

PWM 전력 컨버터를 이용한 배전용 무효전력 보상기 제어

고 지 호* · 김 용 현* · 김 재 홍* · 김 일 환**

Control of Static VAR Compensator for Distribution System using PWM Power Converter

Ji-Ho Ko*, Yong-Hyun Kim*, Jai-Hong Kim* and Eel-Hwan, Kim**

ABSTRACT

This paper presents the control method of reactive power in distribution system using PWM power converter. The PWM power converter controlled by space vector PWM method is voltage source type using IGBT switching device. Using the Park's transformation, three phase load current can be written in terms of component α and β current in a synchronously rotating reference frame. Two axis, the direct axis, α , and the quadrature axis, β , mean the active and reactive component in load current. Also, two components appear as dc quantities in that frame. So it is easy to control the reactive power by controlling the d axis currents. And in accordance with the change of reactive power in load side, PWM power converter compensate the reactive power by generating the reactive current to the load side using PI control. To verify the theoretical analysis, results of computer simulation and experiment are presented to support the discussion

Key words : PWM power converter, reactive power, PI control, Park's transformation

1. 서론

근래에 유도성 부하의 사용증가에 따라 전원계통에는 무효전력이 많이 발생하고 있다. 전원계통에 발생한 무효전력은 전원설비의 용량이나 손실의 증대를 초래하고, 무효전력 변동에 따른 계통전압의 변동을 일으켜 통신장해를 유발하는 등의 계통선에 나쁜 영

향을 미친다. 이러한 문제를 해결하기 위해 종래에는 진상용 커패시터, L-C 수동필터와 사이리스터 스위치를 사용한 정지형 무효전력 보상장치 등이 사용되었다. 하지만 이러한 기존의 보상방식들은 전원계통의 변동에 효율적으로 동작하지 못하고, 제어 응답속도가 느리며 보상의 정밀도가 높지 못하다는 문제점이 지적되었다^{1,2)}. 최근 전력용 반도체소자의 발달과 전력변환장치를 제어하는 새로운 기술들의 개발로 인하여 전원 주파수 및 부하의 변동시에도 실시간으로 보상할 수 있다는 큰 이점을 가진 정지형 무효전력 보상시스템에 대해 많이 연구되고 있다^{3,4)}.

이런 시스템은 구조에 따라 전압형과 전류형으로

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 전기전자공학부, 산업기술연구소

Faculty of Electrical & Electronic Eng., Res. Inst. Ind. Tech.,
Cheju Nat'l Univ.

나뉘어진다^{3,5)}. 이들은 각자 나름대로의 특징을 지니고 있으나, 시스템이 간단하고 제어하기가 쉬운 전압형이 널리 이용되고 있다. 무효전력 보상제어시 전압형 컨버터는 보통 전원측 전류가 주어진 기준파형을 추종하도록 하는 전압형 전류제어 PWM 방식을 많이 채용하는데, 이 때 기준파형은 부하전류에서 유효성분의 파형을 뺀 것에 해당한다.

그 결과 보상후의 전원측 전류파형은 전원전압과 동상의 정현파, 즉 유효성분만의 파형으로 된다. 이러한 시스템을 구현하기 위해서는 전류제어시 3상 d-q 등가변환 이론을 이용한다. 부하에 흐르는 정현파 3상 전류를 동기좌표축상의 d-q 등가변환을 하면, d축은 무효성분, q축은 유효성분으로 쉽게 분리가 된다. 부하에 흐르는 d축 성분만큼 보상기에서 실시간으로 공급하면 전원측에 흐르는 상전압과 전류는 동상이 된다.

따라서 본 연구에서는 IGBT를 이용한 PWM power converter를 보상기로 사용하여 지상부하 운전시 무효전류를 보상하여 전원측의 역률을 항상 1로 제어하는 방법을 제시한다. 또한 제어시스템의 응답 특성을 분석하기 위하여 부하변동시에도 보상전류의 특성을 고찰한다. 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 이를 입증하고자 한다.

II. 순시무효전력

2.1. 순시무효전력의 정의

정현파 전압·전류시의 평균치 개념에 의한 유효전력과 무효전력에 대한 기존의 정의는 부하가 선형이고 시불변인 조건에서 성립한다. 따라서 전력전자기와 같이 비선형, 시변특성을 가지는 부하에서의 기본파전류의 지연 및 고조파에 기인하는 총 무효전력을 종래의 개념으로 정의하기에는 부적절하다. 이에 무효전력에 대한 새로운 개념정립이 필요하고 이들이 가지는 물리적인 의미가 검토되어야 하겠다. 순시유효전력과 순시무효전력을 다음과 같이 정의한다.

순시유효전력

(Instantaneous active power), P_i

$$P_i \cong P + p_r \quad (1)$$

$$\text{단, } \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} p \, dt = P$$

$$p_r = \left\{ p_r(t) \mid \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} p_r(t) \, dt = 0 \right\}$$

$$P_i \geq 0$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

순시무효전력

(Instantaneous reactive power), Q_i

$$Q_i \cong S - P_i \quad (2)$$

단, $S =$ 순시 피상전력

(Instantaneous Apparent Power)

식 (1)과 같이 임의의 주기 ($\Delta t = t_2 - t_1$)에서 순시유효전력 P_i 는 순시전력의 평균치인 유효전력 P 로 주어지는 일정한 값과 시변특성을 가지는 맥동성분 p_r 의 합으로 정의된다. 이 때 P 는 P_i 의 직류성분을 나타내며 전원측에서 부하측으로 공급되는 일정한 전력을 의미하고 p_r 은 P_i 의 교류성분으로서 평균치가 항상 0이 되는 임의의 함수이다. 또한 $P_i \geq 0$ 이므로 순시유효전력 P_i 는 순시전력중에서 전원측에서 부하측으로 공급되는 단방향성 전력성분을 의미한다. 한편 순시무효전력 Q_i 는 식 (2)와 같이 순시피상전력과 순시유효전력의 차로서 정의되는데 평균치가 항상 0이 되므로 순시전력 가운데 전원과 부하간을 왕래하는 양방향성 전력성분을 의미한다.

예로써, 동일 주파수의 정현파 전압 및 전류의 인가시에 순시전력은 다음의 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} p &= v \cdot i \\ &= V_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + \phi) \\ &= \frac{1}{2} V_m I_m \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} V_m I_m \sin \phi \sin 2\omega t \\
 & = P (1 - \cos 2\omega t) + Q \sin 2\omega t \quad (3)
 \end{aligned}$$

식 (3)의 전항을 순시유효전력 P_i 라 정의하면 P_i 는 직류성분 P 와 맥동성분 $p_r = -P \cos 2\omega t$ 로 주어지며 $P_i \geq 0$ 을 만족한다. 또한 식 (3)의 후항은 순시무효전력 Q_i 가 되며, 최대치가 Q 이고 전원전압의 2배수의 주파수를 가지는 교류성분으로 평균치는 항상 0 이 된다. 한편 순시유효전력 P_i 와 순시무효전력 Q_i 를 각각 전원전압 v 로 나누면,

$$\begin{aligned}
 i_p &= \frac{P_i}{v} \\
 &= I_m \cos \phi \sin \omega t \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_q &= \frac{Q_i}{v} \\
 &= I_m \sin \phi \cos \omega t \quad (5)
 \end{aligned}$$

식 (4)와 식 (5)와 같이 유효전류성분 i_p 와 무효전력성분 i_q 로 나타낼 수 있다. 그런데 i_p 와 i_q 는

$$\begin{aligned}
 i_p + i_q &= I_m \cos \phi \sin \omega t + I_m \sin \phi \cos \omega t \\
 &= I_m \sin (\omega t + \phi) \\
 &= i \quad (6)
 \end{aligned}$$

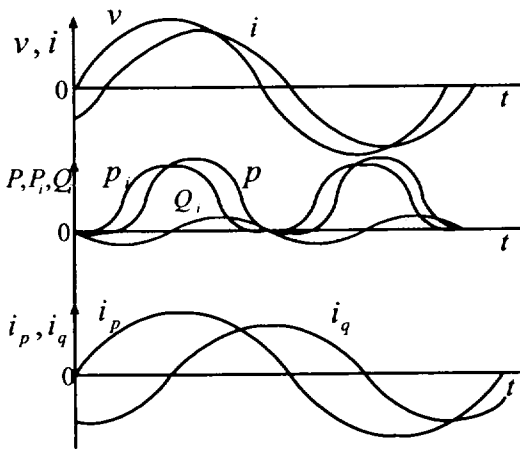


Fig. 1 Instantaneous reactive power

가 성립하여 순시전류는 순시유효전력 P_i 의 발생원인 유효전류성분 i_p 와 순시무효전력 Q_i 의 발생원인 무효전류성분 i_q 의 합임을 알 수 있다. 한편 i_q 에 기인하여 전류의 위상지연이 발생함을 감안할 때 외부에서 선로에 i_q 를 주입함으로써 전원전압과 동상의 i_p 만을 취할 수 있다. Fig. 1은 이들의 관계를 보여준다.

2.2. 3상 순시 무효전력의 보상원리

Fig. 2는 무효전력 보상장치의 동작원리를 나타내기 위한 기본 구성도를 나타내고 있다. 이 그림에서 보면 무효전류가 발생하면 보상기에서 무효전류를 부하에 공급하여 전원측에는 유효성분만 존재하게 한다. 이런 보상전류를 발생하기 위해서는 전원측으로부터의 전압과 전류에 대해 고찰하여야 한다. Fig. 2에서 3상 전원의 각 상전압을 다음과 같이 가정한다.

$$\begin{aligned}
 v_{sa} &= V_m \cos \theta_e \\
 v_{sb} &= V_m \cos \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) \\
 v_{sc} &= V_m \cos \left(\theta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (7)
 \end{aligned}$$

부하에 나타나는 역률각을 ϕ 라 할 때 부하전류의 일반적인 표현식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

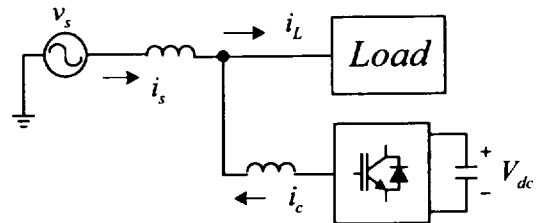


Fig. 2 Fundamental structure of compensator

$$\begin{aligned}
 i_{La} &= I_m \cos (\theta_e - \phi) \\
 i_{Lb} &= I_m \cos \left(\theta_e - \frac{2}{3} \pi - \phi \right) \\
 i_{Lc} &= I_m \cos \left(\theta_e + \frac{2}{3} \pi - \phi \right) \quad (8)
 \end{aligned}$$

Park 변환식을 이용하여 정현파 3상 부하전류를

동기좌표축상의 α, β 축으로 변환하여 나타내면 다음 수식과 같이 직류값으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{L\alpha}^e &= I_m \sin \phi \\ i_{L\beta}^e &= I_m \cos \phi \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 위첨자 e 는 동기좌표축에서 변수임을 나타내고 $i_{L\alpha}^e$ 는 부하전류의 무효성분, $i_{L\beta}^e$ 는 유효성분의 크기를 나타낸다.

식(9)에서 알 수 있듯이 부하에 흐르는 전류는 동기좌표축에서 유효성분과 무효성분으로 다음과 같이 분리가 가능해진다.

$$\bar{i}_L = \bar{i}_\alpha + \bar{i}_\beta \quad (10)$$

식(10)에서 무효성분 전류 \bar{i}_α 는 부하전류에서 순시 무효전력의 발생원으로 작용한다. 따라서 무효전류성분 \bar{i}_α 에 해당하는 보상 전류 \bar{i}_c 를 선로에 주입 시키므로서 전원측에는 유효전류성분 \bar{i}_β 만 흐르도록 한다.

$$\bar{i}_c = \bar{i}_\alpha = \bar{i}_L - \bar{i}_\beta \quad (11)$$

이렇게 하면 전원전류 \bar{i}_s 는 부하전류 \bar{i}_L 의 유효전류성분 \bar{i}_β 와 같고, 보상전류 \bar{i}_c 는 무효전류 성분 \bar{i}_α 와 같게 되어, 부하측에서 요구되는 순시전력 중에서 순시유효전력은 전원측에서 공급하고 순시 무효전력은 보상장치에서 각각 공급하게 된다.

III. 제어시스템 구성

제시한 제어 알고리즘을 구현하기 위하여 Fig. 3과 같이 제어시스템이 구성된다. 제어 시스템을 구현하기 위한 제어 알고리즘의 블록선도는 Fig. 4와 같다. 순시무효전력을 제어하기 위한 시스템에서 주요한 부분은 크게 보상기준전류 계산부, 직류전압 제어부 및 PWM컨버터 제어부로 이루어진다.

3.1. 보상기준전류 계산부

보상기준전류 계산부에서는 2-2절에서와 같이 부하측에서 요구되는 순시무효전력을 보상장치로부터 공

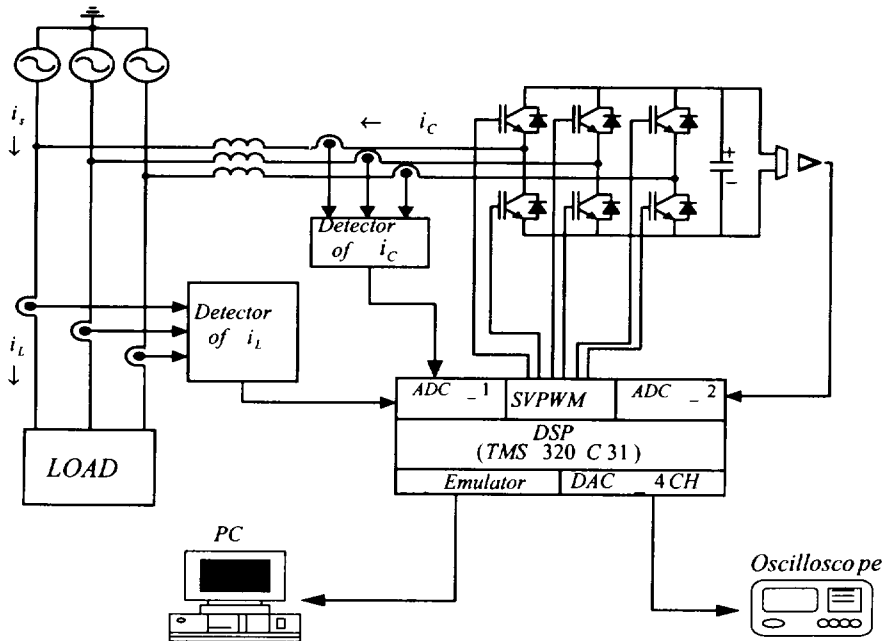


Fig. 3 Block diagram of compensating instantaneous reactive power.

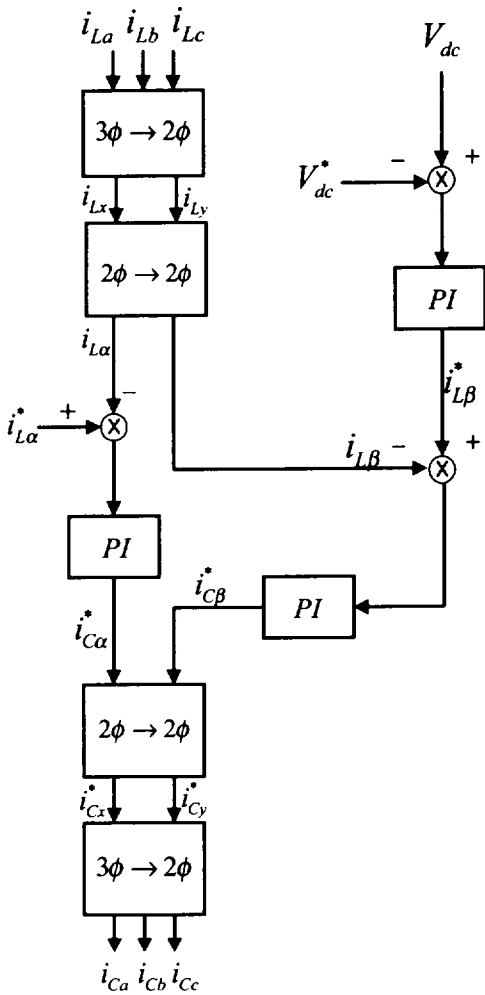


Fig. 4 Compensating command current calculation

급하기 위하여 순시무효전력의 발생원인인 무효전류 성분을 추출하여 이를 보상기준전류로 취한다. 먼저 부하전류 (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc})를 검출하여 $\alpha - \beta$ 좌표 변환을 한 후에 보상기준전류값 ($i_{L\alpha}^*, i_{L\beta}^*$)을 정한 후, 이 기준값에 보상기에서 보상되는 전류값 (i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc})을 검출하여 $\alpha - \beta$ 좌표변환을 한 값 ($i_{C\alpha}, i_{C\beta}$)을 빼주면 보상기에서 보상해야 할 전류값 (i_{Ca}^*, i_{Cb}^*)을 얻을 수 있다. 위의 보상해야 할 전류값을 다시 $\alpha - \beta$ 좌표변환하여 전압형 전류제어 PWM 제어부를 제어하면 된다.

3.2. 직류전압 제어부

직류측 전압은 컨버터에서 보상전류를 발생시키기 위한 에너지원이므로 일정한 값을 가져야 한다. 그러나 스위칭등에 의한 손실과 캐패시터의 누설전류에 의한 방전이 일어나므로 전압은 떨어진다. 따라서 별도의 충전이 이루어지지 않으면 결국 선간전압의 최대치까지 떨어지게 된다. 이런 상태에서는 컨버터의 정상적인 동작을 하기가 어려워 직류측 전압을 일정하게 유지해야 한다. 이 전압을 적정한 값으로 유지하려면 보상기의 자체 손실분에 해당하는 만큼의 전력이 전원측으로부터 공급될 필요가 있다. 이를 위해서는 유효전류에 해당하는 β 축의 직류성분을 직류단 전압제어기를 통해 보정해야한다. 본 실험에서는 직류 기준전압값을 390V 로 유지하도록 하였다.

3.3. 전류제어형 PWM 제어부

본 논문에서 전류제어기는 동기좌표계에서의 PI제어기를 이용하였다. 제어장치에 사용되는 마이크로 프로세서는 전체 시스템의 두뇌에 해당하는 부분으로 전류제어 및 입출력제어 등을 담당하며, 이를 위해 각종 입력데이터를 바탕으로 많은 연산을 수행하고 내부적인 시간을 계산하며, 제어신호나 시스템 상태를 외부로 출력한다. 본 시스템에서는 벡터제어방식을 사용하였고, 인버터의 출력제어는 공간전압벡터 PWM기법에 의해서 구현되어진다. 따라서 삼각함수와 부동소수점 연산이 가능해야하고, 실시간 처리가 요구되며, 고속성을 가지는 32비트 DSP (digital signal processor)인 TMS320C31을 사용하였다.

IV. 시뮬레이션 및 실험결과 고찰

Psim 프로그램으로 Fig. 5와 같은 무효전력 보상 시스템을 설계하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행시 sampling time은 150us로 하였으며, 22.9kV/220V의 배전계통에 연결된 전동기를 대상으로 하였고, 부하의 파라미터 값은 Table 1과 같다. 실험에 사용된 모델부하는 지상부하이며, 부하변동에

따른 응답특성을 분석하기 위해 부하변동 실험을 하였다. 또한 보상전류를 발생하기 위한 시스템에서는 $2mH$ 의 reactor와 직류전압의 평활을 위하여 전해콘덴서는 $1.650\mu F$ 를 사용하였다. Fig. 5의 점선부분은 전압센서를 이용하여 상전압을 검출한 후 3상→2상변

환 즉 정지좌표변환을 하였다. 이는 동기좌표상 변환시의 θ_0 를 계산하기 위한 과정이다.

보상기 내부에서 콘덴서에 연결된 저항은 초기 전원투입시 콘덴서로 유입되는 돌입전류를 저감시키기 위해서 만든 회로이며, 일정시간 경과후에 저항회로

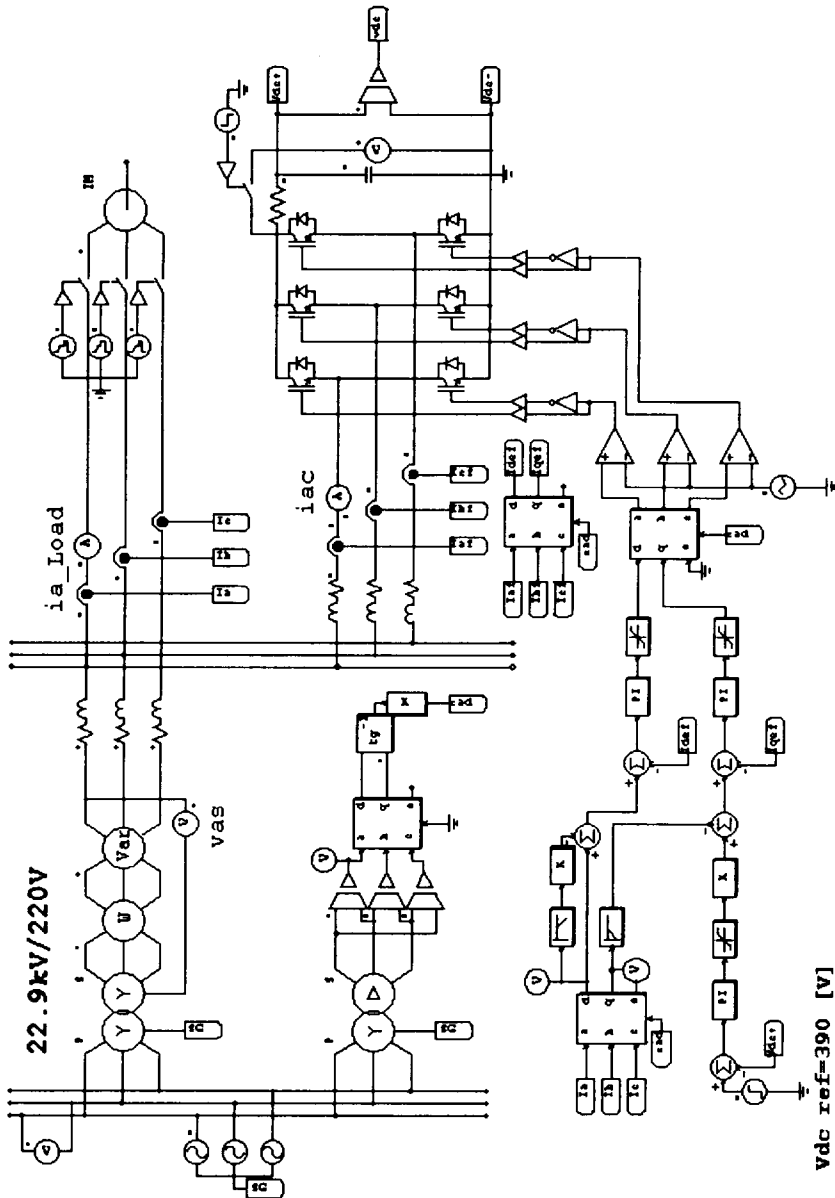


Fig. 5 Simulation block diagram

는 차단된다.

Table 1. Parameters of induction motor

전동기 정수	값	전동기 정수	값
정격출력	3[hp]	R_s	2.0700[Ω]
정격전압	220/380[V]	L_s	0.0085[H]
정격전류	8.8/5.1[A]	R_r	2.0100[Ω]
극 수	4	L_r	0.0085[H]
		L_m	0.2332[H]

Fig. 6은 컨버터의 콘덴서 직류전압 변화량을 보기 위하여 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 충전초기에는 돌입전류 제한용 저항 때문에 직류값이 시정수

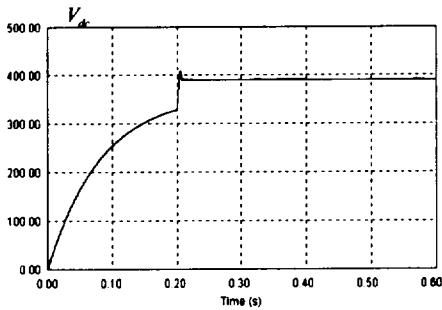


Fig. 6 Simulation results of V_{dc}

17-May-88
20:42:38

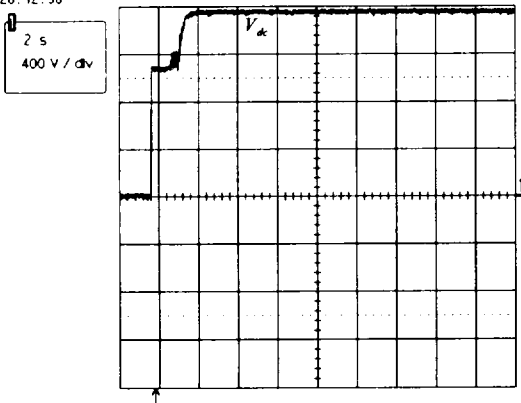


Fig. 7 Experimental results of V_{dc}

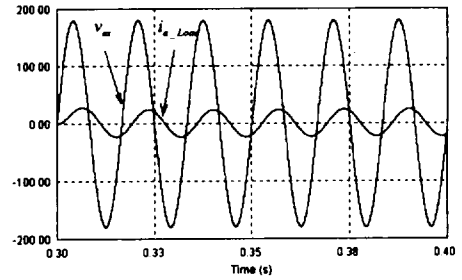


Fig. 8 Simulation results of v_{as} , i_{a_Load}

18-May-88
11:16:16

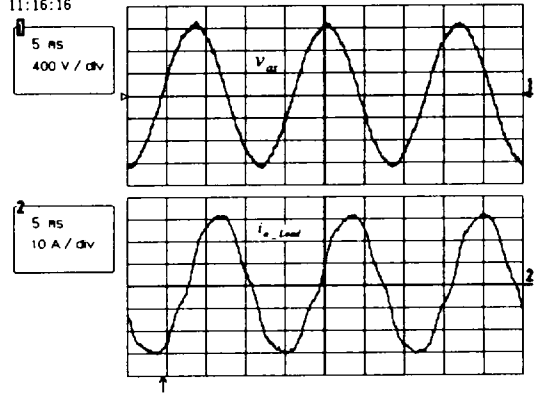


Fig. 9 Experimental results of v_{as} , i_{a_Load}

값으로 상승하다가 0.2[s]때 PI 제어에 의해 390V로 유지됨을 알 수 있다. Fig. 7은 직류전압 변화에 대한 실험결과 파형을 보여주고 있다. Fig. 8은 전원전압 v_{as} 와 부하전류 i_{a_Load} 의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 부하전류는 전원전압의 위상에 비해 지상임을 알 수 있다. Fig. 9는 실험결과 파형을 보여주고 있다. Fig. 10은 보상기의 보상전류 i_{ac} , 전원전류 i_{as} 및 부하전류 i_{a_Load} 의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 보상전류는 전원전류의 지상분을 보상하기 위해 진상으로 전류를 공급함을 알 수 있다. Fig. 10은 실험결과파형을 전원전압과 비교하여 보여주고 있다. Fig. 12는 보상 후 전원전압과 전원전류의 파형을 나타낸 것으로 전압과 전류는 거의 동상을 가져 역률이 1에 가까움을 알 수 있다. Fig. 13은 실험시 상전압과 전류의 파형을 나타내고 있으며 실험시에도 역률이 1

에 가까움을 알 수 있다. Fig. 14는 부하변동시 실험 결과를 나타내고 있으며 이때에도 상전압과 전류의 위상이 거의 일치함을 알 수 있다. 이것은 무효전력 변동에 대한 과도응답이 잘 되고 있는 것이다.

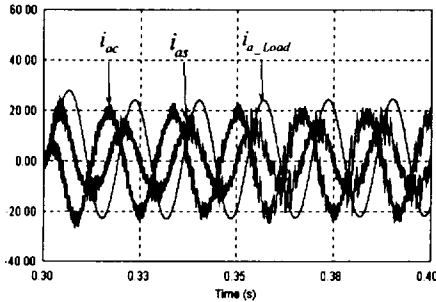


Fig. 10 Simulation results of i_{ac} , i_{as} , i_{a_Load}

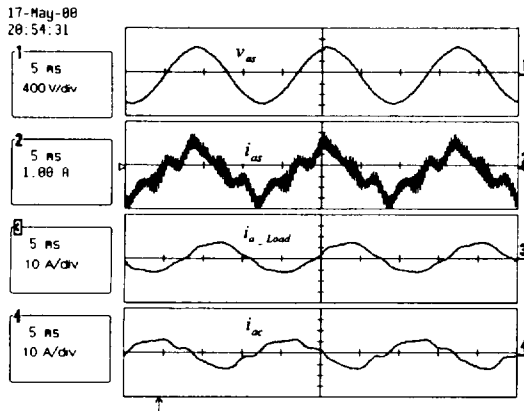


Fig. 11 Experimental results of v_{as} , i_{as} , i_{a_Load} , i_{ac}

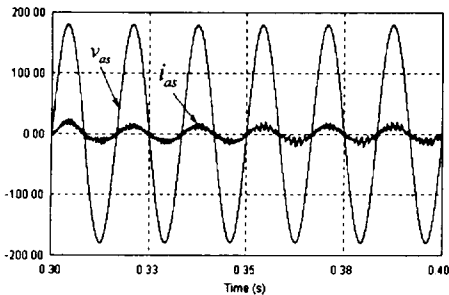


Fig. 12 Simulation results of v_{as} , i_{as}

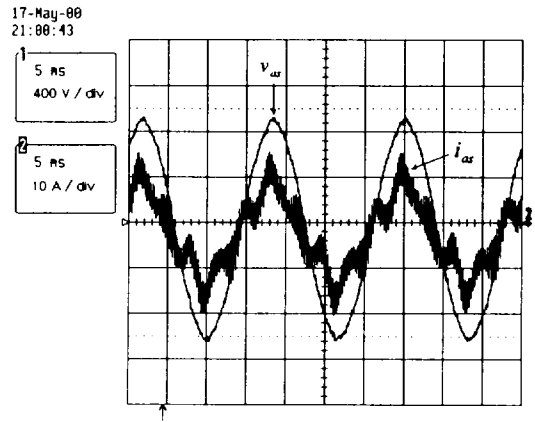


Fig. 13 Experimental results of v_{as} , i_{as}

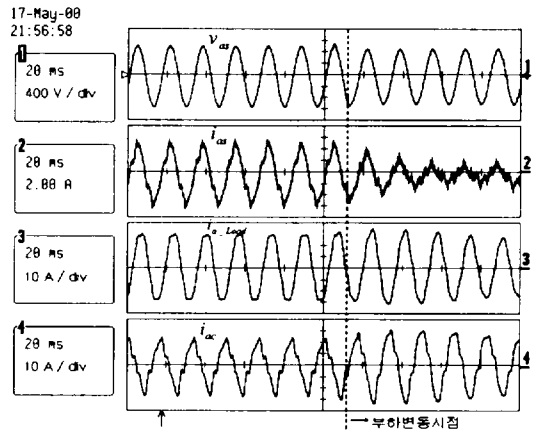


Fig. 14 Experimental results of v_{as} , i_{as} , i_{a_Load} , i_{ac} in transient situation of load change

V. 결론

배전시스템에서 부하에 따라 발생하는 무효전력을 IGBT 스위칭소자를 이용한 전류제어형 PWM 전력 컨버터 시스템으로 보상하는 원리 및 방법을 제시하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 부하에 흐르는 정현파 3상 전류를 동기좌표축상의 유효분과 무효분으로 분리하여 무효분 만큼 PWM 컨버터에서 공급하므로써 전원의 상전압과 상

전류의 위상이 일치하여 전원측의 역률이 1이 되도록 제어가 가능하였다.

(2) 부하변동에 따른 무효전력 변화시에도 기준명령값에 잘 추종하고 있어 실시간 제어가 가능함을 알 수 있었다.

이상과 같은 결과들을 종합해 보면, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험결과들이 서로 잘 일치하고 있어 제시한 무효전력 보상시스템이 잘 동작되고 있음을 알 수 있다. 따라서 이를 무효전력이 발생하는 전력 시스템에 적용하였을 때 전원계통이 역률을 개선하는데 크게 기여할 것으로 사려된다.

참고 문헌

- 1) S.B.Dewan. 1985. Design an input filter for the six-pulse bridge rectifier, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.1, IA-21, No.5, pp.1168-1175
- 2) E.Epstein. 1979. Analysis of a reactive current source used to improve current drawn by static inverters, IEEE. Trans. Ind. Electr. Contr. Instrm., Vol. IECI-26, No.4, pp.172-177
- 3) A.Alexandrovitz. 1984. Analysis of a static var compensator optimal energy storage element, IEEE Trans. Ind. Electr., Vol. IE-31, No.1, pp.28-33
- 4) J.H.Choi. 1989. Instantaneous Reactive Power Compensator using Current Controlled PWM Converter, Trans. KIEE, Vol. 38, No.7, JUL.
- 5) H.Akagi. 1986. Control strategy of active power filter using multiple voltage source PWM converter, IEEE Tans. Ind. Appl., Vol. IA-22, No.3, pp.460-465
- 6) G.H.Cho. 1986. Analysis an control of active power filter with optimized injection, in Conf. Rec. IEEE PESC, pp.401-409