

부하 역률보상용 STATCOM의 설계 및 시뮬레이션

이동주*, 이은웅*, 이종한*, 김종겸**
 충남대학교*, 원주대학교**

Design and Simulation of STATCOM
 for Compensation of Load Power Factor

Dong Ju Lee*, Eun Woong Lee*, Jong Han Lee*, Jong Gyeum Kim**
 Chungnam National University*, Wonju National University**

Abstract - The operation and control scheme of reactive power compensator (so called STATCOM) based on voltage source converter is theoretically reviewed. STATCOM for compensation of load power factor is designed and its operation is verified by simulation.

1. 서 론

여러 산업분야의 성장과 산업용 정밀기기 증가에 따라서 전력이 단순히 전원을 공급한다는 개념보다는 그 전력에 대한 품질이 중요시되고 있다.

같은 입력전원에 단상 전동부하, 전동기 부하, 정류기 부하와 같이 역류 고조파의 크기가 서로 다른 여러 종류의 부하를 혼용해서 사용하는 경우에 과도한 역류 고조파에 의해서 전원 역률저하 및 전원 전압의 왜형을 발생시켜 전체 전원계통의 전력품질을 저하시키게 된다.

과거에는 수동필터 또는 역률개선용 콘덴서 등에 의한 전력품질 개선이 그 주를 이루었으나 근래에는 전력용 반도체소자 및 전력전자 기술발전이 힘입어 부하 또는 전원품질의 변동에 능동적으로 대응할 수 있는 전력품질 개선장치가 개발되었으며 그 성능향상, 대용량화 및 실용화에 관한 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 이미 3-level GTO 인버터를 이용한 3.3kV 1MVA급 STATCOM의 개발에 관한 연구와 IGBT소자를 채용한 PWM 인버터를 이용한 1MVA급 STATCOM에 관한 연구가 되었다.[1][2]

그 중에서 IGBT소자를 적용한 전압형 컨버터에 기초한 STATCOM은 부하에 병렬로 연결되어 부하측에 무효전력을 공급 또는 흡수함으로써 전원의 품질을 향상시킬 수 있는 장치로써 수십kHz까지 고속 스위칭이 가능하여 입력필터 용량을 감소시킬 수 있으며 빠른 동특성을 구현할 수 있어서 부하변동 및 전원변동이 많은 중, 소용량 저압 산업용 부하를 위한 전력품질 개선장치로써 적합하다.[3][4]

본 연구에서는 선행 연구된 저압 산업용 부하용 STATCOM 모델을 근거로 해서 실제 산업현장에 적용이 가능한 STATCOM의 경제적인 설계 모델을 제시하고 그 성능을 시뮬레이션을 통해서 검증하고자 한다.

2. STATCOM 시스템 구성 및 제어

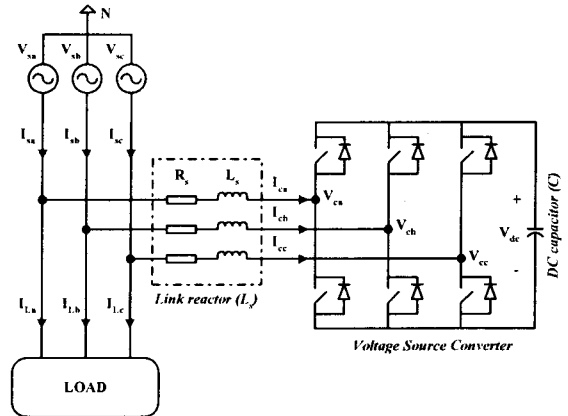
2.1 시스템 구성 및 등가회로

그림 1(a)는 STATCOM 시스템의 구성도이며 그림 1(b)는 이 시스템의 단상등가회로이다.

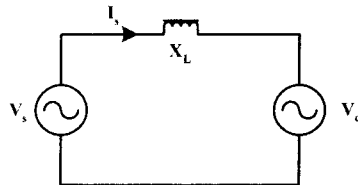
그림 1에 나타난 바와 같이 전압형 컨버터를 이용한 STATCOM은 연계 리액터(Ls)를 통해서 전원측에 병렬로 연결되어 있으면서 전원측에 동기된 전압원이다.

연계 리액터(Ls)는 전원측과 STATCOM간의 전압 차에 의해서 무효전력이 STATCOM측으로 발생 또는 흡수될 수 있도록 하는 역할을 한다. 그리고 전압형 컨버터의 스위칭 소자로는 고전압 대전력용에서는 GTO와 같은 소자의 적용이 가능하지만 GTO소자의 스위칭 속도가 수백Hz미만이기 때문에 연계 리액터(Ls)의 용량이 커야만 전압형 컨버터의 전류를 효과적으로 필터링할 수 있다. 반면에, 저압 소용량의 경우에는 스위칭 속도를 수십 KHz까지 가능한 IGBT소자를 적용하여 연계 리액터(Ls)를 최소화할 수 있어 경제적이다.

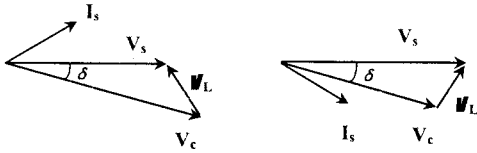
그리고 DC 콘덴서(C)는 용량성 또는 유도성의 무효전력을 보상하는 동안에 전압형 컨버터의 손실만큼의 유효전력을 전원으로부터 받아들여서 DC전압을 일정한 값으로 유지된다.



(a) 시스템 구성
 (a) System configuration



if $V_c > V_s$, I_s = leading current
 if $V_c < V_s$, I_s = lagging
 (b) 단상 등가회로
 (b) Single phase equivalent circuit



(c) 진상 보상시, 벡터도 (d) 지상 보상시, 벡터도
 (c) at leading comp. (d) at lagging comp.
 그림 1 전압형 컨버터를 이용한 무효전력 보상기
 Fig. 1 STATCOM based on voltage source converter

그림 1(b)에서 전원측과 컨버터측사이의 교환되는 유효 전력량은 식 (1)과 같이 표현될 수 있으며 전원전압 (V_s)과 컨버터 출력전압(V_c)간의 위상차(δ)에서 결정되며 이 위상차가 작은 경우($\delta=0$)에는 유효 전력량이 그 위상차에 비례한다. ($\sin\delta=\delta$)

그리고 무효 전력량은 식 (2)와 같이 표현될 수 있으며 컨버터 출력전압(V_c)에 반비례하며 그림 1(c)와 그림 1(d)의 벡터도에 나타난 바와 같이 컨버터 출력전압의 크기에 의해서 컨버터 입력전류(I_s)를 진상 또는 지상으로 흐르도록 제어된다.

이와 같이 컨버터 출력전압의 위상제어를 통해 유효 전력량을 제어하여 dc 콘덴서 전압을 일정하게 유지하면서 컨버터 출력전압의 진폭 제어를 통해서 보상할 무효 전력량의 제어가 가능하다.

$$P(\delta) = \frac{V_s V_c}{X_L} \sin(\delta) \quad (1)$$

$$Q(V_c) = \frac{V_s^2}{X_L} - \frac{V_s V_c}{X_L} \cos(\delta) \quad (2)$$

2.2 동기 회전좌표계 등가회로

그림 1(a)에서 입력측 3상 입력전원이 평형이고 정현적이라면, a상 전압을 기준으로 해서 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{sa} &= \sqrt{2} V_a \cos(\omega t) \\ V_{sb} &= \sqrt{2} V_b \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{sc} &= \sqrt{2} V_c \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 STATCOM시스템을 동기 회전 좌표계에서 d 축과 q축 성분으로 모델링하면 식 (4)와 같다.[1]

$$\begin{pmatrix} \frac{dI_{cqe}}{dt} \\ \frac{dI_{cde}}{dt} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\omega & 0 \\ \omega & -\frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{CR_L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{cqe} \\ I_{cde} \\ V_{dc} \end{pmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{sqe} \\ V_{sde} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{L_s} V_{dc} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_s} V_{dc} \\ \frac{1}{C} I_{cqe} & \frac{1}{C} I_{cde} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{qe} \\ S_{de} \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서, S_{qe} : q축의 인버터 스위칭 함수
 S_{de} : d축의 인버터 스위칭 함수

위의 식 (4)를 이용해서 동기회전 좌표계 d축, q축 성분의 각 등가회로로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2(a)와 그림 2(b)에 보여진 것처럼 d축 등가회로와 q축 등가회로가 서로 커플링되어 있으며 컨버터 입력전류의 q축 성분(I_{cqe})과 d축 성분(I_{cde})의 제어를 통해서 dc 콘덴서 전압 제어 및 보상할 무효전력량의 제어가 가능하다.

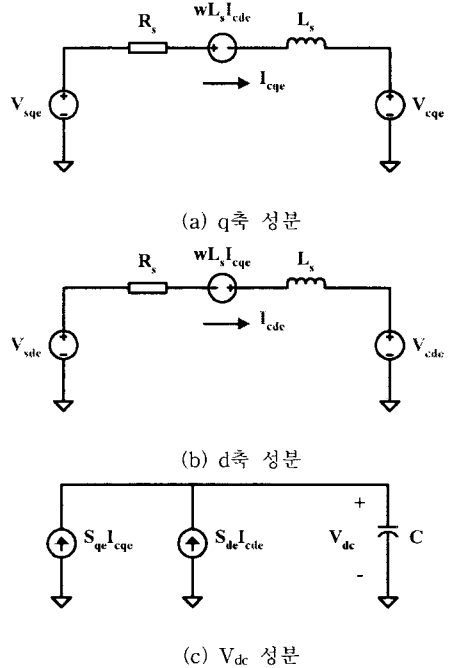


그림 2 동기 회전좌표계에서의 등가회로
 Fig. 2 Equivalent circuit in synchronous rotating frame

3. 설계모델 및 시뮬레이션

3.1 설계 사양

본 연구실에서 선행 연구한 결과[4]를 기초로 해서 설계된 STATCOM 시스템의 사양은 표 1과 같다.

표 1. STATCOM 사양
 Table 1. Specification of STATCOM

Item	Specification
Rating Capacity	30kVA
Rated Voltage	3P3W 380Vac
DC voltage	780 [Vdc]
Resonant Frequency of LC filter	710Hz
DC capacitor	8200uF
Rating of switching device	1200V 150A
Switching Frequency	5kHz

3.2 제어기 구성

그림 3은 위에서 설계된 STATCOM시스템의 제어 블록도이다. dc전압을 일정하게 유지하기 위한 dc 전압 제어기, 보상할 무효전력량의 제어를 수행하기 위한 전류제어기, 인버터 스위칭을 위한 PWM 신호 발생부로 구성되어 있다.

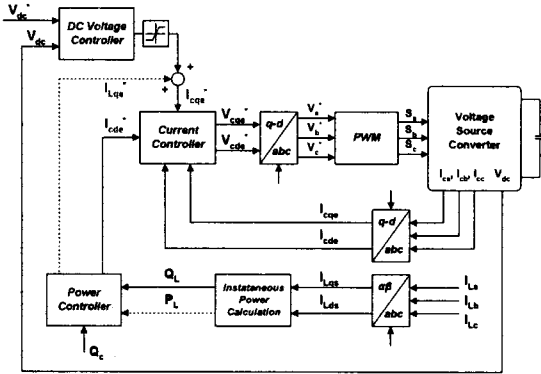
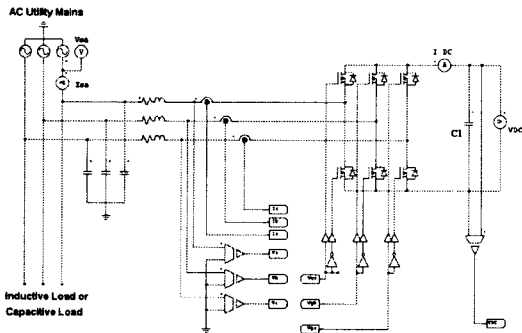


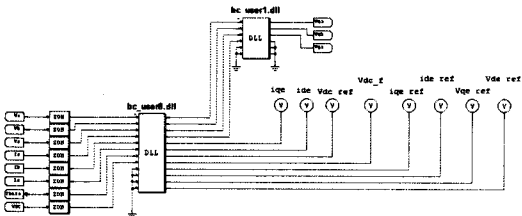
그림 3 제어기 블록도
Fig.3 Block diagram of controller

3.3 시뮬레이션 모델

표 1과 같이 설계된 STATCOM 시스템을 시뮬레이션 소프트웨어(Psim)를 이용한 그 동작특성을 검증하기 위해서 그림 3에 나타난 제어기는 C언어 프로그램으로 구현하여 시뮬레이션 소프트웨어에 입력되었다. 그림 4는 구성된 시뮬레이션 모델이다.



(a) 전압형 컨버터
(a) Voltage source converter



(b) 제어기의 구현
(b) Implementation of controller

그림 4 STATCOM의 시뮬레이션 모델
Fig.4 Simulation model of STATCOM

3.4 시뮬레이션 결과

그림 5는 STATCOM의 지상 보상시, 시뮬레이션 결과로 STATCOM의 입력전류가 전원전압보다 90도 지연되어 흐르고 있어서 전원에서 볼 때, STATCOM시스템이 리액터처럼 작용하여 무효전력을 흡수하는 동작을 하고 있음을 확인할 수 있다

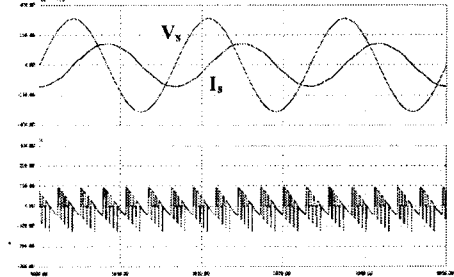


그림 5 지상 보상시, 출력전압,전류 파형 (상단)
dc 콘덴서 전류파형 (하단)

Fig. 5 Output voltage, current waveform (Top) and current of dc capacitor (Bottom) at lagging compensation mode

그림 6은 STATCOM의 진상 보상시, 시뮬레이션 결과로 STATCOM의 입력전류가 전원전압보다 90도 앞서 흐르고 있어서 STATCOM이 전원에서 볼 때 마치 역률 보상을 콘덴서와 같이 동작하여 무효전력을 전원에 공급하는 동작을 하고 있음을 확인할 수 있다.

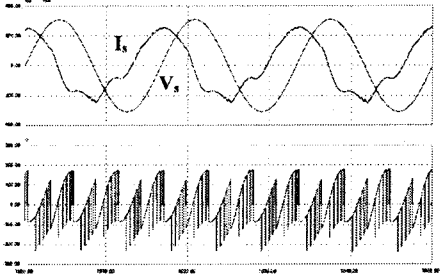


그림 6 진상 보상시, 출력전압,전류 파형 (상단)
dc 콘덴서 전류파형 (하단)

Fig. 6 Output voltage, current waveform (Top) and current of dc capacitor (Bottom) at leading compensation mode

5. 결 론

본 연구에서는 저압 산업용 부하의 역률보상이 주목적인 수용가용 30kVA STATCOM시스템의 설계모델을 제시하고 시뮬레이션을 통해서 설계된 STATCOM 시스템의 동작특성을 확인하고 그 제어 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Guk C. Cho, Nam S. Choi, Chun T. Rim and Gyu H. Cho, "Modeling, Analysis and Control of Static VAR Compensator Using Three-Level Inverter", IEEE Ind. Appl. Society Annual Meeting, pp. 837-843, 1992.
- [2] "3.3kV 1MV Var Static Var Compensator 개발" 기술개발에 관한 연구, 한국전력공사, 1995. 9.
- [3] STATCOM을 이용한 수용가의 역률개선과 무효전력 불평형 보상, 기초전력공학 공동연구소(과제번호:98-068), 1999. 10.
- [4] 전력전자 장비로 운영되는 계통과 수용가의 전력품질개선, 한국과학재단 (과제번호:R101-2000-00267), pp. 170-191, 2003. 10.