

PQR 순시전력이론에 의한 Dynamic Voltage Restorer의 제어기 설계 II -보상전압의 결정

김효성*, 이상준**, 설승기**

*천안공업대학 제어계측과, **서울대학교 전기컴퓨터공학부

Controller Design for Dynamic Voltage Restorers by use of PQR Power Theory II - Determine The Compensation Voltages

H.S Kim*, S.J. Lee**, and S.K. Sul**

*Cheonan Technical College, **Seoul National University

ABSTRACT

This paper discusses how to generate the reference compensation voltages in Dynamic Voltage Restorers (DVR) by use of PQR power theory. Sensed three-phase terminal voltages are transformed to PQR coordinates without time delay. Since the reference voltages in PQR coordinates are dc values, the voltage controller for DVRs is simple and easy to design.

Proposed control method can be implemented by feedforward controllers or by feedback controllers. This paper verified the theory in the feedforward controller of a DVR by experiments.

1. 서 론

최근 들어 전원전압의 품질이 주요한 문제로 부각되면서 계통전압의 품질을 개선시키기 위한 직렬형 전압 보상기에 대하여 많은 연구가 있어왔다^{[1]-[8]}. Dynamic Voltage Restorers (DVR)은 전원 전압의 순간적인 강하(sag)나 상승(swell)을 보상해 주기 위한 장비로서 그 역할이 기대 된다^[9].

[10,11]은 대칭좌표법에 의해서 전원전압을 정상분과 역상분으로 분리하였고 DVR에 의하여 역상분의 전압을 보상하였다. 그러나 대칭좌표법에 의한 역상분 전압의 보상은 페이저(phasor) 표현에 근거하여 주파수 영역에서의 제어가 됨으로서, 과도응답이 나쁘고 보상기의 스위칭에 의한 공진을 피할 수가 없었다.

[12]는 공간벡터의 표현에 근거한 순시대칭좌표 변환을 제안하여 보다 개선된 제어성능을 도출하였다. 불평형이 발생한 계통을 순시대칭좌표 변환을 통하여 독립된 두 개의 평형된 회로로 변환한다. 각 평형된 회로에 d-q 변환을 가하여서 4 개의 dc 회로로 분리한다. d-축을 보상된 부하측 전압에 동기시킴으로써 q-축의 회로들은 제거된다. 따라서 제어시스템은 역상분 전압을 제거하는 부분과 정상분 전압을 조정하는 두 개의 독립된 부분으

로 분리된다. 이 방법은 전원측 전압과 부하측 전압을 모두 검출하여야 하는 단점이 있으며, 영상분은 제어 대상에 고려되지 않았다.

본 논문은 DVR의 제어를 위한 새로운 전압제어 알고리즘을 제안한다. 전원단 전압을 검출하여 DVR이 보상하여야 할 보상전압의 기준값을 시간 지연 없이 즉시 계산한다. PQR 좌표계에서 기준 전압은 간단한 직류값의 형태를 갖는다. 따라서 제어기의 설계가 간단하고 체계적이 된다. 검출전압은 전원측이나 부하측의 어느 쪽을 사용할 수도 있다. 제안된 방법은 전원단의 어떠한 고장에 대하여도 부하단의 전압을 안정되게 유지하여 주며 고조파 전압에 의한 전원단의 왜곡에 대하여도 부하단 전압이 정현적으로 되도록 보상하여 준다. 제안된 제어 방법에 대하여 TMS320VC33/150MHz를 채용한 DSP 보드에 의해 제어되는 3kVA 용량의 DVR 계통으로 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

2. 제어방법

2.1 PQR 변환

a-b-c 좌표계에서의 3상 전압은 식 (1)과 같이 $\alpha-\beta-0$ 좌표계로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

만일 평형된 정현파를 기준 전압으로 택한다면 a-b-c 좌표계에서의 기준전압은 식 (2)와 같으며, 이때 $\alpha-\beta-0$ 좌표계에서의 기준전압의 성분은 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin(\omega_{REF} t) \\ V_m \sin(\omega_{REF} t - 120^\circ) \\ V_m \sin(\omega_{REF} t - 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$V^{REF} = \begin{bmatrix} v_{aREF} \\ v_{\beta REF} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

a-b-c 좌표계에서의 기준전압 v_{aREF} , $v_{\beta REF}$, 그리고 v_{0REF} 가 평형된 정현파라면 기준전압의 영상 성분은 존재하지 않으며, 기준전압의 공간벡터 V^{REF} 는 일정한 크기를 갖고 α - β 평면을 일정한 동기속도 ω_{REF} 로 회전한다. 기준전압 공간벡터의 크기는 $\sqrt{3/2}V_m$ 의 값을 갖는다.

기준전압 v_{aREF} , $v_{\beta REF}$ 을 맵핑매트릭스로 취하면 α - β -0 좌표계의 검출전압은 식 (4)와 같이 p-q-r 좌표계로 변환된다^[13].

$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_q \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_{aREF}}{e_{a\beta REF}} & \frac{e_{\beta REF}}{e_{a\beta REF}} & 0 \\ -\frac{e_{\beta REF}}{e_{a\beta REF}} & \frac{e_{aREF}}{e_{a\beta REF}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

단, $v_{a\beta REF} = \sqrt{v_{aREF}^2 + v_{\beta REF}^2}$.

PQR변환의 물리적 의미를 그림1에 보인다. 기준전압 공간벡터는 α - β 평면을 ω_{REF} 의 각속도로 회전한다. p-축은 기준전압 공간벡터와 일치한다. q-축은 α - β 평면 위에 있으며 p-축과 직교한다. r-축은 α - β -0 좌표계의 0-축과 같으며 회전하는 p-축과 q-축의 중심 축과 같은 위치에 있다.

검출된 전압공간벡터 V^{SEN} 은 식 (1)과 (4)에 의해 즉각적으로 p-축 요소 v_p , q-축 요소 v_q , 그리고 r-축 요소 v_r 로 분해된다. 여기서 v_p 는 기준전압 공간벡터 V^{REF} 와 같은 방향을 갖는 검출전압 공간벡터의 회전 성분이다. v_q 는 기준전압 공간벡터보다 90° 앞서서 검출전압 공간벡터의 회전 성분이다. 또한 v_r 은 검출전압 공간벡터의 영상 성분이다. 일반적으로 계통에 직류성분의 전압이 존재하지 않으므로 v_r 은 교류성분만 존재한다. 그러나 v_p 와 v_q 의 경우는 일반적으로 직류 성분과 교류 성분이 같이 존재한다. v_p 와 v_q 의 직류성분은 검출된 3상 전압의 정상분에 기인한다. 한편 v_p 와 v_q 의 교류성분은 불평형이나 고조파 성분 등의 비 이상적인 조건들에 기인한다.

3상 전압이 평형된 정현파라면 검출전압의 공간벡터 V^{SEN} 은 α - β 평면에서 단위 원의 궤적을 그린다. 더욱이 검출전압이 기준전압과 동상이라면 검출전압의 공간벡터는 기준전압의 공간벡터와 일치한다. 이때 v_q 와 v_r 은 존재하지 않으며, v_p 는 $|V^{SEN}|$ 과 같은 크기의 직류 성분만 존재한다. 만일 3상 평형된 검출전압이 기준전압에 비하여 ϕ 만큼 위상차를 갖는다면, v_r 은 존재하지 않으나 직류 성분의 v_p 와 v_q 가 존재한다. 이때 v_p 와 v_q 의 기하학적 합이 $|V^{SEN}|$ 과 같으며 $\phi = \tan^{-1}(v_p/v_q)$ 과 같다.

그림 2는 대표적인 몇 가지 경우의 전압 파형을 각각 a-b-c 좌표계와 p-q-r 좌표계로 나타낸 것이다.

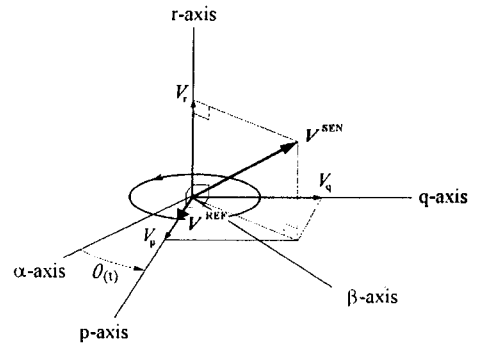
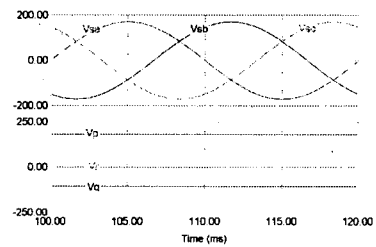
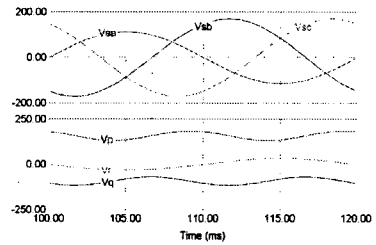


그림 1 제안된 PQR 변환의 물리적 의미.

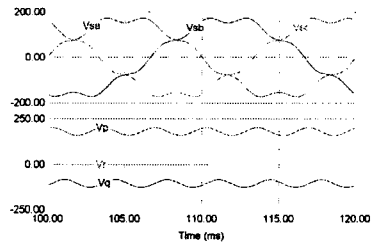
Fig. 1 Physical meaning of proposed PQR transformation.



a)



b)



c)

그림 2 a-b-c 좌표계와 p-q-r 좌표계로 표현되는 대표적인 검출전압 파형; a) 평형된 3상 검출전압이 기준전압보다 30° 위상 지연된 경우, b) 불평형된 3상 검출전압이 기준전압보다 30° 위상 지연된 경우, c) 기준전압보다 30° 위상 지연된 3상 검출전압에 7고조파가 포함된 경우.

Fig. 2 Voltage representation between a-b-c coordinates and p-q-r coordinates; a) when three-phase voltages are sinusoidal balanced with the phase lag of 30° to the reference voltage, b) when three-phase voltages are sinusoidal but unbalanced with the phase lag of 30° , c) when three-phase balanced voltages are distorted by the 7th order harmonics with the phase lag of 30° .

그림 2a)는 3상 평형된 검출전압이 기준전압보다 30° 위상 지연된 경우이다. 이때 v_r 은 영의 값을 갖으며 직류 성분의 v_p 와 v_q 가 존재한다. 이때 $v_p=180$ V, $v_q=-104$ V로서 기하학적 합이 $|V^{SEN}|=V_{Line}$ 과 같으며 $\phi=\tan^{-1}(v_p/v_q)=-30^\circ$ 가 된다. 여기서 V_{Line} 은 선간전압의 실효값이다.

그림 2b)는 3상 정현적인 검출전압이 기준전압보다 30° 위상 지연되고 불평형된 경우이다. 이때 a-b-c 좌표계에서 표현되는 각 상 전압의 합은 영이 아니다. 즉, $v_a+v_b+v_c \neq 0$ 이다. 따라서 영상분 전압을 대표하는 p-q-r 좌표계의 r-축 전압 v_r 가 존재하며 60Hz의 주파수로 맥동한다. 또한 p-축 및 q-축 성분의 전압 v_p 및 v_q 는 직류성분과 함께 120Hz로 맥동하는 교류 성분을 갖게 된다. 여기서 60Hz로 맥동하는 r-축 전압과 120Hz로 맥동하는 p 및 q-축의 전압 성분은 전압의 불평형에 기인하는 것이다.

그림 2c)는 기준전압보다 30° 위상 지연된 3상 평형의 검출전압에 7차 고조파가 포함되어 있는 경우이다. 7차 고조파는 정상 회전 성분을 갖으며 영상성분이 없으므로 v_r 이 영이다. p-축 및 q-축 성분의 전압 v_p 및 v_q 는 직류성분과 함께 전원전압 주파수의 6배로 맥동하는 교류 성분을 갖고 있음을 알 수 있다.

2.2 보상전압의 결정

이상에서 언급한 p-q-r 변환의 물리적 특성에 근거하여 본 논문은 전향보상 (feedforward compensation)에 의한 보상전압의 결정방법을 제안한다. 그림 3에 본 논문에서 제안하는 전향보상 제어기의 구조를 보인다.

검출된 전원단 전압은 Reference Wave Generator (RWG) 블록에 의하여 α - β 좌표계에서 기준 전압파형 V_{aREF} , V_{bREF} 을 발생한다. 기준 전압파형 V_{aREF} , V_{bREF} 을 식 (4)의 좌표변환 매트릭스에 적용하여 전원단의 검출전압을 a-b-c 좌표계로부터 p-q-r 좌표계로 변환한다. 그림 3에서 좌표변환 매트릭스를 [C]로 표기하였다. p-q-r 좌표계에서는 기준전압이 p-축에서만 요구되며 직류값을 가지므로 제어기의 설계가 그림 4와 같이 아주 간단해진다.

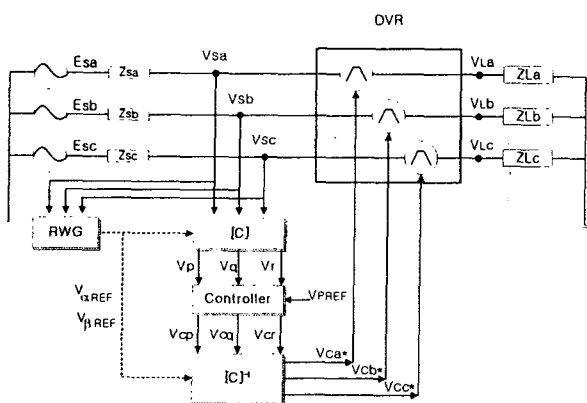


그림 3 제안된 DVR 제어기의 블록도.
Fig. 3 Block diagram of the proposed control system for DVRs.

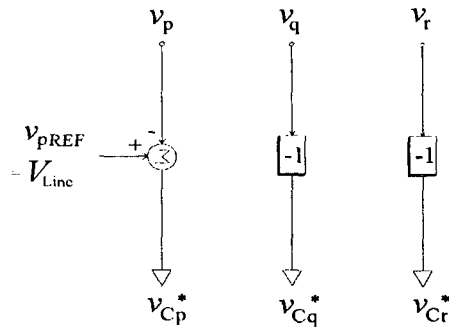


그림 4 제안된 p-q-r 좌표계에서의 전압 보상 제어기.
Fig. 4 Proposed voltage compensation controller in p-q-r coordinates.

그림 4에서 보이는 바와 같이 제안된 전압보상 제어기는 q-축 및 r-축의 전압 성분은 모두 제거하도록 하며 p-축의 전압성분은 직류성분인 V_{Line} 이 되도록 레귤레이션 함으로써 부하단 전압을 기준전압과 동기된 3상 평형 정현파 전압으로 유지하도록 한다.

p-q-r 좌표계에서 결정된 보상전압 v_{Cp}^* , v_{Cq}^* , v_{Cr}^* 은 역변환 매트릭스 [C]⁻¹를 통하여 a-b-c 좌표계의 보상 기준전압 v_{Ca}^* , v_{Cb}^* , v_{Cc}^* 로 역변환 되어 DVR의 인버터에서 보상해야 할 기준전압으로 입력된다. 기준 보상전압은 전원측에 고장이 발생하였을 때 시간 지연 없이 즉각적으로 정확히 계산되고 결정되므로써 DVR의 정확한 동작을 보장하여준다.

제안된 전압보상 제어기는 DVR 뿐만 아니라, 보상전압의 위상각이 전원전압과 동기되는 직렬형 전력형 능동필터라든가, 보상전압의 위상각을 전원전압과 달리 능동적으로 제어 해야하는 Synchronous Static Series Compensator (SSSC), Bootstrap Variable Inductance (BVI) 등에 폭넓게 적용될 수 있다.

3. 실험결과

3.1 실험조건

그림 5에 실험을 위하여 제작된 실험장치의 전력회로 및 제어 회로를 보인다. 공칭 전원전압은 220Vrms/60Hz 이다. 순시전압강하(voltage sag)는 프로그래머블 전원인 SW5250A/ELGAR를 사용하였다. SW5250A/ELGAR는 세 개의 단상전압을 독립적으로 생성할 수 있으며 각 상전압의 크기와 위상을 임의의 순간에 바꾸어줄 수 있다. 한 상의 전력용량은 1750 VA이다.

표 1과 같이 두 가지의 전압 sag를 발생하여 실험을 수행하였다. 초기의 정상조건에서 전원단 전압은 3상 평형 되어있다. Case1의 경우 50%의 평형된 3상 sag가 50ms 동안 발생한다. Case2의 경우 50%크기의 2상 sag가 50ms 동안 b상 및 c상에 발생하며, sag가 발생하는 b상 및 c상의 위상이 각각 $\pm 15^\circ$ 점프하는 현상이 수반된다.

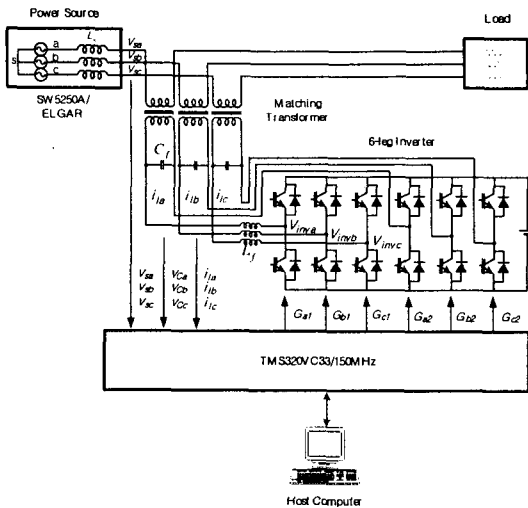


그림 5 DSP 제어보드를 사용한 실험용 DVR 시스템.
Fig. 5 Experimental DVR system equipped with DSP board.

표 1 실험에서 사용된 전압 sag의 조건
Table 1 Voltage sag conditions in the experiment

전원전압	정상시	Sag case1	Sag case2
Vsa [V]	127 $\angle 0^\circ$	64 $\angle 0^\circ$	127 $\angle 0^\circ$
Vsa [V]	127 $\angle -120^\circ$	64 $\angle -120^\circ$	64 $\angle -135^\circ$
Vsa [V]	127 $\angle 120^\circ$	64 $\angle 120^\circ$	64 $\angle 135^\circ$

DVR의 전력회로는 대별하여 6-레그 인버터, 세 개의 LC 필터, 그리고 세 개의 결합용(matching) 변압기로 구성되어 있다. 6-레그 인버터는 10kHz의 스위칭 주파수를 갖는 IGBT로 구성되어 있다. LC 필터는 220 μ H의 인덕터와 40 μ F의 커패시터로 설계되어 있다. 필터 공진주파수가 대략 1.7kHz이므로 인버터의 스위칭 주파수에서 약 -31dB의 노이즈 억제 효과를 갖는다. 매칭용 변압기의 변압비는 1:1로 설계되어 있으며, 실험용 부하는 Y-결선된 40 Ω 의 저항부하이다. 이는 3kVA 정격전력의 약 40% 정도의 부하용량이다.

전원단 전압과 DVR의 인버터 출력단 전압은 LEM/LV25-P를 사용하여 검출하였으며, 부하전류 및 DVR의 인버터 출력전류는 ABB/EL100P2로 검출하여 DSP 제어보드로 입력된다. DSP 제어보드는 TMS320VC33/150MHz가 장착되어 100 μ s의 샘플주기로 검출신호 입력을 받아 계산을 수행하여 100 μ s 후에 PWM 제어 출력을 DVR의 인버터에 가해준다.

3.1 실험결과

그림 6은 a-b-c 좌표계로 검출한 전원단 전압의 실험파형이다. 전압 sag가 50ms (3 사이클)에 걸쳐서 발생하고 있다. 그림 6a)는 Case1의 경우로서 50%의 평형 3상 sag가 발생하고 있음을 볼 수 있다. 그림 6b)는 Case2의 경우로서 b상과 c상에 50% 크기의 불평형된 2상 sag가 발생하고 있다.

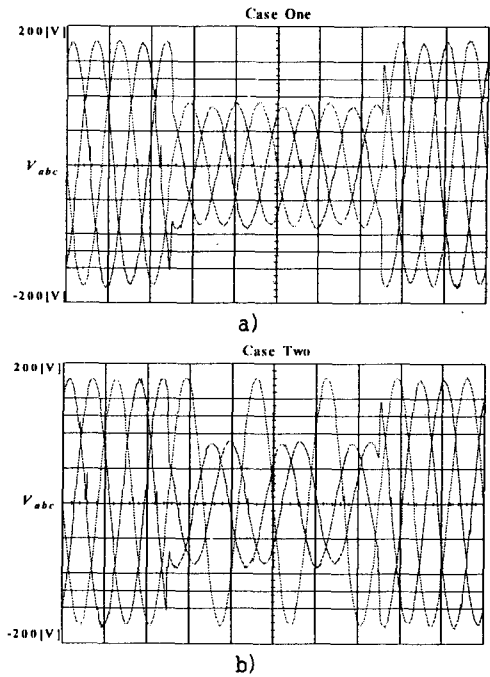


그림 6 전원단 전압의 실험파형 (time=10 ms/div); a) 평형된 3상 sag가 발생된 경우 (Case1), b) 불평형 2상 sag가 발생한 경우 (Case2).

Fig. 6. Experimental waveforms for source terminal voltages (time=10 ms/div); a) symmetrical sag occurred in Case 1, b) typical two-phase sag occurred in Case 2.

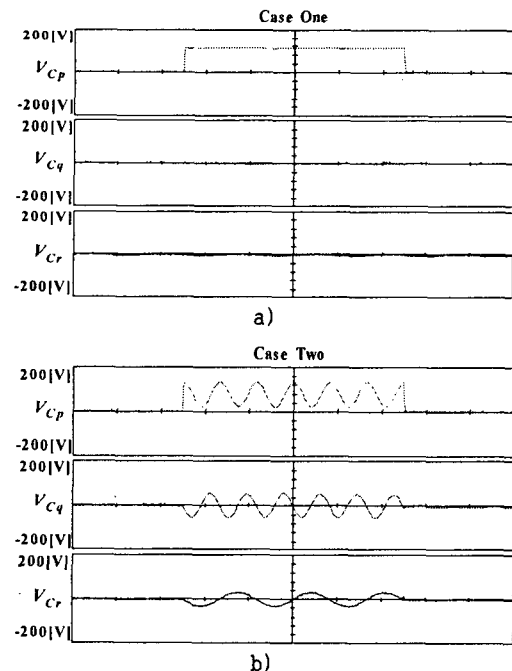


그림 7 p-q-r 좌표계에서 결정된 기준 보상전압의 파형 (time=10 ms/div); a) 평형된 3상 sag가 발생된 경우 (Case1), b) 불평형 2상 sag가 발생한 경우 (Case2).

Fig. 7 Experimental waveforms for reference compensation voltages in p-q-r coordinates (time=10 ms/div); a) symmetrical sag occurred in Case 1, b) typical two-phase sag occurred in Case 2.

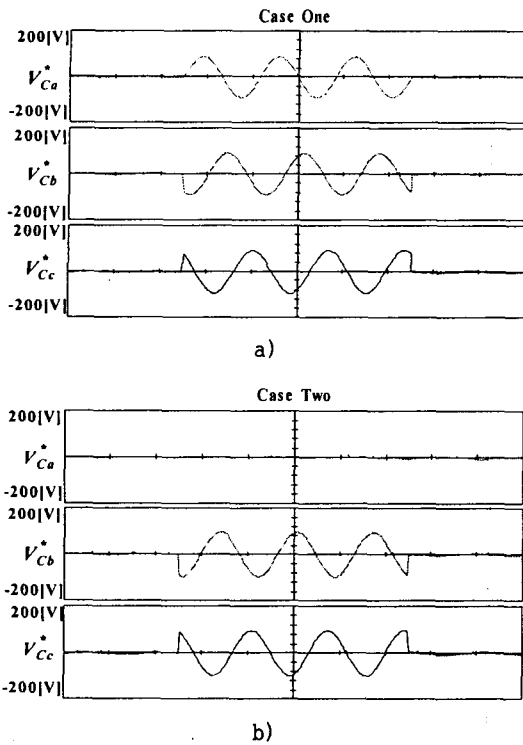


그림 8 p-q-r 좌표계의 보상기준전압을 역변환하여 계산한 a-b-c 좌표계에서의 기준 보상전압의 파형 (time=10 ms/div): a) 평형된 3상 sag가 발생된 경우 (Case1), b) 불평형 2상 sag가 발생한 경우 (Case2).

Fig. 8 Experimental waveforms for the reference compensation voltages in a-b-c coordinates (time=10 ms/div): a) symmetrical sag occurred in Case 1, b) typical two-phase sag occurred in Case 2.

그림 7은 제안된 알고리즘에 따라 p-q-r 좌표계에서 계산된 기준 보상전압의 파형을 보인다. 그림 7a)의 경우는 Case1의 sag가 발생한 경우로서 직류성분의 v_{Cp}^* 만 존재하고 $v_{Cq}^*=v_{Cr}^*=0$ 임을 볼 수 있다. 이는 전원단의 sag가 3상 평형이므로 보상전압도 sag가 발생한 만큼의 3상 평형된 전압이 되기 때문이다. 이에 비하여 그림 7b)의 경우는 Case2의 sag가 발생한 경우로서 전원단 전압이 불평형되고 위상점프가 존재한다. 따라서 보상전압에도 60Hz의 주파수로 맥동하는 v_{Cr}^* 성분이 존재하게 되며, 불평형을 보상해 주기 위하여 v_{Cp}^* , v_{Cq}^* 에는 120Hz의 주파수로 맥동하는 교류 성분이 포함된다.

그림 8은 p-q-r 좌표계의 보상기준전압을 역변환하여 계산한 a-b-c 좌표계에서의 기준 보상전압의 파형이다. 그림 8a) 및 그림 8b)의 기준보상전압 파형을 각각 그림 6a) 및 그림 6b)의 전원단 전압파형에 더해보면 완벽히 보상된 부하단 전압을 얻을 수 있다. 이는 기준 보상전압의 계산이 정확함을 증명한다.

그림 9는 DVR에 의하여 보상된 실제의 부하단 전압을 보인다. 전압 sag가 발생하는 순간과 sag로부터 복귀하는 순간 부하단 전압에 공진이 발생함을 볼 수 있다. 공진은 인버터의 스위칭, DVR 출력단 LC 필터,

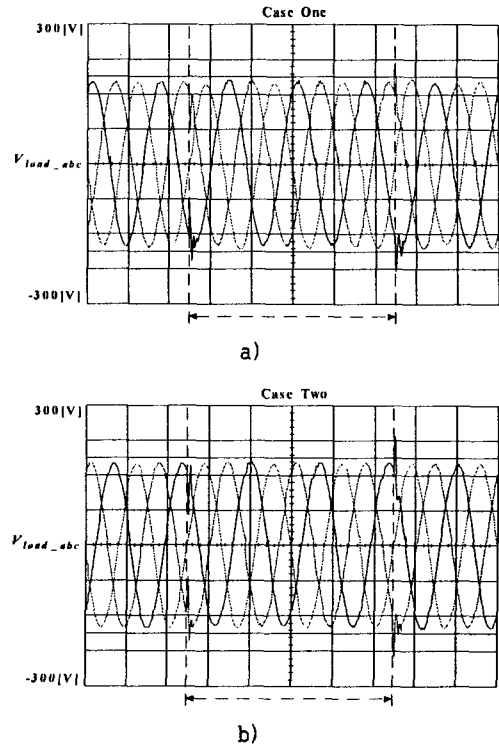


그림 9 DVR에 의하여 보상된 부하단 전압 (time=10 ms/div): a) 평형된 3상 sag가 발생된 경우 (Case1), b) 불평형 2상 sag가 발생한 경우 (Case2).

Fig. 9 Experimental waveforms for load terminal voltages in a-b-c coordinates (time=10 ms/div): a) symmetrical sag occurred in Case 1, b) typical two-phase sag occurred in Case 2.

결합용 변압기, 전원측 임피던스, 그리고 부하측의 임피던스 등에 의하여 발생한다. 이러한 공진을 억제하기 위하여는 DVR 인버터의 PWM 스위칭 제어에 관한 연구가 추가적으로 필요하다.

4. 결 론

본 논문은 p-q-r 전력이론을 이용하여 DVR을 제어하기 위한 우수한 성능의 새로운 제어알고리즘을 제안하였다. 전원단 전압은 시간지연 없이 즉각적으로 p-q-r 좌표계로 변환된다. p-q-r 좌표계에서는 DVR의 제어를 위하여 한 개의 기준 전압만으로 충분하며, 더욱이 기준전압은 직류 값이 된다. 따라서 필요한 보상전압의 계산이 아주 간단하게 되므로 전체적인 제어기의 설계가 체계적이고 간단하여 진다.

본 논문에서는 DVR의 제어를 위하여 전향보상 제어기를 사용하였으나 필요에 따라서 피드백 제어기의 구성도 가능하며 다양한 제어기의 설계가 가능하다. 따라서 제안된 제어 알고리즘은 DVR 뿐만 아니라, 직렬형 능동전력 필터, SSSC, BVI 등등의 다양한 직렬 전압 보상기에 적용 가능하다.

향후 배전망에서 결합용 변압기를 고려한 DVR 시스템에 대한 전력 회로의 분석이 필요하다. 이러한 분석을 바탕으로 하여 보다 개선된 인버터의 PWM 제어, DVR 출력단 LC 필터의 설계, 새로운 인버터 구조의 설계, 그리고 배전망과의 연계가 연구되어질 것이다.

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 전략과제 (02-전-01)에 의해 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] L. Gyugi, C.D. Schauder, K.K. Sen, Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines, *IEEE Trans. on PD-12*, no.1, pp. 406-417, 1997.
- [2] H. Funato, A. Kawamura, Proposal of Variable Active-Passive Reactance, *IEEE Conference Records on PEMC92*, pp. 381-387, 1992.
- [3] T. Ishikawa, H. Funato, T. Ohtaki, K. Kamiyama, Transmission Power Control Using Variable Inductance With Feedforward- and Feedback- based Power Controllers, *IEEE Conference Records on PEDS99*, pp.46-51, July 1999.
- [4] M. Tbvakoli-Bina and D.C. Hamil, The Bootstrap Variable Inductance: A New FACTS Control Element, *IEEE Conference Records on PESC99*, vol .2, pp. 619-625, 1999.
- [5] Mitsutani et al, AC Transmission System with Reactance Compensation, *United State Patent, US 6,172,488B1*, January 9 2001.
- [6] S. Middlekauff and E. Collins, System and Customer Impact, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 278-282, January 1998.
- [7] Edward, Charles, and Wood, Neutral Point Connected Apparatus Providing Compensation to an AC Power Lines, *International Patent, WO 99/39420*, August 5 1999.
- [8] H. Kim, Minimal Energy Control for a Dynamic Voltage Restorer, *Conference Records on PCC02-Osaka*, pp. 428-433, April 2002.
- [9] L. Heinemann, G. Mauthe, J.J. Maillet, M. Hellum, Power Quality-The new paradigm for MV power distribution, *ABB Review: Focus on Transmission and Distribution, The Corporate Technical Journal of the ABB Group, Number Three*, pp. 49-56, 2000.
- [10] A. Campos, G. Joos, P.D. Ziogas, and J. Lindsay, Analysis and Design of a Series Voltage Compensator for Three-Phase Unbalanced Sources, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol.39, no.2, pp.159-167, April 1992.
- [11] A. Campos, G. Joos, J. Lindsay, Dynamic Analysis and Design of Static Series Compensators for Unbalanced AC Voltage Supplies, *IEEE Conference Records on IAS Annual Meeting 94*, vol.2, pp. 954-961, 1994.
- [12] K. Haddad, G. Joos, Distribution System Voltage Regulation Under Fault Conditions Using Static Series Regulation, *IEEE Conference Records on IAS Annual Meeting97*, pp. 1383-1389, October 5-9, 1997.
- [13] H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, J. Choi, Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using p-q-r Theory, *IEEE Trans. On Power Electronics*, vol. 17, No. 5, pp. 701-710, September 2002.