

PV-ESS 연계 적용을 위한 DAB 컨버터의 돌입 전류 저감을 위한 소프트 스타트 제어 전략 연구

장진혁*, 손승찬*, 김용권**, 홍성준***, 손진근*
가천대학교*, 화재보험협회**, (주)원방하이테크***

A Study on Soft-start Control Strategy for Inrush Current Reduction in DAB Converters for PV-ESS Applications

Jin-hyuk Jang*, Yong-gwon Kim**, Seong-joon Hong***, Seung-chan Son*, Jin-geun Shon*
Gachon University*, KOREAN FIRE PROTECTION ASSOCIATION**, WONBANGHIGHTECH Co.,Ltd***

Abstract - 충전 초기 단계에서 발생하는 돌입전류를 저감하기 위해 듀티비를 점진적으로 증가시킨 결과 돌입전류는 감소하였으나 출력전압 강하가 발생하였다. 이에 Feed-Forward 제어와 Phase Shift를 점진적으로 증가시켜 돌입전류와 출력 전압 강하를 저감하였으며, PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서 론

최근 신재생에너지에 대한 관심 증가로 양방향 전력 전송이 가능한 DAB 컨버터의 활용이 확대되고 있다. 그러나 충전 초기 단계에서는 돌입전류가 발생하며, 이를 저감하기 위한 소프트 스타트 과정에서는 출력 전압 강하가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 돌입전류와 출력 전압 강하를 동시에 저감하는 제어 기법을 제안하고, PSIM 시뮬레이션으로 이를 검증하였다.

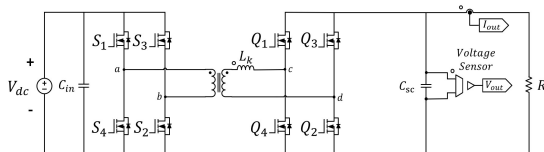
2. DAB 컨버터의 구조 및 소프트 스타트 제어 전략

2.1 DAB 컨버터 관련 설명

DAB 컨버터는 <그림 1>과 같이 변압기를 중심으로 입·출력단에 풀브릿지 회로가 대칭형으로 배치된 구조를 갖는다. 양단 풀브릿지 스위칭 파형의 위상차인 d (Phase Shift)를 통해 전달 전력의 크기와 방향(충전, 방전)이 결정된다.

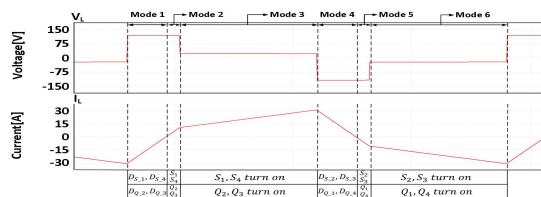
$$P = \frac{V_{dc} \times V_{out}}{2 \times f_{sw} \times L} \times d(1-d), (P = V_{out} \times I_{out}) \quad (1)$$

전달 전력의 크기는 d (Phase Shift)에 비선형적으로 비례하며, 제어 안정성을 위해 동작범위는 $-\pi/2 \leq d \leq \pi/2$ 로 제한한다.



<그림 1> DAB 컨버터의 등가 회로

DAB 컨버터는 <그림 2>와 같이 스위칭 동작과정에서 발생하는 역기전력을 각 스위칭 소자에 내재된 기생 다이오드를 통해 처리하는 특징을 가진다.



<그림 2> DAB 컨버터의 동작 파형

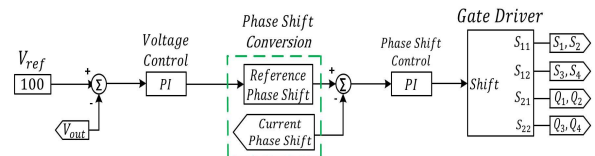
2.2 DAB 컨버터 제어

DAB 컨버터의 전달 전력 식 (1)을 d 에 대한 2차 방정식 형태로 정리하고, 근의 공식과 안정 제어 범위를 적용해 출력 전류 (I_{out})에 따른 Phase Shift를 나타내는 식 (3)을 유도하였다. [1]

$$d^2 - d + \frac{2f_{sw}LI_{out}}{V_{dc}} = 0 \quad (2)$$

$$d = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8f_{sw}LI_{out}}{V_{dc}}}\right) \frac{1}{2} \quad (3)$$

본 논문에서는 이를 전압-전류 이중 제어식에 적용하여 지령 전류를 지령 Phase Shift로, 현재 전류를 현재 Phase Shift로 변환한 후 PI 제어함으로써 DAB 컨버터를 제어하였다.



<그림 3> 슈퍼 커패시터 충전을 위한 제어기

<표 1> DAB 컨버터 파라미터 표

Parameter	Value	Units	Parameter	Value	Units
V_{DC}	70	[V]	R	5	[Ω]
C_{DC}	990	[μH]	C_{out}	0.278	[μF]
L_k	16.5	[mH]	f_{sw}	20	[kHz]
n	1	$\frac{N_2}{N_1}$			

PSIM 시뮬레이션을 실행한 결과 초기 부분에서 약 200[A] 가량의 돌입전류가 관측되었다. 이는 스위칭이 시작되는 순간 인덕터(L_k) 양단에 최대 전압이 인가되면서 발생한 것으로 이를 억제하기 위해 입·출력단 스위칭 파형의 듀티비를 천천히 증가시키는 소프트 스타팅 과정을 통해 완화할 수 있다.



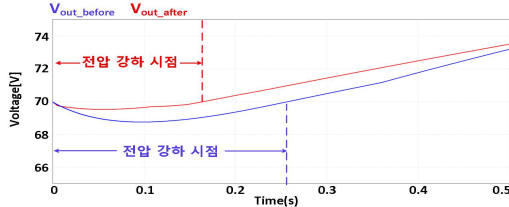
<그림 4> 직렬 인덕터의 돌입전류 파형

하지만 소프트 과정 중 부하단에서 과도한 전력을 소비하면서 출력 전압이 강하하는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 전압 강하 현상을 억제하기 위한 보조 제어 방식으로 식 (4)와

같은 피드포워드(Feed-Forward) 제어 기법을 적용하였다.

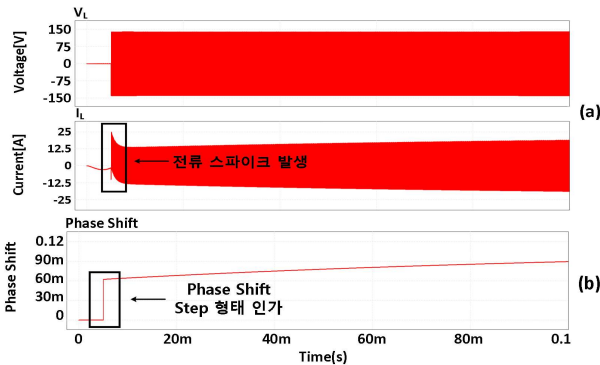
$$V_i = V_p + V_i + (\text{FeedForward}/\text{가중치}) \quad (4)$$

Feed-Forward 제어는 외란으로 인한 영향을 최소화하기 위해 사용하는 보조 제어 방식이다. [2] 본 논문에서는 Phase Shift 제어 출력값에 현재 전류에 해당하는 Phase Shift를 전압에 따라 가중치를 적용하여 인가하였다. 그 결과 <그림 6>과 같이 전압 강하 현상이 완화되었음을 확인하였다.



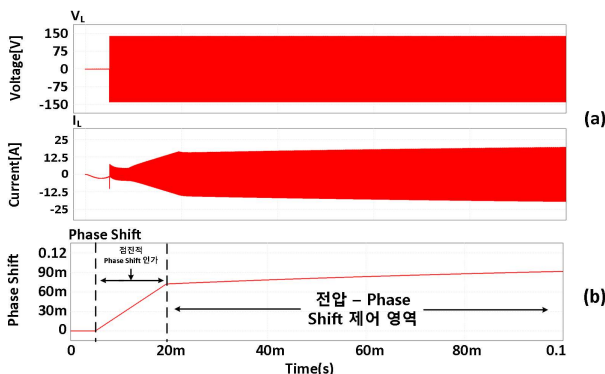
<그림 5> 소프트 스타트 제어 적용시 전후 출력전압 파형

Feed-Forward 제어의 도입은 앞서 언급한 출력 전압 강하 현상을 완화했지만, 제어 적용시 Phase Shift가 Step 형태로 급격히 인가되면서 돌입전류가 다시 상승하는 문제가 발생한다.



<그림 6> feed-forward 제어 적용시 직렬 인덕터의 (a) 전압, 전류 (b) Phase Shift 파형

따라서 단순 소프트 스타팅 기법만으로는 돌입전류 억제와 출력 전압의 안정을 동시에 달성하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 Step 형태로 인가되는 Phase Shift 성분을 시간에 따라 점진적으로 인가함으로써 <그림 9>에 나타난 바와 같이 돌입전류 억제와 출력 전압의 안정을 동시에 달성하였다.

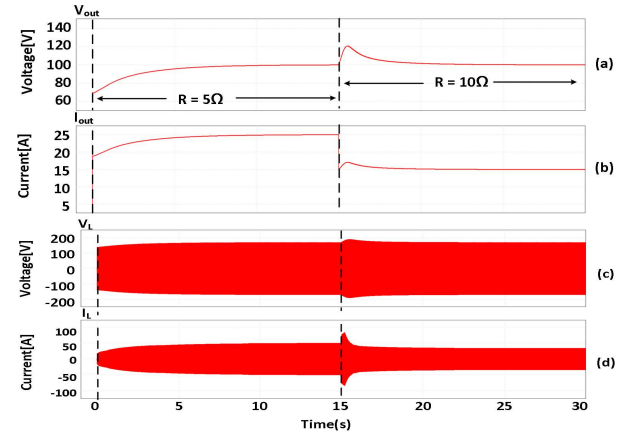


<그림 7> 점진적 Phase Shift 적용시 직렬 인덕터의 (a) 전압, 전류 (b) Phase Shift 파형

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

<그림 8>은 시스템 기동 이후 정상 상태에 도달하기까지의 파형을 나타내고 있다. 먼저, <그림 8> (a)와 (b)에서 확인할 수 있듯이, 초기 기동 시 전압 강하 현상이 발생했던 출력 전압

(V_{out})과 출력 전류(I_{out})는 과도현상 없이 각각 최종 목표 지령치인 100 [V]와 20[A]에 안정적으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한, <그림 8> (c)의 인덕터 전압(V_L)과 (d)의 인덕터 전류(I_L) 파형 분석 결과, 구동 초기 순간에 유발되던 급격한 전류 스파이크 및 과도한 돌입전류가 억제되었으며, 완만하게 상승하는 것을 확인하였다. 또한, 제안한 제어 전략을 검증하기 위해 시스템 구동 중 부하를 변동시키는 시뮬레이션을 수행하였다. <그림 8>의 15s 시점에서 확인할 수 있듯이, 부하 변동이 발생하는 순간 출력 전압과 전류에 일시적인 변동이 발생하지만, 다시 목표 지령치(100V)로 안정적으로 회복하는 것을 알 수 있다. 이때 인덕터 전압(V_L)과 전류(I_L) 역시 변동된 부하 조건에 맞추어 변동함을 확인하였다.



<그림 8> DAB 컨버터의 (a) 출력 전압 (b) 출력 전류 (c) 직렬 인덕터의 전압 (d) 직렬 인덕터의 전류 파형

4. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 출력 변동성을 보완하기 위한 양방향 DAB 컨버터의 과도 상태 개선 제어 기법을 제안하고, 이를 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 초기 기동 시 발생하는 돌입전류 문제와, 이를 억제하기 위한 소프트 스타팅 과정에서 발생하는 출력 전압 강하 현상을 해결하기 위해 Feed-Forward 제어 및 점진적 위상 천이(Phase Shift) 제어 알고리즘을 제어 루프에 적용하였다. 시뮬레이션 분석 결과, 제안한 제어 전략은 구동 초기의 돌입전류를 효과적으로 저감하는 동시에 출력 전압을 목표 지령치에 안정적으로 수렴시킴을 확인하였다.

Acknowledgments

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2026-RS-2023-00259004)

[참 고 문 헌]

- [1] Fiaz, M.F.; Calligaro, S.; Iurich, M.; Petrella, R. "Analytical Modeling and Control of Dual Active Bridge Converter Considering All Phase-Shifts" *Energies*, 15(8), 2720, 2022.
- [2] F. Giuliani, N. Delmonte, P. Cova, A. Costabeber and A. Castellazzi, "Soft-starting procedure for dual active bridge converter," 2015 IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), pp. 1-6, 2015.
- [3] A. Rodríguez, A. Vázquez, D. G. Lamar, M. M. Hernando and J. Sebastián, "Different Purpose Design Strategies and Techniques to Improve the Performance of a Dual Active Bridge With Phase-Shift Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 790-804, Feb. 2015,