

불평형보상을 고려한 수용가 STATCOM의 역상분 및 무효전력 보상

임수생* , 이은용* , 김준호* , 김홍권**
 충남대* , 한국전력공사**

Both Negative-sequence and Reactive Power Compensation of Customer STATCOM considering the Unbalance Compensation

Su-Saeng Lim* , Eun-Woong Lee* , Jun-Ho Kim* , Hong-Kwon Kim**
 Chungnam Nat'l Univ.* , KEPCO**

Abstract - In this paper, a static synchronous compensator(STATCOM) is proposed in order to compensate both negative-sequence and reactive power. The STATCOM control unit is designed considering the proposed compensation scheme for the unbalanced loads. As a result, the effectiveness of the STATCOM for compensating both negative-sequence and reactive power is verified by computer simulations.

STATCOM의 제어구성도는 그림 2와 같다. STATCOM의 제어시스템은 직류커패시터 전압을 일정하게 유지하는 직류링크전압 제어기, 부하전류로부터 보상전류명령을 계산하는 전류명령 계산회로, 빠른 동특성을 갖는 예측전류제어기로 된 컨버터전압 지령 연산회로, 그리고 전압선형이용률이 높은 공간벡터 PWM 회로로 구성된다.

1. 서 론

만일 배전계통에 부하 불균형이 발생하면, 수전전압이 불평형하게되어 역상분 전류가 흐르는 등 전력 품질을 떨어뜨리게 된다 [1].

STATCOM은 기존의 조상설비보다 시스템의 동특성을 실시간으로 빠르게 보상함으로써 낮은 역률을 개선하거나 부하 불평형을 완화시킬 수 있어 전력품질의 저하로부터 수용가를 보호할 수 있다 [2,3].

본 연구에서는 역상분 출력 영향을 최소화하기 위한 직류전압제어기를 설계하며 역상분 전류를 검출하기 위해 벡터위스 저역통과필터를 사용함으로써 불평형보상을 고려한 STATCOM 제어를 제안한다.

그리고, STATCOM의 역상분 및 무효전력 동시보상에 대한 시뮬레이션 결과를 제시한다.

2. 불평형 보상을 고려한 STATCOM 제어

STATCOM은 출력 전압의 크기와 위상을 신속하게 제어할 수 있는 등가전압원을 변압기 누설 리액턴스를 통하여 전원에 진·지상의 무효전력을 공급하는 장치이다. STATCOM은 소용량의 직류충전용 콘덴서를 DC 링크로 하는 3상 인버터로 구성되며, 인버터의 3상 출력전압은 전원전압과 위상이 일치하도록 동작한다. 그림 1은 STATCOM이 수전단과 연결된 단상 등가회로를 나타내며, STATCOM의 컨버터와 교류전원 사이에 교환되는 무효전력의 양은 컨버터 출력전압의 크기로 조절되고, 컨버터와 교류전원사이의 유효/무효전력 교환은 컨버터 출력전압과 교류전압 사이의 위상각을 변경시키는 방법으로 제어가능하게 된다.

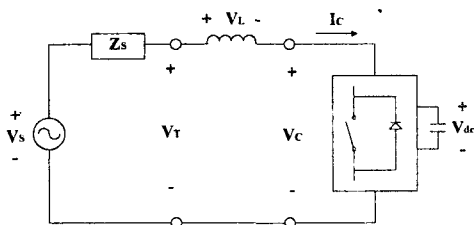


그림 1 수용가용 STATCOM의 단상등가회로

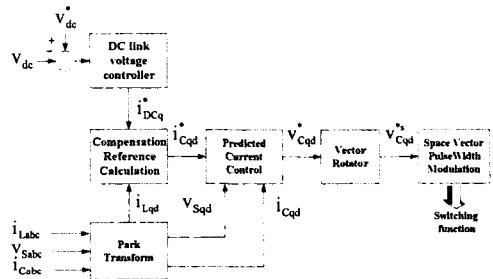


그림 2 STATCOM의 제어구성도

2.1 직류링크전압제어

직류링크전압 제어기는 STATCOM의 작동에서 발생하는 컨버터 스위칭 손실과 커패시터 유전체손의 합에 해당하는 유효전력을 공급하여 직류링크 전압을 일정하게 유지하는 역할을 한다. 직류전압 제어기는 출력 전류 중 유효전류인 q축 전류를 제어하여 직류커패시터에 유효전력을 공급하거나 방출하게 하므로서 직류링크 전압을 안정시킨다.

그런데, STATCOM이 역상분 전류를 출력하여 불평형을 보상할 경우 직류전압의 맥동에 의해 출력이 고조파가 함유되어 STATCOM의 보상능력을 저하시킬 수 있다. 따라서, 직류전압의 맥동이 역상분전류 출력에 미치는 영향을 방지하기 위한 직류전압 제어기의 설계가 필요하다.

qd축 직류링크단 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = f_{q1}i_{DCq} + f_{d1}i_{DCd} \quad (1)$$

여기서, f_q, f_d : qd축 상전압 스위칭 함수

식 (1)을 선형화하면 직류링크전압의 동요방정식 (2)와 같이 된다.

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = f_{q0} \Delta i_{DCq} + f_{d0} \Delta i_{DCd} + i_{DCq0} \Delta f_q + i_{DCd0} \Delta f_d \quad (2)$$

$$\approx f_{q0} \Delta i_{DCq} + f_{d0} \Delta i_{DCd}$$

PI 직류전압제어기의 경우, 증분모델은 그림 3과 같다.

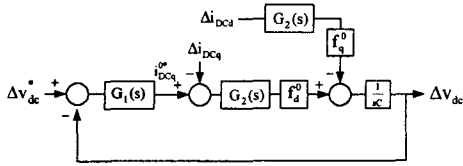


그림 3 직류전압제어기의 증분 모델

직류전압제어기와 역상분전류 출력사이의 상호작용을 방지하기 위해, 직류전압제어기에 의해 부과되는 시스템 자연주파수 ω_n 는 q 축 역상분 부하전류의 최소 주파수보다 작아야 한다.

2.2 역상분 전류 검출

불평형 부하의 역상분 전력을 보상하기 위해서는 부하의 역상분전류를 검출하여야 하는데, 샘플링한 q 축 부하전류로부터 역상분전류를 검출하기 위해 사용되는 저역 통과필터(LPF)는 차단주파수가 60[Hz]이어야 하므로 본 연구에서는 40[Hz] 디지털 버터워스 LPF를 사용하였다. 예측전류제어를 사용할 때, LPF의 과도시간이 STATCOM의 보상전류명령 과도시간의 대부분을 소모한다. 그림 4에서 디지털 버터워스 LPF의 스텝 응답이 1사이클 이내에 최종값의 100%에 도달하므로 STATCOM이 1사이클 이내의 빠른 전류보상능력을 가짐을 알 수 있다.

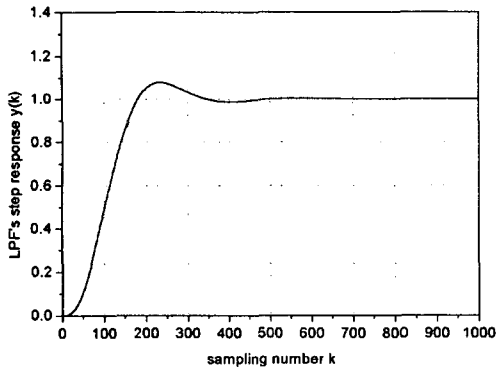


그림 4. 디지털 버터워스 LPF의 스텝 응답

3. STATCOM의 역상분 및 무효 전력 보상

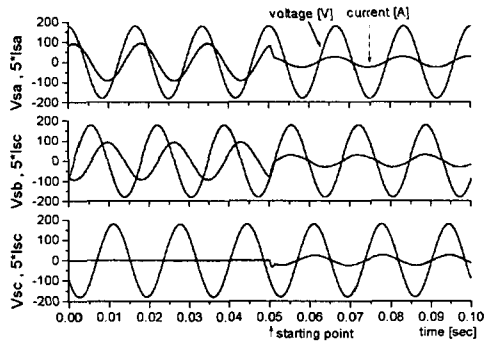
STATCOM과 시험 부하의 사양은 표 1과 같다. 시험 부하로는 표 1과 같이 부하불평형이 가장 심한 단상불평형 부하로 정하였는데, 단상 부하는 a 상과 b 상에 연결되어 있다. 단상부하의 a 상 및 b 상 선전류의 크기는 같고 위상이 반대가 되며 c 상 선전류는 0이 되고 정상분 전류와 역상분 전류의 크기는 같고 a 상 선전류 크기의 $1/\sqrt{3}$ 배이다. 시험부하의 불평형률 U 는 식 (3)에 의해 150%가 된다.

$$U = \frac{\text{평균전류로부터 최대 편차}}{\text{전류의 평균값}} \quad (3)$$

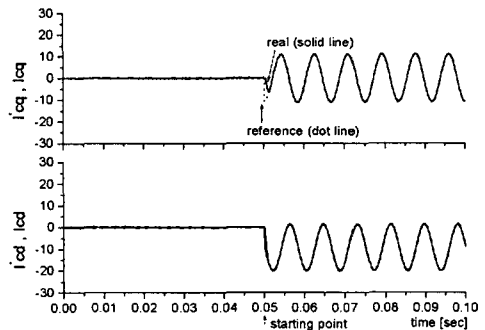
표 1. 수용가용 STATCOM과 시험 부하의 사양

구분	파라미터	기호	값
회로부	보상용량	S_C	10 [kVA]
	정격전압	V_S	220 [V]
	리액터	L	0.5 [mH]
	직류 커패시터	C	5,000 [μ F]
	직류버스 전압	V_{dc}	400 [V]
제어부	직류버스	K_{pdc}	$K_{pdc} = 0.114$
	PI 제어기	K_{idc}	$K_{idc} = 5.076$
	샘플링 주기	T_s	67 [μ s]
시험부하	정격용량	S_L	4 [kVA]
	불평형률	U	150 [%]
	역률	PF	lag 86.6 [%]

그림 4에서 0.05초 이후에 보상을 시작하며, 그림 4(a)는 전원전압과 전원전류를, 그림 4(b)는 q 축 보상전류를, 그림 4(c)는 직류커패시터 전압과 충전전류 명령을 나타낸다. 그림 4(a)에서 보상전(0.05초 이전)에는 a 상과 b 상의 위상차가 180° 이고 c 상 전원전류가 0이 되어 불평형이 150%로 심하였는데 보상후(0.05초 이후)에는 불평형이 감소하고 동시에 기본파의 역률이 개선되었음을 알 수 있다. 그림 4(b)에서, q 축 보상전류는 역상분 유효전류에 해당하는 제 2 고조파 전류가 되고, d 축 보상전류는 부하불평형모드와는 달리 정상분 및 역상분 무효전류의 합인 직류분과 제 2 고조파 전류가 됨을 알 수 있다. 그림 4(c)는 컨버터의 직류커패시터 전압을 나타내고 평형 무효전력보상의 경우와는 달리 STATCOM이 역상분 유효전류를 출력함으로써 직류커패시터 전압이 전원주파수의 2배로 맥동하게 되는데, 직류커패시터 전압의 맥동으로 인해 STATCOM 출력전압은 3배차 고조파를 함유하게 되어 보상능력이 약간 저하하게 된다.



(a) 전원전압과 전원전류



(b) q 축 보상전류 명령과 보상전류

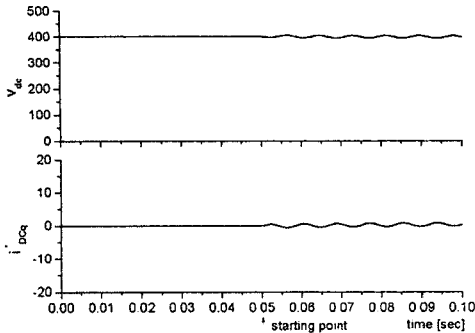
3. 결 론

역상분 출력 영향을 최소화하기 위한 직류전압제어기를 설계하며 역상분 전류를 검출하기 위해 디지털 LPF를 사용함으로써 불평형보상을 고려한 STATCOM 제어를 제안하였다.

수용가 STATCOM의 불평형부하 보상의 유효성을 입증하기 위하여, 불평형률이 가장 심한 단상 부하를 시험 부하로 선정하여 보상결과를 제시하였다. 시뮬레이션 결과, 3상 불평형 부하의 역상분전력과 무효전력을 동시에 보상함으로써 부하불평형으로 인한 전원전압의 불평형을 방지할 수 있으며 동시에 역률까지 개선할 수 있음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] San-Yi Lee, Chi-Jui Wu, "On-line Reactive Power Compensation Schemes for Unbalanced Three Phase Four Wire Distribution Feeders", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, pp. 1958-1965, Oct. 1993.
- [2] Su-Saeng Lim, Eun-Woong Lee, et al, "Private-substation STATCOM for Improving the Power-factor and Filtering the Harmonics", ICEE '98, Vol. 1, pp. 938 -941, July 21-25, 1998.
- [3] 이은용, 임수생 외 6인 "STATCOM을 이용한 수용가의 역률개선과 무효전력 불평형 보상", 최종보고서, 기초 전력공학공동연구소, 1999.



(c) 직류커패시터 전압과 커패시터충전 전류명령
그림 4. 3상불평형부하의 역상분 및 무효 전력 보상

3상 불평형 부하를 보상할 때의 순시유효전력, 순시 피상전력의 변화를 그림 5에 표시하였다.

부하불평형 및 무효전력 동시보상모드인 그림 5에서, 보상후 2배차 고조파인 역상분 순시유효전력이 제거되어 정상분 순시유효전력만이 공급되며, 정상분 순시 무효전력과 역상분 순시무효전력이 모두 제거되어 순시 무효전력이 거의 0이 되었다.

STATCOM을 적용한 불평형 단상부하의 역상분전력 및 무효전력 동시 보상 결과를 표 2에 요약하였다.

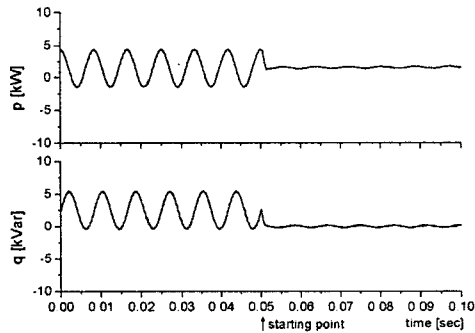


그림 5. 전원측 순시전력 보상결과

표 2. 3상 불평형 부하의 보상 결과

동작모드		보상전	보상후
보상결과	정상분	1.47	1.48
	역상분	2.90	0.18
유효 전력 [kW]	정상분	2.49	0.01
	역상분	2.90	0.25
무효 전력 [kVar]	정상분	lag 59.3°	lag 0.5° bclow
	역상분	150.0	17.2
역률[deg]			
불평형률[%]			
보상시간[ms]		-	1.5