

비대칭 입력 전압 상태를 고려한 LIDVR의 새로운 제어방법

한철우, 김태진, 강대욱, 현동석
한양대학교 전기공학과

New Control Scheme for LIDVR Considering Asymmetry Input Voltage Conditions.

Chul-Woo Han, Tae-Jin Kim, Dae-wook Kang, Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ.

ABSTRACT

Power Quality and reliability are becoming important issues for critical and sensitive loads. The recent growth in the use of impactive and nonlinear loads has caused many power quality problems such as voltage flicks, harmonics and unbalances, which may cause the modern automatic devices to fail, misoperate, or shut down.

This paper deals with 7-Level H-Bridge Line-Interactive Dynamic Voltage Restorer (LIDVR) system. It has the power factor near to unity under normal source voltage, can compensate the harmonic current of the load and instant interruption, and has the fast response. Currently, most of the DVR design studies are based on the assumption of the balanced three-phase system. But, actually line fault occurred 1ϕ sag or 2ϕ sag. Hence, proposed new control scheme compensate asymmetry input voltage. Finally, simulation results verify the proposed 7-Level H-Bridge LIDVR system.

1. 서론

최근 우리는 전력용 반도체 소자를 이용한 전력 변환기를 바탕으로 전력 품질의 문제로부터 민감한 부하를 보호하고 정현적인 전압을 공급하기 위한 Custom Power에 대해서 많은 관심을 가지고 있다.

일반적으로 Custom Power의 장치는 DVR과 같은 직렬 연결된 보상기와 D-Statcom과 같은 병렬 연결된 보상기, 그리고 UPQC와 같은 직,병렬 연결된 보상기로 나누어진다. 전력 품질 문제 중에서, 빈번한 전압강하는 계통 사고 또는 갑작스러운 과도한 부하전류에 의해서 발생되고 컴퓨터나 반도체 기기 같은 민감한 부하에 커다란 영향을 끼친다. 그러므로 전압 강하의 보상은 중요한 문제가 되고, 이를 해결하기 위한 DVR, D-STATCOM, UPS 등의 장치들이 빠르게 발전해 왔다^[1-4].

이들 중 DVR은 직렬 보상장치이고 직렬 주입 변압기를 통하여 전압 강하를 보상한다. DVR의 장점은 기기의 크기가 보상 품질에 의해서 결정된다. 그러나 직렬 변압기를 사용함으로써 다음과 같은 문제가 발생하고 대책들을 필요로 한다. 1차측의

단락 사고에서의 DVR의 보호, 누설 인덕턴스에 기인한 전압 강하 등이 있으며 DVR은 배터리 충전 시스템 또는 부가적인 전력 공급 시스템이 필요로 하고, 역률 제어가 어렵다^[5].

LIDVR은 병렬 보상 장치이고 직렬 리액터를 사용하여 전압 강하를 보상한다. 이것은 시스템의 용량이 증가되는 단점이 있다. 그러나 이것은 Line-Interactive 기능 때문에 배터리나 부가적인 전력 공급 시스템을 필요로 하지 않는다. 또한, 정상 상태에서 단위 역률에 가깝게 입력 역률을 자동적으로 제어한다^[6]. 이것은 Multi-level H-Bridge 컨버터로 구성되고, 정전 보상을 위한 직,병렬로 연결된 거대한 배터리를 사용하지 않는다^{[6],[7]}.

만약 전원 전압이 정현적이고, PCC단 전압이 정현적으로 잘 제어된다고 가정한다면 전원 전류는 비선형 부하 전류임에도 불구하고 정현적이다. 결론적으로 이것은 부하 고조파의 영향을 보상할 수 있다.

본 논문에서는 7-level H-bridge LIDVR 시스템은 시스템 구조와 동작원리를 설명하였다. 제안된 제어 알고리즘을 통하여 정상 또는 3ϕ 전압강하 상태를 통하여 일정한 전압을 가지고 부하측에 공급하는 것을 설명하였다. 다음에 입력 전원이 비대칭 경우 바뀌게 되는 시스템에 대해 설명하였다. 그리고 1ϕ sag, 2ϕ sag 발생시 변하는 제어 알고리즘을 제안하였다^[8]. 마지막으로 제안된 7-level H-Bridge LIDVR 시스템은 시뮬레이션을 통하여 증명 하였다.

2. 7-LEVEL H-Bridge Line-Interactive DVR(LIDVR) System

2.1 시스템 구조

그림 1은 7-레벨 H-Bridge LIDVR 시스템을 보여주 고 있다. LIDVR은 컨버터부, 출력필터부, 리액터부로 나누어진다. 7-레벨 H-Bridge로 구성된 컨버터부는 정상 상태시와 전압변동시 DC-링크를 일정하게 유지시키면서 PCC단 출력전압을 일정하게 제어하는 기능을 한다. 즉, 인가전압의 위상 및 크기를 제어하여 선로전압과 부하전압 차를 보상하여 역률개선을 하게 되며, 또한 고조파보상을 함으로써 효율을 향상시켜 에너지비용 감소와 비선형적인 부하로 인한 입력 전원의 왜곡을 개선시킴으로써 계통의 안정도를 도모할 수 있다. 출력필터부는 LC필터로 구성되어 PWM된 컨버터출력전압을 정현적으로 만들어 주며 리액터부는 전원전압과 PCC단의 전압차를 감당

하는 역할을 하며 다음절의 동작원리에서 설명된다.

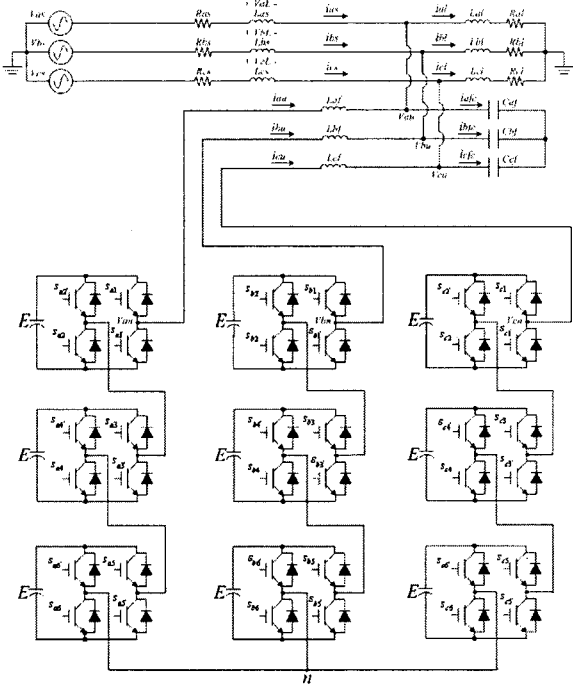


그림 1 7-레벨 H-Bridge LIDVR 시스템의 회로도
Fig. 1 A circuit of 7-Level H-Bridge LIDVR system

2.2 LIDVR의 동작원리

그림 2는 LIDVR의 간략화된 회로도를 나타낸 것이다.

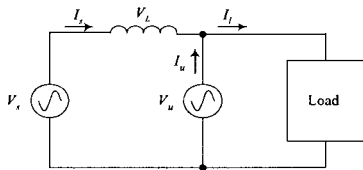


그림 2 간략화된 LIDVR 회로도
Fig. 2 A circuit of simplified LIDVR

LIDVR은 전원전압의 상태에 따라 세가지 모드로 분류 할 수 있다.

2.2.1 Mode I

그림 3은 전원전압이 정상적인 모드로 LIDVR은 DC 링크전압을 충전하면서 부하에 일정전압을 공급한다. 이때 자동적으로 역률을 거의 1에 가깝게 만들기 때문에 역률제어의 효과도 얻게된다. 여기서 α 는 전원전압과 컨버터출력전압과의 위상차를 나타내며 β 는 부하역률을 나타낸다.

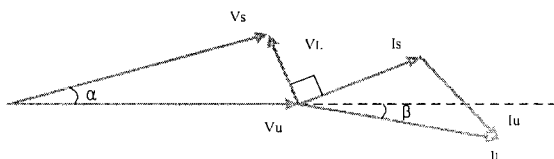


그림 3 전원전압이 정상일 경우(Mode I)의 벡터도
Fig. 3 A vector diagram in case of normal source voltage(Mode I)

2.2.2 Mode II

그림 4는 전원전압에 전압강하가 발생했을 경우로 LIDVR은 DC링크전압을 유지하면서 부하에 일정전압을 공급한다. 이때 α 값은 정상상태보다 큰 값을 갖게되며 진상의 전원전류가 흐르게 된다.

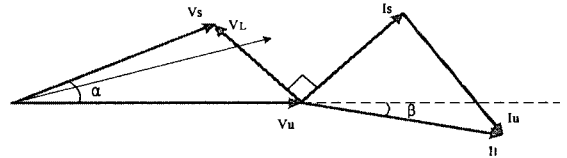


그림 4 전원전압이 감소한 경우(Mode II)의 벡터도
Fig. 4 A vector diagram in case of decreased source voltage(Mode II)

2.2.3 Mode III

그림 5는 전원전압에 전압상승이 발생했을 경우로 다른 모드와 같은 기능을 수행한다. 이때 α 값은 정상상태보다 작은 값을 갖게되며 지상의 전원전류가 흐르게 된다.

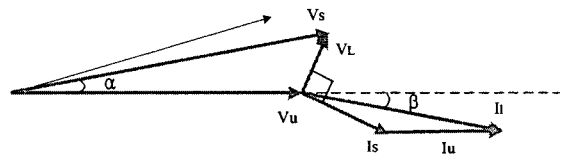


그림 5 전원전압이 증가한 경우(Mode III)의 벡터도
Fig. 5 A vector diagram in case of increased source voltage(Mode III)

2.3 LIDVR의 시스템 모델링

그림 1의 LIDVR에서 3상 전압방정식과 전류방정식은 다음과 같다.

$$V_{abcLf} = V_{abc} - V_{abcu} \quad (1)$$

$$I_{abcLf} = I_{abc} - I_{abcu} \quad (2)$$

$$\text{단, } V_{abcu} = \begin{bmatrix} V_{au} \\ V_{bu} \\ V_{cu} \end{bmatrix}, \dots$$

식(1)에서 V_{abcu} 는 부하중성점기준 전압으로 환산된 컨버터출력전압이다. 위의 두 식을 식(3)을 이용하여 동기 좌표계상으로 정리하면 다음 식(4)와 식(5)같이 나타내어진다.

$$X_{dco} = T(\theta) X_{abc} \quad (3)$$

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

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} + L_f \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d^e \\ V_q^e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{du}^e \\ V_{qu}^e \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{du}^e \\ V_{qu}^e \end{bmatrix} + C_f \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{du}^e \\ V_{qu}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{du}^e \\ i_{qu}^e \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)를 컨버터 출력전압과 전류로 정리하면 다음과 같은 식으로 모델링 할 수 있다.

$$V_d^e = L_f \frac{d}{dt} i_{du}^e - \omega L_f i_{qu}^e + V_{du}^e \quad (6)$$

$$V_q^e = L_f \frac{d}{dt} i_{qu}^e + \omega L_f i_{du}^e + V_{qu}^e \quad (7)$$

$$i_d^e = C_f \frac{d}{dt} V_{du}^e - \omega C_f V_{qu}^e + i_{di}^e \quad (8)$$

$$i_q^e = C_f \frac{d}{dt} V_{qu}^e + \omega C_f V_{du}^e + i_{qi}^e \quad (9)$$

앞에서 구한 식(6)부터 식(9)까지를 이용하여 LDVR의 전압 및 전류제어기를 구성하면 다음과 같다.

$$i_d^{e*} = (K_p + \frac{K_I}{s})(V_{du}^{e*} - V_{du}^e) - \omega C_f V_{qu}^e + i_{di}^e \quad (10)$$

$$i_q^{e*} = (K_p + \frac{K_I}{s})(V_{qu}^{e*} - V_{qu}^e) + \omega C_f V_{du}^e + i_{qi}^e \quad (11)$$

$$V_d^{e*} = (K_p + \frac{K_I}{s})(i_{du}^{e*} - i_{du}^e) - \omega L_f i_{qu}^e + V_{du}^e \quad (12)$$

$$V_q^{e*} = (K_p + \frac{K_I}{s})(i_{qu}^{e*} - i_{qu}^e) + \omega L_f i_{du}^e + V_{qu}^e \quad (13)$$

식(10)부터 식(13)을 이용하면 그림 6과 같이 전압 및 전류제어기블럭도를 나타낼 수 있다. 그림에서 전압지령값은 DC-링크 전압제어기의 출력값이 된다.

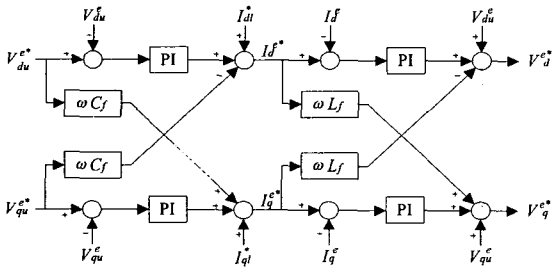


그림 6 LDVR 시스템의 전압 및 전류제어기 블럭도
Fig. 6 A block diagram of voltage and current controller in LDVR system

3. 비대칭 입력 전압 분석

불평형 보상 알고리즘은 다음과 같다.

비대칭 입력 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_r = M_1 \cos(\omega t) \quad (14)$$

$$E_s = M_2 \cos(\omega t - 2\pi/3 + \theta_s)$$

$$E_t = M_3 \cos(\omega t + 2\pi/3 + \theta_t)$$

일반적으로 대칭입력전압은 동기좌표축에서 변환된 값 E_d 와 E_q 로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} T_{32}^T \begin{bmatrix} E_r \\ E_s \\ E_t \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{E_\alpha^2 + E_\beta^2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{여기서, } T_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

비대칭 입력 전압 상태에서 E_d 는 일정한 값을 가지지 못한다. 왜냐하면 역상분에 의하여 2고조파 성분을 가지기 때문이다. 그래서 입력 전압 상태에 따라서 E_d 와 E_q 를 적절히 보상해 줄 수 있는 알고리즘이 필요하다.

불평형 입력전압을 동기좌표계상으로 변환시킨 값,

E_d 는 직류성분인 E_d^b 와 교류성분인 E_d^n 로 나눌 수 있는데, E_d^b 는 식(16)처럼 E_d 의 최대값과 최소값의 평균치로 구할 수 있으며, E_d^n 는 E_d 와 E_d^b 의 차로부터 구할 수 있다.

여기서 E_d 의 dc성분인 E_d^b 는 정상분으로 간주하고 ac 성분은 E_d^n 는 역상분으로 간주한다.

$$E_d^b = \frac{1}{2}(E_{dmax} + E_{dmin}) \quad (16)$$

$$E_d^n = E_{dmax} - E_d^b$$

E_d^n 은 그림 7와 같이 E_d^b 와 $2\theta + \theta_n$ 의 위상차를 가지고 반대방향으로 회전하는 형태로 나타나게 된다. 그러므로 정상분과 역상분 전압벡터를 식(17)과 같이 합성하여 전류제어기에 입력전압의 역기전력 보상성분으로 사용하였다.

$$\begin{bmatrix} E_d^e \\ E_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d^b \\ 0 \end{bmatrix} + R(-(2\theta + \theta_n)) \begin{bmatrix} E_d^n \\ 0 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} E_d^b + E_d^n \cos(2\theta + \theta_n) \\ -E_d^n \sin(2\theta + \theta_n) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\text{여기서, } R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

식 (16), (17)을 쉽게 이해하기 위해 벡터도를 그리면 그림 7과 같다.

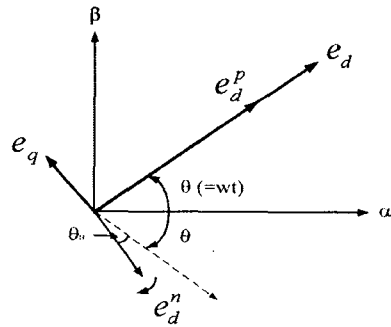


그림 7 동기좌표계상의 입력전압 벡터도
Fig. 7 Vector diagram of input voltage in the synchronous frame model

단위 역률 제어를 하기 위해 무효전력 성분이 영이 되도록 정상분과 역상분의 q축전류를 영으로 제어하고, 유효전력의 제2차 고조파 성분을 영으로 하는 전류 값을 식(18)과 같이 선택하여 각 성분별 전류 지령치를 구한다. 각 성분별 지령치는 식(17)의 입력전압과 동일한 축상에 위치시키기 위해 식(19)와 같이 변환하여 최종전류 지령값을 결정한다.

$$i_d^{b*} = \frac{2}{3} \frac{E_d^b}{(E_d^b)^2 - (E_d^n)^2} P_0, i_q^{b*} = 0 \quad (18)$$

$$i_d^{n*} = \frac{2}{3} \frac{-E_d^n}{(E_d^b)^2 - (E_d^n)^2} P_0, i_q^{n*} = 0$$

$$\begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^{b*} \\ 0 \end{bmatrix} + R(-(2\theta + \theta_n)) \begin{bmatrix} i_d^{n*} \\ 0 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} i_d^{b*} + i_d^{n*} \cos(2\theta + \theta_n) \\ -i_d^{n*} \sin(2\theta + \theta_n) \end{bmatrix} \quad (19)$$

4. DC-Link 제어

그림 8은 DC-링크 전압제어기의 블록도를 나타낸다. 전압제어기는 PI제어기를 사용하였으며 제어기의 출력은 전원전압에 대한 PCC단의 위상차인 α 가 된다. 동기좌표계상에서 전원전압의 유효축(d축)성분을 V_{max}^* 라하면 부하에 일정한 전압을 공급하기 위해서는 그림 9(a)에서 처럼 유효축 지령값은 V_{max}^* 가 아닌 $V_{max}^* \cos \alpha$ 로 주어야 한다. 부하는 전원전압이 아닌 PCC단의 전압을 공급받기 때문에 감소된 유효축 지령값이 필요하기 때문이다. 그렇지 않고 V_{max}^* 로 주게되면 그림 9(b)에서의 외부원처럼 α 값의 크기에 따라 증가된 전압이 부하에 공급되며 α 값 변동시 출력전압이 같이 흔들리게 된다.

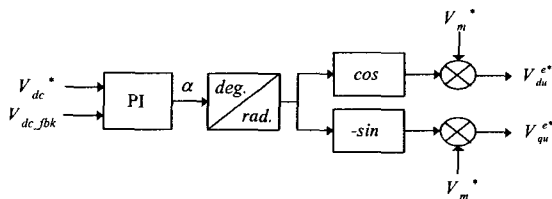


그림 8 DC-링크 전압제어기 블록도
Fig. 8 A block diagram of DC-link voltage controller

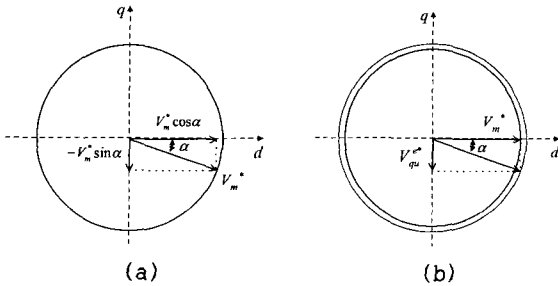


그림 9 α 값과 PCC단 지령전압
Fig. 9 The relation between α and voltage of PCC

5. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 MATLAB을 이용하였으며, 다음과 같은 조건하에서 수행하였다.

표 1 시뮬레이션 조건

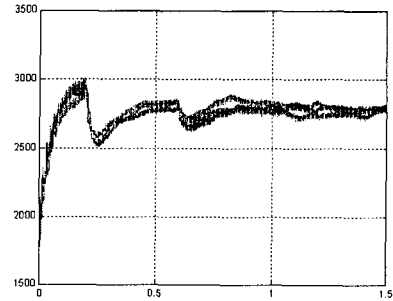
Table 1 Simulation condition

Source Voltage	6600V
Total DC Voltage	11200V
Sampling Period	125 μ s
Each Capacitance	2500 μ f
LC filter	2.5mH, 70 μ f
RL Load	1MW

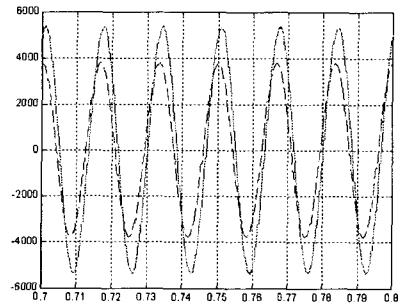
초기상태의 무부하시에는 각각의 DC-Link커패시턴스에 2800V를 가지고 있고, 0.2sec에서 1MW의 부하가 걸리고, 0.6sec에서 전원전압의 a상에 30%의 전압강하를 발생시켰다. 그림 9(a)와 10(a)는 a상의 각 커패시터 전압을 나타내고 있고 그림9(b)와 10(b)는 전압강하 발생시 전원전압(점선)과 PCC단 전압을 나타낸다. 그림 9(c)

와 10(c)는 부하전류를 나타내었다. 1 ϕ 전압강하시에 정상분, 역상분 분리 알고리즘에 의한 방법이 제어가 잘됨을 알 수 있다.

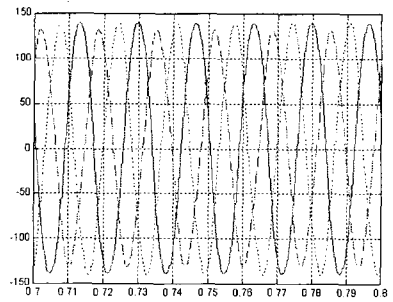
5.1 기존의 제어기



(a) a상의 각 커패시터 전압



(b) 전원전압과 PCC전압

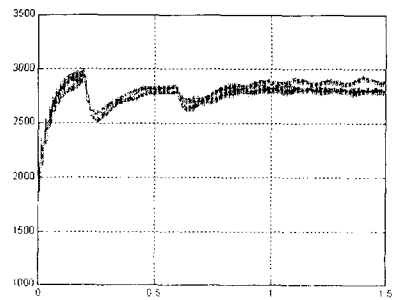


(c) 부하 전류

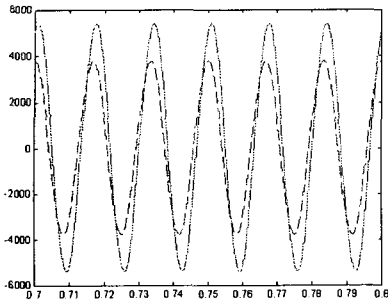
그림 10 기존의 제어기

Fig. 10 Conventional controller

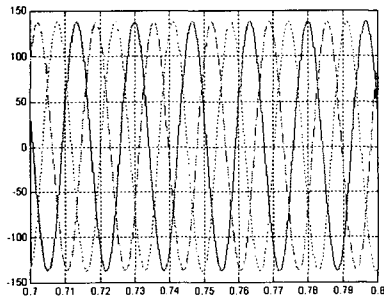
5.2 제안된 제어기



(a) a상의 각 커패시터 전압



(b) 전원전압과 PCC전압



(c) 부하 전류

그림 11 제안된 제어기

Fig. 11 Proposed controller

5. 결론

본 논문에서는 7-Level H-Bridge LIDVR 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 제안된 방법은 무효축 성분으로 DC-Link를 충전시켰으며, PCC단에 일정전압을 공급하기 위해서 유효축 성분의 지령값을 감소시켰다. 그리고, 비대칭 입력 전압이 인가되었을 때 비대칭 입력 전압을 보상해 줄 수 있는 제어 알고리즘을 제시하였다. 마지막으로 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 증명하였다.

참고 문헌

- [1] T. Kawabata, et al, "Three Phase Parallel Processing UPS Using Multi-Functional Inverter", in *IAS'89*, pp.982-987, 1989.
- [2] S. Karve, "Three of a Kind", *IEE REVIEW*, vol.46, pp27-31, March 2000.
- [3] Hingorani and N.G., Introducing custom power, *IEEE Spectrum*,37, (5), pp.41-48, 1995.
- [4] Kara, A, et al, Power supply quality improvement with a dynamic voltage restorer(DVR), in *APEC'98*, pp 986-993, 1988.
- [5] Haque, M.H., Voltage sag correction by dynamic voltage restorer with minimum power injection. *IEEE Power Engineering Review*, vol.21, pp. 56-58, May 2001.
- [6] Y. Qin and S. Du, "A DSP Based Active Power Filter for Line Interactive UPS", in *IECON'95*, pp.884-888, 1995.
- [7] W. J. Ho, et al, "A Line-interactive UPS Structure with Built-in Vector-Controlled Charger and PFC", in *Power*

Electronics and Drive Systems, vol. 1, pp. 127-132, 1997.

- [8] Changjiang Zhan, et al, Dynamic voltage restorer based on voltage-space-vector PWM control, *IEEE Trans.Ind. Applicat.*, vol. 37, pp. 1855-1863, Nov./Dec. 2001.
- [9] K. S. Park, et al, "New Control Scheme 3-Phase PWM AC/DC Converter without Phase Angle Detection under Unbalanced Input Voltage Conditions", *APEC 2000*. Vol. 1, pp. 501-505, 2000.