

# 전력 품질 향상을 위한 배전용 STATCON의 AC전압, 직류결합 전압 및 고조파 보상 제어알고리즘 개발

오 판 일, 전 영 수, 이 기 선, 추 진 부  
전력연구원

## The Development of Control Algorithms of D-STATCON for Compensations of AC Voltage and DC Link Voltage and Harmonics Improve the Quality of Electric Power

K. I. Oh, Y. S. Jeon, K. S. Lee, J. B. Choo  
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

### Abstract

This paper presents the DQ transformation space vector modulation method to develop control algorithm of distributed STATCON(STATIC CONDenser) for line voltage regulation, dc link voltage regulation, harmonics compensation. The Performance of a PI with ramp comparison and synchro reference frame current controller is carried. Based on these analysis, the control performance are desirable to compensate the harmonics, regulate dc link and line voltage of Distribution line.

여 고조파에 대한 규제를 강화하고 있다. 미국의 웨스팅하우스 등 전력변환기술을 보유하고 있는 기업들은 "Clean Power"의 슬로건을 걸고 사용자 전원뿐만 아니라 배전시스템의 Custom Power에 많은 연구를 하고 있다. 그 예로 1-12MVA급 배전용 STATCON(Static Condenser), DVR(Dynamic Voltage Restorer), SSB(Solid-State Breaker)등을 개발하여 무효전력보상, 고조파 저감, 순간정전 보상 및 전압 고조파 보상에 대한 투자가 있다.

### 1. 서론

최근 모든 산업이 고도화되고 국민생활의 향상에 따라 첨단제어장치, 전력변환기기의 광범위한 이용으로 비선형 특성을 갖는 부하가 급증하여 전원 파형을 왜곡시키며 고조파, 역률 저하는 물론, 전력기기의 상호교란, 온도상승 등 많은 문제들이 발생되고 있으며 이는 전력품질과 직결되는 문제이다. 21세기를 바라보는 현재 한국의 전력시장은 독점체제에서 경쟁체제로의 전환을 준비해야할 시기이며 이러한 경쟁체제의 상황에서 국내의 전력시장을 외국기업의 기술적 침투로부터 지키기 위해서는 고품질 전력을 원하는 수용가의 요구를 만족시켜야 한다. 위와 같은 문제들을 해결하며 동시에 경쟁체제에 대처하기 위한 방법으로 최근 관심이 높아지는 유연송전시스템(FACTS, Flexible AC Transmission System)이 있다. 유연송전시스템에 대한 연구는 미국, 유럽과 같은 기술 선진국에 의해 주도되었으며 현재 실증시험을 거쳐 상용화 단계에 있다. 또한 미국 및 유럽의 경우는 고조파 관련 규격(EN61000, IEC555, IEEE519)을 제정하

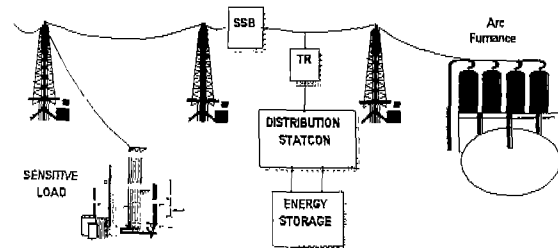


그림 1. 전기로의 전압 플리커 보상을 위한 STATCON의 기능

기본적으로 배전용 정지형 동기조상기는 계통 내 모선 전압과 동상(in-phase)으로 전압을 인가하여 전압변동을 억제하고 무효전력(VAR) 흐름을 조정한다. 배전용 정지형 동기조상기는 동기파형(Synchronous Waveform)을 생성하므로 DSTATCON의 최대 MVA 정격까지 연속적으로 가변 유도성 및 용량성 병렬 보상이 가능하다. 최근 DSTATCON은 배전선로의 고조파를 감쇠시키는 역할로도 사용한다. 고주파 펄스폭변조 방식(Pulse Width Modulation, PWM)으로 동작하는 인버터를 이용하여 비선형 부하에 의하여 발생하는 전류고조파 성분을 상쇄시키는 전류파형을 인가하여 고조파성분을 감소시킨다. 이러한 기능을 그림 1에 도시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 STATCON의 전압조정 개념

그림 2은 STATCON의 전압 조정의 기능을 설명하기 위한 간단한 계통도이다.  $V_s$ 는 모선전압을 나타내며  $V_t$ 는 PCC(Point of Common Coupling)의 전압이다. 모선전압  $V_s$ 와  $V_t$  사이에서의 전압강하를 야기하는 선로임피던스는  $Z_s$ 로 부하는 어드미턴스  $Y_l$ 로 나타내었으며 STATCON은 선로에 병렬로 연결되어 있다. 모선전압과 PCC사이의 전압을  $\Delta V$ 라 하면  $\Delta V = V_s - V_t$  이고  $\Delta Q_l \ll S_{sc}$  인 경우 부하선의 전압은 다음과 같이 간략히 표현할 수 있으며 그림 3에 나타내었다.

$$V \approx \frac{V_s}{1 + \Delta Q_l / S_{sc}} = V_s \left[ 1 - \frac{\Delta Q_l}{S_{sc}} \right] \quad (1)$$

그림 4은 전압조정용 보상기의  $V/Q$  특성을 나타내었다. STATCON이 생성하는 무효전력이  $Q_{r,max}$  보다 작은 경우 시스템 단자전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = V_k + \frac{Q_r}{k_r} \quad (2)$$

위 식에서 전압변동에 대한 무효전력 보상량의 변화율이 크면, 즉  $k_r$  이 크면 시스템 단자전압을  $V_k$  로 일정하게 유지하는 것이 가능하다.

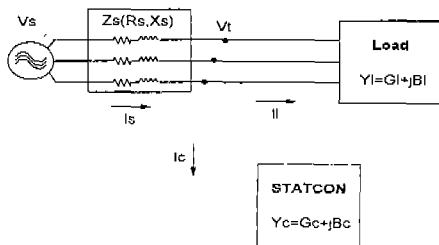


그림 2. 간단한 계통도

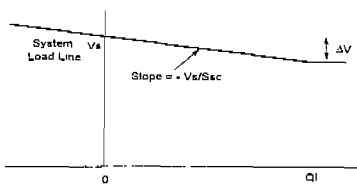


그림 3. 시스템 부하선의  $V/Q$  특성

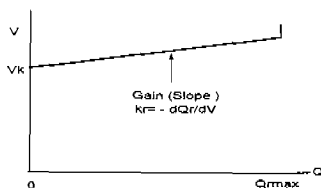


그림 4. 전압조정용 보상기의  $V/Q$  특성

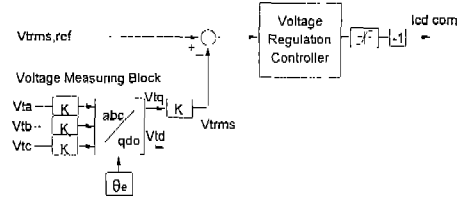


그림 5. STATCON 전압조정 제어기의 간략도

### 2.2 전압조정 제어기법 개발

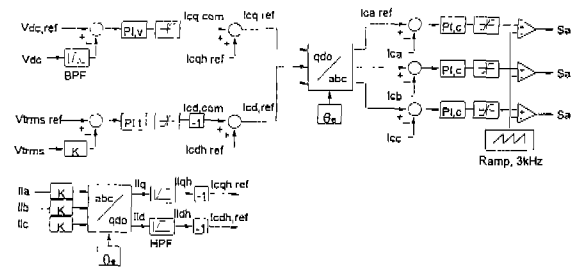


그림 6. STATCON 전압조정 제어기를 포함한 전체 시스템의 제어기(PI+삼각파 비교 전류 제어기)

그림 5에서 STATCON 전압조정 제어기의 간략도를 그렸다. 그림에서 보듯이 전압검출부와 단자전압 지령부 및 전압조정 제어기로 구성되어 있다. 전압검출부는 시스템 단자전압 또는 계통 단자전압 (이하 단자전압)을 전압 검출기(Voltage Sensor)를 이용하여 검출하고 이득  $K$ 를 거쳐서 3상 값을 DQ 변환을 취한다. 여기서  $\theta_e$ 는 단자전압  $V_t$ 의 위상이므로 DQ 변환을 한  $V_{tq}$ 는  $V_{t,abc}$ 의 첨두값이된다. 이 첨두값에서 이득  $K$ 를 통하여 단자전압  $V_{t,abc}$ 의 RMS 값을 구한다. 여기서 단자전압은 3상 평형이라는 가정하에서 단자전압을 검출한다. 검출된 단자전압은 단자전압 명령값과 비교하여 그 오차가 전압조정 제어기의 입력이된다. 여기서 배전계통에 설치하는 STATCON의 경우는 단자전압 명령값이 22900V 이다. 또한 전압조정 제어기로는 일반적인 PI 제어기를 사용한다. 압조정 제어기의 출력은 Limiter를 지나 d 축 전류의 명령값( $I_{cd,com}$ )이 되며 이 값에 고조파 보상기의 출력을 더하여  $I_{cd,ref}$ 를 만든다.

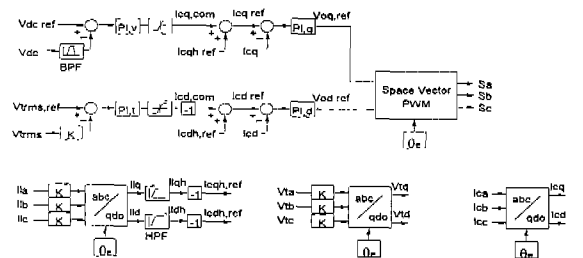


그림 7. STATCON 전압조정 제어기를 포함한 전체 시스템의 제어기(동기 전류 제어기)

그림 5의 STATCON 전압조정 제어기를 포함한 전체 시스템의 제어기를 그림 6에 그렸다. 그림에서 보듯이 단자전압 제어부, 직류전압 제어부, 고조파 보상부, 전류제어부로 구성되었다. 단자전압 제어부는 고조파 보상기의 명령을 더하여 d축 전류명령을 만들며 직류전압 제어부는 고조파 보상기의 명령을 더하여 q축 전류명령을 만든다. 이와 같이 만들어진 DQ 전류명령은 DQ/abc 변환을 통하여 STATCON의 abc상 전류명령을 만들고 이 전류명령을 PI + 삼각파 비교 전류제어기가 STATCON의 상전류가 추종하도록 PWM 전류제어를 한다. 여기서 삼각파는 스위칭 주파수 3kHz로 일전 스위칭 주파수를 보장한다.

동기전류제어기를 사용한 경우의 STATCON 전체 시스템의 제어기를 그림 7에 그렸다. 그림에서 보듯이 단자전압 제어부, 직류전압 제어부, 고조파 보상부, 전류제어부로 구성되었다. 단자전압 제어부는 고조파 보상기의 명령을 더하여 d축 전류명령을 만들며 직류전압 제어부는 고조파 보상기의 명령을 더하여 q축 전류명령을 만든다. 이와 같이 만들어진 dq 전류명령을 잘 추종하도록 동기 전류제어기의 PI 제어기가 dq 인버터 출력전압 명령값을 만든다. dq 인버터 출력전압 명령값을 만족시켜주는 STATCON의 출력전압은 공간벡터 방법을 이용하여 구현한다.

### 2.3 직류전압의 제어

STATCON 직류측 전압은 전원선간 전압의 최대치보다 충분히 큰 전압이 유지되어야 한다. 이 전압이 높을수록 전류제어형 PWM 컨버터의 전류제어 성능이 향상되어 응답특성 및 고조파 제거능력이 향상된다. 그러나 그 최대치는 컨버터 정격전압에 의해 제한되기 때문에 적절한 값을 유지하는 것이 필요하다. 이러한 측면에서 STATCON의 인버터는 승압형 컨버터로서 동작한다. 초기에 직류측 커패시터에 어떤 전압이 충전되어 있다고 할 때 컨버터 스위칭 등에 의한 손실과 커패시터의 누설전류에 의해 방전이 일어나므로 직류측 전압은 차츰 감소하여 결국은 별도의 추정이 이루어지지 않으면 선간전압의 최대치까지 떨어지게 된다. 따라서 이 전압이 적절한 값으로 유지하기 위해서는 STATCON 내의 자체 손실분에 해당하는 만큼의 전력이 전원측으로부터 공급될 필요가 있다. 이는 전원에서 공급되는 전류의 유효성분이 부하의 유효성분 뿐 아니라 필터 손실의 보상분을 포함하여야 함을 의미한다. 이러한 직류전압 제어기 및 고조파 보상 제어기를 그림 8에 나타내었다.

유효성분 전류는 q축 전류로 나타나므로 다음과 같이 보정되어야 한다.

$$i_{sq}^* = \dot{i}_{Lq}^* + i_{comp} \quad (3)$$

여기서  $i_{comp}$ 은 STATCON 내 손실분 전력에 해당하는 전류의 크기로서 손실과는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$P_{loss} = \frac{3}{2} V_m i_{comp} \quad (4)$$

STATCON의 제어회로 내에서  $i_{comp}$ 은 직류전압의 설정기준치와 실제전압간의 오차를 PI제어기를 사용하여 얻는다. 전압의 오차를  $e$ 라 할 때 전압제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_v(s) = \frac{I_{comp}(s)}{E(s)} = K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \quad (5)$$

이를 디지털 형태의 증분방정식으로 바꾸기 위해 아래의 bilinear transform을 적용한다.

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (6)$$

여기서  $T_s$ 는 샘플링 주기를 나타낸다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하여 정리하면

$$\frac{I_{comp}(z)}{E(z)} = \frac{K_{pv}(1-z^{-1}) + K_{iv}\frac{T_s}{2}(1+z^{-1})}{1-z^{-1}} \quad (7)$$

이므로

$$i_{comp}(k) = i_{comp}(k-1) + K_{pv}[e(k) - e(k-1)] + \frac{T_s}{2} K_{iv}[e(k) + e(k-1)] \quad (8)$$

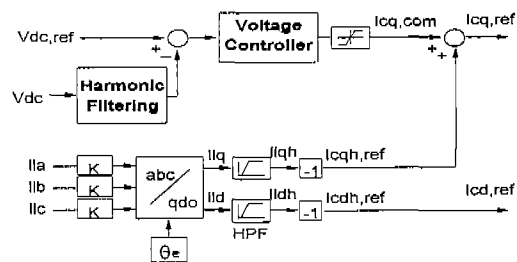


그림 8. 직류전압 제어를 위한 STATCON 제어시스템의 구성도

의 증분방정식을 얻는다. 이 전압제어기는 STATCON의 손실을 보상할 뿐만아니라 부하전류가 변동하는 과도상태에 STATCON를 통한 유효성분 전류의 유입 또는 유출에 의해 나타날 수 있는 전압의 변동을 억제하는 역할을 한다. 따라서 과도상태에서의 전압변동을 억제하는 측면에서 제어기의 이득이 충분히 큰 값을 가져야 한다. 정상상태에서 STATCON는 고조파 전류만을 부담하므로 위에서의 손실보상분 이외의 평균 유효전력의 수수는 없다. 그러나 고조파 전류의 출입에 의해 순시전력의 수수는 항상 존재한다. 이 순시전력은 전원의 3배수 주파수로 맥동하므로 커패시터의 전압도 이 주파수로 맥동하는 결과를 낳는다. 커패시터를 충분히 크게하면 이 맥동성분의 진폭을 감소시킬 수 있으나 경제적인 측면에서 커패시터는 가급적 작은 용량으로 사용하여야

하기 때문에 어느정도의 전압 맥동은 감수하여야 한다. 컨버터의 전류제어 성능이 직류측 전압에 영향을 받기는 하나 그 값이 충분히 크기만 하다면 반드시 일정한 값을 정확하게 유지하여야 할 필요는 없으므로 이 맥동전압의 존재가 그 자체로는 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 위에서와 같이 전압제어를 위해 제어기가 사용되었을 때 전압맥동은 제어기 출력  $i_{comp}$ 의 맥동을 낳고 이것이  $i_{sq}$ 에 중첩된다. 일반적으로  $i_{sq}$ 에  $n$ 차 고조파 성분이 존재하면 이를 역변환한 선전류의 파형에는  $n \pm 1$ 차의 고조파가 중첩된다. 예컨대 부하전류가 5고조파 성분을 포함하고 있으면 직류전압은 6고조파로 맥동하고 이 영향으로 선전류에는 5차와 7차고조파 성분이 생긴다. 물론 이들의 크기는 원래 부하전류에 포함되어 있던 고조파의 크기에 비하여 훨씬 작은 값이 되기는 하나 전원의 잔류고조파로서 STATCON의 성능을 저해하는 원인이 된다. 전압맥동이 시스템의 성능에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 직류전압의 케환시 맥동성분을 제거하여야 한다. 이를 위해서는 앞서 보상전류의 검출에 사용된 것과 같은 평균화 방법을 생각할 수 있으나 평균주기가 전원의 한주기에 해당하므로 응답시간이 매우 빠른 정기적변수의 케환에 적용하였을 경우에는 지나친 위상지연으로 인해 시스템이 불안정하여질 가능성이 있다. 따라서 맥동의 주된 성분을 이루는 6차 고조파에 대한 대역저지필터(Notch Filter)를 적용하였다.

그림 8에서 보듯이 abc상의 부하전류를 케환하여 이를 동기좌표축 부하전류로 변환한 다음 이 값과 선전류의 기준치와의 차이를 구해 이를 STATCON가 주입하여야 할 전류의 기준치로 삼는다. q축 선전류의 기준치는 부하전류의 평균치와 손실보상전류의 합으로 구해지며 손실보상전류는 직류측 전압을 대역통과필터를 통해 케환, 직류전압의 기준치와의 차이를 PI제어기를 통해 얻는다.

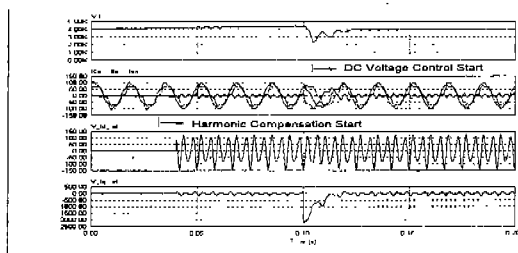


그림 9. 직류전압 제어기를 이용한 STATCON의 응답특성

## 2.4 고조파 전류 보상

고대역필터를 사용한 STATCON의 고조파 전류 검출시스템의 구성도를 그림 10에 도시하였다. 고대역필터는 DQ 부하전류에 나타나는 직류성분을 제거

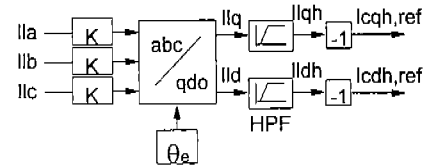


그림 10. 고대역필터를 사용한 STATCON의 고조파 전류 검출시스템의 구성도

하고 고조파 성분만을 검출한다. 이 경우 고대역필터의 차단주파수(Cutoff Frequency)와 감쇠율(Dampin Ratio)이 필터의 성능을 좌우하는 중요한 요소로 지안한 고조파 검출기에서는 차단주파수를 60Hz, 감쇠율을 0.7로 하였다. 차단주파수가 60Hz인 경우 과도상태에서는 처음 한 주기동안 정확한 고조파성분을 검출하지 못하는 단점이 있다. 필터를 아날로그로 설계시에는 저대역필터가 노이즈면에서 우수하므로 고대역필터가 유리하나 디지털로 구현할 경우는 어느 것을 사용하여도 무방하다. 그래서 구조가 간단한 고대역필터를 이용하여 부하전류의 고조파를 검출하기로 하였다.

## 2.5 모의실험 결과

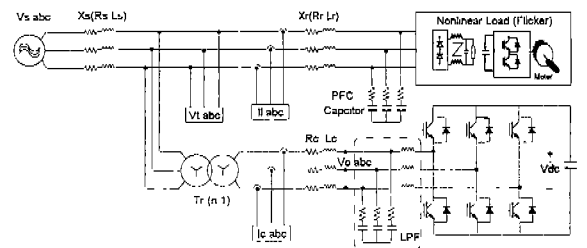


그림 11. STATCON 전체 시스템의 개략도

그림 6과 그림 7과 같이 단자전압 제어, 직류전압 제어, 고조파 보상, 및 전류제어를 모두 수행하는 제어기를 이용한 STATCON의 제어성능 검증을 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용한 STATCON 전체 시스템의 개략도를 그림 11에 그렸다.

그림 12에 단자전압 조정(이득=0.001, 시정수=0.008), 직류전압 제어(이득=0.5, 시정수=0.003), 직류전압 기준값 = 4000V, PI + 삼각파 비교 전류제어(이득=0.005, 시정수=0.001), 전원 선로 임피던스에 의한 전압강하  $\Delta V=900V$ , 기본파에 대한 5차 17% 및 7차 6%의 유도성 부하인 경우의 시뮬레이션 결과를 보인다. 그림에서 보듯이 선간전압의 실효치가 전압명령인 22900V를 추종하고 있음을 알 수 있다. 그러나 직류전압이 단자전압 조정 제어기 및 전류제어의 영향에 의하여 동요가 발생되고 그에 따라 전류 제어 성능도 좋지않음을 알 수 있다. 또한 STATCON의 부적절한 전류 때문에 전류전류도 과

2하게 증가되어 있음을 알 수 있다.

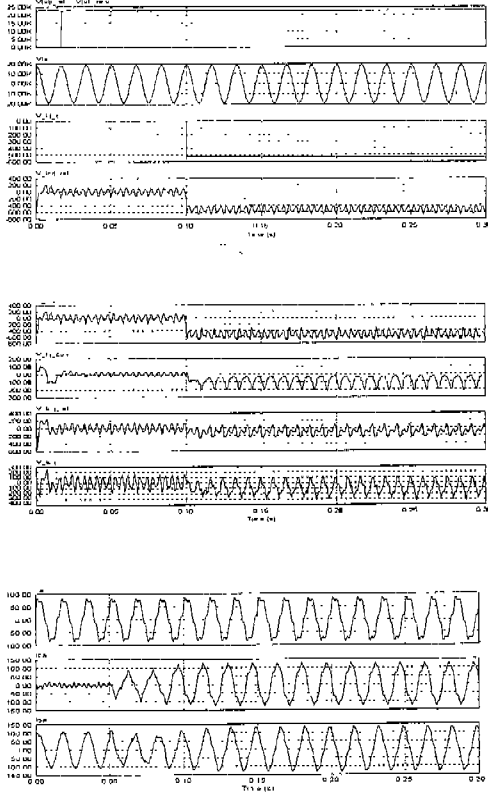


그림 12. 단자전압 조정, 직류전압 기준값 = 4000V, PI + 삼각파 비교 전류제어

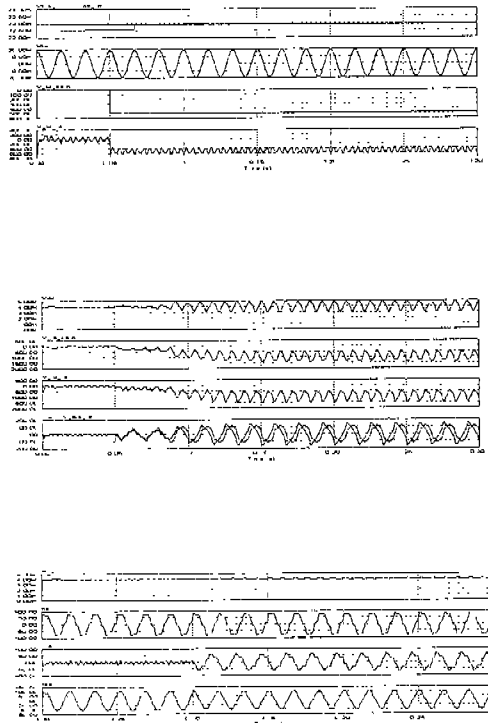


그림 13. 단자전압 조정, 직류전압 기준값 = 4000V, 동기전류제어기

그림 13에 단자전압 조정(이득=0.001, 시정수=0.008), 직류전압 제어(이득=0.5, 시정수=0.003), 직류전압 기준값  $V_{dc,ref} = 4000V$ , 동기 전류제어(이득=5, 시정수=0.001), 전원 선로 임피던스에 의한 전압 강하  $\Delta V = 900V$ , 기본파에 대한 5차 17% 및 7차 6%의 유도성 부하인 경우의 시뮬레이션 결과를 보인다. 그림에서 보듯이 선간전압의 실효치가 전압명령인 22900V를 추종하며 직류전압은 기준값인 4000V를 약간의 동요는 있지만 어느정도 추종한다. 그러나 dq축 전류는 전류명령과 약간의 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다. 일부 전류제어기 성능이 좋은편은 아니나 PI + 삼각파 비교 전류제어시 보다 제어성

### 3. 결론

배전선로의 전력 품질 향상을 위한 AC 전압과 직렬결합전압 조정 및 고조파 보상을 위한 STATCON의 제어 알고리즘 개발을 위하여 DQ변환과 공간벡터에 대한 기술적인 설명을 하였으며 AC 전압 제어, 직렬결합전압 제어 및 고조파 보상을 위한 제어 알고리즘을 개발하였다. 또한 STATCON의 회전자표계에서 DQ축 전류를 직접제어하는 공간벡터방식의 동기전류제어기와 PI + 삼각파 비교 전류제어기를 개발하여 비교 분석하였다. AC 전압 제어, 직렬결합전압 제어 및 고조파 보상을 같이하는 경우 PI + 삼각파 비교 전류제어와 공간벡터방식의 동기전류제어기 모두 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

### [참고 문헌]

- [1] 전력연구원, "FACTS기기 개발 I단계 연구", 중간보고서, pp.39-55, 1997
- [2] 문건우, 오관일, 윤종수, 윤석호, 이기선, 추진부, "유연송전 시스템에서 역률 보상을 위한 배전용 STATCON의 전류제어", 대한전기학회 논문지, 제47권, pp.48-55, 1998.
- [3] 오관일, 전영수, 이기선, 추진부, "배전선로의 전압조정 및 고조파 보상을 위한 STATCON 제어알고리즘 개발", 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, pp.143-146, 1999
- [4] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery". McGraw-Hill, Inc. pp.133-163, 1986
- [5] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics", John Wiley & Sons, Inc. 1989