

Birlikte  
**20**  
Yıl

TÜRKİYE'DE VE DÜNYADA

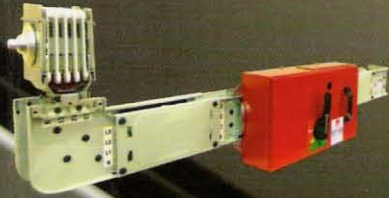
# OTOMASYON

Türkiye'nin Otomasyon Dergisi

NİSAN 2012/04 Sayı: 238 Fiyatı: 6 TL



Endüstrinin  
Zirvesi  
**WIN'de**



- Busbar Kanal Enerji Dağıtım Sistemleri (25A...6300A)
- Trolley Busbar Enerji Dağıtım Sistemleri
- Kablo Kanal ve Askı Sistemleri
- Döşeme Altı Enerji Dağıtım Sistemleri



www.eae.com.tr

**FOKUS** OTOMASYON  
EĞİTİMİ

**DOSYA**  
TEKNOLOJİ  
GELİŞTİRME BÖLGELERİ

**BİLESİM 25.**  
YIL

YAYINLIK, FUARCIK VE  
TANITIM HİZMETLERİ A.Ş.



World of  
Industry  
FAZ II

EURASIA

Otomasyon

EURASIA

29 Mart-1 Nisan 2012 / Büyükdere-İstanbul

# Güç Elektroniği Dönüştürücülerinde Faz Kaydırmalı Modül Paralleleme Yöntemi

İlker Şahin  
silker@metu.edu.tr

Ahmet M. Hava  
hava@metu.edu.tr

Elektrik-Elektronik  
Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Faz kaydırmalı modül paralelleme yöntemi, güç elektroniği dönüştürücülerine sunduğu faydalar ile; yüksek güçlere çıkmak, yüksek güç yoğunluğu elde etmek, çok sıkı elektriksel başarımların sağlanması gibi amaçların gerçekleştirilebilmesi için sıkça uygulanan bir yöntemdir.

## 1. Giriş

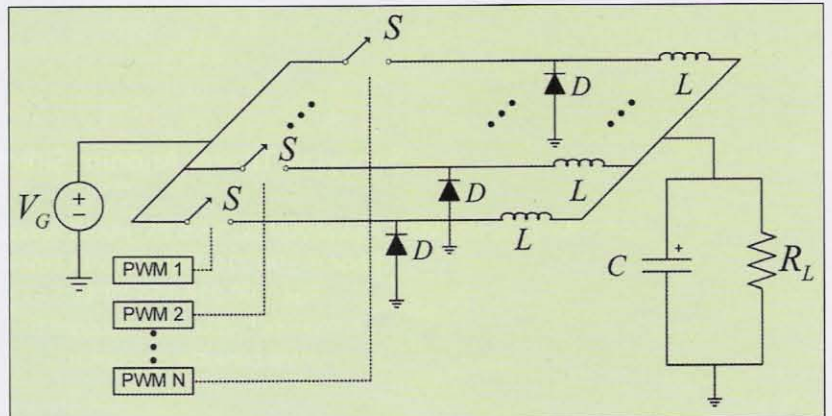
Güç elektroniği, enerji sistemlerinin verimli ve yüksek başarılı işletimi için gerekli olan bir arayüz teknolojisidir. Örneğin; cep telefonu, elektrikli araba, yenilenebilir enerji sistemleri, klimalar, ev elektroniği, sanayi tipi motor sürücüler, robotik gibi uygulamaların tümünde güç elektroniği dönüştürücüleri, enerji kaynağı ile yük arasında enerjinin yüksek verimli ve yüksek başarımlı aktarımında temel yapı taşı olarak yer alır.

Günümüzde yaygınlaşan güç elektroniği teknolojisinin kullanımında sınırlar genişlemekte ve uygulama alanları çoğalmaktadır. Öte yandan dönüştürücülerden beklenen başarımlar ölçütleri de gittikçe sıkılaşmakta, karşılanması güç seviyelere çekilmektedir. Bu noktadan hareketle, yüksek güç seviyelerine çıkma, yüksek güç seviyelerini düşük hacimde gerçekleştirme (güç yoğunluğu), güvenilirlik artırımı, var olan bir ya-

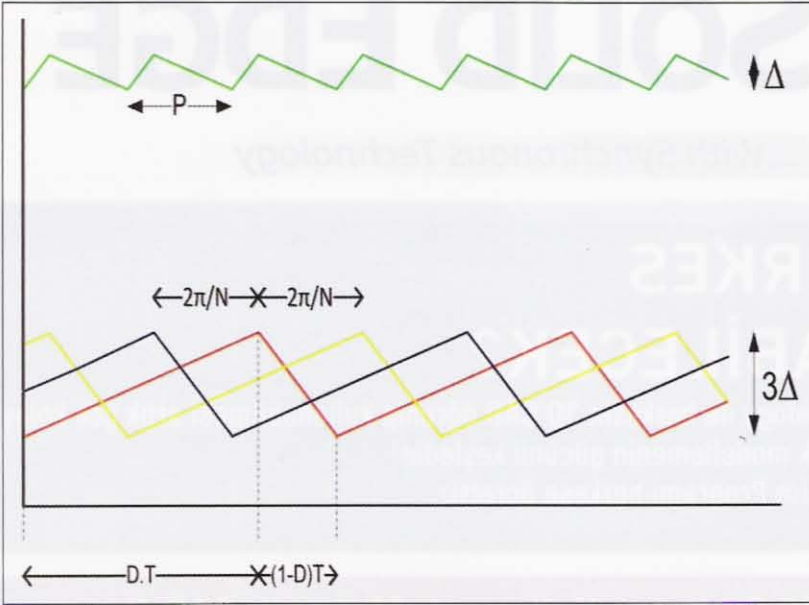
pıda üstün giriş ve çıkış karakteristiği (gürültü azlığı, hızlı dinamik tepki, kırıntı azlığı vb.) gibi hedeflerin gerçekleşmesinde geleneksel yapılar yetersiz kalıp, bu amaçla geliştirilmiş faz kaydırmalı modül paralelleme yöntemi (FKMP) yaygınlaşmaktadır. Yaklaşık 25-30 yıllık geçmişi olan bu yöntem, günümüzde DC-DC uygulamalarında kullanılmakta, AC-DC uygulamalarında örnekleri yayılmakta [1], büyük güçlerde ve evirici uygulamalarında da özel uygulamalar bulmakta ve Ar-Ge çalışmaları yoğunluk sergilemektedir. Bu çalışmada, FKMP yönteminin temelleri gözden geçirilecek, uygulama örnekleri verilip diğer dönüştürücü yapılarına karşı üstünlükleri sergilenmiştir.

## FKMP yöntemi

FKMP yöntemi, bir güç dönüştürücüsünün N adet paralel kata sahip olmasıyla beraber, bütün katların sırayla birbirinden  $2K/N$  derece faz farkıyla sürülmesine (anahtarlanmasına) dayanır.



Şekil 1. Çok fazlı gerilim indirici dönüştürücü yapısı.



Şekil 2. Üç katlı bir indirici dönüştürücünün kat ve toplam çıkış akım dalga şekilleri

FKMP tekniği uygulanmış gerilim indirici (buck) tipi bir dönüştürücünün devre şeması Şekil 1 de gösterilmiştir.

FKMP yöntemini akım dalga şekilleri üzerinden incelemek daha açıklayıcı olacaktır. Üç fazlı, 0.75 çalışma oranında çalışan bir indirici dönüştürücünün faz akımları ve bu faz akımlarının toplamı olan çıkış akımı Şekil 2 de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, çıkış akımındaki kırıntı miktarının faz akımındaki kırıntı şiddetinin üçte biri olduğu ve çıkış akım dalga şeklinin frekansının, faz akım şeklinin frekansının N katı olduğu gözlenebilir. Yani FKMP frekans katlayıcı özellik taşır.

### FKMP Yönteminin Getirileri

FKMP yöntemi, uygulandığı devreye; giriş/çıkış akım kırıntısında azalma, çıkış gerilim kırıntısında azalma, verim artışı, daha hızlı dinamik tepki, daha az elektromanyetik gürültü (EMI) gibi olumlu kazanımlar getirir. Ayrıca, etkin anahtarlama frekansının N katına çıkarılması, modüler yapı sayesinde sistemin yedek fazlar barındırabilmesi, bu sayede güvenilir-

liğin artırılması gibi ikincil faydalar da söz konusudur.

FKMP yöntemi uygulanmış N adet faza sahip olan bir dönüştürücü, paralellenmiş fakat faz kaydırma uygulamayan bir dönüştürücü ve tek fazlı bir dönüştürücü arasında çeşitli başarımlar ölçütleri için karşılaştırması Tablo 1’de gösterilmiştir. Tablo 1’deki karşılaştırma yapılırken, aynı güç seviyesinde çalışacak tek katlı, çok katlı paralel ve çok katlı faz kaydırılmış devre elemanlarının parametrelerinin (R, L, C gibi) aynı olduğu varsayılmıştır. Uygulamada ise genellikle indüktansların akım kapasitesi arttıkça L değerleri düşürülür, eş değer seri dirençleri (ESR) de azalır. Dolayısıyla, tek katlı dönüştürücüde bobinin

	Tek Faz	N Faz Paralel	N Faz FKMP
Giriş Akım Kırıntısı	orta	çok	az
Çıkış Akım Kırıntısı	orta	çok	az
Çıkış Gerilim Kırıntısı	orta	çok	az
Verim	az	orta	çok
Dinamik Başarımlar	kötü	kötü	iyi
EMI	orta	çok	az

Tablo1. Çeşitli başarımlar ölçütlerine göre standart ve paralel yapılar arası karşılaştırma

değeri L (ESR’si de R), N katlıda da her bir bobinin değeri NL (ESR’si de NR) olur. Benzer bir akım kapasitesi-direnç ilişkisi anahtar ve diyotlar için de öne sürülebilir. Çalışmada öncelikle eşit parametreler durumu ele alınacak, ardından da uygulamadaki durum dikkate alınarak değerlendirilmeler yapılacaktır.

FKMP yönteminin dönüştürücü başarımına en temel etkisi giriş/çıkış akım kırıntısında azalmadır. Paralel katların zaman ekseninde kaydırılmış akım dalga şekilleri, topolojiye bağlı olarak giriş veya çıkışta birbirlerini dengeleyerek kırıntısı daha az bir dalga şekline neden olur[2]. Tek katlı indirici tipi bir dönüştürücünün çıkış akımı kırıntısı (1)’deki, FKMP yöntemi uygulanmış, N adet paralel kata sahip bir devrede ise (2)’deki ifadeyle bulunur ve (2)’deki “x” değişkeni bir tamsayı olup (3)’te tanımlanmıştır. Denklemlerde f anahtarlama frekansı, VG kaynak gerilimi, D çalışma oranı ve L bobin indüktansdır.

$$\Delta I_1 = \frac{V_G(1-D)D}{f.L} \quad (1)$$

$$\Delta I_N = \frac{V_G}{f.L.N} (1 - (x - N.D))(x - N.D) \quad (2)$$

$$\frac{x-1}{N} < D < \frac{x}{N} \quad (3)$$

Tablo 1’de karşılaştırılan getirilere örnek vermek bakımından, Şekil 3’te, (1) ve (2) numaralı denklemlerdeki akım kırıntısı ifadeleri kullanılarak, tek fazlı ve çok fazlı FKMP indirici devrelerinin çıkış akım kırıntısı miktarı faz sayısı (N) ve çalışma oranı (D) değerlerine bağlı olarak aynı grafik üzerinden sunulmuştur. Grafik farklı yapıları karşılaştırdığından, akım kırıntı formüllerinde ortak bulunan  $V_G/f.L$  terimi bir birim alınmıştır. İlgili şekilde görüleceği üzere FKMP tekniği her N ve D değeri için, tek fazlı devreye göre

daha düşük akım kırırtısı sunmaktadır. Ayrıca N ve D çarpımının tam sayısı olduğu durumlar için kırırtının tamamen sıfırlandığı gözlenebilir. Yöntemin sunduğu faydanın incelenmesi bakımından, kırırtı miktarı değil fakat çok katlı dönüştürücülerdeki kırırtının, tek katlı eş değerlerine oranı dikkate alınabilir. Çok katlı indirici dönüştürücü yapılarındaki toplam çıkış akımındaki kırırtının tek katlı eş değerdeki kırırtıya oranı Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 3 ve 4'te görüldüğü gibi kat sayısı arttıkça kırırtı miktarı azalır. FKMP yöntemi uygulanmış çok katlı dönüştürücüler ile tek katlı dönüştürücü arasındaki akım kırırtısı karşılaştırması yapılırken, bütün indüktörler "L" değerinde varsayılmıştır. Devrenin indüktörlerinde depoladığı ortalama manyetik enerji, tek katlı devre için (4) te ve çok katlı devre için de (5) te verilmiştir. Yani çok katlı devre, aynı güç değerinde daha iyi akım kırırtısı başarımını daha düşük miktarda (1/N oranında) manyetik enerji depolarken gerçekleştirmektedir. Akım kırırtısı karşılaştırması aynı miktarda manyetik enerji depolayan dönüştürücüler arasında yapılmak istenirse, çok katlı devrenin her katındaki indüktans değeri "N.L" varsayılma-

lıdır ki bu da (2) numaralı denklemden belirtilen ve Şekil 3'te gösterilen çok katlı devredeki kırırtı miktarının "1/N" kadar daha azalmasını sağlar.

$$E_1 = \frac{1}{2}LI^2 \quad (4)$$

$$E_N = N\left(\frac{1}{2}L\left(\frac{I}{N}\right)^2\right) = \frac{1}{2N}LI^2 \quad (5)$$

Çıkış akım kırırtısındaki azalmanın daha düşük çıkış gerilim kırırtısı sağlayacağı açıktır. Yine indirici dönüştürücü üzerinden örnek verilirse, bir indirici dönüştürücüde çıkış gerilim kırırtısı (6)'daki ifadeyle bulunur. FKMP uygulanmış bir devrede akım kırırtısının ( $\Delta I$  terimi) azaldığı ve efektif frekansın (f terimi) N katına çıkarıldığı düşünülürse, FKMP'nin çıkış gerilim kırırtısı üzerindeki olumlu yönde, karesel ilişkiye dayalı etkisi anlaşılır.

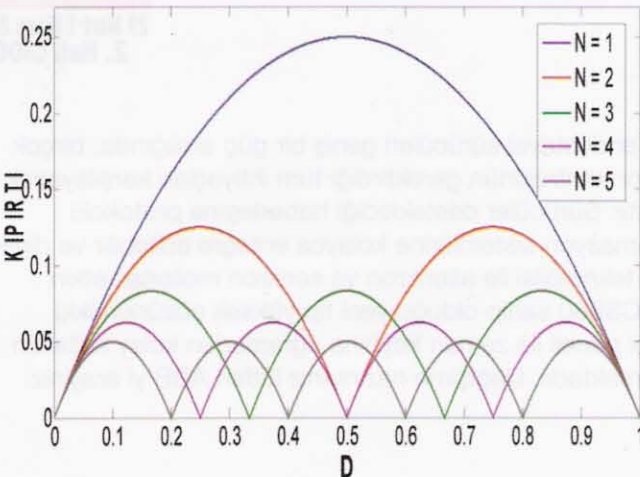
$$\Delta V = \frac{\Delta I}{8fC} \quad (6)$$

Akım ve gerilim kırırtısı azalmasının boyutlandırmaya doğrudan olumlu getirisi vardır. Güç elektroniği dönüştürücülerinde pasif elemanlar (indüktör ve kondansatörler) devrenin akım ve gerilim kırırtılarını istenen bir değer altında tutacak büyüklükte seçilirler. FKMP tekniğinin uygulanma-

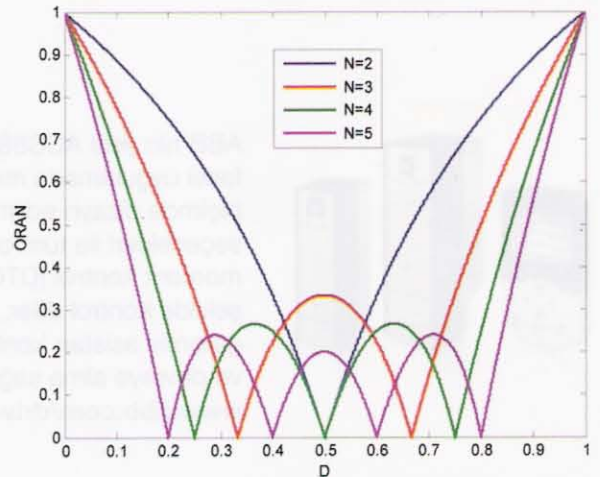
sıyla kırırtı miktarlarında büyük azalma elde edileceğinden aynı başarımla daha düşük L ve C değerleriyle sağlanabilir. Bu durum da devrenin daha küçük bir hacme sığdırılabilmesiyle yüksek bir güç yoğunluğunun elde edilmesini olanaklaştırır[3].

Bir diğer olumlu özellik, dinamik tepkinin iyileştirilmesidir. Modern güç elektroniği dönüştürücülerinde, ani kaynak ve yük değişimlerinin çıkışı bozmaması, yani çıkış normal çalışma değerlerinden sapmaması gerekir. FKMP uygulanmış bir devrede, birbirine paralel katlarda bulunan L değerindeki indüktörlerin toplamda devrenin genel karakterine L/N olarak etki etmesinden ve efektif frekansın N katına çıkmasının kontrol birimine devreyi daha sık zaman aralıklarında kontrol etme olanağı tanımasından dolayı, FKMP yöntemi uygulanmış devreler tek katlı eş değerlerine oranla daha hızlıdır, yani bozucu etkilere karşı düzeltim tepkisi daha hızlıdır[4].

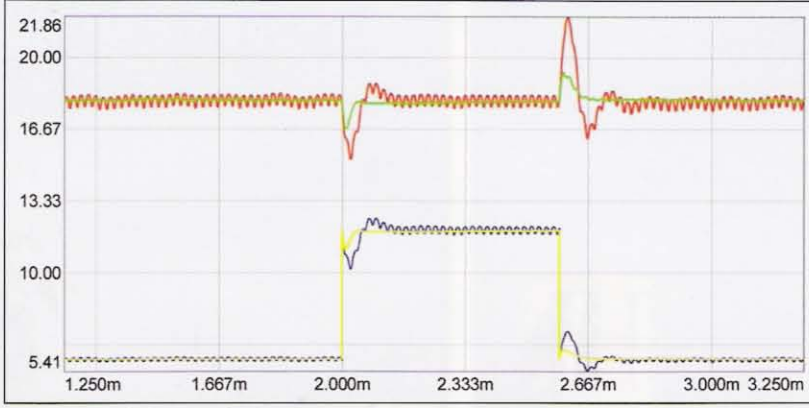
Şekil 5'te 72 V giriş, 18 V çıkış değerlerinde çalışan üç katlı ve tek katlı iki indirici tip dönüştürücünün, yük direncinin aniden 3  $\Omega$ 'dan 1.5  $\Omega$ 'a indiği (yükün 6



Şekil 3. Tek ve çok katlı gerilim indirici devreleri için çıkış akım kırırtı miktarları.



Şekil 4. Çok katlı gerilim indirici devreleri için çıkış akım kırırtı miktarlarının tek katlı devre çıkış akım kırırtısına oranı.



Şekil 5. Tek fazlı ve üç fazlı indirici tip dönüştürücülerin çıkış akım ve gerilimlerinin ani yük değişimine tepkisi(kırmızı: tek katlı dönüştürücü çıkış gerilimi, yeşil: üç katlı dönüştürücü çıkış gerilimi, mavi: tek katlı dönüştürücü çıkış akımı, sarı: çok katlı dönüştürücü çıkış akımı).

A'den 12 A'ye çıktığı) sonra tekrar aniden eski değerine döndüğü bir durumdaki yük akımları ve çıkış gerilimlerinin bilgisayar benzetimi verilmiştir. Karşılaştırması yapılan iki devre için de komponent büyüklükleri ve denetim parametreleri aynıdır. FKMP tekniğinin daha üstün dinamik başarımlar sağladığı söz konusu şekilden görülebilir. Tek katlı devrede, ani yük değişimi çıkış geriliminde çok katlı devreye oranla büyük sapmalara neden olmakla birlikte benzer durum akım değişimi için de geçerlidir. Deneteçte üretilen hata işaretinin, çıkış geriliminin çok saptığı tek katlı devre için, çok katlı eş değere oranla daha büyük olacağı ve bu nedenle yük akımının tırmanışını desteklemek için daha büyük çalışma oranında çalışacağı düşünülebilir. Dolayısıyla, çalışma oranının bir üst sınırla sınırlandırıldığı pratik devrelerde, tek katlı ve çok katlı devreler arasındaki dinamik başarımlar farkının çok katlı devre lehine daha da açılacağı anlaşılabilir.

Şekil 6'da tek katlı ve çok katlı devreler için kaynak regülasyonunun benzetimi sunulmuştur. Benzetimde, normalde 72 V olması gereken giriş gerilimi  $\pm\%20$  değiştirilerek, bunun iki ayrı devre için çıkış gerilimine etkisi göz-

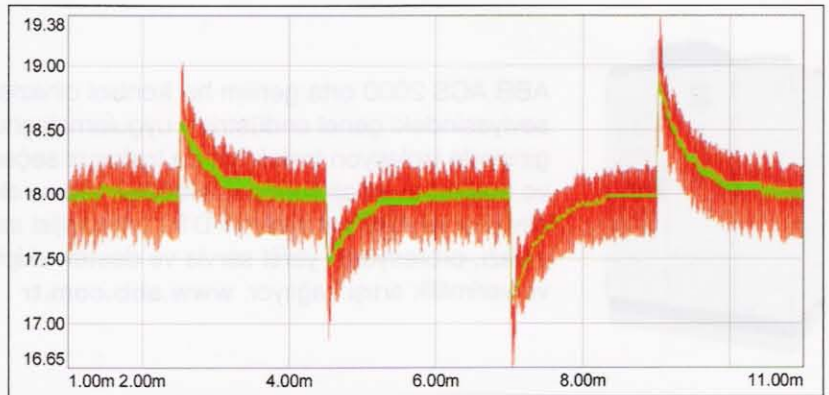
lenmiştir. Burada vurgulanması gereken bir diğer özellik ise, FKMP'de denetim dinamiğinin kat sayısı(N) oranında hızlandırılabilirliği. Yani iç içe gerilim ve akım çevrimleri kapatılıp, akım çevrimleri de FKMP'de faz başına denetlenirse, bu durumda bozucu etkilere dinamik tepki çok daha yüksek olur. Dolayısıyla, Şekil 5 ve 6'daki başarımlar farkı gelişmiş deneteçlerle FKMP yönteminde daha da olumlu seyreder. Şekil 5 ve 6'da verilen akım ve gerilim dalga şekilleri incelendiğinde, dinamik başarımın yanı sıra evvelce sözü edilen, FKMP yönteminin kırırtı bastırma özelliği de gözlenebilir. Benzetimi sunulan üç katlı dönüştürücünün, 72 V giriş ve 18 V çıkış gerilimin-

de dolayısıyla 0.25 çalışma oranında çalışırken tek katlı eş değerine göre akım ve gerilim kırırtısı yönünden üstün olduğu görülebilir. Kırırtı miktarının tek katlı eş değerine oranı Şekil 4'ten bulunabilir. Kırırtının hemen tamamen yok edilmek istendiği bir durumda, aynı dönüştürücünün 4 katlı varyasyonu kullanılabilir. Ancak, maliyet ve karmaşa artar. Bu nedenle kat sayısının seçimi ayrıca bir inceleme gerektirir.

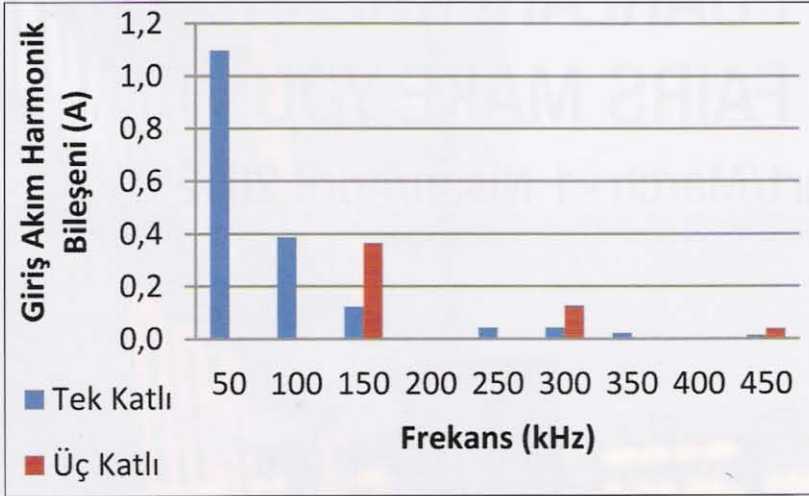
FKMP yönteminin getirilerinden biri de dönüştürücülerin bağlı buldukları güç sisteminden çektikleri harmoniklerinin bastırılmasıdır. Basit bir matematiksel ifade ile açıklamak gerekirse, yükseltici (boost) tipi bir dönüştürücü için giriş akımının Fourier kat sayıları, kendisini oluşturan kat akımlarının Fourier kat sayıları cinsinden şöyle yazılabilir:

$$A_i = \begin{cases} N \cdot a_i & \frac{i}{N} \in Z \\ 0 & \frac{i}{N} \notin Z \end{cases} \quad (7)$$

Tek katlı bir yükseltici dönüştürücünün giriş akımında, "f" anahtarlama frekansı olmak üzere f, 2.f, 3.f... gibi frekanslarda harmonikler görülür. Üstte verilen ifade incelendiğinde, yine f frekansında anahtarlama yapan N katlı bir yükseltici dönüştürücüde ise harmoniklerin N.f, 2.N.f, 3.N.f... de-



Şekil 6. Tek fazlı ve üç fazlı indirici tip dönüştürücülerin çıkış gerilimlerinin ani kaynak değişimine tepkisi (kırmızı: tek katlı dönüştürücü çıkış gerilimi, yeşil: üç katlı dönüştürücü çıkış gerilimi)



Şekil 7. Tek ve çok katlı yükseltici dönüştürücüler için giriş akım harmonikleri.

ğerlerinde belireceği, dolayısıyla  $k.N.f$  ve  $(k+1).N.f$  aralığındaki harmoniklerin tamamen yok edileceği anlaşılabilir. Genelde, yüksek frekanslı akım bileşenlerinin daha kolay süzölebileceği ve çıkış kondansatörü tarafından süzülmesi gereken akım harmoniği miktarının düştüğü düşünülecek olursa FKMP yönteminin sunduğu harmonik bozulmanın azaltılması özelliği daha iyi anlaşılacaktır. Şekil 7’de, 50 kHz’de anahtarlama yapan, FKMP yöntemi uygulanmış 3 katlı 20V giriş 80V çıkış geriliminde çalışan 1.2 kW’lık yükseltici DC-DC dönüştürücünün (kat başına 100  $\mu$ H indüktör, 60 A toplam giriş akımında 0.5 A kırırtı) ve aynı özelliklerde fakat FKMP yöntemi uygulanmamış (tek katlı) bir DC-DC dönüştürücünün giriş akımlarının Fourier analizi verilmiştir. Söz konusu şekilde, FKMP yönteminin harmonik bozulmaya olan olumlu etkisi görülebilir.

FKMP’nin bir diğer üstünlüğü enerji verimliliği ile ilgilidir. Pasif elemanlarda kırırtının az oluşu, bu elemanlarda kayıpları azaltır. Dönüştürücü akımlarının katlar arasında paylaşılmasından dolayı, yarı iletkenlerdeki ısı dağılımı daha dengeli, anahtar başına

akım miktarı daha az, dolayısıyla kayıpları da nispeten daha az olur. Böylece daha az soğutucu malzeme gerekir. Bu durumda zaten bobinlerde depolanan enerjinin daha az ve çıkışta azalan kırırtıdan dolayı çıkış kondansatöründeki kırırtının az olmasından dolayı kondansatör de daha ufak olduğundan, pasif elemanlar da küçülür.

Manyetik bağlı bobin yapıları kullanılarak, manyetik devre boyutları ayrıca azaltılabilir. Toplamda azalan eleman boyutları ve soğutma ihtiyacı, aynı zamanda verime de olumlu yansır. Devrenin kısmi yüklerde aktif kat sayısını azaltarak çalışabilmesi, ayrıca bir verim artışı sağlayabilir, ancak bunun için denetim devresinin donanım ve yazılım yapısının bu amaca uygun olması gerekir. Bu doğrultuda dönüştürücü denetim devresi üreticileri yeni denetim yongaları geliştirmekte ve bu yaklaşımın uygulanması gün geçtikçe daha kolaylaşmaktadır.

#### 4. Sonuç

Güç elektroniği dönüştürücülerinde faz kaydırmalı modül paralelleme yöntemi incelenmiş ve yöntemin uygulanmasıyla elde edilecek getiriler sıralanıp açık-

“ Manyetik bağlı bobin yapıları kullanılarak, manyetik devre boyutları ayrıca azaltılabilir. Toplamda azalan eleman boyutları ve soğutma ihtiyacı, aynı zamanda verime de olumlu yansır. Devrenin kısmi yüklerde aktif kat sayısını azaltarak çalışabilmesi, ayrıca bir verim artışı sağlayabilir, ancak bunun için denetim devresinin donanım ve yazılım yapısının bu amaca uygun olması gerekir. ”

lanmıştır. Bir güç elektroniği devresi tasarımında, uygulamanın gerektirdiği özellikler göz önünde bulundurularak (yüksek güçlere çıkmak, hacim küçültmek, çok hızlı dinamik tepkili bir devre tasarlamak veya şebekeye basılan harmoniğin en aza indirilmesi gibi) FKMP yöntemi istenen özellikleri öne çıkaracak biçimde gerçekleştirilebilir. Yöntem modern güç elektroniği uygulamalarında hızla yaygınlaşmaktadır.

#### Kaynaklar

- [1] M.C. Kaya, A.M. Hava, “Yüksek Güç Katsayılı Serpiştirilmiş Yükseltici GKD AC/DC Dönüştürücü,” EVK 2009, III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 21-22 Mayıs 2009, Kocaeli, sayfa 159-163.
- [2] C. Chang, M.A. Knights, “Interleaving Technique in Distributed Power Systems,” IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, vol. 42, no. 5, May1995, pp.245-251.
- [3] J.A Oliver, P. Zumel, O. García, J. A. Cobos and J. Uceda, “Passive component analysis in interleaved buck converters,”IEEE-APEC Conf., 2004,pp.623-628.
- [4] Y.Y.Law, J.H. Kong, J.C.P. Liu, N.K. Poon, M.H. Pong, “Comparison of three topologies for VRM fast transient application,”IEEE-APEC Conf., 2002, pp.210-215.