

STATCON 제어방식에 따른 특성 연구

한 영성*, 차 재덕*, 홍 순욱*, 이 학성*, 문 건우**, 윤 석호**
 효성중공업 기술연구소*, 한국전력공사 한국전력연구원**

A Study on the Characteristics of Control Schemes for STATCON

Y.S. Han*, J.D. Cha*, S.W. Hong*, H.S. Lee*, K.W. Moon**, S.H. Yoon**

R & D Institute., Hyosung Industries Co., Ltd.*, Korea Electric Power Research Institute, KEPCO**

Abstract - This paper presents STATCON(Static Condensor) control schemes for voltage regulation, power factor correction and harmonics mitigation. Each control scheme can be applied in the system depending on the system requirements. The 20KVA STATCON is developed and tested in the reduced system model for the verification of three different control algorithms. The results of proposed controls are compared for power factor correction and voltage regulation algorithms. For each algorithm, harmonic mitigation scheme is adopted as a part of control. Finally verification of STATCON for the transient response is implemented by voltage flicker test.

1. 서 론

기존의 계통용 보상장치에서와 마찬가지로 STATCON은 설치목적에 따라서 그 기능이 다르다. 송전계통에서는 송전 전류용량의 증대 및 계통 안정도향상을 위하여 역률제어를 하며, 배전계통에서는 장거리 배전망에 의한 전압강하 및 특수부하의 전압변동에 대하여 일정전압을 유지할 수 있도록 전압 regulation제어가 이용되고 있다. 한편 배전선로에서는 공장의 비선형부하에 의하여 고조파가 발생하며 이러한 고조파의 영향으로 인하여, 부하와 설비가 노화되며 설비운전에 장애를 일으킬 수 있다. 이와 같은 현상을 제한하기 위하여 Active Power Filter가 설치되어 사용되어왔다. 본 논문에서는 SVC의 일반적인 기능인 전압제어 혹은 역률제어에 Active Power Filter의 고조파제어알고리즘을 추가시켜 고조파제어와 전압 regulation제어를 동시에 만족시키는 STATCON을 DSP프로세서를 이용하여 제어기와 20KVA의 하드웨어를 설계하고, 배전계통의 현상을 모의할 수 있도록 계통을 구현하였으며 부하현상에 따른 STATCON의 제어특성과 성능을 실험결과를 통하여 제시하였다.

2. 본 론

2.1 전압안정도 개선(Voltage Regulation)

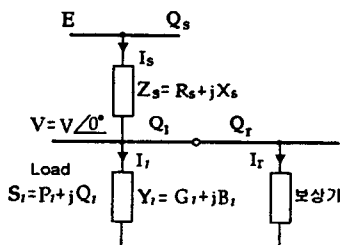


그림 1. STATCON과 부하가 설치된 간략한 선로모형

그림 1은 전압안정도 개선의 기능을 설명하기 위한 간략한 계통도이다. E는 모션전압을 나타내며 V는 부하단의 전압, Zs는 전압 강하를 야기시키는 선로 임피던스로 증가하였고 부하는 어드미턴스 YL로 나타내었으며 보상기는 제어대상 선로의 PCC(Point of Common Coupling)점에 병렬로 연결되어 있다. 그림 2의 Phasor도에 나타난 것과 같이 모션전압 E로부터 선로 임피던스 Zs에 의한 전압강하 ΔV로부터 만큼 감해진 것이 V임을 알 수 있고, ΔV는 Phasor도에 따라 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V = I_s R_s + j I_s X_s \quad (1)$$

보상기가 없을 경우 $I_s = I_L$ 이므로 ΔV는 선로전류 Is와 부하전류 IL는 방향이 같음을 알 수 있다.

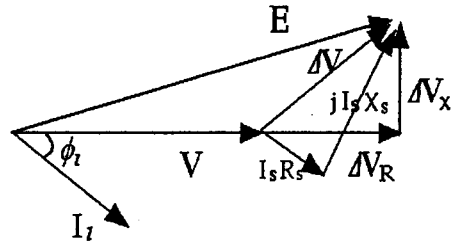


그림 2. 전압 안정화용 보상기가 없을 때 Phasor도

전압 regulation 기능의 보상기를 추가하였을 경우 다음 식이 성립한다.

$$I_s = I_L + I_r \quad (I_r \text{는 보상기전류}) \quad (2)$$

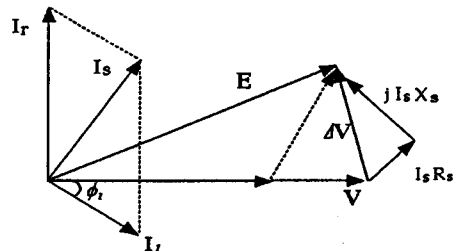


그림 3. PCC전압제어 Phasor도

그림 3은 시스템에 보상기가 추가되었을 경우의 Phasor도를 나타낸다. 부하가 일정한 상태에서 IL의 크기와 위상각이 고정되었다고 가정하면, 진상전류를 발생시키는 용량성 보상기를 추가함으로써 보상기전류 Ir의 크

기를 조절하여 I_s 의 위상각을 변화시킬 수 있다. 따라서 ΔV 의 크기와 위상각이 변화하는데, 이는 ΔV 의 조절로써 PCC전압 V 를 제어하여 전압안정도 개선 기능을 만족시킬 수 있음을 의미한다. 즉, STATCON에 의해 무효전류를 공급시켜 선로에 흐르는 전류의 위상을 변화시키면 PCC전압을 제어할 수 있다. 전압제어를 위한 알고리즘은 그림 4에 제시되어 있다. 전압제어를 위한 PI제어기를 거쳐 STATCON이 공급해야 할 무효전류 지령을 만든다. PI제어기에는 Wind-Up을 방지하기 위해 프로그램상의 리미터를 이용하였다.

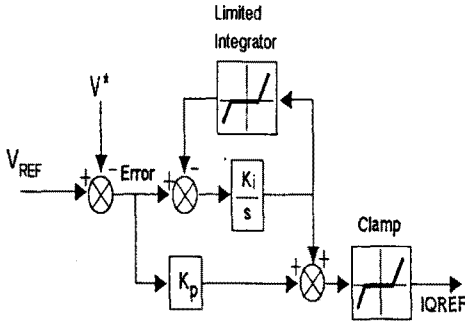


그림 4. PCC전압제어 알고리즘

2.2 역률개선(Power Factor Improvement)

그림 1에 나타난 계통도에서 PCC점의 역률을 개선하기 위하여 다음과 같은 제어방식을 채택하였다.

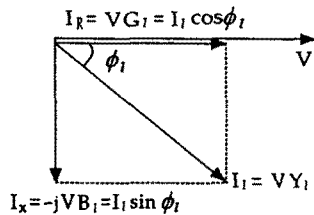


그림 5. 임의부하에서 전압 및 전류 Phasor도

부하전류 I_L 은 식 (3)과 같이 실수부 I_R 과 허수부 I_X 의 성분으로 표현되는데, 이에 대한 Phasor도를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 부하의 $R(G)$, $X(B)$ 의 성분에 의하여 ϕ_L 이 결정된다.

$$I_L = V(G_L + jB_L) = VG_L + jVB_L = I_R + jI_X \quad (3)$$

그림 6은 역률개선 기능의 Phasor도로서 선로전류 I_s 와 부하단 전압 V 의 위상이 동상이 되는 것을 알 수 있다. 부하는 유도성부하로써 지상전류가 흐르는 것을 가정하였고, 따라서 보상기의 전류는 용량성 진상전류가 되어야 효과적인 역률제어가 가능함을 알 수 있다. 그림 6에서, 어떠한 부하상태에서 부하전류 I_L 의 크기와 방향이 ⑤와 같이 정해졌다고 하면 이 때의 보상기전류 I_r 벡터의 크기와 방향은 ③과 같을 때에 전압 V 와 전류 I_s 의 동상을 유지할 수 있게 된다. 또한 이 상태에서 I_r 을 ①과 ②와 같이 크기를 조절하면 선로전류 I_s 를 진/지상으로 변화시킬 수 있음을 알 수 있다. 결국 보상기 전류 I_r 의 크기를 제어함으로써 역률제어가 가능하며, 본 절에서는 부하단이 지상전류일 경우의 예를 설명하고 있지만 용량성 부하일 경우도 보상기를 유도성으로

동작시킴으로써 역시 역률제어가 가능함을 알 수 있다.

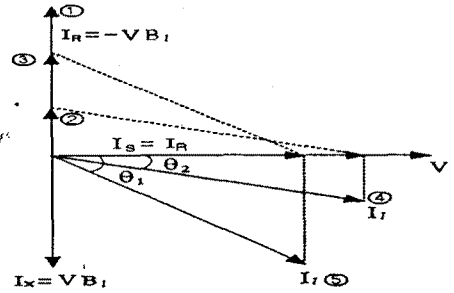


그림 6. 역률개선 기능의 Phasor도

2.3 고조파 제거 제어 원리연구

회전좌표계에서는 기본파만 직류성분으로 나타나고, 고조파는 교류성분으로 나타내게 된다. 따라서 측정된 교류성분을 지령으로 하여 고조파를 주입하면 그 영향을 완화할 수 있다. 그림 7에서 나타난 것과 같이 부하전류를 dq변환하여 High Pass Filter를 거치면, 교류성분을 추출할 수 있다. 부하전류 d축 교류성분에 DC Link 충전전류를 더하여 유효전류 지령을 만든다. q축 전류지령은 전압제어 전류지령을 부하전류 q축 교류성분에 더하여 무효전류 지령을 만든다. 이 방식의 장점은 회전좌표계에서 Filtering을 하기 때문에 위상 지연 없이 Filtering이 가능하다. DC Gain을 0으로 하여 기본파의 확실한 Filtering이 가능하고, Pole의 위치를 원점 가까이 놓을 수 있어서 위상지연을 최소화 할 수 있다.

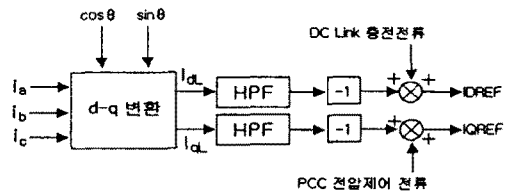


그림 7. 고조파 제어 알고리즘

2.4 실험 시스템 구성

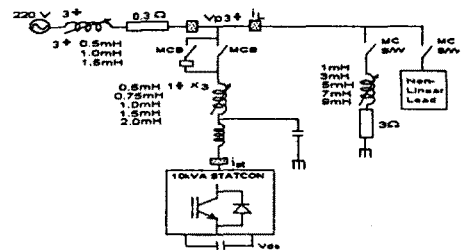


그림 8. 실험회로 구성도

전원은 3상 220V를 사용하였으며 입력단의 저항과 리액턴스는 선로 임피던스를 집중정수로 모델링한 것이다. 부하는 R/L로 구성된 선형유도성부하, 정류기로 구성된 비선형부하, 전압플리커시험에 사용된 광역 정출력 스피들 모터가 사용되었다. STATCON의 전력부는 IGBT를 이용한 전압형인버터로 고주파 PWM방식을 사용하였다. STATCON의 제어기는 TI사의 32 bit DSP프로세서를 이용하였으며 효성중공업에서 개발한 인버터전용 ASIC을 사용하여 구현하였다.

2.5 실험결과

2.5.1 CASE 1

Case 1은 STATCON을 설치하기전 상태에서 부하에 의한 전류와 전압의 파형으로 부하특성에 의한 고조파가 포함되었음을 알 수 있다. 고조파가 많이 포함되어 부하전압이 낮은 것은 선로임피던스가 크기때문으로 전압 THD가 10%이상으로 크게 유지되며 전압도 기준전압인 127V의 약 81%로 저압을 나타내고 있다. 역률은 0.81로 비교적 낮은 역률을 유지하였다.

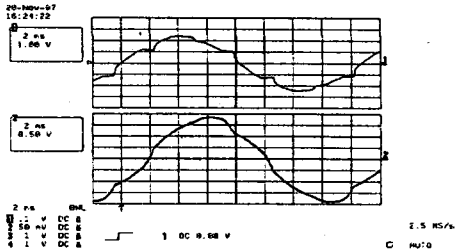


그림 9. 부하에 의한 상전압·전류 파형

2.5.2 CASE 2 (고조파 및 역률제어)

Case 2는 STATCON에 고조파 및 역률제어를 이용하여 제어하였을 경우의 전압, 전류의 파형이다. Case 1에 비하여 고조파함유율이 30%이상 감소되었으며 역률이 0.98으로 제어되었음을 확인할 수 있다.

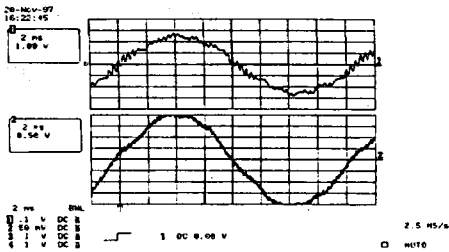


그림 10. 설치점의 상전압·전류 파형

2.5.3 CASE 3 (전압제어)

Case 3은 STATCON에 전압제어를 이용하였을 경우의 전압, 전류의 파형이다. 전압제어를 하여 전류가 진상으로 유지되며 역률이 0.7로 감소되었으나 전압은 기준값인 127V로 정확히 제어됨을 확인할 수 있다. 또한 고조파제어를 사용하지 않아도 빠른 PWM제어에 의하여 고조파 함유율도 개선됨을 확인하였다.

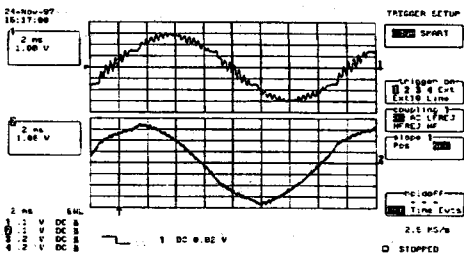


그림 11. 설치점의 상전압·전류 파형

2.5.4 Flicker 실험

그림 12와 그림 13은 전동기를 직입 기동하였을 때의 전압강하를 전압벡터에서 출력한 것으로 20V/div으로 표시되어 있다. 제어가 없을 경우 70V 정도의 전압강하가 발생하였는데 제어를 인가하게 되면 20V의 전압강하로 풀

리기가 제한되었다. 0.6초 가량 지속되던 모터의 과도상태가 0.3초 이하로 떨어졌는데, 그 이유는 모터가 과도상태동안 전압 강하량이 감소하였으므로 충분한 토크를 발생할 수 있기 때문이다. 전압강하가 0이 되지 못하는 이유는 IGBT의 전류 제한값에 의하여 STATCON이 공급할 수 있는 최대 전류 제한에 걸려있기 때문이다

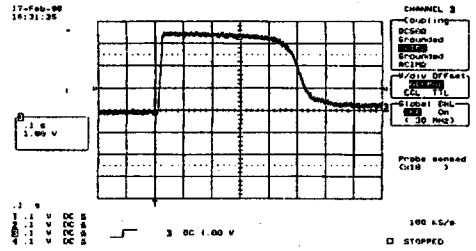


그림 12. 제어가 없는 경우 플리커에 의한 전압강하

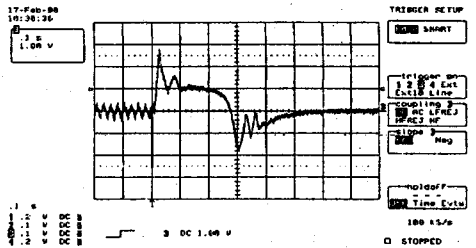


그림 13. 제어한 경우 전압강하변화

표 1. 각 Case별 실험결과 비교

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
	없을 때	고조파 & 역률	전압
전압THD(%)	10.51	6.99	7.84
전압(V)	103.29	112.53	127.3
전류THD(%)	7.21	4.55	5.1
전류(A)	33.57	36.58	57.49
PF	0.81	0.978	0.7
kVA(각상당)	3.47	4.12	7.32

3. 결론

실험 시스템에 대하여 고조파 전류제어와 역률제어를 한 경우 고조파 저감과 역률개선 효과가 현저하였으며, 전압제어를 한 경우 일정전압이 유지됨과 동시에 고조파에도 유사한 효과를 보였다. 또한 Flicker전압에 대한 STATCON의 속응성 및 보상특성에 관한 실험을 실시하였다. 실험에서는 Flicker를 모의하기 위해 광역 정출력 스피들 모터를 직입 기동하여 돌입전류가 발생하도록 하였다. 실험결과에서 알 수 있듯이 충분한 속응성 및 보상특성을 보여 주었다.

[참고 문헌]

- [1] Colin Schauder, Harshad Mehta, "Vector Analysis and Control of Advanced Static Var Compensators", IEEE Proceedings, Vol. 140, No. 4, July 1993
- [2] Spindle & Servo Motor/Driver, 선도기술개발사업 기술보고서, 1994
- [3] 1MVA IGBT형 STATCON개발, 효성중공업 기술연구소 기술보고서, 1997