

3상 불평형 전원 시스템의 새로운 위상각 검출기법을 이용한 순간전압보상기의 해석 및 제어

李承約, 高再錫, 睦亨洙, 崔圭夏

Analysis and Control of Instantaneous Voltage Compensator Using New Phase Angle Detection Method Synchronized by Positive Sequence of Unbalanced 3-Phase Source

Seung-Yo Lee, Jae-Seok Gho, Hyung-Soo Mok, Gyu-Ha Choe

요 약

3상 전력 시스템에서 불평형 전원의 전압은 대칭좌표법에 의하여 정상, 역상, 영상성분으로 각각 분해 될 수 있고 또한 전력 시스템에 중성선이 없는 경우 영상성분은 부하측에 나타나지 않게 된다. 따라서 중성선이 없는 불평형 시스템에서는 전원측의 역상 성분만을 검출하여 보상함으로써 부하측에 평형된 전압을 공급할 수 있을 뿐만 아니라 정상성분의 크기를 제어함으로써 부하에 인가되는 전압의 크기를 조정하는 것이 가능하다. 아울러 이러한 불평형 전압에 의한 각 대칭분은 3상 2상 변환을 통한 동기좌표축 상에서의 효율적인 검출이 가능한데, 본 논문에서는 전원의 불평형 성분을 동기좌표축 상에서 순시적으로 검출하여 이를 보상하고 부하의 전압조정 기능 역시 수행하는 순간전압보상기의 보상 알고리즘 및 이때 좌표변환시 필요한 전원의 위상각 정보를 전원의 정상성분에 일치시키는 새로운 위상각 검출 알고리즘을 제안한다. 제안된 보상 시스템의 성능 및 특성을 시뮬레이션을 통하여 해석하고 실험으로써 검증하였다.

ABSTRACT

Unbalanced source voltage in the 3-phase power system is decomposed into positive, negative and zero sequence components. Also, assuming there is no neutral path in the system, the zero sequence component is not shown on the load side. Therefore, in the unbalanced power system without neutral path, it is possible to provide balanced voltage to the load side by compensating negative sequence component and also to regulate the voltage amplitude by controlling the positive sequence component. In addition, the symmetrical components due to voltage unbalance can be effectively detected on the synchronous reference frame by using d-q transformation. In this paper, an algorithm not only compensating unbalanced source voltage by canceling the negative sequence component on the synchronous reference frame but also maintaining load voltages constantly is proposed. Also a novel method for phase angle detection synchronized by positive sequence component under unbalanced source voltage is suggested and this detected phase angle is used for d-q transformation. The performances and characteristics of the proposed compensating system are analyzed by simulation and verified through experimental results.

Key Words: unbalanced source voltage, positive & negative sequence component, instantaneous voltage compensator, phase angle detection

1. 서 론

일반적인 전력설비의 질적 향상으로 정전의 발생빈도는 적어지게 되었으나 전원측의 전압상승 또는 전압강하와 같은 순간적인 전압변동은 계속되는 전원 문제 중의 하나이다. 3상 전력 시스템에서 어떠한 한 상의 전압이 커지거나 작아지게 되면 불평형 전원 시스템이 되고 이러한 전원전압이 부하에 인가되는 경우 전력 시스템에 좋지 않은 영향을 미치게 되는데 이러한 영향을 해석하고 해결하기 위한 노력이 계속되고 있다.⁽¹⁻⁷⁾ 3상 전원의 불평형은 정지형 컨버터와 같은 비선형 부하로 인하여 특성화 되지 않은 저주파수의 고조파 성분을 발생시키고 이는 컨버터 시스템의 필터나 스위치의 정격용량을 증가시키는 요인으로 작용한다. 또한 불평형 전원이 인가되는 전기기계에서 낮은 역상분 임피던스로 인해 많은 양의 역상분 전류가 발생하여 기계의 손실을 증가시킬 뿐만 아니라 토크의 감소를 초래한다.^(1,4) 따라서 전원측 불평형으로 발생하는 악영향을 배제하기 위하여 전원의 불평형 전압을 보상하여 부하측에 평형된 전원을 공급해 줄 필요가 있다.

불평형 전원의 전압은 대칭좌표법에 의하여 정상분, 역상분, 영상분으로 분해가 가능하며 시스템에 중성선이 없는 경우 영상성분은 무시될 수 있다. 따라서 전원의 역상성분을 검출하여 이를 보상하게 되면 전원의 평형상태를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 정상성분의 크기를 조정함으로써 부하측에 일정한 크기의 전압이 유지되도록 할 수 있다. 불평형 전원 시스템으로부터 이러한 대칭성분은 3상/2상 좌표축 변환을 통하여 d-q 동기좌표축상에서 효율적인 검출이 가능한데 본 논문에서는 이러한 대칭성분들을 순시적으로 검출하고 이를 보상함으로써 전원이 불평형이 되더라도 부하에는 평형된 안정한 전압이 공급되도록 하는 순간전압보상기의 보상 알고리즘을 제안하며 이때 좌표축 변환을 위해 필요한 전원의 위상각 정보를 전원의 정상성분에 일치시키는 새로운 위상각 검출 방식 또한 제안한다. 제안된 d-q축 변환을 위한 기준 위상각 검출방식은 대칭좌표법에 의하여 기준상의 정상성분에 동기된 위상각 정보를 얻도록 하는 것으로, 임의의 위상을 기준으로 기준전압을 만듦으로써 동일용량의 부하를 보상하는데 사용되는 보상 시스템의 용량이 더 커지는 단점을 배제할 수 있을 뿐만 아니라 참고문헌^(6,7)에서 제안된 방식처럼 필터를 이용하여 정상분에 위상각을 일치시키는 경우에 있어서 발생하는 검출 시간지연의 문제를 해결할 수 있다. 제안된 방식은 기준상을 제외한 2상 전압의 120° 위상지연 및 단순한 대수연산을 수행함으로써 간단한 방법으로 순시적인 기준 위상각을 얻을 수 있도록 한다.

2. 불평형 전원의 d-q변환 해석

불평형 3상 전압은 식 (1)과 같이 대칭좌표법을 사용하여 영상분, 정상분, 역상분의 평형 3상의 3개의 페이지로 변환될 수 있다. d-q 좌표축 변환행렬을 식 (2)에 나타낸 바와 같이 T라 했을 때 동기좌표축 상의 d축 및 q축 성분은 식 (3)으로 표현되고, 이때 전원의 위상에 동기된 위상각 정보가 필요하다.

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{an} \\ E_{bn} \\ E_{cn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이며 E_0 는 영상분, E_1 은 정상분, E_2 는 역상분의 페이지를 각각 나타낸다.

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} e_q^e &= \frac{2}{3} (e_{an} - \frac{e_{bn}}{2} - \frac{e_{cn}}{2}) \cos\theta + \frac{1}{\sqrt{3}} (e_{bn} - e_{cn}) \sin\theta \\ e_d^e &= \frac{2}{3} (e_{an} - \frac{e_{bn}}{2} - \frac{e_{cn}}{2}) \sin\theta - \frac{1}{\sqrt{3}} (e_{bn} - e_{cn}) \cos\theta \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 식(1) ~ (3)을 사용하여 불평형 3상전압에 대한 표현식 (4)를 동기좌표축 상의 2상 변수로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} e_{an}(t) \\ e_{bn}(t) \\ e_{cn}(t) \end{bmatrix} = E_{mp} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_p) \\ \cos(\omega t + \alpha_p - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \alpha_p + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} + E_{mn} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_n) \\ \cos(\omega t + \alpha_n + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \alpha_n - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} + E_{m0} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_0) \\ \cos(\omega t + \alpha_0) \\ \cos(\omega t + \alpha_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E_q &= E_{mp} \cos \alpha_p + E_{nm} \cos(2\omega t + \alpha_n) \\ E_d &= -E_{mp} \sin \alpha_p + E_{nm} \sin(2\omega t + \alpha_n) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 첨자 p 는 정상분임을 첨자 n 은 역상분, o 는 영상분임을 나타내고 q 는 q 축 성분임을 d 는 d 성분임을 각각 나타내며 a_p, a_n, a_o 는 각 대칭성분의 위상각을 의미한다. 식 (5)에서와 같이 3상 불평형 전압의 d-q축 상의 표현에는 일정한 크기의 직류성분에 2차의 고조파 성분이 포함되어 있음을 알 수 있고 영상분에 의한 전압성분은 모두 d-q축 상에서 사라짐을 확인할 수 있다.

3. 순간전압보상 시스템

그림 1은 불평형 전압을 보상하기 위한 순간전압보상 시스템의 구성도이다. 전압보상 시스템은 3상 PWM 인버터로 구성되어 있으며 보상전압 성분을 LC 필터를 거쳐 직렬변압기 로써 전력선에 공급해 주도록 한다.

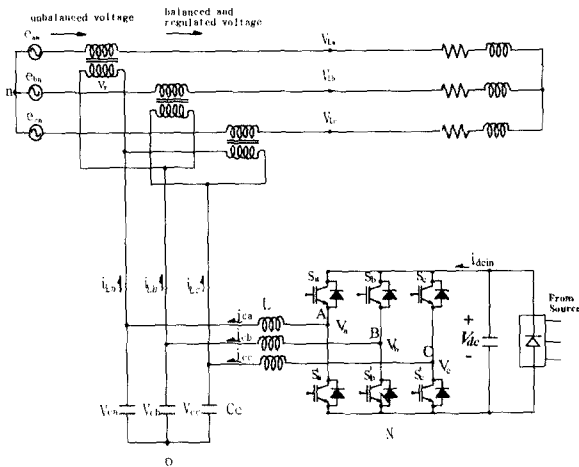


그림 1 순간전압보상 시스템의 전체 구성도
Fig. 1 Overall configuration of instantaneous voltage compensator

3상 전압형 인버터를 이용한 보상 시스템은 전원에서 발생 되는 불평형을 보상하기 위하여 이에 상당한 불평형 전압을 발생시켜 라인에 공급해 주며 본 논문에서 인버터 직류측 전압은 3상 전원에서부터 다이오드 정류기를 사용하여 공급하였다. 이와 같은 보상 시스템의 전력부 모델을 얻기 위하여 그림에서와 같이 필터 커패시터의 중성점을 o 라 하고 식 (6), (7)의 불평형 조건 및 식 (8)의 스위칭 함수를 사용하면 인버터의 보상 출력전압에 대한 상태 방정식을 식 (9)와 같이 얻을 수 있다.

$$v_{ca} + v_{cb} + v_{cc} \neq 0 \quad (6)$$

$$i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} = 0 \quad (7)$$

$$S_a, S_b, S_c = 1: \text{상위 그룹 스위치 ON} \quad (8)$$

$$S_a, S_b, S_c = 0: \text{하위 그룹 스위치 ON}$$

$$\begin{aligned} v_{Ao} &= \frac{V_{dc}}{2} [2S_a - S_b - S_c] + \frac{1}{3} [v_{ca} + v_{cb} + v_{cc}] \\ v_{Bo} &= \frac{V_{dc}}{3} [2S_b - S_c - S_a] + \frac{1}{3} [v_{ca} + v_{cb} + v_{cc}] \\ v_{Co} &= \frac{V_{dc}}{3} [2S_c - S_c - S_b] + \frac{1}{3} [v_{ca} + v_{cb} + v_{cc}] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 v_{ca}, v_{cb}, v_{cc} 는 필터 커패시터에 걸리는 전압을, i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 는 인버터 출력전류를 나타내며 V_{dc} 는 인버터 직류단 전압이고 v_{Ao}, v_{Bo}, v_{Co} 는 인버터 출력단자와 필터 커패시터 중성점 사이의 전압을 의미한다.

필터 커패시터로 흐르는 전류를 정의하기 위하여 P를 미분 연산자, 필터 커패시터의 커패시턴스를 C_c 라 하고 변압기 쪽으로 흐르는 전류를 i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 라 한다면 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$C_c P \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)을 동기좌표축 변수로 변환하고 인버터 출력전류에 대한 d-q 표현식으로 나타내면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} i_{cq}^e &= C_c \frac{d v_{cq}^e}{dt} + i_{Lq}^e + \omega C_c v_{cd}^e \\ i_{cd}^e &= C_c \frac{d v_{cd}^e}{dt} + i_{Ld}^e - \omega C_c v_{cq}^e \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 ω 는 전원의 각주파수이며 각 변수의 상위 첨자 e 는 각 변수가 동기좌표축상에서 표현된 것임을 의미한다.

필터 인덕터의 인덕턴스를 L 이라 한다면 인버터 출력전류에 대한 상태 방정식은 식 (12)와 같이 표현될 수 있으며 동기좌표축 상에서 d-q 성분으로 표현되는 인버터 출력 전압에 대한 표현은 식 (13)과 같다.

$$LP \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{Ao} \\ v_{Bo} \\ v_{Co} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$v_{oq}^e = L \frac{di_{cq}^e}{dt} + v_{cq}^e + L\omega i_{cd}^e \tag{13}$$

$$v_{od}^e = L \frac{di_{cd}^e}{dt} + v_{cd}^e - L\omega i_{cq}^e$$

여기서 v_{oq}^e, v_{od}^e 는 각각 3상 변수 v_{Ao}, v_{Bo}, v_{Co} 에 대한 d-q축 변수이다.

4. 정상분에 동기된 위상각 검출 및 전압 보상분의 제어 알고리즘

4.1 정상분에 동기된 위상각 검출 알고리즘

보상 시스템의 제어를 동기좌표계 d-q축 위에서 실행하기 위해서 3상/2상 또는 2상/3상 좌표축 변환을 실시하며 이때 전원의 위상각 정보를 필요로 하게 된다. 그러나 3상 전원이 불평형이 되는 경우 일반적으로 사용되어 온 방법인 3상 전압을 정지좌표계로 변환한 후 정지좌표계 d-q축 전압변수를 이용하여 위상각을 얻어내는 경우 위상각 정보가 왜곡되는 문제를 발생시키게 되고, 만약 임의의 기준상을 이용하여 임의의 한 상의 전압에 동기된 전원 위상각을 사용하는 경우 보상 시스템의 용량이 증가하는 문제를 발생시킨다. 또한 참고 문헌 [6],[7]에서와 같이 필터를 이용하여 정상성분에 동기된 위상각을 검출하는 방식은 과도 상태에서 검출 시간상에 지연이 생긴다는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 본 논문에서는 대칭좌표법을 이용한 정상성분에 동기된 위상각 검출 방법을 제안한다. 3상 불평형 전압은 식 (1)에서와 같이 기준상을 기준으로 각 대칭성분으로 분해가 가능하다. 식 (1)을 통해서 a, b, c 각 상 기준에 대한 페이저 대칭성분들을 나타내면 식 (14)~(16)과 같다.

$$E_{a0} = (E_{an} + E_{bn} + E_{cn})/3$$

$$E_{a1} = (E_{an} + E_{bnLEAD} + E_{cnLAG})/3 \tag{14}$$

$$E_{a2} = (E_{an} + E_{bnLAG} + E_{cnLEAD})/3$$

$$E_{b0} = (E_{an} + E_{bn} + E_{cn})/3$$

$$E_{b1} = (E_{bn} + E_{cnLEAD} + E_{anLAG})/3 \tag{15}$$

$$E_{b2} = (E_{bn} + E_{cnLAG} + E_{anLEAD})/3$$

$$E_{c0} = (E_{an} + E_{bn} + E_{cn})/3$$

$$E_{c1} = (E_{cn} + E_{anLEAD} + E_{bnLAG})/3 \tag{16}$$

$$E_{c2} = (E_{cn} + E_{anLAG} + E_{bnLEAD})/3$$

여기서 첨자 0, 1, 2는 각각 영상분, 정상분, 역상분을 나타내며 L E AD는 120° 위상 앞섬을 LAG는 120° 위상 지연을

나타낸다. 따라서 정상성분만에 의한 정지좌표계 d-q 성분은 식 (17)과 같고 정상분에 동기된 위상각은 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{qp}^s = (2 * E_{a1} - E_{b1} - E_{c1})/3 \tag{17}$$

$$E_{dp}^s = (E_{c1} - E_{b1})/\sqrt{3}$$

$$\theta = \tan^{-1}(-E_{dp}^s / E_{qp}^s) \tag{18}$$

4.2 전압 보상분의 검출 및 제어

전원전압의 기준전압이 식 (19)와 같이 표현된다면 동기좌표계 d-q축 기준전압은 식 (20)과 같다.

$$e_{amref} = E_{mpr} \cos(\omega t)$$

$$e_{bmref} = E_{mpr} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \tag{19}$$

$$e_{cmref} = E_{mpr} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi)$$

$$E_q^{e*} = E_{mpr} \tag{20}$$

$$E_d^{e*} = 0$$

여기서 $E_{mpr} = \sqrt{2} \cdot \frac{E_{Line}}{\sqrt{3}}$ 이고 E_{Line} 은 선간전압의 기준 실효치이다. 이를 통해 보상기가 보상해야 할 보상 성분의 기준전압은 식 (5)의 센싱되는 전원축 전압의 d-q축 전압 성분을 식 (20)의 d-q축 성분으로부터 각각 빼어 줌으로써 만들어지게 된다. 따라서 보상기가 보상해야 할 기준전압은 식 (21)과 같고 이에 대한 설명은 그림 2에 나타난 바와 같다.

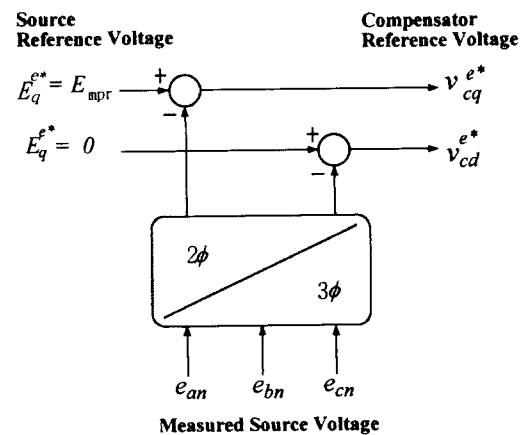


그림 2 보상기 출력 기준전압의 검출 블럭다이어그램
Fig. 2 Block diagram for detection of output reference voltage of the compensator

$$V_{cq}^{e*} = (E_{mpr} - E_{mp} \cos \alpha_p) - E_{mn} \cos(2\omega t + \alpha_n) \quad (21)$$

$$V_{cd}^{e*} = E_{mp} \sin \alpha_p - E_{mn} \sin(2\omega t + \alpha_n)$$

한편 보상기의 전체적인 제어는 전압보상기로 사용되는 3상 PWM 인버터의 출력전압을 제어하기 위하여 그림 1의 필터 커패시터에 걸리는 전압을 d-q축 상에서 전압제어 하고 인버터 출력전류를 안정한 범위 이내로 제한하기 위해서 전압제어 루프 내에 인버터 출력 전류의 제어루프를 두는 이중 제어구조를 갖도록 한다. 내부 전류제어 루프는 또한 부하변동에 의한 외란을 전압보상하는 효과를 얻도록 해준다.

식 (11)에서 d-q축 각각의 미분항에 있는 인버터 출력전압에 대한 전압제어기를 비례-적분(PI) 제어기로써 구성하면 v_{cq}^e , v_{cd}^e 각각을 v_{cdq}^e 로써 함께 표현 했을 때 인버터 기준전압에 대한 출력전압의 전달함수는 식 (22)와 같다.

$$\frac{v_{cdq}^e}{v_{cdq}^{e*}} = \frac{k_{vp}s + k_{vi}}{c_c s^2 + k_{vp}s + k_{vi}} \quad (22)$$

여기서 k_{vp} , k_{vi} 는 각각 PI제어기의 비례 및 적분이득을, C_c 는 필터 커패시터의 용량을 의미하고 v_{cdq}^{e*} 는 인버터 출력의 기준전압을 나타낸다. 전류제어기 구성을 위하여 전압제어기의 경우와 비슷한 방식으로 식 (13)에서 d-q축 각각의 미분항에 있는 인버터 출력전류에 대한 전류제어기를 PI 제어기를 이용하여 구성하면, i_{cdq}^{e*} 로 i_{cq}^e , i_{cd}^e 를 표현하고 제어기의 비례 및 적분 제어이득을 각각 k_p , k_i 필터 인덕터의 인덕턴스를 L 이라 했을 때 인버터 기준전류 (i_{cdq}^{e*})에 대한 출력전류의 전류제어기 전달함수는 식 (23)과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{i_{cdq}^{e*}}{i_{cdq}^{e*}} = \frac{k_p s + k_i}{Ls^2 + k_p s + k_i} \quad (23)$$

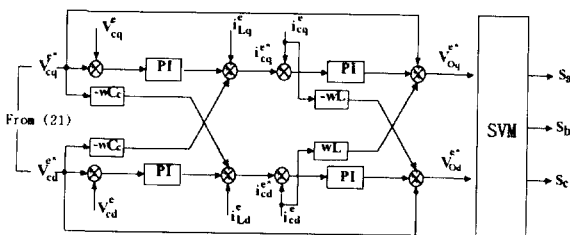


그림 3 전체 제어 블록 선도
Fig. 3 Overall control block diagram

그림 3은 전체적인 제어 블록선도를 나타내는 것으로 전압 및 전류제어 루프가 모두 PI제어기로써 구성되었으며 인버터의 스위칭 함수를 발생시키기 위하여 공간벡터 변조기법이 사용되었다.

5. 시뮬레이션

전원측 이상 현상으로 비정상적인 전압이 발생되었을 때 이를 보상하여 부하측에 평형된 정상적인 전압을 공급하도록 해주는 3상 순간전압보상기의 특성을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션을 위하여 사용된 시스템 파라미터는 표1과 같다. 평형시 전원의 선간전압의 실효치는 220[V]이고 부하 정격용량은 5[kVA]이다.

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

Source Voltage	220[V]
L(Filter Inductance)	0.28[mH]
Cc(Filter Capacitance)	250[μF]
Vdc(DC Link Voltage)	310[V]
Series Transformer Turn Ratio	1 : 1
Load Power Rating	5[kVA]

인버터 출력측의 LC 필터는 보상후 부하측 전압파형의 THD(total harmonic distortion) 관점에서 설계되었으며 필터의 크기가 함께 고려되었다. LC필터가 원활한 필터링을 수행하기 위해서는 인버터의 스위칭 주파수에 비해 공진 주파수 ($1/2\pi\sqrt{LC_c}$)가 낮아야 하며 공진주파수는 스위칭 주파

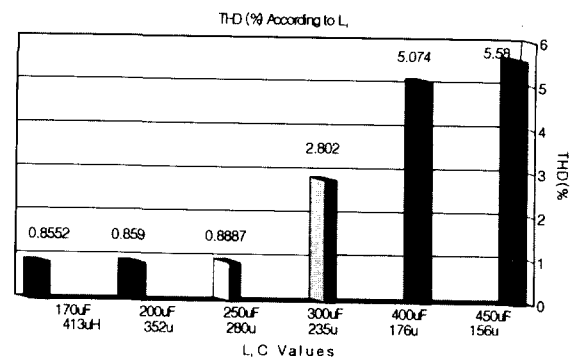


그림 4 LC 값에 따른 THD
Fig. 4 THD according to the values of LC

수와 전원주파수 사이에 존재하여야 한다. 스위칭 주파수에 비하여 공진주파수가 낮을 수록 필터링 특성은 좋아지나 필터의 용량이 커지게 되고 필터의 크기를 줄이기 위하여 공진 주파수를 증가시키는 경우 필터링 특성이 좋지 않게 된다. 따라서 필터링 특성과 필터의 크기 사이에 적절한 타협점을 찾아야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 스위칭 주파수 5(kHz)에 대하여 필터의 공진주파수를 600(Hz)로 설정하였으며 그림 4는 공진주파수 600(Hz)인 경우 LC 값에 따른 THD 값을 나타내는 그래프로 THD 측면 과 LC 값을 고려하여 선정된 필터 파라미터의 값은 각각 0.28(mH), 250(μF)이다.

한편 시뮬레이션 수행시 제안된 전압보상 시스템의 보상특성을 평가하기 위한 기준으로서 전원의 기준전압 최대치에 대한 정상성분 최대치의 크기 비로써 크기 평가계수(AF : amplitude factor)를 식 (24)와 같이 정의 하고 정상성분에 대한 역상성분의 최대치 크기 비로 불평형 평가 계수(UF : unbalanced factor)를 식 (25)와 같이 정의 한다.

$$AF = \frac{E_{mp}}{E_{mpr}} \times 100[\%] \quad (24)$$

$$UF = \frac{E_{mi}}{E_{mp}} \times 100[\%] \quad (25)$$

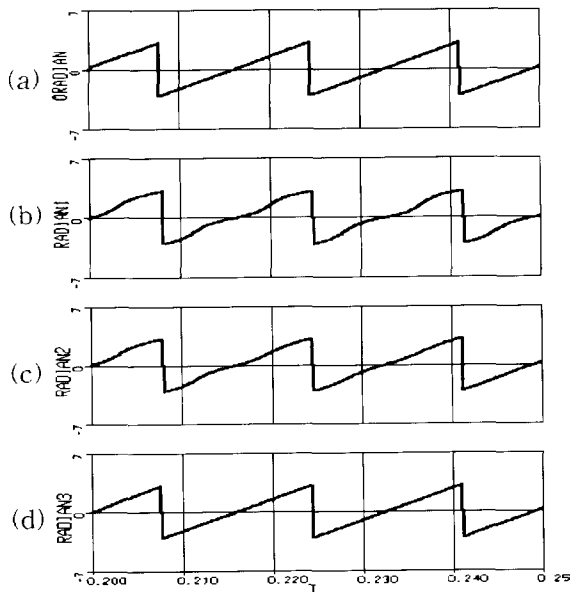


그림 5 위상각 검출 시뮬레이션 결과 (a)실제 정상성분의 위상각 (b) 불평형이 고려되지 않은 경우 (c)필터를 사용하여 정상성에 동기시킨 경우 (d)제안된 방식에 의해 정상성에 동기시킨 경우
Fig. 5 Simulation results of phase angle detection. (a) phase angle by real positive sequence (b) phase angle by conventional method (c) phase angle synchronized with positive sequence by using band pass filter (d) phase angle synchronized with positive sequence by using proposed method

그림 5는 AF가 100(%), UF가 30(%)이고 $\alpha_p = 15^\circ$, $\alpha_n = 30^\circ$ 인 경우에 대해 정상성분에 동기된 위상각 검출의 시뮬레이션 결과로 제안된 3상 불평형 전압의 위상각 검출 알고리즘의 타당성을 보이기 위하여 다른 방식에 의한 위상각 검출 결과와 비교하였다.

그림 5의 (a)는 3상 전원의 실제 정상성분에 의한 위상각을 나타내며 (b)는 전원의 불평형을 고려하지 않은 경우에 대한 위상각 검출 결과를, (c)는 120(Hz) 밴드패스 필터를 사용하여 d-q 축상에서 정상성분만을 검출함으로써 정상성분에 의해 동기된 위상각 검출을 하는 경우에 대한 결과이고 (d)는 제안된 대칭좌표법을 사용하여 순시적으로 정상성에 동기된 위상각을 검출한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 것처럼 불평형을 고려하지 않고 기존의 방법을 사용하여 전원의 위상각을 알아내는 경우 전원 불평형시 위상각 정보가 왜곡되며 필터를 사용하여 정상성분에 동기된 위상각 정보를 검출하는 경우 응답특성이 느린 단점이 있게 되나 본 논문에서 제안된 방식으로 정상성분에 동기된 위상각 검출을 하는 경우 지연 없이 실제 정상성분의 위상각 정보를 검출하게 됨을 알 수 있다.

그림 6은 평형 3상 전원 시스템이 모든 상에 있어서 전압 강하한 경우로 정상성분의 보상을 통해서 모든 상의 전압이

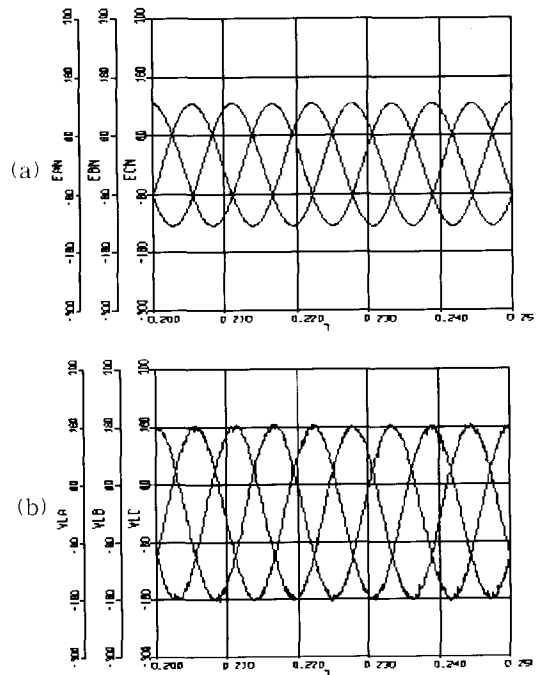


그림 6 3상 전압이 모두 강하한 경우의 전압보상 결과
(a) 보상전 전원전압 파형 (b) 보상후 부하전압 파형
Fig. 6 Compensating result for voltage drop of all 3-phases. (a) source voltage before compensation (b) load voltage after compensation

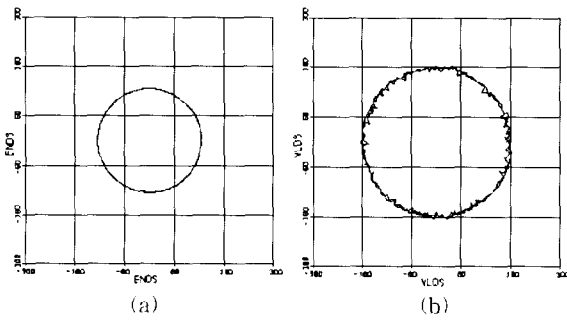


그림 7 3상 전압이 모두 강하한 경우 보상전후의 공간전압 벡터궤적
(a) 보상전 전원전압 벡터궤적 (b) 보상후 부하 전압 벡터궤적
Fig. 7 Space vector trajectory before and after compensation for voltage drop in all 3-phases. (a) source voltage vector trajectory before compensation (b) load voltage vector trajectory after compensation

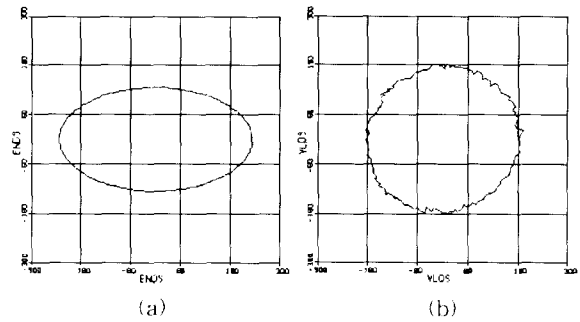


그림 9 불평형 전압의 보상전후 공간전압 벡터궤적 (a) 보상전 전원 전압 벡터궤적 (b) 보상후 부하 전압 벡터궤적
Fig. 9 Space vector trajectory before and after compensation for unbalanced voltage. (a) source voltage vector trajectory before compensation (b) load voltage vector trajectory after compensation

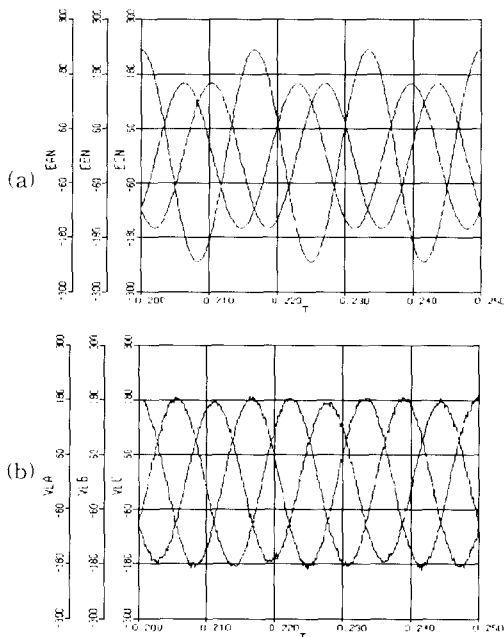


그림 8 불평형 전압의 보상전후 전압파형 (AF=100%, UF=30%)
(a) 보상전 전원전압 파형 (b) 보상후 부하전압 파형
Fig. 8 Voltage waveforms before and after compensation of unbalanced voltage(AF=100%, UF=30%). (a) source voltage before compensation (b) load voltage after compensation

기준전압의 크기로 보상되었음을 보여주고 있다. 그림 6의 (a)는 보상전 전원 전압을 나타내고 (b)는 보상후 부하에 공급되는 전압파형을 나타낸다.

그림 7은 그림 6에 대한 경우의 보상전후 공간전압 벡터궤적을 나타내는 것으로 그림 (a)의 전압벡터 궤적이 보상후 (b)의 크기로 전압 상승되었음을 확인 할 수 있다.

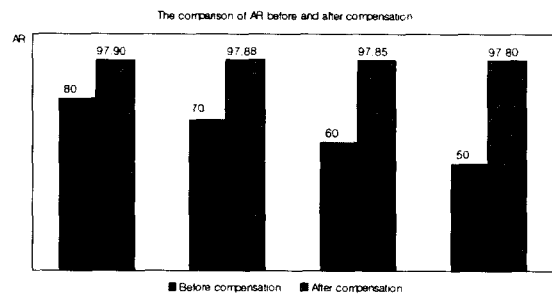


그림 10 보상전후의 AF (UF=30%)
Fig. 10 Values of AF before and after compensation

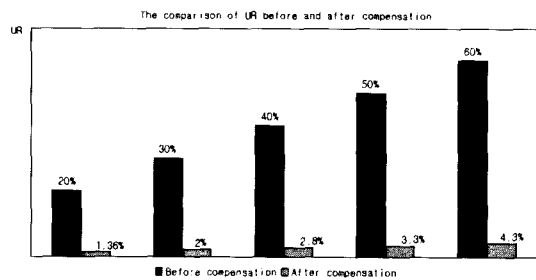


그림 11 보상전후의 UF (AF=100%)
Fig. 11 Values of UF before and after compensation

그림 8은 AF를 100%로 두고 불평형 평가계수 UF를 30%로 설정한 경우에 대한 불평형 전압보상의 시뮬레이션 결과로 (a)는 보상전 전원전압파형을 (b)는 보상후 부하 전압파형을 나타내며 그림 9는 그림 8에 대한 보상전후 공간전압 벡터궤적을 나타내는 것으로 보상전 타원형의 불평형 전압벡터 궤적이 보상후 그림 (b)와 같이 원의 형태를 갖는 평형 전압벡터로 보상되었음을 알 수 있다.

그림 10은 UF 의 값을 30[%]로 고정시키고 보상전 AF 의 값을 80[%]에서 50[%]로 10[%]씩 악화시켰을 때의 보상 후 AF 의 값을 나타낸 것으로 어느 경우이거나 보상 후 AF 의 값이 97[%]이상으로 유지되고 있음을 보여주고 있다. 그림 11은 AF 의 값을 100[%]로 유지시키고 UF 의 값을 20[%]에서 60[%]로 변화시키에 따른 불평형 전압의 보상특성으로 보상 후 UF 의 값이 1.36[%]~4.3[%]의 수준으로 보상되었음을 나타내고 있다.

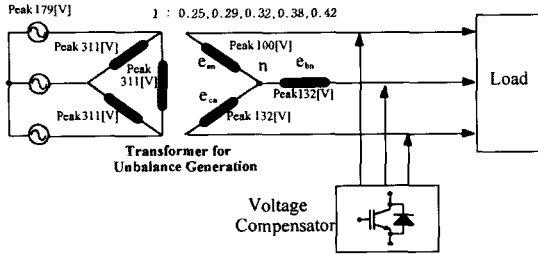


그림 12 불평형 전압발생을 위한 변압기의 연결
Fig. 12 Transformer in source side for generation of unbalance voltage

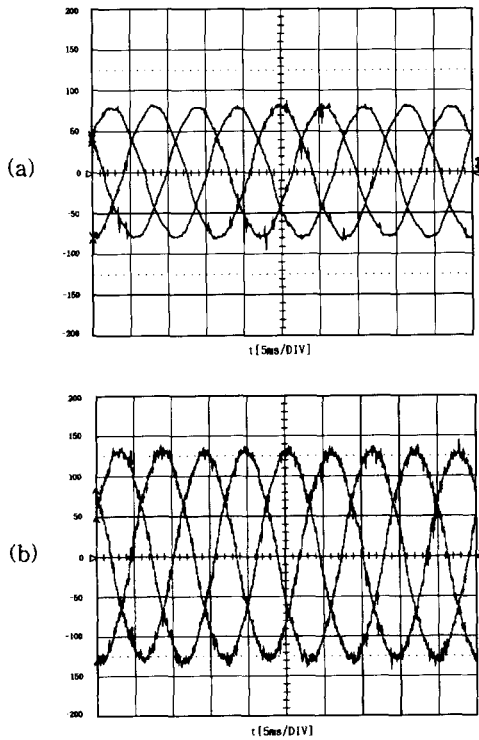


그림 13 3상 전압이 모두 강하한 경우의 실험 결과
(a) 보상전 전원전압 파형 (b) 보상후 부하전압 파형
Fig. 13 Experimental result for voltage drop of all 3-phases. (a) source voltage before compensation (b) load voltage after compensation

6. 실험 및 결과

실험실 규모의 실험장치를 구성하여 실험을 실시하였으며 3상 시스템의 불평형 전압을 발생시키기 위하여 3상 Δ -Y 탭 변압기를 이용하였다. 부하는 시뮬레이션에서와 마찬가지로 R-L 선형부하를 사용하였으며 비선형부하에 대해서도 비슷한 결과를 얻을 수 있으므로 여기에서는 선형부하에 대한 결과만을 제시한다. 실험에 사용된 탭 변압기의 변압비는 1:0.25, 1:0.29, 1:0.32, 1:0.38, 1:0.42이며 1차측 상전압의 최대치는 311[V]로 2차측에 80[V], 90[V], 100[V], 120[V], 132[V]의 전압이 변압비에 따라 유기될 수 있도록 하였고, 각상의 변압비를 달리 함으로써 불평형이 발생되도록 하였다. 2차측 전압의 부하 공급을 위한 기준전압의 최대치는 가장 큰 변압비를 갖는 값으로 설정하였으며 이에 따라 기준전압의 최대치는 132[V]로 설정하였다. 실험시 불평형 발생을 위해 구성된 전원측 3상 변압기는 그림 12에 나타낸 바와 같으며, 그림

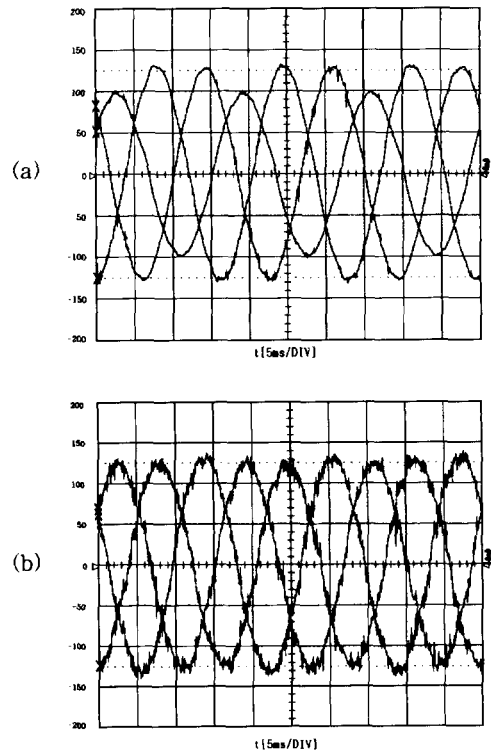


그림 14 불평형 전압($AF=92$ [%], $UF=8.8$ [%])의 보상전후 실험 파형 (a) 보상전 전원전압 파형 (b) 보상후 부하전압 파형
Fig. 14 Experimental waveforms before and after compensation of unbalanced voltage ($AF=92$ [%], $UF=8.8$ [%]). (a) source voltage before compensation (b) load voltage after compensation

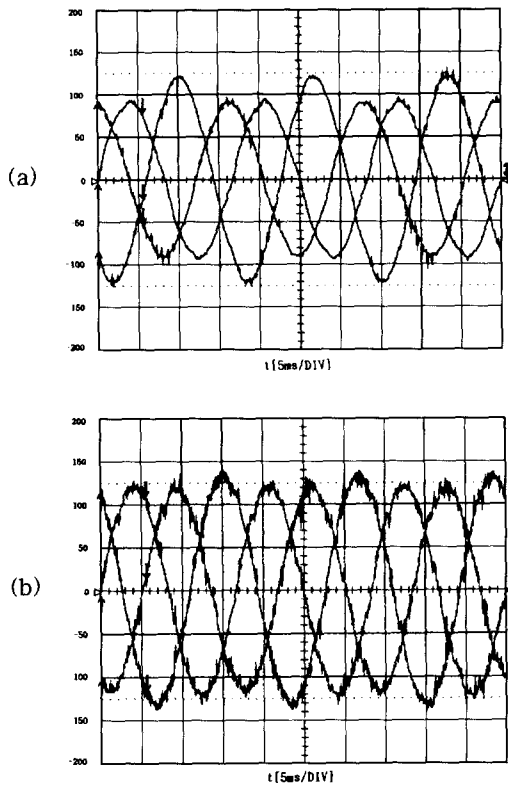


그림 15 불평형 전압(AF=76%, UF=10%)의 보상전후 전압파형 (a) 보상전 전원전압 파형 (b) 보상후 부하전압 파형
 Fig. 15 Voltage waveforms before and after compensation of unbalanced voltage(AF=76%, UF=10%). (a) source voltage before compensation (b) load voltage after compensation

1에서와 같이 전압보상을 위하여 인버터와 라인 사이에 연결된 직렬변압기의 변압비는 3상 모두 1:1로 하였다. 제안된 순간 전압 보상 시스템의 제어는 TMS320C31을 사용하여 DSP에 의한 전 디지털 제어를 수행하였으며 인버터 구동을 위한 변조기법으로는 공간벡터 변조 기법이 사용되었다.

그림 13은 3상 전압이 모두 기준전압 132[V]에 대하여 40[%]씩 전압강하한 경우에 대한 전압보상 실험파형으로 보상전 60[%]인 AF의 값이 보상후 거의 100[%]로 보상되었음을 확인할 수 있다.

그림 14~15는 불평형 전압에 대한 보상 실험 결과로 그림 14는 보상전 AF가 92[%]이고 UF가 8.8[%]이나 보상후 AF는 99.2[%], UF는 0.5[%]로 보상되었음을 보여주고 있고 그림 15는 보상전 AF가 76[%]이고 UF가 10[%]이나 보상후 AF가 98.5[%]로, UF가 2.2[%]로 보상되었음을 보여주고 있다.

7. 결론

본 논문에서는 3상 전원 시스템에서 발생하는 불평형전압의 보상을 수행하는 순간전압보상기의 전압보상 알고리즘과 이의 효율적인 제어를 위하여 전원의 정상성분에 동기된 위상각을 검출하는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 전압보상 시스템을 사용함으로써 전원측에 불평형 또는 부족전압과 같은 현상이 발생하더라도 부하에는 평형되고 일정한 크기의 전압이 공급되도록 해줄 수 있다. 보상 시스템의 보상 성분 검출 및 제어는 모두 d-q 축상에서 이루어 졌으며 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 전압보상 시스템의 보상특성을 확인하였다.

본 연구는 1996년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임.
 (과제번호 : 962-0701-01-3)

참고 문헌

- [1] R.F. Woll, "Effect of unbalanced voltage on the operation of polyphase induction motors", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-11, No.1, pp.38-42, 1975.
- [2] Luis Moran, et al., "Design aspects of synchronous PWM rectifier-inverter systems under unbalanced input voltage conditions", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 28, No. 6, pp.1286-1293, Nov./Dec. 1992.
- [3] Pascal Rioual, et al., "Regulation of PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model", IEEE Trans. Power Electronics, vol.11, No.3, pp.495-502, May, 1996.
- [4] A. Campos, et al., "Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three-phase VSI operating with unbalanced switching function", IEEE Trans. Power Electronics, vol.9, No. 3, pp.269-274, May 1994.
- [5] Vijay B. Bhavaraju, et al., "An active line conditioner to balance voltages in a three-phase system", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 32, No.2, pp287-292, 1996.
- [6] 이승요, 목형수, 최규하 외, "불평형 전원시스템을 고려한 3상 능동전력필터에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, 1997년 7월.
- [7] 이승요, 목형수, 최규하 외, "3상 PWM 인버터를 이용한 순간전압보상기의 해석", 전력전자학술대회 논문집, 1997년 7월.

〈 저 자 소 개 〉



이승요(李承約)

1967년 7월 16일생. 1994년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 수료.



고재석(高再錫)

1967년 6월 4일생. 1994년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정



목형수(睦亨洙)

1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1992년 동대학원 졸업(공박). 1992년~1996년 서울산업대학교 공대 제어계측공학과 조교수. 현재 건국대 공대 전기공학과 조교수.



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 졸업(공박). 1987년~1988년 미국 오레곤주립대 객원교수. 1997년~1998년 건국대 연구처장 역임. 현재 건국대 공대 전기공학과 교수.