



## INVESTIGATION OF INVERTER TOPOLOGIES USED IN MEDIUM FREQUENCY DIRECT CURRENT RESISTANCE SPOT WELDING SYSTEMS

Can Özensoy<sup>1</sup> , Murat Uyar<sup>\*2</sup> 

<sup>1</sup>Siff Elektromekanik San. Tic. Ltd. Şti, Minareliçavuş, Erguvan Cd. No:16, 16140, Nilüfer, Bursa

<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh., 16059, Nilüfer, Bursa

### Abstract

Review paper

Resistance spot welding (RSW) is a metal joining method that is widely used, especially in the automotive industry. Welding technologies are also developing in parallel with the developments in the industry. Traditional alternating current resistance spot welding systems (AC-RSW) are being replaced by new generation medium frequency direct current resistance spot welding (MFDC-RSW) systems. In addition, MFDC-RSW is one of the high energy efficient methods that can work in harmony with robots that have an important role in Industry 4.0. In this study, resistance welding methods, which have an important place in welding technology, are classified and the developments in the new generation MFDC-RSW systems are examined. The advantages and disadvantages of the stated welding method are compared with conventional AC-RSW systems. In addition, the inverter topology of MFDC-RSW systems based on power electronics technology has been examined.

**Keywords:** AC/DC/AC converter, resistance spot welding, h-bridge inverter, medium frequency direct current resistance spot welding.

## ORTA FREKANS DOĞRU AKIM DİRENÇ NOKTA KAYNAK SİSTEMLERİNDE KULLANILAN EVİRİCİ TOPOLOJİLERİNİN İNCELENMESİ

### Özet

Derleme makale

Direnç nokta kaynağı (DNK), özellikle otomotiv sanayisinde yaygın bir şekilde kullanılan bir metal birleştirme yöntemidir. Endüstrideki gelişmelere paralel olarak kaynak teknolojileri de gelişmektedir. Geleneksel alternatif akım direnç nokta kaynak sistemleri (AA-DNK), yerini yeni nesil orta frekans doğru akım direnç nokta kaynak (OFDA-DNK) sistemlerine bırakmaktadır. Ayrıca, OFDA-DNK, Endüstri 4.0 içerisinde önemli role sahip robotlar ile uyumlu bir şekilde çalışabilecek, enerji verimliliği yüksek yöntemlerden biridir. Bu çalışmada kaynak teknolojisinde önemli yere sahip direnç nokta kaynak yöntemleri sınıflandırılarak yeni nesil OFDA-DNK sistemlerindeki gelişmeler incelenmiştir. İfade edilen kaynak yönteminin avantaj ve dezavantajları, geleneksel AA-DNK sistemleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca güç elektroniği teknolojisine dayalı OFDA-DNK sistemlerinin evirici topolojisi incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AA/DA/AA dönüştürücü, direnç nokta kaynağı, h-köprü evirici, orta frekans doğru akım direnç nokta kaynağı.

### 1 Giriş

Direnç kaynağı (DK) yöntemi, otomotiv, beyaz eşya, çelik eşya gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılan, düşük maliyetli ve kolay kullanılabilen bir metal birleştirme teknolojisidir. DK uygulamalarında, kaynatılmak istenen yüzeyleri temas edecek şekilde, iki metal üst üste yerleştirilir. Metallerin üzerine önce basınç, ardından elektrik akımı uygulanır. Metal parçaların uygulanan kaynak akımının akışına karşı gösterdiği direnç sonucunda bir ısı enerjisi oluşur. Ortaya çıkan ısı, iki metalin birleşmesini sağlar. Kaynak akımı, kaynak zamanı ve kaynak kuvveti, tüm bu sıralı süreçlerde kontrol

edilecek üç temel değişkendir. Ayrıca yoğun kullanımda elektrotların kapalı sistem su ile soğutulması gerektiğinden, soğutma suyu sıcaklığı da önemlidir. Elektrot malzemesi, elektrot uç tasarımı da önemli değişkenlerdir. Bu noktada uygulama türü ve iş parçasının gereksinimlerine göre DK işlemleri, direnç nokta kaynağı (DNK), direnç dikiş kaynağı (DDK), direnç projeksiyon kaynağı (DPK) ve direnç alın kaynağı (DAK) olarak bölümlere ayrılır [1].

DNK, en çok tercih edilen direnç kaynak yöntemlerinden biridir. Verimlilik, kullanım kolaylığı, maliyet konularındaki avantajlarının, bu yöntemin yaygınlaşmasında önemli etkisi vardır [2]. Kalifiye

\* Corresponding author.

E-mail address: muratuyar@uludag.edu.tr (M. Uyar)

Received 03 November 2021; Received in revised form 11 December 2021; Accepted 15 December 2021

2587-1943 | © 2021 IJIEA. All rights reserved.

Doi: <https://doi.org/10.46460/ijiea.1018184>

operatör gereksinimi düşüktür, verilmesi gereken eğitim basittir. Operasyon süresinde yüksek hızlara çıkılabilmesi ve uygulama sürecinin otomatikleştirilebilmesi gibi nedenlerle seri üretimde çok kullanılır [3]. Kaynak sistemlerinin verimliliğinin artırılması için sürekli bir iyileştirme çabası harcanmaktadır. Bu süreçte DNK, alternatif akım (AA) ve orta frekanslı doğru akım (OFDA) olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmıştır. AA cihazları yirminci yüzyılda yoğun olarak tercih edilmiş olsa da günümüzde OFDA cihazlarına eğilim artmaktadır. Her iki sistem de AA güç kaynağı ile beslenmesine rağmen dönüştürücü ve kontrol yapıları farklıdır [4-5].

AA-DNK sistemlerinde, tek fazlı AA kaynaktan beslenen dönüştürücüden, kontrol edilebilir akım elde edilir. Dönüştürücü devresi ters paralel bağlı tristörlerden oluşur. Elde edilen akım, kaynak transformatörünün primerine uygulanır. Sekonderde, transformatörün dönüşüm oranında kontrol edilebilir kaynak akımı meydana gelir. Kaynak akımı ile şebeke geriliminin frekansı eşittir. OFDA teknolojisi ise güç elektroniği eviricilerine dayanır. OFDA-DNK sistemlerinde dönüştürücü, üç fazlı AA gerilim ile beslenir. Dönüştürücü devresinde AA/DA/AA topolojisi kullanılır. Şebeke gerilimi, giriş doğrultucusunda doğrultularak eviriciye uygulanır. Eviricinin çıkışında, 1000 Hz frekanslı kontrol edilebilir bir gerilim elde edilir. Orta frekanslı (OF) bu gerilim, OF kaynak transformatörünün primerine iletilir. Sekonderde, dönüşüm oranında kaynak akımı elde edilir ve akım tekrar tam dalga doğrultucuda doğrultulur. OFDA-DNK yapısı, AA-DNK yapısından daha karmaşıktır. Çünkü sistemin besleme gerilimine göre daha yüksek frekanslı çıkış üretmesi, manyetik doyunluk ve kaynak akımında istenmeyen artış gibi sorunlara neden olabilir [4, 6]. Sistemin kontrol frekansı yüksektir ve kaynak transformatörü simetrik beslenemediğinde, transformatörde manyetik doyunluk oluşur. Manyetik doyunluk, kaynak akımının yükselmesine sebep olur. Sistem önlem olarak korumaya geçebilir ve kapanabilir. Sistemdeki bu tür problemler önlenmelidir [7].

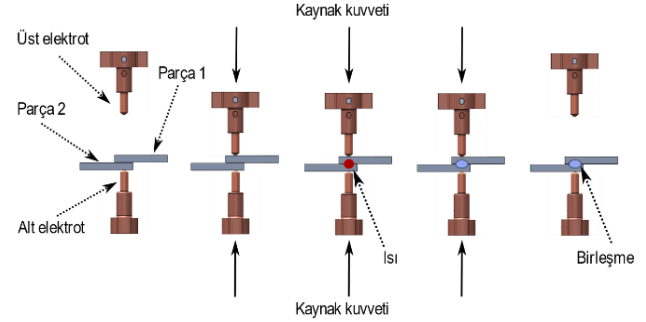
Bu makalede, bir DK yöntemi olan OFDA-DNK sistemlerinin elektriksel yapısı ve evirici topolojisi ayrıntılı bir şekilde incelenmemiştir. Sistem içerisinde yer alan dönüştürücü bloklarının görevleri ve bileşenlerin seçiminde kullanılan matematiksel modeller ortaya konmuştur. Bununla birlikte, geleneksel yöntemlere göre, OFDA-DNK sistemin sunduğu üstünlükler karşılaştırmalı bir şekilde tartışılmıştır.

## 2 Direnç Kaynağı

DK, iş parçalarına uygulanan basınç ve elektrik akımına karşı, parçaların gösterdiği direnç sonucu oluşan ısı ile birleşmenin sağlandığı kaynak işlemleri olarak tarif edilebilir. Başlangıçta, DK sisteminde bulunan elektrotlar birbirine doğru hareket ettirilerek, parçaları bir kaynak kuvvetiyle sıkıştırır. Kaynak kuvvetinin uygulanması sırasında parçaların üzerinden kaynak akımı akıtılır. Uygulanan akım sonlandırıldığında ise kaynak kuvveti kaldırılır ve elektrotlar açılır [8]. Şekil 1’de DK işlemleri sıralı olarak verilmiştir.

Kaynak kuvveti, elektrotlara çoğunlukla pnömatik silindirler veya servo mekanizmalarla iletilir. DK işleminde iş parçası olarak iki veya daha fazla metal

seçilebilir. Elektrotlar üzerinden metal parçalara akıtılan elektrik akımı ise sisteme harici olarak enerji sağlayan bir elektriksel yapı tarafından oluşturulur. Elektrik akımı, parçaların ve temas yüzeylerinin üzerinden akarken, kaynak bölgesinde Joule yasası gereği ısı oluşur [7]. Joule yasasına göre, açığa çıkan ısı enerjisi (1) nolu denklemde gösterilmiştir.



Şekil 1. Direnç kaynağı işlem adımları

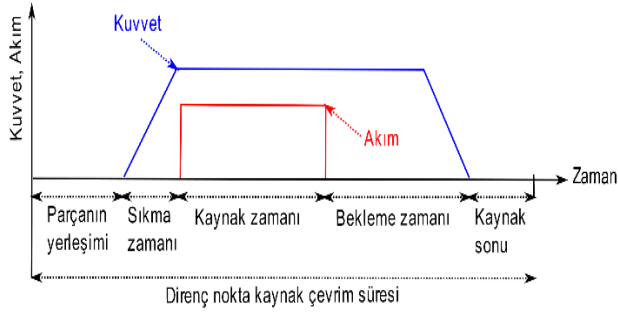
$$E = \int_{T_1}^{T_2} I^2(t)R(t)dt \quad (1)$$

Burada  $T_1$ ,  $T_2$  sırasıyla kaynağın başlangıç ve bitiş süresini,  $I$  kaynak akımını,  $R$  kaynak bölgesindeki direnci temsil eder. Açığa çıkan ısı sonucu parçalarda eriyen bölgeler, uygulanan basınç ile birbiriyle bütünüleşir. Basıncın uygulanma süresi, kaynak zamanı ve kaynak sonrası bekleme zamanı olarak iki bölüme ayrılır. Kaynak zamanında basıncın uygulanması ile kaynak akımının geçişi sağlanır. Bu süre, parçaların DK gereksinimlerine uygun seçilmelidir. Kaynak zamanı çok uzun olursa, parça yanar, çok kısa olursa, parçalar arasında yeterli birleşme sağlanamaz. Kaynak sonrası bekleme zamanı, kaynak tamamlanıp akım akışı kesildikten sonra, bir süre daha parçalar üzerine basıncın uygulandığı süredir. Bu sürede, parçalar sıkıştırılarak soğur ve katılaşır. Dolayısıyla, DK uygulamalarının temelini, ısı, basınç ve sıkıştırma süresi parametrelerinin oluşturduğu söylenebilir.

Kaynaklı bağlantılarda, mukavemet ve performans hedeflerini karşılayabilmek için, DK yöntemleri bazı alt bölümlere ayrılarak özelleştirilmiştir. Bu alt bölümler, direnç dikiş kaynağı (DDK), direnç alım kaynağı (DAK), direnç projeksiyon (DPK) ve DNK olarak sınıflandırılabilir. Ancak seri imalat sürecinde en çok tercih edilen DNK yöntemleridir.

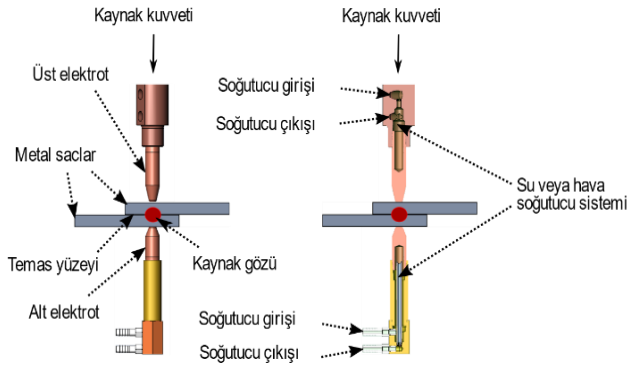
### 2.1 Direnç Nokta Kaynağı

Endüstride bir otomobil veya panel radyatör binlerce nokta kaynağından oluşur. DNK, otomatikleştirilebilir, pratik yapısı sayesinde, bu tür metal plakalardan oluşan ürünlerin eklemelerini birleştiren seri üretim tesisleri için temel yöntem olarak karşımıza çıkar [9]. DNK, düşük gerilimli yüksek elektrik akımı kullanır. Genellikle bindirme bağlantıları için uygulanır. Sac levhaların kaynatılacak temas yüzeyleri elektrotların yüzeyleri arasında merkezlenerek yerleştirilir ve süreç başlatılır. DNK çevrimi için örnek bir grafik Şekil 2’de verilmiştir [3]. DNK uygulanacak parçalarda DPK’daki gibi projeksiyon kabarcıkları bulunmaz. Ancak uygulama adımları DPK ile benzer şekilde ilerler.



Şekil 2. Nokta kaynak çevriminde kuvvet ve akım ilişkisine bir örnek

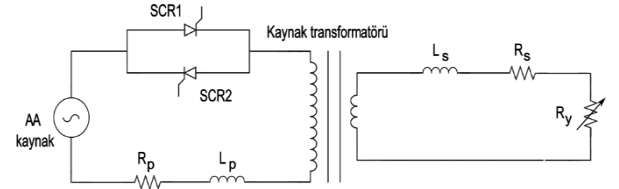
İş parçaları yerleştirildiğinde, kaynak kuvveti uygulanarak elektrotlar arasında sıkıştırılır. Sisteme enerji sağlayan elektriksel yapı tarafından üretilen kaynak akımı, parçaların üzerinden akıtılır. Temas yüzeyinde oluşan direnç sonucu, Joule yasası doğrultusunda ısı üretilir. Isı üreyen bölge eriyerek nokta benzeri bir bölgede birleşme sağlanır. Bu birleşme bölgesi, kaynak gözü olarak da adlandırılır. Kaynak tamamlandığında, ihtiyaç duyuluyorsa, parçalar bir süre daha baskı altında bekletilir. Son olarak, kaynak kuvveti kaldırılarak elektrotlar açılır. Açılma sırasında parçaların elektrotlara yapışmasını önlemek ve elektrotların daha hızlı soğumasını sağlamak için, Şekil 3'de örneği verilen su veya hava soğutmalı elektrotlar kullanılır.



Şekil 3. Direnç nokta kaynağı uygulama şeması

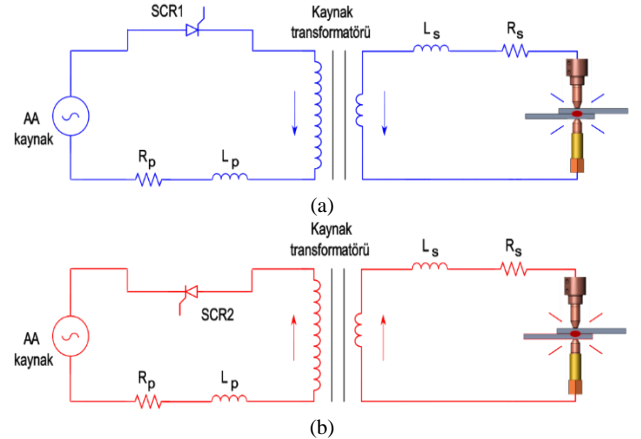
DNK elektrotlarında malzeme olarak, yüksek elektrik iletkenliği nedeniyle, bakır alaşımlar veya bakır ve tungsten bazlı metaller seçilir. Elektrotların ucu düz veya kubbe şeklinde olabilir. Uç kısımdaki bu farklılık, elektrotlar ve parça arasındaki temas yüzeyini etkileyerek akım yoğunluğunu ve üretilen ısı miktarını değiştirir. Yoğun ısı ve basınç gerektiren ağır hizmet koşullarında ucu kubbe tipi elektrotlar seçilir [3, 10]. DNK sistemlerinde, kaynak akımının üretimi için farklı yöntemler kullanan çeşitli elektriksel yapılar oluşturulmuştur. Bu yapılardan ikisi, AA ve OFDA güç kaynaklarıdır [7]. DNK sistemleri, kullanılan güç kaynağına göre AA-DNK ve OFDA-DNK olarak iki gruba ayrılır.

AA-DNK sistemlerinde kaynak akımını kontrol eden güç kaynağı, ters paralel bağlı iki adet tristörden oluşur. Sisteme tek fazlı sinüzoidal şebeke gerilimi uygulanır. Sistem ayrıca bir kaynak transformatorü ve bir kaynak yükü içerir. Şekil 4'de bir AA-DNK sisteminin elektriksel yapısı verilmiştir.



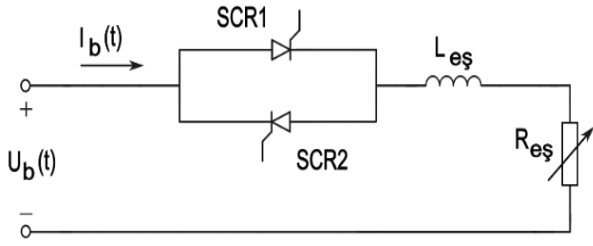
Şekil 4. AA direnç nokta kaynağının elektriksel yapısı

Devrede, kaynak transformatorünün primer ve sekonder bobininin eşdeğer dirençleri ( $R_p$ ,  $R_s$ ) ve endüktif reaktansları ( $L_p$ ,  $L_s$ ) kaynak akımını etkiler. Devrede bulunan tristör, bir ateşleme frekansında tetiklenerek, kontrollü bir kaynak çevrimi başlatır. Ateşleme frekansı, AA şebeke geriliminin frekansının iki katıdır. Bunun nedeni, tristörlerin, şebeke geriliminin pozitif yarı periyodunda ve negatif yarı periyodunda bir ateşleme açısında tetiklenmesidir. Bir diğer deyişle, Şekil 5 (a)'da gösterildiği gibi şebeke geriliminin pozitif alternansında bir tristör, Şekil 5 (b)'deki gibi negatif alternansında diğer tristör iletime geçirilir. Yapılan bu kontroldeki amaç, tristörlerin iletime geçtiği ateşleme açısını ayarlamaktır. Üretilen kontrollü gerilim, bir kaynak transformatorünün primer bobini ile etkileşime geçer. Kaynak transformatorü bir düşürücü transformatorüdür. Uygulanan yüksek gerilim ve düşük akımı, düşük gerilim ve yüksek akıma dönüştürür. Kaynak transformatorünün dönüştürme oranı doğrultusunda sekonder bobinde kaynak akımı elde edilir. Elde edilen kaynak akımı, DNK elektrotlarına gönderilerek parça üzerinden akım akışı sağlanır. Yük direncinin ( $R_y$ ), kaynak akımına gösterdiği direnç sonucunda, parçalar ısı üretir ve AA-DNK oluşur.



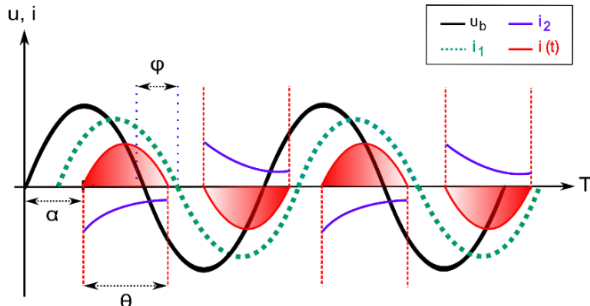
Şekil 5. AA-DNK sisteminde, a) pozitif alternans iletimi, b) negatif alternans iletimi

AA-DNK sistemlerinde hedeflenen kaynak akımının uygulanabilmesi, kapalı çevrim bir kontrolü gerektirir. Ancak sistem doğrusal olmayan ve zamanla değişen bir sistemdir. Sabit akım kontrolünün sağlanabilmesi ve tristörlerin hangi ateşleme açısında tetiklenmesi gerektiğinin belirlenebilmesi için literatürde çalışmalar yapılmıştır [10]. Bu çalışmalarda, kaynak transformatorünü devre dışı bırakan ve sekonder bobinindeki bileşenleri primer bobinine aktaran eşdeğer bir devre modeli kullanılmıştır [11]. Şekil 6'da verilen eşdeğer devre modelinde, şebeke geriliminin ve akımının etkin değeri ( $U_b$ ,  $I_b$ ), devrenin eşdeğer endüktansı ( $L_{eş}$ ) üzerinden, eşdeğer dirence ( $R_{eş}$ ) uygulanmıştır.



Şekil 6. AA-DNK sisteminin eşdeğer devresi

Tristörler iletme geçtiğinde, akımın şebeke geriliminin fazına göre sistemin faz farkı ( $\varphi$ ) kadar gecikmeyle akacağıni değerlendiren çalışmalar, kaynak akımını iki farklı bileşen olarak incelemiştir. Buna göre, akımın birinci bileşeninin ( $i_1$ ), tristör iletim yönünde sinüzoidal formda bir bileşen, ikinci bileşen ( $i_2$ ) ise iletim yönüne ters yönde, üstel formda bir bileşen olduğu ifade edilmiştir. Kaynak sırasında, sistemde paralel ve ters bağlı tristörler, şebeke geriliminin uygun alternansında, sıralı olarak bir ateşleme açısında ( $\alpha$ ) tetiklenir.  $\alpha$ , kaynak akımının miktarını ayarlayan açıdır. Tetiklenen açıda tristör iletime geçer. İletilen gerilimden  $\varphi$  kadar gecikmeyle, tristörde akım akışı başlar. İletim yönünde aktarılan  $i_1$ , ters yöndeki  $i_2$  tarafından düşürülür. İki bileşenin etkisinde oluşan akım, kaynak işleminin etkili olduğu süreyi belirten bir iletim açısı ( $\theta$ ) kadar sürede iletilir. Uygulanan gerilimin sıfır geçişinde tristör kesime gider. Kesime gidildiğinde, yine  $\varphi$  açısı kadar gecikmeyle kaynak akımı kesilir. AA-DNK sistemlerinde kaynak akımı üretiminin dalga formları Şekil 7'de verilmiştir [10].



Şekil 7. AA-DNK sisteminde akım dalga formları

AA-DNK sistemleri basit yapıda ve düşük maliyetli olmasına rağmen, çalışma frekansının şebeke frekansında olması kaynak akımının tepe değerlerini önemli derecede büyötmektedir. Bu durum, akımın etkin değeri açısından kaynak sırasında önemli ölçüde dalgalanmalara neden olur [5]. Günümüzde ise kaynak akımında daha hassas değerlerin hedeflenmesi, kaynak verimliliğinin artırılması, güç kayıplarının azaltılması gibi talepler söz konusudur. AA-DNK sistemlerinin bu talepleri karşılayamaması sonucunda OFDA-DNK sistemleri yaygınlaşmıştır [4].

### 3 OFDA-DNK Sistemi

OFDA-DNK sistemleri, üç faz besleme gerilimine AA/DA dönüşümü yapan bir giriş doğrultucusu, DA gerilimde bulunan yüksek frekans bileşenlerini sönmöleyebilen bir filtre devresi, doğrultulan DA gerilim

için besleme geriliminden daha yüksek frekansta DA/AA dönüşümü yapan bir dönüştürücü ve çıkışında tam dalga doğrultucuya sahip bir OFDA kaynak transformatöründen oluşur. Sistem tarafından üretilen, bir DA seviyenin üzerine bindirilen 2000 Hz frekanslı dalgalanmalar içeren kaynak akımı, DNK yüküne uygulanır. Şekil 8'de temsili bir OFDA-DNK sisteminin blok şeması gösterilmiştir [13].

Sistemdeki giriş doğrultucusu, uygulanan AA şebeke geriliminin üç fazını ( $u_R, u_S, u_T$ ), DA bara gerilimine ( $U_{DA}$ ) dönüştürür. Doğrultulan gerilim, bir filtre devresi ile iyileştirilebilir.  $U_{DA}$ , DA/AA dönüştürücüye iletilir. Burada dönüştürücü, 4 adet IGBT yarı iletken güç anahtarı ve karşılığında 4 adet ters paralel diyot bulunan bir H-köprü evricisidir. Evricide, IGBT güç anahtarlarının darbe genişlik modülasyonu (DGM) yöntemiyle ikili gruplar halinde açılıp kapanmasının sonucunda,  $U_{DA}$ , 1000 Hz frekanslı kare dalga formuna çevrilir. Üretilen çıkış gerilimi ( $U_{OF}$ ), kaynak transformatörünün giriş gerilimi olarak primer bobinine iletilir. Kaynak transformatörü, bir düşürücü transformatördür. Düşük akımlı yüksek gerilimi, dönüştürme oranında, düşük gerilimli yüksek akıma çevirir. Sekonder bölümünde üretilen OF, kare dalga formundaki yüksek akım, transformatörün iki sekonder bobinine bağlı, iki diyottan ( $D_5, D_6$ ) oluşan tam dalga doğrultucuda doğrultulur. Doğrultucu çıkışında OFDA kaynak akımı üretilir [14]. Şekil 9'da bir OFDA-DNK sisteminin basit eşdeğer devresi verilmiştir [14-15].

Kaynak yükünün endüktansı ( $L_y$ ) ve  $R_y$  üzerinden akan  $i$ 'ye karşı üretilen ısı sonucunda OFDA-DNK elde edilir. Eşdeğer devredeki değişkenlerle birlikte, manyetik alan şiddeti ( $H$ ), vakum geçirgenliği ( $\mu_0$ ), transformatörün manyetik histerezis kaybı ( $i_h$ ), transformatör demir çekirdeğinin kesit alanı ( $S_d$ ), manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ), manyetik akı hattının ortalama uzunluğu ( $l_{ort}$ ) ve hava boşluğu ( $\delta$ ) değerleri de kullanılarak oluşturulan dört denklem ile sistem matematiksel olarak tanımlanmıştır [15].

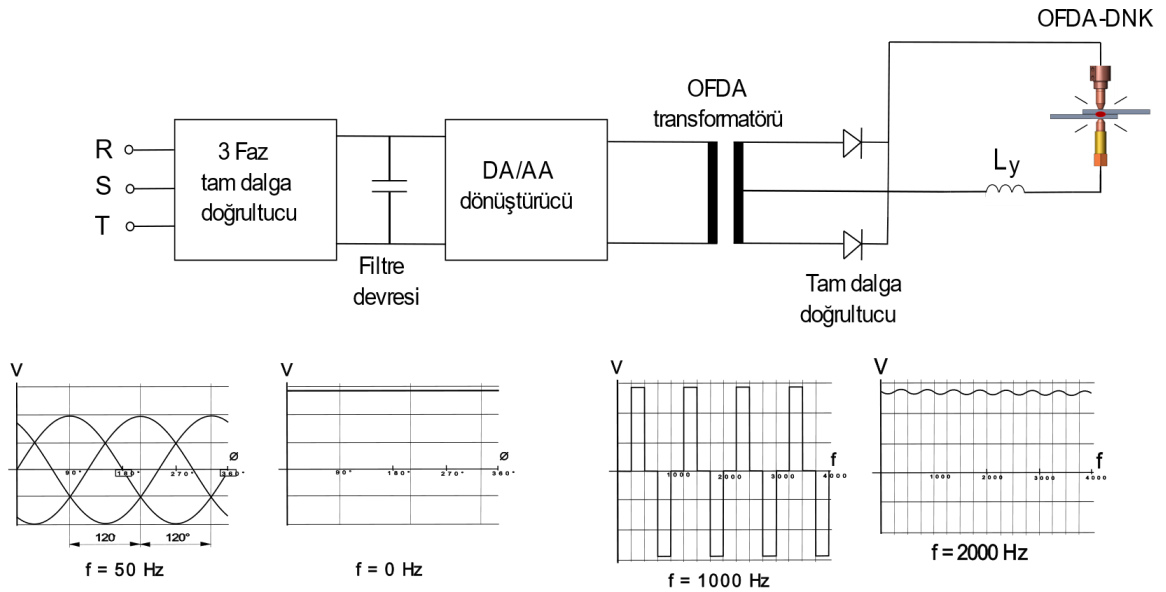
$$u = i_{N1}R_1 + L_{k1} \frac{di_{N1}}{dt} + N_1S_d \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

$$N_2S_d \frac{dB}{dt} = -i_{N2}R_2 - L_{k2} \frac{di_{N2}}{dt} - u_{D5}(i_{N2}) - iR_y - L_y \frac{di}{dt} \quad (3)$$

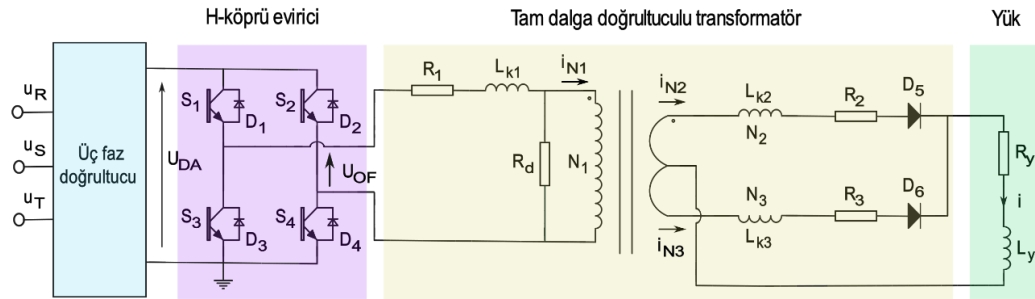
$$N_3S_d \frac{dB}{dt} = i_{N3}R_3 - L_{k3} \frac{di_{N3}}{dt} + u_{D6}(i_{N3}) + iR_y + L_y \frac{di}{dt} \quad (4)$$

$$N_1i_{N1} + N_2i_{N2} - N_3i_{N3} = H(B)l_{ort} + \frac{B}{\mu_0} 2\delta + \frac{N_1^2S_d}{R_d} \frac{dB}{dt} + i_h \quad (5)$$

Sistemde, kaynak transformatörünün primer ve sekonder bölümlerinin manyetik alan dengesi, (5) nolu denklem ile tanımlanır. Kaynak akımı, kaynak transformatörünün demir çekirdek kayıpları ( $R_d$ ), primer ve sekonder bobininin sarım sayıları ( $N_1, N_2, N_3$ ), kaçak endüktansları ( $L_{k1}, L_{k2}, L_{k3}$ ), dirençleri ( $R_1, R_2, R_3$ ) ve bobinlerine karşılık gelen akımlar ( $i_{N1}, i_{N2}, i_{N3}$ ) tarafından etkilenir. Öte yandan, kaynak transformatörünün neredeyse aynı yapıdaki iki sekonder bobinine karşılık gelen (3) ve (4) denklemleri için benzerlik söz konusudur. Bu iki denklemden,  $i$ , sekonder bobinlerinden akan akımların toplamı olarak belirlenir [15].



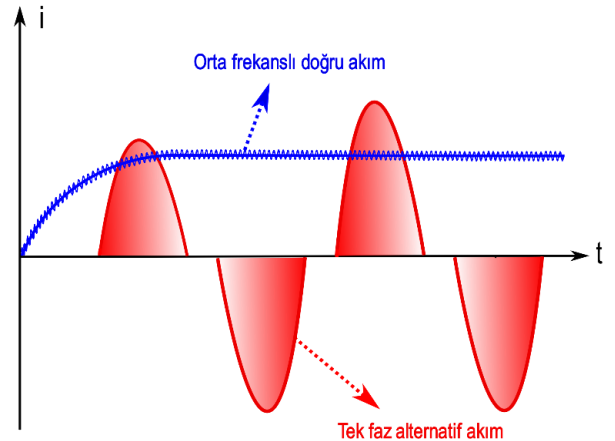
Şekil 8. OFDA-DNK sisteminin blok şeması



Şekil 9. OFDA-DNK sisteminin elektrikselsel yapısı

AA-DNK ve OFDA-DNK çalışmalarında, uygulanan akımın etkin değeri dikkate alınır. Kaynak sırasında akımın etkin değeri ile tepe değerleri arasındaki farkın artması, elektrotlarda ve iş parçasında kaynak problemlerine neden olabilir. AA-DNK sistemlerinde kaynak akımının frekansı, şebeke frekansına eşittir ve akım sadece şebeke geriliminin yarım periyotlarında ayarlanabilir. Kaynak akımı, transformatorün doyuma gitmemesi şartıyla, yaklaşık 10 ms'lik zaman dilimlerinde güncellenir. Frekansın düşük olması sonucunda, tepe değerleri ile etkin değeri arasındaki fark oldukça yüksektir. OFDA-DNK sistemi, şebekenin üç fazından dengeli akım çeker. Giriş doğrultucusunun ardından kullanılan filtre kondansatörleri, gerilim dalgalanmalarını sönümler. Sistemin frekansı 1000 Hz olduğunda, hem daha küçük boyutlu kaynak transformatorü kullanılabilir hem de kaynak akımında daha hızlı ayar yapılabilir. Bu faktörler, akımın tepe değerlerini düşürür. OFDA-DNK akımının tepe değeri ile etkin değeri arasında önemli bir fark yoktur. AA-DNK ve OFDA-DNK akım dalga formları, Şekil 10'da karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur [16].

Standart olarak OFDA-DNK sistemleri üç fazlı AA hat gerilimiyle beslenir. Hat gerilimi giriş doğrultucusuna iletilir. Doğrultucuda üretilen DA bara geriliminin üzerindeki dalgalanmalar bir filtre devresinde giderilir ve eviricinin H-köprüsüne gönderilir. Sisteme uygulanan üç fazlı AA gerilimi DA gerilime dönüştüren giriş doğrultucusu, bir üç fazlı köprü doğrultucusudur.



Şekil 10. AA ve OFDA direnç nokta kaynak akımlarının dalga formları

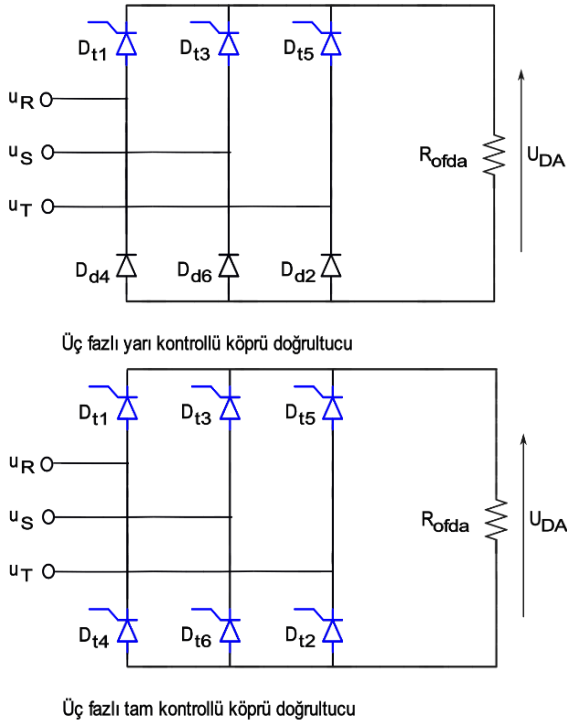
### 3.1 Üç Fazlı Köprü Doğrultucu

Üç fazlı köprü doğrultucular, üç fazlı tam dalga doğrultma işleminde kullanılır. Kontrollsüz, yarı kontrollü ve tam kontrollü olmak üzere üç gruba ayrılır [17].

Üç fazlı kontrollsüz köprü doğrultucular, diyotlu doğrultuculardır. Dışarıdan herhangi bir kontrol komutu uygulanmaz. İkili olarak seri bağlanmış üç diyot grubunun paralel bağlantısından oluşur. Bu üç diyot grubunun seri bağlantı noktalarına, karşılık gelen AA faz gerilimleri uygulanır.

Üç fazlı yarı kontrollü doğrultucular, tristör ve diyot karışımı bir yapıdan oluşur. Üç fazlı tam kontrollü

doğrultucular ise tamamen tristörlerden oluşur. Her iki doğrultucu grubunda da tetikleme açısı kontrol edilerek DA gerilim ve akım ayarlanabilir. Şekil 11’de üç fazlı yarı kontrollü ve tam kontrollü köprü doğrultucu devreleri verilmiştir.

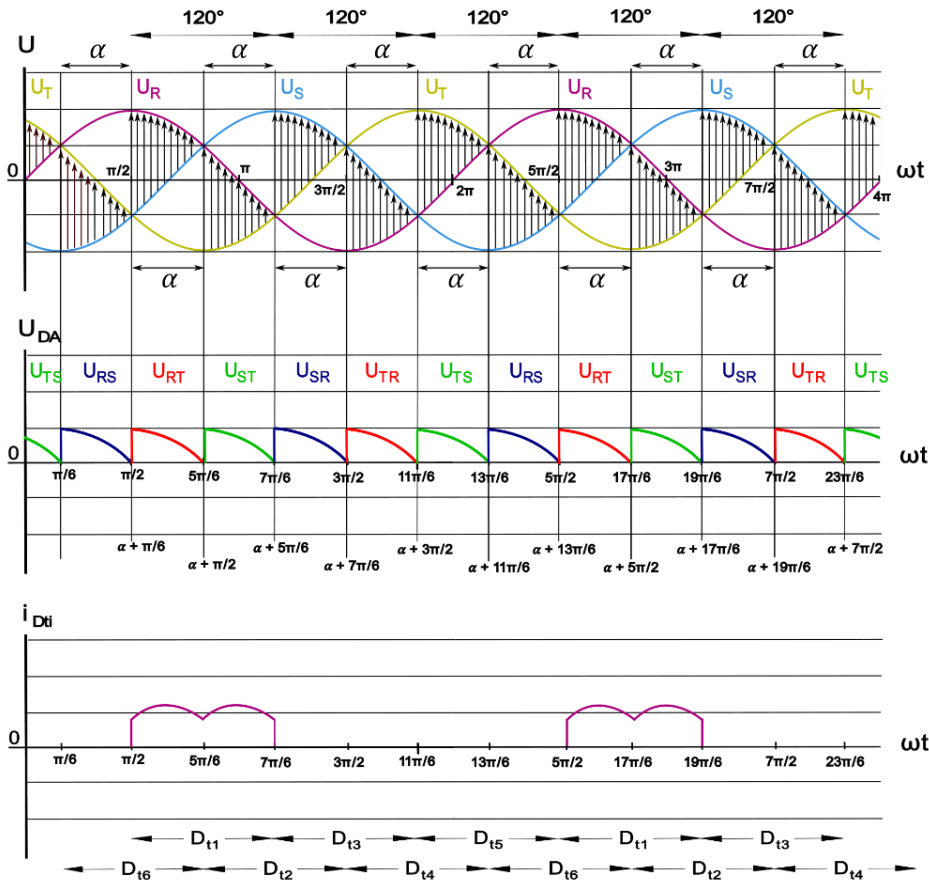


Şekil 11. Üç fazlı yarı kontrollü ve tam kontrollü köprü doğrultucu devreleri

Üç fazlı yarı kontrollü doğrultucular, üç tristör ve üç diyottan oluşur. Pozitif DA gerilim ve akım üretir. Rejeneratif dönüştürücü değildir. Uygulanan üç faz geriliminin sıfır geçişleri takip edilerek, pozitif yarı periyotlarda, tristörler uygun bir  $\alpha$  değerinde sırayla tetiklenir. Tetikleme işlemi her  $2\pi/3$ 'te bir tekrarlanır. Negatif yarı periyotlar, tetikleme kontrolü olmadan, diyotlar üzerinden iletilir [18]. Üç fazlı yarı kontrollü doğrultucular, çift yönlü dönüştürücü kullanımının gerekli olmadığı uygulamalarda, dönüştürücü devresini ve kontrolünü sadeleştirmek için kullanılır.

Üç fazlı kontrolsüz köprü doğrultucular, diyotlardan oluştuğundan, gerilim veya akım kontrol edilemez. Doğrultucuya dışarıdan bir kontrol sinyali uygulanamaz. Gerilimi veya akımı kontrol edebilmek için, diyotların yerine tristör gibi anahtarlama yapılabilen, kontrol edilebilen cihazların kullanılması gerekir. Tristör, uygun  $\alpha$  değerinde tetiklenerek, çıkış gerilimini ve akımını kontrol edebilir [19].

Üç fazlı tam kontrollü köprü doğrultucular, altı adet tristörden oluşur. Rejeneratif dönüştürücüdür, her iki yönde güç akışı sağlayabilir. Üç fazlı yarı kontrollü köprü doğrultuculardan daha az filtreleme gereksinimi vardır. Uygulanan üç faz geriliminin sıfır geçişleri takip edilerek, pozitif yarı periyotlarda anot ucu en pozitif, negatif yarı periyotlarda katot ucu en negatif gerilime sahip olan tristör, uygun bir  $\alpha$  değerinde tetiklenir. Tristörleri tetikleme işlemi, numaralandırma sırasıyla her  $2\pi/3$ 'te bir tekrarlanır [18]. Şekil 12’de üç fazlı tam kontrollü köprü doğrultucunun gerilim ve akım grafikleri verilmiştir [17-18].



Şekil 12. Üç fazlı tam kontrollü köprü doğrultucuda gerilim ve akım ilişkisi

Şekil 12’de görüldüğü gibi,  $D_{t1}$ ,  $\pi/6 + \alpha$  ile  $5\pi/6 + \alpha$  aralığında iletimdedir. İletime geçtiği anın  $\pi/6$ ’lık zaman dilimi sonrasında  $D_{t2}$ ,  $\pi/2 + \alpha$  ile  $7\pi/6 + \alpha$  aralığında iletime geçer. Sürecin tamamı değerlendirildiğinde, iletim süreçleri bu sırayla devam eder. Tetikleme  $60^\circ$  ve sonrasında yapılırsa,  $U_{DA}$  grafiğinde sıfıra düşmeler ve süreksizlikler başlar. Bu durumda, tam kontrollü köprü doğrultucunun çıkışında endüktif yük bağlıysa,  $U_{DA}$  grafiğinin işareti değişir. Bu durumda doğrultucu artık bir ters çevirici olarak çalışır. Çıkışta  $U_{DA}$ ’nın negatif olmasını önlemek veya sıfır olduğunda da akımın yükü akmasını sağlamak sağlanmaktadır, devreye paralel bir diyot eklenir.

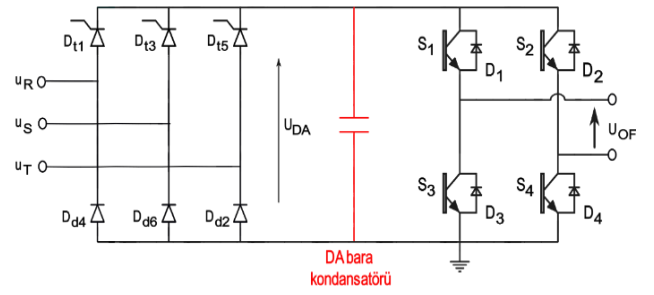
Uygulanan şebeke geriliminin fazları, nominal çalışma şartlarında saf sinüs fonksiyonlarından oluşur. OFDA-DNK sistemine enerji verildiğinde, şebekeden doğrultucuya bir anda gerilim uygulanması, geçici durumda kararsız ve anlık yüksek gerilimin çekilmesine neden olur. Geçici durum sürecinde, üç fazlı köprü doğrultucunun kontrollü olarak düşük bir  $\theta$  ile iletime geçirilmesi,  $\alpha$  açısının yavaşça düşürülerek,  $\theta$  açısının maksimum değer için artırılması, bu probleme bir önlem olarak uygulanabilir. Bu süreç yaklaşık 1-2 s sürer. Enerji verildiğinde  $\theta$  açısına müdahale edebilmek için, yarı kontrollü veya tam kontrollü doğrultucu kullanılmalıdır.

Doğrultucudan eviriciye gönderilen  $U_{DA}$  gerilimi pozitif işaretlidir. Gerilimin işaretini değiştiren bir çift yönlü dönüştürücünün kullanımına ihtiyaç duyulmaz. Aksine, yükten şebekeye güç aktarımı, kaynak sırasında şebekeyi olumsuz etkileyebileceğinden, önlenmesi gereken bir durumdur. Daha basit yapısının yanı sıra, tek yönlü güç akışına izin vermesi nedeniyle, üç fazlı yarı kontrollü köprü doğrultucunun tercih edilmesi uygundur. Öte yandan, yarı kontrollü doğrultuculara, tam kontrollü doğrultuculara göre daha fazla filtreleme gerektiğinden,  $U_{DA}$  çıkışı bir filtre devresinden geçirilerek iyileştirilmelidir.

### 3.2 Doğru Akım Bara Filtresi

OFDA-DNK sistemlerinde, eviriciye gönderilen  $U_{DA}$  geriliminin yapısı, eviriciden sonraki birimleri ve kaynak kalitesini etkiler. Doğrultucunun çıkışında üretilen düşük frekans bileşenleri ( $v_{DF}$ ) ve H-köprüsünün anahtarlamaları sonucunda oluşan yüksek frekans bileşenleri ( $\Delta v$ ),  $U_{DA}$  geriliminde dalgalanmalara neden olur. Gerilim dalgalanmalarını yumuşatmak için DA bara kondansatörünün DA gerilim kaynağına Şekil 13’deki paralel bağlantısı, yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir [20].

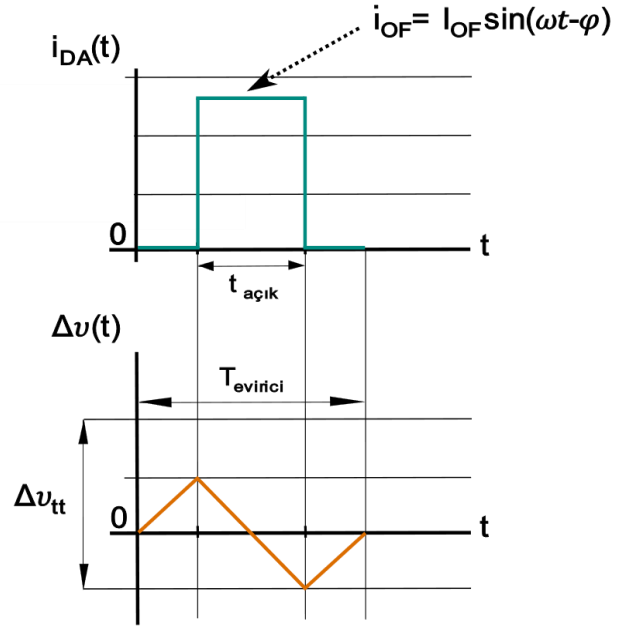
Evirici, doğrultucudan aldığı  $U_{DA}$  gerilimini, bir DGM modülasyon yöntemiyle dönüştürür. H-köprüsünde çapraz olarak eşleştirilen iki IGBT grubu, aralarında  $\varphi$  değeri  $180^\circ$  olarak tetiklenir. IGBT grupları aynı anda tetiklenemez. Anahtarlama periyodunun ( $T_{evirici}$ ) açma süresinde ( $t_{açık}$ ) açılıp, kapatma süresinde ( $t_{kapalı}$ ) kapanan IGBT grupları, OF kare dalga gerilim çıkışı üretir. Eviricinin ürettiği  $U_{OF}$  ile girişine uygulanan  $U_{DA}$  gerilimlerinin oranı, modülasyon indeksi ( $m$ ) olarak adlandırılır. Çalışmaya göre  $U_{DA}$  gerilimindeki dalgalanmanın genliği, eviricinin çıkış akımının genliği ( $I_{OF}$ ) ve  $\varphi$  ile  $m$ ’nin bir fonksiyonudur.



Şekil 13. Doğru akım bara kondansatörü

Yüksek frekans bileşeninin genliği, kullanılan DA bara kondansatörünün değerine göre değişir. Bunun nedeni, bileşenin frekansının kHz değerlerinde olması sonucunda, kapasitif reaktansının DA kaynağın empedansından çok daha küçük olmasıdır. Dalgalanmanın genliği, tepeden tepeye maksimum genliğine veya etkin değerine göre belirlenebilir [20].

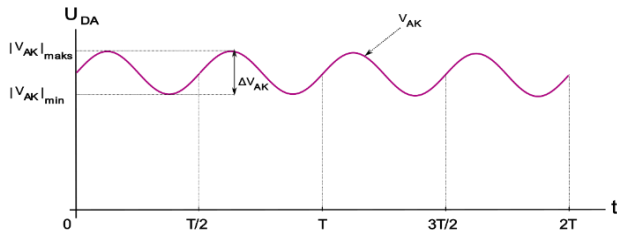
Eviricinin  $T_{evirici}$  süresinde anahtarlamaların  $I_{DA}$  akımında oluşturduğu anlık etkiyle birlikte  $U_{DA}$  geriliminde oluşan  $\Delta v$  ve dalgalanmanın tepeden tepeye genliği ( $\Delta v_{tt}$ ) Şekil 14’de verilmiştir.



Şekil 14. Eviricide anahtarlamaların giriş akımında oluşturduğu anlık etki ve giriş geriliminde oluşan dalgalanma

Doğrultucunun çıkışında, frekansı şebeke frekansının iki katı olan düşük frekans dalgalanmaları üretilir. Düşük frekans dalgalanmaları, ayırma kondansatörleri tarafından kontrol altında tutulur. Ayırma işlemi, AA ve DA ayırma olarak iki gruba ayrılan bir filtreleme işlemidir. Dalgalanmanın giderilmesi hedeflenen  $U_{DA}$  geriliminin işareti pozitif olduğu için DA ayırma yöntemi uygulanır. Şekil 15’de, düşük frekans dalgalanmalarına karşı kullanılan bir DA ayırma kondansatörünün üzerindeki gerilimin ( $V_{AK}$ ) grafiği verilmiştir [21].

Düşük frekans dalgalanmasının genliği, kapasitansın yanı sıra DA baranın empedansı tarafından da etkilenir. Düşük frekans dalgalanmaları için DA baranın eşdeğer empedansının ( $Z_{DF}$ ) ve dalgalanmaların genliğine ilişkin bağıntılar (6) ve (7)’de verilmiştir [20].



Şekil 15. DA ayırma kondansatörünün gerilim dalga formu

$$Z_{DF} = \frac{1}{2\omega C} \sqrt{\frac{R^2 + (2\omega L)^2}{R^2 + (2\omega L - \frac{1}{2\omega C})^2}} \quad (6)$$

$$V_{DF} = \frac{mI_{OF}}{2} \frac{1}{2\omega C} \sqrt{\frac{R^2 + (2\omega L)^2}{R^2 + (2\omega L - \frac{1}{2\omega C})^2}} \quad (7)$$

(7)'nin hesaplanması karmaşık olduğundan, iki varsayımdan birini kabul edilerek sadeleştirilmiştir [20]. Devrenin endüktansının veya direncinin kapasitansından çok büyük olması durumunda, devre endüktif veya rezistif olarak baskın kabul edilebilir. Bu durumda (7) nolu denklem, (8)'e dönüşür.

$$V_{DF} \cong \frac{mI_{OF}}{2} \frac{1}{2\omega C} \quad (8)$$

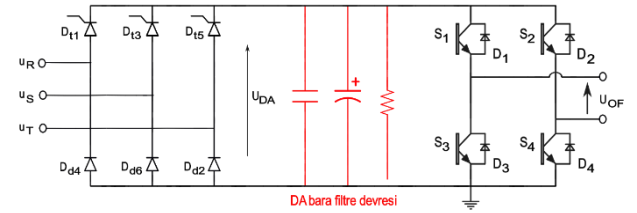
Denkleme  $I_{OF}^{maks}$  dahil edilerek, maksimum genlikli düşük frekans dalgalanmasına karşı kullanılacak DA bara kondansatörü tespit edilir.

$$C \cong \frac{mI_{OF}^{maks}}{2} \frac{1}{2\omega V_{DF}} \quad (9)$$

DA bara gerilimi için kullanılacak kondansatörler, film veya elektrolitik seçilebilir. Film kondansatörlerin düşük eşdeğer seri dirençleri (ESR) vardır. ESR, kondansatörün olumsuz bir özelliğidir ve sistemin verimini düşürür. Ayrıca film kondansatörler yüksek gerilim seviyelerine dayanabilir. Şebekede oluşabilecek anlık aşırı gerilimleri sönmüleyebilmek için, devrede durdurucu kondansatörler kullanılır. Film kondansatörler, durdurucu kondansatör olarak kullanılabilir. DA bara gerilimleri için uyumludur. Elektrolitik kondansatörler ise maksimum 550 V'a kadar değer alabildiğinden, daha yüksek gerilimler için birden fazla elektrolitik kondansatörün seri bağlanması gereksinimi vardır. Elektrolitik kondansatör kullanıldığında, gerilim dengeleme direnci ile DA gerilimdeki dengesizleri gidermek gerekebilir. Ancak elektrolitik kondansatörler, film kondansatörlerden daha fazla enerji depolayabilir ve daha ucuzdur. Filtreleme işleminin uygulanacağı gerilimin işaretiyle birlikte, kondansatörün yapısı ve kullanım amacıyla ilgili teknik detaylar incelenerek, seçim yapılır.

DA bara geriliminin filtrelenmesinde kullanılan kondansatörler, yüksek miktarda gerilim depolayabilir. Sistemin enerjisi kesildiğinde ise bu gerilim hızlı bir şekilde boşaltılamayacaktır. Bu yüzden, enerjisi kesildiğinde, güç devresinin gerilim ölçümleri yapılmalı ve kondansatör gerilimlerinin boşaldığından emin olunmadan temas kurulmamalıdır. Bu süreci hızlandırmak için devrede kondansatörlerle birlikte hava alma dirençleri

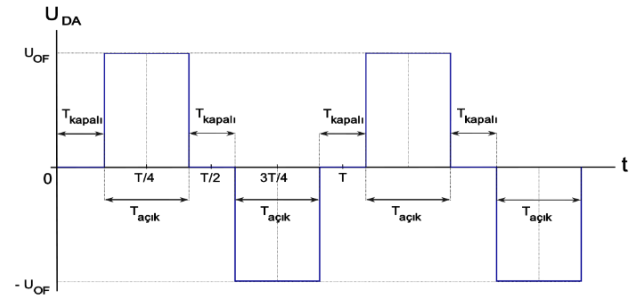
kullanılır. Hava alma direnci, sistem kapatıldığında filtre kondansatörlerinde depolanan enerjiyi boşaltır. Filtre kondansatörleri gibi doğrultucunun çıkışına paralel olarak bağlanır [22]. Şekil 16'da filtre kondansatörleri ve hava alma direnci bağlanmış bir DA bara filtre devresi verilmiştir.



Şekil 16. Doğru akım bara filtre devresi

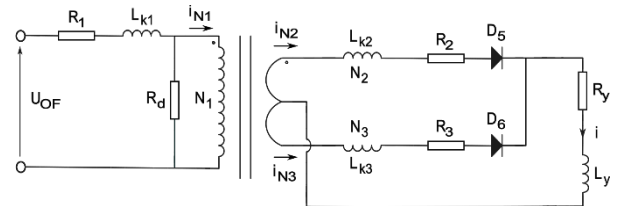
### 3.3 Doğru Akım Bara Filtresi

OFDA-DNK transformatörü bir düşürücü transformatördür. Uygulanan düşük akımlı yüksek gerilimi, dönüştürme oranında, düşük gerilimli yüksek akıma çevirir. Eviricinin H-köprü çıkışından gönderilen ve OFDA-DNK transformatörünün primer bobinini besleyen  $U_{OF}$  gerilimi ise OF AA kare dalga formunda bir gerilimdir. Eviriciye uygulanan  $U_{DA}$  gerilimi sabit kabul edildiğinde, transformatöre gönderilen  $U_{OF}$  geriliminin yapısı Şekil 17'deki gibidir [23].



Şekil 17. Kaynak transformatörüne gönderilen orta frekanslı gerilimin yapısı

Transformatörün sekonder bölümünde,  $U_{OF}$  gerilimi, OF AA bir  $I_{OF}$  akımına dönüştürülür. Transformatörün iki adet sekonder bobinini vardır. Çıkışında, her bir sekonder bobinine bağlı bir diyottan oluşan tam dalga doğrultucu bulunur. Transformator tarafından üretilen  $I_{OF}$  akımı, diyotlarda doğrultularak, çıkışta kaynak yüküne uygulanabilecek bir OFDA-DNK akımı elde edilir. Şekil 18'de kaynak yüküne bağlı bir OFDA-DNK transformatörünün eşdeğer devresi verilmiştir [23].



Şekil 18. Kaynak yüküne bağlı OFDA-DNK transformatörünün eşdeğer devresi

Kaynak yükünün OFDA-DNK transformatörünün sekonder bobinine doğrudan bağlantısı durumunda yüke uygulanacak OF AA akımın genliği, DNK amacıyla kullanılmayacak kadar küçüktür. Eklenen tam dalga



doğrultucuyla, sekonder bobinlerinden gönderilen akımlar doğrultularak, genlikleri arttırılır. Böylece, elde edilen OFDA akım, OFDA-DNK sisteminde kullanılabilir bir seviyeye yükselir. Şekil 19'da kaynak transformatörünün OF AA sekonder akımı ile OFDA kaynak akımının yapısı karşılaştırılmıştır [23].



Şekil 19. Orta frekanslı alternatif ve orta frekanslı doğru akım karşılaştırması

Kaynak transformatörünün kullanımında dikkat edilmesi gereken bir nokta, demir çekirdek doygunluğudur. DNK transformatörlerinde, hava boşluklu bir demir çekirdek bulunur. Kaynak sırasında istenen akımı sağlayabilmek için, demir çekirdek, mümkün olan en yüksek  $B$  seviyesine çıkmalıdır. Demir çekirdek doygunluğunda, gerekli  $B$  seviyesine çıkılamaması söz konusu olabilir. Bu durumda, kaynak akımı için hedeflenen değer elde edilemez [24].

OFDA-DNK sistemini matematiksel olarak tanımlayan dört denklemden faydalanarak, demir çekirdek doygunluğunun nedenlerini incelemiştir [14-15]. Çalışmalarının sonucunda, kaynak transformatörünün primer bobinine uygulanan  $U_{OF}$  gerilimin pozitif ve negatif yarım periyotları birbirine eşit ve dengeli olduğunda, demir çekirdekteki doyma seviyesini düşürmektedir. Uygulanan  $U_{OF}$  geriliminin yarım periyotları eşit değilse, sekonderde dengesiz akım üretilmektedir. Dengesiz akımlar transformatörde DA bileşen oluşturarak, mıknatıslanma akımları üretir. Mıknatıslanma akımları, demir çekirdek doygunluğuna ve akım artışlarına sebep olur.

Alınması gereken bir önlem, eviricinin H-köprüsündeki iki IGBT grubunu aynı  $T_{açık}$  sürede iletme geçirip, aynı  $T_{kapalı}$  sürede kesime götürmektir. Yarım periyotların  $t_{açık}$  sürelerinde farklılıklar olmamalıdır [14]. IGBT tabanlı OF eviriciler, gelişmiş kontrol yeteneği ve verimliliğiyle, yarım periyotlarda dikkat edilmesi gereken konularda ve hassas akım ayarı gerektiren çalışmalarda tavsiye edilen bir çözümdür [25].

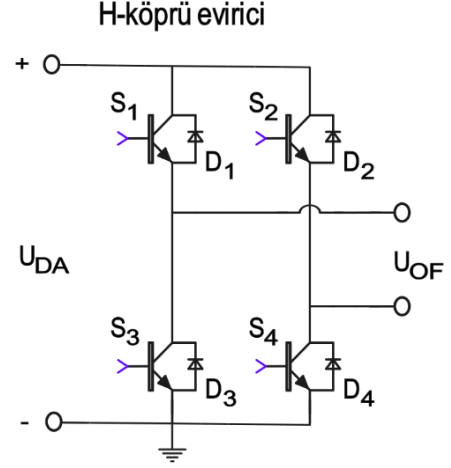
#### 4 Orta Frekanslı Evirici

OFDA-DNK sisteminde üç fazlı köprü doğrultucudan alınan ve DA bara kondansatörleri tarafından filtrelenen  $U_{DA}$  gerilimi, eviricinin H-köprü devresine gönderilir. OFDA kaynak akımının ayarlanabilmesi için, 1000 Hz frekanslı DGM sinyalleriyle H-köprü devresi tetiklenir [26].

##### 4.1 H-Köprü Evirici Topolojisi

H-köprü devresi, S1-S4 IGBT güç anahtarları ve D1-D4 ters paralel bağlı diyotlardan oluşur. Devrede S1-S4 bir grup, S2-S3 diğer grup olmak üzere, IGBT'ler çapraz

olarak gruplanır. İstenen kaynak akımını üretmek için gruplar bir DGM yöntemiyle kontrol edilir. İki grup aynı anda tetiklenemez. Gruplar  $180^\circ$  değerinde  $\varphi$  ile çalıştırılır. H-köprü devresi tarafından üretilen OF AA kare dalga formunda  $U_{OF}$  gerilimi, kaynak transformatörünün primer bobinine iletilir. Şekil 20'de H-köprü devresi verilmiştir [26].



Şekil 20. H-köprü evirici topolojisi

Ters paralel diyotlara sahip IGBT güç anahtarları, güç elektroniği dönüştürücülerinde yaygın olarak kullanılır. Kapı uçlarına sinyal göndererek IGBT'leri tetiklemek ve gerekli izolasyonu sağlayabilmek için IGBT sürücü devreleri kullanılır. IGBT sürücü devreleri,  $U_{DA}$  geriliminden izole olarak IGBT'leri çalışma sınırları içerisinde sürer. IGBT tetiklendiğinde, ters paralel diyot, akıma alternatif bir geçiş sağlar [27].

Kontrol sırasında IGBT, çalışma aralığına uygun bir kapı iletim gerilimiyle ( $U_{Gon}$ ) tetiklenir ve iletme geçer. IGBT'nin kesime girmesi için ise tetikleme geriliminin sıfıra düşürülmesi yeterli olmayabilir. Gerilim tam sıfıra düşürülemezse veya sıfır gerilimde parazite bağlı dalgalanmalar varsa, IGBT tekrar iletme geçebilir. Bu istenmeyen bir anahtarlama davranışıdır. Önlem olarak, IGBT, yine çalışma aralığına uygun, negatif değerli bir kapı kesim geriliminde ( $U_{Goff}$ ) kapatılır. Böylece,  $U_{Goff}$ 'un üzerinde parazit olsa da gerilim sıfırın üzerine çıkmadıkça IGBT iletme geçmez [28].

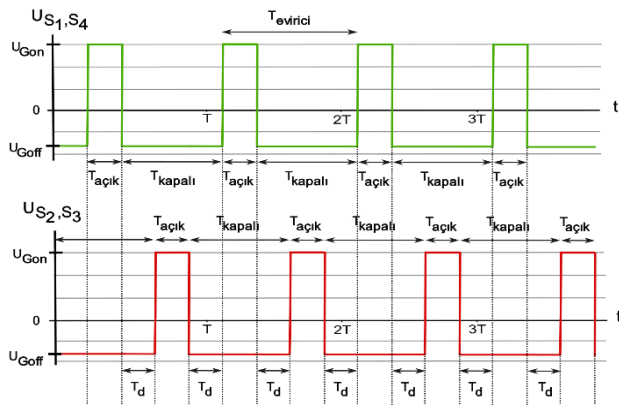
Eviricinin H-köprü devresinde IGBT'leri çalıştıracak uygun bir IGBT sürücü devresi kullanıldığında, S1 ve S4 grubu tetiklendiğinde eviricinin çıkışında pozitif, S2 ve S3 grubu tetiklendiğinde negatif  $U_{OF}$  gerilimi üretilir. Tüm IGBT'ler kesimdeyken yük uçlarında gerilim görülmez. Farklı IGBT gruplarında bulunan IGBT'ler aynı anda tetiklenirse, kısa devre durumu oluşur. IGBT'lerin zarar görmemesi için bu durumdan kaçınılmalıdır. IGBT sürücü devrelerinin kısa devre korumasına da sahip olması önerilir [29].

Eviricinin DGM kontrolünde,  $U_{Gon}$  gerilimi IGBT'lere  $T_{iletim}$  süre kadar uygulanır.  $U_{Gon}$ 'un aktif olduğu bu sürenin anahtarlama sinyalinin periyoduna oranı, (10)'daki gibi yüzdeye çevrildiğinde, görev oranı (%D) olarak adlandırılır.

$$\%D = \frac{T_{iletim}}{T} 100 \quad (10)$$

Burada  $T_{iletim}$ , anahtarın iletimde kaldığı süreyi,  $T$  ise anahtarlama periyodunu temsil eder. Pratikte bir güç anahtarının iletime geçmesi ya da kesime gitmesi için belirli bir süre gereklidir. Bir anahtar kesime götürülüp başka bir anahtar iletime geçirilirse, tetikleme zamanları arasında kısa devre meydana gelir. Bunu önlemek için ölü zaman ( $T_d$ ) denilen bir süre bırakılır. DGM kontrolünde  $T_d$  değerinin artması, kısa devre riskini azalsa da gereğinden fazla arttığında, üretilebilecek maksimum kaynak akımını azaltır. Bu yüzden, üretilecek en yüksek kaynak akımı için optimum bir  $T_d$  değeri belirlenmelidir [30].

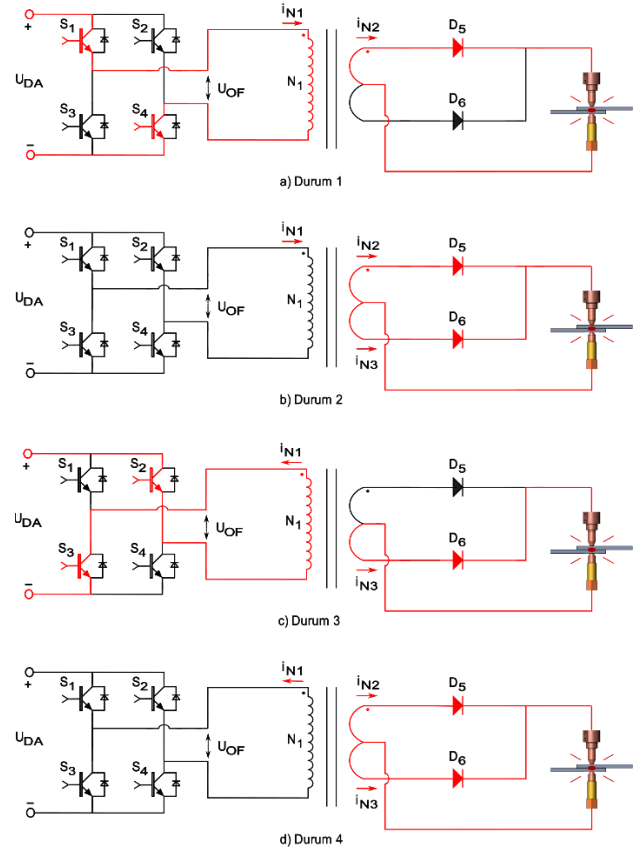
Şekil 21'de H-köprüsünde IGBT'lere uygulanabilecek DGM sinyalleri verilmiştir [30]. H-köprü devresine uygulanan DGM sinyallerinin  $D$  değeri arttıkça, OFDA-DNK sisteminin kaynak akımı artar. Düşük kaynak akımlarında  $D$  değeri azalır, böylece  $T_d$  artar. Öte yandan,  $T_d$ 'nin  $U_{OF}$  ve  $I_{OF}$  üzerinde bozucu bir etkisi vardır.  $D$ 'nin doğrusal olarak artırılması durumunda, üretilen  $I_{OF}$  ve kaynak akımındaki artış doğrusal değildir [31].



Şekil 21. H-köprüsünün darbe genişlik modülasyonu sinyalleri

OFDA-DNK sisteminde, eviricinin çalışmasında, yarım köprü evirici için yapılan çalışmayla benzer şekilde dört durum vardır [32]. Birinci durumda,  $S_1$  ve  $S_4$  IGBT'leri iletime geçer,  $S_2$  ve  $S_3$  kesimde kalır. Transformatörün primer bobinine, pozitif  $U_{DA}$  gerilimi iletilir. Primer bobininden akan akımın yönü pozitiftir. Sekonder bobininde üretilen akım,  $D_5$  diyotu üzerinden yüke uygulanır. İkinci durumda  $S_1$  ve  $S_4$  kesime girer. Transformatörde primer ve sekonder bobininde gerilim sıfıra düşer. Transformatör üzerinde kalan mıknatıslanma akımı, sekonder bölümünde tam dalga doğrultucu üzerinden yüke aktarılır. Üçüncü durumda,  $S_2$  ve  $S_3$  IGBT'leri iletime geçer,  $S_1$  ve  $S_4$  kesime girer. Transformatörün primer bobinine, negatif  $U_{DA}$  gerilimi iletilir. Primer bobininden akan akımın yönü negatiftir. Sekonderde üretilen akım,  $D_6$  diyotu üzerinden yüke uygulanır. Dördüncü durumda  $S_2$  ve  $S_3$  kesime girer. Transformatörde primer ve sekonder bobininde gerilim sıfıra düşer. Transformatör üzerinde kalan mıknatıslanma akımı, sekonder bölümünde tam dalga doğrultucu üzerinden yüke aktarılır. Çalışmanın dört durumunda da yükün üzerinden akan akım, transformatörün sekonder bobinlerinin ortak ucuna geri döner. DGM sinyalleri uygulandığı sürece, durumlar periyodik olarak tekrarlanır. Şekil 22'de OFDA-DNK sisteminde H-köprü eviricinin çalışma adımları verilmiştir.

H-köprüsü bir denetleyici tarafından tetiklenerek eviricinin çıkışında 1000 Hz frekanslı kare dalgaların üretilmesi sağlanır. Yeterli düzeyde bir denetleyici olarak TMS320F28069M mikrodenetleyici ünitesi örnek verilebilir [33]. TMS320F28069M, iç yapısında bulunan gelişmiş DGM birimi ile darbe genişliği dalga formlarını oluşturur. Oluşturulan kare dalga formları, doğrudan IGBT anahtarlama elemanlarına uygulanamaz. IGBT'lerin iletime geçmesi için pozitif  $U_{Gon}$  geriliminin, kesime girmesi için negatif  $U_{Goff}$  geriliminin uygulanması gerekir. Skyper 32 Pro R gibi IGBT sürücü devreler, IGBT modülleri ile denetleyici arasında bir arayüz oluşturarak bu dönüşüm gereksinimini karşılar.



Şekil 22. OFDA-DNK sisteminde H-köprü eviricinin çalışma durumları

IGBT'lerin DGM kontrolü sonucunda üretilen  $U_{OF}$  gerilimi, kaynak transformatörünün primer bobinine gönderilir. Düşürücü transformatörün dönüştürme oranı doğrultusunda sekonder bobinlerinde üretilen OF akım, tam dalga doğrultucuda OFDA kaynak akımına dönüştürülerek yüke aktarılır. Yüke uygulanan kaynak akımının ise takip edilmesi gerekir. Kaynak akımı ile ilgili geri bildirim alınmazsa, sistemde akım üretilmediğinde, kontrol birimi bu durumu tespit edemez. Şebeke ve DA bara dalgalanmaları gibi sebeplerle  $U_{OF}$  geriliminde oluşabilecek bozulmalar da düşünüldüğünde, akım kontrol edilerek kaynak sırasında  $D$  değeri anlık olarak güncellenebilmelidir.

Geri bildirim alınarak sabit tutulması hedeflenen veriye göre, sabit gerilim modu (SGM) ve sabit akım modu (SAM) olarak isimlendirilen farklı kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden, SAM oldukça güvenilir ve kararlı olmasından dolayı daha fazla

tercih edilmektedir. SAM, OFDA-DNK tarafından yüke uygulanan kaynak akımının sabit tutulmasını sağlar. Kaynak sırasında akım bilgisi alarak verileri karşılaştırır. Karşılaştırma sonucunda belirlenen fark doğrultusunda, AA-DNK sistemlerinde  $\alpha$  açısını, OFDA-DNK sistemlerinde DGM kontrolündeki  $D$  değerini günceller. SAM kontrolüne akım bilgisinin aktarılabilmesi için, geri bildirim sağlayabilecek bir akım ölçüm sistemi gereklidir. Bu ölçüm için, Rogowski bobini önerilmektedir.

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada, bir OFDA-DNK sisteminin tüm bileşenleri incelenmiştir. Ayrıca geleneksel AA-DNK yöntemlerine göre, OFDA-DNK sistemlerinin üstünlükleri karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur. Karşılaştırmadan elde edilen önemli bazı sonuçlar maddeler halinde sunulmuştur:

- OFDA-DNK sisteminin frekansı 1000 Hz olduğundan daha küçük boyutlu kaynak transformatörü kullanılır.
- Kaynak akımında daha hızlı ayar yapılabilir.
- OFDA-DNK sistemlerde kaynak akımının tepe değerlerini düşüktür.
- Düşük akımlarda OFDA sistem, AA sistemden daha fazla kaynak noktası üretmektedir.
- AA sistemde harcanan enerji OFDA sistemden daha yüksektir.

Ayrıca OFDA-DNK sistemin bileşenlerinden biri olan OF eviricinin çalışma düzeni ayrıntılı bir şekilde ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, OF eviricinin, H-köprülerinden oluşan sırt sırta bağlı modelinde, gerek devre elemanlarının az olması, gerekse yapısında sadece yarıiletken elemanları barındırması, topolojinin modülasyon tekniklerine uyumluluğunu arttırmaktadır.

## Teşekkür

Yazarlar çalışmadaki destekleri için Siff Elektromekanik San. Tic. Ltd. Şti firmasına ve yetkililerine teşekkür ediyor.

## Bilgilendirme

Gerçekleştirilen bu çalışmada Etik Kurul Onay belgesine gerek yoktur.

## Kaynaklar

- [1] Jenney, C. L., & O'Brien, A. (2001). Welding handbook: welding science and technology. *Woodhead Publishing Ltd.*, 985 p.
- [2] Zhao, D., Bezgans, Y., Wang, Y., Du, W., & Vdonin, N. (2021). Research on the correlation between dynamic resistance and quality estimation of resistance spot welding. *Measurement*, 168, 108299.
- [3] Deepati, A. K., Alhazmi, W., & Benjeer, I. (2021). Mechanical characterization of AA5083 aluminum alloy welded using resistance spot welding for the lightweight automobile body fabrication. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5139-5148.

- [4] Stepien, M., Mikno, Z., & Grzesik, B. (2019). Experimental Determination of Efficiency and Power Losses in Resistance Welding Machines. In *2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM)* (pp. 1-4). IEEE.
- [5] Zhou, K., & Li, H. (2020). A comparative study of single-phase AC and medium frequency DC resistance spot welding using finite element modeling. *IEEE Access*, 8, 107260-107271.
- [6] Zhou K., & Cai, L. (2011). Improvement in control system for the medium frequency direct current resistance spot welding system. In *Proceedings of the 2011 American Control Conference* (pp. 2657-2662). IEEE.
- [7] Zhou, K., & Yao, P. (2017). Review of application of the electrical structure in resistance spot welding. *IEEE Access*, 5, 25741-25749.
- [8] Podrżaj, P., Polajnar, I., Diaci, J., & Kariž, Z. (2008). Overview of resistance spot welding control. *Science and Technology of Welding and Joining*, 13(3), 215-224.
- [9] Dejans, A., Kurtov, O., & Van Rymenant, P. (2021). Acoustic emission as a tool for prediction of nugget diameter in resistance spot welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 7-17.
- [10] Zhou, K., Yao, P., & Cai, L. (2015). Constant current vs. constant power control in AC resistance spot welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 299-304.
- [11] Baldwin, T., Hogans, T., Henry, S., Renovich, F., & Latkovic, P. (2005). Reactive power compensation for voltage control at resistance welders. *IEEE Transaction Industrial applications*, 41(6), 1485-1492.
- [12] Pouranvari, M. (2017). Critical assessment 27: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities. *Materials Science and Technology*, 33(15), 1705-1712.
- [13] Giaccone, L., Cirimele, V., & Canova, A. (2020). Mitigation solutions for the magnetic field produced by MFDC spot welding guns. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(1), 83-92.
- [14] Stumberger, G., Dezelak, K., Polajzer, B., Dolinar, D., & Klopčič, B. (2008). The Impact of voltage generation on harmonic spectra of current and flux density in the welding transformer for a middle frequency resistance spot welding system. In *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-8). IEEE.
- [15] Wang, X., Zhou, K., & Shen, S. (2021). Intelligent parameters measurement of electrical structure of medium frequency DC resistance spot welding system. *Measurement*, 171, 108795.
- [16] Nagasathya, N., Boopathy, S. R., & Santhakumari, A. (2013). MFDC - An energy efficient adaptive technology for welding of thin sheets. In *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability* (pp. 901-906). IEEE.
- [17] Rashid, M. H. (2001). Power electronics handbook (Engineering), *Academic Press*, 892 p.
- [18] Lazim, M. T. (2019). Power electronics and drives, *Philadelphia University*, Jordan.
- [19] Lander, C. W. (1993). Power electronics, *McGraw-Hill Education*.
- [20] Vujacic, M., Hammami, M., Srdovic, M., & Grandi, G. (2017). Theoretical and experimental investigation of switching ripple in the DC-link voltage of single-phase H-bridge PWM inverters. *Energies*, 10(8), 1189.
- [21] Qin, Z., Tang, Y., Loh, P. C., & Blaabjerg, F. (2016). Benchmark of AC and DC active power decoupling circuits for second-order harmonic mitigation in kilowatt-scale single-phase inverters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(1), 15-25.

- [22] Fazia, L., Peretti, L., & Zigliotto, M. (2008). Repetitive control and virtual bleeder resistor for AC generator sets with harmonic-sensitive loads. *In 2008 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives* (pp. 144-148). IET.
- [23] Klopčič, B., Stumberger, G., & Dolinar, D. (2007). Iron core saturation of a welding transformer in a medium frequency resistance spot welding system caused by the asymmetric output rectifier characteristics. *In 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting* (pp. 2319-2326). IEEE.
- [24] Petrun, M., Klopčič, B., Polajzer, B., & Dolinar, D. (2012). Evaluation of iron core quality for resistance spot welding transformers using current controlled supply. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(4), 1633–1636.
- [25] Wagner, M., & Bernet, S. (2013). High frequency inverter for resistance spot welding applications with increased power cycling capability. *In 2013 Africon* (pp. 1-7). IEEE.
- [26] Brezovnik, R., Cernelić, J., Petrun, M., Dolinar, D., & Ritonja, J. (2017). Impact of the switching frequency on the welding current of a spot-welding system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12), 9291–9301.
- [27] Lobsiger, Y., & Kolar, J. W. (2015). Closed-loop di/dt and dv/dt IGBT gate driver. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(6), 3402–3417.
- [28] Denk, M., & Bakran, M. M. (2015). Online junction temperature cycle recording of an IGBT power module in a hybrid car. *Advances in Power Electronics*, 2015, 14 p.
- [29] Saleem, J., Majid, A., Haller, S., & Bertilsson, K. (2011). A study of IGBT rupture phenomenon in medium frequency resistance welding machine. *In International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference* (pp. 236-239). IEEE.
- [30] Yu, Q., Lemmen, E., Wijnands, C. G. E., & Vermulst, B. (2021). Output spectrum modeling of an H-bridge inverter with dead-time based on switching mode analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(10), 11344-11356.
- [31] Zammit, D., Staines, C. S., & Apap, M. (2016). Compensation techniques for non-linearities in H-bridge inverters. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 3(3), 361–376.
- [32] Jabavathi, J. D., & Sait, H. (2020). Design of a single chip PWM driver circuit for inverter welding power source. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(4), 720–724.
- [33] Lund, S. H. J., Billeschou, P., & Larsen, L. B. (2019). High-bandwidth active impedance control of the proprioceptive actuator design in dynamic compliant robotics. *Actuators*, 8(4), 71–103.