

DVR 기능을 갖는 3상 하이브리드형 직렬 능동전력필터

한석우*, 최규하
경문대학*, 건국대학교

3-Phase Hybrid Series Active Power Filter with Dynamic Voltage Restorer

Seok-Woo Han*, Gyu-Ha Choe
Kyungmoon College*, Konkuk University

ABSTRACT

This paper presents the 3-phase hybrid series active power filter with dynamic voltage restorer(DVR) which serve as an energy buffer and current harmonics blocking resistor connected to sensitive loads, such as, to compensate voltage dips and current harmonics in power distribution system. The DVR is to inject a dynamically controlled voltage generated by a forced commutated converter in series to the bus voltage by means of a booster transformer. The momentary amplitudes of the three injected phase voltages are controlled such as to eliminate any detrimental effects of a bus fault to the load voltage. The proposed system is able to simultaneously compensate current harmonics, voltage fluctuating and voltage unbalance in power distribution systems. The reference phase angle detected by synchronized with the positive sequence component of the unbalanced source by using symmetrical component transformation. The effectiveness of proposed system is verified by the computer simulation.

1. 서 론

급속한 경제발전과 국민 생활수준의 향상으로 현재 국내의 발전설비 용량은 53[GW]이며, 최대전력수요는 40[GW] 정도로 매년 10[%] 정도의 높은 증가율을 보이고 있다. 그리고 고도 사회화에 따른 전력환경은 전력수요의 대변화, 부하의 대도시 집중화 및 전력설비의 대용량화로 전력공급 여건은 한층 악화되는 반면, 국민생활수준의 향상과 첨단정밀 산업의 성장 및 최근에 교통수단으로 많이 이용되는 전기철도 분야의 급성장은 전력공급의 질적 향상에 대한 사회적 요구를 더욱 증대시키

고 있다. 전력품질에 영향을 주는 주요원인 중 하나는 장시간 동안 전압 혹은 전류의 파형에 변동이 발생하는 것이며, 다른 하나는 송전선이나 인근 부하에서 발생하는 지락사고 등에 의해서 순간적으로 발생하는 전압변화 사고이다.

첫째, 파형 변동인 고조파 문제는 전기사용에 따라서 생기는 일종의 공해로 발생원에서 억제하는 것이 가장 바람직한 방법이며, 대기오염이나 수질오염이라는 공해와 같은 현상이다. 고조파를 억제하는 방법은 계통차원의 저감법과 설비차원의 저감법으로 구분되며, 계통차원의 저감법은 고조파 발생원 밖에서 사후 대책으로 발생된 고조파를 수동필터 또는 능동전력필터를 설치하여 제거하는 방법이고, 설비차원의 저감법은 비선형 부하 자체가 발생하는 고조파를 사전에 최대한 억제하는 방법이다. 그러나 수동필터는 동조된 공진주파수에 해당하는 고조파만이 제거되는 제한성과 부피가 크다는 단점을 갖고 있다. 따라서 최근에는 수동필터의 단점을 보완하며, 우수한 성능을 발휘할 수 있는 능동전력필터와 그 외 여러가지 토폴로지에 대한 연구가 활발하다[1].

둘째로, 전압변동 문제는 계통에서 사고가 발생하는 경우 보호계전기가 동작하여 사고를 차단하기까지의 시간 동안은 정전이 아니더라도 순간적으로 전압강하 현상이 발생하게 된다. 미국 NPL(National Power Laboratory)의 전력품질 조사에 의하면 전원장해(power trouble)의 대부분이 전원의 순간적인 전압변동으로 조사되었다[2]. 실제로 50[%]의 전압강하가 발생하더라도 UPS는 100[%]의 전력을 부하에 공급하여야 하기 때문에 부하용량의 100[%]가 되는 UPS를 설치하여야 되므로, 효율적이지 못하며, 다양한 배전계통의 사고로부터 부하를 보호할 수는 있으나, 전원측 입장에서는 고조파 발생원으로 작용하고, 손실이 크며, 고가이어서 제한적으로 사용되어지고 있다. 그러나 동적순간전압보상기(DVR : dynamic voltage restorer)는 정전으로부터 부하를 보호할 수는 없지만, 배전계통의 사고 중 90[%] 이상을 차

지하는 순간전압강하와 상승의 보상을 주목적으로 하는 보상장치로, 전압변동분만 보상하기 때문에 UPS에 비하여 용량은 현격하게 줄일 수 있으며, 유지보수가 용이하고, 가격대비 성능이 우수한 장점이 있다. 따라서 DVR이 상용화될 경우 기존의 UPS 시장을 상당부분 대체할 수 있는 기기이다. 최근에는 컨버터 2대를 직·병렬 조합으로 전압 및 전류를 동시에 보상하는 단일화된 전력품질 보상기(UPQC : unified power quality conditioner)가 개발되었다. 이 보상기는 종합적 보상기로 제어 복잡하고, 운전비용이 상승되는 단점을 가지고 있다[3]. 이상과 같이 고조파와 전원 전압변동 문제가 각기의 보상기로 해결되어 지고 있어 장치의 활용도 저하와 설비 비용 증가의 원인이 되고 있는 실정이다.

제안된 시스템은 “DVR 기능을 갖는 3상 하이브리드형 직렬 능동전력필터”로 전원전압의 이상현상에도 불구하고 부하단 전압을 일정하게 유지시켜주며, 또한 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류를 전원측 유출입을 억제시킨다.

본 시스템은 중성선이 없는 경우로 영상분은 부하측에 나타나지 않게 되므로 불평형 발생시 전원측의 역상분만을 검출하여 보상함으로써 부하측에 평형된 전압을 공급할 수 있을 뿐만 아니라 정상분의 크기를 제어함으로써 부하에 인가되는 전압의 크기를 조정하는 것이 가능하다[4]. 이때 기준전압 발생을 위하여 필요한 전원의 위상각 정보를 전역통과필터(all pass filter)를 이용하여 전원의 정상분에 일치되는 위상각 정보를 얻는다.

본 논문에서는 고조파 전류, 전원전압 불평형 및 전원전압 변동을 동시에 보상하는 3상 하이브리드형 직렬 능동전력필터의 제어 알고리즘을 제안하고 그 타당성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성

제안된 시스템은 그림 1과 같이 전압원 PWM 인버터, 출력전압의 리플 성분을 제거하기 위한 LC필터, 직렬변압기, 수동필터 그리고 직류 에너지 저장장치로 구성된다. 시스템은 전원 이상현상으로 인한 전원전압 변동과 비선형 부하에 의해 발생하는 고조파 전류보상에 능동적으로 대처하기 위한 것으로, 전력계통에 보상전압을 결합하기 위하여 3개의 전압 주입용 변압기를 통하여 전원 임피던스에 직렬 결합된다. 그리고 능동전력필터의 용량을 줄이기 위하여 수동필터가 병렬로 연결되며, 고조파 전류에 대한 “영” 임피던스 경로를 제공한다.

즉, 능동전력필터는 고조파 전류를 저지하여 고조파를 계통과 절연시키고, 수동필터는 저 임피던스회로로 동작하여 부하 고조파전류를 흡수하므로 전압제어가 가능해진다. 따라서 컨버터의 정격은 기존의 능동전력필터보다 적어지고 이상적인 기능을 발휘하게 된다. 또한 고조파

전류 보상과 전원전압 변동을 동시에 보상하기 때문에 컨버터의 이용률이 증대된다.

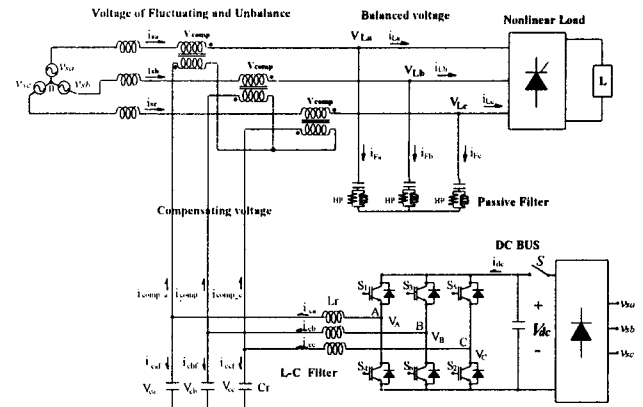


Fig. 1 Configuration of compensator.

2.2 제어 알고리즘

전원전압의 불평형을 보상하기 위하여 전원에 포함된 역상분을 검출한 후 이를 직렬변압기에 주입한다. 전원전압은 정상분과 역상분의 합이므로 기본과 성분과 검출된 전압의 차가 보상기준 전압으로서 식 (1)과 같이 표현된다[5].

$$\Delta v_{(a,b,c)} = v_{(La,Lb,Lc)}^{ref} - v_{(a,b,c)} \quad (1)$$

여기서 $\Delta v_{(a,b,c)}$ 는 각상의 직렬변압기에 주입되어야 할 전압변동에 관한 보상전압이고, $v_{(a,b,c)}$ 는 전원전압이며, $v_{(La,Lb,Lc)}^{ref}$ 는 전원전압의 변동에도 불구하고, 부하단에 유지되어야 할 기준전압으로, 전원전압의 정상분에 동기하는 위상각을 갖는다. 불평형 전원의 전압은 대칭좌표법에 의하여 정상분, 역상분, 영상분으로 분해가 가능하며, 본 시스템과 같이 중성선이 없는 경우 영상분은 무시될 수 있다[4]. 따라서 전원의 역상분을 검출하여 이를 보상하게 되면 전원의 평형상태를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 정상분의 크기를 조정함으로써 부하측에 일정한 크기의 전압이 유지되도록 할 수 있다. 불평형이 포함된 전원전압 v_a, v_b, v_c 에서 정상분과 제어 기준각을 검출한다.

먼저 전원의 정상분을 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ap} \\ v_{bp} \\ v_{cp} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 a 는 $+120^\circ$, a^2 은 -120° 위상이동을 의미하고, 식 (3)과 (4)의 전달함수 및 위상을 갖는 전역통과필터(all pass filter)를 이용하여 정상분을 구한다. 전역통과 필터는 진폭은 일정하게 유지하며, 위상만을 가변시킬 수 있는 위상시프터로 그림 2와 같이 구성된다.

$$v_o = \frac{1-j\omega C_1 R_1}{1-j\omega C_1 R_1} \cdot v_i \quad (3)$$

$$\theta = -2 \tan^{-1} \omega C_1 R_2 \quad (4)$$

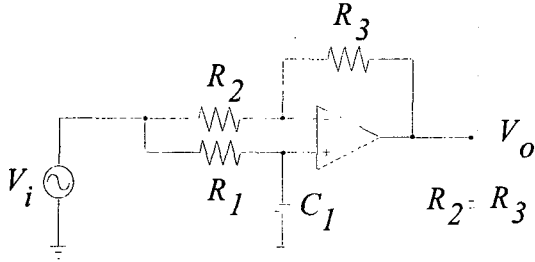


Fig. 2 All pass filter.

식 (2)에서 정상분 v_{ap} , v_{bp} , v_{cp} 는 3상 평형이고, 이를 정좌표계 d-q 축으로 변환하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{qp}^s \\ v_{dp}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2v_{ap} - v_{bp} - v_{cp}}{3} \\ \frac{v_{cp} - v_{bp}}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (2)와 (5)를 이용하여 전원전압의 정상분에 동기된 위상각을 구하면 식 (6)과 같다.

$$\theta_e = \tan^{-1} \left[-\frac{v_{dp}^s}{v_{qp}^s} \right] \quad (6)$$

이 방법은 기존의 방식에 비하여 제어기의 구조가 간단해지며, 기본과 영역에서의 위상편차 및 크기 감소를 초래하는 고역 및 저역 통과필터의 사용을 피할 수 있다.

v_{qp}^e 는 정상분의 동기좌표계 q축 값으로 식 (7)로 부터 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} v_{qp}^e \\ v_{dp}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qp}^s \cos \theta_e - v_{dp}^s \sin \theta_e \\ v_{qp}^s \sin \theta_e + v_{dp}^s \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (7)$$

전원전압 변동시 부하단에 유지되어야 할 기준전압은 식 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{La}^{ref} \\ v_{Lb}^{ref} \\ v_{Lc}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{V_m}{v_{qp}^e} \begin{bmatrix} v_{ap} \\ v_{bp} \\ v_{cp} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 V_m 은 부하단의 기준전압의 진폭이다. 다음으로 전원전류의 고조파성분에 대한 보상기준전압을 구한다. 먼저 전원전류와 전원전압을 검출하고 각각을 α - β 좌표변환을 한다. α - β 좌표변환 한 전압과 전류를 p-q 이론을 이용하여 순시유효전력과 순시무효전력을 얻는다. 여기서 고조파분만을 추출하기 위하여 고역통과 필터를 통과시키면 식 (9)와 같이 고조파성분의 전류를 얻는다.

$$\begin{bmatrix} i_{sah} \\ i_{sbh} \\ i_{sch} \end{bmatrix} = [C] \left(\begin{bmatrix} v_a & v_\beta \\ -v_\beta & v_a \end{bmatrix} \right)^{-1} \left(G_{HPF}(j\omega) \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

여기서 [C]는 식 (10)과 같다.

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

최종적인 보상 기준전압은 두 가지 기준전압의 합의 형태가 된다. 직렬형 능동전력필터의 보상기준전압은 전원과 부하 사이에 3개의 단상 결합변압기를 통해 계통에 직렬로 접속된다. 또한 직렬형 능동전력필터는 부하측 전압과 전원측 전압에서 산출한 기준전압에 추종시켜, 고조파 전류제거와 순시전압강하 보상 기능을 수행한다. 그림 3은 제어 블록선도이며, 최종적으로 전원전압 불평형, 변동 및 고조파 전류를 제거하기 위하여, 직렬변압기에 주입되어야 할 보상전압의 기준치는 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{comp a}^* \\ v_{comp b}^* \\ v_{comp c}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta v_a \\ \Delta v_b \\ \Delta v_c \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} i_{sah} \\ i_{sbh} \\ i_{sch} \end{bmatrix} \quad (11)$$

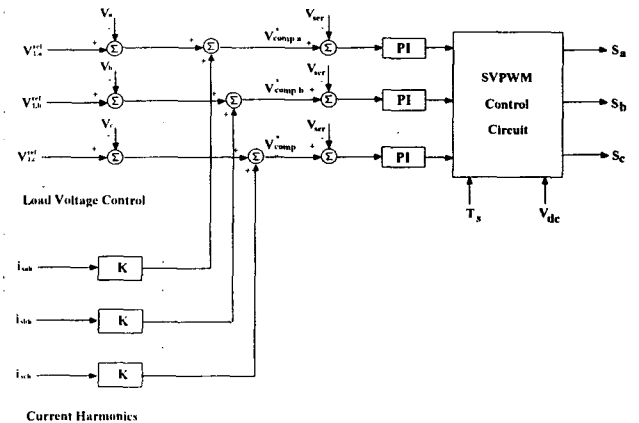


Fig. 3 Control block diagram.

전원전압 변동이 없을 경우 컨버터는 기본과 주파수에서 "영" 값의 임피던스를 나타내며 부하 고조파 주파수에서는 블럭킹 저항으로 동작한다. 직렬 변압기는 누설 인덕턴스가 최소가 되도록 설계하고, 인버터의 직류단은 정류기를 통하여 에너지를 저장한다. 이상적인 전압보상 시 현재 제작되고 있는 보상기 용량은 단상사고에 대해서는 정격 전압의 50[%] 까지, 3상 사고의 경우는 정격 전압의 38[%] 까지 보상이 가능하고, 보상할 수 있는 사고 시간은 최대 150[ms] 즉 10주기 미만인 것으로 알려져 있다.

3. 시뮬레이션 결과

제안된 보상시스템의 시뮬레이션은 표 1의 파라미터, 그림 4의 정상분 검출회로 및 PSIM을 이용하였다. 비선형 부하로는 R-L이 연결된 3상 전파 위상제어정류기로 점호각 60° 로 전원전압 평형, 전원전압 10[%] 상승, 전원전압 50[%] 저하, 전원전압 50[%] 저하인 1선 고장, 전원전압 50[%] 저하인 2선고장에 대하여 특성을 고찰하였다.

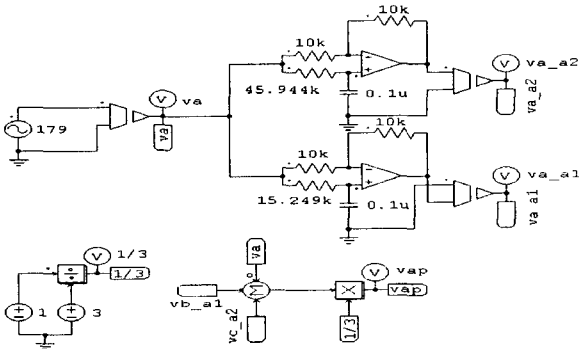


Fig. 4 Detection circuit of positive sequence component.

Table 1 System parameters.

항목	용량
H.P.F	$L=0.26[mH]$ $C=300[\mu F]$ $R=3[\Omega]$
컨버터의 출력필터	$L=760[\mu H]$ $C=2[\mu F]$
전원	220[V], 60[Hz]
부하	5[kVA]
스위칭 주파수	10[kHz]

그림 5와 6은 전압변동이 없는 3상 평형일 때의 파형으로 전원전압, 부하단 전압, 전원전류, 부하전류, 직류단 전압을 보여준다. 이때 부하전류의 THD는 31[%]이며, 전원전류는 4[%]로 보상기는 고조파 보상운전 되었다.

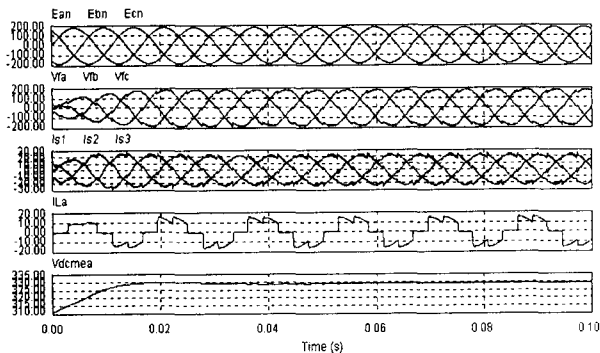


Fig. 5 Simulation result for a phase controlled 3-phase bridge rectifier with proposed compensator (3-phase balanced voltage:100, 100, 100[%] $\alpha=60^\circ$). (a) source voltage (b) load voltage (c) source current (d) a-phase load current (e) DC link voltage

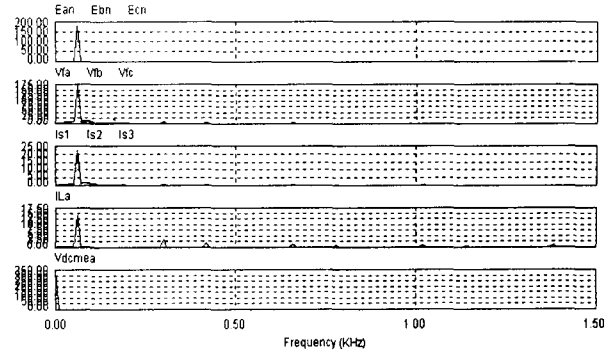


Fig. 6 FFT result of Fig. 5. (a) source voltage (b) load voltage (c) source current (d) a-phase load current (e) DC link voltage

그림 7은 전원전압이 2 주기간 3상 모두가 10[%] 상승한 3상 평형 일때의 파형으로 부하단의 전압이 일정하게 유지되고 전원전류 THD도 4[%]이하로 운전되었다.

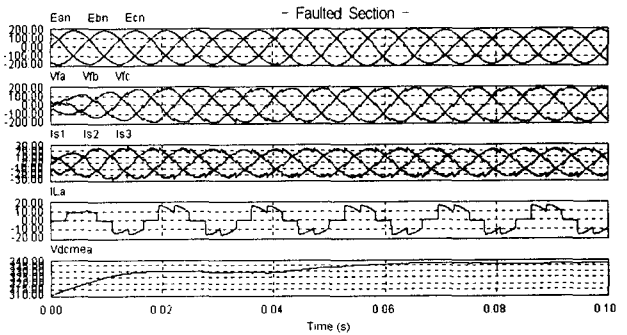


Fig. 7 Simulation result for a phase controlled 3-phase bridge rectifier with proposed compensator (3-phase balanced voltage:110, 110, 110[%] $\alpha=60^\circ$). (a) source voltage (b) load voltage (c) source current (d) a-phase load current (e) DC link voltage

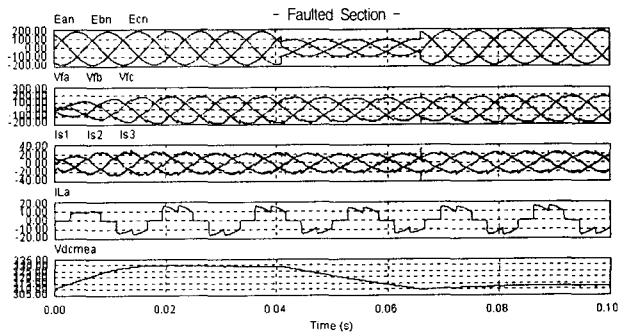


Fig. 8 Simulation result for a phase controlled 3-phase bridge rectifier with proposed compensator (3-phase balanced voltage:50, 50, 50[%] $\alpha=60^\circ$). (a) source voltage (b) load voltage (c) source current (d) a-phase load current (e) DC link voltage

그림 8은 보상기의 보상능력을 시험하기 위하여 전원 전압을 2 주기간 3상 모두 50[%]로 저하시켜 시험하였다.

시험결과 사고구간에서 부하단 전압이 일정하게 유지됨을 보여 주며, 이때 직류단은 방전되고, 사고가 해소되었을 때 다시 일정전압이 유지됨을 보여준다.

그림 9는 전원장해 중 많은 부분을 차지하고 있는 1상 고장으로 3상 평형전압 운전 중 2 주기간 전압을 50[%]로 저하시켰으나 부하단 전압이 일정하게 운전됨을 알 수 있다.

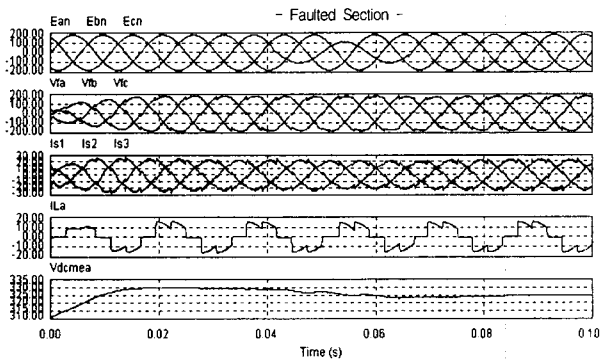


Fig. 9 Simulation result for a phase controlled 3-phase bridge rectifier with proposed compensator (3-phase unbalanced voltage:50,100,100[%] $\alpha=60^\circ$). (a) source voltage (b) load voltage (c) source current (d) a-phase load current (e) DC link voltage

그림 10은 정상 운전 중에 2주기간에 2상이 50[%]로 전압이 저하되었으나, 부하단 전압이 일정하게 운전되었다.

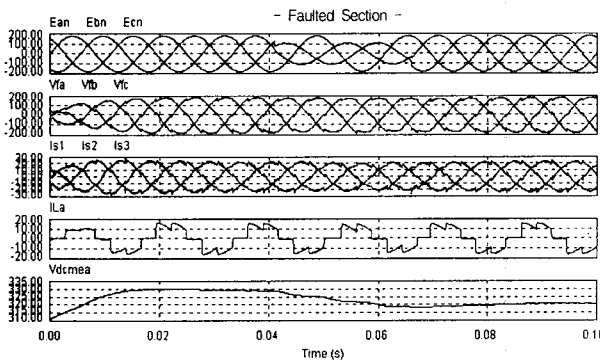


Fig. 10 Simulation result for a phase controlled 3-phase bridge rectifier with proposed compensator (3-phase unbalanced voltage:50, 50, 100[%] $\alpha=60^\circ$). (a) source voltage (b) load voltage (c) source current (d) a-phase load current (e) DC link voltage

4. 결 론

전원 전압 불평형이나 전압강하, 상승에 의한 문제는 전류 고조파에 의한 문제보다 직접적이고, 그 규모도 크다 할 수 있다. 전압의 문제로 인해 각종 컴퓨터 시스템으로 동작하는 민감한 부하의 오동작이나 고장 등을 유발할 수 있으며, 비 선형 부하에 저주파수의 고조파를 발생시키고, 시스템의 용량을 증대시키는 요인으로 작용할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 DVR 기능을 갖는 하

이브리드형 직렬형 능동전력필터를 제안하여 수동필터의 고조파 보상능력을 향상시켜 주며, 전원측으로의 전류 고조파 유출을 억제시키고, 전원 전압의 불평형을 보상하여 부하측에 평형한 전원 조건이 형성되도록 하였다. 제어 알고리즘은 전류고조파 보상과 전원전압 불평형 및 변동 보상 모드로 나뉘며, 최종적인 보상 전압은 두 모드의 보상전압의 합으로 하였다.

불평형 전원의 역상분을 검출하여 이를 보상함으로써 전원의 평형상태를 얻을 수 있고, 정상분의 크기를 조정함으로써, 부하측에 일정한 크기의 전압이 유지되도록 한다. 보상기준전압 발생은 전원전압의 정상분에 동기된 위상각이 필요하며, 전역통과필터와 대칭좌표법을 이용한 방법은 기존의 방식에 비하여 제어기의 구조가 간단해지며, 기본과 영역에서의 위상편차 및 크기 감소를 초래하는 고역 및 저역 통과필터의 사용을 피할 수 있었다.

시뮬레이션 결과와 같이 전원전압에 순간전압강하와 상승이 발생하더라도 부하에 공급되는 전압은 정격전압의 98[%] 이상 유지와 전원전류 THD도 4[%] 정도의 제어가 가능함을 보였다. 따라서 본 기기를 현장에 적용하는 경우, 고조파 유출입 억제와 전원측의 순간전압 변동에 의한 기기의 재시동 등을 방지하여 상당한 경제적 손실을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] F. Z. Peng, et. al., "Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters," *IEEE Trans. Industry Appl.*, vol. 29, No. 1, pp. 144-152, Jan./Feb. 1993.
- [2] S.Y. Lee, S.W. Han, H.S. Mok, G.H. Choe, "A Novel Active Series Voltage Compensator with Harmonic Current Compensating Capability," *PEDS'99*, Vol.2, 1054-1060, June, 1999.
- [3] H. Akagi, et. al., "Unified Power Quality Conditioner : The Integration of Series and Shunt Active Filters," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 13, No. 2, pp. 315-322, March, 1998.
- [4] 이승요, 고재석, 목형수, 최규하, "3상 불평형 전원 시스템의 새로운 위상각 검출기법을 이용한 순간전압 보상기의 해석 및 제어," *전력전자학회논문지*, 제4권, 제3호, pp.275-284, 1999년 6월.
- [5] 한석우, 최규하, "순간전압변동 보상기능을 갖는 3상 하이브리드형 직렬 능동전력필터," *전력전자학회논문지*, 제5권, 제6호, pp 544-551, 2000년 12월.