

EMTDC를 이용한 비선형 부하 제어를 위한 배전용 STATCOM 제어

정수영, 문승일, 김태현*, 한병문**

서울대학교 전기컴퓨터공학부 *목포대학교 전기제어공학부 **명지대학교 전기공학과

Control of DSTATCOM for nonlinear load

Soo-Young Jung, Seung-Il Moon, Tae-Hyun Kim*, Byung-Moon Han**
Seoul Nat'l Univ., *Mokpo Nat'l Univ., **Myongji Univ.

Abstract - 본 논문에서는 $\alpha-\beta-0$ 변환 방식을 이용한 제어방식을 모델화 하여 DSTATCOM에 적용하였다. 이러한 변환 방식을 통해서 배전 선로상에 존재하는 역상성분, 영상성분, 고조파 성분 등을 나타낼 수 있으며 이에 대한 적절한 보상신호를 연산과정을 통해 생성해 낼 수 있다. 제안된 제어기의 검증을 위해 EMTDC/PSCAD를 이용한 IEEE 13 버스 배전 계통 모델링 및 유도기 부하 모델링 및 사고 모의 및 보상 시뮬레이션을 실시하였다.

1. 서 론

최근에는 자동화 설비, 빌딩 설비, 가전제품까지도 전력전자 기기들이 많이 사용되고 있다. 그런데 이들 전력전자 기기들은 비선형 특성을 갖고 있어 고조파 전류의 발생원으로 배전계통의 전압과형을 왜곡시켜 변전소의 변압기를 과열시키고 연계된 다른 부하에 악영향을 주며 인접한 통신선로에 자기유도에 의한 장애를 유발시킨다. 또한 저압 선로에서 큰 용량의 단상 부하 사용이 증가하면서 선로의 불평형을 초래하는 등 선로의 전력품질(Power Quality) 저하가 심각하게 대두되고 있다.

전력품질 저하의 개선은 가까운 미래에 실현될 것으로 보이는 전력공급의 다원화에 따른 전력사업의 경쟁체제 하에서 가장 중요한 부분을 차지할 것으로 보이며 전력 공급업자 또한 고품질의 전력을 소비자에게 공급하여야 할 것으로 보인다. 이와 같은 시대의 흐름에 따라 전력품질 개선에 대한 많은 관심과 연구가 진행되고 있다.

전원 전압의 전력 품질 문제에 대한 관심이 높아지면서, 여러 가지 대비책의 하나로써, 배전 계통에 보상 기기를 부착하는 방법이 연구되고 있다. 이러한 보상 기기는 3가지로 구분되며, 병렬 보상 기기인 DSTATCOM(Distribution static synchronous compensator), 직렬 보상 기기인 DVR(Dynamic voltage regulator), 직·병렬 보상 기기인 UPQC (Unified power quality conditioner)로 이러한 배전용 보상 기기에 대해서 CPD(Custom power device)라고 부른다.

그 중 DSTATCOM이 최근에 많이 연구되고 있다. 이러한 DSTATCOM는 기본적으로 전압을 전원 전압에 병렬로 전압을 연결하는 장치로, 빠르게 제어되는 크기와 위상각과 함께 기본 주파수에서 평형 3상 정현파 전압을 발생한다. 다상 회로에서 IGBT를 사용하는 전압원 인버터는 현재 배전 계통에서 가장 실용적으로 사용되고 있다. 이러한 형태의 제어기가 무효 전력에 의한 전압 보상, 비선형 부하의 전원측 파급효과 방지 및 역률 개선, 고조파 보상, 전력 조류제어의 역할한다.

본 논문에서는 이러한 배전 계통에서의 비선형 부하로 인한 계통에 유입되는 전류왜곡 현상 보상 및 1선 지락 사고시 유도기 부하 모델링 및 제어 방법을 제안하고 EMTDC로 확인하였다.

2. 보상 원리

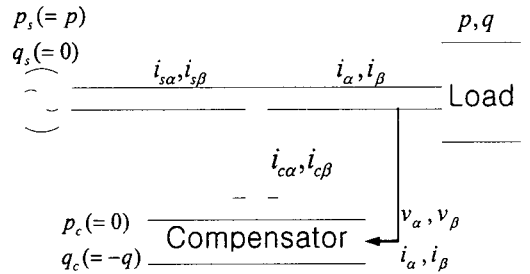


그림 1. DSTATCOM 보상 원리

그림 1은 순시 무효전력 보상 기본원리를 보여준다. 부하 측 순시 가상 전력에 의해서 야기되는 전원측 순시 무효 전력을 제거하기 위해서 순시 무효전력 보상기를 제안한다. 이 보상은 항상 0이므로 에너지 저장 장치 없이 스위칭 소자만으로 구성되어진다.

부하 측 순시 가상 전력에 의해서 야기되는 전원측 순시 무효 전력을 제거하기 위해서 순시 무효전력 보상기를 제안한다.

3. 제어 원리

그림 2는 DSTATCOM에 의해 제어되는 전력계통도를 나타낸다.

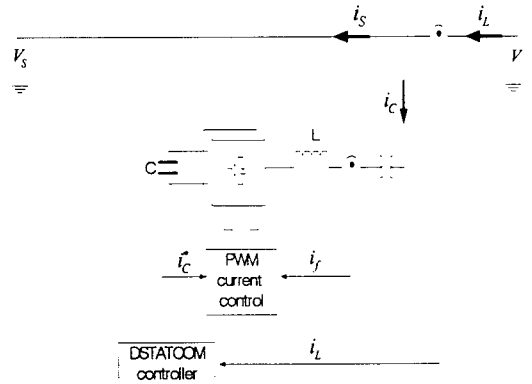


그림 2. DSTATCOM에 의해 제어되는 계통도

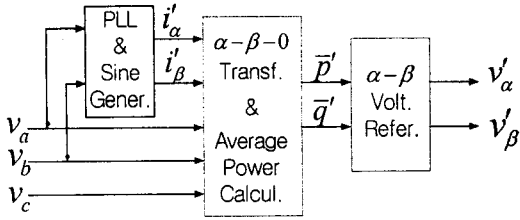


그림 3. 정상 성분 전압 검출기

그림 3은 그림 2의 삼상 전압 V 의 기본 정상 성분 (fundamental positive sequence component)의 순시 값인 v'_α, v'_β 을 얻는 제어블록도이다.

이 방식에서 유효 전력(real power)의 평균값(\bar{p}')과 가상 전력(imaginary)의 평균값(\bar{q}')은 V 의 기본과 정상 성분이다. 그림 3의 정상성분 전압 검출기는 3상 전압의 기본과 정상성분의 순시치 전압을 계산한다. PLL 회로는 외란과 불평형 전압하에서도 동작하도록 설계되어진다. PLL (phase-locked loop)에 의해서 왜란 시스템의 기본주파수 ω_1 추정 및 사인 발진기(sine wave generator)에 의해서 기본과 정상성분 전류(fundamental positive sequence current) i'_α, i'_β 결정된다.

$$\begin{aligned} i'_\alpha &= \sin \omega_1 t \\ i'_\beta &= -\cos \omega_1 t \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{p}' \\ \bar{q}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 식(2)에서 시스템 전압의 기본과 정상성분 유효전력(\bar{p}')와 가상전력(\bar{q}')의 평균값(\bar{p}', \bar{q}')을 결정한다. 보상할 기준 전류는 식(3)과 같다.[1]

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v'_\alpha & v'_\beta \\ -v'_\beta & v'_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\bar{p}' \\ -\bar{q}' \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. 영상성분을 고려한 보상 원리

3상 4선식 배전선로는 영상성분을 고려해야 한다. 영상성분을 고려하면 식(4)와 식(5)로 3상 전압, 전류를 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

순시 전력 p_0 는 다음과 같이 정의하자.

$$p_0 = v_0 \cdot i_0 \quad (6)$$

그렇다면, 식(4),(5)로부터 식(7),(8)을 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

그림 4는 영상분이 고려된 EMTDC 상에서 구현된 DSTATCOM 제어 블록도를 보여준다. 영상 성분의 보상은 영상전류 i_0 에 의해 이루어진다. 전압변동이 발생하지 않는다면 \bar{q}_v 의 계산과정은 생략되어진다. 그러나 DSTATCOM의 손실로 인한 DC전압 변동을 보상하기 위해 p_{loss} 는 항상 연산 된다. 따라서 보상 기준 전류의 연산은 식 (3)에 근거하여 다음과 같이 수정되어진다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\bar{p} + \Delta\bar{p} \\ -\bar{q} + \bar{q}_v \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,

$$\Delta\bar{p} = \bar{p}_0 + \bar{p}_{loss}$$

이다.

5. 시뮬레이션

제한한 제어기술 EMTDC/PSCAD를 이용하여 그림 4에서 보여준 IEEE 13버스에 적용하였다. 150번 버스가 비선형 부하이고 역률 90%, 3MVA 3상 컨버터 부하와 역률 80%, 1MVA 단상 정류기부하를 a, b상 각각에 설치하였고 나머지 3개의 부하는 역률 90%, 3MVA의 일반 부하 및 3상 4선식 다중접지 방식으로 가정하였다. 이때 DSTATCOM의 설치점은 150번스 전단에 설치하였다.

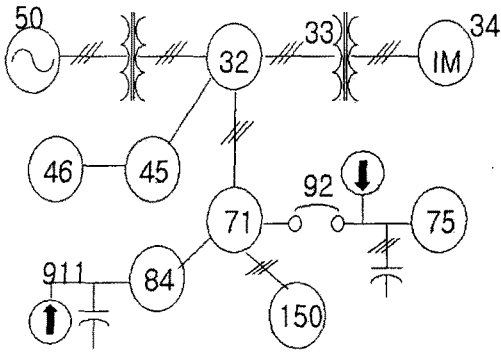


그림 4. IEEE 13버스 방사형 배전 계통

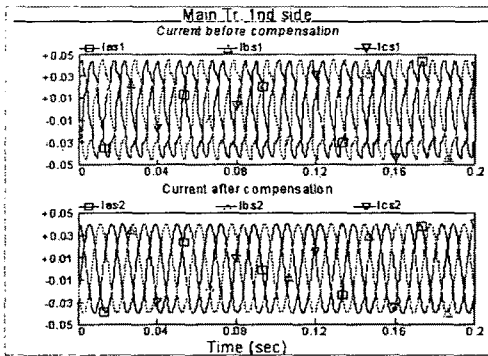


그림 5. 보상전후 주변압기 1차측 유입되는 전류

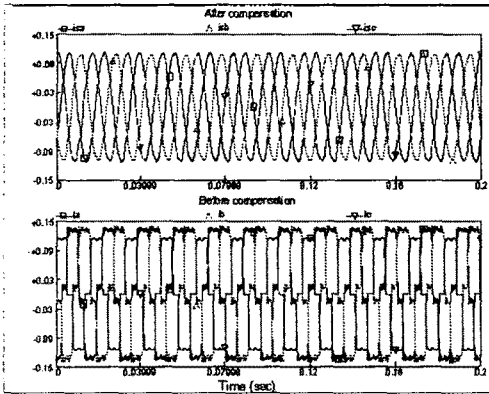


그림 6. 보상전후 비선형부하 앞단의 전류

그림5는 주변압기의 1차측 전류를 나타내고 있다. 보상 전은 비선형 부하로 인한 영향으로 인하여 전원측 전류가 상당히 왜곡됨을 볼 수 있으며 비선형 부하전단에 DSTATCOM 설치 후 파형 개선 효과를 나타내고 있다.

그림 6은 비선형 부하 앞 단의 전류를 나타낸다. 다른 상에 비해 c상 전류가 상대적으로 작은 것으로 나타나 있다. 이는 선로 모형 구성 시 a상과 b상에 단상 다이오드 부하를 설치하였기 때문이다. 비선형 부하전단에 DSTATCOM 설치 후 전류의 고조파 및 불평형 전류가 보상 되었음을 알 수 있다.

자가용 전기 설비의 대표적인 회전기기인 유도전동기는 기동시 2차측을 단락한 변압기와 같으므로 큰 기동전류

(정격전류의 400~600%)가 흘러서 권선을 태워 버릴 우려가 있다. 또한 역률이 매우 낮으므로 기동토크가 비교적 적고 기동에 필요한 피상전력은 크게 된다. 이렇게 되면 전동기가 접속되고 있는 배전 계통에 지장을 주는 일도 생겨서 원만하게 기동을 시키기가 힘들게 되는 일도 있다. 즉, 과도전류가 크고 기동구간동안에 무효 전력이 급변하므로 DSTATCOM의 과도 역률 개선 특성을 확인하였다. 과도 무효전력 보상 효과를 검증하기 위해서 그림 4의 IEEE 13 버스 배전 계통의 34 버스에 위치한 유도기(500hp, 운전중 지상 역률 0.8, 기동용량은 지상 역률0.4에서 정격의 6배로 가정) 앞단에 DSTATCOM 을 적용 해보았다.

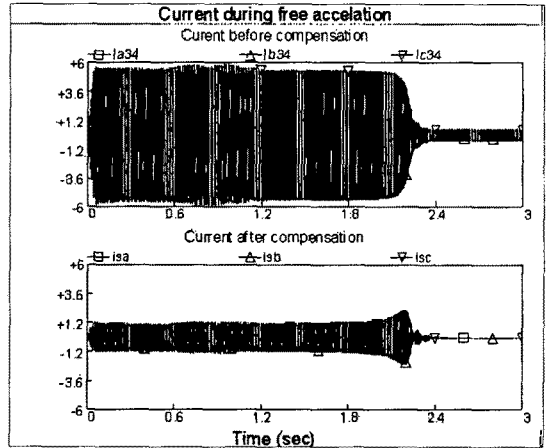


그림 7. 보상전후 기동전류

그림 7에서 순시전력 개념을 도입한 제어기를 이용해 연산된 DSTATCOM의 보상후 무부하시 유도기의 기동 전류는 상당히 감소함을 알 수 있다. 따라서 유도전동기를 주로 사용하는 낮은 지상 역률의 산업용 자가 변전설비의 용량에 맞는 DSTATCOM을 설치하고 적절히 전류제어를 함으로써 불규칙적으로 변하는 수용가의 무효 전력을 보상하여 높은 역률을 유지할 수 있다.

그림 4의 IEEE 13 버스 배전 계통의 주변압기 2차측에 1선 지락 사고로 인한 sag 발생시 34번 버스 유도기 그림 8은 이때 유도기 부하 전단에 전압 파형을 도시하였다.

그림 9는 보상전후의 유도기 전단의 전류 및 보상상시 DSTATCOM의 주입전류를 나타내었다. 이 그림에서 상당 양의 사고 전류가 감소뿐만 아니라 위상 점프도 상당히 감소함을 알 수 있었다.

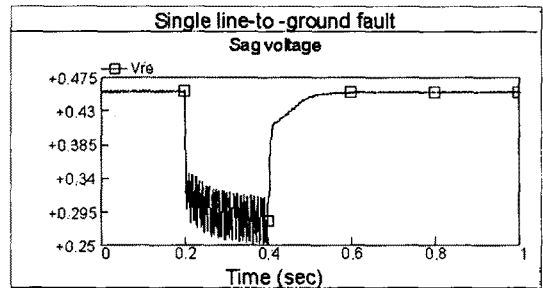


그림8. 주변압기 2차측에서 1선 지락사고시 유도기 앞단 전압

5. 결 론

비선형 부하 전류 보상을 위한 알고리즘을 제시 하였다. $\alpha\beta$ 변환 방식을 이용한 제어 방식을 모델화하고 배전 선로상에 존재하는 역상, 영상, 고조파 성분을 제거 하기 위한 보상기를 제안하였다. 이를 제안한 2가지 배 전 계통에 적용하여 고조파 감소, 역률 개선, 불평형 전 류 감소, 무효전력 보상 효과가 있음을 보였다. IEEE에 서 제시한 배전 계통 13 버스 모형 모델 및 유도기 모델 링 하여 사고 모의 및 보상 효과를 시뮬레이션 통하여 보였다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원(과제번호: 제00-021호)에 의하여 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA 20, no.3, 1984.

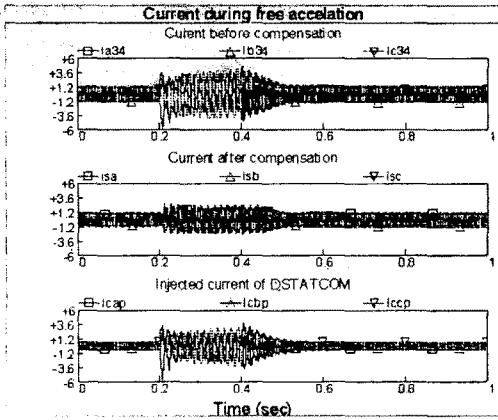


그림9. sag 발생시 보상 전후 전류 및 주입전류