

수용가용 STATCOM을 이용한 3상 유도전동기의 이론적인 역률 보상

論 文

49B-7-4

The Theoretical Power-factor Correction of a 3-phase Induction Motor using Customer STATCOM

林 洙 生* · 李 殷 雄** · 崔 宰 榮*** · 金 洪 權[§]

(Su-Saeng Lim · Eun-Woong Lee · Jae-Young Choi · Hong-Kwon Kim)

Abstract - This paper presents a novel power-factor correction method using customer STATCOM which generally improves the power quality of electric customers. Customer STATCOM detects the reactive currents of a induction motor(IM) and so injects compensation currents which is in 180° phase with load currents that the reactive power of IM is compensated. In particular, the paper proposes the general compensation current references in the synchronous coordinate system and makes converter output voltages using space-vector PWM. The compensation effect of customer STATCOM is confirmed through the simulation according to the operation condition of an induction motor (at no load and full load).

Key Words : STATCOM, Induction Motor, Power-factor Correction, Custom Power

1. 서 론

오늘날 산업사회의 기술이 고도로 성장할수록 안정적이면서도 신뢰성이 높은 양질의 전력을 필요로 한다. 수용가에 공급신뢰성이 높고 전압의 질이 좋은 양질의 전력을 공급하기 위해 최근에 눈비시게 발전하고 있는 전력전자 기술을 이용한 수용가용 전력기기의 일종인 정지형 동기 보상기(synchronous static compensator; STATCOM)가 연구 개발되고 있다[1].

STATCOM은 제어 목적과 적용 장소에 따라 송전용(TSTATCOM), 배전용(DSTATCOM), 그리고 수용가용으로 구별할 수 있다 [2-4]. 수용가용 STATCOM은 계통의 전압안정도 개선, 전력전송용량 증대가 주목적인 송전용 및 배전용 STATCOM과 달리, 수용가 모선에 일괄하여 접속하거나 유도전동기와 같은 역률이 나쁜 부하에 직접연결되고 비선형 부하나 산업용 부하들에서 발생하는 역률 저하, 전압 강하 및 왜곡, 플리커등의 영향이 수용가나 선로로 파급되는 것을 방지할 수 있다.

산업용 전기설비중 역률제어가 어려운 부하로 유도전동기를 들 수 있다. 유도전동기는 여자전류가 크기때문에 전원 역률을 떨어뜨리고 기동시에는 정격전류의 6~8배의 큰 기동전류가 흘러 수전단 버스전압을 강하시키는 등 수용가의 전력품질을 저하시킬 수 있다[5].

유도전동기의 역률 보상을 위해 지금까지 진상용 콘덴서를 설치하거나 전동기 그룹의 경우에는 동기조상기가 사용되어 왔다 [6]. 그러나, 진상용 콘덴서법은 커패시터 개폐시 과도한 유입전류나 이상전압이 발생하며 과보상 또는 부족보상이 되기 쉽고 동기조상기법은 유지보수가 필요하고 회전형 기기이므로 응답속도가 느려서 유도전동기 기동과 같은 동적 무효전력 보상이 불가능하다.

구동력의 대부분으로 유도전동기를 사용하는 산업현장의 자가용 전기설비에서, 시간대별 부하가 불특정하게 변하면 역률변화가 심하여, 기존의 역률 보상방식에 의한 자가변전설비의 무효전력보상과 전력품질 관리는 한계가 있다. 그래서 수용가의 무효전력 보상 및 역률 개선방식으로 수용가용 STATCOM이 가장 적합한 방식으로 생각된다 [7].

따라서, 본 논문에서는 수용가의 전력품질을 높이기 위해 사용되는 STATCOM의 구조와 동작 원리를 정리했다. 그리고 수용가의 무효전류를 보상하기 위한 보상기준전류를 도출하고, 이에 선형변조영역이 넓은 공간벡터변조를 사용하였다. 3상 유도전동기에 대해 Steinmetz법[8]을 사용하여 기본 특성을 구하고 3상 유도전동기의 동적 시뮬레이션에 의해 보상전의 운전특성과 역률 변화를 제시하였다. 3상 유도전동기의 무부하 운전과 정격부하 운전에서, STATCOM의 보상 효용성을 시뮬레이션으로 입증하였다.

2. STATCOM의 기본이론

STATCOM은 그림 1처럼 기본적으로 직류충전용 콘덴서로 구동되는 3상 인버터로 되어 있으며, 인버터의 3상 출력 전압은 전원전압과 위상이 일치하도록 작용한다. 그러므로 STATCOM은 크기와 위상을 등가적으로 신속하게 제어할 수 있는 전압등가전원을 변압기 누설 리액턴스를 통하여 전원에 인가하는 장치이다.

* 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博

*** 準 會 員 : 忠南大 電氣工學科 碩士課程

§ 正 會 員 : 韓國電力公社 忠南支社 保寧支店 科長
接受日字 : 2000年 3月 13日
最終完了 : 2000年 5月 29日

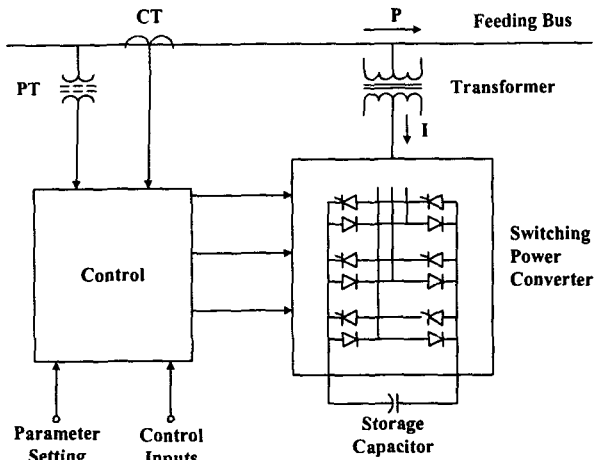


그림 1 수용가의 STATCOM의 구조도
Fig. 1 Configuration of customer STATCOM

2.1 STATCOM의 동작원리

STATCOM은 3상 평형 정현파 전압을 생성하는 기능은 동기조상기와 동일하나, 반도체 스위치를 이용한 동기전압원으로 신속히 출력전압의 크기와 위상을 제어할 수 있는 기능을 갖는 차이점이 있다. 그림 2는 STATCOM이 수전단과 연결된 단상 등가회로를 나타내며, STATCOM의 컨버터와 교류전원 사이에 교환되는 무효전력의 양은 컨버터 출력전압의 크기로 조절되며, 컨버터와 교류전원사이의 유효/무효전력 교환은 컨버터 출력전압과 교류전압 사이의 위상각을 변경시키는 방법으로 제어가 가능하게 된다.

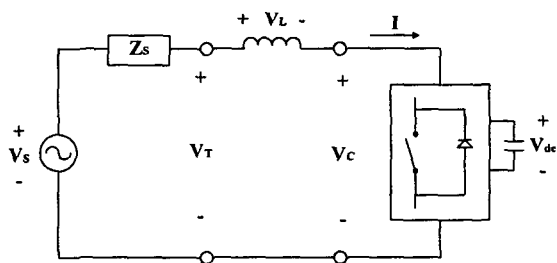


그림 2 수용가용 STATCOM의 단상등가회로
Fig. 2 Single-phase equivalent circuit of customer STATCOM

만일 수전단 전압 V_T 와 STATCOM 출력전압 V_C 가 동일한 위상각을 갖고 $V_C < V_T$ 이면 그림 3(a)와 같이 STATCOM 전류 I 는 V_T 에 대해 90° 지상으로 되어 STATCOM이 교류전원으로부터 무효전력을 흡수하고, $V_C > V_T$ 이면 STATCOM 전류 I 는 V_T 에 대해 90° 진상으로 되어 STATCOM이 교류전원쪽으로 무효전력을 공급하게 된다. 그리고 STATCOM의 출력전압 V_C 와 수전단전압 V_T 가 동일하게 되면, 무효전력의 출입은 0이 된다.

그림 3의 (a)와 (b)는 정상상태에서 유도성과 용량성 동작 모드에 대한 위상도를 나타낸 것이고, (c)와 (d)는 유

도성에서 용량성 동작모드로 상태변환하거나 용량성에서 유도성 동작모드로 상태변환할 때의 위상도를 나타낸다. 수전단전압 V_T 는 컨버터 전압 V_C 와 결합용 변압기(연계용 리액터 L)에 걸리는 전압 V_L 의 합과 같다. 용량성에서 유도성 동작모드로의 전환은 수전단전압 V_T 와 컨버터전압 V_C 의 위상각 차인 α 를 0에서 양의 값으로 변화함으로써 가능한데, 이 때 유효전력은 직류 커패시터 교류단자로 공급되고 직류링크 전압은 강하한다. 유도성 모드에서 용량성 동작모드로의 전환은 α 각을 0에서 음의 값으로 변화함으로써 가능하고, 이 때 유효전력은 전원전압에서 직류커패시터로 공급되어 직류 링크전압은 상승한다.

실제 STATCOM에서는 변압기 권선과 전력용 스위칭 소자에서 열손실이 발생하는데, 이 손실은 정상상태 동작에서 교류전원으로부터 유효전력을 소비한다. 이러한 손실 때문에 컨버터 전압과 전원전압간에는 이를 보상하기 위한 약간의 위상차가 정상상태에서 존재해야 한다.

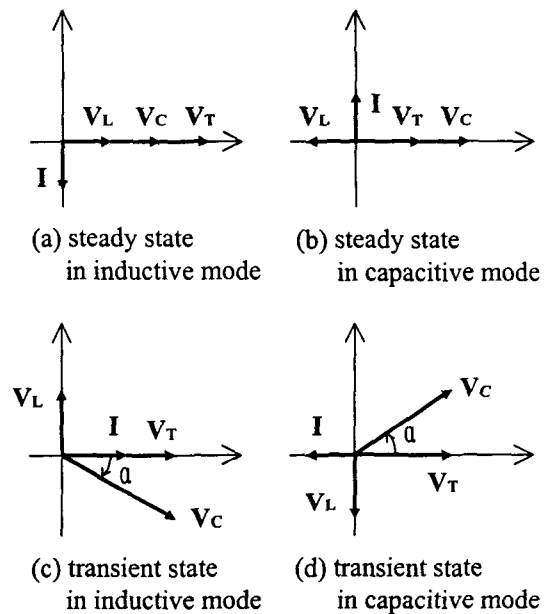


그림 3 수용가용 STATCOM의 동작벡터도
Fig. 3 Operation vector diagram of customer STATCOM

2.2 보상기준전류

무효성분을 포함하는 유도전동기 전류 i_{Lk} 를 식(1)과 같이 나타내진다.

$$i_{Lk} = I_p \cos \left\{ \theta - \frac{2(k-1)}{3} \right\} + I_q \sin \left\{ \theta - \frac{2(k-1)}{3} \right\} \quad (1)$$

여기서, k 는 1,2,3으로 3상의 a,b,c를 나타낸다.

유도전동기의 무효전력을 보상하기 위해서 STATCOM이 유도전동기 무효전류 식(2)만큼의 보상전류 i_{Ck} 를 유도전동기와 병렬로 공급하면 전원전류는 식 (3)과 같은 유효전력만을 공급하게 된다.

$$i_{ck} = i_{sk} - i_{Lk} = -I_q \sin\left\{\theta - \frac{2(k-1)}{3}\right\} \quad (2)$$

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

식 (1), (2), (3)의 관계를 dq축상에서 표현하면, 컨버터 보상전류가 식(4), (5)와 같이 공급될 때, 전원은 식 (6), (7)과 같이 유도전동기 유효전류의 기본파 성분만을 공급하고 d축 전류는 0이 됨으로써 유도전동기의 무효전력을 보상할 수 있다.

$$i_{Cq} = i_{sq} - i_{Lq} = i_{Lq} - \overline{i_{Lq}} + i_{q, dclink} \quad (4)$$

$$i_{Cd} = i_{sd} - i_{Ld} = i_{Ld} \quad (5)$$

$$i_{sq} = \overline{i_{Lq}} \quad (6)$$

$$i_{sd} = 0 \quad (7)$$

2.3 공간벡터 변조

STATCOM의 컨버터 출력전압 \overline{v}_c 는 전류의 샘플링구간 T_s 가 충분히 짧다고 할 때 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{v}_c = \frac{L}{T_s} \Delta \overline{i}_c + \overline{v}_s \quad (8)$$

여기서, L: 리액터의 인덕턴스, $\Delta \overline{i}_c$: 보상전류 \overline{i}_c 의 증분 $\Delta \overline{v}_s$: 전원전압 \overline{v}_s 의 증분

식 (8)로부터 k번째 샘플링구간에서 필요한 컨버터전압 $\overline{v}_c^*(k)$ 를 구할 수 있으며 식 (9)와 같이 나타내진다.

$$\overline{v}_c^*(k) = \frac{L}{T_s} [\overline{i}_c^*(k+1) - \overline{i}_c(k)] + \overline{v}_s(k) \quad (9)$$

식 (9)의 공간전압 벡터명령 \overline{v}_c^* 는 공간벡터 평면상에 서 유효벡터의 합으로 표현할 수 있는데 그림 4에서처럼 공간벡터 \overline{v}_c^* 가 영역 ①에 위치할 때 이는 식 (10)와 같이 유효벡터 \overline{V}_1 과 \overline{V}_6 의 조합으로 표현할 수 있다.

$$\overline{v}_c^* = D_a \overline{V}_1 + D_b \overline{V}_6 = \overline{V}_a + \overline{V}_b \quad (10)$$

여기서, 가중치 D_a 와 D_b 는 식 (11), (12)와 같다.

$$D_a = \frac{3}{2V_{dc}} \left(v_{cq}^* - \frac{1}{\sqrt{3}} v_{cd}^* \right) \quad (11)$$

$$D_b = \frac{\sqrt{3}}{V_{dc}} v_{cd}^* \quad (12)$$

유효 벡터와 그들의 가중치가 결정되면 샘플링 구간동안 가중치만큼의 시간비율로 그에 해당하는 스위칭신호를 출력해야 한다. 주어진 샘플링 구간 T_s 와 전압벡터의 가중치로부터 스위칭 신호인가시간 t_a , t_b 는 식 (13), (14)와 같이 구할 수 있다.

$$t_a = D_a T_s \quad (13)$$

$$t_b = D_b T_s \quad (14)$$

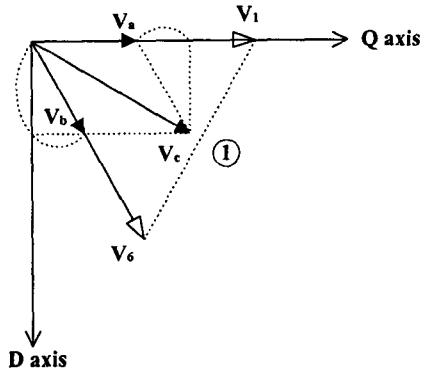


그림 4 공간벡터 변조

Fig. 4 space vector modulation

만일 기준전압 벡터가 제어가능 영역을 이탈하여 $t_a + t_b > T_s$ 가 되었을 때는 식 (15), (16)과 같이 $t'_a + t'_b = T_s$ 가 되도록 인가시간을 조정한다.

$$t'_a = \frac{t_a}{t_a + t_b} T_s \quad (15)$$

$$t'_b = \frac{t_b}{t_a + t_b} T_s \quad (16)$$

3. 수용가용 STATCOM에 의한 유도전동기의 역률 보상

유도전동기의 큰 지상무효전력과 빠른 전류변화에 대응하도록 STATCOM을 동특성이 빠르고 직류전압의 맥동이 작게 설계하였고, 수용가용 STATCOM의 기준치와 회로 파라미터는 표 1과 같다. 그리고, 특성해석에 사용한 유도전동기의 사양은 표 2와 같다.

표 1 수용가용 STATCOM의 기준치와 회로 파라미터
Table 1 The reference values and circuit parameters of customer STATCOM

Section	Parameter	Symbol	Value
circuit	compensation capacity	Sc	10[kVA]
	rated voltage	Vs	220 [V]
	Reactor	L	0.5 [mH]
	DC link Capacitor	Cdc	5,000[μF]
	DC bus voltage	Vdc	400 [V]
control	DC bus PI control	Kpe Kie	Kpe = 0.114 Kie = 5.076
	Sampling period	Ts	67 [μs]

표 2 3상 유도전동기 사양
Table 2 Spec. of a 3-phase induction motor

3[hp], three-phase, 60[Hz], 7.2[A] four-pole, 220[V] induction motor		
line parameter	line resistance R_T	0.2[Ω]
electrical parameter	rated current, I_{lr}	7.2[A]
	rated power factor, $\cos \phi$	0.8[p.u.]
	stator resistance, R_s	0.435[Ω]
	rotor resistance, R'_r	0.816[Ω]
	stator leakage inductance, L_{ls}	2[mH]
	rotor leakage inductance, L'_{lr}	2[mH]
	mutual inductance, L_m	69.31[mH]
mechanical parameter	inertia moment, J	0.089 [kg · m ²]
	friction coefficient, B	0.0146 [Nms/rad]
	rated load torque, T_L	11.87[N · m]

전원, 유도전동기 및 STATCOM을 각각 dq축으로 모델링하고 Visual C++을 사용하여 시뮬레이션하였고, Matlab 패키지를 이용하여 해석결과를 분석하였다.

3.1 유도전동기의 기본 특성

표 1의 유도전동기의 기본특성을 Steinmetz법에 의해 개략적으로 계산하면 다음과 같다.

유도전동기의 기동시에 여자어드미턴스를 무시하면 1차측 및 2차측의 합성 임피던스 $\bar{Z}_s + \bar{Z}'_r$ 에 역비례하는 기동전류 \bar{I}_{st} 가 흐르고, 이 기동전류 \bar{I}_{st} 는 식 (17)과 같이 나타내지며 $64.82 \angle -50.3^\circ$ [A]로 정격전류의 9배에 이른다.

$$\bar{I}_{st} = \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_s + \bar{Z}'_r} = \frac{\bar{V}_1}{(R_s + R'_r) + j(X_s + X'_r)} \quad (17)$$

전동기의 출력 토크 T_{em} 은 회전자계의 공간분포를 정현적이라 가정할 경우 식 (18)과 같다.

$$T_{em} = \frac{3s R'_r V_1^2}{\omega_0 \{ (sR_s + R'_r)^2 + s^2 (X_s + X'_r)^2 \}} \quad (18)$$

여기서, $\omega_0 = \frac{2\pi f}{P}$, P : 전동기 쌍극수

식 (18)에 $s=1$ 을 대입하면 식 (19)에 의해 기동토크 T_{st} 는 54.6[N · m]이다.

$$T_{st} = \frac{3 R'_r V_1^2}{\omega_0 \{ (R_s + R'_r)^2 + (X_s + X'_r)^2 \}} \quad (19)$$

식 (18)을 s 로 미분하여 $\frac{dT_{em}}{ds} = 0$ 으로 놓고 정리하면 식 (20)과 같고, 슬립 s_t 는 0.52일 때 최대토크가 발생하며, 최대토크 T_{max} 은 식 (21)에 의해 64.0[N · m]이다.

$$s_t = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X'_r)^2}} \quad (20)$$

$$T_{max} = \frac{3 V_1^2}{2\omega_0 \{ R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + X'_r)^2} \}} \quad (21)$$

3.2 무부하 운전특성 보상

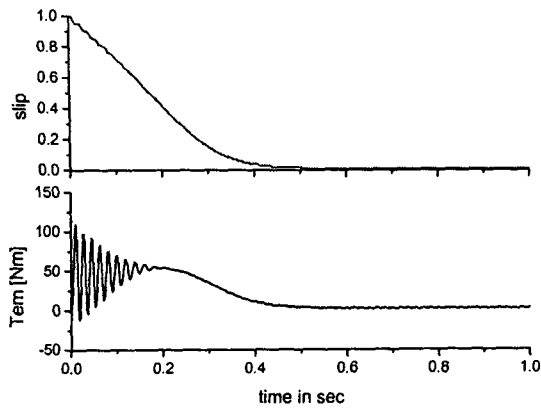
유도전동기의 무부하 운전시 무효전력을 보상하는 경우, 그림 5(a)는 슬립 s 와 발생토크 T_{em} 을, 5(b)는 각각 보상전과 보상후의 qd축 전원상전압 $V_{sqe}, V'_{sqe}, V_{sde}, V'_{sde}$ 를, 5(c)는 각각 보상전과 보상후의 qd축 전원 선전류 $I_{sqe}, I'_{sqe}, I_{sde}, I'_{sde}$ 를, 5(d)는 컨버터의 보상전류 명령 I_{cref} 과 실제 출력전류 I_c 을 나타낸다. 단, 문자 '는 보상후의 값을 나타낸다.

무부하 운전시, 그림 5(a)에서 시험 전동기는 기동후 약 0.5초(30사이클)이내에 최종속도(1780[rpm])에 도달하며 운전 슬립은 1.1%로 매우 작아서 회전자 주파수, 회전자 리액턴스 및 회전자 유기기전력은 모두 매우 작다. 따라서 회전자 전류도 무부하 토크를 발생할 만큼으로 작고 고정자 전류는 1차측 저항손, 철손 전류와 마찰부하전류의 합이면서 상대적으로 작은 유효전류 I_{sqe} 와 고정자의 회전자계를 발생시키는 자화전류인 무효전류 I_{sde} 로 구성된다.

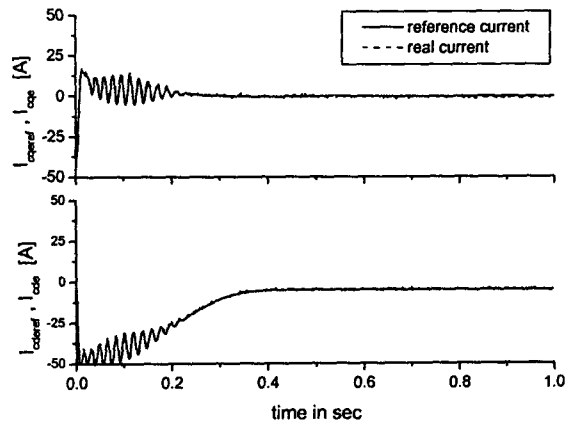
정격 전류의 약 7배인 큰 기동전류 I_{sqe}, I_{sde} 가 0.4초 이상 흐르며 기동역률은 75%이고, 과다한 전동기 기동전류가 선로저항 R_T 로 흘러 전원전압이 0.24초 동안 5%이상 강하시켜 동일 급전선에 연결된 다른 부하에 전압이도(voltage sag)를 일으킬 수 있다. 반면에, 그림 5(b)에서 STATCOM 보상후에는 유도전동기의 무효전류가 보상되어 q축 전압강하가 거의 없으므로 전원전압 V_{sqe}, V_{sde} 의 전압강하는 보상전보다 약간 약해졌다.

그림 5(c)에서 무부하시 정상상태 전류중 유효전류 I_{sqe} 는 무효전류 I_{sde} 에 비해 32%정도로 작으므로 전원은 낮은 지상 역률의 전류를 전동기에 공급한다. 그러나, STATCOM 보상후에는 전동기의 무효전류를 나타내는 d축 무효전류가 거의 0이 되어 유도전동기를 구동하는 전원의 역률이 보상전에 비해 매우 향상되었음을 알 수 있다.

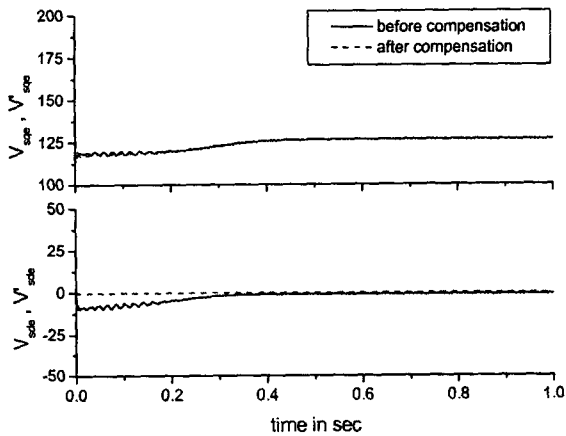
그림 5(d)에서 컨버터 출력전류 I_{cqe}, I_{cde} 가 전류명령 벡터 I_{cqe}^*, I_{cde}^* 를 잘 추종하여 예측전류제어가 위상 지연 및 오버슈트없이 잘 이뤄지고 있다.



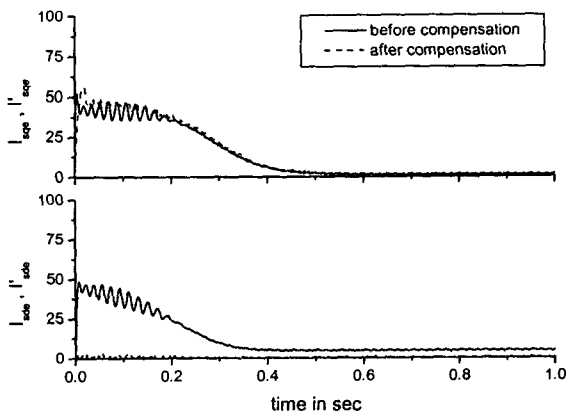
(a) slip s and electromechanical torque T_{em} [Nm]



(d) compensation current reference I_{cref} and converter current I_c in qd axis with compensation



(b) main line-to-ground voltage in qd-axis before and after compensation: V_{sqe} , V'_{sqe} , V_{sde} and V'_{sde} [V]



(c) main line currents in qd-axis before and after compensation: I_{sqe} , I'_{sqe} , I_{sde} and I'_{sde} [A]

그림 5 무부하 운전시의 유도전동기 보상 결과

Fig. 5 compensation results of a no-load induction motor

3.3 전부하 운전특성 보상

시험 전동기를 정격 토크 부하로 기동할 때, 그림 6(a)는 슬립 s 와 발생토크 T_{em} 을, 6(b)는 각각 보상전과 보상후의 qd축 전원상전압 V_{sqe} , V'_{sqe} , V_{sde} , V'_{sde} 를, 6(c)는 각각 보상전과 보상후의 qd축 전원 선전류 I_{sqe} , I'_{sqe} , I_{sde} , I'_{sde} 를, 6(d)는 컨버터의 보상전류 명령 I_{cref} 과 실제 출력전류 I_c 을 나타낸다. 단, 문자 '는 보상후의 값을 나타낸다.

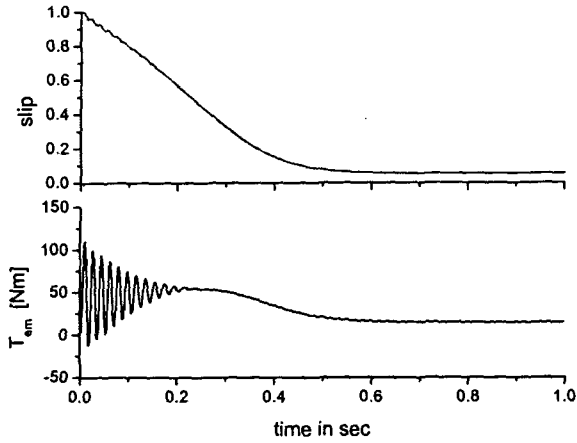
그림 6(a)에서 0.7초(42사이클)이내에 정격속도(1700rpm)에 도달하며 운전 슬립 5.6%로 회전한다. 정격 부하토크가 전동기 축에 걸려 있으므로 속도는 약간 떨어지고, 슬립이 0.055로 회전자 주파수, 회전자 리액턴스 및 회전자 유기기전력에 슬립에 비례해서 증가한다. 따라서 유기기전력은 정격 토크를 발생하도록 증가되고 1차측 부하전류는 유기기전력에 거의 직각인 자화전류보다 크게 된다.

정격부하로 기동할 때 정격 전류의 약 6배인 큰 기동전류가 0.5초 이상 흐르며 기동역률은 76%이고 기동전류 \bar{I}_{st} 가 선로임피던스 R_T 로 흘러, 그림 6(b)와 같이 전원에 0.3초동안 5%이상의 순시전압강하를 일으키고 무부하 운전시보다 더 길게 같은 전원에 연결된 타부하에 전압새그를 파급한다. 반면에, STATCOM 보상후에는 유도전동기의 무효전류가 보상되어 q축 전압강하가 거의 없으므로 전원전압 V_{sqe} , V_{sde} 의 전압강하는 보상전보다 약간 약해졌다.

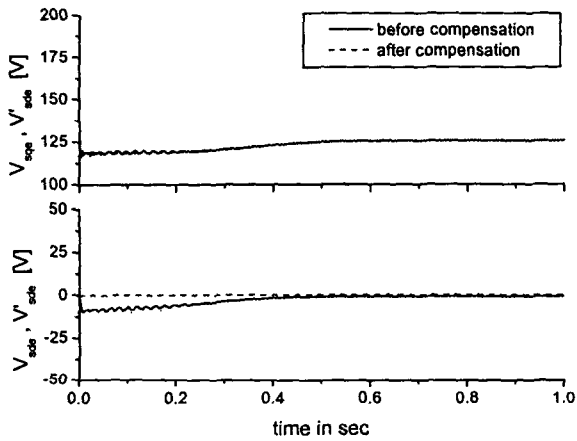
그림 6(c)에서 정격부하시 정상전류중 유효전류 I_{sqe} 는 무효전류 I_{sde} 의 1.6배 정도로 크고 전원은 80%이하의 비교적 높은 지상역률의 전동기 전류를 공급한다. STATCOM 보상후에는 전원의 무효전류를 나타내는 d축 전류가 거의 0이 되어 유도전동기를 구동하는 전원의 역률이 100%에 가깝게 향상되었음을 알 수 있다.

그림 6(d)에서 컨버터 출력전류 I_{cqe} , I_{cde} 가 전류명

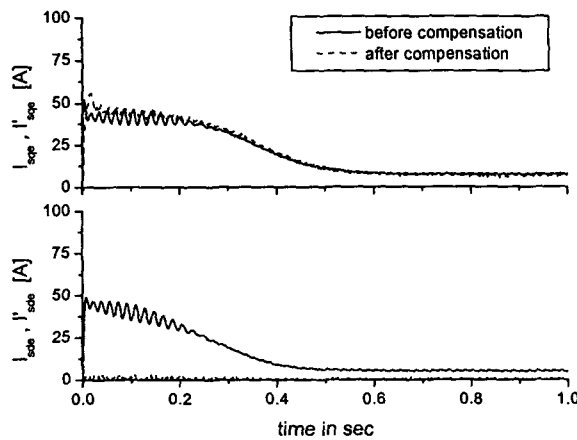
령벡터 I_{Cqe}^* , I_{Cde}^* 를 잘 추종하여 예측전류제어가 위상 지연 및 오버슈트없이 잘 이뤄지고 있다.



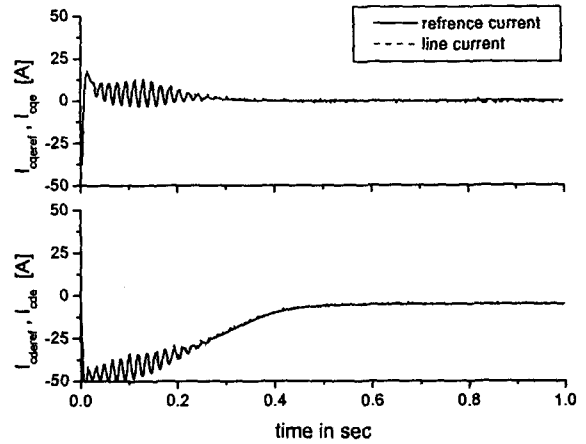
(a) slip s and electromagnetic torque T_{em} [Nm]



(b) main line-to-ground voltages in qd-axis before and after compensation; V_{sqe} , V'_{sqe} , V_{sde} and V'_{sde} [V]



(c) main line currents in qd-axis before and after compensation, I_{sqe} , I'_{sqe} , I_{sde} and I'_{sde} [A]



(d) compensation current reference I_{cref} and converter current I_c in qd axis with compensation

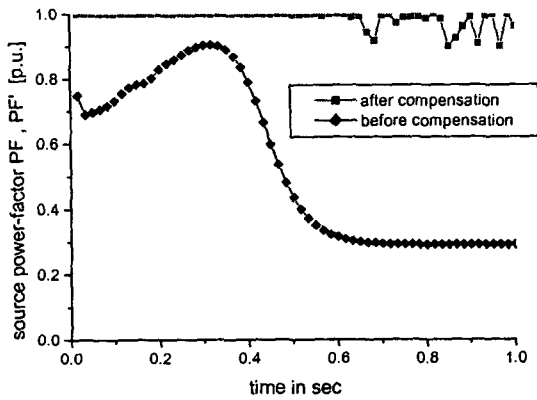
그림 6 전부하 운전시의 유도전동기 보상 결과

Fig. 6 Compensation results of a full-load induction motor

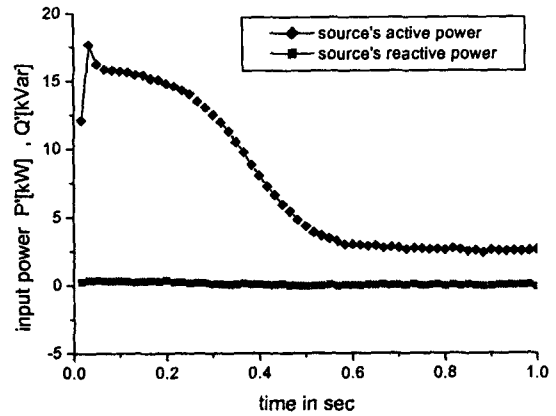
3.4 무효전력 보상과 역률 개선 효과

그림 7(a)에서 무부하운전시 보상전의 전원 역률은 기동 구간인 0.4초 동안 비교적 높은 80% 이상을 유지한 후 급속히 감소하여 0.6초 이후에는 29%의 낮은 지상역률로 운전되는데, 보상하면 기동초기에 전원 역률이 99%이상 유지되다가 0.6초 이후에 유도전동기의 입력 유효전력이 0.2[kW]이하로 떨어지면서 전원 역률의 변동을 나타내지만 전원역률이 90%이상 유지되었다. 그림 7(b)에서 무부하 유도전동기를 보상하면 전원의 무효전력이 기동초기에 최고 +0.4[kVar]에서부터 서서히 감소하다가 정상운전시 ± 0.08 [kVar]이하가 되어 거의 보상되었다. 특히, 그림 7(a)에서 무부하 운전시 정상상태에서 역률이 맥동하는 것은 유도전동기의 유효전력 흡수가 매우 적기 때문이며 그림 7(b)에서 무효전력은 0부근으로 대부분 보상되었음을 알 수 있다.

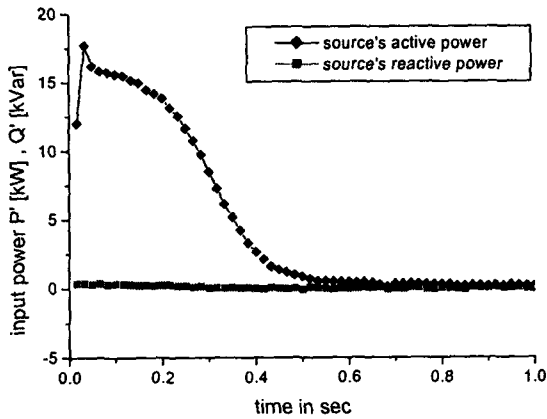
그림 8(a)에서 유도전동기를 전부하로 운전할 때의 보상전의 전원 역률은 기동구간인 0.42초 동안 91%까지 상승한 후 약간 감소하여 0.7초 이후에도 비교적 높은 지상역률 76%으로 운전되는데, 보상하면 정격부하 운전시에는 전구간에 걸쳐 99.9%이상 순수저항 역률로 보상되어 아주 우수한 역률 보상결과를 얻었다. 유도전동기가 전부하로 운전될 때, 그림 8(b)에서 전원의 무효전력은 기동초기에 최고 +0.4[kVar]에서부터 서서히 감소하여 정상운전시 ± 0.09 [kVar]이하가 되어 거의 보상되었다.



(a) source power-factor before and after compensation; PF, PF' [p.u.]



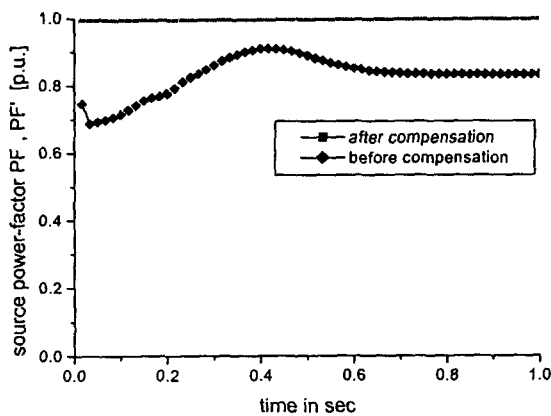
(b) source's active power P' [kW] and reactive power Q' [kVar] after compensation



(b) source's active power P' [kW] and reactive power Q' [kVar] after compensation

그림 7 유도전동기 무부하 운전시의 보상후 전원 유효전력 및 무효전력 그리고 역률

Fig. 7 Compensated source's active power, reactive power, and power factor at no load operation



(a) source power-factor before and after compensation; PF, PF' [p.u.]

그림 8 유도전동기 전부하 운전시의 보상후 전원 유효전력 및 무효전력 그리고 역률

Fig. 8 Compensated source's active power, reactive power, and power factor at full load operation

유도전동기의 무효전력 보상결과를 표 3에 나타냈다. 유도전동기의 기동시 전원 역률은 10~20[%] 정도 개선되어 100.0[%]로 순수 저항부하의 역률을 나타냈다. 또한 정상상태의 경우에도, 무부하시 보상전의 낮은 지상역률 29.1[%]에서 95.1[%]로 매우 향상되었으며 정격부하시 83.1[%]에서 100.0[%]로 단일역률을 유지하였다. 단, 무부하 유도전동기의 유효전력 소비가 매우 적기 때문에 무부하운전 보상역률은 정격부하운전에 비해 약간 낮은 값을 보였다. 따라서 3상 유도전동기의 부하조건에 상관없이 전구간에 걸쳐 무효전력을 거의 보상함으로써 전원 역률을 대폭 개선할 수 있었다.

표 3 수용가용 STATCOM을 사용한 3상 유도전동기의 역률 보상 결과

Table 3 Power-factor correction results of three-phase induction machine using customer STATCOM

condition		cos ϕ	Start-up power-factor PFs [%]	Steady-state power-factor PF [%]
no load	before compensation		83.5	29.1
	after compensation		100.0	95.1
full load	before compensation		90.9	83.1
	after compensation		100.0	100.0

4. 결 론

STATCOM을 사용하여 3상 유도전동기의 가변 지상무효 전력을 보상한 결과, 유도전동기의 무부하에서부터 정격부하 까지 유도전동기의 운전상태에 상관없이 전구간에 걸쳐 무효전력을 거의 보상함으로써 자가변전설비의 무효전력과 역률을 획기적으로 제어할 수 있었다.

본 논문에서는 유도전동기의 정상상태 파라미터를 이용하여 시뮬레이션하였기 때문에 유도전동기의 실제 과도상태와는 차이가 있을 수 있으나, STATCOM이 유도전동기의 부하전류를 검출한 후 예측전류제어기를 통해 보상전류오차를 보정하므로 역률 보상효과는 뛰어날 것으로 생각한다.

유도전동기의 과도한 기동전류로 인한 전압이도는 전동기 자체의 기동현상을 증폭하였으며 STATCOM의 무효전류 보상만으로는 전압강하 보상효과는 미비하였고, 앞으로 전압 새그나 플리커등의 전력품질저하를 방지할 수 있는 STATCOM의 제어방안에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의해 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음(번호98-068)

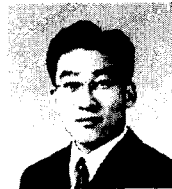
참 고 문 헌

- [1] 김형준, 허성일, 김성희, 안복신, "custom power 기기의 개발현황", 대한전기학회지 제 47 권 3호, pp. 32-36, 1998. 3
- [2] 한병문, "비선형 보상을 적용한 송전용 무효전력 보상기의 제어시스템 설계", 대한전기학회지 제 46 권 1호, pp. 31-37, 1997. 1
- [3] 한영선의 5인, "STATCON제어방식에 따른 특성연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(F권), pp. 79-81, 1998. 7
- [4] 임수생, 이은웅, "전력 품질개선의 필요성과 STATCOM", 대한전기학회지, Vol.48. No.4 1999.4
- [5] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", Prentice-Hall PTR, pp. 167-258, 1998
- [6] M. G. Say, "Alternating Current Machines", John Wiley & Sons, pp. 332-324, 1983
- [7] 임수생, "자가변전설비용 STATCOM의 역률개선과 고조파 필터링", 석사학위논문, 충남대, 1999. 2
- [8] Paul. L. Cochran, "Polyphase Induction Motors Analysis, Design, and Application", Marcel Dekker Inc., 1989

저 자 소 개



임수생 (林洙生)
1973년 2월 24일생. 1995년 충남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
E-mail : papawini@ee.cnu.ac.kr



최재영 (崔宰榮)
1973년 7월 10일 생. 1999년 충남대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
E-mail : mmissing@hanmail.net



이은웅 (李殷雄)
1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1982년~1983년, 1985년~1986년 캐나다 McGill대학교 방문교수. 현재 충남대 전기공학과 교수
Tel : 042-821-5652
E-mail : ewlee@hanbat.cnu.ac.kr



김홍권 (金洪權)
1958년 4월 11일 생. 1983년 충남대 전기공학과 졸업. 1997년~현재 동 산업대학원 전기공학과 석사과정. 현재 한국전력공사 충남지사 보령지점 배전 운용과장
E-mail : khk456@dava.kepco.co.kr