

ESS용 3상 AC/DC 컨버터의 배터리 전류제어에 관한 연구

정건희, 김준형, 김해진, 윤성희
서창전기통신

A Study on Battery Current Control of Three-Phase AC/DC Converter for ESS

Geon-Hui Jeong, Jun-Hyeong Kim, Hae-Jin Kim, and Sung-Hee Yoon
Seochang Electric Communication

ABSTRACT

본 논문에서는 ESS용 3상 AC/DC 컨버터 배터리 전류 제어 시 발생하는 문제에 대해 분석하고, 제안된 제어기의 유효성을 시뮬레이션을 통하여 입증한다.

1. 서론

ESS용 Single-Stage 타입 컨버터에서 발생하는 배터리 방전 시 불안정 문제, DC필터로 인한 공진, 교류 전원 불평형으로 직류측 진동에 대해 분석한다.^{[1],[2]} 제안된 제어기는 시지연을 고려하여 제어기 이득을 설계하고, 방전 시 불안정, 공진, 직류측 진동 문제를 해결한다.

2. 배터리 전류 제어 시 문제점

2.1 배터리 방전 시 문제

ESS용 Single-Stage 타입 컨버터의 시스템은 그림 1과 같다. 그림 1의 수학적 모델은 (1)-(3)으로 얻어진다.

$$E_{dq}^e = L_{ac} \frac{dI_{dq}^e}{dt} + R_{ac} I_{dq}^e + j\omega L_{dc} I_{dq}^e + V_{dq}^e \quad (1)$$

$$\frac{C_{dc}}{2} \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_{ac} - P_{dc} \quad (2)$$

$$V_{dc} = L_{dc} \frac{dI_{bat}}{dt} + R_{dc} I_{bat} + V_{bat} \quad (3)$$

(1)-(3)을 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.^[3] 그림 2에서 G_i 와 G_v 는 각각 $1.5 \begin{bmatrix} V_d^e & V_q^e \end{bmatrix}$ 와 $1.5 \begin{bmatrix} I_d^e & I_q^e \end{bmatrix}$ 이다. v_{dq}^e 의 변동이 매우 작고, 직류측에 입력되는 전력은 i_{dq}^e 만으로 제어된다고 가정하면 파선으로 표시된 부분과 같이 컨버터 시스템을 단순화할 수 있다. 여기서, p_{ac} 에 따른 i_{bat} 전달함수는 (4)와 같다.

$$\frac{i_{bat}}{P_{ac}} = \frac{1/V_{dc0}}{L_{dc} C_{dc} s^2 + \left(R_{dc} C_{dc} + L_{dc} \frac{I_{bat0}}{V_{dc0}} \right) s + \left(1 + R_{dc} \frac{I_{bat0}}{V_{dc0}} \right)} \quad (4)$$

(4)에서 배터리 전류 I_{bat0} 가 교류 전원 측으로 흐르는 방전 조건일 경우 극점이 우반면에 위치하여 시스템은 불안정하다.^[1] 배터리 충-방전에 따른 근궤적을 그림 3과 그림 4에 보인다. 그림 3에서 배터리 충전 전류가 증가할 경우 극점이 좌반면으로 이동하여 안정한 것을 알 수 있다. 반면, 그림 4에서 확인할 수 있듯이 방전 전류가 증가하면 극점이 우반면으로 이동하여 시스템을 불안정하게 만든다.

2.2 DC필터 공진 문제

DC필터로 사용된 L_{dc} 와 DC-Link의 C_{dc} 로 인해 공진이 발생한다.^[1] 공진주파수는 (5)와 같다.

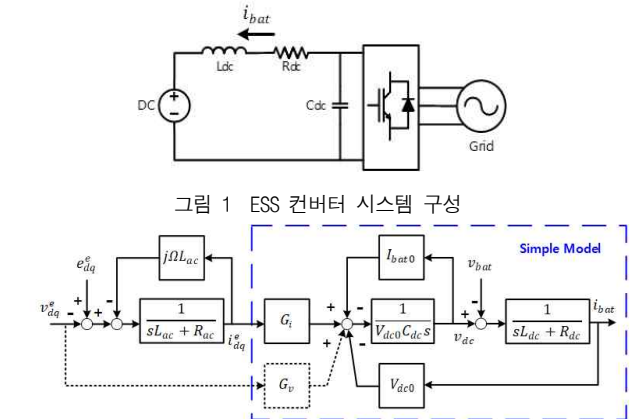


그림 1 ESS 컨버터 시스템 구성

그림 2 ESS용 Single-Stage 타입 컨버터 시스템 블록도

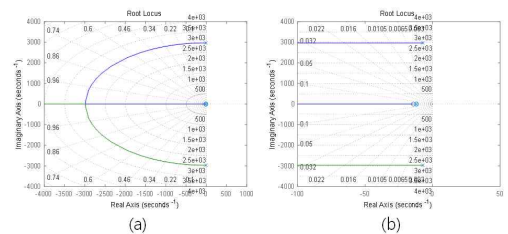


그림 3 배터리 충전 시 근궤적
(a) 충전 시 근궤적 (b) 충전 시 근궤적 확대

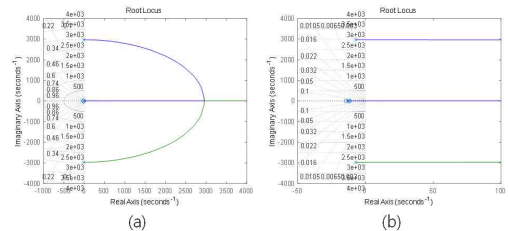


그림 4 배터리 방전 시 근궤적
(a) 방전 시 근궤적 (b) 방전 시 근궤적 확대

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{dc} C_{dc}}} \quad (5)$$

2.3 AC전원 불평형 시 문제

AC전원이 불평형일 경우 유-무효 전력은 (6), (7)과 같다. P_0 , Q_0 의 직류 유-무효 전력과 P_2 , P_{s2} , Q_2 , Q_{s2} 인 교류 전원 주파수의 2배로 진동하는 교류 유-무효 전력으로 분리할 수 있다. $P(t) = P_0 + P_2 \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t)$ (6)

$$Q(t) = Q_0 + Q_2 \cos(2\omega t) + Q_s \sin(2\omega t) \quad (7)$$

여기서, 교류 전원이 불평형일 경우 직류측에 교류 전원 주파수 2배의 진동이 발생된다. (6)의 유효 전력을 0으로 제어하면 불평형으로 인한 직류측 진동은 제거할 수 있다.^[2]

3. 제안하는 배터리 전류 제어 방법

3.1 배터리 전류 제어기 설계

제안하는 배터리 전류 제어 블록도를 그림 5에 보인다. 여기서, $D = [(+E_d^e)^2 + (+E_q^e)^2] - [(-E_d^e)^2 + (-E_q^e)^2]$ 이고 $D \neq 0$ 로 가정한다. 교류 전원 전압의 불평형 시 정-역상분으로 분리하여 제어하는 이중 전류 제어방법을 적용한다.^[4] 배터리 방전 시 문제와 직류측 공진 문제를 해결하기 위해서 v_{dc} 에 댄핑 기법을 적용한다.^[1] Δv_{dc} 는 v_{dc} 의 동작점을 v_{bat} 로 가정하여 두 전압의 차로 설정한다. 교류 전원 불평형 시 배터리 전류제어를 위해 배터리 전류 제어기의 출력을 유효 전력으로 한다. 내부 교류 전류 제어루프, 외부 배터리 전류 제어루프로 제어 시스템을 구성하면, 전달함수는 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{i_{bat}^*}{v_{dc}^*} &= (K_p / V_{dc0} + K_i / V_{dc0}) / \left[L_{dc} C_{dc} s^3 \right. \\ &+ \left. \left(R_{dc} C_{dc} + \frac{I_{bat0}}{V_{dc0}} L_{dc} + K_{dc} K_{damp} L_{dc} \right) s^2 \right. \\ &+ \left. \left(1 + \frac{I_{bat0}}{V_{dc0}} R_{dc} + K_{dc} K_{damp} R_{dc} + \frac{1}{V_{dc0}} K_p \right) s + \frac{1}{V_{dc0}} K_i \right] \quad (8) \end{aligned}$$

여기서, $K_{dc} = 1.5E_q^e / V_{dc0}$, K_{damp} 는 댄핑 이득이다. 배터리 전류 제어기를 2차 저역통과필터 형태로 가정하여 설계하면 제어기 이득은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$K_p = L_{dc} C_{dc} V_{dc0} \omega_{dc}^2 \quad (9)$$

$$K_i = \frac{\omega_{dc} V_{dc0}}{2\zeta} \left(\frac{I_{bat0}}{V_{dc0}} R_{dc} + K_{dc} K_{damp} R_{dc} + 1 \right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} K_{damp} &= \frac{2L_{dc}\omega_{dc}\zeta}{2L_{dc}\omega_{dc}\zeta - R_{dc}} \left[\frac{1}{K_{dc}L_{dc}\omega_{dc}^2\zeta} \left(\frac{I_{bat0}}{V_{dc0}} R_{dc} + 1 \right) \right. \\ &+ \left. \frac{1}{K_{dc}L_{dc}\omega_{dc}^2} \left(\frac{2\zeta\omega_{dc}K_p}{V_{dc0}} - R_{dc}C_{dc}\omega_{dc}^2 - \frac{I_{bat0}}{V_{dc0}}L_{dc}\omega_{dc}^2 \right) \right] \quad (11) \end{aligned}$$

제안하는 제어기를 적용한 시스템의 배터리 어드미턴스와 제어기의 페루프 보드선도를 그림 6에 보인다. 제어기의 댄핑 효과로 직류측 공진이 억제되었으며, 페루프 보드선도에서 시스템이 2차 저역통과필터인 것을 알 수 있다.

3.2 시지연을 고려한 제어기 이득 설계

제안하는 제어기의 전달함수에서 댄핑 이득에 따른 근궤적은 그림 7.(a)와 같이 이득이 변화해도 시스템은 안정함을 확인할 수 있다. 하지만, 그림 7.(b)와 같이 전체 시스템과 시지연을 고려할 경우 시스템은 불안정해진다. 따라서 댄핑 이득을 새롭게 선정할 필요가 있다. 시뮬레이션의 시지연은 샘플러와 ZOH를 샘플링 시간의 0.5배 지연으로 근사화 할 수 있다. 그림 7.(b)를 살펴보면 댄핑 이득은 1.06-8.73 사이의 값일 경우 안정하고, 댄핑 이득이 4.4일 경우 최적이다.

시지연을 고려한 PI제어기의 전달함수는 (12)와 같다.^[5]

$$\begin{aligned} G_{PI}(s) &= (0.5T_{samp} + 1) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \\ &\approx (K_p + 0.5T_{samp}K_i) + \frac{K_i}{s} \quad (12) \end{aligned}$$

제안하는 제어기에 이득을 새롭게 적용한 시스템의 배터리 어드미턴스와 제어기의 페루프 보드선도를 그림 8에 보인다. 수정된 댄핑 이득에서도 공진이 억제됨을 알 수 있으며, 전체 시스템과 시지연을 고려할 경우에 제어기 대역폭 근방의

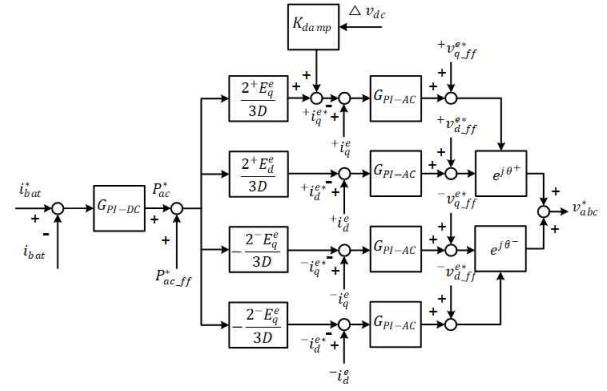


그림 5 제안하는 배터리 전류 제어 블록도

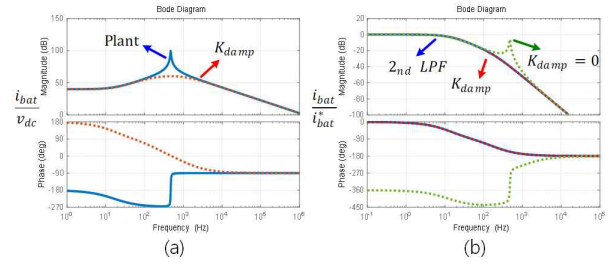


그림 6 배터리 전류 제어 보드선도
(a) 직류측 어드미턴스, (b) 페루프 전달 함수

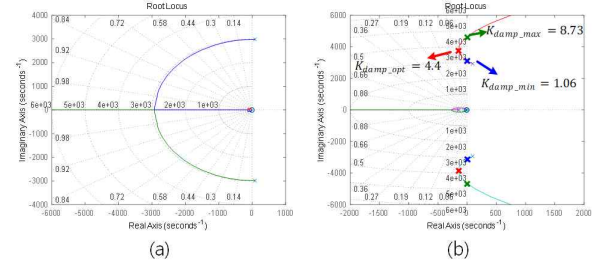


그림 7 댄핑 이득에 따른 근궤적
(a) 단순화된 모델의 근궤적, (b) 전체 시스템과 시지연이 고려된 근궤적

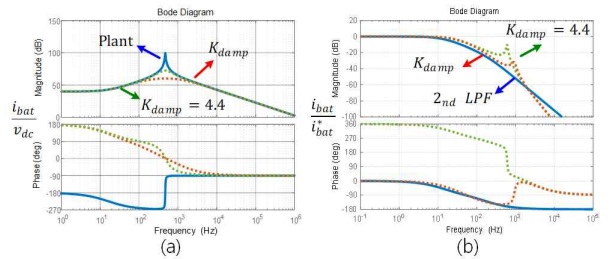


그림 8 이득이 수정된 배터리 전류 제어 보드선도
(a) 직류측 어드미턴스 (b) 전체 시스템과 시지연이 고려된 페루프 전달 함수

표 1 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값	파라미터	값
L_{inv}	130[μH]	R_{inv}	1.9[mΩ]
L_{grid}	65[μH]	R_{grid}	1.9[mΩ]
L_{dc}	70[μH]	R_{dc}	1[mΩ]
C_{dc}	1650[μF]	F_{sw}	10[kHz]
T_{samp}	100[μs]	V_{rms}	380[V]
V_{bat}, V_{dc0}	600[V]	I_{bat0}	-100[A]
ω_{ac}	$2\pi \times 500$ [rad/s]	ω_{dc}	$2\pi \times 50$ [rad/s]

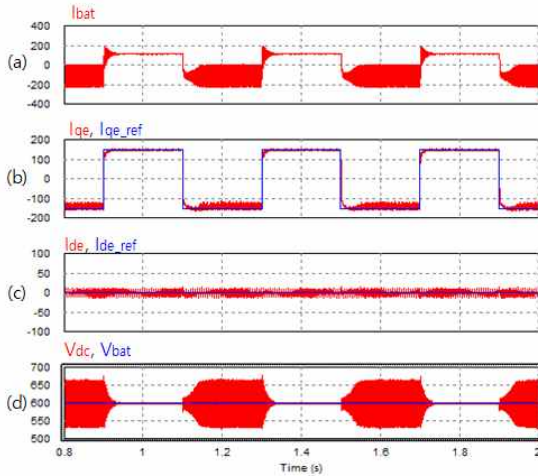


그림 9 d,q축 전류 제어기만 사용
(a) 배터리 전류, (b) q축 전류, q축 전류지령,
(c) d축 전류, d축 전류지령, (d) DC-Link 전압, 배터리 전압

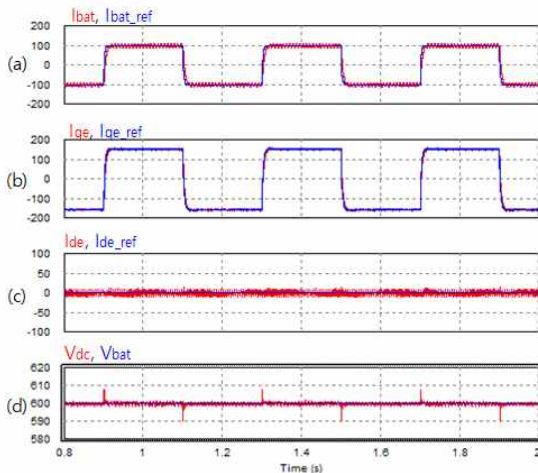


그림 10 불평형 시 제안한 제어기에서 불평형 제어 제외
(a) 배터리 전류, 배터리 전류지령, (b) q축 전류, q축 전류지령,
(c) d축 전류, d축 전류지령, (d) DC-Link 전압, 배터리 전압
영역에서는 2차 저역통과필터와는 근소한 차이만 보여준다.

4. 시뮬레이션 결과

제안하는 제어기법을 검증하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 사용한 파라미터는 표 1에 보인다. 그림 9는 제안하는 제어기를 적용하지 않은 경우이다. q축 전류를 제어하여 배터리를 충-방전한다. 충전 시 안정적으로 제어할 수 있지만, 방전 시 공진이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 10은 제안된 알고리즘을 적용하고, 교류 전압의 불평형 조건(B상 20%, C상 30% 전압 강하)에서 불평형 제어를 하지 않을 경우이다. 배터리 전류와 DC-Link 전압에 교류 전원 주파수 2배의 진동이 발생한다. 그림 11은 동일한 조건에서 불평형 제어기법을 적용한 결과이다. 과도 상태에서 정상분과 역상분의 커플링으로 인하여 작은 오버슈트가 발생하지만, 직류측에 발생하는 진동이 제거된 것을 확인할 수 있다. 이때, 진동이 제거되도록 정-역상분을 제어하기 때문에 상전류는 불평형 상태를 유지하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 ESS용 3상 AC/DC 컨버터의 새로운 배터리 전류 제어기를 제안하였다. 배터리 방전시의 불안정, DC필터로 인한 공진과 교류 전압 불평형 시 교류 주파수 2배의 진동

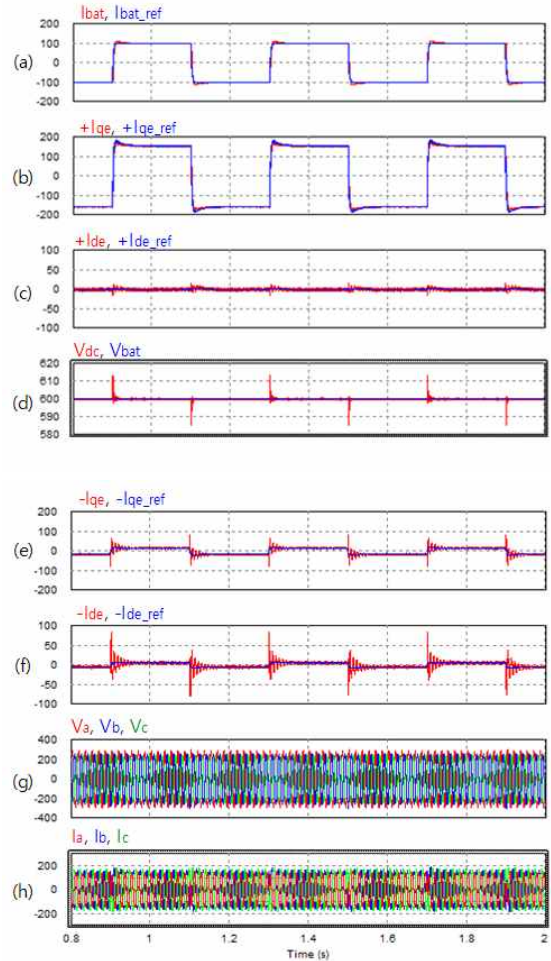


그림 11 불평형 시 제안한 제어기 사용

(a) 배터리 전류, 전류지령, (b) 정상분 q축 전류, 정상분 q축 전류지령,
(c) 정상분 d축 전류 및 정상분 d축 전류지령, (d) DC-Link 전압, 배터리 전압,
(e) 역상분 q축 전류, 역상분 q축 전류지령, (f) 역상분 d축 전류, 역상분 d축 전류지령,
(g) AC전원 상전압, (h) AC전원 상 전류
문제에 대해서 분석하고, 제안된 제어기로 해결할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “국가혁신클러스터사업(P0006681_산업단지 마이크로그리드 계통 안정화용 지능형 전력시스템 개발)”의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

참고 문헌

- [1] Huimin Wang, Xinglai Ge, and Yong-Chao liu, "An Active Damping Stabilization Scheme for the Suppression of the DC-Link Oscillation in Metro Traction Drive System," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 54, no. 3, pp. 5113-5123, 2018.
- [2] 장정익, 이동춘, 김홍근, "전원전압의 불평형 및 왜곡시 3상 PWM 컨버터의 전류제어," 전력전자학회 논문지 제12권 제1호, pp. 27-36, 2007.
- [3] 김병현, "약한 교류 배전 계통에 연계되는 대용량 PCS의 제어기 설계에 따른 안정도 해석 및 안정적 운용을 위한 설계 방안," 서울대학교, 박사학위논문, 2016.
- [4] Manuel Reyes, Pedro Rodriguez, Sergio Vazquez, Alvaro Luna, Remus Teodorescu, and Juan Manuel Carrasco, "Enhanced Decoupled Double Synchronous Reference Frame Current Controller for Unbalanced Grid-Voltage Conditions," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, no. 9, pp. 3934-3943, 2012.
- [5] 김현식, 지승준, 설승기, "임의 파형 발생기를 위한 단일 루프 전압 제어기 설계," 전력전자학회 논문지 제21권, 제1호, pp. 58-64, 2016.