

Capacitor charging power supply의 충전시간 제어를 위한 스위칭 주파수 가변성에 관한 연구

이용덕, 김수홍, 권병기, 최창호
 (주) 포스콘 기술연구소

A study on a variable switching frequency for charging time control of CCPS

Young-Duk Lee, Soo-Hong Kim, Byung-Ki Kwon, Chang-Ho Choi
 POSCON CORPORATION R&D Center

ABSTRACT

본 논문은 대용량 충·방전 커패시터 부하를 갖는 CCPS (Capacitor Charging Power Supply)의 충전시간 제어방법을 제안한다. 기존의 대용량 Capacitor charger들은 LC공진탱크 및 스위칭 주파수를 개 루프 방식으로 제어한다. 이와 같은 제어 방법은 LC 공진탱크의 파라미터 변화로 인해 충전시간 제어가 불가능하다. 본 논문은 이러한 문제점을 해결하기 위해 Zero-crossing 방법을 이용 전류의 공진주파수를 검출한 뒤 스위칭 주파수를 가변 함으로서 원하는 시간과 안정성을 동시에 만족 할 수 있는 피드백 제어 방법을 제안한다.

1. 서 론

최근 대기오염 규제에 따른 환경설비의 개발이 시급한 과제로 대두되고 있다. 그 중 플라즈마를 이용한 환경설비가 기존의 화학적 대기오염 제거 방식을 대체 할 수단으로 각광 받고 있다. 이러한 플라즈마 방식의 환경설비는 대용량 펄스 파워 시스템이 사용되는데, 펄스파워 시스템은 대용량 충·방전 커패시터에 에너지를 충전한 후 방전을 통해 플라즈마를 발생 시킨다. CCPS의 핵심은 대용량 커패시터에 짧은 시간 안에 에너지를 충전 하는데 있다. 이러한 특성을 만족하기 위해서 전류원으로 동작하는 직렬 공진 컨버터가 많이 사용되고 있다. 직렬 공진 컨버터 시스템은 대용량 설계 시 스위칭 소자의 전류 첨두치가 크므로 병렬 구조를 이용 대용량을 구현한다^[1]. 그러나 여러 대의 직렬공진컨버터를 사용하여 전류원으로 동작하는 병렬운전 시스템의 경우 LC공진탱크에 의해 특성 임피던스가 결정되기 때문에 병렬 구조상 각 Unit의 LC탱크 특성 임피던스가 같을 수 없으므로 충전시간제어에 어려움이 발생한다. 이 경우 원하는 충전 시간을 만족하기 위해서는 LC탱크의 교체가 필요하지만, 실제적인 시스템 구성 시 LC탱크의 교체는 많은 비용과 인력이 투입되어야 하므로 그 효율성이 매우 낮다.

본 논문은 이러한 문제를 해결하기 위해 개 루프로 제어되는 기존 시스템을 폐 루프 제어를 통하여 캐리주파수를 가변시켜 줌으로써 LC탱크 교체 없이도 원하는 충전 시간을 제어 가능하도록 설계하였다. CCPS는 부하 커패시터를 최대 25kV까지 원하는 시간에 충전 할 수 있으며, 최대 출력전력은 60kJ/s로 설계 되었다. 그리고 각 Unit의 설계식을 도출하였으며, 동작 특성 및 제어방식을 설명하고, 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다.

2. 전원장치 설계

2.1 2병렬 CCPS 설계

본 논문은 스위칭 소자의 정격을 고려해 60kJ/s의 용량을 두 개의 30kJ/s Unit으로 병렬구성 하였다. 그림 1은 2병렬 CCPS를 보여주며, 회로는 DC-Link, H-bridge구조의 IGBT Module, LC공진 탱크, 고주파 변압기, 고압 정류 다이오드, 부하 커패시터로 구성되어 있다. 표 1은 CCPS 설계의 입력 조건을 보여주고 있다.

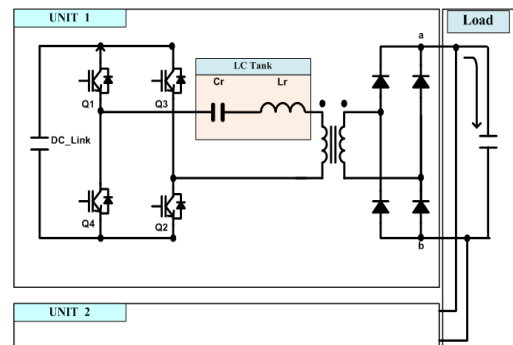


그림 1 2병렬 CCPS 회로도
 Fig. 1 A power circuit of 2 parallel CCPS

표 1 CCPS 설계 입력값
 Table 1 A preset value for design of CCPS

Symbol	Value	Unit
f_s	23	[kHz]
f_r	50	[kHz]
$P_{output\ power}$	60	[kJ/s]
$V_{Charging}$	25	[kV]

2.1.1 용량설계

출력 전류는 입력 조건인 출력 전압과 출력전력 으로부터 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$I_o = \frac{Power}{0.5 \cdot V_{Charging}} = \frac{60[kJ/s]}{12.5[kV]} = 4.8[A] \quad (1)$$

60kJ/s 급의 출력전력을 설계하기 위해서는 소자의 정격용

량 고려가 가장 중요한 문제이다. Unit별 전류 첨두값을 이용하여 실제 구성 가능한 대수를 구성하고 최대 효율을 얻을 수 있는 구조를 고려해야한다. 한 대의 CCPS로 구성 시 전류 첨두치가 실제 구성 가능한 전류 첨두값을 넘어서기 때문에 구성이 용이 하지 않을 것으로 판단된다. 두 대 이상으로 회로구성 시는 전류 첨두치가 실제 구성 시 비용 및 소자 스트레스에서 적합한 값을 가질 수 있을 것으로 표 2를 통해 확인했다. 또한 전류 첨두치를 결정하는 중요한 요소인 DC-Link의 전압값을 고려해 대 수를 결정했다. DC-Link는 전압이 큰 경우보다 스위칭 피크 전류가 더 큰 쪽이 비용 면에서 불리 할 것으로 판단된다. 그러나 DC-link의 전압이 큰 경우는 LC 공진탱크의 특성 임피던스가 커져야 하는데, 이는 LC 공진탱크의 인덕터 성분인 고주파 변압기의 누설 인덕터 성분이 커짐을 의미한다. 또한 외부조건에 의해 특성 임피던스의 변화 시 DC-Link의 전압이 크다면 특성 임피던스 변화에 따라 더 큰 전류 변화가 발생 할 수 있으므로 안정성 면에서는 DC-Link 가 낮고 전류가 높은 방식을 채택 하는 것이 효율적으로 판단된다.

표 2 단일 Unit과 2병렬 비교
Table 2 Comparison of single and 2-parallel unit

	1대 구성		2대 구성	
$V_{dc-link}$ [V]	620	310	620	310
Turn Ratio	40	81	40	81
변압기 2차측 i_o [A]	4.8	4.8	2.4	2.4
변압기 1차측 i_{avg} [A]	192	388.2	96	194.4
i_{peak} [A]	301	610	302	305
$i_{switching-peak}$ [A]	603	1220	150	611

2.1.2 LC 공진탱크 설계^[2]

DC_Link의 전압이 310[V] 이므로 승압 비는 식(2)와 같이 표현 된다

$$n = \frac{V_{Charging}}{V_{dc-link}} = \frac{25[kV]}{310[V]} = 80.6 [Turn] \quad (2)$$

80.6 [turn]의 계산 값은 82[Turn]으로 설계했다.

Unit 당 출력전류가 2.4[A]로 설계 되었고, 1차측 평균 전류는 변압비와 2차측 출력전류의 곱으로 식(3)과 같이 표현된다.

$$i_{avg} = n \cdot i_o = 196.8[A] \quad (3)$$

식(3)를 통해 1차 측에 흐르는 피크 전류를 식(4)와 같이 계산 할 수 있고, 이 값을 통해 특성 임피던스를 산출해 낼 수 있다. 또한 LC 탱크 내에서 공진이 발생하면 스위칭에 의한 피크 전류는 불연속 제어 모드 특성상 두 배 까지 커지게 된다.

$$i_p = \frac{\pi}{2} \cdot i_{avg} = 309[A] \quad (4)$$

특성임피던스는 피크 전류를 이용 식(5)와 같이 계산이 가능하다.

$$Z = \frac{V_{dc-link}}{i_p} = \frac{310[V]}{309[A]} = 1[\Omega] \quad (5)$$

식(5)에 의해 구해진 특성 임피던스를 이용 LC 공진 탱크의 값을 도출해 내기 위해서는 공진 주파수가 필요하다. 공진 주파수의 선택은 고주파 변압기의 누설 인덕턴스와 스위칭 소자의 전류 정격에서의 최대 가능 스위칭 주파수를 고려해서 선정

할 수 있다. 본 논문은 위 두 가지 조건식을 바탕으로 공진 주파수를 50[kHz]로 설계했다. 공진 주파수를 이용 LC 공진 탱크를 설계하면 식 (6), (7)과 같이 구 할 수 있다.

$$L_r = \frac{Z}{j\omega} = 3.18[uH] \quad (6)$$

$$C_r = \frac{1}{j\omega Z} = 3.18[uF] \quad (7)$$

2.1.3 에너지 전달 시간

충전 시간을 알기 위해 공진형 CCPS가 최대 에너지를 낼 때의 부하 C에 충전 되는 에너지를 식(8)을 통해 계산한다.

$$E_C = \frac{1}{4} C_{Load} (V_{charging})^2 = 312.5[J] \quad (8)$$

또한 충전 에너지의 순간 변화량을 계산하면 식(9)와 같다.

$$\Delta E = \frac{1}{2} C_r (2 \cdot V_{dc-link})^2 = 0.61[J] \quad (9)$$

식(8)과 식(9)를 이용 에너지 전달 량을 구하면 식(10)과 같다.

$$\text{에너지 전달량} = E_C / \Delta E = 512 \quad (10)$$

식(10)의 에너지 전달 량을 이용해서 충전 시간을 계산하게 되는데, 공진형 컨버터는 동작 모드를 고려해야한다. 공진형컨버터는연속모드와불연속모드로나뉘고이에따라에너지전달량도달라진다. 식(11)은 CCPS가 $f_s = 0.5 \cdot f_r$ 일 때의 충전시간을 계산했고, 식(12)는 불연속 모드에서의 에너지 전달 량에 따른 충전시간을 계산했다.

$$T_{Charging Time} = \text{에너지 전달량} \cdot \frac{1}{f_r} = 10.24[ms] \quad (11)$$

$$T_{Charging Time} = \frac{25000}{V_{dc-link} \cdot n} \cdot ((\text{에너지 전달량} \cdot \frac{1}{f_r}) + (\text{에너지 전달량} \cdot (\frac{1}{f_{sw}} - \frac{1}{0.5 \cdot f_r}))) = 11.8[ms] \quad (12)$$

2.2 동작특성 및 제어방법

직렬 공진형 컨버터는 ZCS(Zero Current Switching)의 동작 특성을 가지기 위해 불연속 모드 제어를 선택했다. 이러한 특성은 $f_s \leq 0.5f_r$ 의 조건이 만족되어야 하므로 스위칭 주파수를 이에 맞게 설계해야한다. 컨버터의 동작 모드별 특성은 S1,S4가 Turn on하면 LC 공진탱크의 공진 주파수를 가지는 공진 전류가 흐르게 된다. S1,S4가 Turn off 되면 D1,D4에 의해 전류가 흐르게 되고 스위칭은 ZCS 모드에서 off 되게 된다.

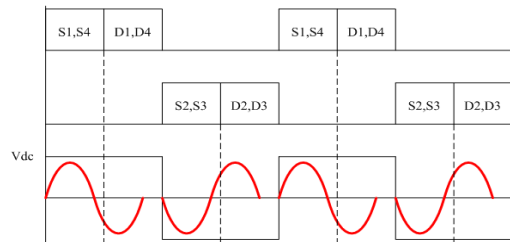


그림 2 PWM 파형과 공진 전류 파형
Fig. 2 PWM waveform and resonant current waveform

직렬 공진형 컨버터의 병렬 구조에서는 각 Unit의 LC 공진 탱크의 값이 변동되면 공진 주파수와 특성 임피던스의 값이 증가하게 된다. 이러한 변화는 동작특성에서 다이오드 도통구간 중 데드타임이 길어져 평균 전류가 작아지므로 에너지 전달시간이 길어지게 된다. 본 논문은 이러한 문제를 Zero-crossing 방법을 이용하여 공진 주파수를 추적하고, 캐리 주파수를 조정함으로써 데드타임 구간을 최소화하여 에너지 전달 시간을 제어했다. 또한 LC 탱크의 변동이 공진 주파수와 특성 임피던스가 감소하는 방향으로 변동 된다면 ZCS 모드를 유지하고 안정성 있는 제어를 위해 스위칭 주파수를 불연속 모드가 가능한 주파수대로 가변 할 수 있도록 제어한다.

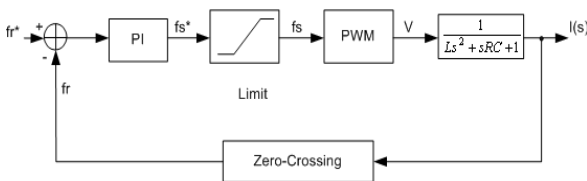


그림 3 제어 블록도
Fig. 3 A control block diagram

3. Simulation

본 논문에서 제안한 제어방법은 PSIM software를 이용하여 검증했다. 표 3은 시스템 사양을 보여주고 있다.

표 3 시스템 사양
Table 3 the system parameters

Symbol	value	Unit
$P_{per\ unit}$	30	[kJ/s]
i_{avg}	196.8	[A]
i_p	309	[A]
$V_{dc-link}$	310	[Vdc]
$Turn\ ratio$	82	[Turn]
Z	1	[Ω]
L_r	3.18	[μH]
C_r	3.18	[μF]
f_s	23	[kHz]
f_r	50	[kHz]
$T_{charging\ time}$	11.8	[ms]

실제 LC 공진 탱크 구성 시 Unit 마다 LC값이 같지 않을 것을 고려해 시뮬레이션을 진행했다. 각각 Unit의 LC값은 한 대는 설계식에 의해 도출된 값을 사용하고, 나머지 한 대는 10% 작은 값인 $L_r = 2.86[\mu H]$, $C_r = 2.86[\mu F]$ 인 값을 사용했다. 그림 4는 LC 탱크의 공진 주파수 및 특성 임피던스의 값이 작아진 Unit의 컨버터 출력 파형 및 공진 전류를 보여준다. 이 파형은 정상상태의 Unit보다 데드타임이 증가된 것을 볼 수 있다. 또한 전압 충전은 목표 시간 보다 늦게 충전되어 지는 것을 볼 수 있다. 이러한 문제를 개루프 제어를 통해 그림 5와 같이 Zero-Crossing 방법을 이용 공진 전류를 센싱하고 Carrier wave를 조정함으로써 충전 시간의 제어가 가능함을

보여주고 있다.

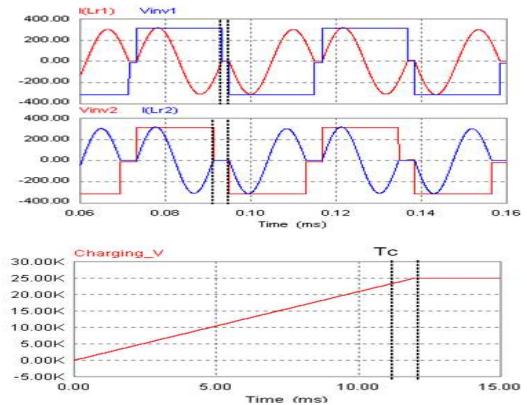


그림 4 개회로 제어
Fig. 4 A open loop control

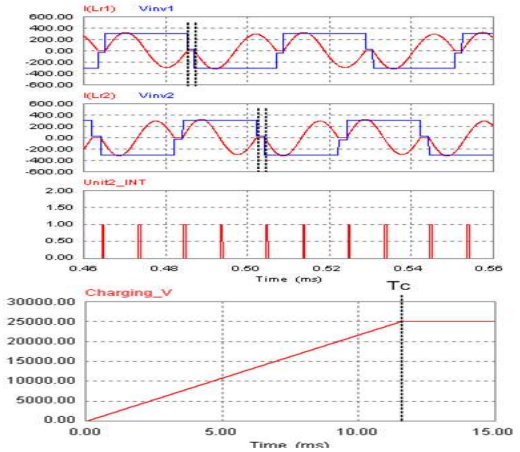


그림 5 폐회로 제어
Fig. 5 A closed loop control

4. 결론

본 논문은 대용량 충·방전 커패시터 부하를 갖는 CCPS의 충전시간 제어방법을 제안하였다. 기존의 대용량 Capacitor charger들은 개 루프 제어방식에 의한 평균전류 제어 및 안정성 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제의 해결방안으로 Zero-crossing 방법을 이용하여 전류의 공진주파수를 검출한 후 스위칭 주파수를 가변 하는 방법을 제안했고, 커패시터의 충전시간 조절과 안정성을 동시에 만족 할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다. 향후 제안한 방법의 타당성을 실험을 통해 검증하려 한다.

참고 문헌

[1] I.H.Song · H.S.Shin · C.H.Choi, "A Capacitor-Charging Power Supply Using a Series-Resonant Three-Level Inverter Topology", ICPE(ISPE)논문집 2001년 ICPE논문집, 2001. 10, pp. 301 ~ 303

[2] A. C. Lippincott, R. M. Nelms, "A Capacitor-Charging Power Supply Using a Series-Resonant Topology, Constant On-Time/Variable Frequency Control, and Zero-Current Switching," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 6, pp. 438-447, December 1991.