반복제어기를 활용한 CHB-STATCOM의 고조파 전류 보상

이준희*, 정재정*, 설승기*, 손금태**, 정용호**
*서울대학교 공과대학 전기정보공학부, **LS 산전㈜

Harmonic Current Compensation of CHB-STATCOM based on Repetitive Controller

Joon-Hee Lee*, Jae-Jung Jung*, and Seung-Ki Sul*, Gum Tae Son** and Yong-Ho Chung**
*Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University
**LS Industrial System Co.,Ltd

ABSTRACT

STATCOM은 전력 계통에 병렬로 연결되어 역률 보상, 전압 보상 그리고 비선형 부하에 의해 야기되는 불필요한 고조파 전류를 보상하는 기능을 한다. 고조파 전류의 경우 대개 전원 주파수의 배수 형태로 발생하며, 이를 보상하기 위해 활용될 수 있는 다양한 제어기 중 하나로써 반복 제어기를 적용하였다. 공진 제어기의 무한한 합과 등가인 반복제어기의 경우, 모든 배수 고조파에 대한 제어가 가능하기 때문에 다양한 부하에 의한 예측 불가능한 고조파 전류를 보상해야 하는 STATCOM 제어에 적합하다. 본 논문에서는 반복제어기를 적용한 고조파 전류 제어기를 소개하고, 그 성능을 15kVA 축소 모델 실험으로 검증한다.

1. 서 론

STATCOM은 전력 계통에 병렬로 연결되어 무효 전력 제어, 역률 제어, 모선 전압 제어, 불평형 제어 등의 기능을 하는 정지형 병렬 보상 장치를 일컫는다. 특히, 무효 전력을 계통에 공급함으로써, 전력 계통의 전압 안정성을 향상 시키는데 기여한다. 하지만 점차 전력전자 기술 기반의 장비들을 포함한 비선형 부하들이 전력 계통에 연결됨에 따라 고조파 전류 및 전압의 크기들이 증가하게 되었고, 계통 품질 유지를 위해 설립된 고조파 규정을 위반할 수 있는 가능성이 증가하고 있다.[1] 이러한 다양한 부하, 특히 비선형 부하에 의해 야기되는 고조파 전류의 보상은 STATCOM이 필수적으로 가져야 될 기능 중 하나이다.

비선형 부하에 의해 발생되는 고조파 전류의 경우 대개 전원 주파수의 배수, 즉 5, 7, 11, 13배 등의 주파수를 가지는 형태로 발생하게 된다. 따라서 기존의 PI 제어기로는 달성하기 어려운 높은 주파수 대역의 제어 성능을 필요로 하며, 이를 위해 활용될 수 있는 제어기로써 공진 제어기와 반복 제어기가 있다. 공진제어기의 경우 이론적으로, 미리 설정된 주파수에서 무한대의 이득을 가지지만, 설정된 주파수만을 제어할 수 있다는 점에서 예상하지 못한 고조파에 대해 유효하지 못하다. 이에 반해 반복제어기의 경우 전원 주파수의 모든 배수의 주파수에 대한 공진 제어기의 무한한 합과 등가이기 때문에, 전원 주파수의 모든 배수 고조파에 대한 제어가 가능하다.[2] 이는 예측 불가능한 고조파 전류를 보상해야 하는 STATCOM에 적합하며, 이러한 성능은 본 논문의 실험을 통해서 검증되었다.

2. STATCOM 전류 제어기 설계[3]

그림 2.1과 같이 지연함수를 통해 구현할 수 반복 제어기의 경우, 식 (1)처럼 수학적으로 공진 제어기의 무한한 합과 등가적이다. 즉, 단순히 하나의 제어기만으로 모든 배수 고조파들에 대한 제어가 가능하다. 또한, 지연 함수의 경우 디지털 시스템에서 구현하기가 매우 쉽기 때문에, 무한히 병렬로 연결되는 공진제어기를 각각 설계하는 것에 비해 구현상의 이점을 가진다.

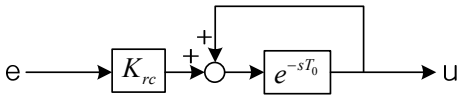

그림 2.1 반복제어기의 기본적인 제어 블록도

$$G_{RC}(s)=\frac{U(s)}{E(s)}=\frac{K_{rc}e^{-sT_0}}{1-e^{-sT_0}}=-\frac{1}{2}K_{rc}+\frac{K_{rc}}{T_0}\frac{1}{s}+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2\frac{K_{rc}}{T_0}s}{s^2+(k\omega_0)^2} \quad (1)$$

하지만, 이를 실제로 구현하기 위해서는 반복제어기가 모든 배수 고조파에 대해서 무한대의 이득을 가지기 때문에, 주파수가 높아질수록 플랜트의 위상지연으로 인한 불안정 영역이 존재하게 된다. 따라서, 제어하고자 하는 대상 고조파를 고려하여 적절한 차단 주파수로 설정된 저역통과(Low Pass) 필터와 그것의 위상 지연을 보상할 보상기 등이 추가적으로 설계되어야 한다. 이를 고려한 반복제어기와 기본파 전류 제어를 포함하는 전체 전류 제어기의 블록도는 아래의 그림 2.2와 같다.

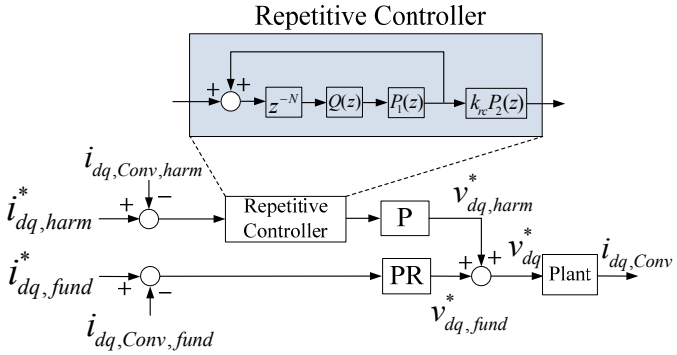

그림 2.2 반복제어기를 포함하는 CHB-STATCOM 전류 제어기

위의 블록도에서 z^{-N}은 위상 지연, $Q(z)$는 반복제어기의 안정도를 위한 저역 통과 필터, k_{rc}는 반복제어기의 자체적인 이득, $P_1(z)$와 $P_2(z)$는 각각 저역 통과 필터와 플랜트의 시지연 보상기를 나타낸다.

기본파 전류 제어의 경우, 60Hz 공진점을 둔 공진 제어기를 통해 제어되며, 반복제어기의 경우 고조파 전류 제어

만을 담당함으로써, 전체 전류 제어에 있어 빠른 응답성을 얻을 수 있다.

3. 실험 결과

반복제어기를 활용한 CHB-STATCOM의 고조파 전류 보상 능력을 알아보기 위해 다음의 실험을 수행하였다. 실험은 $300V_{rms}$ 선간 전압을 가지며 5, 7 고조파가 각각 5%씩 존재하는 전원에 연결된 11.5kVA, 역률 0.128(지상)의 선형 부하(저항과 인덕터)와 이에 병렬로 연결된 2.95kVA의 비선형 부하(3상 다이오드 정류기 부하)를 대상으로 하였다. 부하의 무효 전력만을 보상했을 경우와 이와 동시에 고조파 전류를 보상했을 경우의 결과를 비교하였다.

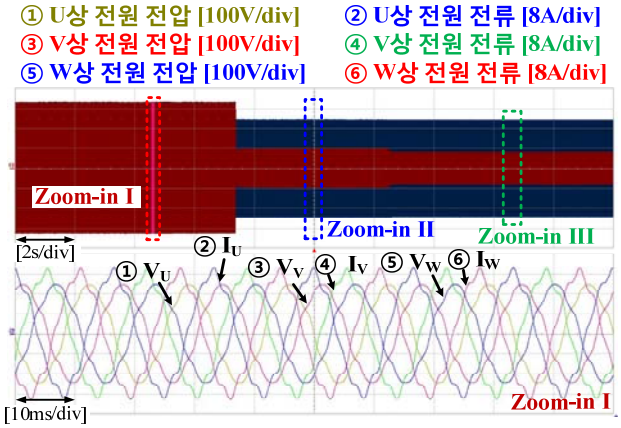

그림 3.1 전체 구간 파형 및 보상 전 전원 전압, 전류 파형

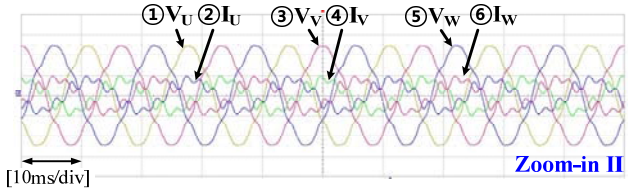

그림 3.2 무효 전력만을 보상 후 전원 전압, 전류 파형

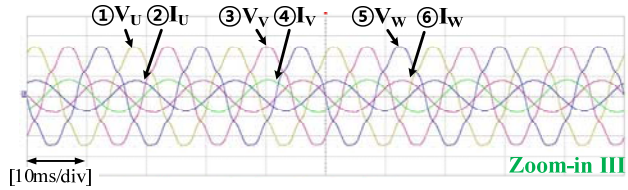

그림 3.3 무효 전력 및 고조파 전류 보상 후 전원 전압, 전류 파형

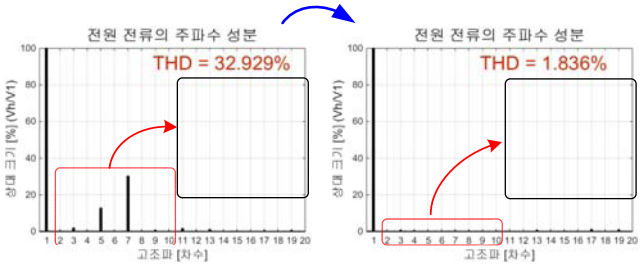

그림 3.4 전원 전류의 주파수 성분 스펙트럼 및 THD
(左 : 그림 3.2의 전류, 友 : 그림 3.3의 전류)

그림 3.1은 보상 전과 후를 나타내는 전체 실험 파형과 부하 전류를 보상하기 전의 전원 전압과 전류의 확대 파형을 나타내고 있다. 전압의 경우 고조파로 인해 왜곡된 형태의 정현파를 보이며 전류 또한 비선형 부하에 의한 왜곡 되었으며, 유도성 부하에 의해 역률이 0.1에 가깝게 매우 낮은 것을 알 수 있다.

그림 3.2는 부하의 무효 전력만을 STATCOM이 보상한 경우의 확대 파형이다. 각 상의 전압과 전류의 기본파 성분이 동일한 위상을 가지며, 전원 쪽에서 바라본 기본파 역률(Displacement Power Factor)이 1로 보상되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 전원 전압 고조파와 비선형 부하에 의해 야기되는 고조파 전류로 인해 전원 전류는 상당히 왜곡되어 있다. 주파수 분석을 통해 본 결과, 그림 3.4와 같이 기본파 대비 5, 7 고조파가 각각 13%, 30% 정도로 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

그림 3.3은 무효전력 보상 뿐만 아니라 고조파 전류 또한 보상한 경우의 확대 파형이다. 전원 전압은 여전히 왜곡된 형태를 보이지만, 전류의 경우 거의 정현파에 가까운 형태를 보이며, 그 주파수 성분 또한 그림 3.4에서 볼 수 있듯이, 고조파가 거의 존재하지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서, STATCOM은 부하의 무효 전류 성분과, 고조파 전류를 보상함으로써 전원 전류의 크기와 왜곡을 감소시킴을 실험으로 확인할 수 있었다. 또한, 고조파 전류 보상을 위해 적용한 반복제어기의 보상 성능과 제어적 타당성을 실험으로 검증하였다.

4. 결론

본 논문에서는 비선형 부하 및 전원의 고조파에 의해 야기 되는 부하 고조파 전류를 보상하기 위해 전원 주파수를 기본파로 하는 반복제어기를 활용하는 고조파 전류 제어기를 설계하였다. STATCOM의 본래 기능인 무효 전력 보상 기능 외에도 부하 전류 고조파 보상 기능을 가짐으로써 다양한 형태의 예측 불가능한 부하에 대해서도 전원 단의 전류를 깨끗한 정현파로 유지할 수 있다. 이를 검증하기 위해 축소 모델 STATCOM과 선형, 비선형 부하들을 이용하여 실험을 수행하였고, 이를 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] 박병주, "전력계통의 고조파 억제 기술", *월간 전기*, pp. 43-53, 2009년 9월

[2] A. Garcia-Cerrada, O. Pinzon-Ardila, V. Feliu-Batlle, P. Roncero-Sanchez, and P.Garcia-Gonzalez, "Application of a repetitive controller for a three-phase active power filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 1, pp. 237-246, Jan. 2007.

[3] Yue Wang, Qunwei Xu, Yaowei Hu, and Guozhu Chen, "Fast-transient repetitive controller based current control strategy for a cascaded DSTATCOM", 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 6704-6709, Sep. 2015