



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Tek Kademe Dönüştürücülü Güç Elektronikliği Trafosunun Tasarımı

Fatih EVRAN <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> *Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE*

*\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: fatihevrans@duzce.edu.tr*

### ÖZET

Güç elektronikliği trafoları, manyetik çekirdeği ve iletken sargıları oluşturmak için gerekli olan demir ve bakır miktarını azaltarak geleneksel dağıtım trafolarının boyutunu ve maliyetini düşürme potansiyeline sahiptir ve orta ölçekli frekanslarda trafo çekirdek boyutunu düşürmektedirler. Önerilen topoloji, diğer topolojilerle kıyaslandığında güç elektronikliği trafosunun hem maliyetini hem de fiziksel boyutunu azaltmayı sağlamayı hedeflemektedir. Son olarak, teorik analizin etkililiğini doğrulamak için kullanılan dönüştürücü için benzetim sonuçları verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *AA-AA dönüştürücü, Frekans dönüştürücü, Güç elektronikliği trafosu, Matris dönüştürücü*

## Design of Single-Stage Converter based on Power Electronic Transformer

### ABSTRACT

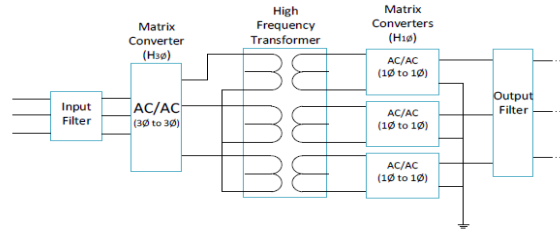
Power electronic transformers have the potential to reduce the size and cost of traditional distribution transformers by reducing the amount of iron and copper required to create magnetic core and conductor windings and reduce transformer core size in medium range frequency. The proposed topology promises to reduce both the cost and physical size of power electronic transformer when compared to other topologies. Finally, simulation results are given for the proposed converter to verify the effectiveness of the theoretical analysis.

**Keywords:** *AC to AC converter, Frequency converter, Power electronic transformer, Matrix converter*

## I. GİRİŞ

Günümüzde, galvanik yalıtım trafoları gerilim dönüştürme ve gürültü önlemeyi sağlamak için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna karşın, bir elektrik sisteminde düşük frekanslı yalıtım trafoları (50-60 Hz) ağırlık ve yüksek maliyet gibi bazı olumsuzluklara sahiptir [1]. Güç elektroniği trafosu (PET), yüksek frekanslı anahtarlama elemanlar kullanarak bu olumsuzlukların üstesinden gelebilmektedir. Geleneksel bir PET' in temel yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir.

PET, güç elektroniği devresi olan bir frekans dönüştürücüsünden ve yüksek frekans trafosundan oluşmaktadır. PET' in temel çalışma ilkesinde, ilk olarak düşük frekanslı AA (Alternatif akım) gerilimi (bir güç sistemi için genel olarak 50 Hz veya 60 Hz'dir) yüksek frekanslı AA gerilimine (normalde bir kaç kHz ile on kHz aralığında) değiştirilmektedir. Ardından, hacmi ve ağırlığı önemli ölçüde azaltılan yüksek frekanslı trafo, gerilim dönüşümü ve galvanik yalıtımı içeren bir dizi işlevi gerçekleştirmektedir. Üçüncü aşamada ise, yüksek frekanstan düşük frekanslı gerilim sinyali elde edilir ve güç yüküne verilmektedir. Solid-state devre anahtarlama aygıtlarının giderek artan sağlamlığı ile artan gerilim, akım ve güç düzeylerinde daha iyi elektrik güç işleme teknolojileri için yeni ve yenilikçi çözümler ortaya çıkmaya devam etmektedir. Uygulamaların gerilim dönüşümünü gerçekleştirme biçimini iyileştirmek ve PET' in ortaya çıkışı ile dağıtım seviyesinde galvanik yalıtım elde etmek için potansiyel bir çözüm bulunmaktadır. Dolayısıyla, PET' ler, geleneksel dağıtım trafolarının (CDT) maliyetini ve fiziksel kalitesini düşürmek açısından önemli bir işlevsellik göstermektedir. PET' ler gerilim dönüştürme, galvanik yalıtım ve gürültü önleme gibi geleneksel işlevlerini yerine getirmenin yanı sıra gerilim regülasyonu, reaktif güç dengeleme ve harmonik bastırma gibi özellikleri de sağlayabilmektedir [2, 3].



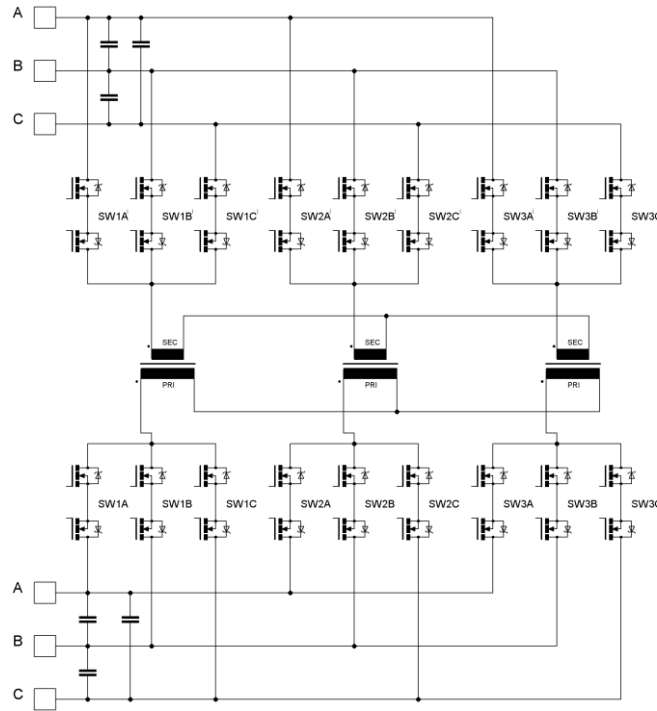
Şekil 1. Geleneksel bir PET yapısı

Son zamanlarda, çeşitli PET topolojileri önerilmiştir [4-18]. Genel olarak bir PET' de, AA gerilimi AA gerilime çevirmek için iki topoloji vardır. Bunlar, çok aşamalı dönüşüm [4-15] ve tek aşamalı dönüşüm topolojileridir [16-18]. İki aşamalı dönüşüm veya üç aşamalı dönüşüm olarak adlandırılan çok aşamalı PET yaklaşımları kaskad bağlantılar gerektirmektedir. İki aşamalı dönüşüm topolojisi, AA-DA aşaması ve DA-AA aşamasından oluşur [4-7]. Üç aşamalı dönüşüm topolojisi ise AA-DA (Doğru akım), DA-DA ve DA-AA aşamalarından oluşmaktadır [8-15]. Çok aşamalı dönüşüm topolojileri denetim esnekliği elde etmelerine rağmen, bu topolojiler birçok pasif bileşenlerden oluşmaktadır. Bu ise düşük güç verimliliğine neden olmaktadır. Öte yandan, tek aşamalı dönüşümde doğrudan AA-AA dönüşümü yapılmaktadır. Bu nedenle dönüştürme aşamaları azaltılmaktadır. Bu ise devre karmaşıklığını azaltmaktadır ve güvenilirliği artırmaktadır. Bu çalışmada yeni bir PET topolojisi sunulmaktadır. Önerilen PET topoloji tabanlı matris dönüştürücü, AA gerilimi herhangi bir DA gerilim bağlantısı olmaksızın AA gerilime dönüştürebilmektedir. Bu sayede PET' in hem maliyeti hem de fiziksel boyutu azaltılabilmektedir. Giriş aşamasında frekans yükseltme dönüştürücü olarak çalışan üç fazlı, iki yönlü, geleneksel bir matris dönüştürücüsü bulunmaktadır (CMC). Girişteki CMC, ikinci aşamada yüksek frekanslı ve AA gerilimli bir trafoyu beslemektedir. Kullanılan bu trafo, gerilim seviyesini azaltabilmektedir ya da arttırabilmektedir ve dönüştürülmüş yüksek frekanslı AA gerilimini ise üçüncü aşamaya vermektedir.

Üçüncü aşama ise frekans düşürücü olarak çalışan 3-fazlı, çift yönlü bir CMC' den oluşmaktadır. CMC orta ölçekli frekanslı gerilimi, şebeke frekanslı gerilime çevirerek gücü çıkış yüküne vermektedir. Bu çalışmanın içeriği aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. Bölüm II önerilen dönüştürücünün çalışma analizi ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Bölüm III önerilen dönüştürücünün tasarımını açıklamaktadır. Bölüm IV ise önerilen dönüştürücünün etkinliğini doğrulamak için benzetim sonuçlarını vermektedir.

## II. ÖNERİLEN TOPOLOJİNİN İNCELENMESİ

Şekil 2 yarıiletken elemanlı önerilen PET topolojisini göstermektedir. Önerilen topoloji üç kısma ayrılmaktadır. İlk kısmında 3-faz CMC bulunmaktadır. İkinci kısmında 3-faz, 3-manyetik çekirdekli WYE (yıldız-delta) bağlantılı yüksek frekanslı trafo bulunmaktadır. Üçüncü kısmında ise ilk kısmında olduğu gibi 3-faz CMC bulunmaktadır. Birinci kısmın girişi 3-faz şebekedir. Bu şebekenin çalışma frekansı 50Hz'dir. Üçüncü kısmın çıkışı 3-faz olup, çalışma frekansı şebeke frekansı ile aynıdır. İkinci kısımda bulunan yüksek frekanslı trafolar, 1:1 tur oranları ile sarılmıştır. Bundan dolayı gerilim seviyesi değişmemektedir. Birinci ve üçüncü kısımda kullanılan delta bağlantılı kondansatörler filtre görevini üstlenmektedirler. CMC yapısında bulunan anahtarlar çift yönlü olup yapılarında 2 tane paralel diyot bulunmaktadır.

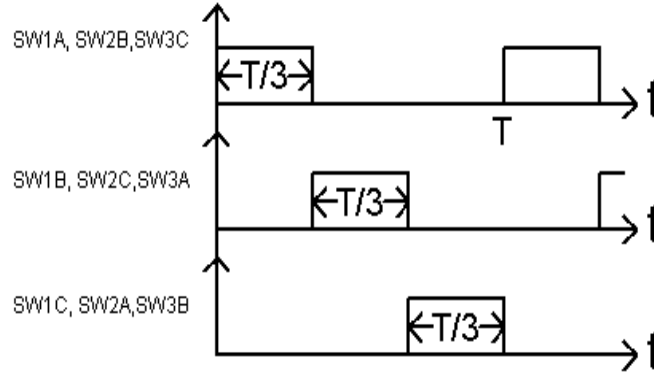


**Şekil 2.** Önerilen PET yapısı

Şekil.3 önerilen PET topolojisini denetlemek için % 33'lük doluluk oranına sahip ve 120 derece faz farklı yüksek frekanslı anahtarların kapı darbelerini göstermektedir.

Birinci kısımdaki CMC girişinin fazları ve üçüncü kısımdaki CMC çıkışının fazları aynı kapı sinyallerine sahiptir. Örneğin SW1 anahtarı iletime girdiğinde SW1' anahtarı da iletime girmektedir. Ayrıca, birinci kısımdaki CMC, şebeke frekanslı giriş gerilimini yüksek frekanslı gerilime

dönüştürürken ve ikinci kısımdaki CMC ise, yüksek frekanslı trafo çıkışını orijinal giriş dalga şekline dönüştürmektedir.



Şekil 3. Önerilen topolojinin kapı darbeleri

### III. ÖNERİLEN TOPOLOJİNİN TASARIMI

PET' ler, maliyet ve ağırlık gibi olumsuzlukları olan şebeke frekanslı yalıtım trafolarının yerine kullanılabilen yüksek frekanslı yalıtım trafolarıdır. Trafonun boyutu doğrudan manyetik çekirdeğin malzemesinin doyma akı yoğunluğuna ve izin verilen maksimum çekirdek sıcaklık artışına bağlıdır. Akı yoğunluğu, çalışma frekansıyla ters orantılı olduğu için frekans arttırıldığında dolayı çekirdek, doyuma yüksek frekansta kolayca ulaşamadığı için manyetik çekirdeğin boyutunda bir azalma gözükmektedir. Bir trafonun çalışma frekansının arttırılmasının, daha küçük bir manyetik çekirdeğe ne kadar izin verebildiğini anlayabilmek için, trafonun çekirdeğinin *volt x amper* ifadesi aşağıdaki denklemde gösterilmektedir.

$$E_{rms} \cdot I_{\phi,rms} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_{max} \cdot H_{rms} \cdot (A_c \cdot l_c) \quad (1)$$

Eş. 1'de kullanılan birimler Tablo 1'de gösterilmiştir. Eş. 1'den, bir trafonun *volt x amper* değeri frekans, maksimum akı yoğunluğu, manyetik alan yoğunluğunun *rms* (etkin) değeri, çekirdek kesit alanı ve ortalama çekirdek uzunluğu ile doğru orantılı olduğu gözlemlenebilmektedir. Çekirdek kesit alanı ve ortalama çekirdek uzunluğu çarpımı, trafo çekirdeğinin hacmine eşittir. Sabit *volt x amper* değerinde trafonun hacmini ( $A_c$  ve  $l_c$  çarpımını) azaltmak için frekans arttırılmalıdır. Örneğin, trafo çalışma frekansının ikiye katlanması ve çekirdek hacminin yarıya indirilmesi, çekirdek uyarımını sabit tutmak ve güç akışını korumak için yeterli olacaktır. Buna karşın, artan frekans çekirdek kayıplarını arttıracaktır ve kayıpları azaltmak için büyük çaplı iletkenlerin kullanılması gerekmektedir.

Ayrıca, CCM frekans dönüştürücüde anahtarlama ve iletim kayıpları görülmektedir. Bundan dolayı tasarımcılar uygun değerli çekirdek ve iletken boyutlarını seçerek çekirdek kayıplarını, dönüştürücü kayıplarını ve iletken kayıplarını göz önüne almalıdırlar. PET, CDT'den daha cazip olmasına rağmen ticari kuruluşlar PET çözümünün güvenilir ve yetenekli olduğu kanıtlanana kadar CDT'den yeni PET'e geçmek istememektedirler. Uç kullanıcı olan müşteriler ise, PET' in ekonomik ve performans avantajlarını elde etmek için artan güç kullanılabilirliği bozulmalarına tolerans göstermeyecektir. PET' in kullanılabilirliğini arttırmak için bir DA link kullanan AA/ DA / AA frekans dönüştürücüleri gibi teknolojik olarak olgunluğa sahip güç elektroniği dönüştürücü topolojisini seçilebilmektedir.

**Tablo 1.** Manyetik Birimler.

| Sembol         | Açıklaması   |
|----------------|--|
| $E_{rms}$      | Trafonun primer (birincil) sargısının geriliminin etkin değeri |
| $I_{\phi,rms}$ | Trafonun uyarma akımının etkin değeri                          |
| $f$            | Çalışma frekansı   |
| $B_{max}$      | Akı yoğunluğunun tepe değeri                                   |
| $H_{rms}$      | Manyetik alan yoğunluğunun etkin değeri                        |
| $A_c$          | Çekirdek kesit alanı   |
| $l_c$          | Ortalama çekirdek uzunluğu çarpımı                             |

Buna karşın, karmaşık güç elektronik dönüştürücü sistem teknolojilerinin gelişimi epey zaman ve çaba gerektirmektedir, bu nedenle yeni teknolojilerin zamanla olgunlaşmasına gereken gayreti göstermek dışında, hafifletici bir çözüm bulunmamaktadır. Önerilen PET topolojisi, yapısında bulunan CMC' nin teknolojik olgunluğunun diğer güç elektroniği frekans dönüştürücü seçeneklerine kıyasla hala çok düşük olması nedeniyle önemli bir olumsuzluğa sahiptir. Bu olumsuzluk yakın gelecekte PET'in sürdürülebilir bir seçenek haline gelebilmesi için önerilen PET topolojisinin önünde önemli engel teşkil etmektedir. Bu durum, CMC teknolojisini geliştirmek isteyen güç elektroniği araştırmacıları tarafından artan bir gözlemlenmektedir. Ancak, CMC' nin özelliklerine önemli ölçüde ilgi gösterilmesi, özellikle de reaktif bileşenlere ihtiyaç duymadan en yaygın güç dönüştürme işlevlerini yerine getirme potansiyeline sahip olması nedeniyle, CMC teknolojisini olgunlaştırmak isteyen güç elektroniği araştırmacıları tarafından dikkate alınmış bir sonuç ortaya çıkmıştır. CMC teknolojisi olgunlaştıkça CDT' nin değiştirilmesi için, önerilen PET topolojisi ya olumlu bir PET çözümü ya da olumsuz bir PET çözümü olarak ortaya çıkacaktır.

Tablo 2, literatürde sunulan topolojilerle önerilen PET topolojisinin performans karşılaştırmasını sunmaktadır. Tabloda, bir PET topolojisinin maliyeti, boyutu ve topolojik özellikler özetlenmektedir. Tablo 2'deki veriler, önerilen PET'nin az sayıda reaktif bileşene sahip olduğunu ve çok sayıda anahtarlama aygıtının kullanıldığı göstermektedir.

**Tablo 2.** Önerilen PET topolojisinin karşılaştırılması.

| Tanımlama                       | Önerilen | [4] | [15] | [17] |
|---------------------------------|----------|-----|------|------|
| Güç dönüştürme aşamaları sayısı | 1        | 2   | 3    | 1    |
| MFT sayısı                      | 3        | 3   | 1    | 3    |
| Yarıiletken sayısı              | 72       | 24  | 18   | 48   |
| Kondansatör sayısı              | 6        | 3   | 4    | 6    |
| Endüktans sayısı                | 0        | 6   | 3    | 0    |

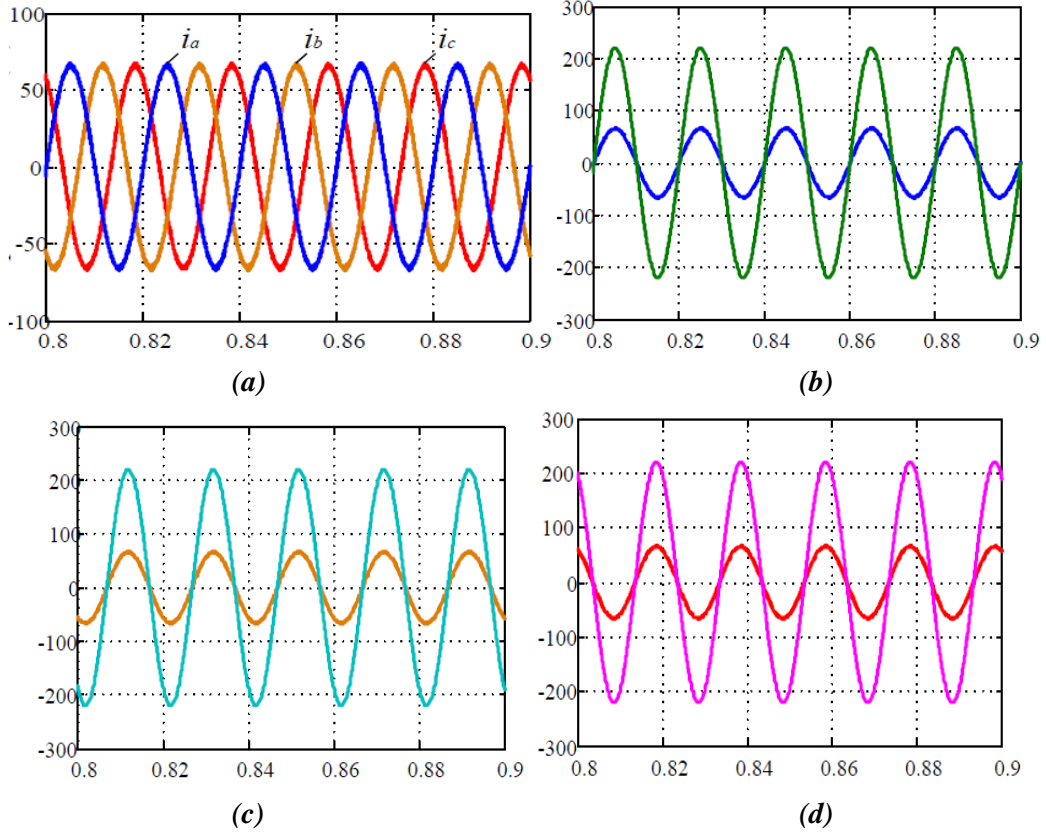
## IV. BENZETİM ÇALIŞMASI

Benzetim programı olarak PSIM kullanılmıştır. Benzetim çalışmasında kullanılan parametrelerin ve bileşen değerlerinin listesi Tablo 3'te gösterilmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5, benzetim sonucunda elde edilmiş olan gerilim ve akım dalga biçimlerini göstermektedir.

Şekil 4'te, giriş akımı ve giriş gerilimi gösterilmektedir. Şekil 4(b)'de görüldüğü gibi Faz A'nın giriş akımı ve giriş gerilimi, birim güç faktörünün sağlanmasıyla aynı fazda olmaktadır. Aynı durum Şekil 4(c) ve Şekil 4(d)'de de görülmektedir.

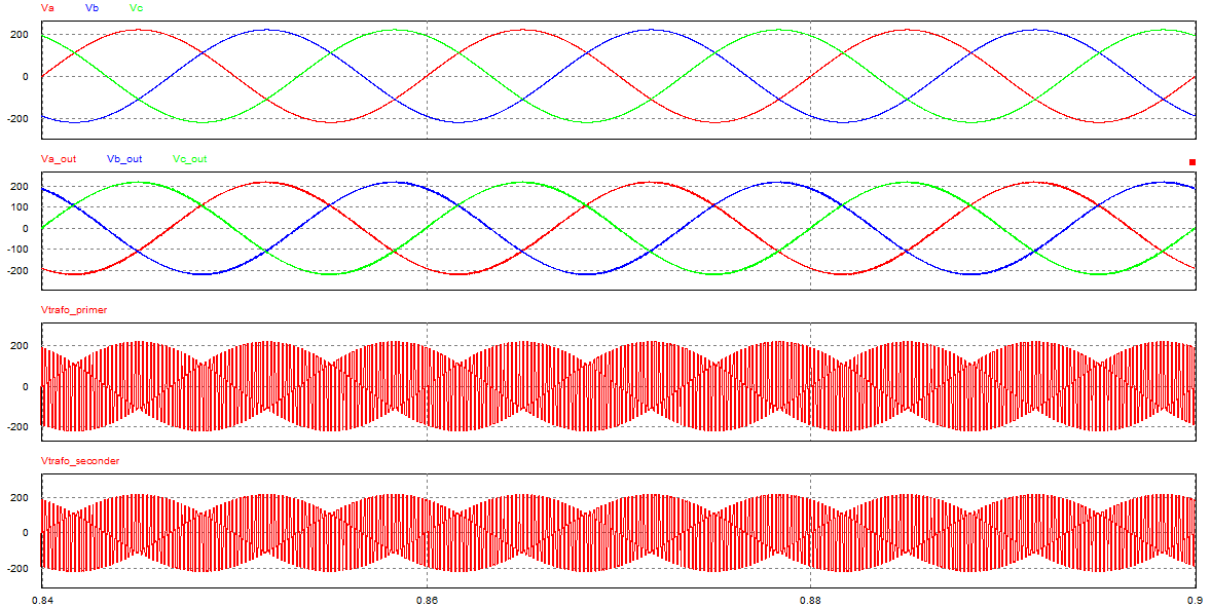
**Tablo 3.** Benzetim ve deneysel çalışmalarında kullanılan parametreler.

| Bileşen                | Değeri       |
|------------------------|--------------|
| Giriş gerilimi         | 150 V        |
| Giriş/Çıkış frekansı   | 50 Hz        |
| Filtre kondansatörü    | 0.68 $\mu$ F |
| Trafo dönüştürme oranı | 1:1          |



**Şekil 4.** Önerilen PET topolojisinin dalga şekilleri, a) Faz giriş akımları, b) Faz A'nın akım ve gerilim dalga şekilleri, c) Faz B'nin akım ve gerilim dalga şekilleri, d) b) Faz C'nin akım ve gerilim dalga şekilleri.

Şekil 5'te, en üstteki şekil giriş kaynağının faz gerilimlerini, ikinci şekil çıkış faz gerilimlerini, bir sonraki şekil trafonun primer sargısında oluşan gerilimi ve en alttaki şekil ise trafonun sekonder sargısında oluşan gerilimi göstermektedir.



Şekil 5. Önerilen PET topolojisinin gerilim dalga şekilleri

Benzetim çalışmalarından görüldüğü gibi giriş ve çıkış geriliminin frekansı 50 Hz olmaktadır ve kullanılan anahtarlar 5kHz frekansında çalıştırılmaktadır. Birinci aşamada şebeke frekansı orta ölçekli frekansa, üçüncü aşamada ise elde edilen orta ölçekli frekans ise tekrar şebeke frekansına dönüştürülmektedir. Benzetim sonuçları, önerilen PET modelinin bir trafo olarak çalıştığını doğrulamaktadır.

## V. SONUÇ

Frekans dönüştürme için iki CMC, galvanik yalıtım için bir üç fazlı, üç yüksek frekanslı trafo kullanan yeni bir PET topolojisi sunulmuştur. Önerilen PET topolojisinin benzetimi PSIM’ de başarıyla gerçekleştirilmiştir. Yüksek maliyet, geniş fiziksel boyut ve düşük teknolojik olgunluk olan PET'in canlılığını engellemektedir. Buna karşın önerilen topoloji, frekans dönüştürme aşamaları için gerekli olan reaktif bileşenler sayısını azaltarak PET’ in fiziksel boyutunu ve maliyetini düşürmektedir. Bununla birlikte önerilen topoloji, frekans dönüştürme evrelerini uygulamak için birçok anahtarlama aygıtına ihtiyaç duymaktadır. Bu özellik, maliyeti, fiziksel boyutu ve reaktif bileşenlere olan ihtiyacı azaltarak maliyet ve boyut kazanımlarına karşı etkili olmayı sağlamaktadır.

## VI. KAYNAKLAR

- [1] M. D. Manjrekar, R. Kieferndorf, G. Venkataramanan “Power electronic transformers for utility applications,” Conference record of the IEEE Industry Applications Conf., Roma, İtalya, 2000, ss. 2496-2502.
- [2] D. Wang, C. Ma ve J. Lu, “Modelling of electronic power transformer and its application to power system,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, c. 1, s. 6, ss. 887-895, 2007.

- [3] H. Liu, C. Mao, J. Lu ve D. Wang, "Parallel operation of electronic power transformer based on distributed logic control," Universities Power Engineering Conference, Brighton, İngiltere, 2007, ss. 93-101.
- [4] Han Ju Cha ve P. N. Enjeti, "A three-phase AC/AC high-frequency link matrix converter for VSCF applications," Power Electronics Specialist Conference, Acapulco, Meksika, 2003, ss.1971-1976.
- [5] M. Sabahi, S. H. Hosseini, M. B. Sharifian, A.Y. Goharrizi ve G. B. Gharehpetian, "Zero-voltage switching bi-directional power electronic transformer," *IET Power Electronics*, c.3, s.5, ss. 818-828, 2010.
- [6] M. Sabahi, S. H. Hosseini, M. B. Sharifian, A.Y. Goharrizi ve G. B. Gharehpetian, "Zero-voltage switching bi-directional power electronic transformer," *IET Power Electron.*, c. 3, s. 5, ss. 818-828, 2010.
- [7] P. Drabek, Z. Peroutka, M. Pittermann ve M. Cedral, "New Configuration of Traction Converter With Medium-Frequency Transformer Using Matrix Converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c.58, s.11, ss. 5041-5048, 2011.
- [8] Xiaohu Liu, Hui Li ve Zhan Wang, "A Start-Up Scheme for a Three-Stage Solid-State Transformer With Minimized Transformer Current Response," *IEEE Transactions on Power Electronics*, c.27, s. 12, ss 4832- 4836, 2012.
- [9] Jianjiang Shi, Wei Gou, Hao Yuan, Tiefu Zhao ve A. Q. Huang, "Research on Voltage and Power Balance Control for Cascaded Modular Solid-State Transformer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 26, s. 4, ss. 1154- 1166, 2011.
- [10] Haifeng Fan ve Hui Li, "High-Frequency Transformer Isolated Bidirectional DC-DC Converter Modules With High Efficiency Over Wide Load Range for 20 kVA Solid-State Transformer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 26, s. 12, ss. 3599- 3608, 2011.
- [11] Xu She, A.Q. Huang, S. Lukic ve M. E. Baran, "On Integration of Solid-State Transformer With Zonal DC Microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, c.3, s.2, ss. 975-985, 2012.
- [12] Xu She, A.Q. Huang ve Xijun Ni, "Current Sensorless Power Balance Strategy for DC/DC Converters in a Cascaded Multilevel Converter Based Solid State Transformer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 29, s.1, ss. 17-22, 2014.
- [13] Seon-Hwan Hwang, Xiaohu Liu, Jang-Mok Kim ve Hui Li, "Distributed Digital Control of Modular-Based Solid-State Transformer Using DSP+FPGA," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 60, s.2, ss. 670-680, 2013.
- [14] Xu She, A.Q. Huang ve Gangyao Wang, "3-D Space Modulation With Voltage Balancing Capability for a Cascaded Seven-Level Converter in a Solid-State Transformer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 26, s.12, ss. 3778-3789, 2011.



- [15] S. Falcones, R. Ayyanar ve Xiaolin Mao, “A DC–DC Multiport-Converter-Based Solid-State Transformer Integrating Distributed Generation and Storage,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c.28, s.5, ss. 2192-2203, 2013.
- [16] M. Kang, P.N. Enjeti ve I. J. Pitel, “Analysis and design of electronic transformers for electric power distribution system,” *IEEE Transactions on Power Electronics* , c.14, s.6, ss. 1133-1141, 1999.
- [17] Hengsi Qin ve J. W. Kimball, “Solid-State Transformer Architecture Using AC–AC Dual-Active-Bridge Converter,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 60, s. 9, ss. 3720 – 3730, 2013.
- [18] Hengsi Qin ve J. W. Kimball, “Ac-ac dual active bridge converter for solid state transformer,” Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, ABD, 2009, ss. 3039-3044.