

영상분 전류 주입을 통한 스타 결선 CHB기반 멀티레벨 전력변환 시스템의 역상분 전류 보상영역 확장 기법

김영웅*, 최성휘**, 정재정*
 경북대학교*, 서울대학교**

Technique for Expanding Negative-Sequence Current Compensation Region in Star-Connected CHB Based Multilevel Power Conversion Systems through Injection of Zero-Sequence Current

Yeongung Kim*, Shenghui Cui**, Jae-Jung Jung*
 Kyungpook National University*, Seoul National University**

ABSTRACT

본 연구에서는 지그재그 변압기를 활용하여 스타 결선 Cascaded H-Bridge(CHB)기반의 Static Synchronous Compensator(STATCOM)의 역상분 전류 보상 능력을 향상시키고, 기존 스타 결선 CHB기반 STATCOM과의 성능을 정량적으로 비교분석하였다. 지그재그 변압기는 영상분 전류를 활용하여 CHB 컨버터 클러스터 에너지 균형 제어에 기여함으로써, 전체 시스템의 안정성을 향상시킨다. STATCOM의 역상분 및 영상분 전류에 관한 수식적 접근을 바탕으로 한 시뮬레이션 결과를 제시하며, 해당 수식을 기반으로 한 전향보상 기법을 적용하여 과도상태의 성능을 개선하는 방법을 제안한다. 제안하는 컨버터가 기존 컨버터에 비해 역상분 전류의 보상 가능 영역이 크게 확장됨을 보여주며, 추가적인 전향보상 기법이 전력 시스템의 동적 응답 개선에 크게 기여할 수 있음을 확인하였다. 이러한 개선은 사고 발생시 응답 시간 감소 및 전력 품질 개선에 중요한 영향을 미칠 것으로 기대된다.

1. 서론

Static Synchronous Compensator(STATCOM)은 무효 전력 및 역상분 전류를 공급하거나 흡수하여 Point of Common Coupling(PCC)의 전압을 조절한다. 중전압 및 고전압 계통일 경우 스타 결선 Cascaded H-Bridge(CHB) 컨버터를 STATCOM의 토폴로지로 채택하고 있다. CHB 컨버터의 각 상은 클러스터와 클러스터 인덕터로 구성되고 변압기를 통해 계통과 연결된다.

스타 결선 CHB 컨버터의 각 상의 DC단이 독립적으로 구성되어 있어 각 클러스터 사이의 에너지 불균형이 필연적으로 발생한다. 따라서, 무효 전력 및 역상분 전류 보상시 클러스터 에너지 균형 제어가 필수적이다^[1]. 스타 결선 CHB 컨버터는 클러스터 에너지 균형 제어를 위해 영상분 전압을 이용한다. 주입되는 영상분 전압으로 인해 최대 출력 전압이 증가하여 출력 전압 여유를 설계시 더 확보해야한다^[2].

본 논문에서는 그림 1과 같이 영상분 전류로 클러스터 에너지 균형 제어가 가능한 스타 결선 CHB 컨버터

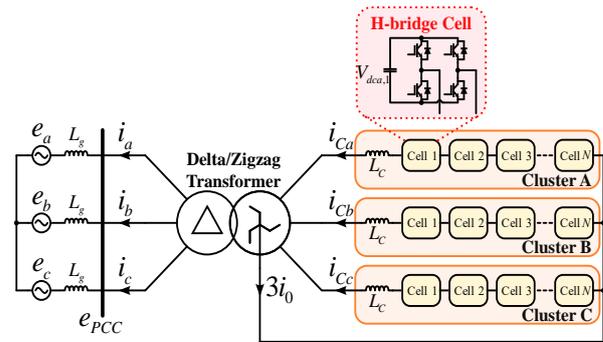


Fig.1 Proposed star-connected CHB converter system.

회로를 제안한다. 영상분 전류 경로는 지그재그 변압기가 제공한다. 기존 컨버터와 비교를 위해 역상분 전류와 영상분 성분의 관계를 수학적으로 분석하였고 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 역상분 전류 보상 능력 비교

2.1 에너지 불균형을 야기하는 유효 전력

V_{cd}^+ , V_{cq}^+ , V_{cd}^- 및 V_{cq}^- 은 dq 동기좌표계상의 정상분 및 역상분 클러스터 전압이다. I_{cd}^+ , I_{cq}^+ , I_{cd}^- 및 I_{cq}^- 은 dq 동기좌표계상의 정상분 및 역상분 클러스터 전류이다. 각 상의 유효 전력은 (1)과 같이 dq 동기좌표계상의 전류와 전압 성분을 이용하여 정지좌표계상에 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{2}{3}P_a - \frac{1}{3}P_b - \frac{1}{3}P_c \\ \frac{1}{\sqrt{3}}P_b - \frac{1}{\sqrt{3}}P_c \end{bmatrix} \\
 &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_{cd}^- & -I_{cq}^- & I_{cd}^+ & -I_{cq}^+ \\ -I_{cd}^- & -I_{cd}^- & -I_{cq}^+ & -I_{cd}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{cd}^+ \\ V_{cq}^+ \\ V_{cd}^- \\ V_{cq}^- \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

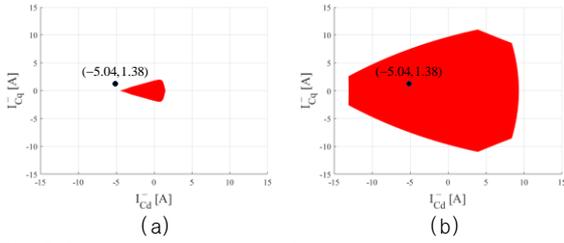


Fig.2 Compensation region of negative sequence currents under unbalanced grid. (a) Conventional star-connected CHB converter. (b) Proposed star-connected CHB converter.

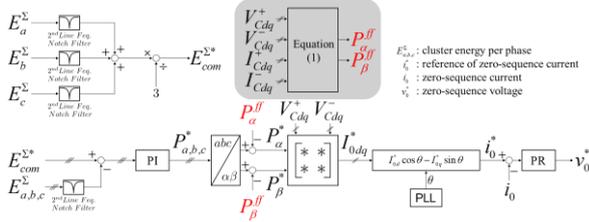


Fig.3 Block diagram of the proposed cluster energy balancing controller.

이렇게 구한 유효 전력을 이용하여 역상분 전류에 따른 영상분 성분을 구하고 기존 컨버터와 제안하는 컨버터의 역상분 전류 보상 능력을 비교할 수 있다. 그림 2는 계통 역상분 전압이 정상분 전압의 10%가 되는 불평형이 발생했을 때 역상분 전류 보상 범위이다. 6[kVAR]급 컨버터는 계통 불평형 보상을 위해 정상분 d축 전류 ($I_{Cd}^+ = 4.8$ [A])와 역상분 전류 ($I_{Cd}^- = -5.04$ [A], $I_{Cq}^- = 1.38$ [A])가 주입된다. 제안하는 컨버터는 기존 컨버터에 비해 역상분 전류 보상 능력이 향상된다.

2.2 클러스터 에너지 균형 제어 전향보상

제안하는 컨버터는 정상상태에서 주입되는 영상분 전압이 매우 감소하지만, 과도상태에서 순간적으로 영상분 전압이 상승하여 출력전압이 증가하고 클러스터 에너지 균형 제어 응답이 길어질 수 있다. 이를 해결하기 위해 (1)을 이용한 전향보상을 제안한다. 전향보상을 적용한 클러스터 에너지 균형 제어는 그림 3과 같다.

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 클러스터 에너지 균형 제어와 전향보상을 검증하기 위해 6[kVAR]급 스타 결선 CHB 컨버터를 통해 시뮬레이션을 진행하였다. 각 클러스터는 4개의 셀로 구성되어 있다. 셀 커패시터 정격 전압은 60[V]이다. 그림 4는 계통 전압 불평형 보상시 출력 파형이다. 그림 4(a)에서 기존 컨버터는 역상분 전류 보상 능력이 부족하여 불평형 보상과 클러스터 에너지 균형을 하지 못한다. 그림 4(b)에서 제안하는 컨버터는 역상분 전류 보상 범위가 넓기 때문에 불평형 보상과 클러스터 에너지 균형 제어가 가능하다. 하지만 과도상태일 때 셀 전압의 변동이 크고 응답 시간이 길다. 하지만 그림 4(c)에서 유효 전력을 전향보상함으로써, 과도안정도가 향상됨을 알 수 있다.

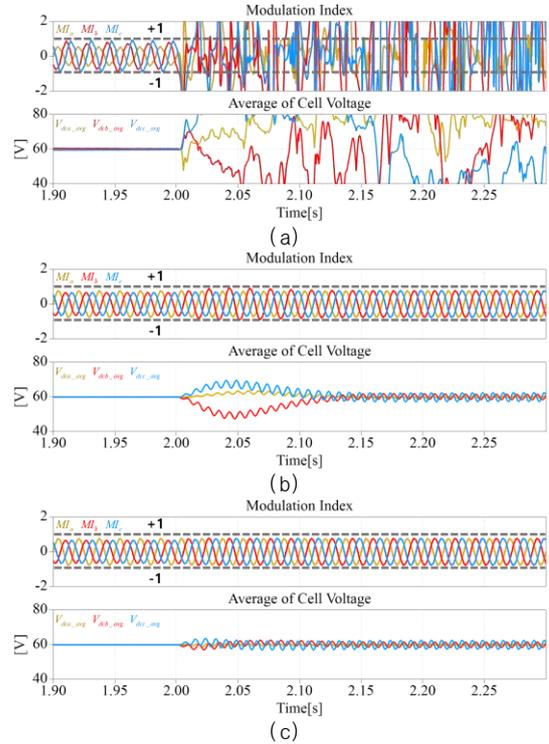


Fig.4 Simulation results; modulation index and average of cell voltage. (a) Conventional method. (b) Proposed method without feedforward. (c) Proposed method with feedforward.

4. 결론

본 논문에서는 지그재그 변압기를 적용한 스타 결선 CHB기반 STATCOM의 구조를 통해 역상분 전류의 보상 능력을 향상시켰다. 수학적 분석을 통해 기존 스타 결선 CHB 컨버터와 비교하여 역상분 전류 보상에 있어 뚜렷한 성능 향상을 보였다. 수학적 분석에 사용한 유효 전력을 활용한 전향보상 기법의 적용은 과도상태의 안정성과 응답 속도를 개선하여, 계통의 신뢰성을 강화하고 고장에 대한 빠른 대응을 가능하게 하였다. 제안하는 클러스터 에너지 균형 제어와 전향보상의 유효성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(20210501010020)

참고 문헌

- [1] Y. Shi, B. Liu, Y. Shi, and S. Duan, "Individual phase current control based on optimal zero-sequence current separation for a star-connected cascade STATCOM under unbalanced conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 3, pp. 2099–2110, Mar. 2016.
- [2] J. I. Y. Ota, Y. Shibano, N. Niimura, and H. Akagi, "A Phase-shifted-PWM D-STATCOM using a modular multilevel cascade converter (SSBC)—Part I: Modeling, analysis, and design of current control," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, pp. 279–288, Jan./Feb. 2015.