

송전용 무효전력보상기의 제어장치 설계

한 병문, 최 대길*, 백 승택
 명지대학교 전기공학과

Control System Design for Transmission STATCON

Byung-Moon Han, Dae-Gil Choi*, Seung-Tak Baek
 Myung ji University Dept. of Electrical Engineering

Abstract - This paper describes a control system design for the transmission STATCON by applying a non-linear feedback. A mathematical model for the STATCON was derived by using a 3-phase equivalent circuit and its controller was designed by a numerical computation. The verification of newly designed controller was performed by EMTF simulation and scaled hardware model test. The test results show that the controller using non-linear feedback skim controls its reactive power properly without large transients.

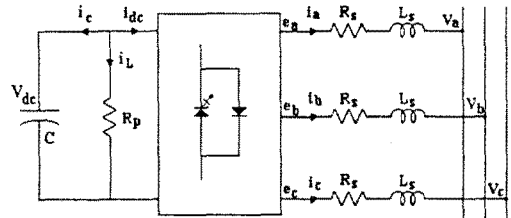


그림 1. 송전계통과 STATCON의 등가회로

1. 서 론

계통에서 소요되는 무효전력을 신속, 정확하게 제어하는 장비인 STATCON (static condenser) 은 전압원인버터식 무효전력보상기로 송전용과 배전용으로 구분된다.[1,2,3] 배전용은 인버터가 PWM방식으로, 송전용은 다중펄스방식으로 출력 전압을 형성한다. 배전용의 경우는 점호각과 변조율을 조절하여 출력전압의 크기와 위상의 분리제어가 가능하나 송전용의 경우는 출력전압은 점호각 하나를 조절하여 직류링크전압을 조절하므로써 출력전압의 크기와 위상을 제어한다. 따라서 송전용의 경우 제어기는 단순 PI제어기만으로는 효과적인 출력전압 제어가 불가능하다.

본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 비선형보상제어기를 설계하고 그 성능 검증을 위해 송전용 무효전력보상기의 하드웨어 축소모형을 제작하고 무효전력 제어성능을 실험적으로 확인하였다.[4]

2. 본 론

2.1 STATCON의 제어시스템

그림 1은 STATCON이 송전선로와 연결된 상태를 3상 등가회로로 나타낸 것이다. 이 그림에서 직렬인덕턴스 Ls는 실제의 전력용 변압기의 인덕턴스를 나타내고, 직렬저항 Rs는 인버터와 변압기의 전도 손실을 나타낸다. 또한 캐패시터와 병렬로 연결된 저항 Rp는 인버터의 스위칭 손실을 나타낸다.

이 등가회로로 부터 교류와 직류측의 회로방정식을 유도하고 동기회전좌표에 대해 d-q변환을 수행하면 다음 방정식이 얻어진다.

$$p \cdot \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \\ i'_{dc} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \\ i'_{dc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\omega_b |v'|}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R'_s \omega_b}{L} & \omega & \frac{k \omega_b \cos(\alpha)}{L} \\ -\omega & -\frac{R'_s \omega_b}{L} & \frac{k \omega_b \sin(\alpha)}{L} \\ -\frac{3}{2} k C' \omega_b \cos(\alpha) & -\frac{3}{2} k C' \omega_b \sin(\alpha) & -\frac{\omega_b C'}{R_p} \end{bmatrix}$$

여기서, p=d/dt이고 $\omega = d\theta/dt$ 이다.

효과적인 모델링을 위해 모든 변수들을 송전계통을 기준으로 한 퍼유니트(per unit)로 환산해야 한다. 각 변수들의 정의는 다음과 같다.

$$L' = \frac{\omega_b L_s}{z_{base}}; C' = \frac{1}{\omega_b C z_{base}}; R'_s = \frac{R_s}{z_{base}}; R'_p = \frac{R_p}{z_{base}}$$

$$i'_x = \frac{i_x}{z_{base}}; v'_x = \frac{v_x}{z_{base}}; e'_x = \frac{e_x}{z_{base}}; z_{base} = \frac{v_{base}}{i_{base}}$$

식 (1)에서 인버터의 d-q변환된 출력전압 e_d 와 e_q 는 고조파를 무시할 경우 다음 수식으로 표현된다.

$$e_d = k v_{dc} \cos(\alpha) \quad (2)$$

$$e_q = k v_{dc} \sin(\alpha) \quad (3)$$

여기서, k는 인버터의 스위칭방식과 관계된 계수로

의 PWM변조법을 사용하였다. 3고조파 주입방식은 기준사인파에 그 크기가 1/6배인 3고조파를 합하여 이를 캐리어와 비교하는 방식이다. 이 방식으로 사용한 결과 예전의 방식보다 출력 전압, 전류의 파형이 보다 더 개선됨을 알 수 있었다. 스위칭주파수는 제어기의 동작주기(326 μ s)를 감안하여 3kHz로 하였다. 그림 5는 STATCON의 하드웨어 축소모형의 전체 회로도이다.

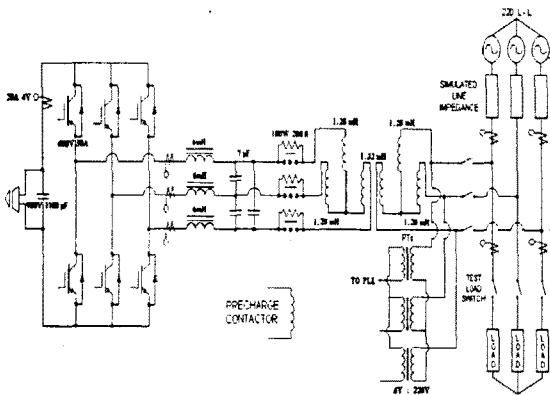


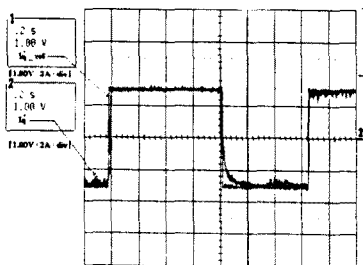
그림 5. 하드웨어 축소모형 전체 회로도

그림 6-a는 제작한 STATCON의 출력 무효전류 파형으로 기준 무효전류 I_{q_ref} 에 제안된 제어기가 무효전류를 적절히 제어함을 보여주고 있다.

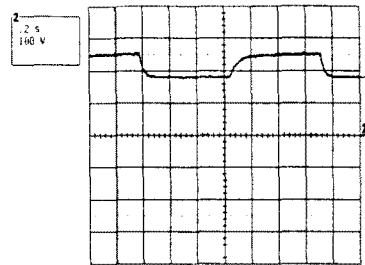
그림 6-b는 직류 캐패시터의 전압변화를 나타낸 것인데 정상상태에서 진상 무효전류를 공급하기 위해 250V까지 충전하였다가 다시 지상 무효전류를 공급하기 위해 180V까지 하강함을 보여주고 있다. 실제 장치에서 진상-지상 천이 시간은 직류캐패시터의 용량과 필터용 리액터의 용량에 크게 좌우된다. 직류캐패시터 용량이 과도하게 설계되면 천이 시간이 길어지고 이와 반대로 적게 설계되면 인버터 출력에 리플성분이 존재하게 된다.

그림 6-c는 기준 무효전류의 변화에 따른 점호각의 변화인데 직류 캐패시터의 충전을 위해 점호각이 5.0° 까지 상승하였다가 지상무효전류로 전환하면서 -4.5° 로 변화하는 것을 알 수 있다.

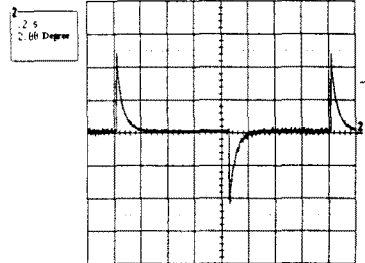
그림 6-d는 연결점에서의 계통전압과 STATCON 무효전류 파형을 나타낸 것으로 지상영역에서 진상영역으로의 천이가 적절히 잘 이루어짐을 보여주고 있다.



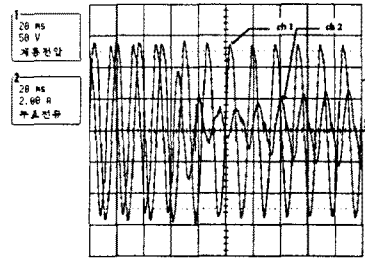
(a) 출력 무효전류



(b) 직류 캐패시터의 전압변화



(c) 점호각의 변화



(d) 계통 전압과 무효전류

그림 6. 실험 결과

3. 결 론

본 연구에서는 송전용 무효전력보상기에 대해 비선형 보상이 적용된 제어장치를 제안하고 이를 시뮬레이션과 하드웨어 축소모형의 실험을 통해 그 성능을 검증하였다. 제안된 제어 시스템은 실 규모 보상기의 제어장치설계에 필요한 중요한 데이터를 얻는데 유용하리라 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] L. Gyugi, "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits", IEEE Trans. on Industry Application, IA-15, NO. 5, Sept./Oct. 1979, pp. 521-532
- [2] G. Joos, L. Moran, P. Ziogas, "Performance Analysis of a PWM Inverter Var Compensator", IEEE Trans. on PE, Vol. 6, No. 3, July, 1991, pp. 521-532.
- [3] C. W. Edward, et al, "Advanced Static Var Generator employing GTO Thyristors" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, NO. 4, Oct. 1988, pp. 1622-1627.
- [4] 한병문, "전압원인버터방식 송전용 무효전력보상기의 제어시스템 설계", 전력전자학회 창립기념 학술발표회 논문집, pp 89-92, 1996.6.