

불평형 전원의 위상각 검출방법을 이용한 순시 저전압보상기

박현규^{*}, 송홍석, 남광희
포항공과 대학교 전자전기 공학과

Instantaneous Voltage Compensator with a Fast Finding Algorithm for the Phase Angle of the Unbalance

Hyun-Gyu Park , Hong-seok Song and Kwanghee Nam
Department of Electrical Engineering, POSTECH University

Abstract - 3상 전원에서 1차측이 지락 되거나 단락이 되면 2차측 전압은 불평형이 된다. 본 논문에서는 직렬 보상형 순시 전압 보상기에서 불평형 전원의 정상성분에 대한 위상각을 검출하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 그리고 왜란 관측자를 통해 부하전류를 추정하는 방법을 제안한다. 위상각의 순시 검출을 통해서 정상성분과 동일 위상의 기준 전압을 만듦으로써 순시 전압 보상기에서 출력해야 하는 전압의 크기를 최소화 하였다. 제안된 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해서 검증한다.

1. 서론

컴퓨터 전원 및 전기적으로 민감한 제어 장비는 고품질의 전원을 필요로 한다. 3상전원에서 한 상이 지락되거나 단락 사고가 일어나게 되면 Y-Δ 또는 Δ-Y결선의 변압기의 2차측에는 영상 성분이 없는 불평형 전원이 나타나게 된다. 이러한 불평형 전원은 컴퓨터나 제어장비에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 이러한 사고를 막기 위한 방법으로 기존에는 UPS를 사용하고 있다. 하지만 UPS는 고가이고 배터리의 유지, 보수도 필요로 한다. 또 전원의 전체 용량을 보상하는 전압 보상방법을 쓰고 있기 때문에 용량이 커진다. 최근에는 이러한 불평형 전원의 전압을 보상하는 방법으로 직렬 변압기를 이용해서 부족분만의 전압을 인가해서 용량을 줄일 수 있는 직렬 구조의 순시 전압 보상 방법이 연구되고 있다.[1][2][6]

본 논문에서는 동기좌표계d-q변환을 통해 불평형 전원을 해석하고 그림1과 같은 직렬 구조로 부족분의 전압을 보상하는 방법을 제안한다. 이때 기준 전압을 만들기 위해서는

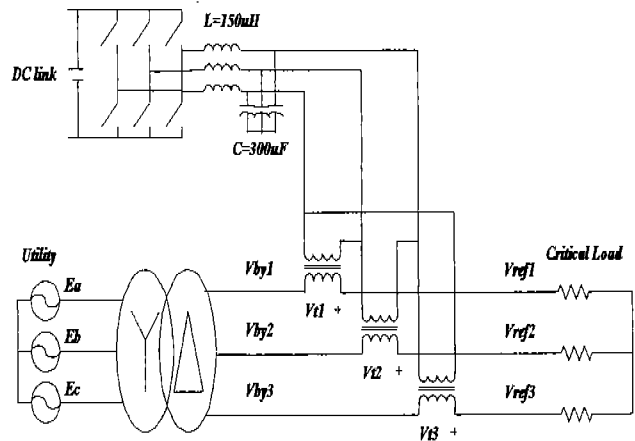


그림 1 전체 시스템 구성도

정상성분의 위상각 정보가 필요하다. 그러나 일반적으로 불평형 전원의 정상성분은 순시적으로 분해할 수 없기 때문에, 지금까지는 임의의 위상을 기준으로 기준전압을 만들었다.[1] 기준전압 선정 시 정상성분의 위상과 다른 위상을 이용하는 경우, 동일 용량의 부하를 보상하기 위해 인버터는 더 큰 양의 전압을 인가해야 하므로 인버터 용량이 커지게 된다. 불평형 전원의 정상성분에 대한 위상각을 필터를 이용하여 찾는 방법도 사용되어 왔으나, 이 방법은 필터를 이용하므로 시간지연을 갖는다. 따라서 빠른응답을 요구하는 순시 전압 보상기에 적합치 않았다. 근래에 와서, 좀더 빠른 위상정보를 찾는 방법이 제안되었다.[3] 그러나, 하나의 상 전압을 기준으로 사용하므로 근본적으로 사용된 상 전압의 위상에 의존하게 된다. 본 논문은 한 PWM주기에 짧은 시간차를 두고 전원을 두 번 sampling하여 불평형 전원의 정상 성분 및 역상성분을 순시적으로 검출하는 방법을 제안한다.

정상성분에 대한 순시 위상각 정보는 최적의 기준전압 선정에 사용된다. 그리고 왜란 관측자를 통해 부하전류를 추정하는 방법을 제안한다.

2. 전원의 불평형

불평형 전압이 발생하면 상전압 V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} 을 대칭성분 방법(Symmetrical Component Method)에 의해 식(1)과 같이 정상분(V_P), 역상분(V_N), 영상분(V_Z)으로 분해할 수 있다.[6]

$$\begin{bmatrix} V_Z \\ V_P \\ V_N \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $\alpha = e^{j\frac{2}{3}\pi}$ 이다.

영상성분이 없는 임의의 3상전압은 정지좌표계에서 식(2)와 같이 표현되고 이것을 동기좌표계로 표현하면 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{DS} \\ V_{QS} \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$V_{de} = V_p \cos \phi_p + V_n \cos(2\omega t + \phi_n) \quad (3)$$

$$V_{qe} = V_p \sin \phi_p - V_n \sin(2\omega t + \phi_n)$$

여기서 V_p, V_n 은 각각 정상분과 역상분의 크기이고, ϕ_p, ϕ_n 은 각각 정상분과 역상분의 위상을 나타낸다. 식(3)에서 보는바와 같이 불평형 전원의 정상성분은 동기 좌표계에서 DC성분으로, 역상분은 2차 고조파로 나타내어진다는 것을 알 수 있다. 그림 2는 불평형이 일어났을 때 순시적으로 나타낸 동기좌표계의 그림이다. 역상분은 $2\omega t$ 로 회전함을 알 수 있다.

3. 정상성분의 순시 위상각 검출 방법

정지좌표계에서 불평형 전원은 식(4)와 같다.

$$V_{dqs}(t) = V_{dqe}^p(t) e^{j\omega t} + V_{dqe}^n(t) e^{-j\omega t} \quad (4)$$

여기서, $V_{dqe}^p(t) = V_p(t) \cdot [\cos(\phi_p(t)) + j\sin(\phi_p(t))]$,

$$V_{dqe}^n(t) = V_n(t) \cdot [\cos(\phi_n(t)) + j\sin(\phi_n(t))],$$

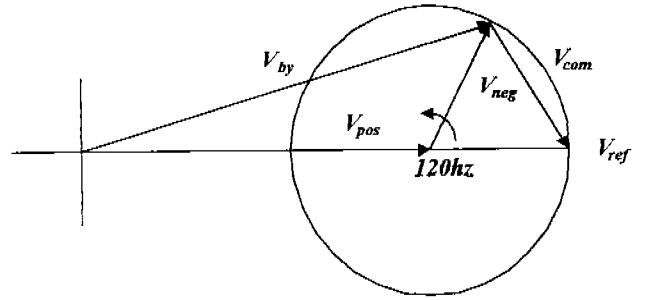


그림 2 불평형 전원의 동기 좌표계

$$V_{dq}(t) = V_d(t) + jV_q(t)$$

정상상태에서 $V_p(t), V_n(t), \phi_p(t), \phi_n(t)$ 는 상수이다.

한 PWM 주기에 작은 시간차를 두고 전압을 sampling하면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} V_{dqs}(t_0) &= V_{dqe}^p(t_0) e^{j\omega t_0} + V_{dqe}^n(t_0) e^{-j\omega t_0} \\ V_{dqs}(t_0 + \Delta t) &= V_{dqe}^p(t_0 + \Delta t) e^{j\omega(t_0 + \Delta t)} \\ &\quad + V_{dqe}^n(t_0 + \Delta t) e^{-j\omega(t_0 + \Delta t)} \end{aligned} \quad (5)$$

현실적으로 짧은 시간간격(예를 들어 $\Delta t \approx 10 \mu \text{ sec}$)으로 전압을 sampling하면 식(6)과 같이 가정을 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{dqe}^p(t_0) &= V_{dqe}^p(t_0 + \Delta t) \\ V_{dqe}^n(t_0) &= V_{dqe}^n(t_0 + \Delta t) \end{aligned} \quad (6)$$

비록 sampling 간격 사이의 t_1 에서 ($t_0 < t_1 < t_0 + \Delta t$) 불평형이 발생하더라도 t_0 에서의 순시 위상을 찾는 것이 목적이므로, 한 PWM주기안에서 t_0 이후에 발생한 불평형은 무시하고, 다음 PWM주기에서 ($t_0 + T_{PWM}$) t_1 에서 발생한 불평형의 위상을 찾는다. 즉 t_1 에서 불평형이 스텝형태로 발생하더라도 ADC의 LPF를(약 5kHz cutoff 주파수) 통과한 신호는 스텝변화를 나타내지 않는다. 따라서 추정조건(6)을 근사적으로 만족하게 된다. 이것은 t_1 에서 발생한 불평형을 무시하는 결과를 가져오게 된다. 결과적으로

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{dqe}^p \\ \hat{V}_{dqe}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\omega t_0} & e^{-j\omega t_0} \\ e^{j\omega(t_0 + \Delta t)} & e^{-j\omega(t_0 + \Delta t)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{dq}(t_0) \\ V_{dq}(t_0 + \Delta t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\{V_{dqe}^p, V_{dqe}^n\}$ 은 식(7)과 같이 얻어진다.

얻어진 $\{\hat{V}_{dqe}^p, \hat{V}_{dqe}^n\}$ 로부터 쉽게 정상성분과 역상성분 각각의 위상각 $\theta_p(t), \theta_n(t)$ 를 식(8)과 같이 찾을 수 있다.

$$\theta_p(t) = \text{atan2}[\widehat{V}_{qe}^p(t), \widehat{V}_{de}^p(t)] \quad (8)$$

시뮬레이션을 통해서 알고리즘을 검증한다.

4. 제어 알고리즘

4.1. 시스템 구성도

Utility 시스템에서는 일반적으로 전원을 변압기를 이용해 승압 및 강압뿐 아니라 isolation시킨 후 이용한다. 1차측 전원에서 사고가 발생하게 되면 2차측에는 불평형 전원이 발생한다. 2차측에 중성선이 없다고 가정하면 정상분과 역상분만이 나타난다. 이때 부하측 전압을 regulation 시켜주기 위해서 인버터가 LC 2차 필터를 거쳐 직렬변압기로 전압을 가감 해준다. 그리고 직렬 변압기는 평상시에 변압기에서의 전압강하를 줄이기 위해 리액턴스가 매우 작게 설계되어야 한다. 이에 대한 전체 시스템 구성도는 그림 1과 같다.

4.2. 캐패시터의 전압 reference 결정

불평형이 발생하게 되면 부족분의 전압을 필터 커패시터, C의 전압 제어를 통해 보상할 수 있다. 그림3과 같이 보상되어질 전압은 식(9)와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} V_{t1} &= V_{ref1} - V_{by1} \\ V_{t2} &= V_{ref2} - V_{by2} \\ V_{t3} &= V_{ref3} - V_{by3} \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)이 커패시터의 기준전압이 되기 위해서는 식(10)과 같이 된다. 이것을 동기 좌표계로 표현하면 식(11)이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{c1} \\ V_{c2} \\ V_{c3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{t1} \\ V_{t2} \\ V_{t3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} V_{c\,de} \\ V_{c\,qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.2889 \\ -0.2889 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{t\,de} \\ V_{t\,qe} \end{bmatrix} \quad (11)$$

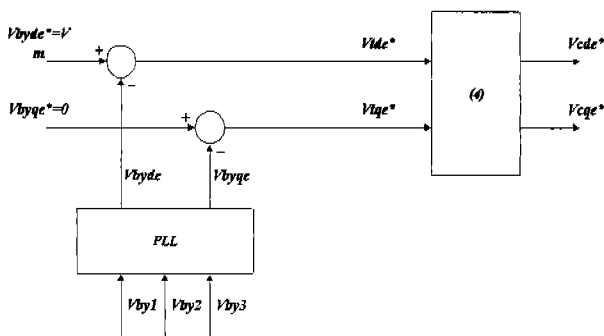


그림 3 부족분 전압 발생기

4.3 시스템 모델

그림4와 같이 인버터의 출력 단에 있는 2차 필터를 플랜트로 보고 캐패시터의 전압을 제어하는 것을 목적으로 한다. 이것의 dynamic model을 동기좌표계d-q변환에서 구하면 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= A(\omega_e)x + Bv_a + d \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} x &= [i_{ad} \ i_{aq} \ v_{cd} \ v_{cq}]^T \\ y &= [i_{ad} \ i_{aq} \ v_{cd} \ v_{cq}]^T \end{aligned} \quad (13)$$

$$A(\omega_e) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_e & -\frac{1}{L} & 0 \\ -\omega_e & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & \omega_e \\ 0 & \frac{1}{C} & -\omega_e & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$v_a = \begin{bmatrix} v_{ad} \\ v_{aq} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad d = -\frac{1}{C} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix}$$

여기서 ω_e 는 60hz로 고정된다.

4.4 제어기 구성

A. i_L observer 구성

식(12)에서 보듯이 i_L 은 왜란으로 동작하므로 observer를 이용하여 이를 전향제어로 보상해 준다. 그림 4에서와 같이 i_L 은 i_a 와 i_c 의 합이고 i_c 은 v_c 를 미분함으로써 얻어질 수 있다. 하지만 미분기는 노이즈 등에 취약하므로 Q 필터를

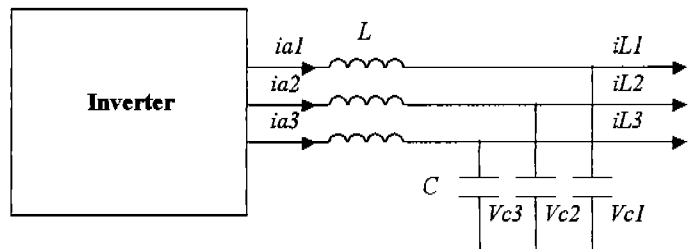


그림 4 플랜트 모델

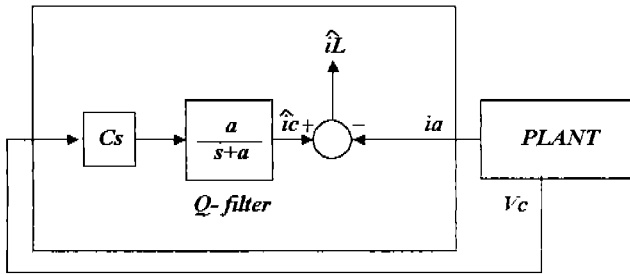


그림 5 부하 관측자

이용한다. Q 필터는 시스템 주파수에서는 gain이 1이고 그 이상의 주파수에서는 LPF(Low Pass Filter)성격을 갖는다. 그에 대한 구성도는 그림 5와 같다.

여기서 a 는 시스템 bandwidth에 10배로 설정했다.

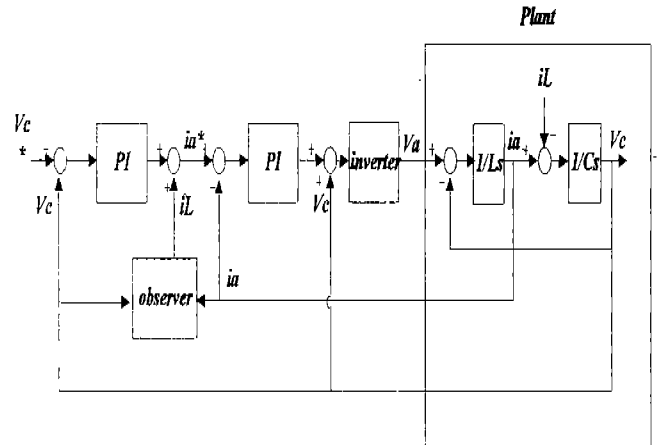


그림 6. 전체 제어기 구성도

B. PI controller

전체제어 시스템은 그림 6과 같이 일반적으로 사용하는 PI 제어기를 사용하였다. Modulation방법은 SVM(space vector modulation)을 사용하였다.

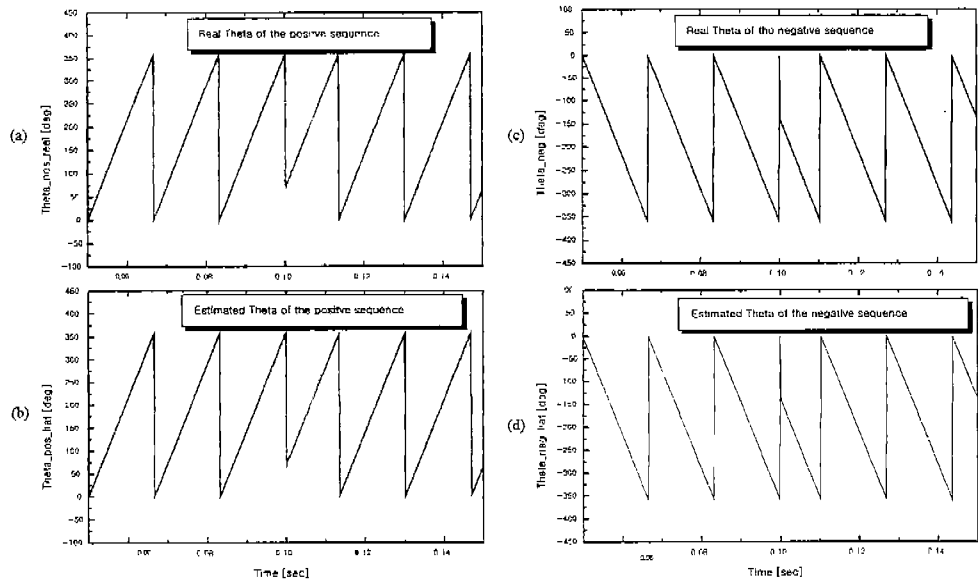


그림 7. 정상성분의 순시 위상각 검출 simulation결과

(t_0 에서 step형태의 불평형 인가, $t_0 < t_1 < t_0 + \Delta t$)

- (a) 실제 정상성분의 위상각, (b) 추정된 정상성분의 위상각,
- (c) 실제 역상성분의 위상각, (d) 추정된 역상성분의 위상각

5. 시뮬레이션

A. 순시 위상각 검출

정상성분 및 역상성분의 위상각 검출은 식(7)-(8)을 이용하였다. 초기에 정상성분 및 역상성분은 $\{V_p(t)=100, V_n(t)=0, \phi_p(t)=0^\circ, \phi_n(t)=0^\circ\}$ 의 조건이었다. PWM 주기내에서 첫 번째 sampling과 두 번째 sampling사이의 시간 t_1 에서 ($t_1=0.1 \text{ sec}$, $t_0 < t_1 < t_0 + \Delta t$) 정상 및 역상성분을 $\{V_p(t)=50, V_n(t)=50, \phi_p(t)=10^\circ, \phi_n(t)=20^\circ\}$ 의 조건으로 step 형태로 변화 시켰다. 그림 7에 나타나는 바와 같이 시뮬레이션 결과는 추정치가 실제 위상각과 일치하는 것을 보여준다. Noise에 의한 민감도는 실험

을 통해서 보이고자 한다.

B. 순시 저전압(불평형 전압)의 보상

시뮬레이션에 사용된 parameter는 표1과 같다. 스위칭 주파수는 8.33KHz이고 그림 1의 구조에서 1차측 전압의 한 상을 0.23msec에서 50% 전압강하를 시켜 순간 저전압이 발생하는 경우에 대해 시뮬레이션을 수행했다.

표 1 시뮬레이션 parameter

L	150uH
C	300uF
DC link전압	300V
line-line 전압	300Vp
직렬변압기 비	2 : 1

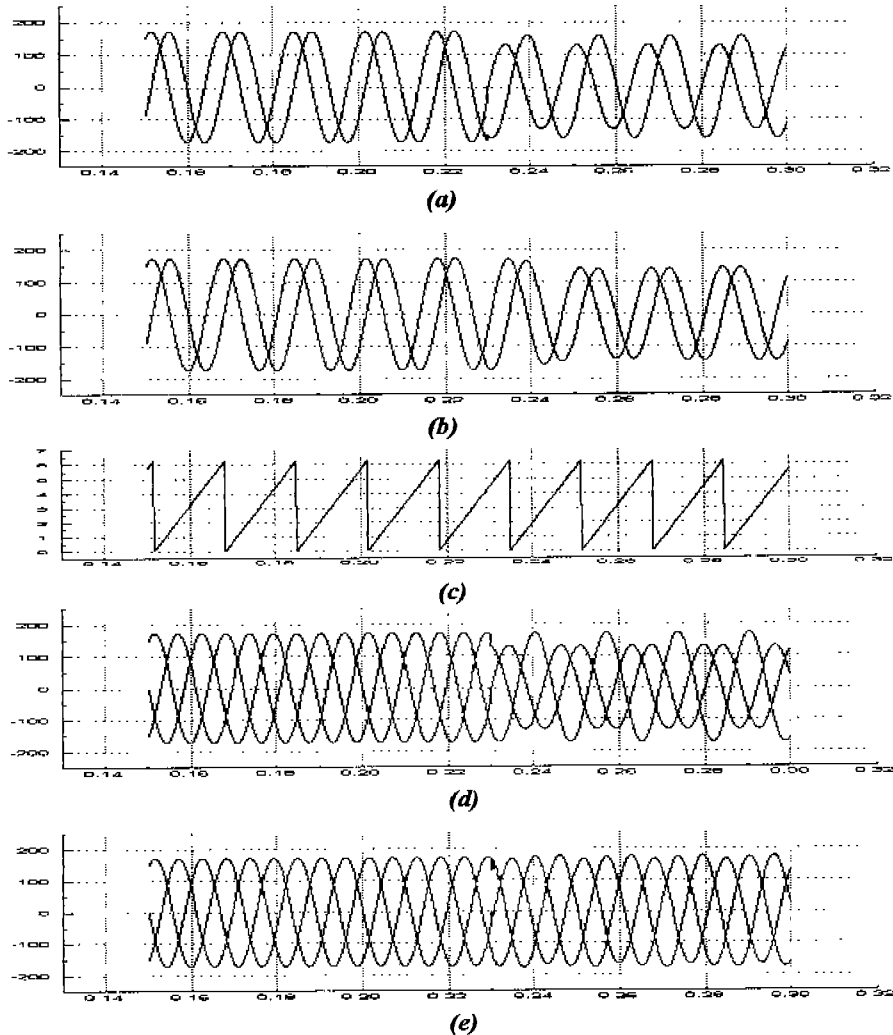


그림 8 불평형 됐을때의 (a) 정지 좌표계전압 (b) 정상성분의 전압 (c) 위상각 (d) 보상전의 상전압 (e) 보상후의상전압

그림 8의 (a)는 불평형이 되었을 시 정지좌표계의 성분을 나타내고 (b)는 식(7)에 의해 얻어진 정상성분만을 나타낸다. (c)는 식(7)에 의해 얻어진 정상분의 값을 \tan^{-1} 로 계산한 위상각을 나타낸다. 위상각이 불평형이 되어도 변하지 않음을 볼 수 있었다. 그리고 (d)는 보상 전의 상전압 이고 (e)는 보상 후의 상전압 파형이다. 불평형이 발생해도 충분히 보상함을 볼 수 있었다.

C. 부하 관측자

시스템 BW(Bandwidth)를 100hz 로 가정하고 부하관측자의 BW(Bandwidth)를 1000hz로 사용했다. 그림 9는 실제 부하 전류파형과 관측자의 전류파형이다. 거의 일치함을 볼 수 있었다.

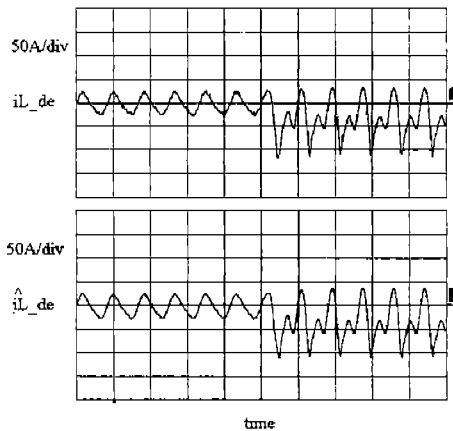


그림 9. 부하측 실제 전류와 관측자 파형

7. 결론

본 논문은 순간 저전압 및 불평형 전압이 발생했을 때 생기는 문제점을 분석했으며 직렬 구조의 순간 전압 보상기에 있어서 정상성분만을 순시적으로 검출하고 이를 이용해서 위상각을 구하는 알고리즘을 제안했다. 그리고 Q-필터를 이용한 부하 관측자를 설계하여 부하전류를 측정하지 않고 보상하는 방법을 제안했고, 제안된 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 보였다. 앞으로 실험을 통해 제안된 알고리즘을 보이고자 한다.

참고문헌

- [1] Alexandre Campos , Geza Joos. "Analysis and Design of a Series Voltage Unbalance Compensator Based on a Three-Phase VSI Operating With Unbalanced Switching Functions",IEEE Trans. Power Elec. Vol.9 ,No.3 , May 1994 p269-274.
- [2] Ping Hsu , Michae Behnke " A Three-Phase Synchronous Frame Controller for Unbalanced Load" , 98 APEC conference, p1369-1374
- [3] Kevok Haddad , Geza Joos " A fast Algorithm for Voltage Unbalance Compensation and Regulation faulted Distribution Systems" , 98 APEC conference. p963-969
- [4] V.B. Bhavaraju and Prasad N.Enjeti."Analysis and Design of an Active Power Filter for Balancing Unbalanced Loads" IEEE Trans. Power Elec. Vol.8 , No. 4, Oct. 1993 p640-647
- [5] Vijay B. Bhavaraju and Prasad N.Enjeti,"An Active Line Conditioner to Balance Voltage in a Three-Phase System" IEEE Indus. Appl. Vol. 32 , No. 2, Mar/Appil. 1996
- [6]최연규, 이승요,최규하,목형수,함형원 " 3상 PWM 인버터를 이용한 순간전압보상기의 해석 " '97 전력 전자학술대회 논문집 p222-227
- [7]이승요,조준석,최규하,목형수,박영길,신우석,"불평형 전원 시스템을 고려한 3상 능동전력필터에 관한 연구",KIPE Power Elec. Annual Conference, July 1997.
- [8]김병진,최재호 " 동특성 개선을 위한 UPS용 인버터의 전디지탈화 이중제어기" ,전기학회논문집 Vol. 46, No. 5, May. 1997