

배터리저장시스템을 위한 2단 인버터의 모델링 방법 및 제어

현동엽, 임창순, 현동석
한양대학교

Modeling and Control of Two-Stage Inverter for Battery Energy Storage System.

Dong Yub Hyun, Chang Soon Lim, and Dong Seok Hyun
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 배터리 저장 시스템을 위한 2단 인버터의 동작 특성 해석과 정확한 제어기 설계를 위한 모델링 방법을 제안한다. 한 번에 2단 인버터의 회로 해석 및 동특성 방정식을 유도하는 것은 매우 복잡하고 어렵다. 따라서 2단 인버터를 등가 전류원을 포함하는 양방향 컨버터, 단상 풀 브릿지 인버터로 각각 나누어 회로방정식을 유도한 후, 상태 공간 평균화 방법을 이용하여 소신호 모델을 얻을 수 있다. 제안된 방법의 장점은 2단 인버터의 복잡한 수학과정을 간소화하여 모델링한 점이다. 이를 바탕으로 양방향 컨버터에서는 배터리 입력 전류제어기를 설계하고, 단상 풀 브릿지 인버터에서는 DC Link 전압 및 계통전류 제어를 설계하였다. 시뮬레이션과 실험결과를 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

자원이 점점 고갈됨에 따라, 최근 신재생에너지 수요는 급격히 증가하고 있다. 그러나 환경조건에 따른 신재생에너지원의 제약으로 인해, 이를 해결하기 위한 에너지저장시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1] 에너지 저장 장치 중에서 배터리는 널리 사용되고 있지만, 많은 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 전력 변환 장치가 많이 연구되고 있는데, 그 중에서 2단 인버터는 한 번에 회로 해석 및 동특성 방정식을 유도하는 것은 매우 복잡하고 어렵다.

본 논문에서는 2단 인버터의 동작 특성 해석하고 정확한 제어기 설계를 위한 모델링 방법을 제안한다. 제안한 방법은 2단 인버터를 등가 전류원을 포함하는 양방향 컨버터, 단상 풀 브릿지 인버터로 각각 나누어^[2] 회로방정식을 유도한 후, 상태 공간 평균화 방법을 이용하여 소신호 모델을 얻는 것이다. 이를 바탕으로 각각의 제어기를 설계하고, 시뮬레이션과 실험결과를 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 시스템 모델링

2단 DC AC 인버터는 그림 1처럼 양방향 DC DC 컨버터와 단상 풀 브릿지 인버터로 구성되어 있다. 모델링을 쉽게 하기 위해서 3상 인터리브 양방향 DC DC 컨버터를 단상 양방향 컨버터로 간략화 시킬 수 있다. 간략화 된 2단 인버터를 제안된

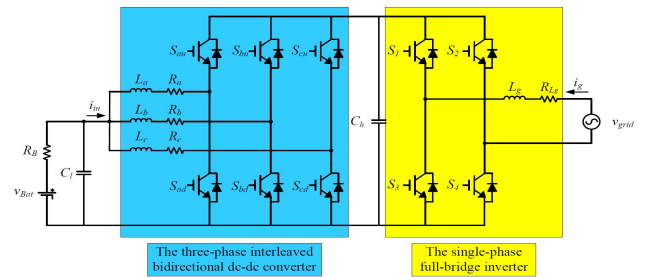


그림 1 2단 DC-AC 인버터의 회로

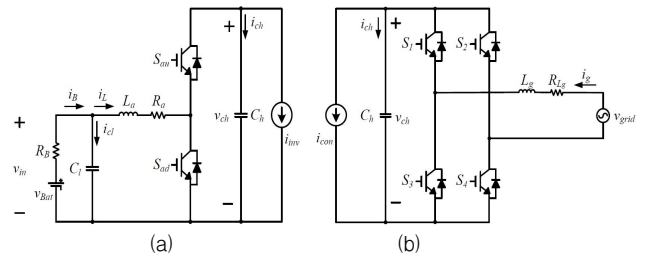


그림 2 제안된 방법에 의한 등가전류원을 포함한 2단 인버터 (a)양방향 컨버터, (b)단상 풀 브릿지 인버터

방법으로 그림 2처럼 등가 전류원을 포함하는 (a)양방향 컨버터와 (b)단상 풀 브릿지 인버터로 나눈다.

양방향 컨버터의 두 개의 스위치는 서로 상보적으로 동작하며, 스위치 S_{ad} 가 주 스위치이다. 단상 풀 브릿지 인버터는 유니폴라 PWM(Pulse Width Modulation) 스위칭 동작을 하며, 스위치 S_3 이 주 스위치이다. 두 개의 토폴로지는 각각 스위칭 한 주기 동안 두 개의 세부구간으로 나눌 수 있는데, 각 세부구간별로 회로방정식을 유도한다. 회로 방정식으로부터 상태 공간 평균화 기법을 이용하여 평균화, 변동과 선형화 과정을 통해 소신호 모델을 다음과 같이 각각 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_i \\ \hat{v}_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & \frac{1}{L_a} & -\frac{D}{L_a} \\ -\frac{1}{C_i} & -\frac{1}{C_i R_B} & 0 \\ \frac{D}{C_h} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_i \\ \hat{v}_{ch} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_{ch}}{L_a} \\ \frac{1}{C_i R_B} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_h} & -\frac{i_f}{C_h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{Bat} \\ \hat{i}_{mv} \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_g \\ \hat{v}_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{Lg}}{L_g} & -\frac{D}{L_g} \\ -\frac{D}{C_h} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_g \\ \hat{v}_{ch} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_g} & \frac{V_{ch}}{L_g} \\ -\frac{1}{C_h} & 0 & -\frac{i_g}{C_h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{con} \\ \hat{v}_g \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. 제어기 설계

양방향 컨버터에서는 입력 인덕터 전류를 제어하기 위한 전류제어기를 설계하고, 단상 인버터에서는 계통전압과 DC Link 전압을 제어하기 위해 이중루프를 갖는 제어기를 설계해야 한다. 따라서 식 (1), (2) 으로부터 각각의 전달함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_1 = \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = \frac{as^2 + bs + D'i_L}{cs^3 + ds^2 + es + D'} \quad (3)$$

여기서, $a = C_l C_{ch} R_B V_{ch}$, $b = C_l R_B D' i_L + C_{ch} V_{ch}$, $c = C_l C_{ch} L_u R_B$, $d = C_l C_h R_u R_B + C_h L_u$, $e = C_h R_L + C_h R_B + C_l R_B D'$

$$G_2 = \frac{\hat{i}_g}{\hat{d}} = \frac{C_h V_{ch} s + D' i_g}{C_h L_g s^2 + C_h R_{Lg} s + D'} \quad (4)$$

$$G_3 = \frac{\hat{v}_{ch}}{\hat{i}_g} = \frac{L_g i_g s + R_{Lg} i_g - D' V_{ch}}{C_h V_{ch} s + D' i_g} \quad (5)$$

위에서 구한 전달함수로부터 위상여유를 확보하여 시스템의 안정성을 위해 각각 PI(Proportional Integral)제어기를 설계하였고, 이에 대한 각 루프 이득의 크기와 위상 Bode plot을 그림 3에 나타내었다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 4는 배터리가 방전모드일 때 2단 인버터의 시뮬레이션 및 실험결과이다. 입력 상 평균 인덕터 전류는 약 4.9A이며, 전체 입력 평균 인덕터 전류는 약 14.6A이다. DC Link 전압은 400V로 기준전압을 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 또한 계통전압 약 311V(=220V_{rms})이며, 계통전류는 약 21.9A(=15.5A_{rms})이다. 따라서 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 제어기가 적절하게 설계되었고, 소신호 평균화 모델의 타당성을 검증하였다.

5. 결론

본 논문에서는 배터리 저장 시스템을 위한 2단 인버터의 모델링 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 복잡하고 어려운 수학과정을 간소화시키고, 상태 공간 평균화 기법을 이용하여 유도한 동특성 방정식으로부터 시스템에 대한 직관적인 해석을 쉽게 할 수 있다. 이를 바탕으로 각각의 제어기를 설계하였고, 시뮬레이션과 실험결과를 통해 유도한 소신호 평균화 모델링의 타당성을 검증하였다.

표 1 설계사양

출력 전력	P	3 [kW]
배터리 전압	V_{Bat}	205 [V]
DC Link 전압	V_{ch}	400 [V]
계통 전압	V_g	220 [V _{rms}]
입력 상 인덕턴스	L	1 [mH]
계통필터 인덕턴스	L_g	3 [mH]
입력 커패시턴스	C_l	470 [μ F]
DC Link 커패시턴스	C_h	1880 [μ F]
배터리 내부저항	R_B	0.01 [Ω]
입력 상 인덕턴스 내부저항	R_l	0.07 [Ω]
계통필터 인덕턴스 내부저항	R_{Lg}	0.12 [Ω]
스위칭 주파수	f_s	20 [kHz]

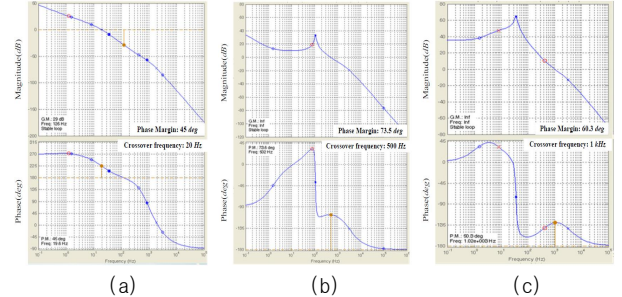


그림 3 2단 인버터의 루프 이득 Bode plot (a)양방향 컨버터의 보상된 루프 이득, (b)단상 인버터의 보상된 내부 루프(Inner loop) 이득 (c)단상 인버터의 보상된 외부 루프(Outer loop) 이득

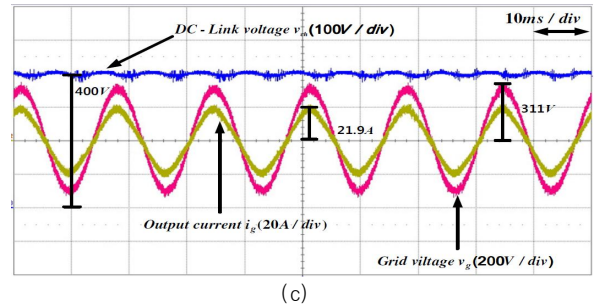
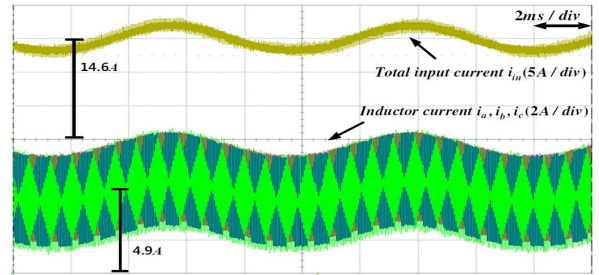
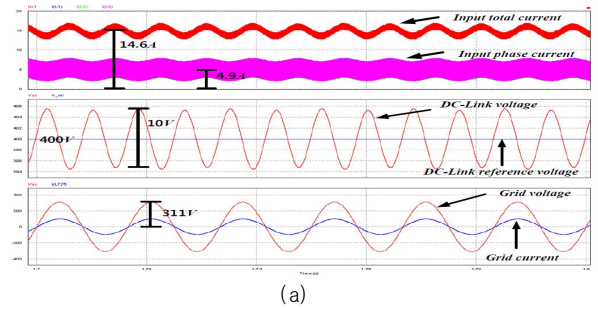


그림 4 방전모드일 때 2단 인버터의 시뮬레이션과 실험결과 (a)2단 인버터의 시뮬레이션 결과, (b)양방향 컨버터의 실험결과, (c)단상 인버터의 실험결과

참고 문헌

- [1] X. Wang, M. Yue and E. Muljadi, "Modeling and control system design for an integrated solar generation and energy storage system with a ride through capability," in Proc. IEEE. ECCE, Sept. 2012.
- [2] R. Y. Kim and J. S. Lai, "Aggregated modeling and control of a boost buck cascade converter for maximum power point tracking of a thermoelectric generator," in Proc. IEEE. Appl. Power Electron. Conf. Expo. APEC, pp.1754-1760, Feb. 2008.