

슬라이딩모드 제어 기반의 병렬-입력 직렬-출력 DAB 컨버터의 전압 평형 제어

이상민, 정윤철, 이동춘
영남대학교 전기공학과

Voltage Balancing Control of Input-Parallel Output-Series DAB Converters Based on Sliding Mode Control

Sangmin Lee, Yoon Cheul Jeung, Dong Choon Lee
Dept. of Electrical Eng., Yeungnam University

ABSTRACT

본 논문은 병렬 입력 직렬 출력 구조의 모듈형 DAB (Dual active bridge) 컨버터의 출력 전압 평형 제어기법을 제안한다. 이를 위해, 먼저 모듈형 DAB 컨버터를 모델링하고 계층형 슬라이딩모드(Hierarchical SMC) 제어를 설계한다. 제안된 기법을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

최근 모듈형 DAB 컨버터는 직류 송배전 시스템, 지능형 반도체 변압기, ESS 시스템 등 대용량의 양방향 전력흐름과 절연이 요구되는 응용분야에 많이 적용되고 있다.

이러한 모듈형 DAB 컨버터는 기생 성분의 차이, 제작 오차 등에 의하여 개별 모듈 간의 파라미터(변압비, 인덕턴스 등)에 오차가 나타날 수 있다. 파라미터의 오차로 인해 개별 모듈의 출력전압이 더해진 전체 전압이 잘 제어되더라도 각 모듈의 출력 전압이 불평형이 되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 개별 모듈의 전압을 평형하게 제어할 필요가 있다.

본 논문에서는 모듈형 DAB 컨버터의 단일 위상천이 변조(Single phase shift modulation SPSM) 기반의 고조파 모델을 이용하여 계층형 슬라이딩모드 제어기를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 제어기의 성능을 검증한다.

2. 시스템 구성

본 연구에서는 그림 1과 같은 구조를 가지는 2 스테이지형 다단 에너지 저장장치^[1]에서의 저압(LV)과 중전압(MV) 버스 간의 전력제어를 위한 모듈형 DAB 컨버터를 고려한다.

그림 2는 모듈형 DAB 컨버터의 회로를 보인다. 하나의 DAB 컨버터 모듈은 1개의 고주파 변압기와 4개의 IGBT 레그를 가진다. 각 모듈은 병렬 입력, 직렬 출력 형태로 연결된다. 여기서, V_s 는 입력전압, V_o 는 출력전압, V_{dc1} 과 V_{dc2} 는 개별 모듈의 출력전압, d_1 과 d_2 는 개별 모듈 변압기의 1차측과 2차측 전압의 위상차이다. DAB 컨버터를 제어하기 위해 SPSM을 이용한다. 이 때, 개별 모듈 출력전력은 식 (1)과 같다.

$$P = \frac{n V_s V_o}{2 f_s L_s} d(1-d) \quad (1)$$

3. DAB 컨버터 모델링

먼저, 스위칭 함수를 이용한 고조파 모델을 이용하여 시스템을 모델링한다^[2]. 고조파 모델을 이용한 개별 모듈의

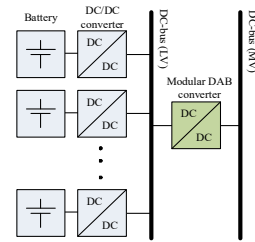


그림 1 다단 에너지 저장장치의 구조

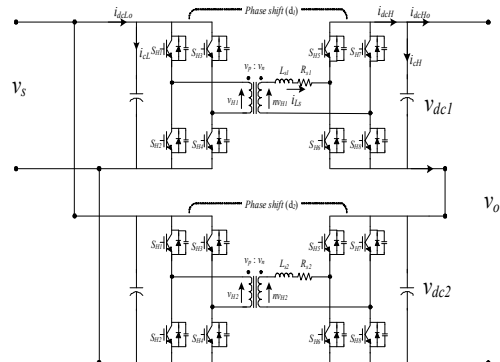


그림 2 병렬-입력 직렬-출력 DAB 컨버터

DAB 컨버터 출력 전압을 식 (2)와 같이 비선형 상태방정식 형태로 나타낸다. 여기서, k 는 스위칭 주파수에 대한 고조파 차수이다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + E \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} x &= v_{dc} \\ u &= \cos\{(2k+1)\delta - \varphi_z(k)\} \\ f(x) &= -\frac{8}{C_{out}\pi^2} \sum_{k=0}^m \frac{\cos\{\varphi_z(k)\}}{(2k+1)^2 |z(k)|} v_{dc}(t) \\ g(x) &= \frac{8}{C_{out}\pi^2} \sum_{k=0}^m \frac{Nv_s(t)}{(2k+1)^2 |z(k)|} \\ E &= -\frac{i_{Load}(t)}{C_{out}} \end{aligned}$$

$$|Z(k)| = \sqrt{R_s^2 + \{(2k+1)\omega_s L_s\}^2}, \varphi_z(k) = \tan^{-1}\left(\frac{(2k+1)\omega_s L_s}{R_s}\right)$$

모듈형 DAB 컨버터의 출력전압은 식 (3), (4)와 같이 SIMO(Single Input Multi Output) 시스템으로 정의할 수 있다.

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)u_1 + E_1 \quad (3)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_2) + g_2(x_2)u_2 + E_2 \quad (4)$$

여기서, x_1 은 전체 출력 전압 V_o , x_2 는 개별 모듈 전압이다. 전체 출력 전압의 모델은 오차가 없는 경우를 가정할 수 있으며, 개별 모듈의 개수에 상응한다.

4. 계층형 슬라이딩모드 제어기

슬라이딩모드 제어기는 모델의 파라미터가 불확실할 경우에도 시스템의 상태변수가 미리 정의한 슬라이딩 평면에 도달할 수 있게 하는 제어 기법이다. SIMO 시스템에 SMC를 적용하기 위해 계층형 슬라이딩모드 이론^[3]을 적용하고자 한다.

개별 제어 대상에 대하여 각각의 슬라이딩 평면을 식 (5), (6)과 같이 정의한다.

$$s_1 = c_1 e_1 + c_2 \int e_1 \quad (5)$$

$$s_2 = c_3 e_2 + c_4 \int e_2 \quad (6)$$

여기서, $e_1 = x_1 - x_{1d}$, $e_2 = x_2 - x_{2d}$ 이며, x_{1d} 와 x_{2d} 는 각각의 지령치이다.

상태변수가 각각의 슬라이딩 평면으로 접하고, 그 값을 유지하기 위한 제어 입력은 식 (7), (8)과 같이 유도된다.

$$u_1 = \frac{-c_1 f_1(x) - c_1 E_1 - c_2 e_1}{c_1 g_1(x)} \quad (7)$$

$$u_2 = \frac{-c_3 f_2(x) - c_3 E_2 - c_4 e_2}{c_3 g_2(x)} \quad (8)$$

하나의 제어 입력을 가지기 위한 전체 슬라이딩 평면과 그 평면에 대한 전체 제어입력을 각각 식 (9), (10)과 같이 선정한다.

$$S_i = s_1 + \alpha s_2 \quad (9)$$

$$u_{eq}^* = u_1 + u_2 + u_{sw} \quad (10)$$

상태변수가 슬라이딩 평면에 도달하기 위한 조건은 식 (11), (12)와 같으며, 두 조건을 통하여 전체 슬라이딩 평면에 도달하기 위한 제어입력 u_{sw} 을 식 (13)과 같이 얻을 수 있다.

$$V' = SS' = S[s_1' + \alpha s_2'] \quad (11)$$

$$S' = -n \operatorname{sgn}(S) - kS \quad (12)$$

$$u_{sw} = \frac{-c_1 g_1(x) u_2 - \alpha c_3 g_2(x) u_1 - n \operatorname{sgn}(S) - kS}{c_1 g_1(x) + \alpha c_3 g_2(x)} \quad (13)$$

식 (10)에 나타난 전체 제어입력에 식 (7), (8), (13)을 대입하면 SMC 제어기의 출력을 식 (14)와 같이 얻을 수 있다.

$$u_{eq}^* = \frac{[-c_1 f_1(x) - c_1 E_1 - c_2 e_1] + \alpha [-c_3 f_2(x) - c_3 E_2 - c_4 e_2] + (-n \operatorname{sgn}(S) - kS)}{c_1 g_1(x) + \alpha c_3 g_2(x)} \quad (14)$$

최종적으로, 개별 DAB 컨버터의 제어입력인 d^* 를 SMC 제어기의 출력 u_{eq}^* 를 이용하여 식 (15)와 같이 얻을 수 있다.

$$d^* = \frac{\sin^{-1}(u_{eq}^*)}{\pi} \quad (15)$$

5. 시뮬레이션

표 1은 모듈형 DAB 컨버터의 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 제안된 계층형 SMC 제어기의 성능은 기존의 PI 제어기^[2]와 비교 분석된다.

표 1 모듈형 DAB 컨버터의 파라미터

Parameter	Value
Input DC voltage (V_s)	1000 V
Output DC voltage (V_o)	2000 V
Inductor inductance (L_{s1} , L_{s2})	71uH, 78uH(+10%)
Transformer Tum ratio (n)	1 : 1
DC link capacitance (C_{out})	3500uF
Switching frequency (f_{sw})	5kHz

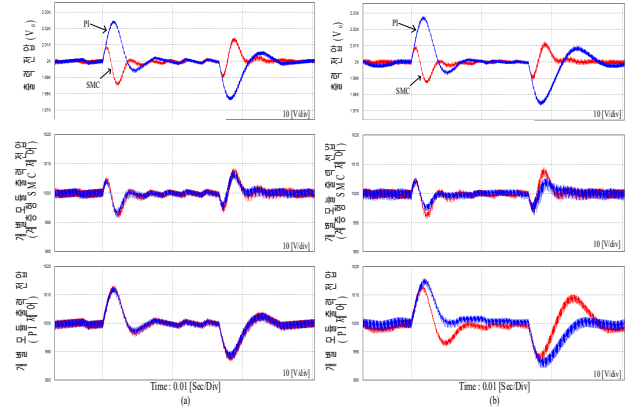


그림 3 전압 평형 제어 결과 (a) $L_1 = L_2$ (b) $L_1 < L_2$ (+10%)

그림 3(a)는 각각의 DAB 모듈의 인덕턴스(L_1 , L_2)가 동일한 조건이며, 그림 3(b)는 모듈 2의 인덕턴스가 모듈 1의 인덕턴스 대비 10%의 오차가 있는 조건에 대하여 부하를 580 [kW]에서 500 [kW]로, 500 [kW]에서 580 [kW]로 변화할 경우의 두 제어기의 전체 출력 전압과 개별 DAB 출력 전압의 성능을 나타낸다. SMC 제어기의 경우 각 모듈의 인덕턴스 오차가 존재하더라도 전체 출력전압과 개별 모듈의 출력전압이 유사한 응답 특성을 보인다. 반면 PI 제어기의 경우 모듈의 인덕턴스 오차가 존재하면 전체 출력전압은 유사한 응답특성을 보이나 개별 모듈의 출력 전압은 불평형적인 응답을 보인다. 따라서 계층형 SMC 제어기는 파라미터 변동에 대하여 강인한 응답 성능을 가짐을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 계층형 슬라이딩모드 제어를 이용하여 모듈형 DAB 컨버터의 출력 전압 제어 및 개별 모듈의 평형제어 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 검증하였다. 제안된 제어기법은 모듈간의 파라미터의 오차가 존재하는 조건에서도 강인한 제어 성능을 나타낸다.

이 논문은 2014년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF 2014R1A2A1A11052748)

참고 문헌

- [1] Y. Tang and A. Khaligh, "Bidirectional hybrid battery/ultracapacitor energy storage systems for next generation MVDC shipboard power systems," in proc. of IEEE VPPC, 2011, pp. 1 6
- [2] D. Segaran, B. P. McGrath, and D. G. Holmes, "Adaptive dynamic control of a bi directional DC DC converter," in proc. of IEEE ECCE, 2010, pp. 1442 1449
- [3] W. Wang, J. Yi, D. Zhao, and D. Liu, "Design of a stable sliding mode controller for a class of second order underactuated systems," IEE Proc. Control Theory and Applications, vol. 151, no. 6, pp. 683 690, 2004.