

# 거리를 고려한 Virtual D-STATCOM

## Virtual D-STATCOM Considering Distance

김 태 훈\*, 오 정 식\*, 박 장 현\*, 박 태 식\*<sup>★</sup>

Tae-Hun Kim\*, Jeong-Sik Oh\*, Jang-Hyon Park\*, Tae-Sik Park\*<sup>★</sup>

### Abstract

In this paper, we construct a Virtual D-STATCOM using a number of grid-connected inverters installed in solar and wind power plants and compensate the reactive power of the cable depending on the reactive power of the load of the power distribution system and the distance to the power distribution line. We propose a method to compensate the reactive power of the PCC stage near the substation without installing the existing single large capacity D-STATCOM. The proposed method is verified by Matlab Simulink simulation and its operation principle and reactive power compensation.

### 요 약

본 논문에서는 태양광 및 풍력 발전소 등에 설치되어 있는 다수의 계통 연계형 인버터를 사용하여 Virtual D-STATCOM을 구성하고, 배전계통의 부하의 무효전력과 배전선로의 거리에 따른 케이블의 무효전력을 보상하여 기존의 단일 대용량 D-STATCOM을 설치하지 않고 변전소 인근의 PCC단의 무효전력을 보상하는 방법을 제시한다. 제안된 방식은 Matlab Simulink 시뮬레이션을 통해 동작원리와 무효전력 보상 성능을 검증하였다.

*Key words* : UPQC(Unified Power Quality Conditioner), D-STATCOM(Distribution Static synchronous Compensator), Reactive Power Compensation, Grid-Connected inverter, Matlab Simulink modeling

### 1. 서론

최근의 배전계통에서는 지속적인 산업의 성장에 의해 고도의 정밀기기와 전력전자기기의 수요가 증가로 인해 전력수요의 증가와 배전계통의 전력품질(Power Quality)의 저하를 초래하였다. 배전계통의 전력품질 문제로는 역률(Power Factor) 저하, 고조파(Harmonic) 전류 유입, 순간정전(Interruption), 순간전압강하(Sag), 순간전압상승(Swell), 전압 불

평형(Voltage Unbalance)등이 있다. 이러한 전력품질 문제를 완화 및 보상하기 위해 최근 FACTS설비가 도입이 되고 있고 FACTS설비중 D-STATCOM[1]은 VSC(Voltage Source Converter) 기반으로 작동되며, 배전계통에 병렬로 연결되어 능동필터의 역할로 수행하며 역률 보상, 고조파전류보상, 전압강하 보상등 배전계통의 외란과 변동에 대해 신속하게 대처 및 효율적으로 관리할 수가 있다. 하지만 대부분의 D-STATCOM은 배전계통의 별도의

\* Dept. of Electrical and Control Engineering, Mokpo National University

★ Corresponding author

E-mail : tspark@mokpo.ac.kr, Tel: +82-61-450-2465

※ Acknowledgment

This research was supported by the basic research on outside public offerings (individual) by Korea Electric Power Corporation.(Grant number : R18XA06-60)

Manuscript received Mar. 8, 2019; revised Mar. 16, 2019; accepted Mar. 25, 2019

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

특정 부하 말단의 인근과 변전소의 급전선(Feeder)에서 설치되어 보상이 이루어져 있다. 부하 말단에서의 설치시 다른 선로에 대해서 보상이 이루어질 수 없고 급전선에서 설치시 대용량의 D-STATCOM 설치를 해야 하므로 결국 다른 선로에 대한 미보상과 높은 설치비용으로 경제성이 저하될 수 있다. 또한 전력수요의 증가와 환경적인 요인에 의해 신·재생 에너지를 이용한 분산전원들이 분기된 배전선로에 연계되고 있는 실정이다. D-STATCOM은 분산전원의 계통연계형 인버터와 유사한 형태의 설비이며, 분산전원을 DC-Link를 통해 연계[2]가 가능하다. 이러한 점을 이용하여 분산전원의 에너지 지원을 전력수요에 대한 전력공급뿐만 아니라 배전선로와 부하에 대한 무효전력보상으로 활용이 가능하다.

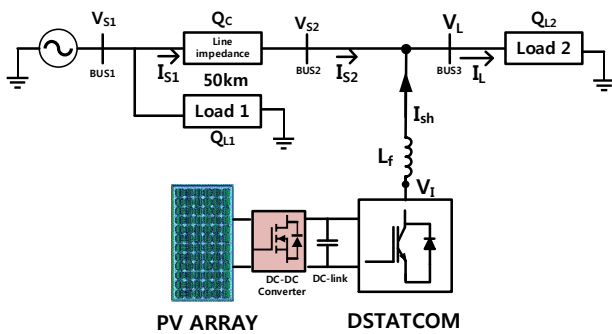


Fig. 1. Overview of D-STATCOM using Distributed Power Line-Connected Inverter.  
그림 1. 분산전원 계통 연계형 인버터를 활용한 D-STATCOM 개요도

그림 1은 계통 연계형 인버터를 D-STATCOM으로 구성시의 개요도이다. 임의의 위치에 분산전원을 활용하여 D-STATCOM을 구성시 기존의 단일 동작으로 부하 Load2의 무효전력을 측정하여 무효전력을 보상한다면 그림 2처럼 (a)보상전과 (b)보상후의 벡터도로 나타낼 수 있다. (a)는 배전계통의 케이블의 임피던스에 의해서  $\Delta V$ 만큼 전압강하가 발생하여 부하단의 전압이 감소하게 되며 (b)는 D-STATCOM으로 부하단의 흐르는 전압 및 지상 전류를 주입시켜 결국 무효전력을 보상함으로써  $\Delta V$ 를 감소시켜 부하단 전압을 안정도를 높일 수 있다.

따라서 본 논문에서는 다수의 분산전원 소형 계통 연계형 인버터를 D-STATCOM으로 활용하여

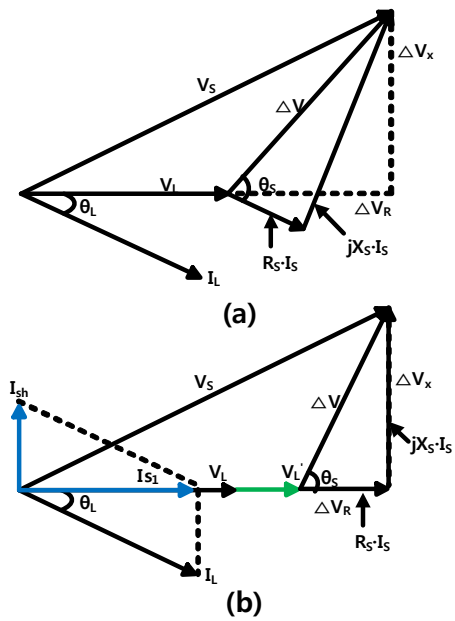


Fig. 2. D-STATCOM Load2 Reactive Power Compensation Vector Diagram Utilizing Distributed Power Line-Connected Inverter (a) Before Compensation, (b) After Compensation.

그림 2. 분산전원 계통 연계형 인버터를 활용한 D-STATCOM Load2 무효전력보상 벡터도 (a) 보상전, (b) 보상후

배전계통의 말단 부하에 대한 무효전력 보상과 더불어 다른 선로의 무효전력 보상 및 거리에 따른 배전케이블의 무효전력 보상량을 통합제어를 통해 변전소 인근의 PCC단에 대해서 역률을 개선하고자 한다. 제안된 방식은 태양광 및 풍력 발전소 등에 설치되어 있는 다수의 계통 연계형 인버터를 사용하여 Virtual D-STATCOM을 구성하고, 배전계통의 부하의 무효전력과 배전선로의 거리에 따른 케이블 및 다른 선로의 무효전력을 보상하여 기존의 단일 대용량 D-STATCOM을 설치하지 않고 변전소 인근의 PCC단의 무효전력을 보상하는 방법을 제시한다.

## II. 제안된 거리를 고려한 Virtual D-STATCOM

### 1. Single Line D-STATCOM 제어기 구성 및 설계

그림 3은 D-STATCOM의 제어기 구성을 보인다.

#### 가. 순시무효전력측정 및 계산

D-STATCOM으로 배전계통의 무효전력과 부하의 고조파전류를 보상하기 위해서는 순시 유·무효전력량 산출해야 한다. 이를 위해 P-Q[3]이론을

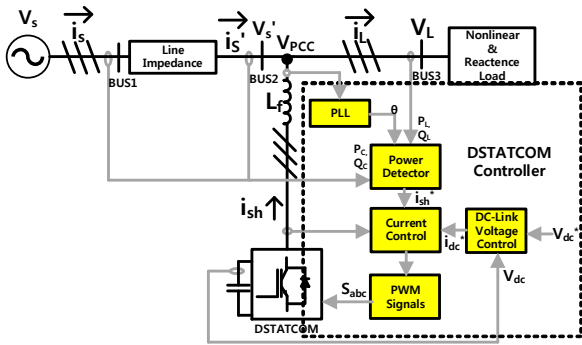


Fig. 3. D-STATCOM and Controller Configuration Diagram.  
그림 3. D-STATCOM 및 제어기 구성도

이용한 순시 유효·무효전력계산이 이루어지게 된다. 순시 유효·무효전력은 동기좌표계로 변환 및 표현이 가능하고, 또한 배전계통의 전압 전류가 영상분이 없는 3상평이라고 가정시 수식 (1)과 수식 (2)를 이용해 수식 (3)처럼 순시 유효·무효전력을 계산할 수 있다.

$$V_{dq} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$i_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

또한 동기좌표계 변환시 필요한 위상각  $\theta$ 는 PLL을 통해서 계통의 위상각을 검출하며 계통이 3상평형시 q축을 0으로 기준으로 하여 다시 순시 유효·무효전력값을 구할시 수식 (4)처럼 구해지게 된다.

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d & 0 \\ 0 & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

계산된 순시 유효·무효전력에 대한 보상 기준 전류를 구하기 위해서는 수식 (4)에 대해서 배전계통과 연결된 접점의 전압  $V_{PCC}$ 를 동기좌표계로 변환한  $V_{PCC\_dq}$ 를 이용하여 수식 (5)처럼 보상기준 전류를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{PCC\_d}^2 + V_{PCC\_q}^2} \begin{bmatrix} V_d & 0 \\ 0 & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

앞서 서술한 순시 유효·무효전력은 부하측의 소비 유효·무효전력량  $P_L, Q_L$ 과 배전케이블에 의한 무효

전력량  $Q_C$ 로 각각 나눠서 순시 유효·무효전력량을 산출하게 된다. D-STATCOM이 그림4처럼 배전계통에 구성되어있을시  $P_L, Q_L$ 은 BUS3의 전압  $V_L$ 과 전류  $I_L$ 을 측정하여 수식 (6)처럼 구해지고

$$\begin{bmatrix} P_L \\ Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d & 0 \\ 0 & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\_d} \\ i_{L\_q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$Q_C$ 는 BUS1과 BUS2의  $V_S I_S, V_S' I_S'$ 를 측정 및 합성하여 수식 (7)처럼 배전케이블의 순시·유효 무효전력량을 산출하게 된다.

$$Q_c = (-V_{S\_d} I_{S\_q}) + (-V_{S\_d'} I_{S\_q}') \quad (7)$$

결과적으로 보상 기준전류를 산출하기 위해 다음과 수식과 같이 순시 유효·무효전력량을 합산하게 된다.

$$\begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_L \\ Q_L + Q_C \end{bmatrix} \quad (8)$$

나. D-STATCOM 보상 기준전류

그림 4은 D-STATCOM이 추종해야할 보상 기준전류를 구하기 위한 다이어그램이다.

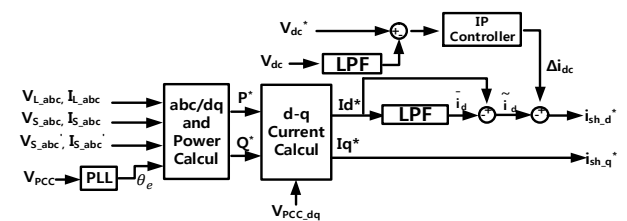


Fig. 4. D-STATCOM reference current diagram.

그림 4. D-STATCOM 기준전류 다이어그램

계산된  $I_d^*$ 로는 유효전력을 제어와  $I_q^*$ 로는 무효전력을 제어할 수가 있다. 부하에 의한 유효전력성분의 고조파전류를 제거하기 위해서  $I_d^*$  기준전류를 LPF (Low Pass Filter)를 사용하여 고조파 전류  $\tilde{I}_d$ 를 계산하게 된다. 또한 D-STATCOM이 보상시 DC-Link 전압은 스위칭 손실 및 캐패시터의 누설전류에 의해 서서히 방전이 되며 원활한 보상과 충분한 전압을 유지하기 위해서는 DC-Link의 전압은 PCC 단의 선간전압 최대값 보다 높게 유지해야한다. DC-Link의 전압을 일정전압으로 유지하기 위해서

DC-Link의 기준전압과 측정된 DC-Link의 전압을 비교하여 DC-Link의 전압 오차값을 IP제어기로 통해 유효성분에 해당하는 d축성분인  $\tilde{i}_d$ 와 합산하여[4] DC-Link의 전압제어를 하게 되며,  $I_q^*$ 는 무효 전력성분에 해당하므로  $I_q^*$  값에 대해서는 측정된 값 그대로 보상하게 된다. 결과적으로 D-STATCOM의 보상 기준전류에 대한 전류는 수식 (9)와 같이 정의할 수 있으며

$$\begin{aligned} i_{sh\_d}^* &= \tilde{i}_d + \Delta i_d \\ i_{sh\_q}^* &= i_q^* \end{aligned} \quad (9)$$

보상전류의 주입후의 계통의 전류  $i_s = i_L - i_{sh}$ 로 표현이 가능하고 결과적으로 수식 (10)와 같이 부하전압과 동상인 정상분(positive)의  $\tilde{i}_{s\_d}$ 만 남게 된다.

$$\begin{aligned} i_{s\_d} &= \tilde{i}_{s\_d} \\ i_{s\_q} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

다. D-STATCOM 전류 제어기

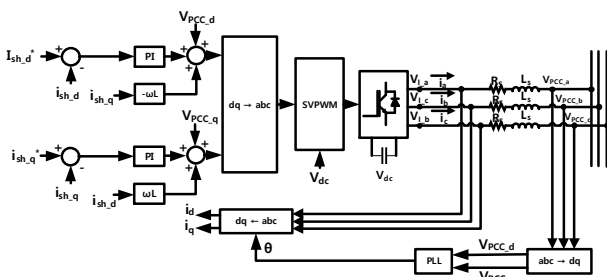


Fig. 5. D-STATCOM Current Controller block diagram.  
그림 5. D-STATCOM 전류제어기 블록도

D-STATCOM의 출력전류가 보상 기준 전류를 잘 추종하기 위해 그림 5처럼 전류제어기가 그림 필요하다. 그림 5의  $L_s$ 는 연계용 리액터 및  $R_s$ 는 D-STATCOM과 연계용 리액터의 전도손실을 나타낸다. D-STATCOM의 출력전압에 대한 회로 방정식을 표현하면 수식 (11)과 같고 수식 (11)을 동기좌표계로 변환시 수식 (12)로 표현가능하며

$$\begin{bmatrix} V_{L.a} \\ V_{L.b} \\ V_{L.c} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sh.a} \\ i_{sh.b} \\ i_{sh.c} \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sh.a} \\ i_{sh.b} \\ i_{sh.c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{PCC.a} \\ V_{PCC.b} \\ V_{PCC.c} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} V_{L.d} \\ V_{L.q} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{sh.d} \\ I_{sh.q} \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh.d} \\ I_{sh.q} \end{bmatrix} + L_s \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh.d} \\ I_{sh.q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{PCC.d} \\ V_{PCC.q} \end{bmatrix} \quad (12)$$

이를 통해 속도기전력(Speed Voltage)성분  $-L_s\omega I_{sh\_d}$  및  $-L_s\omega I_{sh\_q}$ 와 PCC단의 상 전압 성분  $V_{PCC\_d}$ ,  $V_{PCC\_q}$  상호 간섭 성분들을 제거 하여 D-STATCOM의 보상전류가 보상 기준전류를 추정 가능하게 한다.

전류제어기를 PI제어기로 설계시 그림 6처럼 전류제어기를 포함한 인버터의 제어 블록도로 나타낼 수 있다. 전류제어기의 개루프 전달함수는 수식 (13)로 표현할 수가 있고 전체시스템의 폐루프 전달함수는 수식 (14)과 같다. 또한 전체 시스템에 대한 개루프 전달함수 수식은 수식 (15)과 같이 정의할 수 있다.

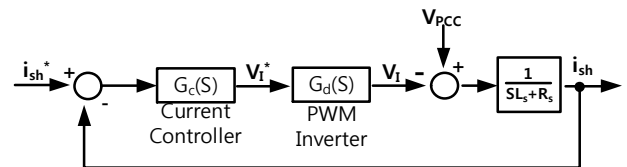


Fig. 6. DSTATCOM current control block diagram.  
그림 6. DSTATCOM 전류제어 블록도

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_c s} \right) \quad \left( \frac{1}{T_c} = \frac{K_i}{K_p} \right) \quad (13)$$

$$\frac{I_{sh}(s)}{I_{sh}^*(s)} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 L_s + (R_s + K_p) s + K_i} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} G_s(s) &= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_c s} \right) \cdot \frac{1}{s L_s + R_s} \\ &= K_p \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \cdot \frac{1}{L_s} \cdot \frac{1}{s + \frac{R_s}{L_s}} \end{aligned} \quad (15)$$

또한 PI제어기의 영점이 시스템의 극점을 상쇄 하도록 PI제어기의 절점 주파수를 시스템의 시정수와 같게 Pole-Zero 상쇄 기법을 통해서 수식 (16)처럼 선정시 전체 개루프 전달 함수는 수식 (17)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{T_c} = \frac{K_i}{K_p} = \frac{R_s}{L_s} \quad (16)$$

$$G_s(s) = \frac{1}{L_s} \frac{1}{K_p} s \quad (17)$$

PI제어기의 주파수 대역폭은 수식 (17)의 개루프 주파수 응답 특성 이득이 0dB가 될 때의 주파수로 정의가 가능하며 수식 (18)로 표현할 수가 있다.

$$|G_s(j\omega)| = \left| \frac{1}{\frac{L_s}{K_p} j\omega_{cc}} \right| = 1 \quad (18)$$

$$\omega_{cc} = \frac{K_{pc}}{L_s}$$

그러므로 전류제어기의  $K_p$ ,  $K_i$  이득값은 제어 대역폭  $\omega_{cc}$ 가 주어진다면 비례이득인  $K_p$ 는 수식 (19)처럼 주어지게 되고, 적분이득인  $K_i$ 는 Pole-Zero 상쇄조건으로 수식 (20)처럼 주어질 수 있다.

$$K_p = L_s \omega_{cc} \quad (19)$$

$$K_i = \frac{R_s}{L_s} K_p = R_s \omega_{cc} \quad (20)$$

주파수 대역폭을 증가시킬수록 각 이득을 크게 하여 전류제어기의 속응성을 올리는데 효과가 있지만 전류 측정시 피드백 되는 전류값에서 리플값에 민감하게 되어 시스템이 불안해질 수 있다. 그러므로 전류제어기 대역폭은 전류 샘플링주파수를 고려하여 1/25이하로 선정할 수 있다.

#### 라. DC-Link 전압제어

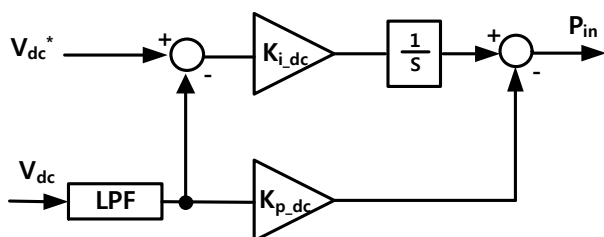


Fig. 7. DC-link capacitor voltage controller.  
그림 7. DC-link 커패시터 전압 제어기

DC-link 전압을 제어[3]하기 위해서는 PCC단에서 D-STATCOM으로 유입되는 유효전력을 제어함으로써 전압제어가 가능하다 유입되는 유효전력은 수식 (21)로 나타낼 수 있다.

$$P_{in} = \frac{3}{2} (V_{pcc-d} i_{sh-d} + V_{pcc-q} i_{sh-q}) = \frac{3}{2} V_{pcc} i_{sh-d} \quad (21)$$

즉, 유효전력 성분인  $I_d^*$ 를 제어함으로써 DC-link의 전압을 제어할 수 있으며 DC-link를 IP제어기

로 구성시 DC-link 전압의 오버슈트를 방지할 수가 있다. 그림 7의 IP제어기에 유효전력에 관한 수식으로 표현하면 수식 (22)로 표현이 가능하다.

$$P_{in} = [-K_{p-dc} V_{dc} + K_{i-dc} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt] \quad (22)$$

IP제어기의 유효전력수식 (22)에 DC-link의 커패시터 전압에 관한 방정식 수식 (23)을 대입을 하면 수식 (24)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{C_{dc}}{2} \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_{in} \quad (23)$$

$$\frac{C}{2} \frac{dV_{dc}}{dt} = [-K_{p-dc} V_{dc} + K_{i-dc} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt] \quad (24)$$

커패시터 전압의 동작점 ( $V_{dc0}$ )에 대해서  $V_{dc}^2$ 을 테일러 시리즈 전개 하여 2차항은 무시하고 정리하면 수식 (25)가 되며 수식 (25)를 수식 (24)에 대입시 최종적으로 수식 (26)로 표현이 가능하다.

$$V_{dc}^2 = V_{dc0}^2 = 2(V_{dc} - V_{dc0}) \quad (25)$$

$$C_{dc} V_{dc0} \frac{dV_{dc}}{dt} = [-K_{p-dc} V_{dc} + K_{i-dc} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt] \quad (26)$$

수식 (26)를 전달함수로 구할시 수식 (27)처럼 표현이 가능하며,

$$\frac{V_{dc}(s)}{V_{dc}^*(s)} = \frac{\frac{K_{i-dc}}{C_{dc} V_{dc0}}}{s^2 + \frac{K_{p-dc}}{C_{dc} V_{dc0}} s + \frac{K_{i-dc}}{C_{dc} V_{dc0}}} \quad (27)$$

$$= \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2}$$

비례이득 및 적분이득은 전달함수 수식 (27)을 주파수 해석을 통해서 구하게 되는데, 직류단 커패시터 전압의 동작점 ( $V_{dc0}$ )이 직류단 커패시터 전압의 지령치 이므로 수식 (28)와 같이 비례이득과 적분이득을 구하게 된다. 전압 제어기의 대역폭은 수식 (29)과 같이 구할 수가 있다.

$$K_{p-dc} = 2\zeta\omega_n C_{dc} V_{dc}^* \quad (28)$$

$$K_{i-dc} = \omega_n^2 C_{dc} V_{dc}^*$$

$$\omega_{c-dc} = \omega_n [(1-2\zeta^2) + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}]^{1/2} \quad (29)$$

또한 순시 유효전력 측정시 맥동성분으로 인해 전압제어에 영향을 미치므로, 일정한 동작점을 유

지하기 위해서 LPF를 거쳐 DC-Link의 전압을 산출하게 된다.

다. 다수의 계통 연계형 인버터를 활용한 Virtual D-STATCOM 무효전력 보상

다수의 계통 연계형 인버터를 Virtual D-STATCOM으로 구성하고 무효전력을 보상한다면 전원단과 전원단 인근의 부하에 대해서도 분산전원을 통해 효과적으로 무효전력을 보상할 수 있지만 각각의 분산전원들은 보상할 수 있는 무효전력량은 분산전원들의 보상 가능한 용량과 연결되어있는 선로의 파라미터 및 부하량등 상황에 따라서 달라질 수 있다. 그러므로 다수의 Virtual D-STATCOM들을 통합제어가 필요하게 된다.

본 논문에서는 분산전원의 용량과 부하와 배전선로의 케이블 거리에 따른 무효전력량을 고려하여 보상 가능한 무효전력량 대비 D-STATCOM이 연결되어있는 배전 선로와 배전소와의 거리 및 부하 용량에 따라 각각 Single line D-STATCOM이 보상할 무효전력량을 통합 제어[5]하여 분배시킨다. 배전선로의 거리가 짧고, 부하의 소비 무효전력이 작을시 배전소단의 무효전력량을 가장 크게 공급을 하고 부하의 소비 무효전력량이 배전선로의 무효전력량보다 많다면 부하단에 대한 보상 무효전력량을 우선적으로 분배 및 공급하도록 제어한다.

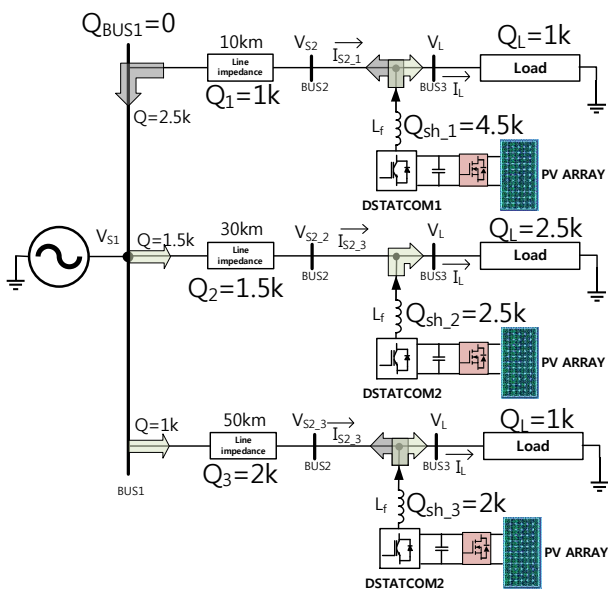


Fig. 8. Example of virtual D-STATCOM reactive power compensation.

그림 8. Virtual D-STATCOM 무효전력 보상 예시도

그림 8은 Virtual D-STATCOM 무효전력 보상 예시도 이다. 그림처럼 배전선로를 구성하였고 총 3대의 D-STATCOM으로 BUS1의 역률을 개선할 수가 있다. D-STATCOM1은 보상할 수 있는 무효전력량 대비 부하의 소비무효전력량과 배전선로가 짧아서 전원단에 대해서 많은 양의 무효전력을 보상할 수가 있으며 다른 선로의 케이블의 순시 무효전력을 측정하여 전원단으로 공급하도록 제어하며, D-STATCOM2는 보상할 수 있는 무효전력량 대비 부하의 소비무효전력량과 동일하므로 부하에 대한 무효전력량만을 제어하게 되고 D-STATCOM3는 보상할 수 있는 무효전력량 대비 부하의 소비무효전력량이 적으므로 전원단에 대해서 D-STATCOM1과 같이 케이블의 무효전력을 보상하도록 제어할 수 있다.

이처럼 Virtual D-STATCOM 순시적으로 무효전력량의 산출과 분배를 통합 제어하여 이루어지게 된다.

### III. 시뮬레이션 결과

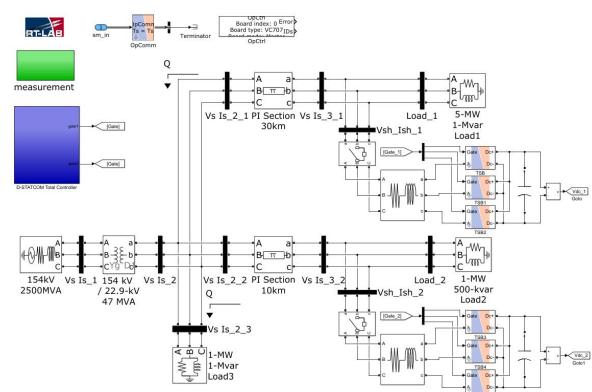


Fig. 9. Virtual D-STATCOM simulation model.

그림 9. Virtual D-STATCOM 시뮬레이션 모델

Matlab Simulink Simulation으로 배전단에 총 3개의 부하가 유도성 부하로 선정 하였고 2기의 Virtual D-STATCOM으로 배전케이블 및 부하의 무효전력을 보상하였다. 2기의 Virtual D-STATCOM은 0.05초 이후에 연결된 선로의 부하무효전력 보상 및 거리에 따른 Pi Section의 무효전력 보상과 다른 선로에 있는 Bus\_VsIs\_2,3단의 Load3의 총 무효전력량 1[MVar]중 각각 절반인 0.5[MVar]씩 분담하여서 무효전력을 보상하였고 결과적으로 Bus\_VsIs\_2단의 무효전력량이 0으로 수렴하는 것을 시뮬레이션 결과로 확인하였다.

Table 1. Virtual D-STATCOM simulation parameters.

표 1. Virtual D-STATCOM 시뮬레이션 파라미터

Simulation Parameters	
Voltage Supply	154[kV], 60[Hz]
Distribution Transformer	47[MVA], 154/22.9 [kV]
Load1	5[MW], 1[MVar]
Load2	1[MW], 500[KVar]
Load3	1[MW], 1[MVar]
Switching frequency	10[KHz]
Grid-connected Inductor	213[mH]
DC-Link Capacity	500[uF]
System Circuit Time Step	15[us]
Controller Time Step	30[us]

Table 2. PI Section Parameters.

표 2. PI Section 파라미터

PI Section Parameters	
Positive-sequence resistances	0.1153 [ $\Omega$ /km]
Zero-Sequence resistances	0.413 [ $\Omega$ /km]
Positive-sequence Inductances	1.05[mH/km]
Zero-Sequence Inductances	3.32[mH/km]
Positive-sequence Capacitances	11.33[nF/km]
Zero-Sequence Capacitances	5.01[nF/km]

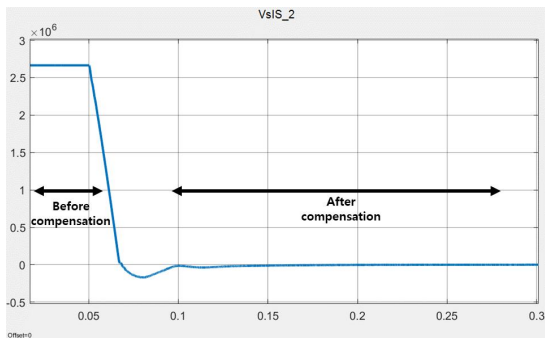


Fig. 10. Reactive power amount of Bus\_VsIs\_2.

그림 10. Bus\_VsIs\_2 단의 무효전력량

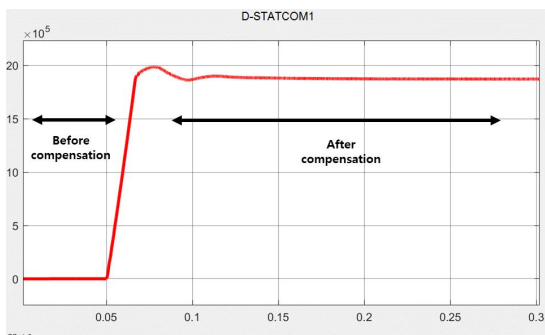


Fig. 11. Reactive Power Compensation of D-STATCOM1.

그림 11. D-STATCOM1의 무효전력 보상량

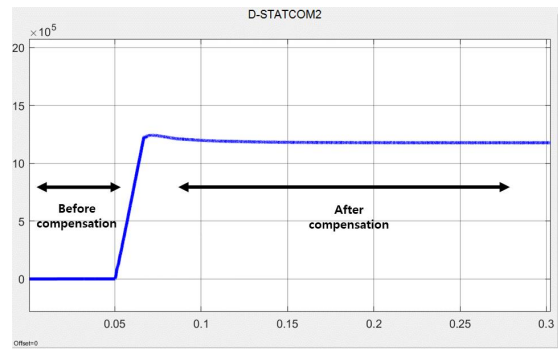


Fig. 12. Reactive power compensation of D-STATCOM2.

그림 12. D-STATCOM2의 무효전력 보상량

#### IV. 결론

배전계통에서 부하와 배전선로에 의해서 무효전력이 발생하는데 선로들이 복잡하고 다양하여 무효전력을 보상하기 위해서는 많은 기기들과 대용량의 보상기가 필요하다. 무효전력보상장치를 설치하지 않고 기존의 분산전원의 계통연계형 인버터를 Virtual D-STATCOM로 구성하여 변전소인근의 전원단의 무효전력량을 감소시켜 배전선로의 용량을 증대시킬 수 있다. 이를 위해 거리를 고려한 케이블과 부하의 순시무효전력을 측정방법과 제어기 구성 및 설계를 제시하였고, Matlab Simulink 시뮬레이션으로 변전소 전원단의 무효전력이 보상됨을 입증하였다.

#### References

- [1] P. Bapaiah, "Power Quality Improvement by using DSTATCOM," *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics (IJETEE)*, Vol. 2, Issue.4, 2013. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0841
- [2] B. Han, B. Bae, H. Kim, S. Baek "Combined operation of unified power-quality conditioner with distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, VOL. 21, Issue pp. 330-338, 2006. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.852843
- [3] Z. P. Fang, G. W. Ott, and D. J. Adams, "Harmonic and Reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems,"

*IEEE Trans. Power Electron*, vol. 13, no. 3, pp. 1174-1181, 1998. DOI: 10.1109/63.728344

[4] Ashish A. Patel, Aditi A. Patel, "Application of DSTATCOM for harmonics elimination and power quality improvement," *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS-2017)*, 2017.

DOI: 10.1109/ICECDS.2017.8390008

[5] Morris Brenna, Roberto Faranda, Enrico Tironi, "A New Proposal for Power Quality and Custom Power Improvement: OPEN UPQC," *IEEE Trans. on POWER DELIVERY*, VOL. 24, NO. 4, OCTOBER 2009, pp. 2107-2116, 2009.

DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2028791

---

## BIOGRAPHY

---

### Tae-Hun Kim (Member)



2017 : BS degree in Electrical Engineering, Mokpo National University.

2017~ : Graduate student in School of Electrical Engineering, Mokpo National University.

### Jeong-Sik Oh (Member)



2016 : BS degree in Electrical Engineering, Mokpo National University.

2018 : MS degree in Electrical Engineering, Mokpo National University.

2018~Present : PhD course in Electrical Engineering, Mokpo National University.

### Jang-Hyun Park (Member)



1995 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
1997 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
2002 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

2013~ : Professor, Dept. Electrical and Control Engineering, Mokpo National University.

### Tae-Sik Park (Member)



1996 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
1998 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
2000 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

2000~2005 : Senior Engineer, Samsung Electronics.

2005~2013 : Administrative Official, Korea Intellectual Property Office.

2013~Present : Professor, Dept. Electrical and Control Engineering, Mokpo National University.