

3.3kW SRC-OBC의 경부하 효율 향상을 위한 스위칭 기법 비교 분석

김민중, 유승희, 김동희, 이병국*
 성균관대학교 정보통신대학

Comparison of 3.3kW SRC-OBC Switching Methods for Improving Efficiency at Light Load

Min Jung Kim, Seung Hee Ryu, Dong Hee Kim, and Byoung Kuk Lee*
 College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차용 부하 직렬 공진형 컨버터 (Series loaded Resonant Converter, SRC)타입의 탑재형 충전기 (On Board Charger, OBC)의 추가 회로 없이 경부하 효율을 향상시키기 위한 스위칭 방법들을 비교 분석한다. 시스템에 적용할 스위칭 제어 방법은 Asymmetrical Duty Cycle Control (ADC)과 Asymmetrical Voltage Cancellation Control (AVC) 방법이다. 각 제어 방법을 기존의 3.3kW SRC OBC의 적용하여 경부하 영역에서의 효율을 확인하고 각 제어 방법의 타당성을 검증한다.

1. 서론

최근 주목받고 있는 전기 자동차는 내연기관 없이 고에너지 밀도를 가지는 Li ion계 배터리로부터 필요한 전력을 공급받는다. 완속 충전기에 속하는 OBC의 충전 알고리즘은 정전류 (Constant Current, CC)충전과 정전압 (Constant Voltage, CV) 충전의 장점을 조합한 CC CV 충전 제어 방법이 대부분 적용되어 있다. SRC 회로의 CV 제어를 위해서는 가변 스위칭 주파수 제어 방법이 필요하며, 기존 고정 듀티 제어 방법의 스위칭 주파수는 부하에 따라 최대 6배 이상의 차이가 난다. 이는 반도체 소자 및 자성체 등의 손실을 증가시키는 요인이 되어 전체 시스템의 효율을 감소시키는 문제점을 가진다^[1].

본 논문에서는 기존의 3.3kW SRC OBC 회로의 경부하 효율을 향상시키기 위한 ADC, AVC 스위칭 방법을 분석한다. 또한 제안한 제어 방법을 제작된 3.3kW SRC OBC 시작품에 적용하여 경부하 영역에서 기존의 주파수만을 가변한 고정 듀티 제어 방법과 효율 비교를 통해 제안한 스위칭 방법의 타당성을 검증한다.

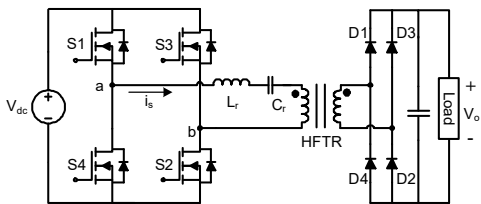


그림 1 SRC-OBC 회로
 Fig. 1 SRC-OBC circuit

2. 스위칭 알고리즘

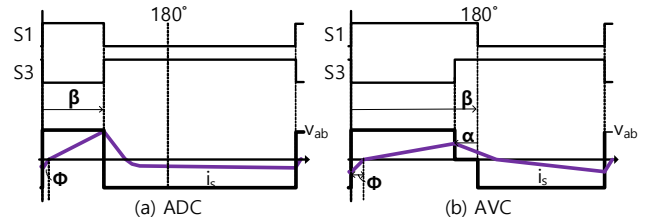


그림 2 비대칭 스위칭 기법
 Fig. 2 Asymmetry switching control

SRC 회로는 회로 내 인덕터와 커패시터의 공진특성을 이용한 영전압 스위칭 (Zero Voltage Switching, ZVS)을 통해 동작 시 반도체 스위치의 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 이는 레그 양단의 전압 (V_{ab})와 1차측 출력전류 (i_s)의 위상차 (Φ)에 의해 ZVS 동작 영역을 확보할 수 있다.

본 논문에서 분석할 스위칭 기법은 ADC 방법과 AVC 방법이며 각 스위칭 방법의 파형은 그림 2에서 확인할 수 있다. 풀브리지 구조의 아랫단 스위치는 같은 레그의 상단의 스위치와 상보적으로 동작한다. 또한 기존의 고정 듀티 제어 방법에 비해 가변된 위상각을 α 와 β 로 표시하였다. ADC 방법은 α 는 0° 으로 고정하고 β 를 가변하는 제어 방법이고, AVC 방법은 α 를 가변하고 β 를 180° 로 고정하는 제어 방법이다.

ADC, AVC 방법을 적용한 SRC 회로의 레그 양단 전압의 크기 (\widehat{V}_{ab})를 푸리에 급수로 표현하게 되면 식 (1), (2)로 나타낼 수 있다^[2].

$$\widehat{V}_{ab} = \frac{4V_i}{\pi} \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad : ADC \quad (1)$$

$$\widehat{V}_{ab} = \frac{V_i}{\pi} \sqrt{(10 + 6\cos\alpha)} \quad : AVC \quad (2)$$

SRC OBC의 부하인 배터리는 저항 (R_{load})으로 등가화시킬 수 있다. 이를 트랜스포머의 권선비 ($N_1:N_2, N_T$)를 고려하여 1차측의 저항 (R_{ac})으로 환원할 수 있고 Q factor와 공진 주파수 (ω_0)를 각각 식 (3), (4)로 나타낼 수 있다^[3].

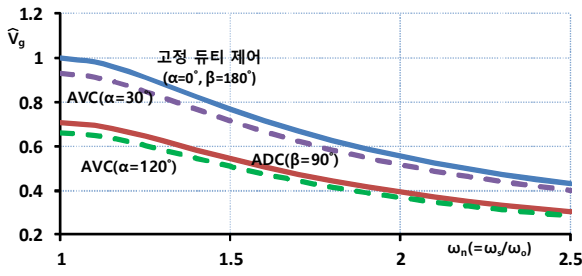


그림 3 제어 방법별 전압이득곡선
Fig. 3 Voltage gain for different control scheme

$$R_{ac} = \frac{8R_{Load}}{\pi^2 N_T^2} \quad (3)$$

$$Q = \frac{\sqrt{(L_r/C_r)}}{R_{ac}}, \quad \omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (4)$$

제어 방법에 따른 전압 전달비 ($V_g = V_o/V_{dc}$)는 식 (1)~(4)를 이용하여 식 (5), (6)으로 나타낼 수 있다.

$$V_g = \frac{4\sin(\beta/2)}{\pi \sqrt{1 + Q^2(\omega_n - (1/\omega_n))^2}} \quad : \text{ADC} \quad (5)$$

$$V_g = \frac{\sqrt{10 + 6\cos\alpha}}{\pi \sqrt{1 + Q^2(\omega_n - (1/\omega_n))^2}} \quad : \text{AVC} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)을 통해 동일한 출력에서 각 제어 방법별 정규화된 주파수에 따른 전압 전달비는 그림 3과 같이 나타난다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 스위칭 함수의 α 와 β 값을 적절히 가변하여 SRC OBC를 제어하게 되면 기존의 제어 방법의 주파수에 비해 낮은 스위칭 주파수로 정전압제어가 가능하다는 것을 알 수 있다. 이는 반도체 스위치의 스위칭 손실, 커패시터의 주파수 특성에 따른 손실, 자성소자의 코어 손실 등을 줄여 전체 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다.

3. 실험 결과

본 논문에서 제어 방법에 따른 효율 향상을 비교하기 위해 사용된 SRC OBC 시스템의 주요 파라미터는 표 1과 같으며 스위치 제어는 TI사의 TMS320F28335를 사용하여 개루프 제어를 하였다. 부하인 배터리의 경우는 전자로드를 사용하여 저항으로 증가화 하였고, 시스템 효율은 WT 3000을 사용하여 측정하였다. SRC 회로의 특성상 중부하 영역에서는 제어 방법별 스위칭 주파수 크기의 차이가 크지 않기 때문에 본 논문에서는 900W 이하의 경부하 영역에서의 실험결과를 나타내었다. 각 제어 방법별 SRC OBC의 효율은 기타 외부회로의 추가 없이 모두 ZVS 동작 영역에서 측정을 하였다.

그림 4(a)~(c)는 제어 방법에 따른 SRC OBC의 동작파형이다. ADC의 경우 $\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$ 로 제어 하고 AVC는 $\alpha=25^\circ$, $\beta=180^\circ$ 로 제어하였으며 각 제어 방법에 따라 출력전압이 400V로 일정하고 ZVS 동작을 하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(d)는 경부하 영역에서 시스템 효율을 나타낸 것이며, 기존 고정 듀티 제어 방법에 비해 최대 약 1.8%의 효율이 증가한 것을 확인하였다.

표 1 3.3kW SRC-OBC

Table 1 System Parameter of SRC

Parameter	Value	Parameter	Value
$P_{o,max}$	3.3 [kW]	V_{dc}	380 [V _{dc}]
V_o	400 [V]	$N_1:N_2(N_T)$	19:26(1.368)
L_r	75 [μ H]	C_r	66 [nF]
DIODE	DSEI60 06A	MOSFET	FCH47N60C3

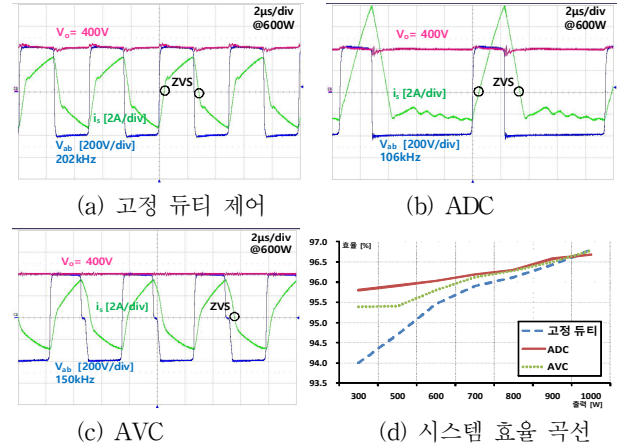


그림 4 실험 결과
Fig. 4 Experimental results

4. 결론

본 논문에서는 3.3kW SRC OBC 시스템의 경부하영역의 효율을 향상시키기 위해 듀티를 가변하는 스위치 제어 방법을 적용하였다. 적용한 스위치 제어 방법인 ADC, AVC 방법의 경우 기존의 토폴로지에 외부회로의 추가 없이 경부하영역에서 전체적으로 약 0.5~1.8%의 효율을 향상시킬 수 있다. 향후 각 제어 방법별 최적 동작영역을 도출 및 수동소자의 최적 설계 등을 통해 효율 성능 개선을 위한 연구를 진행할 계획이다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20104010100630)

참고 문헌

- [1] 김중수, "전기자동차용 탑재형 충전기의 공진 Network 최적 설계에 관한 연구", 성균관대학교 대학원 박사논문, 2011.
- [2] José M. Burdío, "Asymmetrical Voltage Cancellation Control for Full Bridge Series Resonant Inverters", IEEE Transactions of Power Electronics., Vol. 19, No. 2, pp. 461-469, 2004, March.
- [3] R. L. Steigerwald, "A comparison of half bridge resonant converter topologies", IEEE Trans. Power. Electron., Vol. 3, No. 2, pp. 174-182, 1988, April.