

Elektronik Güç Transformatörlerinin Darbe Genişlik Modülasyon Doğrultucu Tabanlı Benzetim Çalışması

Simulation Study of Pulse Width Modulation Rectifier Based Power Electronic Transformers

Hakan AÇIKGÖZ¹, Mustafa ŞEKKELİ²

Özet- Güç transformatörleri enerji iletiminde en önemli bileşenlerden biridir. Fakat bu transformatörler elektrik dağıtım sistemlerindeki en ağır ve pahalı kısımlardan biridir. Bilindiği gibi transformatörlerin boyutu frekans ile ters orantılıdır. Frekans artırılarak transformatörlerin boyutu küçültülebilmektedir. Mikroşemciler, yarı iletken teknolojileri ve çeşitli denetim algoritmalarındaki hızlı ilerlemelerle birçok araştırmacı tarafından yeni bir transformatör önerilmiştir. Bu yeni güç transformatörleri elektronik güç transformatörü olarak adlandırılmaktadır. EGT'leri için literatürde birçok farklı topoloji mevcuttur. Bu çalışmada, üç fazlı darbe genişlik modülasyonu (DGM) tabanlı EGT'lerinin tasarımı ve denetim ilkeleri analiz edilmiştir. Önerilen EGT giriş, izolasyon ve çıkış kısımlarından oluşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Darbe genişlik modülasyonu, Doğrultucu, Elektronik Güç Transformatörleri, Transformatörler

Abstract- Power transformers are one of the most important components of power transmission. But these transformers are one of the heaviest and most expensive parts in an electrical distribution system. It is well known that the size of transformers is inversely proportion to frequency. With an increase in the frequency, the size of transformers can be reduced. By the rapid development of microprocessor, power semiconductor technologies and various intelligent control algorithms, a new transformer has been proposed by many researchers. These new power transformers have been called as electronic power transformer. Many different topologies in literature have been presented for PET. The design and control of three phase PWM rectifier based PET are analyzed in this study. The proposed PET consists of three stages such as input, isolation and output stages.

Key Words: Pulse width modulation, Rectifier, Power Electronic Transformer, Transformers

I. GİRİŞ

Değişken bir manyetik alan etkisiyle bir gerilim seviyesindeki alternatif akım elektrik gücünü diğer bir gerilim seviyesindeki alternatif akım elektrik gücüne dönüştüren elektrik makinalarına transformatör denilmektedir [1]. Elektrik enerjisinin güvenli ve verimli bir şekilde ürettiği yerden çok uzak bölgelere taşınabilmesi transformatörlerle mümkündür. Transformatörler elektrik devresinde gerilim ya da akımın frekansını değiştirmeden diğer bir gerilim ya da akım seviyesine yükseltmek veya düşürmek için kullanılırlar. Transformatörler elektronikte ise farklı devreleri birleştirmek için kullanılır [1-2]. Bu bakımdan modern yaşamda transformatörlerin önemi oldukça büyüktür. Tüm bu özelliklerine rağmen transformatörler yapısal olarak büyük olmaları, kapladıkları hacimlerin fazla olması, üretim ve tesis edilme durumlarındaki zorluklarla birlikte işletim maliyetleri de çok yüksektir[1-3]. Bilindiği gibi transformatörlerin boyutları eğer akı yoğunluğu sabit olarak varsayılırsa frekans ile ters orantılıdır[2-5].

Son yıllarda, Mikroşemciler ve güç elektroniği devre elemanlarındaki hızlı ilerlemelerle birlikte yüksek frekanslı ve elektronik güç elemanları ile oluşturulan özel transformatörler üzerinde birçok çalışma yapılmaya başlanmıştır. Bu

¹hakanacikgoz@kilis.edu.tr

²mustafasekkeli@ksu.edu.tr

¹Kilis Meslek Yüksekokulu, Elektrik-Enerji Bölümü, KİLİS

²Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, KİLİS

transformatörler elektronik güç transformatörleri (EGT) olarak adlandırılmaktadır [2-4].

EGT'ler ilk olarak 1968 yılında McMurray [3] tarafından önerilmiştir. McMurray'ın önerdiği EGT'nin hem primer hem de sekonder kısmında doğrudan frekans çeviriciler bulunmaktadır. Böylece primer tarafındaki düşük frekanstaki gerilim doğrudan çeviricilerle yüksek frekansa dönüştürülerek yüksek frekanslı transformatöre iletilir ve sekonder kısmında bulunan doğrudan frekans çeviriciyle de tekrardan düşük frekanslı bir gerilim elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Daha sonra ise EGT'ler için birçok çalışma yapılmıştır ve halada yapılmaya devam etmektedir. EGT'lerin temel amacı tek bir devre üzerinde yüksek frekansla birlikte gerilim dönüşümü, gerilim regülasyonu ve çift yönlü güç akış özelliğidir[2-5].

Gelişen güç elektroniği devrelerindeki teknolojiyle birlikte EGT'ler için çok aşamalı devreler yapılmıştır. Bunlardan biride AC-DC-AC-DC-AC dönüşümlerinin olduğu EGT'lerdir [4]. Bu EGT'ler primer, izolasyon ve sekonder kısmı olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Primer kısmında AC-DC dönüştürücü olarak doğrultucu devresi ve bu doğrultucunun çıkışında kapasite mevcuttur. Bu kısım güç faktörü için çok önemlidir ve bu kısımdan elde edilen DC gerilim yüksek frekanslı kare dalga üreten tek fazlı invertere iletilerek izolasyon olarak kullanılan yüksek frekanslı transformatöre iletilmektedir. Yüksek frekanslı transformatörün dönüştürme oranına göre sekonderde yüksek frekanslı bir gerilim oluşmaktadır. Sekonder kısmında ise tek fazlı doğrultucu devresi, üç fazlı bir inverter ve yük bulunmaktadır [2-4]. Diğer bir EGT devresi ise hem primer hem de sekonder kısmının matris çevirici ile olduğu devredir. Bu topolojinin en önemli özelliği ise bir önceki topolojideki gibi 3 bölümden oluşmayıp DC link kısımları olmadan farklı anahtarlamalarla AC-AC dönüşümün tek bir devrede yapılmasıdır [5]. Matris çeviriciler çift yönlü enerji akışı, değişken frekans ve gerilimi üretebilmesi, aktif ve reaktif güç denetimi ve tek kısımda güç dönüşümü gibi özelliklerinden dolayı EGT'ler için önemli bir yere sahiptir. EGT'ler için zaman içinde birçok farklı çalışma mevcuttur ve bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

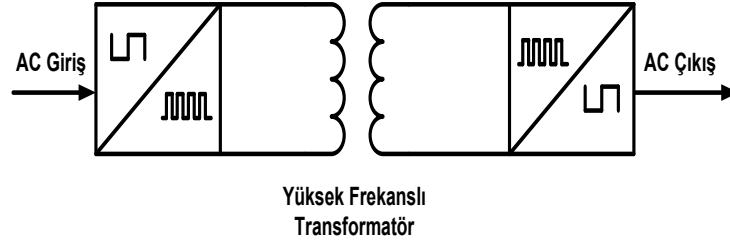
1986 yılında McMurray tarafından geliştirilen ilk EGT direkt frekans çeviricilerden oluşmaktadır [1]. Subramanya Sarma ve K.S.R Anjaneyulu DC-link kapasitörlü EGT için yeni bir yapılandırmayı önermişlerdir. Yüksek verim elde etmek için AC/DC ve DC/AC dönüştürücüleri tek bir dönüştürücü içerisine entegre etmişlerdir. Bu topolojinin güç faktörü düzeltme, gerilim regülasyonu, gerilim düşmesi ve yükselmesini ortadan kaldırdığı görülmektedir [6]. H.Iman-Eini ve arkadaşları modüler bir EGT yapısı gerçekleştirmişlerdir. EGT'nin modüler yapısı, farklı frekanslar altındaki farklı gerilim sistemlerine kolay ve hızlı adaptasyonu garanti ettiği ve geleneksel transformatörlerle karşılaştırıldığında, EGT'nin daha hafif, küçük hacimli ve genişletilmiş işlevselliğe sahip olduğunu anlatılmışlardır. EGT, bu tip işlevlerinin yanı sıra birkaç güç faktörü fonksiyonlarını tek bir cihazın içerisine entegre etmektedir. Bu ise gerilim düşmesi, yükselmesi, gerilim dalgalanmasını azaltır ve primer veya sekonder tarafındaki güç faktörü düzeltmesini gerçekleştirir[7]. M.R Banaei ve E. Salary ise DC-Link kapasitörlü EGT ve doğrusal olmayan yüklü paralel işleyişi incelenmiştir. Transformatörler elektrik güç sisteminde yaygın olarak kullanılmaktadır ve EGT'ler güç kalitesini geliştirmekte ve birincil fonksiyonları olan gerilim dönüşümü ve izolasyonunu gerçekleştirmektedir. Ek olarak, bu çalışmada DC-Link kapasitörlü EGT'nin paralel işleyişi kullanılarak akım harmonikleri dengeleme, reaktif güç ve doğrusal olmayan yüklerin akım dengesizliği gösterilmiştir. Benzetim çalışması sonuçları ise önerilen yapıdaki bazı avantajları göstermektedir [8]. M.R Banaei ve E. Salary DC-AC dönüştürücünün yeni bir yapılandırmasını önermişlerdir. Önerilen topoloji daha az anahtar ve kapı sürücü devrelerine gereksinim duymaktadır ve buna ek olarak bu dönüştürücüde DC-link kapasitörü yoktur. Bu yüzden, önerilen topoloji EGT'nin büyüklüğünün ve maliyetinin azalmasına yol açar ve denetim sistemini daha sade hale getirir [9]. Chen Ling ve arkadaşları dağıtım sistemine uygulanan yeni bir EGT sistemini önermişlerdir. Giriş kısmı üç fazlı, üç-seviyeli DGM doğrultucudan oluşmaktadır. İzolasyon kısmında yüksek frekanslı gerilimler elde etmek için primer tarafında tek fazlı inverter ve sekonder tarafında ise doğrultucu devresi mevcuttur. Çıkış kısmında ise üç-fazlı iki-seviyeli inverter istenilen gerilim ve gücü yüke vermektedir. Benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar, giriş akımları ve çıkış gerilimlerinin profillerinin çok düzgün olduğunu göstermektedir [4]. F.N. Mazgar ve arkadaşları EGT için pull-push çevirici kullanarak yeni bir yapı tasarlamışlardır. Sonuç olarak bu yapı önceki yapıyla karşılaştırıldığında daha az güç anahtarı kullanılmaktadır. Benzetim çalışmaları bu yapının güç kalitesinin iyileştirilmesi konusunda etkili olduğunu göstermektedir [10]. Hakimas Mohd Hanafi ve arkadaşları tek fazlı bir matris çevirici ile oluşturulan bir EGT yapısını gerçekleştirmişlerdir. Bu yapıda hem primer hem de sekonder kısmında matris çevirici kullanarak bu yapı için oluşturulan matris çeviricinin anahtarlama topolojisi anlatılmaktadır[11].

Bu çalışmada giriş, izolasyon ve çıkış kısmından oluşan EGT'ler incelenmiştir. İkinci bölümde giriş, izolasyon ve çıkış kısımları anlatılmış ve bu kısımlarda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Son bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçlar verilmiştir.

II. ELEKTRONİK GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİ VE DENETİM İLKELERİ

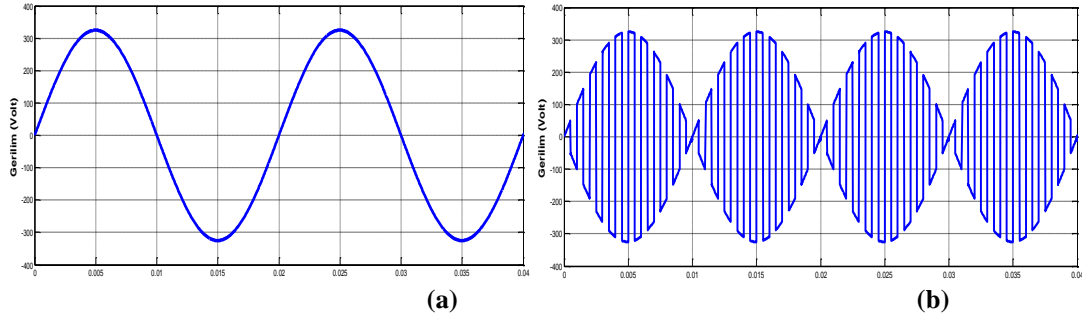
Elektrik güç dağıtım sistemlerinde transformatörler gerilim dönüşümü, izolasyon ve gürültü dekulplajı gibi birçok işlevi gerçekleştirmektedir[5]. Bilindiği gibi klasik (50 Hz'lik) transformatörler yapı olarak büyük ve maliyetlidir [1-5]. Transformatörlerin boyutları frekansla ters orantılı olduğu için yüksek frekansla bir gerilim elde edilmesiyle

transformatörlerin boyutları küçültülmektedir [5-7]. Şekil 1’de primer ve sekonder kısmında AC-AC çeviriciden oluşan bir EGT yapısı görülmektedir. Bu yapıda DC link kapasitörü bulunmamaktadır. AC girişindeki düşük frekanstaki gerilim AC-AC çevirici ile yüksek frekanslı gerilime dönüştürülerek yüksek frekanslı transformatöre iletilir ve yüksek frekanslı transformatörün dönüştürme oranına göre de sekonder kısmında yüksek frekanslı bir gerilim elde edilir. Bu gerilim sekonder kısmındaki AC-AC çeviriciyle de düşük frekanslı AC gerilime dönüştürülür.



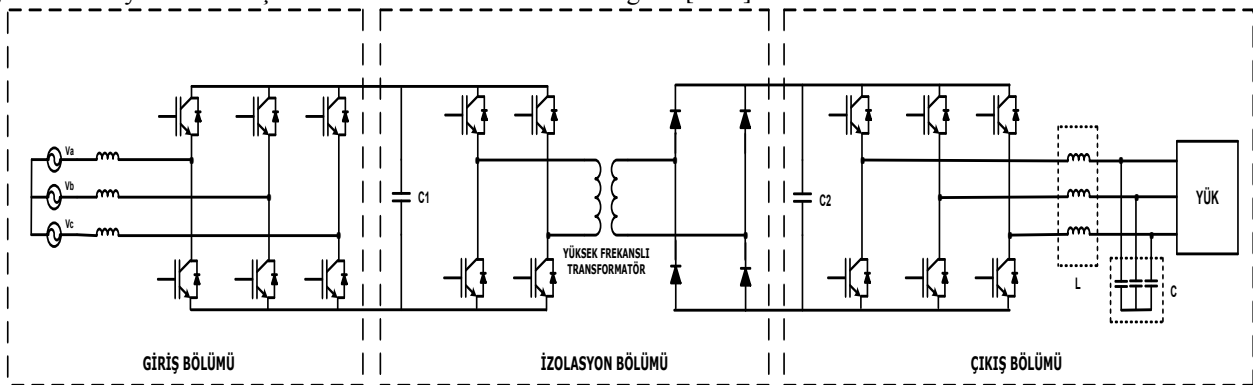
Şekil 1. AC/AC dönüşümlü EGT blok diyagramı

Şekil 2’de AC-AC çeviricinin giriş kısmındaki düşük frekanslı gerilim ile çıkışındaki 1000 Hz’lik yüksek frekanslı gerilim gösterilmektedir. AC-AC çeviricideki yarıiletken elemanlarla uygun anahtarlar yapılarak istenilen frekansta gerilim elde edilebilir ve yüksek frekansla da transformatörün boyutu küçültülebilir [10].



Şekil 2. 325 Volt AC gerilim a) 50 Hz’lik giriş gerilimi b) 1000 Hz’lik çıkış gerilimi

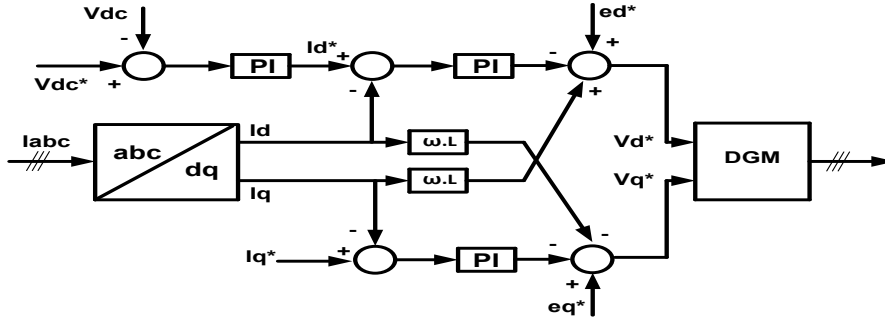
Şekil 3’te ise AC-DC-AC-DC-AC dönüşüm yapısına sahip olan EGT bloğu gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi AC giriş gerilimi öncelikle doğrultularak DC link kapasitörüyle DC gerilime dönüştürülür. Bu kısımda birim güç faktörü önemlidir. Diyot doğrultuculu yani denetimsiz doğrultucularda birim güç faktörü küçüktür. Birim güç faktörünün 1’e yakın olması istenilmektedir[6-9]. Bunun için darbe genişlik modülasyon (DGM) tabanlı yükseltici tip doğrultucu kullanarak diyot doğrultucunun bu olumsuzluğundan kurtularak birim güç faktörü düzeltilebilir ve akım profili sinüse benzer şekilde elde edilebilir. Güç faktörünün yüksek olması şebekeden çekilen akım profilinin şebeke gerilimi ile aynı fazda ve şeklinin de sinüse benzemesine bağlıdır[4-10].



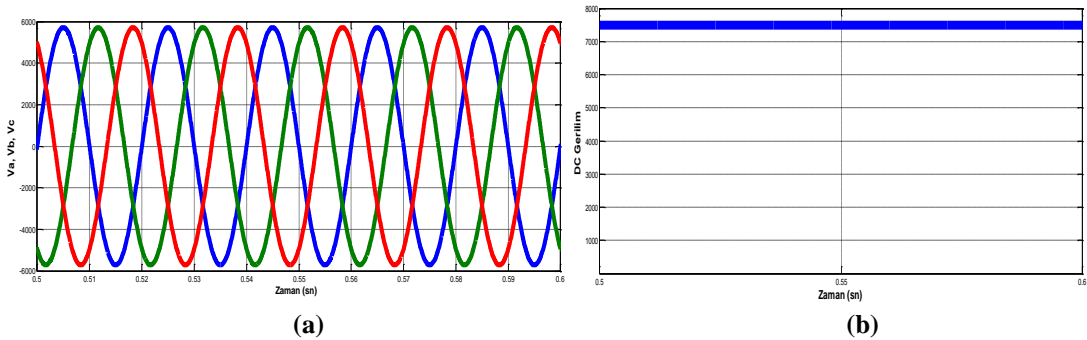
Şekil 3. Giriş, izolasyon ve çıkış kısmından oluşan EGT bloğu

Şekil 4’te DGM yükseltici tip bir doğrultucu devresi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi d-q dönüşümlerinin olduğu bir yapı mevcuttur. Bu yapıda I_q^* akımının birim güç faktörünü sağlaması için 0’a eşit olması gerekmektedir. d-q akım bileşenlerinin PI denetleyicilerden referans d-q akımlarıyla karşılaştırılıp denetlendikten sonra

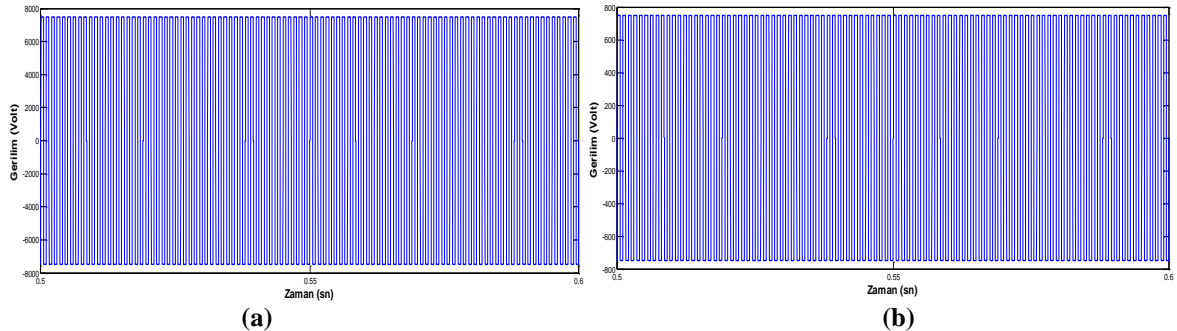
çapraz kulplajlar eklenerek iki akım arasındaki kenetleme etkisi yok edilir ve referans V_d^* ve V_q^* gerilim değerleri elde edilir. Bu büyüklüklerden doğrultucu için gerekli sinyaller üretilir. DGM doğrultucu ile gerilim düşmesi, gerilim yükselmesi, fliker olayı ve harmoniklerin yok edilmesi mümkün olmaktadır [4-5]. DGM doğrultucunun en önemli görevi ise gerilim düşmesi veya yükselmesi durumlarında DC gerilimi sabitlemektir. DGM doğrultucu kullanarak enerji kalitesi iyileştirilir ve güç faktörü 1'e yaklaştırılır [6-8]. EGT için 3 fazlı giriş gerilimi şekil 5 (a)'da gösterilmektedir. DGM doğrultucu devresine gelen 3 fazlı AC gerilim şekil 5 (b)'deki gibi doğrultucu çıkışına bağlanan kapasite yardımıyla doğrultularak istenilen DC gerilim elde edilir. Elde edilen bu DC gerilim tek fazlı inverter yardımıyla yüksek frekanslı kare dalga haline getirilerek yüksek frekanslı transformatöre iletilir. Yüksek frekanslı transformatörün dönüştürme oranına göre primerdeki gerilim değeri sekonderde dönüştürülür. Şekil 6 (a) ve (b)'de primer ve sekonderdeki yüksek frekanslı kare dalga şekli verilmiştir.



Şekil 4. DGM doğrultucu devresi

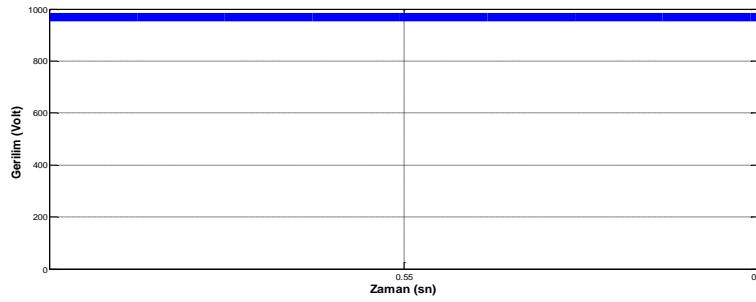


Şekil 5. (a) 3 fazlı AC giriş gerilimi b) Giriş kısmındaki DC gerilim

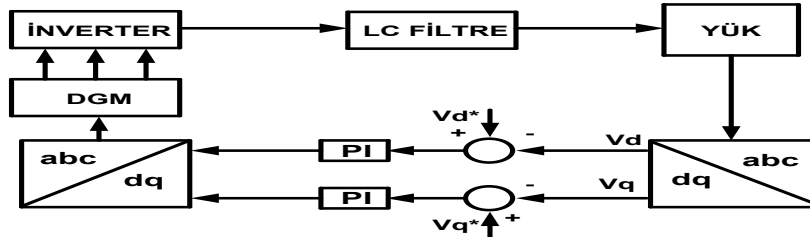


Şekil 6. Yüksek frekanslı kare dalga (primer) Yüksek frekanslı kare dalga (sekonder)

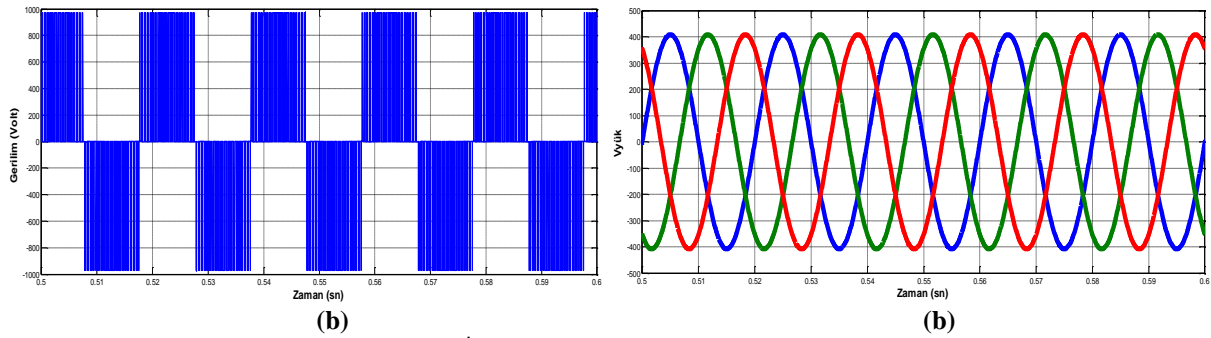
Sekonder kısmındaki yüksek frekanslı kare dalga gerilimi, doğrultucu ve kapasite yardımıyla düşük bir DC gerilime dönüştürülür. Elde edilen bu DC gerilim şekil 7'de gösterilmektedir. DC gerilime dönüştürülen gerilim inverter yardımıyla yüke verilmektedir. Şekil 8'de 3 fazlı iki seviyeli inverter bloğu verilmiştir. Bu yapıda abc-dq dönüşümünden sonra d-q referans değerleri ile karşılaştırılıp PI denetleyicilerle denetlendikten sonra tekrardan tersine bir dönüşümlerde DGM'nin inverter için uygun anahtarlama sinyallerini üretmesi sağlanır ve böylece inverter istenilen gerilimi ve gücü yüke aktarır [12-16]. İnverterde elde edilen gerilim şekil 9(a)'da verilmiştir. Bu gerilim LC filtreden geçirilerek şekil 9 (b)'deki 3 fazlı yük gerilimi elde edilir.



Şekil 7. Diyot doğrultucudan elde edilen DC gerilim



Şekil 8. 3 fazlı gerilim kaynaklı iki seviyeli inverter yapısı



Şekil 9. (a) İverter Vab gerilimi ve (b) 3 fazlı yük gerilimi

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada güç elektroniğindeki ilerlemeler ve yeniliklerin verdiği imkânlarla oluşturulan yeni bir transformatör yapısından bahsedilmiştir. Çalışmada EGT'ler için oluşturulan farklı topolojilerden bahsedilmiştir. İlk olarak AC-AC dönüşüme dayalı matris çeviriciden oluşan EGT sistemi üzerinde durulmuştur. Daha sonra AC-DC-AC-DC-AC dönüşümüne dayalı topoloji üzerinde durularak bu yapıya dayalı bir EGT sistemi Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Oluşturulan EGT sistemindeki kısımların nasıl denetlendiği açıklanmıştır. Bu sistemde kullanılan DGM tipi doğrultucunun sistemin enerji kalitesi ve verimi açısından önemi hakkında bilgiler verilmiştir. Sonuç olarak EGT'ler elektrik enerji sistemleri için önemli bir eleman olmaya başlamıştır ve tek bir devre üzerinde hem transformatörün boyutu küçültülmüş hem de enerji kalitesi iyileştirilmiştir. EGT'ler için farklı topolojilerle de daha etkin performans elde edebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Chapman, S. J., *Elektrik Makinalarının Temelleri*, 3.baskı, İstanbul, 2013.
- [2] Kang M, Enjeti P N, and Pitel I J. "Analysis and Design of Electronic Transformers for Electric Power Distribution system", *IEEE Trans on Power Electronics*, vol.14(6), pp. 1133-1141, 1999.
- [3] McMurray, W., *Power Converter Circuits Having a High-Frequency Link*, U.S Patent 3,517,300, June 23, 1970.
- [4] Ling, C., B. Ge, Bi, D. and Ma, Q., "An effective power electronic transformer applied to distribution system," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on*, Aug. 2011, pp. 1–6.
- [5] Mohapatra, K.K. and Mohan, N., "Matrix Converter Fed Open-ended Power Electronic Transformer For Power System Application", *In Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, pp.1–6, July 2008.

- [6] Subramanya, S., Anjaneyulu, K.S.R., “Modeling and Simulation of AC/AC Matrix Converter Based Power Electronic Transformer for Power Quality Improvement”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 1 Issue 5, July – 2012.
- [7] Iman-Eini, H. , Schanen, JL. , Farhangi1, Barbaroux, Sh. J., Keradec, JP. “A Power Electronic Based Transformer for Feeding Sensitive Loads”, *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*, 15-19 June 2008
- [8] Banaei, M. R., Salary, E. “Power Quality Improvement Using Parallel Operation of Power Electronic Transformer”, *International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.M.O.S.)*, vol. 4, N. 4, August 2011.
- [9] Banaei, M. R., Salary, E. “Power Delivery by a Novel Multi-Stage DC/AC Converter Based on Multilevel AC/AC Converter”, *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, vol. 6, N. 5, September-October 2011.
- [10] Mazgar, F.N., Hagh, M.T., Babaei, E., “Distribution Electronic Power Transformer With Reduced Number of Power Switches”, *Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC)*, 15-16 Feb. 2012.
- [11] Hanafi, H.M., Shah A., Hamzah, M.K., Hamzah, N.R., “Modeling of Electronic Transformer Design with the Implementation of Single-Phase Matrix Converter using MATLAB/Simulink”, *Research and Development (SCOREd), 2009 IEEE Student Conference on*, 16-18 Nov. 2009.
- [12] Iman-Eini, H., Farhangi, Sh., “Analysis and Design of Power Electronic Transformer for Medium Voltage Levels”, *in proc. IEEE PESC conf.*, pp. 843- 847, June 2006.
- [13] Wang, D., Mao, C., Jiming, L. and et al, “The Research on Characteristic of Electronic Power Transformer For Distribution System,” In: *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia and Pacific Dalian, China*, 1-5, 2005.
- [14] Wrede, H, Staudt, V. and Steimel, A , “Design of an Electronic Power Transformer”, In: *Proc. 2002 IECON (Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference)*, 20002 ,pp.1380-1385.
- [15] Basu, K., Gupta, R.K., Nath, S., Castelino, G.F., Mohapatra, K.K., Mohan, N., “Research in Matrix-Converter Based Three-Phase Power-Electronic Transformers”, *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International* , 21-24 June 2010, pp.2799- 2803.
- [16] Wang, D., Mao, C. , . Lu, J, Fan, S., Peng, F.Z., “Theory and Application of Distribution Electronic Power Transformer”, *Electric Power Syst. Res.*, vol. 77, pp. 219–226, March 2007.