



İki Yönlü Çift Aktif Köprülü DA-DA Dönüştürücünün Tasarımı ve Kontrolü Design and Control of Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC Converter

Miraç ÖZTÜRK¹, Hakan KAHVECİ¹, Furkan Muhammed KIRIKCI¹

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği
Karadeniz Teknik Üniversitesi

miracozturk61@outlook.com, hknkahveci@ktu.edu.tr, mfurkankirikci@ktu.edu.tr

Özet

Günümüz teknolojisi gün geçtikçe gelişmekte ve hayatımızı kolaylaştırmak için ilerlemektedir. Bu ilerlemenin olduğu noktalardan birisi güç aktarımı yapılabilen dönüştürücülerdir. Günümüzde elektrikli araçların kullanımı için gerekli olan sistemlerde batarya ve güç aktarımı bulunmaktadır. Bunun haricinde güç aktarımının bulunduğu uçaklar, şebekelerde bulunan DA gereken noktalarda kullanılmaktadır. Bu noktada enerjinin depolanarak güç aktarımı sağlanması için çift aktif köprülü iki yönlü çalışan dönüştürücüler tasarlanmıştır. Temel mantık olarak DA-DA dönüştürücü olarak çalışmaktadırlar. Dönüştürücülerin kullanıldığı yerde amacına uygun olabilmesi için farklı kontroller ile istenilen aralıklarda kullanılabilmesi sağlanmaktadır. Bu çalışmada iki yönlü aktif olarak çalışan dönüştürücü ve dönüştürücünün teorik olan tüm gereksinimleri incelenmiştir. İncelenen dönüştürücüde PI, PID kontrol yöntemleri kullanılmıştır ve karşılaştırması yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda PI ile kontrol edilen sistemin istenilen düzeyde çalıştığı gözlemlenmiştir.

Abstract

Today's technology is developing day by day and is advancing to make our lives easier. One of the points of this progress is power transfer converters. Today, the systems required for the use of electric vehicles include batteries and power transmissions. Apart from this, aircraft with power transmissions are used at the points where DC is required in the networks. At this point, two-way converters with double-active bridges are designed to store energy and provide power transfer. They work as DC-DC converters as basic logic. In order for the converters to be suitable for their purpose where they are used, it is ensured that they can be used at desired intervals with different controls. In this study, a two-way actively working transducer was examined. All the theoretical requirements of the converter have been examined. PI, and PID control methods were used and compared in the converter examined. As a result of the comparison, it has been observed that the system controlled by PI works at the desired level.

1. Giriş

İnsanların teknolojiye olan bağımlılıklarının artması elektrik enerjisine olan talebin yükselmesi elektrikli sistemlere olan çalışmayı arttırmaktadır. Bu talebin karşılanması için rüzgâr ve

güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu ve elektrik kesintisi koşulları altında yüksek kapasiteli pil yedeğinin sağlanması gerekmektedir [1]. Şebekeden bataryaya doğru çalışan sistemlerin aksine bataryadan da şebekeye doğru çalışan sistemlerin gerektiği noktada DA-DA dönüştürücü kullanmalıyız [2]. Çift yönlü dönüştürücüler pil depolama sistemi, kesintisiz güç kaynağı gibi çift yönlü enerji akışının önemli olduğu uygulamalarda rol oynamaktadır. İki yönlü çift aktif köprü (DAB) dönüştürücü topolojisi galvanik izolasyonlu, yüksek verimli ve simetrik devre yapısı nedeniyle çift yönlü güç aktarımında büyük öneme sahiptir [3]. İki yönlü çift aktif köprülü sistem çalışma moduna bağlı olarak pil depolama sisteminden güç depolamak veya beslemek için mikro şebekelerde kullanılan sistemdir [4].

İki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücü yüksek güçlü uygulamalar için en uygun dönüştürücülerdendir. Minimum sayıda harici eleman (endüktans, kapasite) barındırmaktadır. Az sayıda harici eleman bulunmasının avantajı dönüştürücünün güvenilirliğinin artmasını sağlamaktadır. Dönüştürücüde bulunan harici elemanlar, anahtarlar, transformatör seçimi ve bu sistemin kontrolü için olan parametrelerin belirlenmesi büyük öneme sahiptir [5-6]. Dönüştürücü genellikle basit çalışma prensibi olan tek fazlı kaydırma (SPS) yöntemiyle beraber kullanılmaktadır. Tek fazlı kaydırma işlemi dönüştürücüde bulunan transformatörün primer ve sekonder sargısı arasında bir faz kaydırma işlemidir. Yapılan faz kaydırmanın kontrolü anahtarlamalar üzerinden yapılmaktadır [7-8].

İnsanların teknolojiye ilerletmesiyle birlikte fosil yakıtlı araçlar yerini elektrikli araçlara bırakmaktadır. Elektrikli araçların izlediği bu yol elektrikli uçaklar üzerinde de gerçekleşme yönelimindedir. Elektrikli uçakların olması sadece çevreye olan kirliliğin azalmasına katkı sağlamaz daha yüksek güvenilirlik sağlayabilir. Uçakta kullanılan sistemler (AA ve DA) olarak bir arada çalışmaktadır. Dönüştürücülerin uçakta oldukça önemli bir payı vardır. Dönüştürücülerin yüksek güç yoğunluğu, yüksek güvenilirlik, yüksek verimliliğe sahip olduğu için kullanılmaktadır. Uçakta bulunan sistemler AA ve DA olarak çalıştığı için elektrikli olarak izolasyon, yumuşak anahtarlama önemli bir etkiye sahiptir. Dönüştürücünün sıfır gerilim anahtarlama (ZVS) çalışma aralığı genişletilerek sistemin daha yumuşak -anahtarlama yapması sağlanır [9-11]. Şekil 2' de iki yönlü çift aktif köprülü (DAB) dönüştürücünün yapısı gösterilmiştir.

Dönüştürücünün yapısında gösterildiği gibi yüksek frekanslı bir transformatör aracılığıyla bağlanan çift aktif köprüye sahip sistem öncelikle anahtarlamalar üzerinden DA-AA 'ye daha sonra transformatörden geçerek ikinci köprüde AA-DA 'ye dönüştürülmektedir [12]. Yapılan anahtarlamaların sisteme tepkisi incelenerek sistem üzerinde minimum kayıp olması için çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmaların çalışılan gerilim, akım veya güç değerine bağlı olarak verimde farklılıklar oluşturmaktadır. Anahtarlama elemanları ile doğru akımın alternatif akım kare dalgaya çevrilerek transformatör çalışması sağlanacaktır. Transformatörün kaçak endüktansı anlık enerji depolama elemanı olarak hizmet eder. Anlık olarak sistemde fazla akımın oluşmasını engellemek için sisteme sıfır gerilim anahtarlama (ZVS) yapılarak sistem elemanlarının korunması sağlanmaktadır [13]. Elemanların korunması için yapılan sıfır gerilim anahtarlama yüksek akımların olduğu noktalarda sıfır akım anahtarlama (ZCS) geçiş yaparak kazanç sağlanır [14]. Her köprü trafo primer ve sekonderi üzerinde kare dalga voltajı üretilebilir için sabit iletim süresinde (%50) kontrol edilir. Transformatörün kaçak endüktans değerine göre kontrol edilmiş sistem, bir DA kaynaktan diğerine güç akışı için uygun şekilde faz kaydırılır. Güç önde gelen kare dalganın olduğu taraftan sağlanır ve çift yönlü güç akışı sağlanmış olur [15].

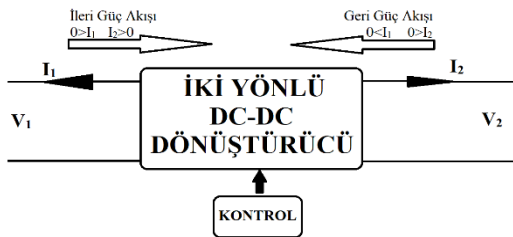
Tek yönlü olarak çalışan dönüştürücüler kurulum alanı sıkıntı olmayan sistemlerde ayrı ayrı kullanılarak çift yönlü olarak güç akışı sağlayabilirler. Ancak kurulum alanının sıkıntı olduğu sistemlerde iki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücü kullanılmaktadır. İki yönlü olarak çalışan dönüştürücülerin uygun aralıklarda verimli çalışabilmesi için kontrol sistemleri kullanılmaktadır. İki yönlü çift aktif köprü dönüştürücünün temel prensipleri, çalışma metodları, yumuşak anahtarlama koşulları ve farklı oluşabilecek durumlara karşı alınabilecek önlemlerden bir sonraki bölümlerde bahsedilecektir.

2. Materyal ve Yöntem

İki yönlü çift aktif köprü, tek devre halinde iki yönlü güç akışı yapılabilen DA-DA dönüştürücüdür. Dönüştürücü az eleman kullanımı, yumuşak anahtarlama uygulanabilmesi, düşük maliyet ve yüksek verimlilik avantajlarına sahip sistemdir. İncelenen olan dönüştürücünün temel çalışma prensibi ve faz kaydırmanın kontrol edilme yöntemi incelenecektir. Yapılacak olan kontrol yöntemleri PI ve PID kontrol yöntemleri ile sistem çalışmasının davranışları incelenecektir.

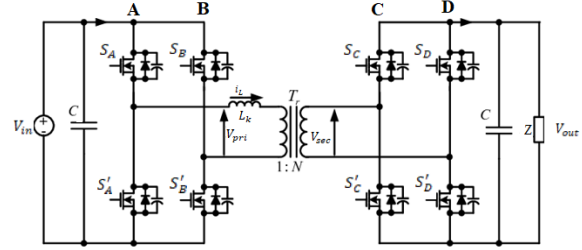
2.1. DAB Dönüştürücü

İki yönlü çift aktif köprü DA-DA dönüştürücünün temel çalışma prensibi dönüştürücünün birincil köprü ve ikincil köprüsünde bulunan IGBT/MOSFET 'in anahtarlamalarını bir kontrol sistemi ile kontrol ederek çift yönlü çalıştırılmaktadır. Çalıştırılan sistemin genel çalışma prensibi Şekil 1' de verilmektedir.



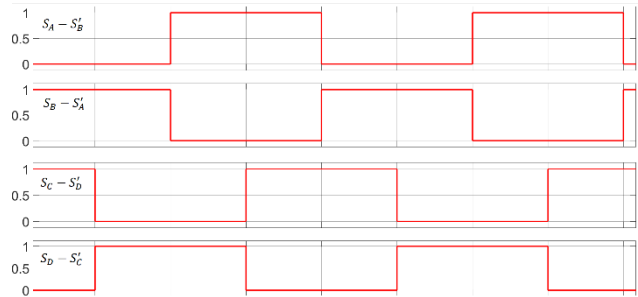
Şekil 1: Dönüştürücünün genel çalışma prensibi

Dönüştürücülerin giriş ve çıkışları arasında olan bağlantıya göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar İzoleli ve İzolesiz dönüştürücülerdir. İzolesiz dönüştürücülerin giriş ve çıkışları doğrudan bağlantıya sahiptir. İzoleli dönüştürücülerin giriş ve çıkışları arasında doğrudan değil transformatör gibi elemanlarla bağlantı yapılmaktadır. Transformatörde bulunan kaçak endüktans ve devrenin tam hali Şekil 2' de verilmiştir.



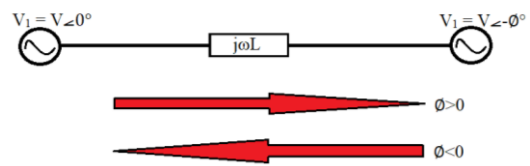
Şekil 2: İki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücü

Dönüştürücü 8 adet IGBT/MOSFET 'in anahtarlama ile oluşan devredir. Şekil 2'de verilen A, B, C, D ile gösterilen bölgedeki anahtarlama çalışmalarının fonksiyonları harmonik formda fourier serisi olarak ifade edilmiştir [16-17]. Anahtarlamaların kontrolü için tek fazlı kaydırma (SPS), iki faz kaydırma (DPS), genişletilmiş faz kaydırma (EPS) ve üç faz kaydırma (TPS) olmak üzere yaygın yöntemler kullanılmaktadır. Anahtarlamalar %50 görev döngüsü olacak şekilde çalıştırılmaktadır. İncelenen olan dönüştürücüde tek faz kaydırma yöntemi kullanılacaktır. Tek faz kaydırma birinci ve ikinci köprü arasında çapraz anahtarlar aynı davranış gösterecek şekilde anahtarlama yapılarak faz kayması oluşturulması sağlanır [18-19]. Yapılacak olan anahtarlama işaretleri Şekil 3' de anahtarların tetiklenme davranışı gösterilmiştir.



Şekil 3: Anahtarlama çalışması

İki yönlü çift aktif köprüye sahip dönüştürücüde kararlı durum güç aktarım ilişkisi bir empedans üzerinden bağlanan iki kaynak gibi düşünülebilir. Şekil 4' de empedans üzerinden basit olarak bağlantı gösterilmiştir.



Şekil 4: Dönüştürücünün basitleştirilmiş güç akışı

Basitleştirilmiş olarak görülen bağlantının güç akışı faz kayması geride kalan tarafa olduğu görülmektedir. Faz açısı üzerinden de sistemin hangi yöne doğru güç akışı olduğu görülebilmektedir. Güç değerinin elde edilmesi Denklem 1' de verilmektedir.

$$P = \frac{V_1 V_2 \sin \phi}{\omega L} \quad (1)$$

İki yönlü çift aktif köprü dönüştürücünün temel çalışma prensibi iki köprü arasında bir faz kayması oluşturmaktır. Şekil 2' de görülen devrenin faz kayması transformator ve anahtarlama elemanları üzerinden gerçekleşmektedir. Sistem faz kayması ve devre elemanları dikkate alınarak Denklem 1' in düzenlenmiş hali Denklem 2' de verilmiştir [20].

$$P = \frac{nV_1 V_2 \phi(\pi - \phi)}{2\pi^2 F_s L} \quad (2)$$

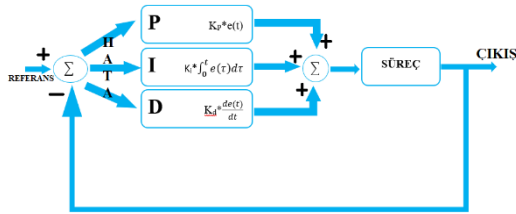
Güç ifadesinde görüldüğü üzere sistemin faz kaymasının elde edilebileceği ifade Denklem 3' de verilmiştir.

$$\phi = \frac{\pi}{2} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8 * F_s * L * P_{çıkış}}{n * V_1 * V_2}} \right) \quad (3)$$

ϕ faz kaymasının açısıdır. Devrenin çalışma zamanına göre endüktans değerinin hesaplanması değişmektedir.

2.2. Kontrol Yöntemi (PID)

PID hata değerini azaltmak için üç ayrı sabit parametrenin kontrol edilmesini sağlar. P oransal, I integral, D türevdir. P oluşmuş olan hataya bağlı, I geçmiş hataların toplamı, D gelecekteki hataların bir tahminidir [20]. Şekil 5' de görsel olarak PID mantığı gösterilmiştir.

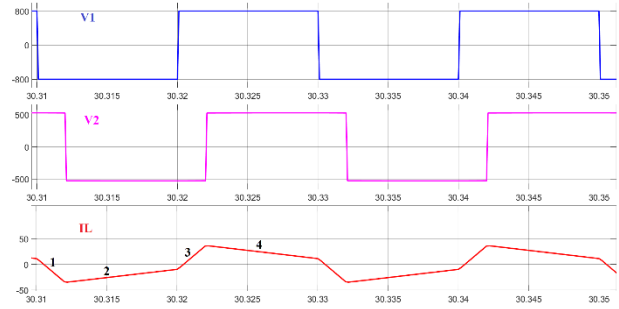


Şekil 5: PID çalışma prensibi

3. Yapılan Çalışmalar ve Bulgular

Sistemin kurulumu yapıldıktan sonra Şekil 3 de gösterildiği gibi devrenin anahtarları tek faz kaydırma (SPS) olacak şekilde çalıştırılmıştır.

Şekil 6' da görüldüğü üzere anahtarlama yapılmış sistemde endüktans üzerinde 4 farklı durumun olduğu zaman aralıkları mevcuttur. Endüktans üzerinde oluşan 4 farklı durumda endüktansın pozitif olma durumu ve negatif olma durumu gösterilmiştir [19].

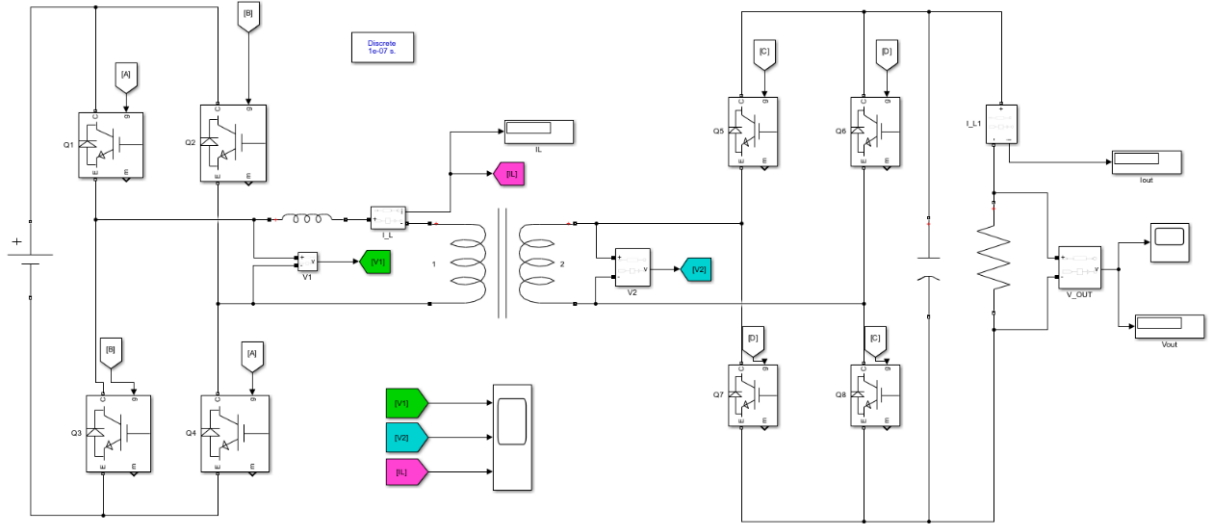


Şekil 6: Endüktans üzerindeki etki

Devrede oluşan 4 farklı durumda akımın hesaplanması akımın aktığı devrenin çalıştığı duruma göre Denklem 4' den elde edilebilmektedir.

$$\frac{di}{dt} = \frac{\pm V_1 \pm V_2}{L} \quad (4)$$

İki yönlü çift aktif köprü dönüştürücü MATLAB/SIMULINK ortamında oluşturulmuştur. Dönüştürücüde anahtarlama yapılacak 8 adet IGBT kullanılmıştır. Anahtarlama çapraz anahtarlar aynı olacak şekilde %50 bağlı iletim süresince çalıştırılmıştır. ŞEKİL 7' de SIMULINK üzerinden oluşturulan dönüştürücü görülmektedir.



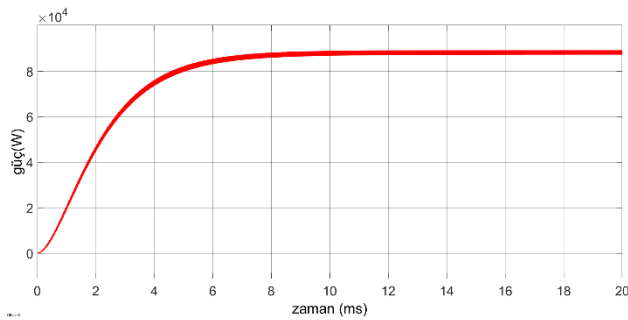
Şekil 7: Tasarlanan DA-DA dönüştürücü

Dönüştürücüde kullanılan değerler Çizelge 1’ de verilmektedir.

Çizelge 1: Dönüştürücü kullanılan değerler

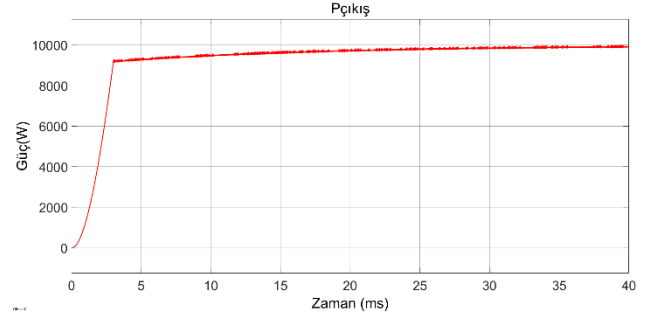
Faz Kayması	$-0.44 < \phi < 0.44$ (rad)
Kaçak Endüktans	35 mH
Anahtarlama Frekansı	100 kHz
Dönüştürme Oranı	1:0.625
Yük Direnci	26 ohm
Giriş Gerilimi	800 V
Çıkış Gerilimi	500 V
Çıkış Akımı	20 A
Çıkış Gücü	10 kW

Çizelge 1’ de verilen değerler ile dönüştürücü kontrolsüz olarak sabit bir faz kayma açısında çalıştırıldığında çıkışta elde edilen güç değeri Şekil 8’ de verilmiştir.



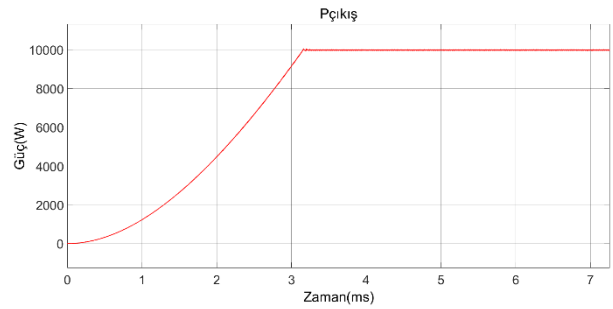
Şekil 8: Kontrolsüz çıkış güç sonucu

Kontrolsüz olarak elde edilen değerlerin iyileştirilmesi ve sistemin zaman içerisindeki değişimlerinin kontrolü için PID kontrolü sisteme uygulanmıştır. PID sistemin çalışmasında gerekli parametreler değiştirilerek düzenlenmiştir. Şekil 9’ da PID ile kontrol edilmiş sistem görülmektedir.



Şekil 9: PID ile kontrol edilmiş güç sonucu

PID kontrolü istenilen referans değere hızlı ve güvenilir ulaşması için çalışılmıştır. Sistemin PID kontrolü altında yavaş ve kararsız çalışması sebebiyle sistem PI olarak çalıştırılmıştır. PI olarak çalışan sistem PID olarak çalışan sistemden çok daha hızlı bir şekilde çalıştığı Şekil 10’ da görülmektedir.



Şekil 10: PI ile kontrol edilmiş güç sonucu

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

İki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücünün çalışma yöntemlerinden olan tek faz kaydırma yöntemi incelenmiştir. İncelemeler yapılırken teorik olarak yapılmış ve daha sonra simülasyon ortamına taşınmıştır. Dönüştürücünün amacına yönelik kullanılabilmesi için bir kontrol yöntemleri

uygulanmıştır. Uygulanan kontrol yöntemleri PI ve PID kontrol yöntemidir. Kontrol yöntemi uygulanmadan önce anahtarlar üzerinde tek faz kaydırma yöntemi kullanılarak tetiklemeler yapılmıştır. Yapılan kontrolsüz simülasyon çalışmasında sistemin istenilen güç değerine değil daha düşük bir değerinde sonuç elde ettiği Şekil 8’ de gözlemlenmiştir. Dönüştürücüde kontrolsüz elde edilen değeri istenilen değere taşıyabilmek için PID kontrolü anahtarlar uygulanan faz kayması kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuç ise kararsız ve daha yavaş çalışmıştır. PID kontrolünde olan D(türevsel) etkinin sistemi kararsız ve daha uzun çalıştırdığı Şekil 9’ da gözlemlenmiştir. Dönüştürücünün daha verimli olabilmesi için sistemde olan türevsel etki kaldırılarak sistem kontrolünün PI olarak yapılmıştır. PI kontrolü ile anahtarlamalarda yapılan faz kaydırmasının kontrolü sistemi Şekil 10’ da görüldüğü üzere çok hızlı ve çok kararlı bir yapıya götürmüştür.

Dönüştürücünün kontrolü amacına uygun olacak şekilde istenilen güç aralığında elde edilmesi için PI kontrolü yapılmıştır.

5. Kaynaklar

- [1] George, Kenny. "Design and control of a bidirectional dual active bridge DC-DC converter to interface solar, battery storage, and grid-tied inverters." (2015).
- [2] JANAKI, N.; JENITHA, J. Suji. A Review on Bidirectional ‘Dual-Active Bridge DC-DC Converter’ for Various Applications.
- [3] J. Yin, J. Lu, Y. Liu, J. Peng and H. Jiang, "Novel Phase-Shift Method for Fast Power Reversal With Transient Zero Voltage Switching in a Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 9, pp. 8028-8038, Sept. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3013549.
- [4] ULLAH, Nasim, et al. A computationally efficient robust voltage control for a single phase dual active bridge. Energy Reports, 2020, 6: 3346-3356.
- [5] IQBAL, Mohammad Tauquir, et al. Explicit discrete modelling of bidirectional dual active bridge dc-dc converter using multi-time scale mixed system model. IET Power Electronics, 2020, 13.18: 4252-4260.
- [6] Middlebrook R. D., Cuk S.: "AIA general unified approach to modelling switching-converter power stages," in 1976 IEEE Power Electron. Specialists Conf., June 1976, pp. 184-185.
- [7] S. Wei, Z. Zhao, K. Li, L. Yuan and W. Wen, "Deadbeat Current Controller for Bidirectional Dual-Active-Bridge Converter Using an Enhanced SPS Modulation Method," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 2, pp. 1274-1279, Feb. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3007706.
- [8] X. Li and Y. Li, "An optimized phase-shift modulation for fast transient response in a dual-active-bridge converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 6, pp. 2661-2665, Jun. 2014.
- [9] JIANG, Chunyang; LIU, Hongchen. A novel interleaved parallel bidirectional dual-active-bridge DC-DC converter with coupled inductor for more-electric aircraft. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68.2: 1759-1768.
- [10] Y. Yan, H. Bai, A. Foote, and W. Wang, "Securing full-power-range zero-voltage switching in both steady-state and transient operations for a dual-active-bridge-based bidirectional electric vehicle charger," IEEE Trans. Power Electron., vol. 35, no. 7, pp. 7506-7519, Jul. 2020.
- [11] M. Mollahasanoğlu and H. Okumuş, "A Review of Three Phase AC-DC Power Factor Correction Converters for Electric Vehicle Fast Charging", Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, no. 32, pp. 663-669, Dec. 2021, doi:10.31590/ejosat.1041081
- [12] I. Abuishmais and F. R. Shahroury, "Bidirectional Dual Active Bridge for Interfacing Battery Energy Storage Systems with DC Microgrid," 2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECET52533.2021.9698654.
- [13] S. Shao, H. Chen, X. Wu, J. Zhang and K. Sheng, "Circulating Current and ZVS-on of a Dual Active Bridge DC-DC Converter: A Review," in IEEE Access, vol. 7, pp. 50561-50572, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2911009.
- [14] M. Zhang, D. M. Xu, and Z. Qian, "An improved dual active bridge dc/dc converter," in Proc. 32nd IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC 2001), Vancouver, BC, Jun. vol. 1, pp. 232-236.
- [15] A. K. Jain and R. Ayyanar, "Pwm control of dual active bridge: Comprehensive analysis and experimental verification," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 4, pp. 1215-1227, April 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2070519.
- [16] D. Segaran, B.P. McGrath, and D.G. Holmes, Adaptive dynamic control of a bi-directional DC-DC converter, Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, USA, 2010, 1442-1449.
- [17] D. Segaran, B. P. McGrath and D. G. Holmes, "Adaptive dynamic control of a bi-directional DC-DC converter," 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010, pp. 1442-1449, doi: 10.1109/ECCE.2010.5618258.
- [18] B. Feng, Y. Wang and J. Man, "A novel dual-phase-shift control strategy for dual-active-bridge DC-DC converter," IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2014, pp. 4140-4145, doi: 10.1109/IECON.2014.7049124.
- [19] A. R. Rodríguez Alonso, J. Sebastian, D. G. Lamar, M. M. Hernando and A. Vazquez, "An overall study of a Dual Active Bridge for bidirectional DC/DC conversion," 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010, pp. 1129-1135, doi: 10.1109/ECCE.2010.5617847.
- [20] INSTRUMENT, T. Bidirectional, Dual Active Bridge Reference Design for Level 3 Electric Vehicle Charging Stations.