

지그재그 변압기를 활용한 중앙집중형 에너지저장 기반 더블스타 풀브릿지 멀티레벨 컨버터

김영웅*, 이성두**, 이준혁**, 김재한**, 조혜원**, 최성휘***, 정재정*
경북대학교*, 한국전력공사**, 서울대학교***

A Double-Star Full-Bridge Multilevel Converter with Centralized Energy Storage Using a Zigzag Transformer

Yeongung Kim*, Seongdoo Lee**, Junhyeok Lee**, Jaehan Kim**, Hyewon Jo**, Shenghui Cui***, Jae-Jung Jung*
Kyungpook National University*, Korea Electric Power Corporation**, Seoul National University***

Abstract - 중앙집중형 에너지저장소(energy storage, ES)를 적용한 더블스타 풀브릿지(double-star full-bridge, DSFB) MMC 기반 E-STATCOM은 단일 ES 뱅크 운용에 따른 시스템 구성의 간결성과 에너지 관리 측면의 이점을 갖는다. 그러나 상단 또는 하단 암(arm) 내부에서 서브모듈(SM) 고장, 암 인덕터 고장, ES 셀 고장 등이 발생하면 상단 및 하단 암이 ES 뱅크를 통해 직렬 경로를 공유하는 토폴로지 특성상 시스템 전체를 정지시켜야 한다는 한계가 있다. 본 논문에서는 중앙집중형 ES 뱅크의 중성점을 지그재그 변압기(zigzag transformer) 중성점에 연결한 DSFB-MMC 토폴로지를 제안한다. 지그재그 변압기는 단일 암 고장 시에는 건전한 측 암만으로 운전을 지속하는 데 필요한 영상분 순환 전류 경로를 제공한다. 영상분 전압을 합성하는 extra cluster를 포함한 전체 에너지 제어와 클러스터 간 에너지 균형 제어 기법을 제시하고, 주파수 드롭 이벤트와 하단 암 트립이 결합된 시나리오에 대한 PLECS 시뮬레이션을 통해 제안 토폴로지가 건전 암만으로 보상 운전을 지속할 수 있음을 검증한다.

1. 서 론

신재생에너지 보급 확대와 함께 무효전력 보상과 더불어 유효 전력의 양방향 주입·흡수 능력이 요구되고 있으며, 이에 따라 에너지 저장소(energy storage, ES)를 결합한 E-STATCOM이 부각되고 있다 [1]. ES 배치 방식에 따라 분산형과 중앙집중형으로 구분되며, 중앙집중형은 단일 ES 뱅크 운용에 따른 절연·열 관리 부담이 적고 전체 직류 단 전압을 단일 변수로 제어할 수 있어 대용량 응용에서 매력적인 대안이다.

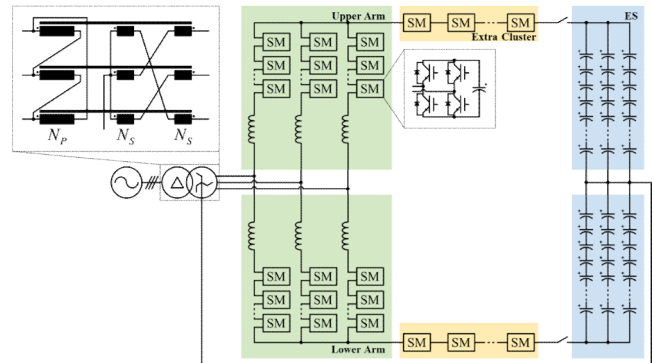
더블스타(double-star) 풀브릿지(full-bridge, FB) MMC는 음의 출력 전압 합성이 가능하여 직류 단 전압 활용률이 높고, DC 단락 차단 능력을 갖추어 ES 응용에 유리한 토폴로지이다 [2]. 그러나 중앙집중형 ES와 DSFB-MMC 구조에서는 상단·하단 암이 ES 뱅크를 통해 직렬 경로를 공유하기 때문에, 어느 한 측 암에서 서브모듈(SM), 암 인덕터, 또는 ES 셀 고장이 발생하면 전류 순환 경로가 차단되어 시스템 전체를 정지시켜야 한다 [3].

본 논문에서는 중앙집중형 ES 뱅크의 중성점을 델타/지그재그 변압기를 통해 계통 측 중성점에 접속한 새로운 DSFB-MMC 기반 E-STATCOM 토폴로지를 제안한다. 지그재그 변압기는 정·역상분 임피던스가 크고 영상분(zero-sequence) 임피던스는 작게 설계되므로, 정상 운전 시에는 부가적인 정상분 전류를 흘리지 않으면서, 단일 암 고장 시에는 건전한 측 암만으로 운전을 지속할 수 있는 영상분 순환 전류 경로를 제공한다. 또한 전체 에너지 제어와 클러스터 간 에너지 균형 제어를 통합한 제어 구조를 제시하고 PLECS 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 제안하는 토폴로지

그림 1과 같이 제안 토폴로지는 3상 6암 DSFB-MMC, 중앙



〈그림 1〉 제안하는 지그재그 변압기 기반 DSFB-MMC E-STATCOM 토폴로지

집중형 ES 뱅크, 그리고 델타/지그재그 변압기로 구성된다. ES 뱅크는 직렬 연결된 두 부분으로 분할되어 상단 암과 하단 암의 DC 측에 $+V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$ 의 직류 전압을 공급하고, 그 중성점은 지그재그 변압기의 중성점에 접속된다. 정상 운전 시 변압기 1차 측 중성점 전류는 이상적으로 0이며, 단일 암 고장 시에만 영상분 순환 전류 경로가 형성된다.

또한 각 암에는 클러스터 에너지 균형을 위해 별도의 풀브릿지 extra cluster가 부가된다. Extra cluster는 정상 운전 시 상·하단 암이 합성하는 영상분 전압과 동일한 영상분 전압을 합성하여, 영상분 순환 전류 경로의 전압 강하를 상쇄시킨다. 이를 통해 균형 제어를 위해 주입되는 영상분 전압이 추가적인 영상분 전류를 합성하는 것을 방지한다.

고장 운전 시에는 고장 측 3개 암을 모두 차단하고 건전한 측 3개 암만으로 운전한다. ES 뱅크에서 공급되는 직류 전류는 건전한 암과 지그재그 변압기 영상분 경로를 통해 순환하므로, 정상 운전 대비 약 절반의 용량으로 보상 운전을 지속할 수 있다.

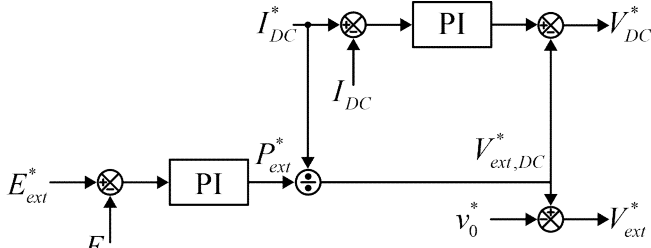
2.2 전체 및 extra cluster 에너지 제어

MMC 전체 에너지 제어 루프는 정격 직류 전압으로부터 산출되는 에너지 지령 E_{total}^* 과 측정값 E_{total} 의 오차를 PI 제어기로 보상하여 AC 유효전력 지령 P_{AC}^* 와 직류 전류 지령 I_{DC}^* 를 생성한다. Extra cluster 에너지 제어 루프는 에너지 지령 E_{ext}^* 과 측정값 E_{ext} 의 오차를 PI 제어기로 보상하여 유효전력 지령 P_{ext}^* 를 생성하고, 직류 전류 지령으로 나누어 extra cluster DC 전압 지령 $V_{ext,DC}^*$ 를 산출한다.

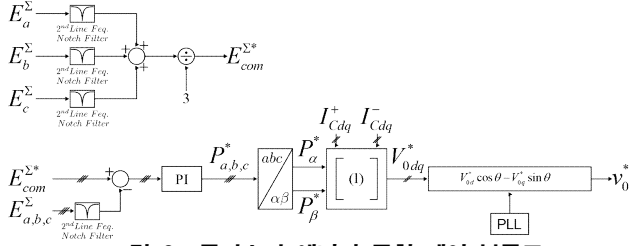
분배된 $V_{ext,DC}^*$ 의 변동이 MMC 직류 전류 제어 루프에 외란으로 작용하지 않도록, $V_{ext,DC}^*$ 를 직류 전류 제어기 출력에 전향 보상(feed-forward) 형태로 반영한다. 그림 2는 extra cluster 에너지 제어 구조를 나타낸다.

2.3 영상분 전압을 이용한 클러스터 에너지 균형 제어

각 상의 클러스터 에너지 오차 $E_{com}^x - E_x^x$ ($x \in \{a,b,c\}$)를 PI



〈그림 2〉 extra cluster 에너지 제어 블록도



〈그림 3〉 클러스터 에너지 균형 제어 블록도

제어기로 보상하여 균형 제어 유효전력 지령 P_x^* 를 생성한다. 동기 회전 좌표계의 dq 축 영상분 전압 지령 V_{0d}^* , V_{0q}^* 는 dq 축 정·역상분 전류 I_{Cdq}^+ , I_{Cdq}^- 와 유효전력 지령 P_x^* 의 관계로부터 식 (1)-(2)와 같이 도출된다.

$$\begin{bmatrix} V_{0d}^* \\ V_{0q}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{D} \begin{bmatrix} -I_{Cd}^+ + I_{Cd}^- & -I_{Cq}^+ + I_{Cq}^- \\ -I_{Cq}^+ - I_{Cd}^- & I_{Cd}^+ + I_{Cd}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_a^* \\ P_\beta^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$D = -(I_{Cd}^+)^2 + (I_{Cd}^-)^2 - (I_{Cq}^+)^2 + (I_{Cq}^-)^2 \quad (2)$$

그림 3과 같이 클러스터 에너지 균형 제어를 위한 기본파 영상분 전압 v_0^* 는 MMC 본 암 측 출력 전압 지령에 가산되고, 그림 3과 같이 extra cluster 측에는 부호를 반전하여 주입된다. 이를 통해 DC측에서 본 합성 전압의 기본파 영상분 성분이 상쇄되어 ES 전류에는 기본파 영상분이 흐르지 않으면서, 영상분 전압과 정·역상 전류의 곱에 의한 평균 유효전력이 상간 에너지를 조절한다.

2.4 PLECS 시뮬레이션 결과

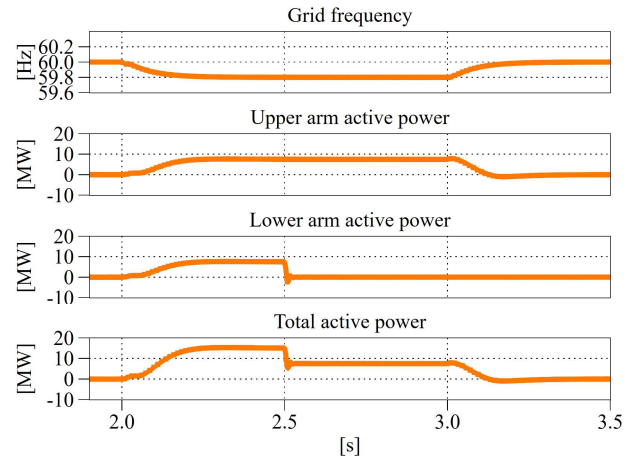
〈표 1〉 DSFB-MMC E-STATCOM 주요 파라미터

정격 용량	40 [MVA]	계통 전압	22.9 [kV]
정격 유효전력	20 [MW]	ES DC 전압	40 [kV]
SM 정격 DC 전압	1.2 [kV]	ES 용량	20 [MWs]
암 당 SM 수	40	Extra cluster SM 수	10

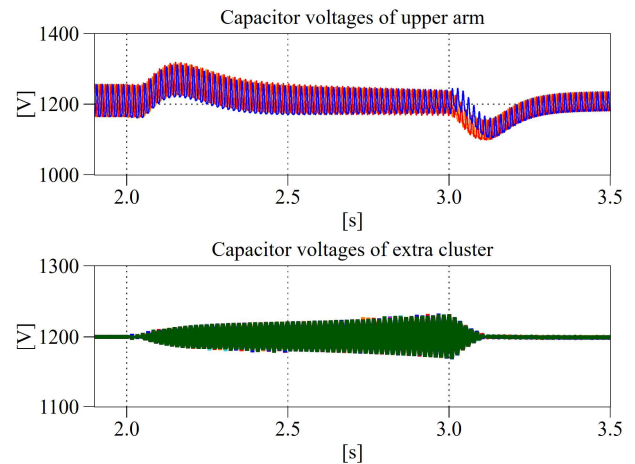
시뮬레이션 시나리오는 다음과 같다. 무효전력 0.7 p.u 출력 중 $t = 2$ s에서 계통 주파수가 60 Hz에서 59.8 Hz로 떨어지고, 동시에 a상 전압이 1.0에서 0.8 p.u로 감소하는 불평형 조건을 인가한다. $t = 2.5$ s에서는 하단 암 측에 고장이 발생하여 트립 되고 상단 암만으로 운전을 지속한다.

그림 4와 같이, $t = 2$ s 이후 설정된 드롭 계수와 데드밴드에 따라 전체 유효전력이 약 15 MW 출력되며 상·하단 암이 동일한 분담으로 동작한다. 이때 상하단 암 DC 전류가 서로 반대 방향이라는 정상 운전 특성으로 인해 변압기 2차 측 DC 전류는 상쇄되고, 변압기 정격 전류를 낮게 설계할 수 있다. $t = 3$ s에서 하단암이 트립된 이후에는 건전한 상단 암만으로 단일-스타 구조와 동일하게 동작하여 유효전력 보상이 지속됨을 확인할 수 있다.

그림 5는 상단암 extra cluster SM 커패시터 전압이 정격 전압 1.2 kV로 유지됨을 보여주며, extra cluster 에너지 제어가 정상적으로 동작함을 검증한다.



〈그림 4〉 계통 주파수와 상·하단 암 유효전력



〈그림 5〉 상단 암 서브모듈 커패시터 전압과 extra cluster 서브모듈 커패시터 전압

3. 결 론

본 논문은 중앙집중형 ES 뱅크의 중성점을 델타/지그재그 변압기로 접속한 DSFB-MMC 토폴로지를 제안하고, extra cluster를 포함한 전체 에너지 제어와 영상분 전압을 이용한 클러스터 에너지 균형 제어 기법을 제시하였다. PLECS 시뮬레이션을 통해 제안 토폴로지가 단일 암 고장 시에도 약 절반 용량의 보상 운전을 지속할 수 있음을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. R25TA22)

참고 문헌

- [1] M. Vasiladiotis and A. Rufer, "Analysis and Control of Modular Multilevel Converters With Integrated Battery Energy Storage," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 1, pp. 163-175, Jan. 2015
- [2] H. Akagi, "Classification, Terminology, and Application of the Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC)," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 11, pp. 3119-3130, Nov. 2011
- [3] P. Hu, D. Jiang, Y. Liang, F. Lin, and R. Lai, "Fault-Tolerant Approach for Modular Multilevel Converters Under Submodule Faults," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 11, pp. 7253-7263, Nov. 2016