

DPS ve TPS Kontrollü Anahtarlama Stratejilerinin Çift Aktif KöprülÜ Dönüştürücülerde Performans Karşılaştırması

Khalıl YOUSOUF ADAM^{1*}, Mehmet Emin MERAL²

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği / Fen Bilimleri Enstitüsü, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Türkiye

² Elektrik Elektronik Mühendisliği / Fen Bilimleri Enstitüsü, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Türkiye

*(khalilyoussoufadam@gmail.com)

(Received: 15 May 2025, Accepted: 20 May 2025)

(7th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2025, May 15-16, 2025)

ATIF/REFERENCE: Youssouf Adam, K. & Meral, M. E. (2025). DPS ve TPS Kontrollü Anahtarlama Stratejilerinin Çift Aktif KöprülÜ Dönüştürücülerde Performans Karşılaştırması. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(5), 225-231.

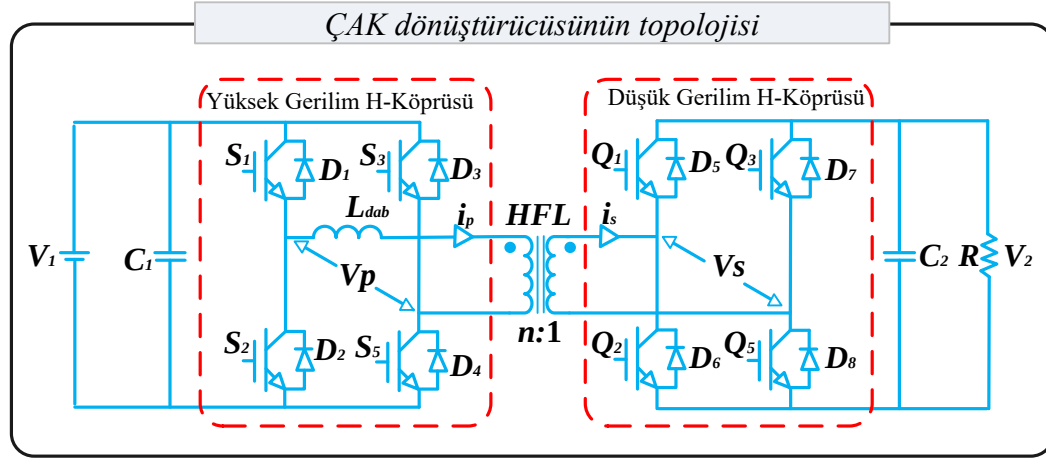
Özet – Bu çalışma, çift aktif köprü (ÇAK) dönüştürücülerdeki farklı anahtarlama tekniklerini Dual phase shift (DPS), Triple phase shift (TSP) kapsamlı bir şekilde karşılaştırmıştır. ÇAK dönüştürücünün performansı, temel anahtarlama tekniğinden etkilenmiş olup; güç seviyesi, giriş ve çıkış akımları/gerilimleri dahil tüm parametreler bu durumdan etkilenmiştir. Tüm çalışma aralığında en yüksek ve en verimli performansı elde etmek için çeşitli anahtarlama kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre, DPS ve TSP gibi birden fazla serbestlik derecesine sahip anahtarlama teknikleri ile önerilen kontrol stratejisi en iyi performansı sağlamıştır. Önerilen optimizasyon ve incelenen anahtarlama teknikleri, dönüştürücünün verimliliği, akım ve gerilim dalgalanmaları ile geri akış gücü açısından değerlendirilmiştir. Önerilen kontrol stratejisi, dönüştürücünün dinamik davranışını optimize ederek enerji kayıplarını ve geri akışı minimize etmiştir. Bu bulgular, yüksek verimli güç elektroniği sistemleri tasarımı için kritik bir referans sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Tek Faz Kaydırmalı, Genişletilmiş Faz Kaydırmalı, Çift Faz Kaydırmalı, Üçlü Faz Kaydırma, SPS, EPS, DPS, TPS, Çift Aktif Köprü, Dual Active Bridge, Single Shase Shift, Extended Phase Shift, Dual Phase Shift, Dual Phase Shift.

1.GİRİŞ

Çift Aktif Köprü (ÇAK) veya Dual Active Bridge (DAB) dönüştürücü, ilk olarak De Doncker ve Divan (1991) tarafından önerilmiş ve çift yönlü güç aktarımı, yüksek güç yoğunluğu, sıfır gerilim anahtarlama (ZVS), geniş gerilim regülasyon aralığı gibi avantajları nedeniyle yaygın bir kullanım alanı bulmuştur [6]. Ancak, bu avantajlara rağmen ÇAK dönüştürücünün kontrol sürecinde yük değişimleri, anahtarlama etkileri, giriş gerilim dalgalanmaları, bekleme süresi ve anahtar devresi gerilim düşüşleri gibi faktörler, çıkış geriliminde hatalara yol açarak sistemin kontrol doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Bu sorunların üstesinden gelmek için çıkış gerilimi kontrolüne yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [1]. Tam köprü (full-bridge) dönüştürücü topolojisinde, transformatör kaçak endüktansından kaynaklanan serbest dolaşım akımlarının çıkışa yönlendirilmesiyle sistem verimliliği artırılmış ve yüksek frekanslı çalışma sayesinde kompakt bir güç yoğunluğu elde edilmiştir [2]. ÇAK dönüştürücü, düşük anahtarlama gerilim stresi, küçük pasif bileşen değerleri ve çift yönlü güç akışı için kesintisiz kontrol sağlayan simetrik bir yapı sunar. Aktarılan güç miktarı, iki köprü arasındaki faz açısı farkı ve DC gerilim seviyeleri ile kontrol edilir [3]. ÇAK dönüştürücünün ideal devre yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir. Topoloji, yüksek ve düşük gerilim

tarafında birer H-köprüsü, yüksek frekanslı bir transformatör ve bir endüktanstan oluşur. Yüksek gerilim tarafındaki doğrultucu, DC bağlantı gerilimini stabilize ederken, düşük gerilim tarafı ÇAK ile regüle edilir. Transformatörün gerilim ve akım dalga formları Şekil 2'de görülebilir. Bu yapı, tüm anahtarlarda sıfır gerilim anahtarlama (ZVS), düşük gerilim stresi ve pasif bileşenlerin minimal boyutlandırılması gibi avantajlar sağlar. İlk çalışmalarda, enerji transferini kontrol etmek için tek faz kaydırmalı (SPS) anahtarlama yöntemi kullanılmıştır [4], [11]. Bu yöntem, faz kaydırma tekniğiyle sistem verimliliğini artırmayı hedefler. Çift Aktif Köprü (ÇAK) dönüştürücü, çift yönlü enerji aktarımı sağlayan ve yüksek verimlilikle çalışan bir topoloji olarak öne çıkar. En dikkat çekici özelliği, ek devrelere ihtiyaç duymadan PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyali ile sıfır gerilim anahtarlama (ZVS) gerçekleştirebilmesidir. Bu sayede anahtarlama kayıpları minimize edilerek sistem verimliliği artırılır. Aynı zamanda hem yükseltici (boost) hem de düşürücü (buck) modlarda çalışabilme esnekliği, geniş bir gerilim regülasyon aralığı sunar [6]. Son yıllarda yarı iletken teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, ÇAK dönüştürücüler 100 kHz ile 500 kHz aralığında yüksek frekanslı uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır [8]. Bu gelişmeler, sistemlerin güç yoğunluğunu daha da artırmış ve özellikle elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve enerji depolama alanlarında yaygınlaşmalarını sağlamıştır. Bu çalışmada, ÇAK dönüştürücünün dinamik kontrol performansını iyileştirmeye yönelik bir kontrol stratejisi önerilmiş ve benzetim sonuçlarıyla desteklenmiştir.



Şekil 1. ÇAK dönüştürücüsünün topolojisi.

II.MATERYAL VE YÖNTEM

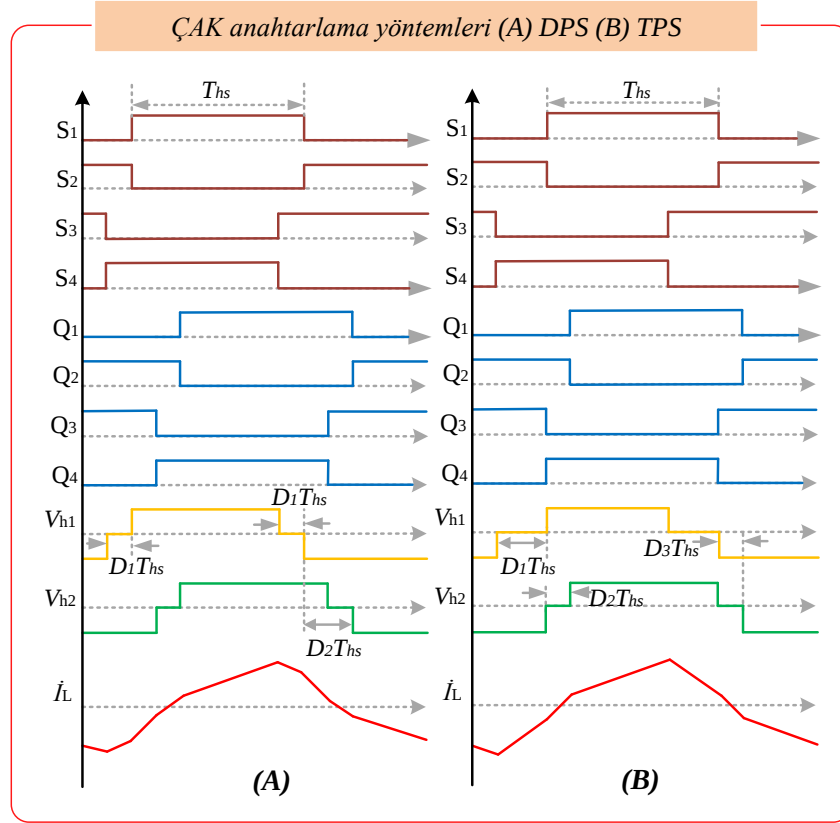
Doncker ve arkadaşları (1991) tarafından geliştirilen Tek Fazlı Kaydırma Kontrolü (SPS), izole çift yönlü çift aktif köprü dönüştürücüler için yaygın bir anahtarlama yöntemidir. Bu yöntemde, köprülerdeki anahtar çiftleri %50 görev oranında açılır. Çalışmalar, SPS ile %97,4 verimlilik elde edildiğini göstermektedir [1]. Ancak, SPS'nin dezavantajları arasında değişken yük koşullarında yumuşak anahtarlama elde edememesi ve sirkülasyon akımının meydana gelmesi sayılabilir [10].

Bu sorunları aşmak için Genişletilmiş Faz Kaydırma Modülasyonu (EPS) Demetriades önerilmiştir [12]. EPS yöntemde birincil tarafta üç seviyeli gerilim çıktısı üretir. İkincil H-köprüsü ise, iki seviyeli gerilim çıktısı ile SPS ile aynı şekilde çalışır. İç faz kaydırma oranı D_1 , birincil taraftaki H-köprüsünün farklı köprü kollarındaki anahtarlar arasında tanımlanmıştır; dış faz kaydırma oranı D_2 ise iki H-köprüsü arasındaki faz kaydırma oranıdır bu, SPS modülasyonu altındaki faz kaydırma oranı D ile aynıdır. Faz kaydırma oranları kullanılarak harmonikler ve akım stresi azaltılır, ZVS aralığı genişletilir. EPS, dinamik performansı iyileştirirken, iki kontrol parametresi gerektirir [4].

Çift Faz Kaydırmalı Yöntem (DPS), Zhang ve Ruan tarafından EPS'in geliştirilmiş bir versiyonu olarak önerilmiştir [13]. Her iki köprüde eşit iç faz kaydırma oranı ($D_1=D_2$) ile çalışarak transformatörün her iki tarafında üç seviyeli AC gerilim dalga formları üretir. Bu yöntem, hafif yüklerde reaktif gücü ortadan

kaldırarak verimliliği artırır (%89–%96,5), akım stresini ve tepe akımlarını azaltır. ZVS aralığının genişlemesi, anahtarlama kayıplarını düşürürken dinamik yanıtı iyileştirir [4], [5], [9].

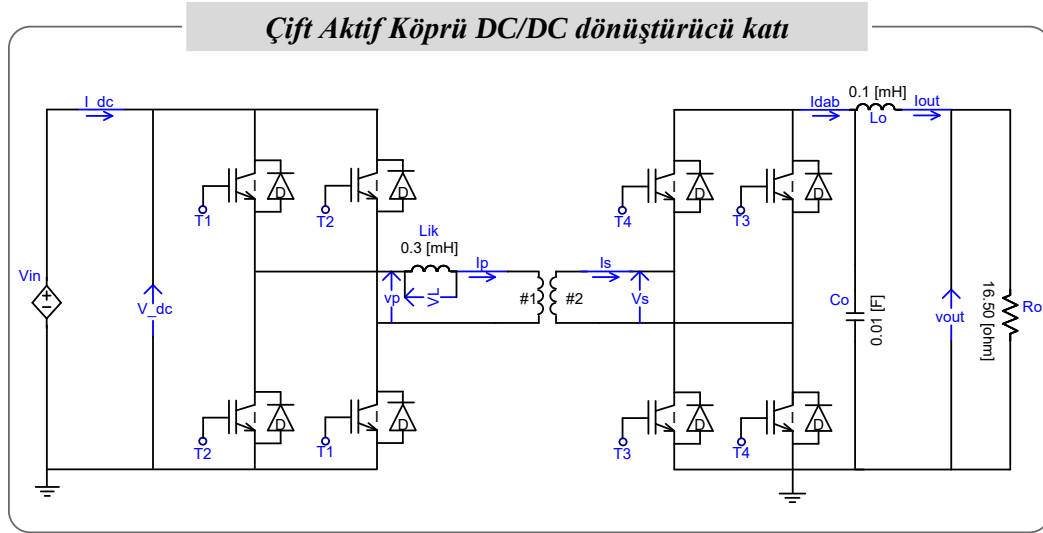
Üçlü Faz Kaydırmalı Yöntem (TPS), Krismer ve Kolar tarafından önerilen ve en üst düzey performans hedefleyen bir tekniktir [14]. Eşit olmayan iç faz kaydırma oranları ($D_1 \neq D_2, D_1 = D_2$) ile çalışarak sıfır yüke kadar genişletilmiş ZVS aralığı sağlar. TPS, en düşük akım/gerilim dalgalanması ve en yüksek verimliliği (%96–%97,8) sunar. Ancak, üç kontrol parametresi gerektirmesi, karmaşık algoritmalar ve standartlaşma eksikliği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda sınırlıdır [5], [7].



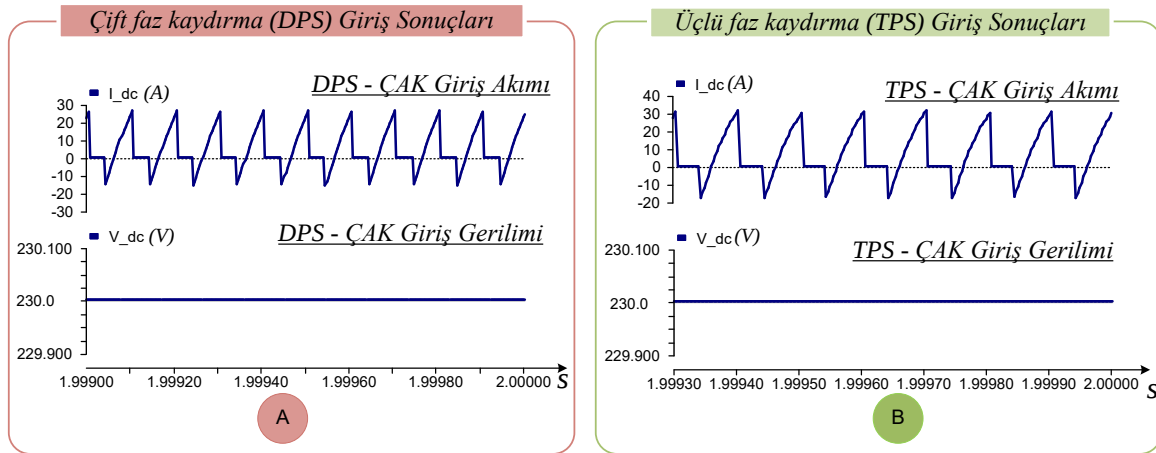
Şekil 2. (A).Çift Faz Kaydırmalı Modülasyonu. (B). Üçlü Faz Kaydırmalı Modülasyonu.

III.BULGULAR

Bu bölümde, ÇAK (Çift Aktif Köprü) ve Yüksek Frekanslı Transformatörler (YFT)'nin PSCAD/EMTDC yazılımı kullanılarak modellenmesi ele alınmaktadır. Modelleme, çift aktif köprü topolojisi ve yüksek frekanslı transformatör bileşenlerinden oluşmaktadır. Anahtarlama kontrolü kullanılarak Çift Faz Kaydırmalı (DPS) ve Üçlü Faz Kaydırmalı (TPS) yöntemlerin performansı karşılaştırılmıştır.

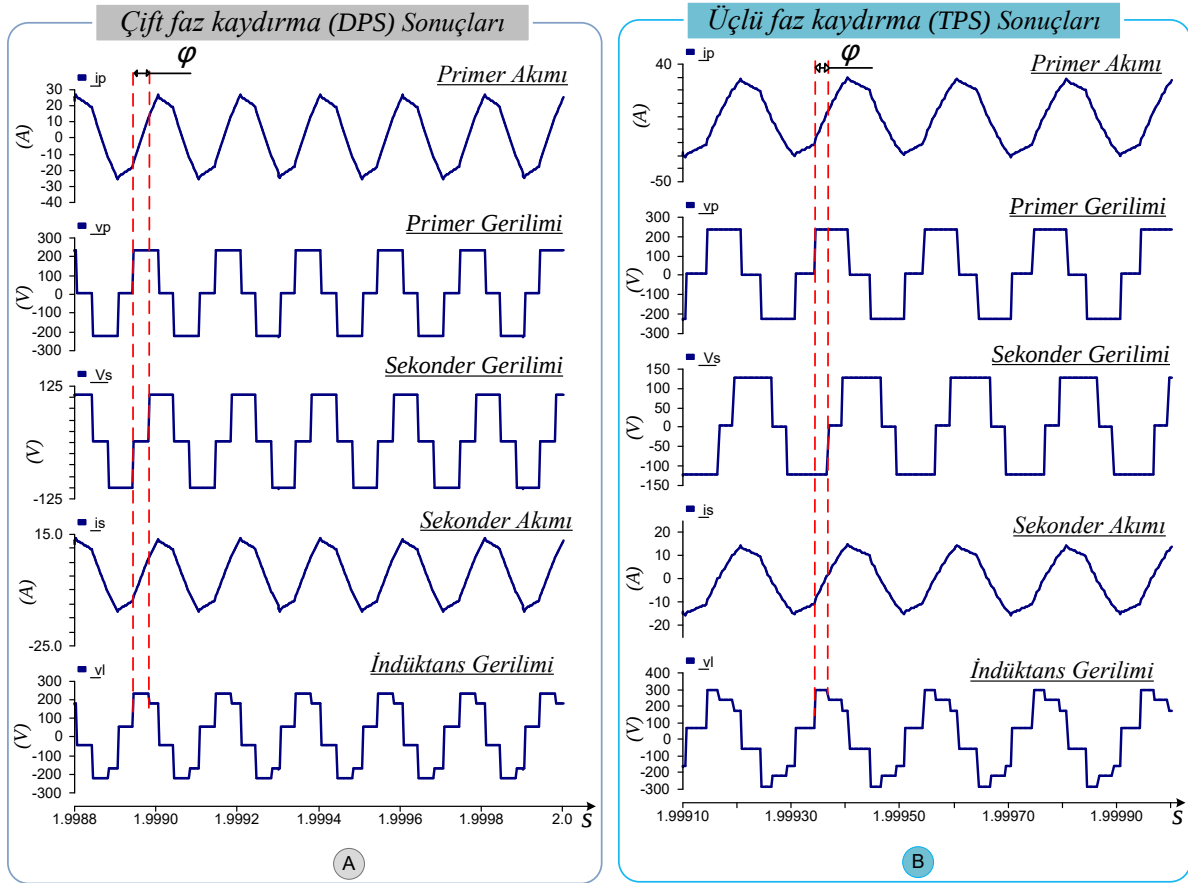


Şekil 3. Çift aktif köprü DC/DC dönüştürücü katı.



Şekil 4. ÇAK Giriş Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri (a)DPS, (b)TPS.

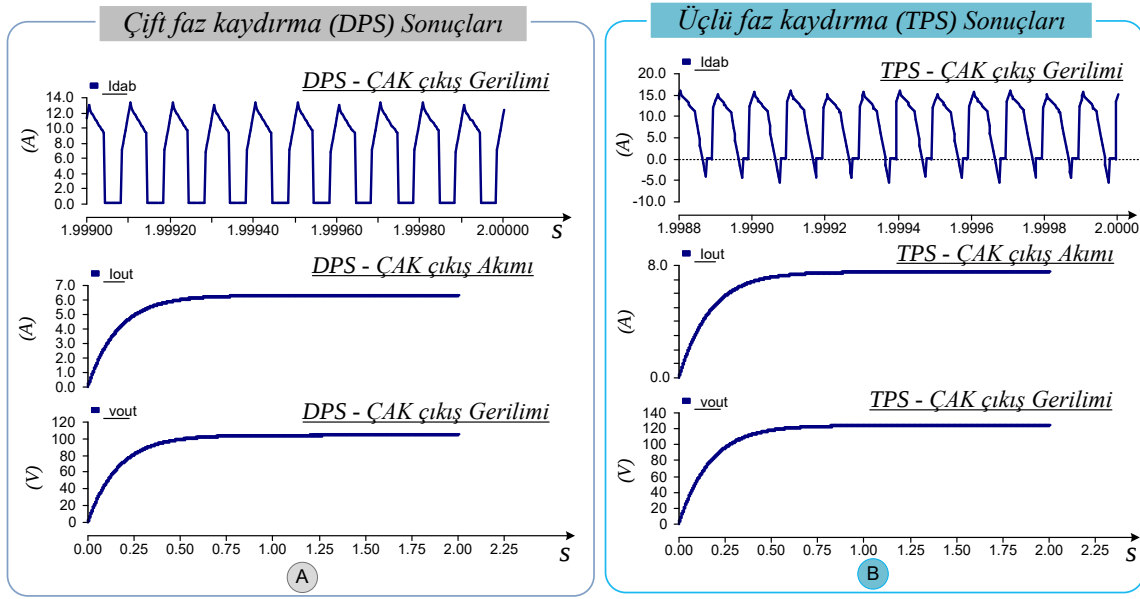
ÇAK konvertörde Çift Faz Kaydırmalı (DPS) ve Üçlü Faz Kaydırmalı (TPS) yöntemlerin performansı Şekil 4-5-6 de analiz edilmiştir. Şekil 4’de görülen ÇAK DPS ve TPS yöntemlerinin çıkış akımı ve giriş akımı dalga göstermiştir. Giriş gerilimi sabit bir gerilim ayrıca giriş akım değişen bir dalgadır.



Şekil 5. YFT primer ve sekonder akım ve gerilim dalga şekilleri (a)DPS, (b)TPS.

DPS yönteminde (Şekil 5.a), her iki köprüde eşit iç faz kaydırma oranları kullanılarak üç seviyeli AC gerilimler üretilir. Bu yöntem, akım stresini ve kararlı durum akımını azaltır, verimliliği artırır, ZVS aralığını genişletir ve ölü bant kompanzasyonunu kolaylaştırır. Ayrıca, EPS'ye kıyasla dinamik performansı daha iyidir ve uygulaması daha basittir.

TPS yöntemi (Şekil 5.b) ise her iki tam köprüdeki çapraz bağlı anahtar çiftleri bir iç faz kaydırma oranı ile anahtarlınır. Ancak, iç faz kaydırma oranları eşit olmayabilir. Bu yöntem, sıfır yükte bile ZVS sağlar, RMS/tepe akımlarını düşürür ve transformator boyutunu küçültür. Ancak, üç kontrol parametresi gerektirmesi ve standart bir uygulama olmaması nedeniyle karmaşıktır.



Şekil 6. ÇAK çıkış Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri (a) DPS, (b)TPS.

Şekil 6’da TPS’nin, DPS’ye göre daha hızlı tepki süresi, düşük dalgalanma ve dinamik performans ile üstünlüğü vurgulanmıştır. Sonuç olarak, DPS denge avantajları sunarken, TPS yüksek performans için tasarlanmıştır; ancak uygulama zorluğu nedeniyle kısıtlı kullanım alanına sahiptir.

IV. SONUÇLAR

ÇAK konvertördeki faz kaydırmalı modülasyon yöntemlerinin (DPS, TPS) karşılaştırmalı analizi şu sonuçları ortaya koymaktadır:

SPS, basit kontrol yapısı ve düşük uygulama karmaşıklığı avantajına sahip olsa da yüksek harmonik bozulma, akım stresi ve dar ZVS (sıfır gerilim anahtarlama) aralığı nedeniyle sınırlı verimlilik sunar.

EPS, üç seviyeli dalga üreterek harmonikleri ve akım stresini azaltır, ZVS aralığını genişletir ve dinamik performansı iyileştirir. Ancak iki kontrol derecesi gerektirir.

DPS, her iki köprüde üç seviyeli dalga ile daha dengeli bir performans sağlar. Akım stresini belirgin şekilde düşürür, ZVS aralığını artırır ve uygulama kolaylığı nedeniyle EPS’ye göre dinamik açıdan daha avantajlıdır. TPS, en esnek ve yüksek performanslı yöntemdir. Akım/gerilim dalgalanmasını en aza indirir, tepki süresini hızlandırır ve ZVS’i sıfır yüke kadar genişletir. Ancak üç kontrol derecesi ve karmaşık uygulama süreci pratik kullanımını zorlaştırır. Düşük karmaşıklık ve temel performans için SPS, dengeli verimlilik ve uygulanabilirlik için EPS/DPS, en optimize sonuçlar için ise TPS tercih edilebilir. TPS’in kontrol zorluğu dikkate alındığında, DPS ve EPS, yüksek verimlilik ile uygulama kolaylığını birleştiren pratik çözümler olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Bai, H., & Mi, C. (2008). Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge DC–DC converters using novel dual- phase-shift control. IEEE Transactions on power electronics, 23(6), 2905-2914.
- [2] Costinett, D., Maksimovic, D., & Zane, R. (2013). Design and control for high efficiency in high step-down dual active bridge converters operating at high switching frequency. IEEE Transactions on Power Electronics, 28(8), 3931 - 3940.
- [3] Krismer, F., & Kolar, J. W. (2012). Closed form solution for minimum conduction loss modulation of DAB converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 27(1), 174- 188.

- [4] Lin, F., Zhang, X., Li, X., Sun, C., Zsurzsan, G., Cai, W., & Wang, C. (2023). AI-based design with data trimming for hybrid phase shift modulation for minimum-current-stress dual active bridge converter. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 12(2), 2268-2280.
- [5] Noroozi, N., Emadi, A., & Narimani, M. (2021). Performance evaluation of modulation techniques in single-phase dual active bridge converters. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2, 410-427.
- [6] Shao, S., Chen, H., Wu, X., Zhang, J., & Sheng, K. (2019). Circulating current and ZVS-on of a dual active bridge DC-DC converter: A review. *Ieee Access*, 7, 50561-50572.
- [7] Karthikeyan, V., & Gupta, R. (2015, November). Closed-loop control of isolated dual active bridge converter using dual phase shift modulation. In *IECON 2015- 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 002800-002805). IEEE.
- [8] Saeed, M., Rogina, M. R., Rodriguez, A., Arias, M., & Briz, F. (2020). SiC-based high efficiency high isolation dual active bridge converter for a power electronic transformer. *Energies*, 13(5), 1198.
- [9] Wen, H., Xiao, W., & Su, B. (2014). Nonactive power loss minimization in a bidirectional isolated DC–DC converter for distributed power systems. *IEEE Transactions on industrial Electronics*, 61(12), 6822-6831.
- [10] Xiong, F., Wu, J., Hao, L., & Liu, Z. (2017). Backflow power optimization control for dual active bridge DC-DC converters. *Energies*, 10(9), 1403.
- [11] Zhao, B., Song, Q., & Liu, W. (2012). Power characterization of isolated bidirectional dual-active-bridge DC–DC converter with dual-phase-shift control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(9), 4172-4176.
- [12] Demetriades, G. D. (2005). On small-signal analysis and control of the single-and the dual-active bridge topologies (Doctoral dissertation, KTH).
- [13] Zhang, Z., & Ruan, X. (2005, March). A novel double phase-shift control scheme for full-bridge three-level converter. In *Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005.* (Vol. 2, pp. 1240-1245). IEEE.
- [14] Krömer, F., & Kolar, J. W. (2009). Accurate small-signal model for the digital control of an automotive bidirectional dual active bridge. *IEEE transactions on power electronics*, 24(12), 2756-2768.
- [15] De Doncker, R. W., Divan, D. M., & Kheraluwala, M. H. (1991). A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications. *IEEE transactions on industry applications*, 27(1), 63-73.