

# Delta 구조 MMC 기반 BESS의 서브모듈 배터리 SOC 균등제어

김재혁, 이윤석, 한병문\*  
 명지대학교 전기공학과

## Sub-module Battery SOC Balancing Control for BESS Based on MMC with Delta Configuration

Jae-Hyuk Kim, Yoon-Seok Lee, Byung-Moon Han\*  
 Department of Electrical Engineering, Myongji University

### ABSTRACT

본 논문에서는 Full-bridge 서브모듈로 구성된 Delta 구조 MMC를 기반으로 하는 BESS의 SOC 균등제어 기법에 대하여 기술하고 있다. Full-bridge로 구성된 서브모듈의 직류단에는 배터리가 연계되어 있다. 배터리는 그 모델에 따라 고유의 전압특성 곡선을 갖기에 SOC 제어를 통한 배터리 출력전압의 균등제어가 필요하다. 본 논문에서는 Delta 구조 MMC BESS의 영상분 전류주입과 개별 배터리의 SOC 차를 이용한 SOC 균등제어 기법을 제안하였다. 그리고 PSCAD/EMTDC를 통하여 제안하는 기법을 시뮬레이션으로 검증하였다.

전체 시스템은 Delta 형태로 구성되어 전력조류를 분석하기 위해 해서 전압과 전류는 식(3)과 같이 Delta 결선에서의 상전압과 상전류로 나타내어야 분석이 용이하다. 수식을 통해 상 별 영상분 피상전력을 구하고, 무효전력 성분을 제거하면 식(4)와 같이 상 별 영상분 유효전력을 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & \sqrt{3}/2 \\ -0.5 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d^p \\ V_q^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d^n \\ V_q^n \end{bmatrix} \right) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & \sqrt{3}/2 \\ -0.5 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^p \\ I_q^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^n \\ I_q^n \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

### 1. 서론

최근 분산전원의 증가로 인한 계통의 안정성 문제가 대두되고 있다. 신 재생 에너지원에 의한 전력과 주파수의 변동은 계통에 중대한 영향을 미친다. 이러한 문제를 해결하는 방안 중 하나는 VSG(Virtual Synchronous Generator)를 통하여 가상의 관성과 댐핑특성을 적용하는 방법이 있다. 대용량의 동기발전기 특성을 구현하기 위해서는 MMC 기반의 BESS를 필요로 한다. MMC BESS는 각 서브모듈 마다 배터리가 연계되어 SOC 균등제어가 필요하다. 본 논문에서는 Full-bridge로 구성된 Delta 구조 MMC BESS의 SOC 균등제어 기법에 대하여 제안하고자 한다.

### 2. 시스템 구성

MMC BESS의 전체 시스템의 구성은 Delta 구조 MMC와 리튬이온 배터리로 구성된다. MMC를 구성하는 상 별 암은 10개의 서브모듈로 구성되어 있고 PSC(Phase Shift Carrier) 기법을 적용하였다. 서브모듈은 직류단에 리튬이온 배터리 팩이 연계되어 있다. 리튬이온 배터리는 다른 배터리에 비해 정격전압이 높아 중전압 MMC의 직류단 전압을 형성함에 있어 상대적으로 적은 수의 배터리 셀의 직렬연결이 필요하다. MMC BESS의 서브모듈에 적용된 배터리 셀은 정격전압이 3.3V로 이를 직렬로 350개 연결하여 동작전압이 1120~1190V이고 모듈 30개를 병렬 연결하여 정격용량이 69Ah이다.

### 3. 평균전력분석

배터리 셀의 SOC 불균등과 계통의 전압 및 부하 불평형에 따른 상 간 불균등 전력분배를 해결하기 위해서는 시스템의 정상분, 역상분 그리고 영상분을 통한 전력분석이 이뤄져야 한다. MMC BESS의 출력전압과 출력전류를 정상분과 역상분으로 나타내면 식(1)과 (2)로 표현할 수 있다 [1].

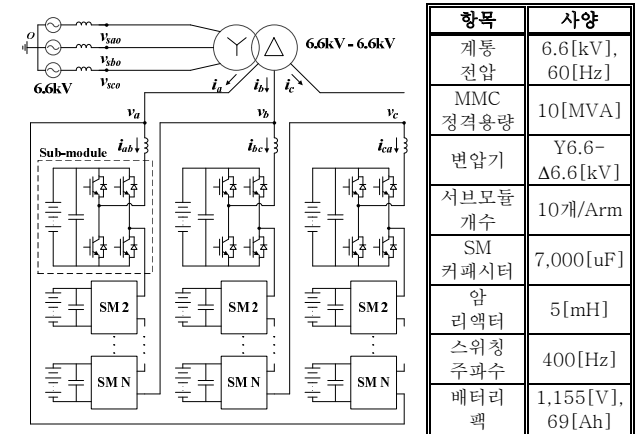


그림 1 Delta 구조 MMC BESS 시스템회로도

$$\begin{cases} v_{ab} = v_a - v_b \\ v_{bc} = v_b - v_c \\ v_{ca} = v_c - v_a \end{cases} \quad \begin{cases} i'_{ab} = i_a - i_b \\ i'_{bc} = i_b - i_c \\ i'_{ca} = i_c - i_a \end{cases} \quad \begin{cases} i_{ab} = i'_{ab} + i_0 \\ i_{bc} = i'_{bc} + i_0 \\ i_{ca} = i'_{ca} + i_0 \end{cases} \quad i_0 = I_0 \cos(\omega t + \theta_0) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} P_{ab}^0 &= 0.25I_0 \left( (3V_d^p - \sqrt{3}V_q^p + 3V_d^n - \sqrt{3}V_q^n) \cos \theta_0 + (\sqrt{3}V_d^p + \sqrt{3}V_q^p - \sqrt{3}V_d^n - 3V_q^n) \sin \theta_0 \right) \\ P_{bc}^0 &= 0.5I_0 \left( (\sqrt{3}V_d^p + \sqrt{3}V_q^n) \cos \theta_0 + (-\sqrt{3}V_d^p + \sqrt{3}V_d^n) \sin \theta_0 \right) \\ P_{ca}^0 &= 0.25I_0 \left( (-3V_d^p - \sqrt{3}V_q^p - 3V_d^n - \sqrt{3}V_q^n) \cos \theta_0 + (\sqrt{3}V_d^p - \sqrt{3}V_q^p - \sqrt{3}V_d^n + 3V_q^n) \sin \theta_0 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

### 4. 서브모듈 배터리 SOC 균등제어

그림 2는 MMC BESS의 전체 제어 구조를 나타낸다. 유효 전력에 따른 전류지령은 정상분과 역상분으로 나뉘어 적용된다. 그리고 SOC 균등제어는 두 가지의 제어기로 구성된다. 하나는 상 간 SOC 균등제어기로, 각 암을 이루고 있는 서브모듈들의 평균 SOC를 Delta 결선에 영상분 전류주입을 통하여 SOC를 균

등하게 하는 제어기이다. 그리고 다른 하나는 개별 SOC 균등제 어기로, 한 암을 이루는 서브모듈의 SOC를 제어한다.

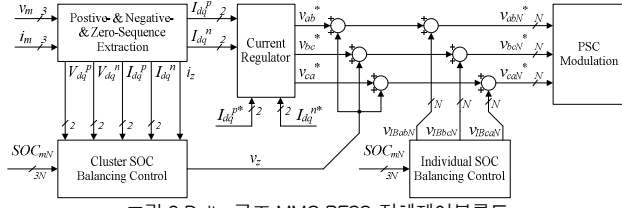


그림 2 Delta 구조 MMC BESS 전체제어블록도

#### 4.1 상 간 SOC 균등제어

상 간 SOC 균등제어기는 상 별 서브모듈의 SOC 평균값을 시스템 전체의 SOC 평균값과 비교하여, 그 차이에 비례하여 영상분 전류의 크기와 위상각을 결정한다. 그리하여 각 암을 이루는 서브모듈의 배터리는 영상분 전력이 추가로 더해져 충·방전 동작을 수행하게 된다. 그림 3은 상 간 SOC 균등제어기를 나타내고 수식은 상수  $K_z$ 를 나타낸다.  $\Delta SOC_m$ 는 상수  $K_z$ 에 의해서 전류 값으로 변환된다. 이 때 식(5)에서의 시간상수  $T_z$ 는 불균등률에 따른 영상분 전류의 크기, 즉 시간당 충·방전량을 결정한다.

$$K_z [A/\%] = N \times Rated \ Capacity \ [Ah] \times 1/100[\%] \times T_z [1/h] \quad (5)$$

제어기를 통해 결정된 상 별 영상분 전력은 식(6)에 의해 d-q축 성분의 영상분 전류로 나타낼 수 있고, 식(7)을 통하여 영상분 전류 지령치로 나타낼 수 있다.

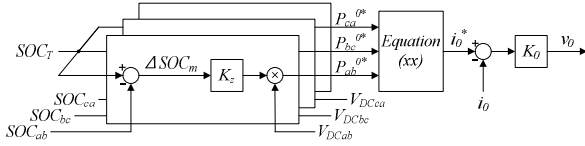


그림 3 상간 SOC 균등제어블록도

$$T_0 \begin{bmatrix} p_{ab}^{0+} \\ p_{bc}^{0+} \\ p_{ca}^{0+} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 3V_d^p - \sqrt{3}V_q^p + 3V_d^n - \sqrt{3}V_q^n & \sqrt{3}V_d^p + \sqrt{3}V_q^p - \sqrt{3}V_d^n - \sqrt{3}V_q^n \\ \sqrt{3}V_d^p + \sqrt{3}V_q^p + \sqrt{3}V_d^n + 3V_q^n & -3V_d^p + \sqrt{3}V_q^p + 3V_d^n - \sqrt{3}V_q^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \cos \theta_0 \\ I_0 \sin \theta_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\theta_0 = \tan^{-1} \frac{I_0 \sin \theta_0}{I_0 \cos \theta_0}, \quad |I_0| = \sqrt{(I_0 \sin \theta_0)^2 + (I_0 \cos \theta_0)^2}, \quad i_0^* = |I_0| \cos(\omega t + \theta_0) \quad (7)$$

#### 4.2 개별 SOC 균등제어

그림 4는 개별 SOC 균등제어기로 한 암 N번째 서브모듈에 대한 제어기를 나타낸다. 이 평균 SOC값과 암을 구성하는 개별 서브모듈 SOC값을 비교하여 한 상의 서브모듈간 에너지를 교환하여 SOC를 균등하게 한다.



그림 4. 개별 SOC 균등제어블록도

### 5. 시뮬레이션

제안하는 SOC 균등제어 기법의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 모든 서브모듈 배터리는 초기 SOC를 각각 다르게 설정하고, 100s 마다 10MW의 전력을 번갈아 충·방전 하도록 시나리오를 적용하였다. 그림은 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. (a)는 30개의 서브모듈 배터리 SOC, (b)는 배터리 전압을 나타낸다. 균등제어 기법으로 인해 SOC가 균등해짐에

따라 배터리 간의 전압차가 줄어들음을 확인할 수 있다. (c)와 (d)는 Delta 결선의 상전압과상전류를 나타내고 있다. 상전류는 영상분 전류가 포함되어 상 별 크기가 각기 다르며, 상 간 SOC가 불균등함에 따라 영상분 전류가 주입되고 있음을 보여준다. (e)는 Y 결선에서의 상전류로, Delta 결선에 영상분 전류를 주입하여도 Y 결선에서의 상전류에는 영향을 미치지 않고 BESS의 전력이 온전하게 출력됨을 확인할 수 있다.

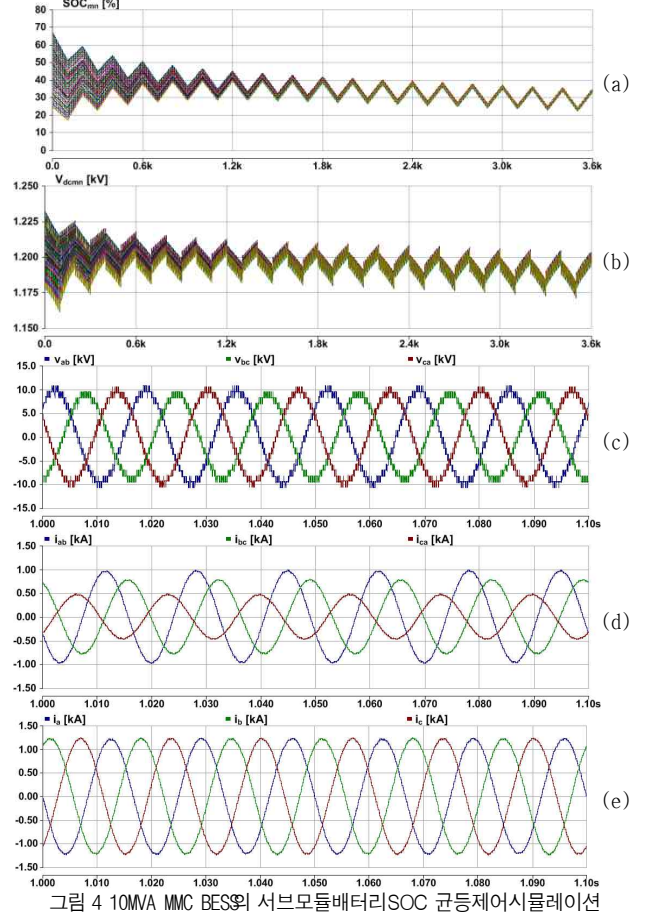


그림 4 10MVA MMC BESS의 서브모듈배터리 SOC 균등제어시뮬레이션

### 6. 결론

본 논문에서는 평균전력 분석에 의한 영상분 전류주입을 통하여 Delta 구조 MMC 기반 BESS의 서브모듈 배터리 SOC 균등제어 기법을 제시하고, 기법의 타당성을 확인 할 목적으로 10MVA MMC BESS 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 향후에는 제안하는 SOC 균등제어 기법을 토대로 MMC BESS의 VSG 동작제어 메커니즘에 대하여 연구를 수행할 것이다.

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 기초연구개발 과제의 지원에 의하여 이루어진 연구입니다. (R15XA03-46)

### 참고 문헌

[1] P. H. Wu, H. C. Chen, Y. T. Chang and P. T. Cheng, "Delta-connected cascaded H-bridge converter application in unbalanced load compensation," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, 2015, pp. 6043-6050.