# 지그재그 변압기를 이용한 스타 결선 멀티레벨 전력변환시스템의 레그 에너지 균형 제어

김영웅\*, 최성휘\*\*, 정재정\* 경북대학교\*, 서울대학교\*\*

## Balancing control of leg energy in star-connected multilevel power conversion system using zigzag transformer

Yeongung Kim<sup>\*</sup>, Shenghui Cui<sup>\*\*</sup>, Jae-Jung Jung<sup>\*</sup> Kyungpook National University<sup>\*\*</sup>, Seoul National University<sup>\*\*</sup>

#### ABSTRACT

Cascaded H-Bridge (CHB)로 구성된 Static Synchronous Compensator (STATCOM)은 독립적인 직류단을 가지는 서브모듈이 직렬로 연결된 구조로 되어 있어 필연적으로 레그 에너지 불균형이 발생한다. 스타 결선 CHB 컨버터는 영상분 전압을 레그 에너지 균형 제어를 위한 제어 요소로 이용할 수 있지만 컨버터 설계 시 영상분 전압 여유를 고려하여야 한다. 하지만 지그재그 변압기를 통해 영상분 전류 경로를 생성하고 적절한 제어 방식을 통해 영상분 전류를 레그 에너지 균형 제어 요소로 사용함으로써 동일 출력전압 대비 서브모듈 셀 개수를 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 스타 결선 멀티레벨 전력변환시스템에 지그재그 변압기를 이용하여 영상분 전류 주입을 통한 레그 에너지 균형 제어 기법을 제안한다. 다양한 계통, 부하 불평형 상황에서 주입된 영상분 전압의 저감을 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.

### 1. 서 론

Static Synchronous Compensator (STATCOM)은 Flexible AC Transmission System (FACTS) 설비 중 하나로 전력 반도체 소자를 이용하여 전력 흐름을 능동적으로 제어할 수 있다. 유도성 또는 용량성 무효 공급하고 전력 품질과 송전 전력을 빠른 시간에 시스템의 안정성을 보장하고 효율을 개선한다. Cascaded H-Bridge (CHB) 컨버터는 H-bridge 컨버터와 커패시터로 구성된 서브모듈들이 직렬로 연결된 형태의 멀티레벨 전력변환시스템이다. 구조적 특성에 의해 출력 전압 레벨 확장이 용이하고 낮은 전고조파왜율을 가진다. CHB 컨버터는 출력전압합성 과정에서 순시적으로 각 서브모듈 커패시터의 전압이 변하기 때문에 신뢰성과 우수한 운전 성능을 확보하기 위해서는 각 레그 간의 에너지 균형 제어와 서브모듈 전압 균형 제어가 필수적이다. 각 레그 간의 에너지 균형 제어를 위해 델타 결선 CHB 컨버터는 영상분 전류가 이용되고 이로 인해 전류 여유를 확보해야 한다<sup>[1]</sup>. 스타 결선 CHB 컨버터는 영상분 전류 경로가 없기 때문에 레그 에너지 균형 제어에 영상분 전압이 이용되므로 전압 여유를 확보해야 한다<sup>[2]</sup>. 하지만 지그재그 변압기의 특성을 이용하여 스타 결선 CHB 컨버터에 영상분 전류 경로를 제공하면 영상분 전류를 이용한 레그 에너지 균형

제어가 가능하다. 본 논문에서는 지그재그 변압기의 특성을 이용하여 스타 결선 CHB 컨버터의 영상분 전류 경로를 생성하고 영상분 전류 주입을 통한 레그 에너지 균형 제어 기법을 제안한다. 제안하는 제어 기법의 타당성을 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.



그림 1. 와이-지그재그 변압기를 이용한 스타 결선 CHB 컨버터 STATCOM 시스템

#### 2. 제안하는 레그 에너지 균형 제어 기법

#### 2.1 지그재그 변압기 특성을 이용한 영상분 전류 제어

전력 계통 접속을 위한 변압기로 그림 1과 같이 지그재그 변압기를 이용하였다. 지그재그 변압기는 정상분과 역상분 임피던스가 커서 변압기에서 소비되는 무효 전력이 적고 영상분 전류에 의해 발생되는 기자력이 구조적인 특성으로 상쇄되어 낮은 영상분 임피던스를 제공한다<sup>[3]</sup>. 따라서 지그재그 변압기로 스타 결선 CHB 컨버터의 영상분 전류 경로 제공할 경우, 영상분 전류를 균형 제어 요소로 이용할 수 있으며, 그로 인해 발생되는 영상분 전압도 감소시킬 수 있다.

#### 2.2 주입되는 영상분 전류 분석

지그재그 변압기가 결합된 스타 결선 CHB 컨버터의 레그 전압은 정상분과 역상분 성분을 가지고 레그 전류는 정상분과 역상분 이외에 영상분 성분을 가지며 식 (1)과 (2)으로 표현된다. 여기서 영상분 전류는 레그 에너지 균형 제어를 위하여 주입되는 성분이다.

$$v_{Ca} = -V_m^+ \sin(\omega t) - V_m^- \sin(\omega t + \theta_v^-)$$

$$v_{Cb} = -V_m^+ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - V_m^- \sin(\omega t + \theta_v^- + \frac{2\pi}{3})$$

$$v_{Cc} = -V_m^+ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - V_m^- \sin(\omega t + \theta_v^- - \frac{2\pi}{3})$$

$$= -U_m^+ \sin(\omega t + \theta_v^-) - U_m^- \sin(\omega t + \theta_v^-) - U_m^- \sin(\omega t + \theta_v^-)$$
(1)

$$i_{Ca} = -I_m \sin(\omega t + \theta_i) - I_m \sin(\omega t + \theta_i) - I_{m0} \sin(\omega t + \theta_{i0})$$

$$i_{Cb} = -I_m^+ \sin(\omega t + \theta_i^+ - \frac{2\pi}{3}) - I_m^- \sin(\omega t + \theta_i^- + \frac{2\pi}{3}) - I_{m0} \sin(\omega t + \theta_{i0}) \quad (2)$$

$$i_{Cc} = -I_m^+ \sin(\omega t + \theta_i^+ + \frac{2\pi}{3}) - I_m^- \sin(\omega t + \theta_i^- - \frac{2\pi}{3}) - I_{m0} \sin(\omega t + \theta_{i0})$$

V<sup>+</sup>, V<sup>-</sup><sub>m</sub>는 정사분과 역상분 전압의 크기를 나타내고  $I_m^+, I_m^-, I_{m0}$ 는 각각 정상분, 역상분과 영상분 전류를 나 타낸다.  $\theta_{v}$ ,  $\theta_{i}^{+}$ ,  $\theta_{i}$ ,  $\theta_{i0}$ 는 각각 역상분 전압, 정상분 전 류, 역상분 전류와 영상분 전류의 위상이다. 기존의 스타 결선과 지그재그 변압기가 결합한 스타 결선 CHB 컨버 터에서 레그 에너지 불균형을 야기하는 평균 유효전력 (Punbalance)은 동일하며 다음과 같이 계산된다.

$$P_{unbalance} = (V^+ + V^-) \cdot (I^+ + I^-) = V^+ \cdot I^- + V^- \cdot I^+$$
(3)

V<sup>+</sup>, V<sup>−</sup>, I<sup>+</sup>, I<sup>+</sup>는 각각 정상분 전압, 역상분 전압, 정 상분 전류와 역상분 전류의 페이저식이다. 레그 에너지 불균형을 해소하기 위해 주입하는 영상분 전류는 다음과 같다.

$$I_0 \cdot (V^+ + V^-) = -P_{unbalance} \tag{4}$$

a= ))/

Io는 영상분 전류의 페이저식을 나타낸다. 영상분 전 류와 각 상의 레그 출력 전압이 만드는 평균 유효 전력 을 계산하면 식 (5)와 같다.

$$\left\langle -I_{m0}\sin\left(\omega t + \theta_{i0}\right) \left\{ -V_m^+ \sin\left(\omega t\right) - V_m^- \sin\left(\omega t + \theta_v^-\right) \right\} \right\rangle_{avg}$$

$$= \frac{1}{2} V_m^+ I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0}\right) + \frac{1}{2} V_m^+ I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0} + \theta_v^-\right)$$

$$\left\langle -I_{m0}\sin\left(\omega t + \theta_{i0}\right) \left\{ -V_m^+ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - V_m^- \sin\left(\omega t + \theta_v^- + \frac{2\pi}{3}\right) \right\} \right\rangle_{avg}$$

$$= \frac{1}{2} V_m^+ I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0} - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} V_m^+ I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0} + \theta_v^- + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\left\langle -I_{m0}\sin\left(\omega t + \theta_{i0}\right) \left\{ -V_m^+ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - V_m^- \sin\left(\omega t + \theta_v^- - \frac{2\pi}{3}\right) \right\} \right\rangle_{avg}$$

$$= \frac{1}{2} V_m^+ I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0} + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} V_m^+ I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0} + \theta_v^- - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\left\langle -U_m \sin\left(\omega t + \theta_{i0}\right) \left\{ -V_m^+ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - V_m^- \sin\left(\omega t + \theta_v^- - \frac{2\pi}{3}\right) \right\} \right\rangle_{avg}$$

각 상의 전력 식 $(P_a^{\Sigma}, P_b^{\Sigma}, P_c^{\Sigma})$ 으로 나타내면 다음식 (6)과 같다.

$$P_{a}^{\Sigma} = \frac{1}{2} V_{m}^{+} I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0}\right) + \frac{1}{2} V_{m}^{+} I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0} + \theta_{v}^{-}\right)$$

$$P_{b}^{\Sigma} = \frac{1}{2} V_{m}^{+} I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0} - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} V_{m}^{+} I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0} + \theta_{v}^{-} + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6)$$

$$P_{c}^{\Sigma} = \frac{1}{2} V_{m}^{+} I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0} + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} V_{m}^{+} I_{m0} \cos\left(-\theta_{i0} + \theta_{v}^{-} - \frac{2\pi}{3}\right)$$

제어 간단화를 위해 정지좌표계 $(P_{\alpha}^{\Sigma}, P_{\beta}^{\Sigma})$ 로 다시 나타 낸다.

$$P_{\alpha}^{\Sigma} = \frac{dE_{\alpha}^{\Sigma}}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\frac{2}{3}E_{a}^{\Sigma} - \frac{1}{3}E_{b}^{\Sigma} - \frac{1}{3}E_{c}^{\Sigma}\right)$$

$$= \frac{2}{3}P_{a}^{\Sigma} - \frac{1}{3}P_{b}^{\Sigma} - \frac{1}{3}P_{c}^{\Sigma}$$

$$= \frac{1}{2}V_{m}^{+}I_{m0}\cos(-\theta_{i0}) + \frac{1}{2}V_{m}^{-}I_{m0}\cos(-\theta_{i0} + \theta_{v}^{-})$$

$$= \frac{1}{2}\left(V_{mqe}^{+}I_{m0qe} + V_{mqe}^{-}I_{m0qe} - V_{mde}^{-}I_{m0de}\right)$$

$$P_{\beta}^{\Sigma} = \frac{dE_{\beta}^{\Sigma}}{dt} = \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}E_{b}^{\Sigma} - \frac{1}{\sqrt{3}}E_{c}^{\Sigma}\right)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}}P_{b}^{\Sigma} - \frac{1}{\sqrt{3}}P_{c}^{\Sigma}$$

$$= \frac{1}{2}V_{m}^{+}I_{m0}\sin(-\theta_{i0}) + \frac{1}{2}V_{m}^{-}I_{m0}\sin(-\theta_{i0} + \theta_{v}^{-})$$

$$= \frac{1}{2}\left(V_{mqe}^{+}I_{m0de} - V_{mqe}^{-}I_{m0de} - V_{mde}^{-}I_{m0qe}\right)$$
(7)

영상분 전류가 만드는 레그 전력의 정지좌표계 식은 레그 전압의 동기좌표계 값(V<sup>+</sup><sub>mdge</sub>, V<sup>-</sup><sub>mdge</sub>)과 레그 영상분 전류의 동기좌표계 값(Imodge)으로 변환한다. 영상분 전 류의 값은 단상이므로 그 자체로는 좌표변환을 적용할 수 없지만 기준 좌표계의 위상과 일치시켜, 가상의 2상 변수를 동기좌표계로 변화하여 등가 직류 제어의 문제로 치환하여 해결한다. 식 (7)을 행렬 형태로 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} P_{\alpha}^{\Sigma} \\ P_{\beta}^{\Sigma} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -V_{mde}^{-} & V_{mde}^{+} + V_{mqe}^{-} \\ V_{mqe}^{+} - V_{mqe}^{-} & -V_{mde}^{-} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{m0d} \\ I_{m0q} \end{bmatrix}$$
(8)

식 (8)에서 레그 전압의 동기좌표계 값으로 구성된 행 렬의 역행렬을 각 항에 곱하면 영상분 전류를 구할 수 있으며 식 (9)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} I_{m0d} \\ I_{m0q} \end{bmatrix} = \frac{2}{D} \begin{bmatrix} -V_{mde}^{-} & -V_{mde}^{+} - V_{mqe}^{-} \\ -V_{mqe}^{+} + V_{mqe}^{-} & -V_{mde}^{-} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\alpha}^{\Sigma} \\ P_{\beta}^{\Sigma} \end{bmatrix}$$
(9)

행렬식(*D*)은 식 (10)과 같다.

$$D = \left(V_{mde}^{-}\right)^{2} + \left(V_{mqe}^{-}\right)^{2} - \left(V_{mqe}^{+}\right)^{2}$$
(10)

식 (9)를 이용하여 영상분 전류의 순시 값을 구하면 식 (11)과 같다.

$$i_0 = -I_{m0}\sin(\omega t + \theta_{i0}) = -I_{m0qe}\sin\omega t + I_{m0de}\cos\omega t \quad (11)$$

영상분 전류 주입에 따라 각 레그 간의 에너지를 제어 할 수 있음을 확인하였다.

#### 2.3 레그 에너지 균형 제어 알고리즘

제안하는 회로의 제어 구성으로는 스타 결선 CHB 컨버터의 전체 에너지 제어, 전류 제어, 레그 균형 제어, 전압 변조 4가지로 구성된다. 그림 2는 제어 블록도를 나타낸다.



식 (6)~(11)을 적용한 레그 에너지 균형 제어 알고리즘은 그림 3과 4와 같이 나타낼 수 있다.



그림 3. 평균 레그 에너지 제어 블록도

그림 3은 각 레그의 평균 에너지를 구하는 블록도를 나타낸다. 기본파의 2고조파 성분이 나타나므로 2고조파 노치 필터를 통해 제거한 후 직류성분만을 제어한다.



그림 4. 각 레그의 평균 유효전력과 레그 에너지 균형 제어를 위해 주입되는 영상분 전류 제어 블록도

각 레그 에너지와 평균 레그 에너지의 오차를 0으로 만드는 평균 유효전력을 PI 제어기를 통해 산출한다. 그리고, 좌표 변환을 통해 주입되는 영상분 전류를 계산하고 이를 비례 공진 제어기의 지령으로 이용하여 레그 에너지 균형 제어를 위한 오프셋 전압을 출력한다.

#### 3. 시뮬레이션 결과

영상분 전류를 이용한 레그 에너지 균형 제어를 검증하기 위해서 50MVA의 컨버터를 모의하는 PLECS 시뮬레이션을 진행하였다. 정상적으로 컨버터 동작을 하다가 1초에 c상 저항을 2배 증가시켜 부하 불평형을 발생시켰다. 그림 5는 기존의 스타 결선 CHB 컨버터의 각 레그 커패시터 전압의 합과 주입하는 영상분 전압을 나타낸다. 그림 6는 제안하는 스타 결선 CHB 컨버터의 각 레그 커패시터 전압의 합과 주입하는 영상분 전압과 전류를 나타낸다. 제안하는 컨버터가 기존 컨버터보다 작은 영상분 전압으로 레그 에너지 균형 제어됨을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 STATCOM 토폴로지 중 하나인 스타 결선 CHB 컨버터의 레그 에너지 균형 제어를 위해 지그재그 변압기를 사용한 균형 제어를 제안하였다. 수식을 통해 지그재그 변압기를 통해 흐르는 영상분 전류를 분석하였다. 50MVA의 스타 결선 CHB 컨버터 시뮬레이션을 통해 영상분 전류로 각 레그 간 에너지 균형 제어가 가능함을 검증하였다. 동일한 컨버터에 지그재그 변압기와 제안된 균형 제어를 적용했을 경우 주입되는 영상분 전압이 감소하여 전압 여유를 보다 더 확보가 가능하다.







This work was conducted under the framework of the research and development program of the Korea Institute of Energy Research (C3-2471).

## 참 고 문 헌

- [1] J. –J. Jung, J. –H. Lee, S. –K. Sul, G. T. Son and Y. –H. Chung, "DC Capacitor Voltage Balancing Control for Delta–Connected Cascaded H–Bridge STATCOM Considering Unbalanced Grid and Load Conditions," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 6, pp. 4726–4735, June 2018.
- [2] J. -M. Kim, G. -S. Song and J. -J. Jung, "Zero-Sequence Voltage Injection Method for DC Capacitor Voltage Balancing of Wye-Connected CHB Converter under Unbalanced Grid and Load Conditions," in Energies, 14, no. 4, 2021.
- [3] S. Cui, J. -H. Lee, J. Hu, R. W. De Doncker and S. -K. Sul, "A Modular Multilevel Converter with a Zigzag Transformer for Bipolar MVDC Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 2, pp. 1038-1043, Feb. 2019.