

# Y 결선 CHB 컨버터 에너지 균형 제어 동특성 향상을 위한 주입 영상분 분석

김재명, 김예린, 김흥근, 정재정  
경북대학교

## Analysis of the Injected Zero-Sequence Voltage for Improving Dynamics of Energy Balancing Control with Wye-Connected CHB Converter

Jae-Myeong Kim, Ye-Rin Kim, Heung-Geun Kim, Jae-Jung Jung  
Kyungpook National University

### ABSTRACT

Static synchronous compensator (STATCOM)은 무효 전력을 공급하여 외란을 완화하는 등 전력 품질을 향상시켜 전력 계통을 안정화하는 시스템이다. Cascaded H-bridge (CHB) 컨버터는 멀티레벨 구조를 가지므로 STATCOM 시스템 적용에 많은 이점이 있다. 하지만, 이러한 멀티레벨 CHB 컨버터의 안정적인 동작을 위해서는 균형 제어가 필수적이다. 본 논문에서는 Y 결선 CHB 컨버터의 레그 에너지 균형 제어에 사용되는 주입 영상분 전압에 대하여 분석하고 균형 제어의 동특성 향상을 위한 전항 보상 계산 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 적용하여 부하 불평형뿐만 아니라 계통 사고로 인한 계통 및 부하 동시 불균형에서도 안정적으로 시스템을 동작할 수 있다. 마지막으로 제안한 방법에 대한 수학적 타당성을 제시하고, 50MVA의 실제 스케일의 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법을 검증하였다.

### 1. 서론

대규모 분산 전원 및 부하의 증가 등으로 인한 전력 계통의 대용량화는 전력 품질의 향상과 안정적인 전력 공급을 위한 기술을 필요로 한다. 이에 따라 많은 시스템과 기술이 개발되었고 static synchronous compensator (STATCOM)은 대표적인 기술 중 하나이다. STATCOM은 무효 전력을 공급하여 전력 품질을 향상시키며, 외란을 보상하고 복잡한 전력 계통을 안정화하는 시스템이다. STATCOM의 토폴로지 중 cascaded H-bridge (CHB) 컨버터는 기존의 2레벨 전압형 컨버터를 대체하기에 적합한 많은 장점이 있다. 그림 1과 같이 CHB 컨버터는 각 상에 수 많은 서브모듈이 직렬 연결된 레그와 하나의 인덕터로 구성되어 있다. 각 서브모듈은 H-bridge 컨버터와 개별 커패시터가 연결된 구조를 갖는다. 이러한 구조적 특성에 의해 출력 전압의 레벨을 높이기 용이하고 출력 전압이 낮은 고조파 함유율을 가지는 등 다양한 이점을 가진다<sup>[1]</sup>. CHB 컨버터의 수 많은 서브모듈 커패시터 전압은 일정하지 않고 순서적으로 변화하기 때문에 시스템의 안정적인 동작을 위해서는 서브모듈 커패시터 전압 균형 제어가 필수적이다. 일반적으로 델타 결선의 CHB 컨버터에서는 영상분 순환 전류를 통해서 레그 에너지 균형을 제어한다. 하지만 Y 결선 CHB 컨버터는 영상분 순환 전류가 흐를 수 없기 때문에 주입 가능한 영상분 전압을

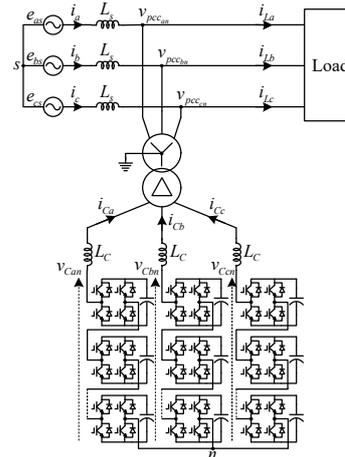


그림 1. Y 결선 CHB 컨버터 STATCOM 시스템

이용하여 레그 에너지 균형을 제어할 수 있다. 본 논문에서는 레그 에너지 균형 제어를 위한 영상분 전압을 분석하고 균형 제어의 동특성 향상을 위한 전항 보상 방법을 제안하였다. 마지막으로 제안한 방법에 대한 수학적 타당성을 제시하고, 50MVA의 실제 스케일의 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 2. 영상분 전압 분석 및 전항 보상 계산 방법

Y 결선 CHB 컨버터의 레그 전압과 전류는 정상분과 역상분 성분을 포함하고 레그 전압은 영상분 전압 또한 포함하고 있다. 그림 2(a)는 3상 레그 전압 벡터( $\vec{V}_{Ca}^o, \vec{V}_{Cb}^o, \vec{V}_{Cc}^o$ )와 전류 벡터( $\vec{I}_{Ca}, \vec{I}_{Cb}, \vec{I}_{Cc}$ )를 나타내고 있으며, 레그 전압 벡터는 오직 정상분과 역상분 전압만이 포함되어 있다. 이 때, 레그 전압 벡터를 레그 전류 벡터에 수직으로 투영한 벡터( $\vec{V}_{Ca,Act}^o, \vec{V}_{Cb,Act}^o, \vec{V}_{Cc,Act}^o$ )는 유효 전력을 발생하는 성분이다. 그림 2(a)에서 보이듯이, 불균형 계통이나 부하 상황에서 3상의 유효 전력의 크기는 다르다. 이러한 3상 간의 평균 유효 전력의 차이는 시스템의 불균형을 유발하고, 정상적인 동작을 방해한다. 따라서, 각 상에 인가되는 평균 유효 전력의 차이를 제거하는 것은 매우 중요하다. 따라서, 영상분 전압을 주입하여 3상 레그 간의 에너지 불균형을 해소할 수 있다. 그림 2(b)와 같이 3상 간의 에너지 불균형을 야기하는 3상 벡터는 삼각형을 만들 수 있다. 외심( $\vec{V}_{circumcenter}$ )은 삼각형의 세 변의 수직이등분선이 만나는 점이며 각 꼭지점에서 거리가 같고 삼각형의 외접원의 중심이다<sup>[2]</sup>. 이 때, 3상 레그 간의 에너지 불균형을 제거하는 영상분 전압

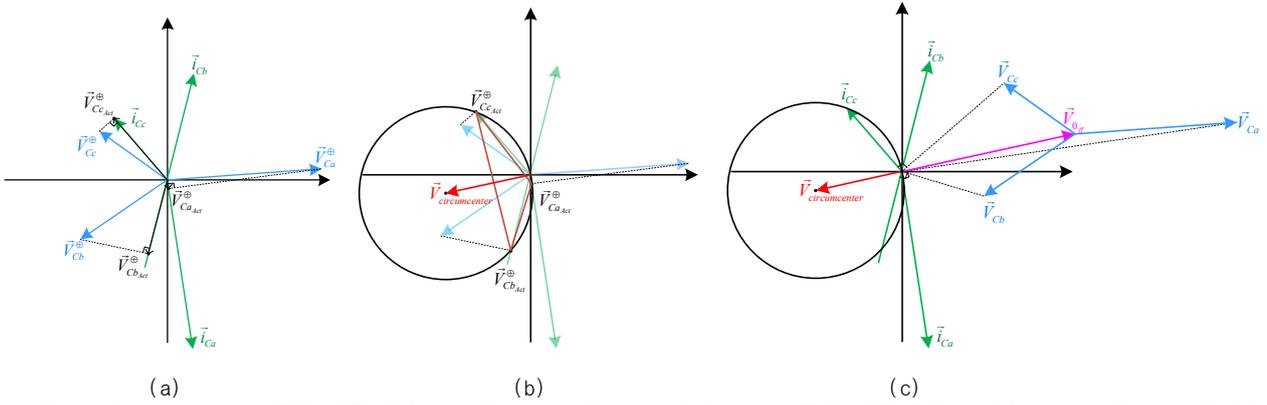


그림 2. 페이지도: (a) 불균형 평균 유효 전력을 발생시키는 3상 벡터, (b) 불균형 평균 유효 전력을 발생시키는 3상 벡터의 외심, (c) 외심으로 계산한 전항 보상 성분

벡터( $\vec{V}_{0,off}$ )는 (1)과 같이 외심 벡터와 방향은 반대로 크기는 2배인 벡터로 계산된다. 그림 2(c)에서 보이듯이, 영상분 전압 벡터를 포함한 3상 레그 전압에서 레그 전류로 수직으로 투영한 벡터는 모두 0이 되어 3상 간의 에너지 불평형 성분이 제거된다. 따라서  $\vec{V}_{0,off}$ 는 전항 보상 성분으로 사용 가능하다.

$$\vec{V}_{0,off} = -2\vec{V}_{circumcenter} \quad (1)$$

### 3. 시뮬레이션 결과

앞의 영상분 전압 분석 및 전항 보상 계산 방법을 검증하기 위해서 50MVA의 실제 스케일의 PSIM 시뮬레이션을 진행하였다. 초기에 평형 부하에서 동작을 하다가 1.2초에 c상 인덕터를 2배로 증가시켜 부하 불평형을 모의하였다. 그림 3(a)는 레그 에너지 균형 제어에서 전항 보상 포함하지 않았을 경우의 영상분 전압과 전항 보상 계산 값을 나타낸다. 정상 상태에서 피드백 제어를 통한 영상분 전압과 앞에서 제안한 방식으로 계산된 전항 보상 값이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 전항 보상을 포함하지 않은 경우의 3상 레그 커패시터의 합을 나타내고 그림 3(c)는 전항 보상을 포함한 경우의 3상 레그 커패시터의 합을 나타낸다. 부하 불균형이 발생하여 레그 에너지가 과도 상태가 일 때, 전항 보상을 포함하는 경우가 포함하지 않는 경우 보다 적은 레그 커패시터 전압의 합을 가지는 것을 알 수 있다. 또한, 전항 보상을 포함하는 경우에 정상 상태에 도달하는 시간이 더욱 빠르므로, 균형 제어의 동특성이 향상되었다는 것을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 전력 계통의 안정화와 전력 품질의 향상을 위해 사용되는 STATCOM의 토폴로지 중 하나인 Y 결선 CHB 컨버터의 레그 에너지 균형을 위한 영상분 전압을 분석하였다. 페이지도와 벡터 분석을 통해 영상분 전압의 전항 보상 방법을 도출하였다. 50MVA의 실제 스케일의 시뮬레이션을 통해, 제안한 전항 보상 계산이 피드백 제어를 통한 영상분 전압과 일치함을 검증하였고, 제안된 전항 보상을 균형제어에 적용했을 경우, 레그 에너지 균형 제어의 동특성이 향상됨을 확인하였다.

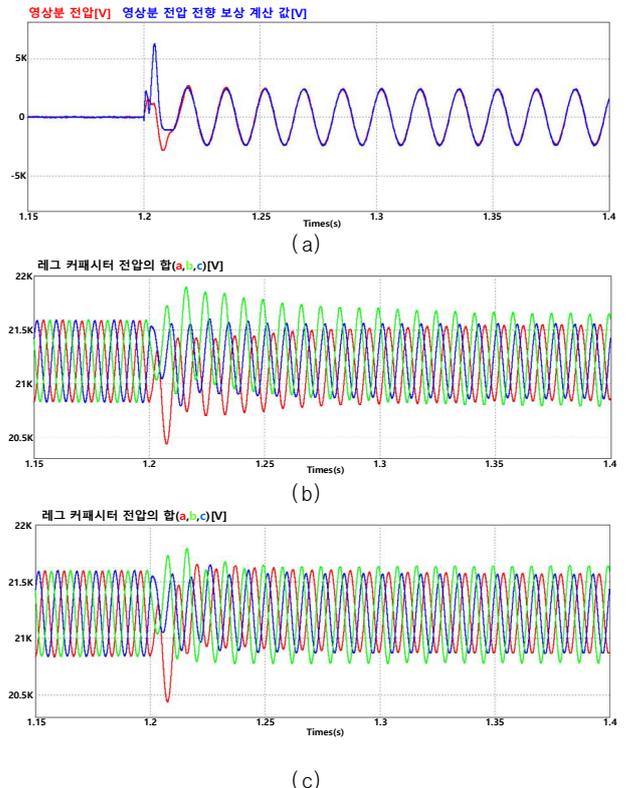


그림 3. 시뮬레이션 결과: (a)전항 보상을 포함하지 않은 경우의 영상분 전압과 제안된 방식으로 계산된 전항 보상 값, (b)전항 보상을 포함하지 않은 경우의 레그 커패시터 전압의 합, (c)전항 보상을 포함한 레그 커패시터 전압의 합

### 참고 문헌

[1] F.Z Peng, J. -S. Lai, J. W. McKeever, and J. VanCoevering, "A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static Var Generation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 32, no. 5, pp. 1130-1138, Sep./Oct. 1996.

[2] J. -J. Jung, J. -H. Lee, S. -K. Sul, G. T. Son, Y. -H. Chung, "DC capacitor voltage balancing control for delta-connected cascaded H-bridge STATCOM considering unbalanced grid and load conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 33, no. 6, pp. 4726-4735, Jun. 2018.