

전압 플리커 및 고조파 보상을 위한 배전용 STATCON의 제어알고리즘 개발

전영수*, 오관일, 이기선, 추진부
전력연구원

Development of Control Algorithm of D-STATCON(Distribution STATIC-CONDensers: Compensations of Voltage Flicker and Harmonics

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

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

는 인버터를 이용하여 비선형 부하에 의하여 발생하는 전류고조파 성분을 상쇄시키는 전류파형을 인가하여 고조파성분을 감소시킨다. 이러한 기능을 그림 1에 도시하였다.

2. 전압 플리커 및 고조파 보상을 위한 STATCON 제어알고리즘

2.1 전기로 시스템

1. 서 론

모든 산업이 고도화되고 국민생활의 향상에 따라 첨단 제어장치, 전력변환기기의 광범위한 이용으로 비선형 특성을 갖는 부하가 급증하여 전원 파형을 왜곡시킴으로 고조파 문제, 역률 저하는 물론, 전력기기의 상호교란, 온도상승 등 많은 문제들이 발생되고 있다. 이러한 고조파 문제를 해결하기 위하여 기술선진국인 미국 및 유럽의 경우는 고조파 관련 규격(EN61000, IEC555, IEEE519)을 제정하여 고조파에 대한 규제를 강화하고 있다. 또한 미국의 웨스팅하우스 등 전력변환기술을 보유하고 있는 기업들은 "Clean Power"의 슬로건을 걸고 사용자 전원뿐만 아니라 배전계통의 Custom Power에 많은 연구를 하고 있다. 그 예로 1-12MVA급 배전용 STATCON(Static Condenser), DVR(Dynamic Voltage Restorer), SSB(Solid-State Breaker)등을 개발하여 무효 전력보상, 고조파 저감, 순간정전 보상 및 전압 고조파 보상에 대한 투자가 있다.

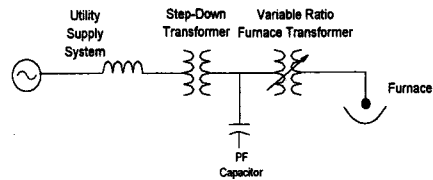


그림 2. 일반적인 전기로 시스템의 단선도

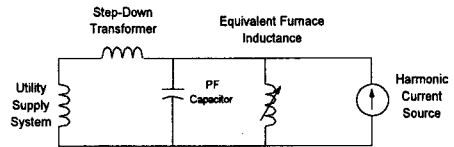


그림 3. 전기로 시스템의 단선 등가회로

일반적으로 전기로, 전기용접기, 대형 전동기 등과 같은 무효전력 소비의 변동이 심한 비선형 부하는 전력계통의 단자전압을 교란시키거나 전압 플리커를 발생시킨다. 인간의 눈은 0.3%에서 0.4% 전압 크기의 변화에 대해서 약 5Hz에서 20Hz의 변조 주파수에 가장 민감한 것으로 보고되고 있다.

일반적인 전기로 시스템의 단선도를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 대부분의 전기로 시스템은 역률개선용 커패시터를 가지고 있다. 일반적으로 설치하는 역률개선용 커패시터의 값은 계통 임피던스와 전압강하용 변압기의 임피던스로 구성된 전원 임피던스와 공진하여 5차 또는 7차 고조파를 발생시키며 전기로에 의하여 공진을 증폭시키기도 한다. 전기로의 임피던스는 전원 임피던스에 비하여 상당히 크고 전기로 변압기의 탭변환 및 전기로 스위칭에 의하여 약간의 공진 주파수의 변화를 가져오는 일종의 가변 인덕터로 동작한다. 이러한 경우의 전기로 시스템의 단선 등가회로를 그리면 그림 3와 같다.

역률 개선용 커패시터의 고조파 증폭 작용에 의하여 커패시터, 리액터 및 변압기를 소손 시키거나 수명을 현저히 저감시키고, 또한 계통전압의 왜곡이 발생되기도 하며 발전기에 까지 영향을 주어 열손실을 가져오기도 한다. 따라서 이러한 고조파 문제 때문에 전력설비의 설계시 고조파에 의한 여유분을 고려하여 설계하거나 고조파 자체를 발생되지 않도록 하여야한다.

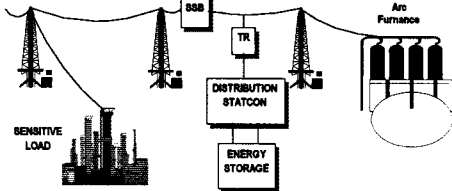


그림 1. 전기로의 전압 플리커 보상을 위한 STATCON의 기능

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. 고조파 펄스폭변조 방식(Pulse Width Modulation, PWM)으로 동작하

결론적으로 공진현상에 의한 고조파 문제를 해결하기 위해서는 역률 개선용 커패시터에 직렬 리액터를 설치하여 공진이 일어나지 않도록 튜닝하는 것이다. 또한 전기로 운전시 공진이 발생되지 않도록 운전지침을 만들어 운용하는 것이다. 또는 한 주파수 이상을 필터링할 수 있는 복합 필터(compound filters)를 사용하는 것도 방법이다. 공진이 발생되지 않도록 전기로 시스템을 운용하는 방법은 공진을 증폭시키는 전기로 변압기의 탭을 사용하지 않거나 커패시터의 특정한 값을 사용하지 않는 것이다. 여러 개의 전기로를 운용하는 경우에는 특정한 탭을 사용하지 않기가 어려우므로 이 경우에는 커패시터의 크기를 조절하여 운용한다. 다른 방법으로는 전기로에서 발생하는 무효전력을 보상하는 SVC(Static var compensator) 또는 동기조상기(Synchronous condenser)를 이용하는 방법이 있다. SVC나 STATCON을 적절히 제어하여 공진 문제가 발생되지 않도록 할 수 있다.

2.2 STATCON의 모델링

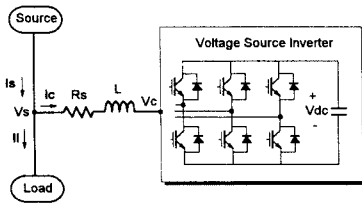


그림 4. STATCON의 기본회로도

그림 4에 STATCON의 기본회로를 나타내었다. 3상 AC source와 무효전력 및 고조파 발생을 하는 3상 AC load로 구성되었으며 저항 R은 STATCON의 해석을 위하여 리액터에 존재하는 기생 저항 성분과 STATCON의 손실부분을 증가화하여 표현한다. STATCON, 비선형 부하 및 배전계통의 모델링을 위하여 그림 4의 회로를 간략화 하여 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 모든 전압은 전원의 중성점 g에 대한 전압을 나타낸다. 교류측 인덕터 및 손실성분을 대표하는 저항의 용량은 모두 같다고 하면 각 상에 대한 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{sa} = L \frac{di_a}{dt} + R_s i_a + V_{ca} \quad (1)$$

$$V_{sb} = L \frac{di_b}{dt} + R_s i_b + V_{cb} \quad (2)$$

$$V_{sc} = L \frac{di_c}{dt} + R_s i_c + V_{cc} \quad (3)$$

또한 dc link 커패시터 전압 방정식은 다음과 같다.

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (4)$$

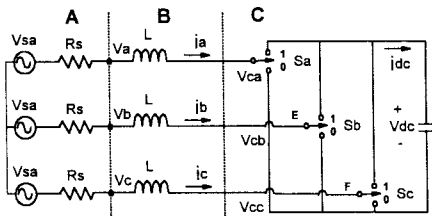


그림 5 간략화된 STATCON의 주요 회로도 식 4에서 인버터의 각 상에 대해 스위칭 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$S_a, S_b, S_c = \begin{cases} 0 & \text{for negative leg ON} \\ 1 & \text{for positive leg ON} \end{cases} \quad (5)$$

STATCON의 qd전류와 dc 링크 전압을 변수로 하여 미분방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_q}{dt} \\ \frac{di_d}{dt} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & -\omega & 0 \\ \omega & -\frac{R_s}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} V_{ca} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} V_{cb} \\ \frac{1}{C} i_w & \frac{1}{C} i_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 S_{aq} 와 S_{dq} 는 q축 및 d축의 제어변수이다. 그리고 첨자 e는 회전좌표축의 qd변수를 나타낸다.

2.3 고조파 전류보상

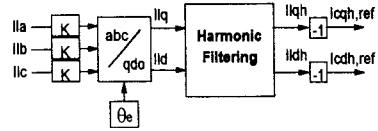


그림 6 STATCON의 고조파 전류 제어시스템의 구성도

그림 6은 STATCON의 고조파 전류 제어시스템의 구성도를 나타내고 있다. 여기서 부하전류는 3상 평형이고 무효전력 및 고조파를 발생한다고 가정한다.

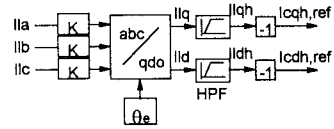


그림 7 고대역필터를 사용한 STATCON의 고조파 전류 검출시스템의 구성도

STATCON의 고조파 전류 제어시스템의 구성도에서 고조파 전류 성분의 검출 성능을 고대역필터를 사용한 STATCON의 고조파 전류 검출시스템의 구성도를 그림 7에 도시하였다. 고대역필터는 DQ 부하전류에 나타나는 직류성분을 제거하고 고조파 성분만을 검출한다. 이 경우 고대역필터의 차단주파수(Cutoff Frequency)와 감쇠율(Damping Ratio)이 필터의 성능을 좌우하는 중요한 요소로 제한한 고조파 검출기에서는 차단주파수를 60Hz, 감쇠율을 0.7로 하였으며, 비교적 구조가 간단한 고대역필터를 이용하여 부하전류의 고조파를 검출하기로 하였다.

2.4 PWM 전류제어

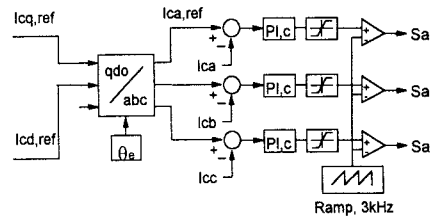


그림 8. 삼각파 + PI 전류제어기 블록도

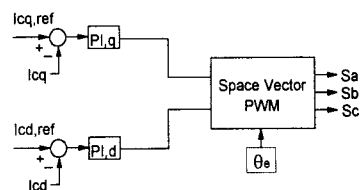


그림 9. 동기 전류제어기 블록도

전류제어기는 제어알고리즘에서 만든 abc 또는 dq 전류명령을 인버터가 잘 추종하도록 하는 제어기로서 STATCON에서는 상당히 중요한 역할을 한다. 전류제어기의 성능이 나쁘면 STATCON이 만들어내는 보상전류에 큰 전류 리플이나 움셋이 발생하게 되며 이로 인하여 변압기 및 계통에 고조파 노이즈를 발생시킨다. 따라서 이러한 전류 맥동성분을 저감시키기 위해서 고주파(스위칭 주파수) 필터를 설치하여야 하거나 리액터의 크기를 키워야 한다. 그러나 리액터의 크기를 키우면 전류 맥동은 작아지나 전류명령을 추종하는데 있어 시간지연이 발생한다. 이러한 시간지연을 극복하기 위해서는 dc 링크 전압의 크기를 증가시켜야 한다. 그러나 dc 링크 전압의 크기를 증가시키면 스위칭 소자의 전압 스트레스가 증가하여 더 큰 용량의 소자를 사용하거나 직렬로 스위칭을 추가하여야 하는 심각한 문제가 발생한다. 여기서는 기존의 PI + 삼각파 비교제어기와 동기 전류제어기의 특성을 비교한다.

삼각파 + PI 전류 제어기의 블록도를 그림 8에 도시하였다. 이 제어기의 경우 상지연 없이 일정한 스위칭 주파수로 동작하는 장점이 있어 STATCON에 적용이 가능할 것으로 생각된다. 단지 PI 제어기의 이득을 튜닝하여야 하면 과도상태에서 이 이득에 의하여 과도 응답이 나타나므로 과도상태에서 느린 응답을 보일 수도 있다. 그림 9에 동기전류제어기(동기축 전류 제어기, Synchronous Reference Frame Current Controller)의 블록도를 그렸다. dq 전류 명령과 STATCON 전류의 오차로부터 PI 제어기를 거친 후 인버터 출력전압의 기준값을 만든다. 이러한 인버터 출력전압의 기준값을 추종하는 인버터 출력전압을 만들기 위하여 공간 벡터 방식을 사용한다.

공간벡터 방식을 사용하면 인버터의 출력 상전압은 표 1과 같이 8개의 공간벡터로 정의 될 수 있다. 인버터 상태 0과 7은 스위칭 상태가 서로 다름에도 불구하고 출력 상전압은 같다. 또 V0과 V7은 크기가 모두 0이므로 영벡터(zero vector)라고 한다.

인버터 상태 k	스위칭 상태	출력 상전압		
		Vca	Vcb	Vcc
0	[0 0 0]	0	0	0
1	[1 0 0]	2Vdc/3	-Vdc/3	-Vdc/3
2	[1 1 0]	Vdc/3	Vdc/3	-2Vdc/3
3	[0 1 0]	-Vdc/3	2Vdc/3	-Vdc/3
4	[0 1 1]	-2Vdc/3	Vdc/3	Vdc/3
5	[0 0 1]	-Vdc/3	-Vdc/3	2Vdc/3
6	[1 0 1]	Vdc/3	-2Vdc/3	Vdc/3
7	[0 0 0]	0	0	0

표 1. 3상 인버터의 출력 상전압

필요한 공간벡터 $V_{c,ref}$ 는 공간벡터 평면상에 임의의 지점에 놓이게 되므로 어느 하나의 스위칭 상태로는 이 값을 구현할 수 없다. 따라서 주어진 구간 내에서 가장 가까운 인근벡터의 벡터 합으로 이를 구현한다. 예를 들어 그림에 나타난 경우에는 V1과 V3의 조합으로 다음과 같이 된다.

$$V_{c,ref} = D_a V_1 + D_b V_3 \quad (9)$$

여기서 D_a 는 인근벡터 중 시계방향으로 앞쪽에 있는 벡터의 가중치를, D_b 는 뒤쪽에 있는 벡터의 가중치를 각각 나타낸다.

기준 전압벡터의 크기 및 위상은 다음 식으로 구한다.

$$|V_{c,ref}| = \sqrt{V_{cqe,ref}^2 + V_{cde,ref}^2} \quad (10)$$

$$\delta = \theta - \tan^{-1} \left(\frac{V_{cqe,ref}}{V_{cde,ref}} \right) \quad (11)$$

이러한 기준전압벡터의 위치 결정을 위한 예를 그림 10에 도시하였다.

기준벡터의 위치가 결정되어 인근벡터가 결정되면 인

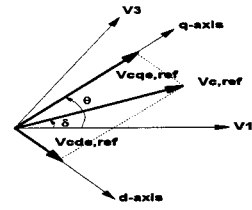


그림 10. 기준전압벡터의 위치 결정을 위한 예 근벡터의 가중치를 결정한다. 기준벡터가

$$V_{c,ref} = D_a V_1 + D_b V_3 = V_a + V_b \quad (12)$$

로 될 때 주어진 기준벡터의 좌표 $V_{cqe,ref}$ 와 $V_{cde,ref}$ 로부터 V_a 와 V_b 의 크기는 다음과 같이 된다.

$$V_a = \frac{2}{\sqrt{3}} |V_{c,ref}| \sin \left(\frac{\pi}{3} - \delta \right) \quad (13)$$

$$V_b = \frac{2}{\sqrt{3}} |V_{c,ref}| \sin \delta \quad (14)$$

한편 인버터 전압벡터의 크기는 $2/3 V_{dc}$ 이므로 가중치는

$$D_a = \frac{V_a}{|V_1|} = \frac{3}{2} \frac{V_a}{V_{dc}} \quad (15)$$

$$D_b = \frac{V_b}{|V_3|} = \frac{3}{2} \frac{V_b}{V_{dc}} \quad (16)$$

로 된다. 이상은 기준전압벡터가 영역 1에 있을 경우이며 타 영역에 있을 때는 기준벡터를 1 영역 내로 회전시켜 가중치를 구한다.

인근 벡터와 그들의 가중치가 결정되면 샘플링 구간 동안 가중치에 해당하는 만큼의 시간 비율로 그에 해당하는 스위칭 신호를 출력하여야 한다. 그러나 기준벡터가 두 인근벡터의 꼭지점을 잇는 접선 이내에 들어 있으면 두 인근 벡터의 가중치의 합은 1보다 작기 때문에 그 나머지 구간 동안에는 영벡터에 해당하는 신호를 내보내게 된다. 제한한 전류제어기의 스위칭 신호 출력방식은 필요한 스위칭 벡터를 매 스위칭 구간마다에서 2회로 나누어 인가하는 방식이다. 여기서 항상 첫 번째 스위칭 구간의 끝에 영벡터를 놓고 두 번째 스위칭 구간 시작에 다시 영벡터를 놓고 첫 번째 스위칭 구간에서 가한 두 벡터의 순서를 바꿔서 인가한다. 이러한 방식으로 하면 전류의 움셋을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 주어진 샘플링 구간 T_s 와 전압벡터의 가중치로부터 스위칭 신호 인가시간은 다음과 같다.

$$t_A = \frac{\sqrt{3}}{V_{dc}} |V_{c,ref}| \sin \left(\frac{\pi}{3} - \delta \right) \cdot T_s \quad (26)$$

$$t_B = \frac{\sqrt{3}}{V_{dc}} |V_{c,ref}| \sin \delta \cdot T_s \quad (27)$$

$$t_2 = T_s - (t_A + t_B) \quad (28)$$

만일 기준전압 벡터가 제어가능 영역을 이탈, $t_a + t_b > T_s$ ($V_a + V_b > 2/3 V_{dc}$)가 되었을 때는 인가시간을 다음과 같이 $t'_a + t'_b = T_s$ 가 되도록 조정하여 준다.

$$t'_a = \frac{T_s}{t_a + t_b} t_a \quad (29)$$

$$t'_b = \frac{T_s}{t_a + t_b} t_b \quad (30)$$

2.5 전압 플리커 보상

그림 11의 STATCON 전압조정 제어기를 포함한 전체 시스템의 제어기를 그림 12에 그렸다. 그림에서 보듯이 전압 플리커 보상부, 직류전압 제어부, 고조파 보상부, 전류 제어부로 구성되었다. 전압 플리커 제어기의 출력은 Limiter를 지나 d축 전류의 명령값(Icd,com)이 되며 이 값에 고조파 보상기의 출력을 더하여 Icd,ref를 만든다. 단자전압 제어부는 고조파 보상기의 명령을 더하여 d축 전류명령을 만들며 직류전압 제어부는 고조파 보

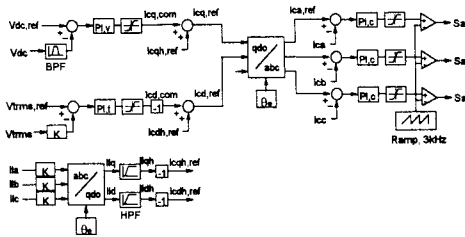


그림 12. STATCON 전압조정 제어기를 포함한 전체 시스템의 제어기(PI+삼각파 비교 전류 제어기)

상기의 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 일정한 스위칭 주파수를 보장한다.

동기전류제어기를 사용한 경우의 STATCON 전체 시스템의 제어기를 그림 13에 그렸다. 그림에서 보듯이 전압 플리커 보상부, 직류전압 제어부, 고조파 보상부, 전류 제어부로 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.

그림 12과 그림 13와 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 14에 그렸다.

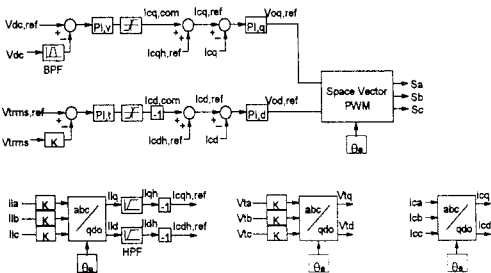


그림 13. STATCON 전압조정 제어기를 포함한 전체 시스템의 제어기(동기 전류 제어기)

그림 15에 전압 플리커 보상이 없는 경우의 응답을 보인다. 그림에서 보듯이 선로 임피던스에 의한 전압강하와 전기로 가동에 의한 전압 플리커가 동시에 나타나고 있다. 전기로가 가동되는 경우에는 부하전류가 증가하여 시스템 단자전압이 감소함을 알 수 있다. 그림 16에 전압 플리커 보상(이득=0.08, 시정수=0.005), PI + 삼각파 비교 전류제어(이득=0.005, 시정수=0.0001), 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 약간의 맥동을 보이며 전압명령인 22900V를 추종하고 있음을 알 수 있다. 또한 직류전압은 기준값인 4000V를 잘 추종하며 전류제어기도 a상 전류 명령을 잘 추종함을 알 수 있다. 그림 17에 전압 플리커 보상(이득=0.08, 시정수=0.008), 동기 전류제어(이득=0.5, 시정수=0.001), 전원 선로 임피던스에 의한 전압강하 $\Delta V=900V$, 기본파에 대한

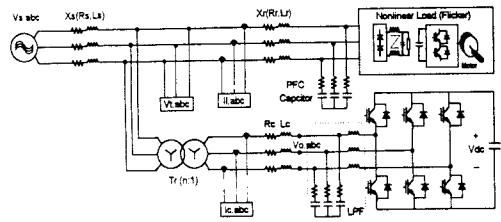


그림 14 STATCON 전체 시스템의 개략도

5차 17% 및 7차 6%의 유도성 부하인 경우의 시뮬레이션 결과를 보인다. 그림에서 보듯이 선간전압의 실효치가 전압명령인 22900V를 추종하며 직류전압은 기준값인 4000V를 잘 추종한다. 또한 전류제어기도 dq축 전류 명령을 잘 추종함을 알 수 있다. 단자전압 조정을 시작하면 전원전류는 전원전압에 대한 위상이 STATCON의 전상전류에 의하여 역률도 많이 좋아짐을 알 수 있다. 그림 16-17에서 보듯이 전압 플리커 보상의 경우 PI + 삼각파 비교 전류제어기가 동기 전류제어보다 우수한 응답을 보이고 있음을 알 수 있다.

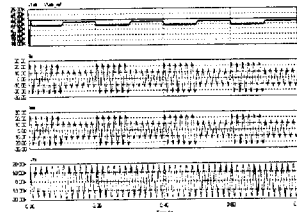


그림 15 전압 플리커 보상이 없는 경우의 $V_{ab,rms}$, $V_{ab,ref}$, I_{ca} , I_{sa} , V_{ta}

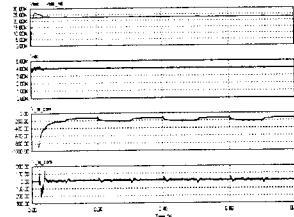
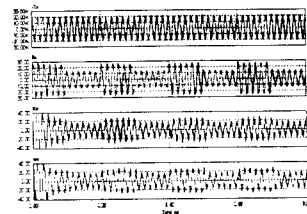


그림 16. PI+삼각파비교 전류제어기를 사용한 전압플리커 보상



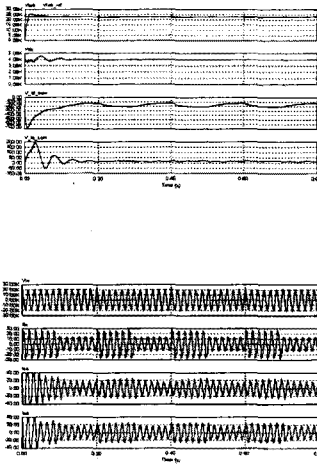


그림 17. 동기 전류제어를 사용한 전압플리커 보상

3. 결 론

전기로의 전압 플리커 및 고조파 보상을 위한 STATCON의 제어 알고리즘 개발을 위하여 DQ변환과 공간벡터에 대한 기술적인 설명을 하였으며 전압 플리커 보상, 직류전압 제어 및 고조파 보상을 위한 제어 알고리즘을 개발하였다. 또한 STATCON의 회전좌표계에서 DQ축 전류를 직접제어하는 공간벡터방식의 동기전류제어기와 PI + 삼각파 비교 전류제어기를 개발하여 비교 분석하였다. 전압 플리커 보상, 직류전압 제어 및 고조파 보상을 같이하는 경우 PI + 삼각파 비교 전류제어와 공간벡터방식의 동기전류제어기 모두 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- (1) 전력연구원, "FACTS기기 개발 I단계 연구", 중간보고서 pp.39-55, 1997
- (2) 문건우, 오관일, 윤중수, 윤석호, 이기선, 추진부, "유연송 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", 전력계통 연구회 춘계학술대회 논문집, pp.143-146, 1999
- (4) Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machi McGraw-Hill, Inc. pp.133-163, 1986
- (5) Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. R "Power Electronics", John Wiley & Sons, Inc. 1989