

Review of the Solid-State Transformers and an Application of Full Bridge DC/DC Converter

 Oğuz ALKUL^{1,2,*}, Şevki DEMİRBAŞ¹
¹ Gazi University Faculty of Technology, Department of Electrical Electronics Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

² Texas A&M University at Qatar, Electrical and Computer Engineering, 23874, Doha/QATAR

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Received: 24/04/2019

Revision: 30/05/2019

Accepted: 07/06/2019

Highlights

- SST topologies.
- DC/DC converter.
- Matlab-Simulink

Keywords

 High Frequency
 Transformer
 Full Bridge Converter
 Solid State Transformer

In this study, Solid State Transformer (SST) topologies, which are widely used in solar and grid-connected systems, are summarized by examining various configurations. SST topologies are grouped under four headings: AC/AC, AC/DC, DC/AC and DC/DC. The topology structures are analyzed in general and detailed with a sample application. In addition, a 2kVA SST capable of DC/DC conversion with full bridge converters was simulated and prototyped.

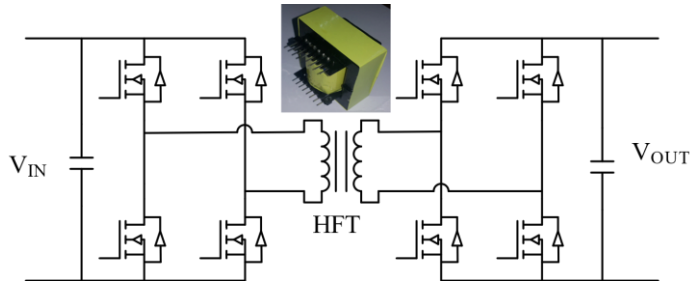


Figure A. Circuit schema of the SST design

Purpose: In this study, SST structures are examined. Simulation and application of full bridge converter performing DC/DC conversion is realized. Firstly, circuit topologies of SSTs are examined, and usage areas are analyzed. Then, a full bridge type converter topology is used to design a converter that converts DC to DC and simulated.

Theory and Methods: Solid state transformer design is explained step by step. High Frequency Transformer (HFT) calculations that are required for the design of the transformer are given in the paper. Core type and wire type were selected, and winding numbers have been calculated to deeply analyze the design procedure. To implement the SST, full bridge switches were connected to input and output side of HFT. The developed SST was simulated in Matlab/Simulink environment and then applied in laboratory.

Results: The results have shown that 300V DC voltage was successfully converted to 100V and 22kHz AC voltage by using the proposed converter. After the experimental setup was completed, SST was tested at 22kHz switching frequency. The simulation and experimental results are presented and compared in Section 3.

Conclusion: Design and application of SST that include HFT are presented in this study. Application studies were realized for each stage that depends on the number of converters. Results show that the efficiency of the system is directly dependent on the number and types of converters. In general, SSTs are more widely used in renewable and grid-connected systems. It has been observed that serial connection structure is preferred in high voltage applications. Most of the parallel connected types are preferred for increasing total power.

To realize the proposed structure, HFT design procedure is presented. The required power, number of winding, conductor selection calculations are explained in the paper. Results show that the proposed system converts DC voltage to DC voltage via 22kHz AC voltage with the help of HFT.

GU J Sci, Part C, 7(2): 450-471 (2019)

Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

Güç Elektroniği Transformatörlerinin İncelenmesi ve Bir DA/DA Dönüştürücü Uygulaması

Oğuz ALKUL^{1,*} Şevki DEMİRBAŞ²¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA²Katar Texas A&M Üniversitesi, Elektrik ve Bilgisayar Bölümü, 23874, Education City/DOHA

Öz

Malzeme bilimindeki gelişmelere paralel olarak artan güç-boyut oranı ile özellikle ağırlığın önemli olduğu hava, kara, deniz araçları ile uzay teknolojilerinde yüksek frekans transformatörlerine (YFT) olan talep artış göstermektedir. Özellikle YFT'lerin yarı iletken anahtarlar ile birlikte kullanılması sonucunda elde edilen güç dönüştürücüler (Güç Elektroniği Transformatörü – GET), elektrikli araçlardan uzay araçlarına, dağıtık üretim ve depolama birimlerinin şebeke entegrasyonuna kadar birçok uygulamada geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır. Bu çalışmada GET yapıları incelenerek DA/DA dönüştürme yapan tam köprü dönüştürücünün benzetim ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ilk olarak GET'ler incelenmiş ve devre topolojileri ile kullanım alanları analiz edilmiştir. Daha sonra tam köprü tipi dönüştürücü topolojisi kullanılarak DA/DA dönüştürme yapan bir çevirici tasarımı yapılmış ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetimi gerçekleştirilen dönüştürücü için gerekli malzeme seçimi yapılarak prototip hazırlanmış ve deneysel çalışmalar tamamlanmıştır. Deneysel kurulumu tamamlanan GET, 22kHz anahtarlama frekansında test edilerek benzetim ve deneysel sonuçlar sunulmuştur.

Makale Bilgisi

Başvuru: 24/04/2019

Düzeltilme: 30/05/2019

Kabul: 07/06/2019

Anahtar Kelimeler

Yüksek Frekans
Transformatörü
Tam Köprü Dönüştürücü
Güç Elektroniği
Transformatörü

Keywords

High Frequency
Transformer
Full Bridge Converter
Solid State Transformer

Review of the Solid-State Transformers and an Application of Full Bridge DC/DC Converter

Abstract

With the increased power to weight ratio, corresponding to the developments in material science, the demand for high frequency transformers (HFT) in air, land, marine and aerospace technologies where the weight is particularly important has increased. Especially, the power converters in which HFTs are used with semiconductor switches (Solid State Transformers – SST) have found wide application area in many applications ranging from electric vehicles to space vehicles, distributed generation and storage network integration. In this study, by reviewing SST topologies, simulation and practical implementation of full-bridge converter performing DC/DC conversion have been realized. Firstly, SSTs have been examined and circuit topologies and usage areas has been analyzed in the study. Then, an SST performing DC/DC conversion has been designed and simulated by using full-bridge converter topology. By selecting the required material for the simulated converter, the prototype has been set up and experimental studies have been completed. After completing the experimental setup for the SST, simulated and experimental results are presented by testing SST under 22kHz switching frequency.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisinin üretiminden tüketimine kadar geçen süreçte, alternatif akım (AA) kullanılmasının en önemli gerekçesi, düşük frekans transformatörleri (DFT) yardımıyla giriş geriliminin farklı gerilim seviyelerine kolaylıkla dönüştürülebilmeleridir. Elektrik güç sistemlerinde, DFT'ler gerilim dönüşümlerinin yanında elektriksel yalıtım görevini de yerine getirmektedir. Fakat DFT'ler, yapısındaki hantal demir nüve ve bakır sargıların ağırlığından dolayı, güç sistemlerinin hacim, ağırlık ve maliyet bakımından en büyük parçasını oluşturmaktadır. Transformatörlerin boyut ve ağırlıkları, yapılarında kullanılan nüvelerin ferromanyetik özellikleri ile nüve ve sargıların sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir.

Güç transformatörlerinde, transformatör üzerine yerleştirilen çeşitli soğutucu düzenekler yardımıyla transformatör ısı kontrol edilirken, nüve yapısında manyetik geçirgenliği yüksek malzemelerin kullanılmasıyla ağırlık ve hacim bakımından azalma sağlanabilmektedir. Diğer taraftan frekans ile transformatör boyutları ters orantılı olarak değiştiğinden, frekansın artırılması ile transformatör boyutlarında küçülme sağlanabilmektedir. Fakat frekansın artırılması histerisiz ve eddy akımından kaynaklanan kayıpları da artıracığından dolayı, geleneksel manyetik nüveler yerine manyetik geçirgenliği yüksek nüvelere ihtiyaç duyulmaktadır. Malzeme bilimindeki ilerlemelerle birlikte orta gerilim seviyelerinde büyük güçlü, manyetik geçirgenliği yüksek nüveler geliştirilebilmektedir[1-4].

Günümüzde gerek değişik profildeki yüklerin ihtiyaçlarının karşılanmasında, gerekse güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlantılarında transformatörler tek başına yetersiz kalmaktadır. Özellikle gerilim yükselmesi ve düşmesi, kırılaşım veya harmonik gibi güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde ek düzeneklere ihtiyaç bulunmaktadır[5]. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, güç elektroniği karmaşık güç sistemlerinin problemleriyle başa çıkma konusunda umut verici bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek güçlü ve kontrol edilebilir katı hal anahtarları hem iletim hem de dağıtım sistemlerinde uygulama bulan çeşitli güç elektroniği dönüştürücülerinin gelişimini tetiklemiştir. Başlangıçta transistörler yardımı ile oluşturulan güç elektroniği devre ve düzenekleri, öncelikle endüstri alanında kullanılmıştır. Motor kontrol üniteleri ile başlayan bu süreç, gelişen yarı iletken teknolojileri sayesinde endüstrinin dışına çıkarak elektrikli araçlar[6,7], mikro şebekeler[8,9], yenilenebilir enerji kaynakları[10,11], ev, ofis, tarım ve hayvancılığa[12,13] kadar birçok yerde kullanım alanı bulmuştur. Artan taleple beraber üretimi ve tüketimi artan güç elektroniği devreleri, yük etkisinin kaynağa ve çevre cihazlarına etkisini en aza indirmesi ve birbiri ile uyumlu olmasını zorunlu kılmıştır. Ayrıca kullanıcıların kaliteli ve kesintisiz enerji talepleri[14] güç kalitesi, verim, güvenlik ve yalıtım özelliklerinin sağlanmasını zorunlu hale getirmiştir. Arıza durumlarında meydana gelen geniş çapta enerji kesintilerinin önüne geçilmesi, bozucu etkilerin sönümlenmesi ve şebekeye yük oluşturulan güç faktörü düzeyinin en uygun seviyede tutulması gerekliliğini doğurmuştur.

Geleneksel transformatörler ile yarı iletken dönüştürücülerin birlikte kullanılması sonucunda ortaya çıkan güç dönüştürücüleri güç elektroniği transformatörü (GET) olarak tanımlanmaktadır. GET'lerin patenti ilk olarak 1970 yılında Murray tarafından alınmıştır[15]. GET'lerde geleneksel transformatörlerin kullanılması, elektriksel yalıtımın yanında, farklı gerilim seviyeleri arasında kolay dönüşüm sağlamaktadır. Fakat şebeke frekansında (50Hz/60Hz) kullanılan transformatörlerin güce bağlı olarak ağırlık ve boyutlarının çok büyük olması gibi dezavantajları vardır. Brooks 1980 yılında yalıtım bariyerinin frekansını artırmak suretiyle sistemin boyutlarında küçülme sağlanabileceğini ve daha düşük boyutlarda transformatör ile daha fazla güç aktarılacağı fikrini ortaya atmıştır[16]. Böylece frekans uygulama limitleri çerçevesinde çalıştırılabilen transformatörler ile beraber çok küçük boyutlardan çok yüksek enerji dönüşümlerinin önü açılmıştır. Özellikle düşük ve orta gerilim seviyelerinde DFT yerine GET kullanımını yaygınlaştırmaya başlamıştır. GET'ler yapısında bulunan güç elektroniği elemanlarını uygun şekilde kontrol etmek suretiyle geniş bir aralıkta güvenli ve verimli güç kontrolü sağlanmaktadır. GET'ler geleneksel transformatörler ile karşılaştırıldığında yüksek güç yoğunluğu, küçük hacimli ve ağırlık, kontrollü güç faktörü, kontrollü gerilim düşürme vb. gibi iyi özelliklere sahip olduğu görülmektedir[17,18]. Diğer taraftan çalışma frekansının artırılması sonucunda filtre elemanlarının boyutlarında küçülme sağlanarak, düşük hacimlerden yüksek enerji dönüşümleri yapılabilmesine olanak tanınmaktadır[19]. Malzeme bilimindeki ilerlemeler ışığında GET'ler yarı iletken devre elemanları ile paralel gelişme göstermiştir.

Bu çalışmada GET'ler üzerine yapılan çalışmalar incelenerek, literatürde yaygın olarak yer alan GET topolojileri özetlenmiştir. GET topolojileri AA/AA, AA/DA, DA/AA ve DA/DA olmak üzere dört alt başlık altında toplanmıştır. Topoloji yapıları genel olarak incelenmiş ve birer örnek uygulama ile detaylandırılmıştır. Ayrıca tam köprü dönüştürücüler yardımıyla DA/DA dönüşüm yapabilen, 2kVA gücünde bir GET'in benzetimi yapılarak prototipi gerçekleştirilmiştir. Prototip tasarımında, ilk olarak prototip için kullanılacak YFT dizaynı gerçekleştirilerek tasarım basamakları ve hesaplamalara yer verilmiştir. Kullanılan materyal, iletken seçimi ve sarım sayıları belirtilmiştir. Hesaplamalar doğrultusunda ilk örnekleme gerçekleştirilen transformatöre, tam köprü dönüştürücü eklenerek bir GET uygulaması geliştirilmiştir. Geliştirilen GET'in ilk olarak Matlab/Simulink ortamında simülasyonu yapılmış, daha

sonra laboratuvar ortamında uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tasarım kriterleri ile benzetim ve uygulamadan elde edilen bulgular çalışmanın 3. Bölüm'ünde sunulmuştur.

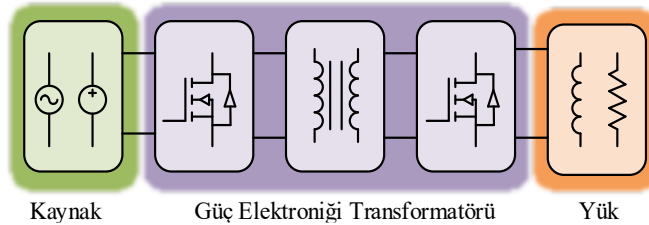
2. GÜÇ ELEKTRONİĞİ TRANSFORMATÖRLERİ (SOLID STATE TRANSFORMERS)

Geleneksel düşük frekanslı transformatörler, güç sistemlerinde enerji dönüşümünün en önemli bileşenlerinden biridir. Bu transformatörler bir taraftan bağlantı noktaları arasında elektriksel yalıtım sağlarken diğer taraftan giriş/çıkış uçlarında gerilim uyumunu gerçekleştirmek için gerilim seviyelerini de değiştirmektedirler. Düşük frekanslı transformatörler yapısının basit olması, verimlerinin yüksek olması ve güvenli olmalarından dolayı elektrik şebekelerinde uzun süre kullanılabilir. Fakat bu transformatörlerin, ihtiyaç duyulan güce bağlı olarak nüve ve sargı yapılarından dolayı boyutları büyümekte, ağırlıkları artmaktadır. Bu da taşınmasını zorlaştırmakta üretimi ve kurulumu karmaşık hale getirerek maliyeti artırmaktadır. Diğer taraftan bu transformatörler DA dağıtım sistemleri, dağıtık üretim kaynakları ve enerji depolama üniteleri gibi teknolojiler ile kullanıma uygun olmaması gibi dezavantajı bulunmaktadır.

Malzeme teknolojisindeki gelişmeler ile amorf, ferit, nanokristal gibi manyetik geçirgenliği yüksek malzemeler transformatörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerin kullanılmaya başlanması ile birlikte YFT tasarımları hız kazanmıştır. YFT'lerin güç elektroniği dönüştürücüleri ile birlikte kullanılması sonucunda elde edilen GET'ler teknolojinin her alanında yer bulmuştur. DFT'ler ile karşılaştırıldığında GET'lerin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Aktif güç filtrelemesi yaparak girişteki toplam harmonik etkinin azaltılmasını sağlar.
- Mükemmel gerilim regülasyonu sağlar.
- Giriş/Çıkış frekansları farklı olabilir.
- Farklı bir faza sahip sisteme bağlantı gerçekleştirilebilir.
- Yüksek frekanslarda çalışır. Bu nedenle nüve, sargı ve çıkış filtre boyutları küçüktür. Toplam ağırlıkları azdır.
- Isınma problemi azdır.

Şekil 1'de temel bir GET şeması verilmiştir. Şekilden görüleceği gibi GET'ler en basit hali ile kaynak, transformatör, güç elektroniği devre elemanları ile yük birimlerinden oluşmaktadır. Devrede transformatör giriş ile çıkış arasında gerilim seviyesini ayarlamının yanında izolasyon görevini de yapmaktadır. Devrede kullanılan güç elektroniği dönüştürücüler ise giriş bölümündeki AA veya DA gerilimi transformatörde ihtiyaç duyulan yüksek frekanslı AA gerilimi dönüştürmekte, transformatör çıkışından elde edilen yüksek frekanslı AA gerilimi ise yük talebine bağlı olarak AA veya DA gerilime dönüştürmektedir.



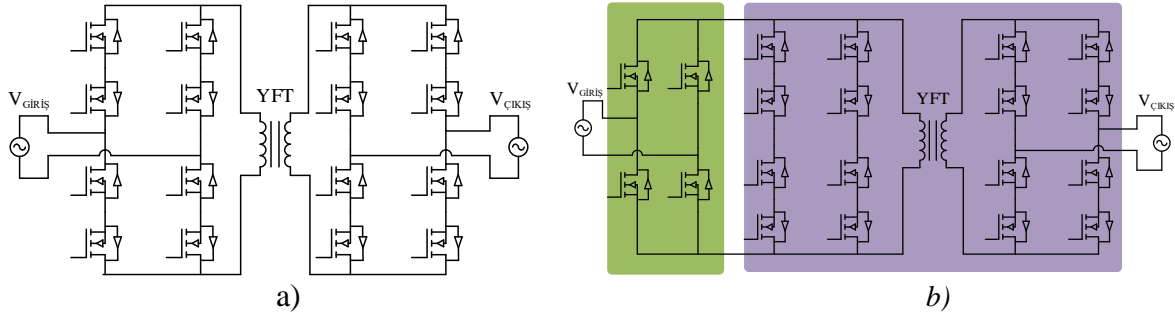
Şekil 1. GET yapısı

Enerji dönüştürme şekillerine göre GET'ler AA/AA, AA/DA, DA/AA ve DA/DA dönüştürücüler olmak üzere dört grupta incelenmektedir.

2.1. AA/AA Dönüştürücü GET Uygulamaları (AC/AC Converter SST Applications)

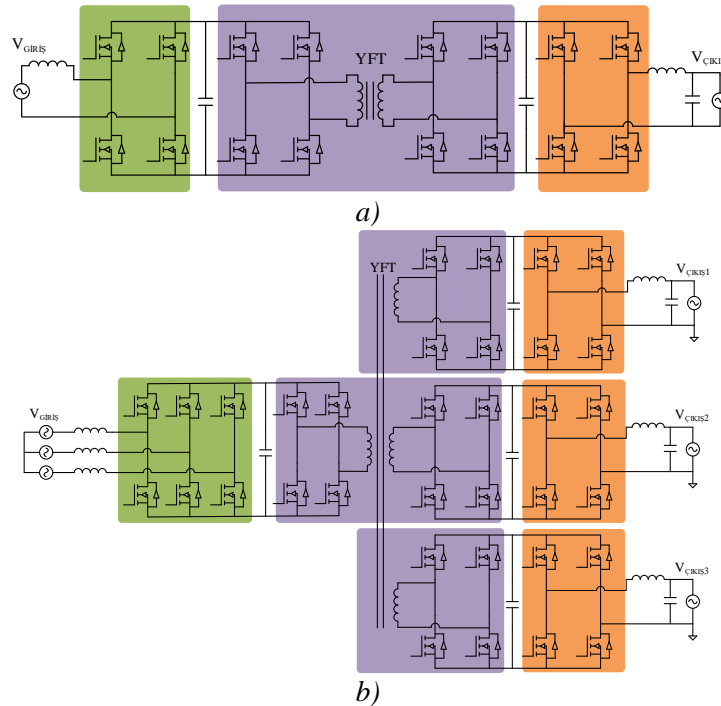
GET içeren AA/AA dönüştürücüler enerji dönüşüm aşamalarına göre temel olarak dört temel topoloji uygulaması bulunmaktadır. Birden çok dönüştürücü yapılarının içerdiği bu uygulamalar yüksek gerilim AA/AA dönüşümü işlemleri için uygundur[21-32,34-44,46,47]. Bir aşamalı AA/AA dönüştürücüler

doğrudan AA gerilimini GET yardımıyla düşürebilir[21,23,26,40,41] İki aşamalı dönüştürücüler ise yüksek AA gerilimini DA gerilimine dönüştürür. Aynı zamanda, bir aşamalı tiplere göre fazladan bir dönüştürücü yardımıyla tekrar AA sinyaline dönüşüm sağlanır[22,24,27,29,30,32,33]. Bir ve iki aşamalı dönüştürücüye örnek Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. GET AA/AA dönüştürücü uygulamaları (a) bir aşamalı[22], b) iki aşamalı[33])

Bir aşamalı dönüştürücülerde AA/AA dönüştürücü yapısı tercih edilir. Bu tip dönüştürücülerin girişine uygulanan düşük frekanslı AA sinyali, uygun bir pozitif ve negatif kenar tetiklemesi yardımıyla yüksek frekanslı AA sinyale dönüştürülür. Bu uygulama yapısında, giriş sinyali DA’ya dönüştürülmeden doğrudan GET’e uygulanır. GET’in girişine uygulanan sinyal, doğrudan anahtarlanarak istenilen frekansta AC elde edilmesi sağlanır. İki aşamalı dönüştürücü yapılarında ise bir aşamalı dönüştürücülerden farklı olarak AA/DA ve DA/AA dönüştürücü yapıları içerir. Birden fazla dönüştürücü yapısının kullanımı verimi düşürür, bileşen sayısını artırır. Devre boyutlarının genel olarak büyümesine ve toplam maliyeti artırmasına neden olur.

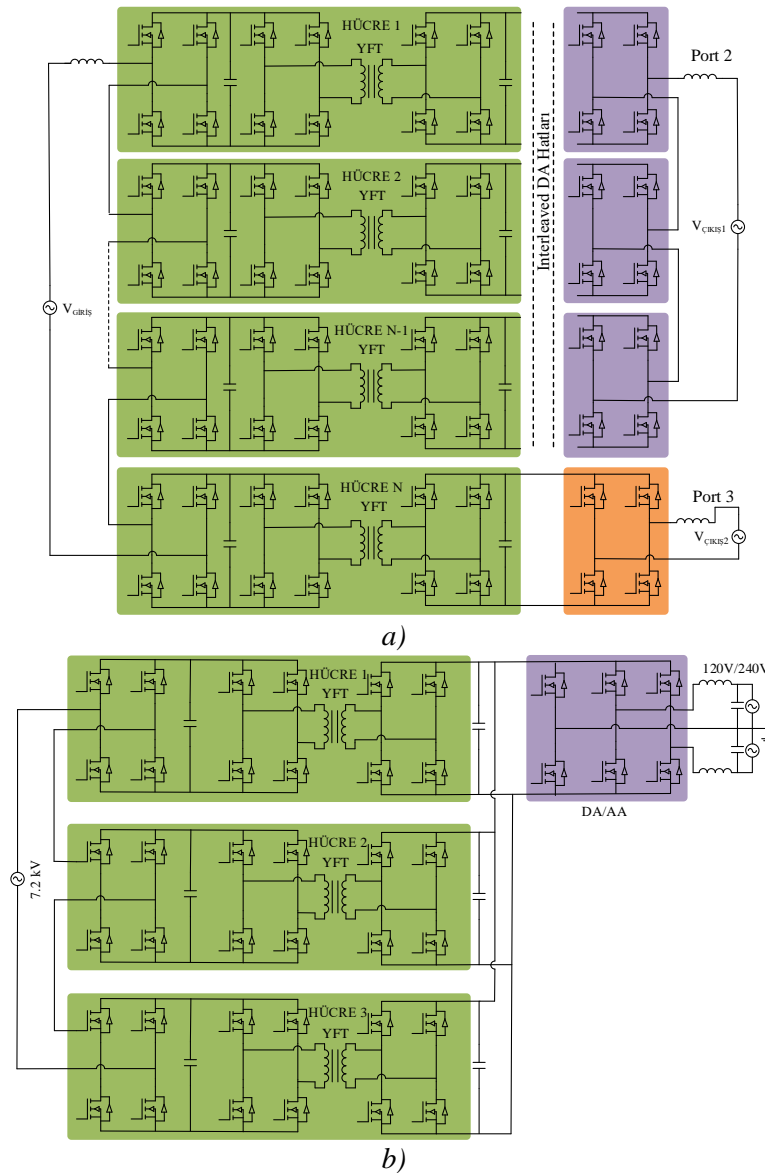


Şekil 3. Üç aşamalı AA/AA dönüştürücü modelleri (a) basitleştirilmiş bir faz[48], b) üç faz[49])

Bir diğer dönüştürücü yapısında ise üç aşamalı dönüştürücü yapısı kullanılır. Şekil 3’te görüldüğü üzere, dönüştürücü sırasıyla, AA/DA dönüşüm, DA/AA ve tersine AA/DA dönüşümü yapar. Elde edilen DA, son bölümdeki tam köprü vasıtasıyla (DA/AA) şebeke frekansına uygun bir AA sinyale dönüştürülür[34,39,41,47,49]. Bir ve iki aşamalı dönüştürücülere nazaran daha fazla dönüştürücü yapısı barındırdığından dolayı verimleri düşüktür. Kullanımı bir ve iki aşamalı dönüştürücülere göre zor ve

maliyetlidir. GET içeren dönüştürücü yapıları galvanik izolasyon ve gerilim dönüşümü sağlar. Sadece giriş ve çıkış birimine sahip dönüştürücüler bir fazlı enerji dönüşümü için uygundur. Birden çok bağlantı yapısına sahip transformatörler ise bağımsız çok fazlı dönüştürücü uygulamaları için uygundur.

Dağıtım gerilim değerleri, yarı iletken teknolojilerinin ve beraberinde GET birimlerinin doğrudan kullanımı için hazır değildir. GET'lerin yüksek gerilim ve yüksek güçlerde kullanılması amacıyla bu sorunun çözümüne yönelik seri ve paralel bağlantılı hücresel yaklaşımlar kullanılır. Seri bağlantı yapısı hücreler üzerine düşen gerilimin dönüştürücü sayısı miktarına bağlı olarak giriş gerilimi dönüştürücüler arasında paylaşılır. GET'ler yüksek gerilim uygulamaları için uygundur[50-52]. Giriş ucu paralel bağlı dönüştürücülerde ise güç, dönüştürücüler arasında paylaşılsa da yarı iletken devre elemanları kullanımı nedeniyle yüksek gerilimlerde uygulamaları sınırlıdır. Giriş ucu seri bağlanan dönüştürücülere göre kontrolü basit ve kullanımı kolaydır. Hücreler üzerine düşen akım miktarının paylaşılmasını temin eder. Oluşturulan bağlantı yapıları sayesinde yarı iletkenlerin dayanım kapasitelerinin üzerindeki gerilim ve akımlarda çalışabilirlik sağlar. Bu uygulamaların dezavantajı ise güç dengesinin sağlanması amacıyla yapılması gereken karmaşık kontrol işlemleridir. Farklı sayıda hücrenin birbiri ile etkileşimli kullanılması ve güç paylaşımının kontrolü için uygun bir kontrol yöntemine gerekmektedir.

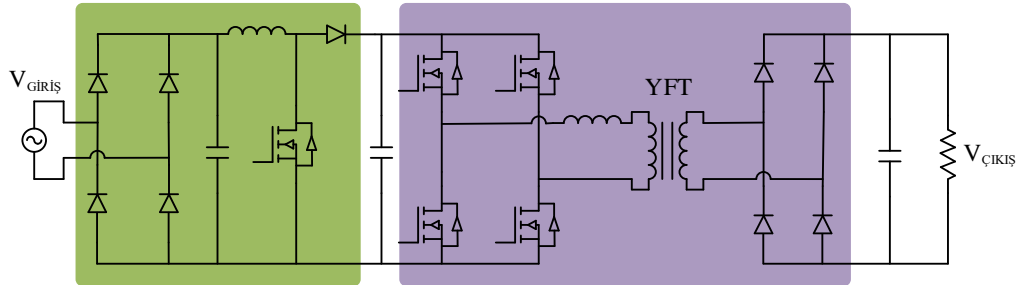


Şekil 4. Girişi seri bağlı GET dönüştürücü modelleri (a) UNIFLEX 300kVA üç faz dönüştürücü modeli[Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.], b) 20kVA, 7,2kV 120/240V AA/AA dönüştürücü modeli[52])

Seri bağlantı yapısı dönüştürücüler içerisinde daha küçük filtre elemanları kullanılarak dalgalanma akımlarının azaltılabilmesini sağlayabilir. Fakat dağıtım geriliminin artması doğrudan hücre sayısının ve kontrol karmaşıklığının artmasına neden olur. Bağlantı yapısı bu sistemlerin bir dezavantajı olarak gösterilmektedir. Şekil 4'teki yapılarda tamamen hücresel bir dönüştürücü konfigürasyonunu görülmektedir. Şekildeki birçok AA/AA topolojisinde güç hücreler arasında paylaşılmaktadır. Topolojiden dolayı, bazı sistemler herhangi bir kontrol metoduna ihtiyaç duymadan güç paylaşımını sağlayabilmektedir. Ancak, bu tüm AA/AA dönüştürücüler için doğru değildir[53].

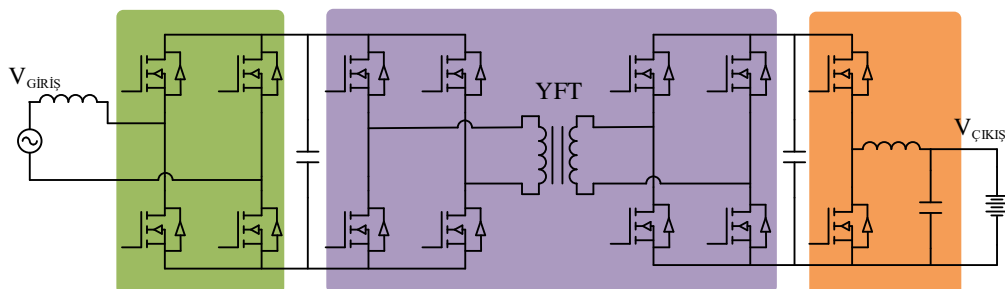
2.2. AA/DA Dönüştürücü GET Uygulamaları (AC/DC Converter SST Applications)

AA/DA GET içeren dönüştürücüler genellikle batarya şarj sistemleri ve DA kaynakla beslenen cihazlarda tercih edilen bir dönüştürücü tipidir. Bir aşamalı dönüştürücüler kaynak AA enerjisini doğrudan yüksek frekans AA enerjisine dönüşüm gerçekleştirerek transformatöre uygulanması ve transformatörden alınan sinyalin doğrultulması adımlarını içerir. İki aşamalı dönüştürücüler AA/DA dönüşümü yapan bir adet dönüştürücünün girişe bağlanarak oluşturulur. Bir aşamalı dönüştürücülere göre farkı, transformatöre uygulanan sinyalin üretilme yöntemidir. Üç aşamalı dönüştürücülerde ise iki aşamalı dönüştürücülere göre fazladan bir adet DA/DA dönüştürücü içermektedir. Örnek olarak Şekil 5'te verilen devre yapısında, alternatif akımın düzenlenmesi ve şebeke üzerindeki bozucu etkilerin minimuma indirilmesi amacıyla ek olarak bir gerilimi artırıcı kullanılmaktadır. Yaygın olarak elektrikli araçlarda tümleşik olarak kullanımı tercih edilen uygulama yöntemi her aşamada %97'ye kadar yüksek verim elde eder. İki kademeli yapı, güç faktörü düzeltme bölümü ve yüksek frekanslı transformatör bölümlü DA/DA dönüştürücü yapılarından oluşur ve toplam verimlilik %94 civarındadır. Bu sınırlama yapısal sorunlardan kaynaklandığı için, bu yapıdaki maksimum verimliliği artırmak neredeyse imkânsızdır. Ayrıca, geniş aralıklı çıkış gerilimi ve galvanik izolasyon için yüksek frekanslı bir transformatör, verimlilik ve güç yoğunluğu üzerinde olumsuz etkiye sahiptir[54-58].



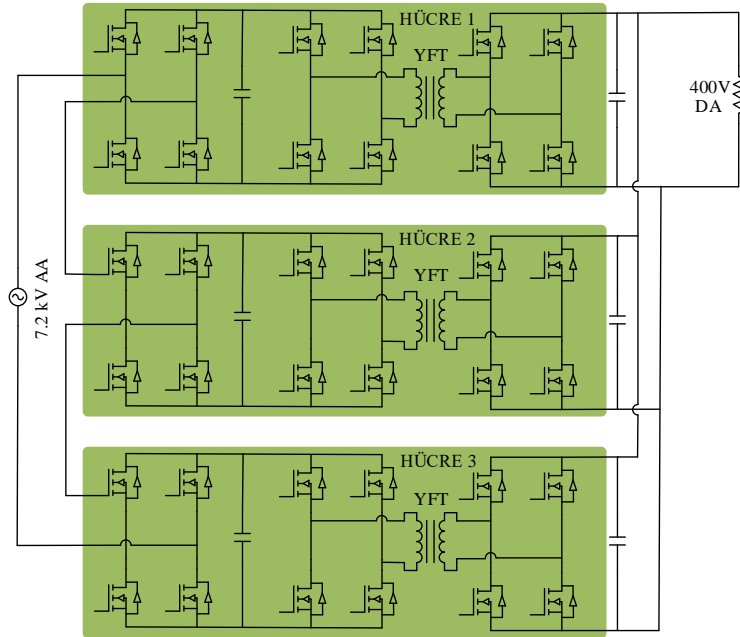
Şekil 5. Geleneksel iki aşamalı AA/DA dönüştürücü basitleştirilmiş modeli

İki aktif köprü dönüştürücüsünü temel alan üç aşamalı konfigürasyon, SST uygulaması için potansiyel bir aday olarak gösterilebilir. Bu topoloji depolama ve ek bir PV entegrasyonu için düşük gerilimli bir DA bağlantıya dayanmaktadır. PV panel depolama elemanı gibi doğrudan GET'in çıkışına bağlıdır. Şekil 6'da görüldüğü gibi ayrı izoleli olmayan ayrı DA/DA dönüştürücüler aracılığıyla elde edilir. Gerilim değerleri düşük voltaj DA geriliminden önemli ölçüde farklıysa ve/veya topraklama için izolasyon gerekliyse, ek bir YFT'ye ihtiyaç duyar ve bu durum dezavantaj olarak gösterilebilir[59].



Şekil 6. Üç aşamalı AA/DA dönüştürücü basitleştirilmiş modeli[59]

AA/DA dönüştürücüleri farklı gerilim ve güç düzeylerinin karşılanabilmesi amacıyla farklı bağlantı yapılarına sahiptir. Seri bağlantı yapısı yüksek gerilim uygulamalarında, paralel bağlantı yapısı ise aktarılan enerji miktarının artırılması amacıyla tercih edilir. Birbirleri arasında seri bağlantı yapısına sahip uygulamalar, yaygın olarak tercih edilen dönüştürücü uygulamasıdır. Şekil 7’de görülen girişi seri çıkışı paralel yapının uygulanması basit olsa da temel dezavantajı, farklı H köprülerinde meydana gelen DA gerilim dengesizliğidir[61-63]. Oluşan gerilim dengesizliği yarı iletken devre elemanlarında bozulmaya neden olmaktadır. İstenmeyen durum olarak nitelendirilen bu durum farklı kontrol ve uygulama yöntemleri ile çözülebilmektedir. En yaygın kullanılan gerilim ve güç kontrol yöntemidir. Düzenli olarak hücrelerde gerilim ve akım ölçümü yapılarak anahtarlama kontrolüne dayanır. Bu sayede gerilim ve güç hücreler arasında eşit olarak paylaştırılmış olur.



Şekil 7. AA/DA giriş seri çıkış paralel GET uygulaması[63]

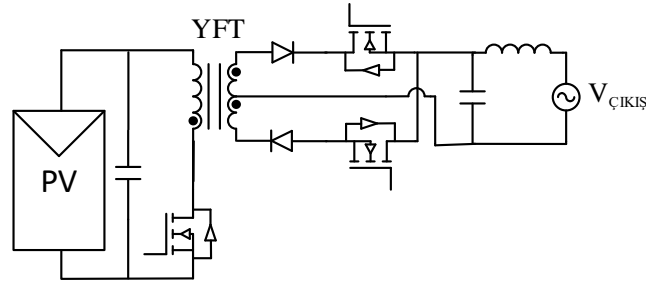
Paralel giriş paralel çıkış uygulamalarında asıl amaç gücün yükseltilmesidir. Seri bağlantı yapısına sahip uygulamalardaki gibi dönüştürücüler arasında gerilim dengesizliği yaşanmaz. Kontrolü kolaydır ve istenilen sayıda devreye alınabilir veya devreden çıkarılabilir. Bu özelliği nedeni ile esnekler. Fakat yarı iletken dayanımları nedeni ile yüksek gerilim uygulamaları için uygun değildir ve düşük gerilimlerde tercih edilen bir dönüştürücü tipidir. Girişi paralel birden çok çıkışa sahip uygulamalarda aynı kaynak üzerinden birden fazla cihazın beslenmesi amacıyla kullanılan uygulamalarda tercih edilir. Yapısı gereği farklı dönüştürme oranlarına sahip olabilmektedirler. Ayrıca bu sistemlerde iki yönlü dönüştürücüler kullanılarak ana kaynağın beslenmesi de sağlanmaktadır. Kullanımı basit ve dönüştürücüler birbirinden bağımsız olarak çalışabilmektedir.

2.3. DA/AA Dönüştürücü GET Uygulamaları (DC/AC Converter SST Applications)

Şebeke uygulamalarında GET temel iki tip dönüştürücü yapısı ile kullanılır. Bir aşamalı güneş paneli uygulamalarında giriş sinyali alternatif sinyale dönüştürülür ve çıkış sinyali doğrudan uygun şebeke gerilimine dönüştürülür[66-68]. Diğer iki aşamalı dönüştürücülerde ise DA gerilimi AA gerilimine dönüştürülerek GET'e uygulanır. Çıkış gerilimi doğrultturulur ve ikinci bir dönüştürücü yardımı ile DA sinyali AA sinyaline dönüştürülür[60,69-73,75]. Her iki uygulama tipi de güneş paneli uygulamalarında maksimum güç noktası takibi için uygundur.

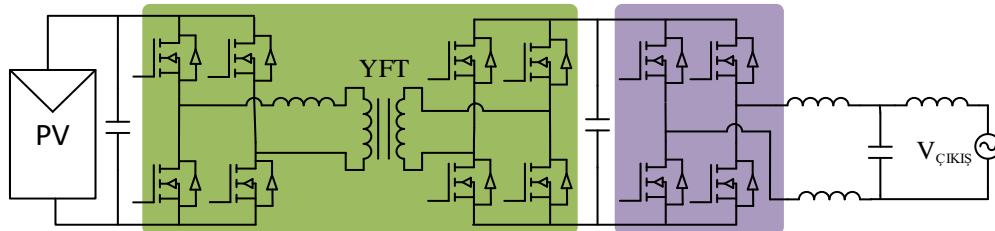
Tek seviyeli dönüştürücüler flyback tipi dönüştürücü yapıları içerirler[65-68]. Birden çok aşamalı dönüştürücülere göre DA enerji dönümü yapılmasına gerek duyulmadan direkt olarak yüksek frekans AA enerjisi, şebeke uyumlu AA enerjisine dönüştürülür. Ekstra bir dönüştürücü yapısı içermeyen tek aşamalı dönüştürücülerde eleman sayısı azdır. Birim maliyet düşük ve kontrolü basittir[65]'de yapılan flyback tipi

dönüştürücü modelinin giriş kısmı değiştirilerek iki[68] ve dört anahtarlı[66] modelleri üretilmiştir. Pek çok DA/DA dönüştürücü topolojisi, bir fazlı gerilim ve akıma izin vermek için anahtarların bir kısmını veya tamamını dört çeyrek anahtarla değiştirerek AA/AA dönüştürücülere dönüştürülebilir. Bu AA/AA dönüştürücü, en basit izole edilmiş DA/DA dönüştürücü topolojisinden, flybackten türetilmiştir. Hücre başına en az anahtar sayısına sahiptir[65]. Görev döngüsü modülasyonu çıkış gerilimi regülasyonuna izin verir. Bir DA barasının bulunmamasına ek olarak, ana dezavantaj, büyük dalgalanma akımları nedeniyle ihtiyaç duyulan filtrelerin büyüklüğüdür. Ayrıca flyback tipi dönüştürücülerin çift ikişer anahtarlı[67] gibi farklı modeli de bulunur. Bu tip dönüştürücülerin çıkış akımı düzenlidir. Elektrik şebekesi bağlantılı uygulamalarda herhangi bir filtre bobinine ihtiyaç duyulmamaktadır. Dönüştürücü girişinde bulunan bir bobin sayesinde kontrollü olarak gerilimi artırma veya azaltma özelliklerine de sahiptir. Şekil 8’de en basit hâli ile bir flyback tipi dönüştürücü yapısı görülmektedir.



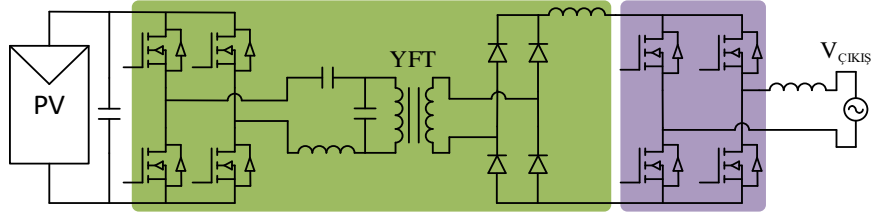
Şekil 8. Yüksek güç ayırıştırımlı flyback tipi evirici[65]

GET içeren uygulamalarda en yaygın kullanılan dönüştürücü tipi iki aşamalı DA/AA dönüştürücü yapısıdır[69-75]. DA/AA dönüştürücüler arasında, kullanım basitliği ve kontrolü ile ön plana çıkar. Bağlantı ve kontrol yapısına göre çıkış bir veya birden çok çıkışlı olabilir. Tam köprü dönüştürücü içeren uygulamalar genel olarak uygulama bakımından benzerlik gösterirler. Yüksek frekans kare sinyalin üretilmesi, doğrultma ve şebekeye uygun tam köprü DA/AA dönüştürücü kombinasyonlarını içerir. Tüm tek aşamalı SST topolojilerine göre, bu topoloji basit kontrol gerektirir. Bu dönüştürücünün basitleştirilmiş bir versiyonu Şekil 9’da verilmiştir. Bu durumda, giriş gerilimi YFT’den geçirilmeden önce %50 görev döngüsü ile yüksek frekanslı kare dalgaya dönüştürülür. Düşük gerilim tarafında, gerilim tekrar eski sinüzoidal şekline dönüştürülür. Bu basit yaklaşım giriş ve çıkış endüktif filtrelerine olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Çıkış gerilimi regülasyonu eklemek için görev döngüsü modüle edilebilir. Bununla birlikte, tam sinüzoidal dalga üretebilmek için çıkışa endüktif bir filtre ve üretilen dalgalanma akımını filtre etmek için girişe bir tane daha eklenmelidir. Bu yaklaşımın ana dezavantajı, giriş güç faktörünü etkileyen filtrelerin boyutlarının artmasıdır.



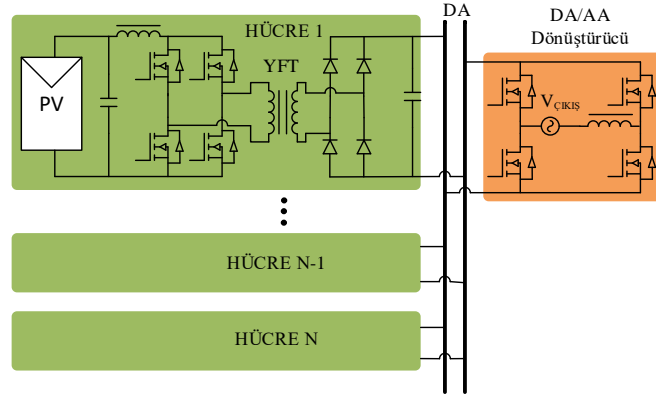
Şekil 9. Tam köprü DA/AA dönüştürücü[75]

Ayrıca iki aşamalı dönüştürücü yapılarında rezonans tipi dönüştürücü yapıları verimlilik açısından tercih edilen bir dönüştürücü yapısı olarak gösterilebilir[76-79]. Bu tip dönüştürücülerde uygun kapasite ve bobin değerinin yakalandığı frekanslarda gerilim alternatif sinyal tipinde salınım yapmaya başlar. Bu işlemde rezonans frekansına uyumlu tetikleme yapılması girişte bulunan anahtarların anahtarlama kayıplarını azaltır. Kaybın azalması ile yüksek frekans anahtarlama yapmaya olanak verir. Ayrıca yüksek verimlerde dönüştürücü yapımına izin verir. Şekil 10’da basit bir seri-paralel rezonans DA/AA eviricili DA/AA yapısı örneği sunulmuştur.



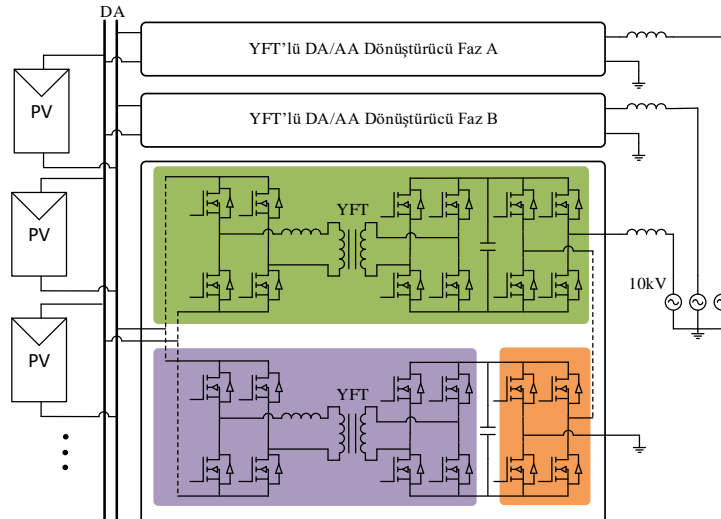
Şekil 10. Seri-paralel rezonans eviricili DA/AA dönüştürücü[77]

Güneş paneli uygulamalarında çıkış toplam gücünün artırılması için panel grupları GET'ler aracılığı ile paralel bağlanmaktadır[80-84]. Her panel grubu YFT içeren birer dönüştürücü kullanılarak ortak bir DA baraya bağlanır. Bununla birlikte, bu yapıların AA çıkışlıları da mevcuttur. DA çıkışlılarda şebeke bağlantısı için merkezi bir DA/AA dönüştürücü kullanılır. Uygulamada her PV panel grubu galvanik izolasyon, maksimum güç takibi olanağı sağlanmakta ve istenilen sayıda PV panel bağlantısı gerçekleştirmeye imkân verir. Diğer dönüştürücülerden bağımsız olarak çalıştırılabilir. İstenilen güce göre istenilen sayıda paralel dönüştürücü sisteme eklenebilir. Fakat büyük güçlü uygulamalarda AA hattının yanında ayrıca bir DA hattının kullanılması kablo maliyeti ve uygulanabilirlik açısından bu tip uygulamaların dezavantajı olarak gösterilebilir.



Şekil 11. Birden çok hücreli evirici modeli[80-84] Hücre başı maksimum güç 1500W, gerilim 200~500V

PV panellerin dönüştürücü olmaksızın bir DA baraya bağlanmasıyla oluşturulan uygulamalar da bulunmaktadır[85]. Bu uygulamalarda bir DA/AA vasıtasıyla güç dönüşümü yapılmaktadır. Her DA/AA dönüştürücü çıkışı uygun sayıda seri bağlı iki aşamalı dönüştürücü gruplarından oluşur. En basit hali ile devre yapısı Şekil 12'de gösterilmiştir.

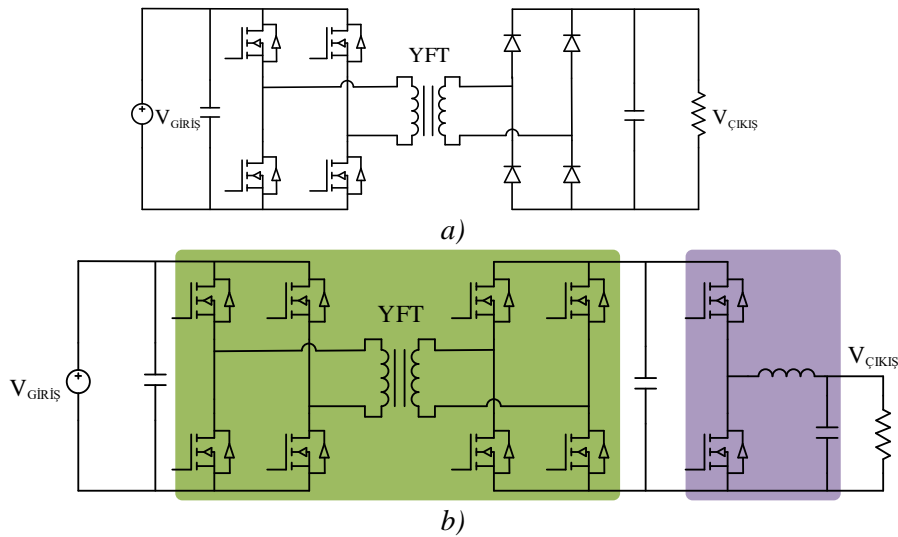


Şekil 12. Paralel bağlı PV grubundan DA/AA yüksek gerilim şebeke uygulaması[85]

Ortak bir DA hattına bağlı uygulamalarda istenilen sayıda PV panel kullanılabilmektedir. Fakat yüksek güçlü uygulamalarda PV paneller dış etkilerin neden olduğu kirlilik, gölgelenme gibi durumlar nedeniyle farklı akım ve gerilim özellikleri gösterir. Bu nedenle paralel bağlantılı PV panel maksimum güç noktası uygulamalarında tüm panellerden aynı verim alınması zordur. Bu tip uygulamalar maksimum güç noktası takibi için çok uygun değildir. Çıkışı seri bağlı uygulamalarda herhangi bir gerilimi artıran dönüştürücü kullanmadan, yüksek gerilimler elde edilmesi sağlanır. Fakat dengeli bir gerilim artışı, dönüştürücüler arasında gerilim ve güç paylaşımı ile sağlanabilir. İhtiyacın karşılanabilmesi her hücrede akım ve gerilimin ölçümü ve kontrolü ile mümkündür. Ayrıca seri bağlantılı uygulamalar herhangi bir devre elemanında meydana gelen arızanın bağlı olduğu fazı etkilenmesi muhtemel ve devreden çıkarılmasını gerektirir.

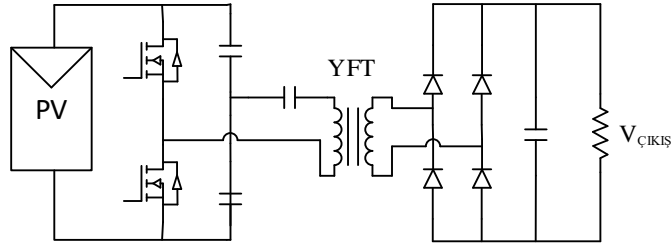
2.4. DA/DA Dönüştürücü GET Uygulamaları (DC/DC Converter SST Applications)

GET kullanılan DA/DA dönüştürücü yapıları transformatörün çalışabilmesi için fazladan dönüştürme işlemine ihtiyaç duyar. İhtiyacın karşılanabilmesi dönüştürücü sayısının artırılması ile mümkündür. Bu tipteki GET'ler DA/AA ve AA/DA dönüştürücü uygulamaları ile kullanılırlar. Yapısında bulunan GET ve fazladan dönüştürücü yardımı ile daha geniş aralıklarda gerilim dönüşümü mümkündür. Diğer dönüştürücülere oranla kontrolü basit ve uygulaması kolaydır. Kolaylıkla basit bir PI kontrol metodu ile denetleme gerçekleştirilebilir. Bu tip dönüştürücü yapıları iki ve üç aşamalı olarak uygulanabilmektedir. Bir aşamalı DA/DA dönüştürücüler en basit hali ile tam köprü evirici ve tam köprü doğrultucu yarı iletken devre elemanları barındırmaktadır. Giriş enerjisi transformatöre uygulanan yüksek frekanslı sinyalin oluşturulması ve transformatörden alınan sinyalin bir adet tam köprü doğrultucu vasıtası ile doğrultulması basamaklarını içerir. İki aşamalı GET içeren DA/DA dönüştürücülerde ise bir aşamalı dönüştürücülere ek bir adet azaltan tip dönüştürücü kullanarak oluşturulmuştur. Bu iki dönüştürücü yapısı da Şekil 13'de basitleştirilmiş olarak paylaşılmıştır.



Şekil 13. Basitleştirilmiş DA/DA dönüştürücü uygulamaları (a) bir aşamalı [96], b) iki aşamalı)

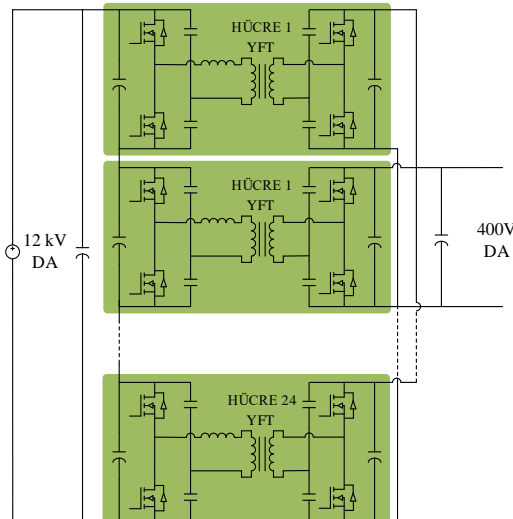
Klasik tipteki GET'lerin yanı sıra bir aşamalı GET içeren rezonans tipi DA/DA dönüştürücüler de bulunmaktadır. Rezonans tipi dönüştürücüler düşük giriş akım stresi, yüksek gerilim dönüşüm oranı, anahtarların düşük iletim kaybı, yüksek verim ve düşük akım salınımları gibi birçok avantaja sahiptir. Bu tip dönüştürücülerde DA enerjisinin AA enerjisine dönüştürülmesi için rezonans devresinin çıkışı transformatörün birincil sargılarına uygulanır. İkincil sargıdan alınan AA sinyal doğrultularak DA'ya dönüştürülür [87-93]. Yarım köprü rezonans dönüştürücülerde (Şekil 14) sıfır akım anahtarlama, uygun bir kapasiteye sahip kondansatör, anahtarlama frekansı ayarlanabilen sürücü sinyalleri, transformatör kaçak endüktansı ve transformatör sargılarına seri bağlı kondansatör kullanılarak gerçekleştirilir. Bunun dışında, MOSFET anahtarlarına paralel olarak bağlanan kapasitif devre elemanlarının kullanılmasıyla yüksek verim elde edilir. Böylece sıfır gerilimde ve neredeyse sıfır akımda değiştirilebilirler. Doğrultucu diyotları sıfır akımda değiştirilir. Anahtarlama kayıpları düşük olduğu için sadece iletim kayıpları baskındır [87].



Şekil 14. Rezonans yarım köprü dönüştürücü [Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.]

[89]'daki yarım köprü rezonans tipi dönüştürücüler düşük gerilim DA/DA dönüşümü için iki bobinli dönüştürücü modelini içerir. Sıfır gerilimde anahtarlama için paralel kondansatörler transformatöre seri olarak bağlanır. Böylece transformatör bobiniyle rezonansa girerek sıfır gerilim geçişi sağlanır. Akım beslemeli birden çok rezonans dönüştürücüye sahip modellerde[91], iki bobin ve bir yarım köprü dönüştürücü arasında rezonans oluşur. Çıkış tam köprü doğrultucudan oluşur. Yüksek geçiş akımı ve transformatör ikincil sargı kayıpları nedeniyle yüksek güç uygulamalarında verim sınırlanabilir. Yüksek gerilim kazancı ve düşük salınımlı giriş akımına sahip geliştirilmiş dönüştürücülerde ise[90] transformatörün dönüş akımını azaltmak için gerilim katlayıcı uygulamaktadır. Kayıpların azalmasını sağlayacak bu durum transformatör boyutlarında küçülme ve bununla beraber maliyetin de azalmasını sağlamaktadır. Diğer dönüştürücüler ile benzer şekilde yarı iletkenler yüksek gerilim ve yüksek güç seviyelerinde direk olarak kullanıma uygun olmaması GET'lerin birbiri aralarında seri ve paralel bağlantı yapılarını zorunlu kılar. GET'lerin yüksek gerilim değerlerini karşılayabilmesinde kullanılan en yaygın yöntem seri bağlantı yapısıdır. Yüksek güç değerinin karşılanabilmesi için kullanılan en yaygın tip ise paralel bağlantı yapısıdır. Seri bağlantı yapısında asıl amaç dönüştürücüler arasında gerilimi paylaşmak, paralel bağlantı yapısında ise asıl amaç gücün paylaşılmasıdır.

Girişin seri, çıkışın paralel bağlantı yapısının tercih edildiği [43]'teki 20kVA bir GET modeli, YFT'li çift yönlü DA/DA konvertör hücreleri, geniş yük aralığında yüksek verime sahip olarak uygulanmıştır. Bu dönüştürücü yapısında girişi seri çıkışı paralel bağlantı yapısı kullanılmıştır. Yüksek frekanslı galvanik izolasyon, çift yönlü güç akışı ve tüm anahtarlama cihazlarının sıfır gerilimde tetiklenmesi sağlanmıştır. Ayrıca, her bir hücre için bir faz kayması çift yarım köprü dönüştürücü kullanılarak yüksek frekanslı çalışmalarda dâhi anahtarlama kayıpları azaltılmıştır. Geniş gerilim aralığında yüksek verim ve yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir. Önerilen çift yarım köprü dönüştürücüsündeki adaptif bobinli anahtar cihazların mevcut gerilimi, geleneksel çift yarım köprü dönüştürücüsüne göre düşüktür. Uyarlanabilir bobin, diğer faz kaymalı çift köprü dönüştürücülere uygulanabilir ve aynı avantajlar elde edilebilir. Ek olarak, bir araya getirilmiş sargılara sahip olan bir düzlemsel transformatör, düşük çekirdek kaybı, optimize edilmiş yüksek frekanslı bakır kaybı, düşük profil ve daha fazla güvenilirliğe yol açan katı yalıtım elde etmek için tasarlanmıştır. 50kHz çalışma ile geniş bir yük aralığında %97,2'ye kadar yüksek verim elde edilmiştir[43].



Şekil 15. Giriş seri çıkış paralel rezonans tipi dönüştürücü yapısı[43].

3. BİR DEN ÇOK BAĞLANTILI GET TASARIMI VE UYGULAMASI (DESIGN AND APPLICATION OF MULTIPLE-LINK SST)

Transformatör seçimi ve tasarım işleminde, transformatörün çıkış gücü, çalışma frekansı ve elde edilmesi beklenen hedef verim göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla seçilen transformatör tasarım parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Hedef Transformatör Parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Değeri</i>
<i>Çıkış gücü (P_o)</i>	2000W
<i>Doğru akım bara gerilimi</i>	100-300V
<i>Çalışma frekansı (f_{SST})</i>	22kHz
<i>Çıkış gerilimi</i>	100-300V
<i>Çıkış akımı (V_{min} değerinde)</i>	10A(I_{max})
<i>Hedef verim (η)</i>	%95
<i>Regülasyon</i>	%0,5
<i>Doluluk oranı</i>	%40

Anahtarlama elemanı olarak seçilecek mosfet devre elemanının en verimli çalışma koşulunun sağlanması ve ısınma probleminin optimum seviyede tutulması kayıpların en aza indirgenmesi açısından önemlidir. Anahtarlama frekansının artması verimi düşürmekte ve toplam enerji dönüşüm miktarında azalmaya neden olmaktadır. YFT’lerde ise anahtarlama frekansı verimi artırarak toplam güç hacmini artırmaktadır. YFT ile mosfetlerin birleşimi olarak düşünülen GET sisteminde verimlilik açısından uygun değer olarak 20kHz’lik bir sinyal belirlenmiştir. Fakat hesaplamalar doğrultusunda güç hacmi sınırının hedef güç değerinin altında kaldığı görülmüş ve 22kHz’lik bir anahtarlama sinyali olarak değiştirilmiştir. 22kHz’de ve 20°C’de ($\rho = 1.70 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$)[94] bakır iletkenlerin deri kalınlığı $\delta = 66/\sqrt{22000} \cong 0,445 \text{ mm}$ ’dir. Alternatif akımın deri ve yaklaşım etkisine bağlı olarak kayıpları azaltabilmek ve belirtilen akımları taşıyabilmesi amacıyla 2δ kalınlığında litz teli kullanılabilirdi. Ancak yüksek frekans nedeniyle deri ve yaklaşım etkisini en aza indirmek ve dönüşüm işlemleri sırasında önemi kritik olan verimin üst düzeye çıkarılabilmesi amacıyla bakır folyo iletkenler tercih edilmiştir. Tablo 2’de verilen parametrelerden görüldüğü üzere, transformatör malzemesi olarak TDG firması tarafından üretilen MnZn (Mangan-Çinko) alaşımlı ferrit TP4 seçilmiştir.

Tablo 2. Transformatör Çekirdeğinin Parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Değeri</i>
<i>Manyetik malzeme</i>	TDG MnZn TP4
<i>AL</i>	9080nH
<i>Manyetik yol uzunluğu</i>	147mm
<i>Pencere kesiti</i>	5,54cm ²
<i>Çekirdek kesiti</i>	5,35cm ²
<i>Güç hacmi ($W_a A_c$)</i>	29,6cm ⁴
<i>Hacim</i>	78,6cm ³
<i>Ortalama tur uzunluğu</i>	14cm

Malzeme tipinin belirlenmesinin ardından, çekirdek boyutlarına karar verilmesi amacıyla, hedeflenen güç çevrim miktarı, iletken ve transformatöre uygulanması düşünülen frekansa göre çekirdek güç hacmi hesaplaması yapılmıştır. Burada çekirdek boyutu seçimi için Denklem 1 kullanılmıştır[95].

$$W_a A_c = \frac{P_o}{\Delta B f J K} \quad 1$$

İstenilen değerler ve malzeme özellikleri yerine konularak;

$$W_a A_c = \frac{2000}{0,27 \times 22000 \times 3 \times 10^6 \times 0,40} = 28 \text{ cm}^4 \quad 2$$

güç hacmi bulunmuştur. Verimin çok önemli olduğu şarj sistemlerinde çekirdek seçimi büyük öneme sahiptir. Verimi artırabilmek amacıyla manyetik geçirgenliği yüksek EE 65/65/27 boyutlarındaki ferrit çekirdek seçilmiştir.

Bu veriler yardımıyla hesaplanan birincil sarım sayısı Denklem 3 ile hesaplanmaktadır[96].

$$N_p = \frac{V_{in}^{min} d^{max}}{f A_c \Delta B} \quad 3$$

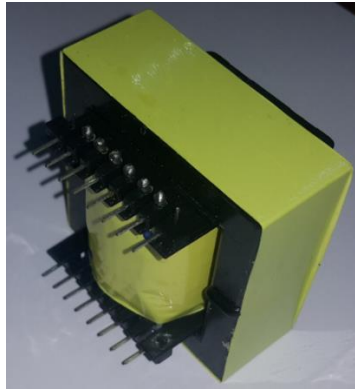
$$N_p = \frac{100 \times 0,40}{22000 \times 5,35 \times 10^{-4} \times 0,27} = 12,58 \quad 4$$

Sarım sayısı Denklem 4'teki gibi bulunmuştur. Kullanılan transformatör 3:1'lik dönüştürme oranına sahip olduğundan dolayı ($\frac{N_p}{3} = \frac{12,58}{3}$ den $N = 4,194$) N değeri 4,194 tur olarak bulunmuştur. İstenilen güç değerlerinin karşılanabilmesi amacıyla bir üst değer olan 5 sarım olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yaklaşık sargı endüktansı Denklem 5 ile hesaplanmıştır[96].

$$L = N^2 \times A_L \quad 5$$

$$L_{1N} = 5^2 \times 9080 \times 10^{-9} = 227 \mu H \quad 6$$

$$L_{3N} = 15^2 \times 9080 \times 10^{-9} = 2043 \mu H \quad 7$$



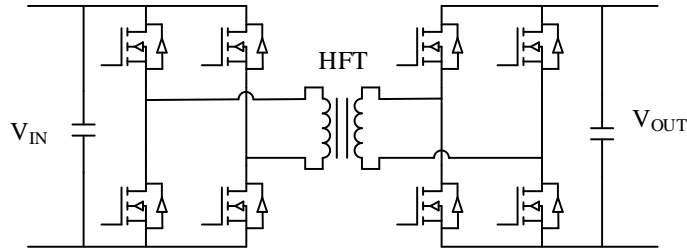
Şekil 16. Transformatörün perspektif görüntüsü

Manyetik geçirgenlik, hava aralığının artması ile azalmaktadır. Bu nedenle hesaplanan endüktans ile gerçek koşullarda ölçülen endüktans arasında farklılık olmaktadır. Ölçülen ve Denklem 5'e göre hesaplanan değerler Tablo 3'de gösterilmektedir.

Tablo 3. Transformatör ölçülen ve hesaplanan endüktans değerleri

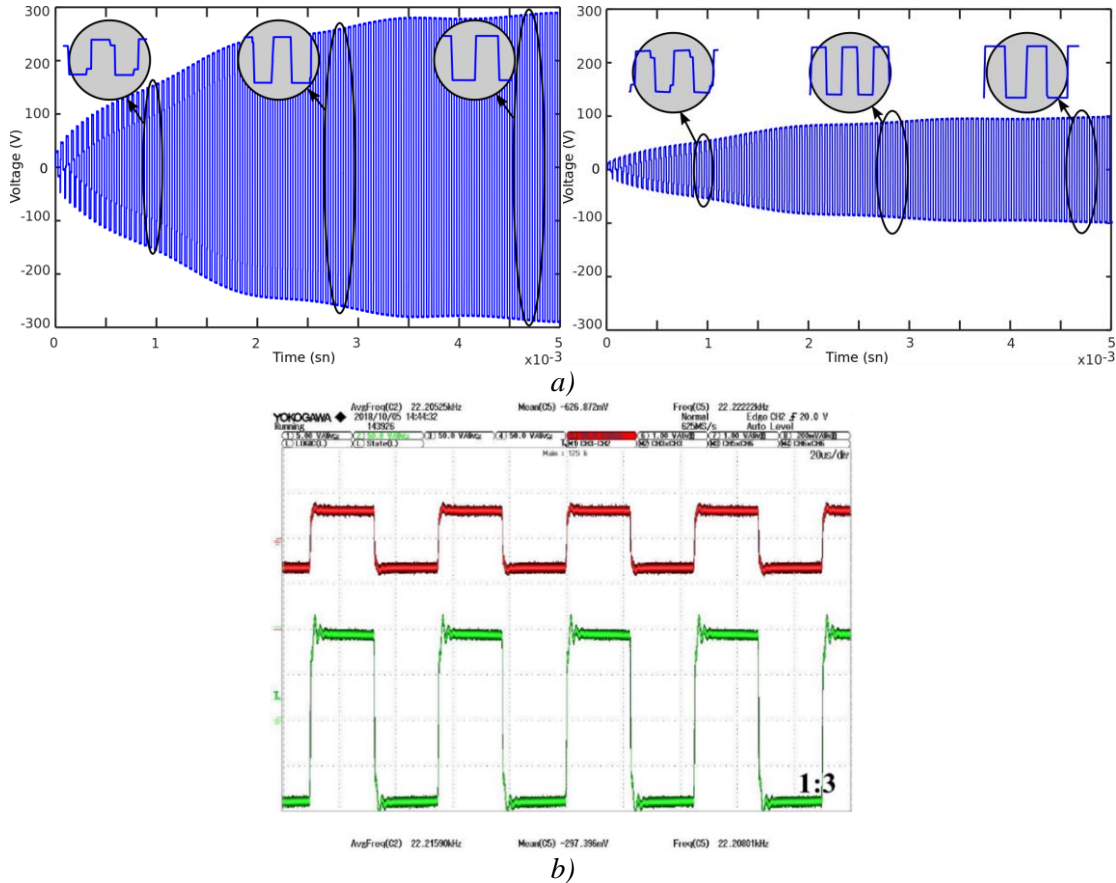
Parametre	Ölçülen	Hesaplanan	Fark
L_{1N}	205 μH	227 μH	%9,3
L_{2N}	1845 μH	2043 μH	%9,3

Tasarımı ve üretimi tamamlanan YFT test amacıyla bir adet DA/DA dönüştürücü yapısı ve tam köprü dönüştürücü kullanılarak oluşturulmuştur. Devre şeması Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. GET benzetim ve uygulama devresi

Devre Infineon marka IRS2453D sürücü, ST marka 20A ve 600V dayanım değerlerine sahip 20NM60 adlı mosfet ve 220 μ F/400V değerinde kondansatörler ile kurulmuştur. 22kHz ile anahtarlama işlemi gerçekleştirilen transformatörün giriş ve çıkış sinyallerinin benzetim ve uygulama sonuçları Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. YFT giriş ve çıkış sinyallerinin gözlemlenmesi (a) benzetim sonucu, b) uygulama sonucu)

Yaygın kullanım alanına sahip gerilimi azaltan tip dönüştürücü uygulamalarına bir örnek olarak gösterilebilecek bu dönüştürücü yapısında, 300V DA gerilim bir tam köprü dönüştürücü yardımı ile 22kHz değerinde bir alternatif kare sinyaline dönüştürülmüştür. Oluşturulan AA gerilim 3:1 dönüştürme oranına sahip bir transformatör ile 100V AA’ya dönüştürülmüştür. Bu işlem sonucunda istenilen düzeyde gerilim dönüştürme oranının sağlandığı görülmüştür. Giriş gerilimi ve çıkış geriliminde gözlemlenen kare dalganın geçici durumda yapısının bozulması transformatörün çıkışında bulunan kondansatörden kaynaklanmaktadır. Başlangıç koşullarında kondansatör hızlı olarak şarj olma eğilimi göstermektedir. Kısa bir süre transformatör bu yüksek güç ihtiyacını karşılayamamaktadır. Bu nedenle, çıkış sinyalinde ve genlik

değerinde stabil olmayan bir değişim görülmüştür. 3-4 saniyelik bu geçici durumdan sonra sistem kalıcı durum değerine ulaşmış ve GET devre yapısı kararlı çalışma durumuna geçmiştir.

Yarı iletken devre elemanlarındaki anahtarlama sinyalinin yükselme ve düşme hızları GET'in doyuma ulaşmadan farklı limitler çerçevesinde kullanılabilmesini göstermektedir. Genellikle anahtarlama limitleri transformatörün çalışma frekansını belirleyen ana unsur olmaktadır. Yeni gelişen silisyum karbür tipi mosfetlerin uygulanabilir GET anahtarlama limitlerine ulaşması kolaydır. Ayrıca, çok daha küçük boyutlarda fazladan dönüştürücü yapılarına ihtiyaç duymadan daha yüksek gerilim dönüştürme olanağı doğuracağı düşünülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu makalede GET'lerde kullanılan farklı topolojilerin sınıflandırılması ve detaylı incelemesi sunulmuştur. Farklı bağlantı yapılarının kullanılması kontrol karmaşıklığına neden olsa da yüksek güç ve gerilimlerde çalışmaya olanak sağlamaktadır. Güç elektroniğindeki gelişmeler ve kullanılan yarı iletken malzemelerinin yüksek frekanslarda anahtarlabilmesi GET'lerin şebeke uygulamalarında kullanılabilirliğini artırmıştır. Gelişen teknoloji doğrultusunda malzeme alanındaki iyileştirmeler, GET'in daha küçük boyutlarda üretimini ve daha küçük devre elemanları ile beraber kullanılmasını sağlamaktadır. Bununla beraber GET'in lokomotif, uçak ve gemi elektrik sistemi gibi maliyetten ziyade büyüklüğün ve ağırlığın önemli olduğu uygulamalarda yaygınlaşacağı tahmin edilmektedir. GET'in farklı alanlarda kullanılması ve referans tasarım adımlarına göre basit ve anlaşılır bir şekilde yapılması önemlidir. Bu amaçlar, bir yüksek frekans transformatörünün tasarım adımları ve ilk örnek işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüksek frekans transformatörü uygulamalarında yaygın olarak kullanılan tam köprü dönüştürücü üzerinde benzetim ve ölçümlenmelere yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlar tasarlanan sistemin öngörülen çalışma koşullarını sağladığını ve dönüşümü başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (*Proje No: 07/2018-08*) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Magnetics® Databook, 2004 Magnetics Catalog, www.mag-inc.com.
- [2] Ferroxcube® Databook, "Soft Ferrites and Accessories", www.ferroxcube.com.
- [3] Siemens® Databook, "Ferrites and Accessories", www.epcos.com.
- [4] TDK® Databook, "Ferrites for SMPS", www.tdk.com.
- [5] Dujic, D., Kieferndorf, F., & Canales, F. (2012). Power electronic transformer technology for traction applications—an overview. *Electronics*, 16(1), 50-56.
- [6] Du, Y., Lukic, S., Jacobson, B., & Huang, A. (2011). Review of high power isolated bi-directional DC-DC converters for PHEV/EV DC charging infrastructure. In 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 553-560.
- [7] Lee, Y. J., Khaligh, A., & Emadi, A. (2009). Advanced integrated bidirectional AC/DC and DC/DC converter for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 58(8), 3970-3980.
- [8] Wang, F., Duarte, J. L., & Hendrix, M. A. (2011). Grid-interfacing converter systems with enhanced voltage quality for microgrid application—Concept and implementation. *IEEE Transactions on power electronics*, 26(12), 3501-3513.
- [9] Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., & Rodriguez, P. (2012). Control of power converters in AC microgrids. *IEEE transactions on power electronics*, 27(11), 4734-4749.

- [10] Revathi, B. S., & Prabhakar, M. (2016). Non-isolated high gain DC-DC converter topologies for PV applications—A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 920-933.
- [11] Zhao, Z., Xu, M., Chen, Q., Lai, J. S., & Cho, Y. (2012). Derivation, analysis, and implementation of a boost–buck converter-based high-efficiency PV inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(3), 1304-1313.
- [12] Buning, E. A. (2010). Electric drives in agricultural machinery—approach from the tractor side. *Journal of Agricultural Engineering*, 47(3), 30-35.
- [13] Burmester, D., Rayudu, R., Seah, W., & Akinyele, D. (2017). A review of nanogrid topologies and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 760-775.
- [14] Hemetsberger F. A. (2003). An Investigation Of Power Quality Problems In A Remote Mine Site, M.S. Thesis, The University of Queensland.
- [15] McMurray, W. (1970). U.S. Patent No. 3,517,300. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [16] Brooks, J. L. (1980). Solid State Transformer Concept Development (No. CEL-TN-1575). Civil Engineering Lab (navy) port hueneme ca.
- [17] Yang, L., Zhao, T., Wang, J., & Huang, A. Q. (2007). Design and analysis of a 270kW five-level DC/DC converter for solid state transformer using 10kV SiC power devices. In 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 245-251.
- [18] Ronan, E. R., Sudhoff, S. D., Glover, S. F., & Galloway, D. L. (2000). Application of power electronics to the distribution transformer. In APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 2, 861-867.
- [19] Lotfi, A. W., & Wilkowski, M. A. (2001). Issues and advances in high-frequency magnetics for switching power supplies. *Proceedings of the IEEE* 89.6, 833-845.
- [20] Shi, Y., Li, R., Xue, Y., & Li, H. (2016). High-frequency-link-based grid-tied PV system with small DC-link capacitor and low-frequency ripple-free maximum power point tracking. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(1), 328-339.
- [21] Qin, H., & Kimball, J. W. (2009). Ac-ac dual active bridge converter for solid state transformer. In 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 3039-3044.
- [22] Abedini, A., & Lipo, T. (2010). A novel topology of solid state transformer. In 2010 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 101-105.
- [23] Banaei, M. R., & Salary, E. (2011). Power quality improvement based on novel power electronic transformer. In 2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and technologies Conference, 286-291.
- [24] Ai-juan, J., Hang-tian, L., & Shao-long, L. (2006). A new matrix type three-phase four-wire power electronic transformer. In 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1-6.
- [25] Mohapatra, K. K., & Mohan, N. (2008). Matrix converter fed open-ended power electronic transformer for power system application. In 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 1-6.
- [26] Mirmousa, H., & Zolghadri, M. R. (2007). A novel circuit topology for three-phase four-wire distribution electronic power transformer. In 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 1215-1222.

- [27] Sabahi, M., Goharrizi, A. Y., Hosseini, S. H., Sharifian, M. B. B., & Gharehpetian, G. B. (2010). Flexible power electronic transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(8), 2159-2169.
- [28] Sabahi, M., Hosseini, S. H., Sharifian, M. B., Goharrizi, A. Y., & Gharehpetian, G. B. (2010). Zero-voltage switching bi-directional power electronic transformer. *IET power electronics*, 3(5), 818-828.
- [29] Drabek, P., Peroutka, Z., Pittermann, M., & Cedl, M. (2011). New configuration of traction converter with medium-frequency transformer using matrix converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(11), 5041-5048.
- [30] Hugo, N., Stefanutti, P., Pellerin, M., & Akdag, A. (2007). Power electronics traction transformer. In *2007 European conference on power electronics and applications*, 1-10.
- [31] Carpita, M., Marchesoni, M., Pellerin, M., & Moser, D. (2008). Multilevel converter for traction applications: Small-scale prototype tests results. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(5), 2203-2212.
- [32] Glinka, M., & Marquardt, R. (2005). A new AC/AC multilevel converter family. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(3), 662-669.
- [33] Mao, X., Falcones, S., & Ayyanar, R. (2010). Energy-based control design for a solid-state transformer. In *Power and Energy Society General Meeting. IEEE*, 1-7.
- [34] Bifaretti, S., Zanchetta, P., Watson, A., Tarisciotti, L., & Clare, J. C. (2011). Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(2), 231-243.
- [35] Zhao, T., Yang, L., Wang, J., & Huang, A. Q. (2007). 270kVA solid state transformer based on 10 kV SiC power devices. In *2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 145-149.
- [36] Ronan, E. R., Sudhoff, S. D., Glover, S. F., & Galloway, D. L. (2002). A power electronic-based distribution transformer. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 537-543.
- [37] Lai, J. S., Maitra, A., Mansoor, A., & Goodman, F. (2005). Multilevel intelligent universal transformer for medium voltage applications. In *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference*, Vol. 3, 1893-1899.
- [38] Wang, G., Baek, S., Elliott, J., Kadavelugu, A., Wang, F., She, X., ... & Gould, R. (2011). Design and hardware implementation of Gen-1 silicon based solid state transformer. In *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 1344-1349.
- [39] Grider, D., Das, M., Agarwal, A., Palmour, J., Leslie, S., Ostop, J., ... & Hefner, A. (2011). 10 kV/120 A SiC DMOSFET half H-bridge power modules for 1 MVA solid state power substation. In *2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 131-134.
- [40] Energy Conversation Program for Commercial Equipment, Distribution Transformers Energy Conversation Standards, CFR Standard 431, Oct. 2007.
- [41] Hatua, K., Dutta, S., Tripathi, A., Baek, S., Karimi, G., & Bhattacharya, S. (2011). Transformer less Intelligent Power Substation design with 15kV SiC IGBT for grid interconnection. In *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 4225-4232.
- [42] Ortiz, G., Leibl, M., Kolar, J. W., & Apeldoorn, O. (2013, April). Medium frequency transformers for solid-state-transformer applications—Design and experimental verification. In *2013 IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 1285-1290.

- [43] Fan, H., & Li, H. (2011). High-frequency transformer isolated bidirectional DC–DC converter modules with high efficiency over wide load range for 20kVA solid-state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(12), 3599-3608.
- [44] G. Brando, A. Dannier, and A. D. Pizzo, (2010) A simple predictive control technique of power electronic transformers with high dynamic features. In *Proc. IEEE PEMD*, 1–6.
- [45] Komrska, T., & Peroutka, Z. (2008). Main traction converter with medium-frequency transformer: Control of converters around MF transformer. In *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 1194-1198.
- [46] Steiner, M., & Reinold, H. (2007). Medium frequency topology in railway applications. In *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, 1-10.
- [47] M. Claessens, D. Dujic, J. K. Steinke, P. Stefanutti, and C. Vetterli.(2012). Traction transformation: A power electronic traction transformer (PETT). *ABB Rev.*, 3(16), 1–3.
- [48] Falcones, S., Mao, X., & Ayyanar, R. (2010). Topology comparison for solid state transformer implementation. In *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, 1-8.
- [49] Wang, D., Mao, C., Lu, J., Fan, S., & Chen, L. (2005). The research on characteristics of electronic power transformer for distribution system. In *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, 1-5.
- [50] Iman-Eini, H., & Farhangi, S. (2006). Analysis and design of power electronic transformer for medium voltage levels. In *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1-5.
- [51] Zhao, B., Song, Q., & Liu, W. (2015). A Practical Solution of High-Frequency-Link Bidirectional Solid-State Transformer Based On Advanced Components in Hybrid Microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(7), 4587-4597.
- [52] Bhattacharya, S., Zhao, T., Wang, G., Dutta, S., Baek, S., Du, Y., ... & Huang, A. Q. (2010). Design and development of generation-I silicon based solid state transformer. In *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 1666-1673.
- [53] Wang, L., Zhang, D., Wang, Y., Wu, B., & Athab, H. S. (2016). Power and voltage balance control of a novel three-phase solid-state transformer using multilevel cascaded H-bridge inverters for microgrid applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(4), 3289-3301.
- [54] Kim, J. S., Choe, G. Y., Jung, H. M., Lee, B. K., Cho, Y. J., & Han, K. B. (2010). Design and implementation of a high-efficiency on-board battery charger for electric vehicles with frequency control strategy. In *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-6.
- [55] Liu, C., Gu, B., Lai, J. S., Wang, M., Ji, Y., Cai, G., ... & Sun, P. (2013). High-efficiency hybrid full-bridge–half-bridge converter with shared ZVS lagging leg and dual outputs in series. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(2), 849-861.
- [56] Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2013). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE transactions on Power Electronics*, 28(5), 2151-2169.
- [57] Gu, B., Lai, J. S., Kees, N., & Zheng, C. (2013). Hybrid-switching full-bridge DC–DC converter with minimal voltage stress of bridge rectifier, reduced circulating losses, and filter requirement for electric vehicle battery chargers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(3), 1132-1144.
- [58] Khaligh, A., & Dusmez, S. (2012). Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(8), 3475-3489.

- [59] Falcones, S., Ayyanar, R., & Mao, X. (2013). A DC–DC multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2192-2203.
- [60] Jung, Y., Yu, G., Choi, J., & Choi, J. (2002). High-frequency DC link inverter for grid-connected photovoltaic system. In *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1410-1413.
- [61] Shi, J., Gou, W., Yuan, H., Zhao, T., & Huang, A. Q. (2011). Research on voltage and power balance control for cascaded modular solid-state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(4), 1154-1166.
- [62] She, X., Huang, A. Q., & Wang, G. (2011). 3-D space modulation with voltage balancing capability for a cascaded seven-level converter in a solid-state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(12), 3778-3789.
- [63] Zhao, T., Wang, G., Bhattacharya, S., & Huang, A. Q. (2013). Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(4), 1523-1532.
- [64] Krishnaswami, H. (2011). Photovoltaic microinverter using single-stage isolated high-frequency link series resonant topology. In *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 495-500.
- [65] Shimizu, T., Wada, K., & Nakamura, N. (2002). A flyback-type single phase utility interactive inverter with low-frequency ripple current reduction on the DC input for an AC photovoltaic module system. In *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No. 02CH37289)*, Vol. 3, 1483-1488.
- [66] Kjaer, S. B., & Blaabjerg, F. (2003). Design optimization of a single phase inverter for photovoltaic applications. In *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist. PESC'03. Vol. 3*, 1183-1190.
- [67] Nagao, M., & Harada, K. (1997). Power flow of photovoltaic system using buck-boost PWM power inverter. In *Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Vol. 1, 144-149.
- [68] Papanikolaou, N. P., Tatakis, E. C., Critsis, A., & Klimis, D. (2003). Simplified high frequency converter in decentralized grid-connected PV systems: a novel low-cost solution. In *proc. EPE'03*.
- [69] Kjaer, S. B. (2005). Design and control of an inverter for photovoltaic applications. Institute of Energy Technology, Aalborg University. 2004-2005.
- [70] Mekhilef, S., Rahim, N. A., & Omar, A. M. (2000). A new solar energy conversion scheme implemented using grid-tied single phase inverter. In *2000 TENCON Proceedings. Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium. Vol. 3*, 524-527.
- [71] Martins, D. C., & Demonti, R. (2002). Grid connected PV system using two energy processing stages. In *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 1649-1652.
- [72] Martins, D. C., & Demonti, R. (2001). Photovoltaic energy processing for utility connected system. In *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 37243). Vol. 3*, 1965-1969.
- [73] Lohner A., Meyer T., Nagel A. (1996). A new panel-integratable inverter concept for grid-connected photovoltaic systems, *IEEE proc. of the 1996 international symposium on industrial electronics (ISIE'96)*. Vol. 2, 827-831.

- [74] Wang, Z., & Li, H. (2011). Integrated MPPT and bidirectional battery charger for PV application using one multiphase interleaved three-port dc-dc converter. In 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 295-300.
- [75] Cacciato, M., Consoli, A., Attanasio, R., & Gennaro, F. (2010). Soft-switching converter with HF transformer for grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(5), 1678-1686.
- [76] M. Meinhardt, T. O'Donnell, H. Schneider, J. Flannery, C.O. Mathuna, P. Zacharias, T. Krieger, (1999). Miniaturised "Low Profile" module integrated converter for photovoltaic applications with integrated magnetic components, *IEEE proc. Of the 14th annual applied power electronics conference and exposition (APEC'99)*. Vol. 1, 305-311.
- [77] Prapanavarat C., Barnes M., Jenkins N. (2002). Investigation of the performance of a photovoltaic AC module, *IEE proc. of generation, transmission and distribution*. 149(4), 472-478.
- [78] S.W.H. de Haan, H. Oldenkamp, E.J. Wildenbeest (1994). Test results of a 130 W AC module; a modular solar AC power station, *IEEE proc. of the 24th photovoltaic specialists conference*. Vol. 1, 925-928.
- [79] S.W.H. de Haan, H. Oldenkamp, C.F.A Frumau, W. Bonin. (1994). Development of a 100 W resonant inverter for ac-modules, *Proc. of the 12th European photovoltaic solar energy conference*.
- [80] Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Borup, U., & Liserre, M. (2004). A new control structure for grid-connected LCL PV inverters with zero steady-state error and selective harmonic compensation. In *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04*. Vol. 1, 580-586.
- [81] Asiminoaei, L., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., & Borup, U. (2004). A new method of on-line grid impedance estimation for PV inverter. In *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'04*. Vol. 3, 1527-1533.
- [82] Timbus, A. V., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., & Borup, U. (2004). Online grid measurement and ENS detection for PV inverter running on highly inductive grid. *IEEE power electronics letters*, 2(3), 77-82.
- [83] C. Dorofte, (2001) Comparative analysis of four dc/dc converters for photovoltaic grid interconnection. *Aalborg Univ./Powerlynx A/S, Aalborg East, Denmark, Tech. Rep.*
- [84] -, (2001) Design of a dc/dc converter for photovoltaic grid interconnection. *Aalborg Univ./Powerlynx A/S, Aalborg East, Denmark, Tech. Rep.*
- [85] Liu, T., Yang, X., Chen, W., Li, Y., Xuan, Y., Huang, L., & Hao, X. (2018). Design and implementation of high efficiency control scheme of dual active bridge based 10kV/1MW solid state transformer for PV application. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- [86] Rubino, L., Guida, B., Liccardo, F., Marino, P., & Cavallo, A. (2010). Buck-boost DC/DC converter for aeronautical applications. In *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2690-2695.
- [87] Kim, E. H., & Kwon, B. H. (2009). High step-up resonant push-pull converter with high efficiency. *IET Power Electronics*, 2(1), 79-89.
- [88] Delshad, M., & Farzanehfard, H. (2011). High step-up zero-voltage switching current-fed isolated pulse width modulation DC-DC converter. *IET power electronics*, 4(3), 316-322.

- [89] Wolfs, P., & Li, Q. (2002). An analysis of a resonant half bridge dual converter operating in continuous and discontinuous modes. In 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No. 02CH37289). Vol. 3, 1313-1318.
- [90] D. Li, B. Liu, B. Yuan, X. Yang, J. Duan, and J. Zhai. (2011) A high step-up current fed multi-resonant converter with output voltage doubler. 26th Applied Power Electronics Conf. and Exposition (APEC) IEEE 1, CD-ROM.
- [91] Yuan, B., Yang, X., & Li, D. (2010). A high efficiency current fed multi-resonant converter for high step-up power conversion in renewable energy harvesting. In 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2637-2641.
- [92] Çetin, S. (2017) Veri merkezi uygulamaları için yüksek verimli bir LLC rezonanslı DC-DC dönüştürücü tasarımı. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5(1), 45-54.
- [93] Choi, W. Y., Song, S. G., Park, S. J., Kim, K. H., & Lim, Y. C. (2009). Photovoltaic module integrated converter system minimizing input ripple current for inverter load. In INTELEC 2009-31st International Telecommunications Energy Conference. 1-4.
- [94] Emanet, H. (2001). Yüksek Frekanslı Manyetik Malzemelerde Deri Ve Yaklaşım Etkisi Sonucu Oluşan İletken Kayıplarının Hesaplanması (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [95] Sclocchi, M. Switching Power Supply Design: LM5030 Push-Pull Converter.
- [96] Aydemir, T., Koparan, A., & Şimşek, O. 200 Amper, Yüksek Frekans Anahtarlamalı DA Kaynak Makinesinin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi/Design and Implementation of a 200 Ampere High Frequency Switching DC Welding Machine. EMO BİLİMSEL DERGİ, 2(3), 51-61.