

자가변전설비용 STATCOM의 수전단 역률개선과 고조파 전류 필터링

오영웅*, 이은웅*, 임수생*, 김석곤**, 이승학**
 충남대*, 전력연구원**

Receiving-end's power factor improvement and harmonic current filtering using the private-substion STATCOM

Oh, Young-Woong*, Lee, Eun-Woong*, Lim, Su-Saeng*, Kim, Seok-Gon**, Lee, seung-hak**
 Chung Nam Univ*, KEPRI**

Abstract - STATCOM can compensate industrial load's reactive power and filter the harmonic of nonlinear load's with the rapid dynamic response. In this paper, STATCOM is modelled to synchronous rotating coordinate by circuit dq transformation, and space vector PWM method is applied for broad voltage modulation. Also predict current controller is used for harmonic current filtering.

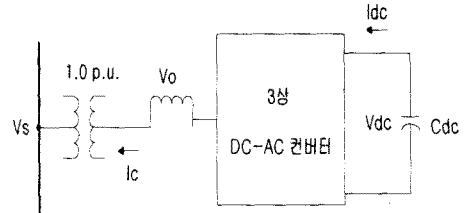


그림 1 자가변전설비용 STATCOM의 개략도

1. 서론

STATCOM은 교류 전력시스템에서 발생하는 무효전력을 효율적으로 실시간 보상하기 위한 전력 기기로 송전용, 배전용, 자가변전설비용으로 구분된다.[1,2] 본 논문에서는 자가변전설비용 STATCOM에 대해 간이 해석모델을 설정, 동기좌표계에서 dq변환하여 모델링하고 선형제어영역이 넓은 공간벡터 PWM방식을 사용하여 컨버터에 의한 고조파의 발생을 최소화하고자 한다.[3] 또한 고조파의 위상지연보상을 적용한 예측전류제어기를 설계하여 시스템의 상태에 따라 최적에 가까운 전류제어가 가능하게 할 것이다.

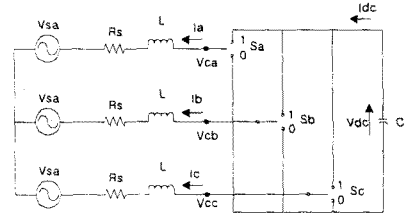


그림 2 STATCOM의 간이 해석 모델

2. STATCOM의 동기좌표계 모델링

STATCOM은 자가변전설비 버스에 병렬로 강압형 변압기를 통해 연결되는 3상 전압형 컨버터로 구성되어있다. 이 전압형 컨버터는 변압기의 누설 리액턴스 또는 부가의 저주파 대역필터를 통해 직류전압을 교류선로와 동기된 3상 교류전압으로 변환한다. 그림 1은 자가변전설비용 STATCOM의 개략도이다. STATCOM을 모델링하기 위해 그림 1의 회로를 간략화하여 그림 2와 같이 나타내었다. 그림 2의 abc상의 회로를 동기좌표계로 모델링하면[4], dq축 전류와 직류 링크 전압의 관계로 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{cqe} = -L \frac{di_{qe}}{dt} - R_s i_{qe} - \omega i_{de} + V_{sqe} \quad (2)$$

$$V_{cde} = -L \frac{di_{de}}{dt} - R_s i_{de} - \omega i_{qe} + V_{sde} \quad (3)$$

여기서, ω 는 전원전압의 각주파수이다. 전류의 샘플링 주기 T_s 가 충분히 짧다고 하면 $(k+1)$ 번째 샘플링구간에서 k 번째 전류오차를 0으로 만들 전압벡터를 이산시간 영역에서 표현하면 식(4), 식(5)와 같다.

$$V_{cqe}(k) = -L \frac{i_{qe,ref}(k+1) - i_{qe}(k)}{T_s} - R_s i_{qe}(k) - \omega i_{de}(k) + V_{sqe}(k) \quad (4)$$

$$V_{cde}(k) = -L \frac{i_{de,ref}(k+1) - i_{de}(k)}{T_s} - R_s i_{de}(k) - \omega i_{qe}(k) + V_{sde}(k) \quad (5)$$

여기서 첨자 ref는 전류명령을 나타내며, $i_{qe,de}(k)$ 은 k 번째 샘플링에서의 dq축 캐환전류이고, $V_{cqe,de}(k)$ 는 예측한 전압명령벡터이다.

3.2 보상기준전류의 위상보정

부하전류가 불규칙해서 $(k+1)$ 번째의 전류명령벡터 $i_{qe,de,ref}(k+1)$ 을 예측할 수 없으므로, 대신 $i_{qe,de}(k)$ 가 사용된다. 이것은 실제전류와 기준전류 사이에 한 샘플링 주기만큼의 오차가 발생하는 원인이 된다. 따라서, 샘플링 지연에 따른 STATCOM의 보상특성의 저하를 막기위한 보정이 요구된다.[5] 보상 대상의 주파수 성분을 $(6m \pm 1)$ 이라 할 때 $(6m+1)$ 차 성분은 dq 정지좌표축상에서 반시계방향으로 회전하는 정상분으로, $(6m-1)$ 차 성분은 시계방향으로 회전하는 역상분으로 표현할 수 있다. 따라서, 정방향 회전성분인 정상분에 대해서는 $(6m+1)\omega T_s$ 만큼, 그리고 역방향 회전성분인 역상분에 대해서는 $-(6m-1)\omega T_s$ 만큼 정지좌표축상에

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{qe}}{dt} \\ \frac{di_{de}}{dt} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & -\omega & 0 \\ \omega & -\frac{R_s}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qe} \\ i_{de} \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sqe} \\ V_{sde} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} V_{dc} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} V_{dc} \\ \frac{1}{C} i_{qe} & \frac{1}{C} i_{de} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{qe} \\ S_{de} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, S_{qe} 와 S_{de} 는 q축 및 d축의 스위칭 함수이고, 첨자 e는 동기좌표계의 dq변수임을 나타낸다.

3. 위상지연보상을 적용한 예측전류제어기

3.1 예측 전류제어기

인버터 출력 전압명령을 미리 예측하여 현재의 전류오차를 다음 샘플링구간에서 0으로 만드는 전류제어방식을 예측전류제어라 한다. 먼저, 현재 k 순간의 컨버터 전압방정식을 dq축 변수로 구하면 식(2),식(3)과 같다.

서 정·역방향 성분을 각 회전방향으로 한 샘플링만큼 보정해줌으로써 오차를 제거할 수 있다.

4. STATCOM의 제어 시스템

STATCOM의 제어시스템은 그림 3과 같다. 무효전력과 고조파를 발생하는 부하전류를 동기좌표축으로 변환하여 q축 전류의 기본파와 직류링크전류로부터 단일 역률이 되도록 보상전류를 얻는다.

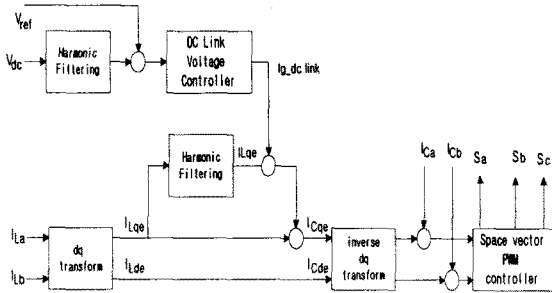


그림 3 STATCOM의 제어시스템

4.1 직류전압 제어기

STATCOM 직류축 전압은 높을수록 고조파 제거능력이 향상된다.[6] 그러나 그 최대치는 컨버터 정격전압에 의해 제한되므로 적절한 값으로 유지해야 한다. 따라서, 컨버터 스위칭에 의한 손실과 커패시터의 누설전류에 의해 방전되는 등의 STATCOM의 유효 손실만큼 공급하여 직류링크 전압을 유지하는 역할을 한다.

4.2 STATCOM의 고조파 제거

무효성분과 고조파가 포함된 부하전류를 식(6)과 같다고 하자.

$$i_{Lk} = I_p \cos\left\{\theta - \frac{2(k-1)}{3}\right\} + I_q \sin\left\{\theta - \frac{2(k-1)}{3}\right\} + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cos\left\{n\left(\theta - \frac{2(k-1)}{3}\right) - \phi_n\right\} \quad (6)$$

여기서, k는 1, 2, 3으로 3상의 a, b, c를 나타내며, ϕ_k 는 k고조파의 역률각이다. 그러면, 전원전류가 식(7)과 같이 되게 하기 위해 능동 필터에서는 식(8)과 같은 전류를 공급해야 한다.

$$i_{Sk} = I_p \cos\left\{\theta - \frac{2(k-1)}{3}\right\} \quad (7)$$

$$i_{ik} = i_{Sk} - i_{Lk} = -I_q \sin\left\{\theta - \frac{2(k-1)}{3}\right\} - \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cos\left\{n\left(\theta - \frac{2(k-1)}{3}\right) - \phi_n\right\} \quad (8)$$

위의 관계를 dq축상에서 표현하면, dq축 전류가 식(9)와 같이 공급될때, 전원전류는 식(10)과 같이 q축 전류는 부하전류의 기본파 성분만이 존재하고, d축 전류는 0이 되므로 고조파가 무효성분전류와 동시에 보상될 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{Ca} &= i_{Sa} - i_{La} = i_{La} - \overline{i_{La}} + i_{q,dcLink} \\ i_{Cd} &= i_{Sd} - i_{Ld} = i_{Ld} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} i_{Sa} &= \overline{i_{La}} \\ i_{Sd} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

5. 시뮬레이션 결과 및 검토

5.1 무효전력량이 유도성인 경우

STATCOM의 기준치와 회로 파라미터는 표1과 같다. 그림 4-a는 전원 선전압, 선전류, 고조파가 포함된 유도성 부하전류, a상 전류명령, a상 전류를 보인다. 유도성의 무효전력을 보상하여 수전단의 역률이 1로 유지됨을 알 수 있다. 그림 4-b에 a상 전압명령벡터와 공간벡터 PWM a상 출력 상전압을 보이고, 그림 4-c에 dq축 전류명령과 선전류를 나타내었다. 그림 4-d는 예측전류제어를 사용하여 고조파를 필터링함으로 THD가 29.6%에서 16%로 54%정도 감소함을 알 수 있다.

표 1 STATCOM의 기준치와 회로 파라미터

정격선간전압	208 [V]
저항 Rs	0.34Ω
리액터 L	0.5mH
직류링크 커패시터	500uF
직류링크 커패시터 전압기준	330 [V]
직류링크 커패시터	Kp=0.01
전압 PI 제어기	Ki=0.5
스위칭 주파수	10kHz
샘플링 시간	1usec
부하 상전류 첨두치	16.6 [A]
무효전력	유도성 = -30° 용량성 = +30° 40차 이하
고조파 부하	$(I_k = \frac{ I_1 }{k})$

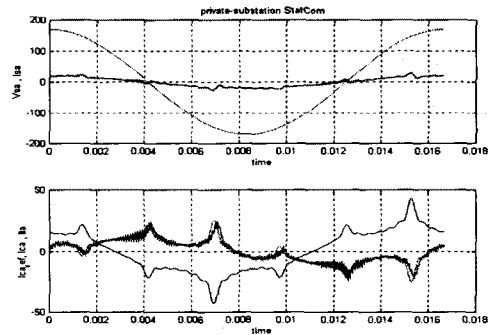


그림4-a. a상에 대한 전원선전압(Vsa),전원선전류(Isa) 부하전류(ILa), 전압명령(Icref), 전류(Ica)

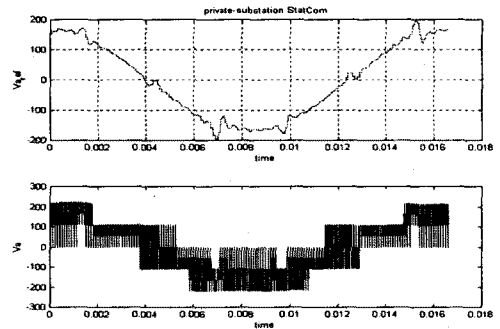


그림4-b. a상에 대한 전압명령벡터(Va_ref) 출력 상전압(Va)

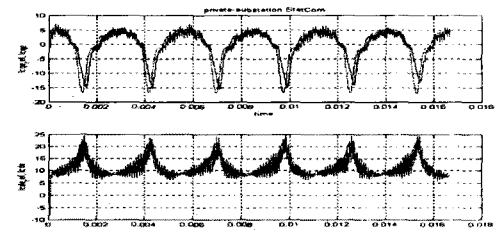


그림4-c. q축 전류명령(Icqe_ref),d축 전류명령(Idce_ref) q축 선전류(Icqe), d축 선전류(Idce)

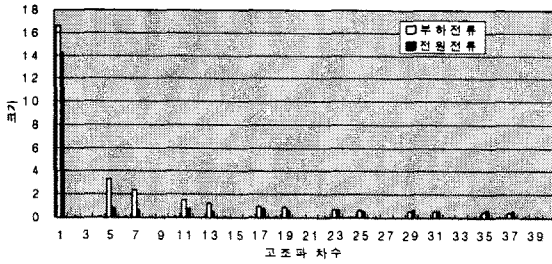


그림4-d. 부하전류의 고조파 스펙트럼과

전원전류의 고조파 스펙트럼

5.2 무효전력량이 용량성인 경우

그림 5-a는 전원 선전압, 선전류, 고조파가 포함된 용량성 부하전류, a상 전류명령, a상 전류를 보인다. 용량성의 무효전력을 보상하여 수전단의 역류이 1로 유지됨을 알 수 있다. 그림 5-b에 a상 전압명령벡터와 공간벡터 PWM a상 출력 상전압을 보이고, 그림 5-c에 dq축 전류명령과 선전류를 나타내었다. 그림 5-d는 예측전류제어를 사용하여 고조파를 필터링함으로 THD가 29.6%에서 15.34%로 51.8%정도 감소함을 알 수 있다.

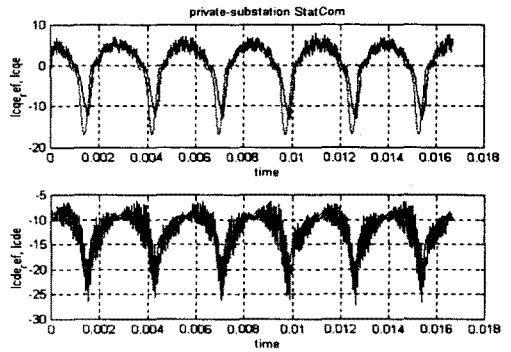


그림5-c. q축 전류명령(Icq_ref),d축 전류명령(Icd_ref)
q축 선전류(Icq), d축 선전류(Icd)

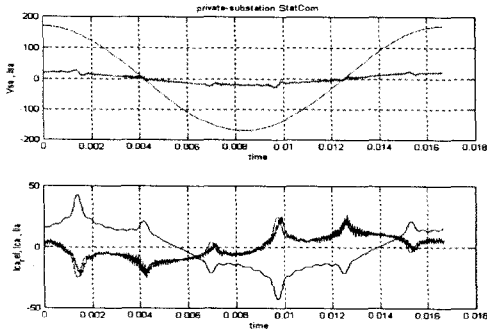


그림5-a. a상에 대한 전원선전압(Vsa),전원선전류(Isa)
부하전류(Ia), 전압명령(Icaref), 전류(Ica)

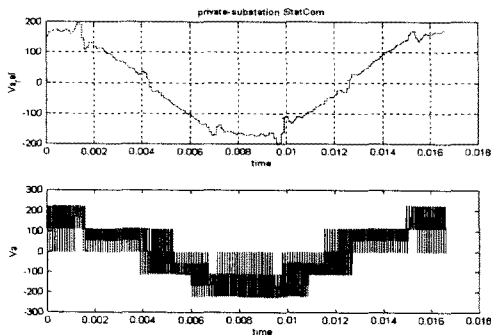


그림5-b. a상에 대한 전압명령벡터(Va_ref)
출력 상전압(Va)

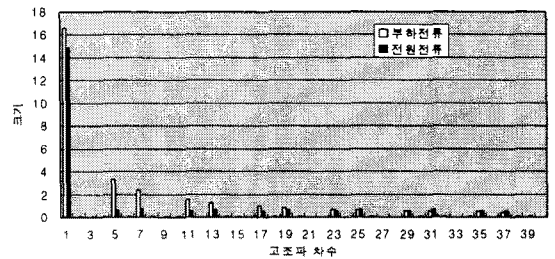


그림5-d. 부하전류의 고조파 스펙트럼과
전원전류의 고조파 스펙트럼

3. 결 론

본 논문에서는 STATCOM을 동기좌표계에서 dq변수를 사용하여 모델링하였고, 공간벡터 PWM 방식의 예측전류제어를 사용하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 수전단의 역류이 항상 단일 역류로 유지되고 동시에 부하전류의 40차이하의 고조파가 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. W. Edward. et al, "Advanced Static Var Generator employing GTO Thyristor", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp. 1662-1627, Oct. 1988
- [2] 이은용, 임수생, 이동주, 김성현, "NPC 인버터를 이용한 3상 동기형 SVC의 해석 및 설계", 대한전기학회 '97 추계학술대회 논문집, pp.42-45, 1997.11.29
- [3] 서영수, 김명춘, 하종욱, 송호빈, "공간전압벡터 PWM방식을 이용한 유도전동기의 저속운전", 대한전기학회 '97 하계학술대회 논문집, pp. 2171-2173, 1997. 7
- [4] Chun T. Rim, Nam S. Choi, Guk C. Cho, Gyu H. Cho, "A Complete DC and AC Analysis of Three-Phase Controlled Current PWM Rectifier Using Circuit D-Q Transformation", IEEE Trans. on P.E., vol.9, no.4, pp. 390-396, July 1994.
- [5] 권병기,우명호,정승기,"DSP를 사용한 예측전류제어방식의 능동전력필터",Trans.KIEE.vol.44.No.6.1995.6
- [6] 이은용, 임수생, 오명용, 김석근,"자가변전설비용 정지형 동기 보상기의 전압안정 및 역률 개선", 대한전기학회 전기기기 연구회 춘계학술발표, pp.48-51, 1998.5