

DAB 컨버터를 위한 적응형 Type-2 제어 전략

서주형, 쯡찬뎐, 최성진
울산대학교 전기전자컴퓨터공학과

Adaptive Type-2 Control strategy for SPS-modulated DAB converters

Ju-Hyeon Seo, Chanh-Tin Truong, Sung-Jin Choi
Department of Electrical, Electronic, and Computer Engineering, University of Ulsan
Ulsan, 44610, South Korea

ABSTRACT

DAB 컨버터의 제어를 위해 통상 PI 제어기를 사용하지만, PI 제어기는 제어 계수가 고정되어 있어 배터리를 충전하는 동안 전압과 전류가 변하는 CC-CV 방식에서 개루프의 교차 주파수가 변동되어 시스템의 반응성이나 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 논문은 제어 계수를 상황에 따라 바꾸며 항상 일정한 교차 주파수를 유지하여 최적의 제어를 할 수 있는 적응형 Type-2 제어기를 제안한다. PSIM을 이용하여 5KW급 컨버터로 전압 제어 시뮬레이션을 하였고 PI 제어기와 K-factor 방식을 사용한 Type-2 제어기를 비교하였다. 시뮬레이션 결과 적응형 Type-2 제어기는 다양한 동작점에서도 교차 주파수와 위상 여유를 유지하며 안정된 제어를 하는 것을 확인하였다.

1. 서론

이중 능동형 브릿지(Dual Active Bridge, DAB) 컨버터는 양방향 전력 흐름을 가능하게 하는 DC-DC 컨버터로, 에너지 저장 시스템(ESS), 전기자동차, 스마트 그리드 등 다양한 분야에 사용되고 있다. 이러한 응용 분야에서는 시스템의 전압 및 전류 레벨과 운영 조건이 다양하게 변한다. 따라서 DAB 컨버터의 최적화된 제어는 시스템의 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 기존의 DAB 컨버터의 제어를 위해 선형화 제어, 피드포워드 제어가 사용되었는데 이러한 방법들은 구현하기 어렵고 복잡하다는 한계를 가진다.^[1] 이에 반해 PI 제어기는 구현이 간단하여 널리 사용되고 있지만, 고정된 PI 계수를 사용하는 경우 배터리 충전 과정에 전압과 전류가 변화하여 개루프의 교차 주파수가 변동하는 상황에서는 최적의 제어를 하지 못한다. 따라서 본 논문은 입력 전압, 출력 전압과 전류가 변화하는 상황에서도 항상 일정한 교차 주파수와 위상 여유를 유지할 수 있는 적응형 Type-2 제어기를 제안한다.

2. DAB 컨버터의 전달함수 및 주파수 특성 분석

DAB 컨버터는 그림 1과 같이 입력단과 출력단에 출 브릿지 회로와 그 사이에 변압기로 구성이 되어있는 구조이다. 따라서 전력이 양방향으로 전달될 수 있다. DAB 컨버터의 전달함수는 다음 식과 같다.

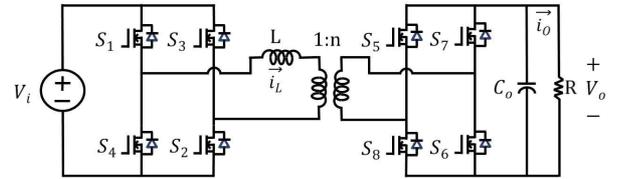


그림1. DAB 컨버터 회로도

$$P(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} = \frac{V_o(1-2D)}{D(1-D)\left(\frac{C_o V_o}{I_o} s + 1\right)} = G_{DAB} \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{PDAB}}\right)} \quad (1)$$

여기서 V_o 는 출력 전압 동작점, I_o 는 출력 전류 동작점, D 는 위상차 동작점이다. DAB 컨버터의 출력 전류 동작점은 다음과 같이 표현이 된다.

$$I_o = \frac{V_i \Phi (1-2\frac{\Phi}{T_s})}{nL} = \frac{V_i D (1-2D)}{nL f_s} \quad (2)$$

위상차 동작점 D 는 다음 식으로 얻어진다.

$$D = \frac{1}{4} - \frac{\sqrt{1 - \frac{8I_o n L f_s}{V_i}}}{4} \quad (3)$$

수식(3)은 위상차 D 를 입력 전압과 출력 전류에 관한 식으로 나타낼 수 있고 이는 DAB의 전달함수의 이득인 G_{DAB} 가 입력 전압과 출력 전류의 동작점에 따라 변하는 것을 의미한다. 또한 DAB 컨버터의 극점 주파수인 ω_{PDAB} 또한 출력 전압과 출력 전류 동작점에 따라 달라지는 것을 수식을 통해 확인할 수 있다.

3. 적응형 Type-2 제어기 설계

Type-2 제어기의 전달함수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C(s) = G_{Type2} \frac{1}{s} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{zType2}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{pType2}}\right)} \quad (4)$$

여기서 K-factor 방법^[2]을 사용하면 수식 (5)를 사용하여 설정한 교차 주파수에서 위상 여유를 결정하여 K-factor 값을 구할 수 있다. 이후 K-factor 값을 이용하여 Type 2 제어기의 극점 주파수와 영점 주파수를 결정할 수 있다.

$$K_{factor} = \tan\left(\frac{\theta_{PM} - \theta_{DAB at \omega_c} - 90^\circ}{2} + 45^\circ\right) \quad (5)$$

$$\omega_{z_{Type2}} = \frac{\omega_c}{K_{factor}}, \omega_{p_{Type2}} = K_{factor}\omega_c \quad (6)$$

DAB 컨버터와 제어기를 연결한 개루프 이득은 설정한 0dB 교차 주파수에서 설정한 위상 여유를 달성하여야 한다. 여기서 α 는 $\omega_c / \omega_{P_{DAB}}$ 를 나타내고 개루프 이득의 주파수 응답을 식으로 표현하면 (7)과 같다.

$$C(j\omega_c)P(j\omega_c) = -\frac{G_{Type2}G_{DAB}(K_{factor} + jK_{factor}^2)}{\omega_c((K_{factor} + \alpha) + j(-K_{factor} + \alpha))} \quad (7)$$

0dB 교차 주파수에서 $|C(j\omega_c)P(j\omega_c)|=1$ 임을 이용하면 Type-2 제어기의 이득에 해당하는 G_{Type2} 를 수식(8)로 표현할 수 있다.

$$G_{Type2} = \frac{\sqrt{\omega_c^2(K_{factor}^2 + 1) + (\alpha^2 + 1)}}{K_{DAB}K_{factor}} \quad (8)$$

수식을 보면 G_{Type2} 는 K_{DAB} , $\omega_{P_{DAB}}$, D를 포함하고 있으므로 입력 전압, 출력 전압, 출력 전류의 동작점 값을 측정하면 G_{Type2} 를 계산하여 제어기에 적용을 할 수 있다. 따라서 동작점이 달라지더라도 항상 교차 주파수에서 $|C(j\omega_c)P(j\omega_c)|=1$ 과 설정한 위상 여유를 유지할 수 있다. 이는 하나의 제어기를 사용하여 다른 조건의 DAB 컨버터를 동일한 동특성으로 제어할 수 있음을 의미한다.

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 5KW급 DAB 컨버터에 대해 PSIM을 사용하여 진행하였다. DAB 컨버터의 파라미터는 표 1에 나와있다. 시뮬레이션은 기존의 PI, 기존의 Type-2 제어기, 적응형 Type-2 제어기를 출력 전류가 달라지는 계단 부하 응답 조건과 계단 입력 전압 조건에서 비교하였다.

4.1 계단파 부하 응답

부하를 36[Ω]에서 50[Ω]으로 계단형으로 변경하였을 때 출력 전압, 출력 전류, 인덕터 전류, 제어기 출력 신호 파형을 그림 2(a)에 나타내었다. Type-2 제어기가 PI 제어기에 극점이 하나가 더 추가된 형태이므로 Type-2 제어기 신호의 리플이 PI 제어기보다 작다.

4.2 계단파 입력 전압 응답

그림 2(b)는 입력 전압을 750[V]에서 600[V]으로 변화시켰을 때 출력 전압, 출력 전류, 인덕터 전류 그리고 제어기에서 나오는 출력 신호의 파형이다. 제어기의 출력 신호에서 볼 수 있듯이 입력 전압이 낮아지는 경우 적응형 Type-2 제어기가 가장 빠르게 반응하고 PI 제어기의 반응이 가장 느리다. 이는 DAB 컨버터의 전달함수가 입력 전압에 따라 변하여 교차 주파수가 바뀌었기 때문이다. 또한 PI 제어기의 경우 큰 진폭으로 인하여 포화되는 구간이 발생하는데 이는 교차 주파수가 바뀌며 위상 여유가 45° 밑으로 내려갔기 때문이다. 이와 다르게 적응형 Type-2 제어기는 항상 고정된 교차 주파수인 20KHz와 60°의 위상 여유를 가지므로 안정된 제어를 할 수 있다.

5. 결론

표 1. DAB 컨버터 파라미터

Symbol	Values	Symbol	Values
V_i	750 V	ω_c	40000π
V_{ref}	420 V	L	60.5μH
f_{sw}	200KHz	C_o	200μF
n	0.5	R	36.12Ω

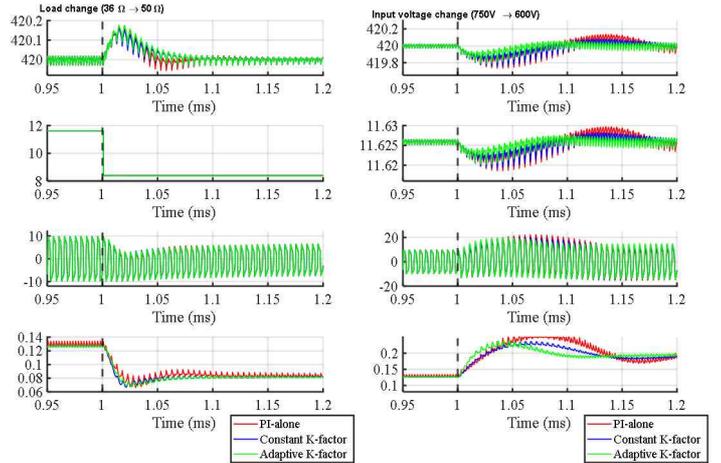


그림 2. DAB 컨버터의 출력 전압, 출력 전류, 인덕터 전류, 제어 신호 파형 (a)부하가 36Ω에서 50Ω으로 바뀔 때 (b)입력 전압이 750 V에서 600 V으로 바뀔 때

본 논문에서는 변화하는 입력 전압, 출력 전압, 출력 전류에도 불구하고 항상 일정한 교차 주파수와 위상 여유를 유지할 수 있는 적응형 Type-2 제어 전략을 제시하였다. 제안된 제어기는 DAB 컨버터의 전달 함수가 운영 조건에 따라 변동하는 특성을 고려하여, 제어기의 이득을 입력 전압, 출력 전압, 출력 전류의 값을 이용하여 제어기의 이득을 실시간으로 조정함으로써 다양한 상황에서 안정적인 제어 성능을 달성하였다. PSIM 시뮬레이션을 통해 5KW급 DAB 컨버터에서 제안된 적응형 Type-2 제어기와 기존의 PI 제어기, 기존의 Type-2 제어기를 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 적응형 Type-2 제어기는 부하 변화, 입력 전압 변화와 같은 다양한 조건에서도 일정한 교차 주파수와 위상 여유를 유지하며 안정된 출력 전압 제어 성능을 나타내었다. 반면, 기존의 PI 제어기와 Type-2 제어기는 이러한 조건 변화에 취약하여 시스템의 안정성이 저하되는 현상이 나타났다. 이에 따라 적응형 Type-2 제어기가 DAB 컨버터의 다양한 응용 분야에서 별도의 제어기 재설계 없이도 최적의 제어 성능을 제공할 수 있음을 기대할 수 있다.

본 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(2021RIS-003)

참고 문헌

- [1] N. Tiwary, V. Naik N, A. K. Panda, A. Narendra and R. K. Lenka, "A Robust Voltage Control of DAB Converter With Super-Twisting Sliding Mode Approach," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, vol. 4, no. 1, pp. 288-298, Jan. 2023.
- [2] Christophe Basso, Designing Control Loops for Linear and Switching Power Supplies Power Supplies: A Tutorial Guide, Artech, 2012.