

불평형 전압 보상을 위한 DVR 제어에 관한 연구

정 홍주*, 정 준모, 송 종환
(주) 효성 중공업 연구소

A Study On DVR Control for Unbalanced Voltage Compensation

HongJu-Jung*, JoonMo-Chung, JongWhan-Song
Hyosung Corporation

Abstract - This paper presents a new control scheme for a Dynamic Voltage Restorer(DVR) system consisting of series voltage source PWM converters. The control system is designed using differential controllers and digital filters to transfer the faulted ac source voltage to a d-q model and to separate the positive and negative sequence component for individual compensation. The performance of the presented controller and scheme are confirmed through simulation and actual experiment.

1. 서 론

일반적으로 배전계통은 하나의 모선에 여러 개의 선로가 병렬로 연결되어 있으며, 병렬선로나 모선에 고장이 발생할 경우 타 선로에 전압 불평형을 유발하게 된다. 선로의 고장은 반도체 소자를 사용한 민감한 부하에 치명적인 영향을 미칠 수 있으며 부하의 이상 동작으로 산업체에서는 심각한 손실이 야기 될 수 있다. 따라서 민감한 부하를 선로의 고장으로부터 보호하는 장치가 많이 개발되어 왔는데 그 장치 중의 하나가 DVR이다. 또한 DVR의 제어를 이상적으로 하기 위해 불평형이 발생한 전원 전압을 역상성분과 정상성분으로 분리하여 제어 대상인 전원 전압을 dc성분으로 제어하려는 연구가 많이 진행되어 왔다.

본 논문에서는 이러한 불평형이 발생한 전원전압에서 역상성분과 정상성분을 미분기와 디지털 필터를 사용하여 분리하는 방법을 제안한다. 제안된 제어기로 완전한 역상성분과 정상성분의 분리가 가능하여 불평형이 발생한 ac성분의 전원전압을 dc성분으로 제어 할 수 있으므로 PI제어기를 사용하여 제어의 성능을 우수하게 할 수 있음을 보였다. 또한 제안된 제어기와 시스템을 Matlab를 이용하여 모델링하여 보상특성을 살펴 보았으며 마지막으로 2.5kW의 소형 실험용 DVR을 제작하여 실험을 통하여 제안한 시스템의 성능을 검증해 보였다.

2. 제안된 시스템의 구성

2.1 시스템 구성

그림 2.1은 DVR의 시스템 구성도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 단상 PWM인버터 3개의 출력이 필터를 통하여 계통과 직렬형 변압기를 통하여 연결되어 있다. 인버터 전압의 입력은 계통에서 3상 3권선 변압기와 다이오드 정류기를 사용하여 capacitor bank에 저장시켜 사용한다. 또한 계통의 고장을 인위적으로 발생시키기 위한 장치로 Magnetic contact를 사용하여 DVR 앞단에 순간적으로 저항을 투입 할 수 있게 하였다. 부하로는 권선형 저항을 사용하였다.

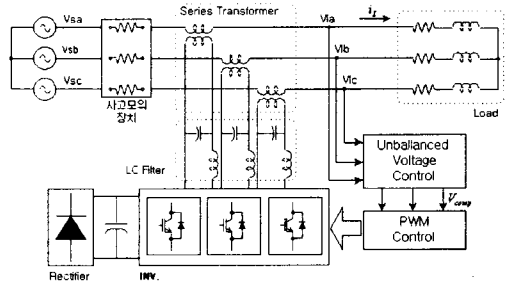


그림 2.1 시스템 구성도

2.2 제어기 구성

기존에 불평형이 발생한 전원전압을 정상성분과 역상성분으로 분리하는 방법으로 디지털 필터를 사용하였는데 사실상 필터를 통해 정상성분과 역상성분을 분리하는 방법으로는 한계가 있었다. 따라서 필터를 사용하지 않고 정상성분과 역상성분을 분리하는 방법으로 본 논문에서는 미분기와 노이즈필터를 사용하였는데 그림 2.2는 제안된 전압보상기의 제어방식을 나타낸 것이다.

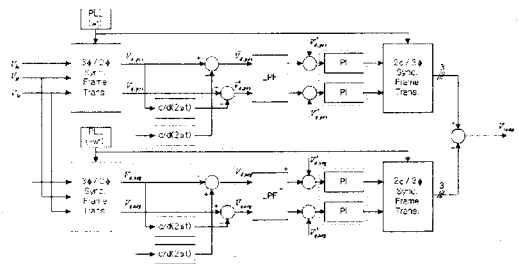


그림 2.2 제안된 제어기 블럭도

제어 동작에 대해 설명하면, 전원전압을 정상성분과 역상성분을 기준으로 3상 2상 변환을 하고 미분기와 적분기를 사용하여 정상성분과 역상성분을 분리시킨다. 분리된 성분을 부하가 요구하는 기준 값과 비교하여 그 오차를 PI제어기를 통하게 한다. 이 결과 값들을 역변환하고 가산하면 제어기의 출력으로 DVR이 보상할 기준 전압이 된다.

3. 보상기의 원리

앞 절에서 살펴본 보상기의 제어방법을 본 절에서는 수식을 사용하여 살펴보기로 하자.

먼저 불평형이 발생한 3상 전원전압을 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{a_n} &= E_{m_p} \cos(\omega t + \alpha_p) + E_{m_n} \cos(\omega t + \alpha_n) + E_{m_o} \cos(\omega t + \alpha_o) \\ E_{b_n} &= E_{m_p} \cos\left(\omega t + \alpha_p - \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m_n} \cos\left(\omega t + \alpha_n + \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m_o} \cos(\omega t + \alpha_o) \\ E_{c_n} &= E_{m_p} \cos\left(\omega t + \alpha_p + \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m_n} \cos\left(\omega t + \alpha_n - \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m_o} \cos(\omega t + \alpha_o) \end{aligned} \quad (3.1)$$

수식 (3.1)을 ωt 로 동기좌표변환한 수식은 (3.2)와 같이 표현되며,

$$\begin{aligned} E_{d+} &= E_{m_p} \cos(\alpha_p) + E_{m_n} \cos(2\omega t + \alpha_n) \\ E_{q+} &= -E_{m_p} \sin(\alpha_p) + E_{m_n} \sin(2\omega t + \alpha_n) \end{aligned} \quad (3.2)$$

위의 식(3.2)의 E_{q+} 를 $2\omega t$ 로 미분하면,

$E_{m_n} \cos(2\omega t + \alpha_n)$ 이 되며 이를 E_{d+} 와 제산하여 순수한 dc값인 d축의 정상성분을 얻을 수 있다. 그리고 E_{d+} 를 $2\omega t$ 로 미분하면, $-E_{m_n} \sin(2\omega t + \alpha_n)$ 이 되며 E_{q+} 와 합산하여 $-E_{m_p} \sin(\alpha_p)$ 인 q축의 정상성분에 해당하는 dc값을 얻을 수 있다.

또한 (3.1)수식을 $-\omega t$ 로 동기좌표변환한 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_{d-} &= E_{m_p} \cos(2\omega t + \alpha_p) + E_{m_n} \cos(\alpha_n) \\ E_{q-} &= -E_{m_p} \sin(2\omega t + \alpha_p) + E_{m_n} \sin(\alpha_n) \end{aligned} \quad (3.3)$$

위의 식(3.3)의 E_{q-} 를 $2\omega t$ 로 미분하면, $-E_{m_p} \cos(2\omega t + \alpha_p)$ 가 되며 이를 E_{d-} 와 합산하면, $E_{m_n} \cos(\alpha_n)$ 의 순수한 dc값인 d축의 역상성분을 얻을 수 있고 E_{d-} 를 $2\omega t$ 로 미분하면, $-E_{m_p} \sin(2\omega t + \alpha_p)$ 으로 E_{q-} 와 제산하여 $E_{m_n} \sin(\alpha_n)$ 인 역상성분의 q축에 해당하는 dc성분의 값을 얻을 수 있다. 하지만 위의 dc 성분들은 미분기의 출력으로 나온 값으로 노이즈가 많이 있다 따라서 정상성분과 역상성분의 dq성분들을 노이즈 필터를 사용하여, 미분기를 사용함으로써 발생하는 고주파 대역의 노이즈를 제거하여 제어의 요소인 전원전압을 순수한 dc성분으로 추출하게 된다. 이 dc성분의 값은 부하가 필요로 하는 기준전압과 비교가 되어 그 오차가 PI제어기의 입력으로 되며 PI제어기의 출력은 각각 정상성분과 역상성분을 기준으로 하는 PLL의 값과 연산되어 3상의 값으로 변환된다. 마지막으로 이 3상의 정상성분, 역상성분이 가산되어 제어기의 출력으로 나오게 되며, 이는 인버터가 출력해야 할 전압이 된다.

4. 시뮬레이션 결과

제안된 시스템의 제어기를 Matlab로 모델링하였으며 부하에서 필요로 하는 기준전압을 $220(V_{LL})$ 로 설정하여 전원전압에 sagging이 발생하였을 경우 제어기가 부하에서 요구하는 정상성분과 역상성분의 전압을 적절히 검출하여 DVR 시스템이 보상전압을 공급하는지를 확인해 볼 수 있다.

먼저 전원에 불평형이 발생 할 경우 그림 4.1과 같은 전압이 나타난다.

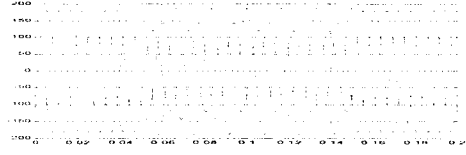


그림 4.1 불평형 전원전압

그림 4.1의 결과를 정상성분과 역상성분을 각각 기준으로 하여 3상 2상 변환하면 아래와 같은 그림 4.2과 4.3으로 표현할 수 있다.

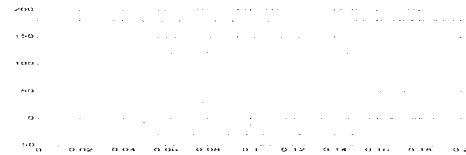


그림 4.2 정상성분을 기준으로 동기좌표변환한 결과

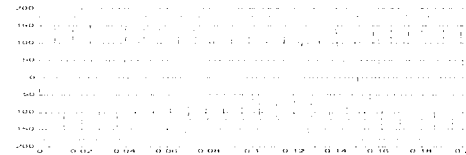


그림 4.3 역상성분을 기준으로 동기좌표변환한 결과

아래 그림 4.4과 4.5는 좌표변환한 값을 미분기와 노이즈 필터를 통해 나온 결과를 나타낸 것이다.

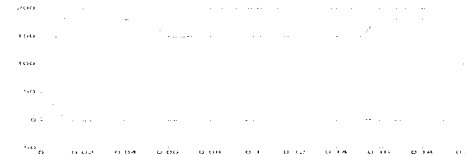


그림 4.4 정상성분만을 검출한 결과

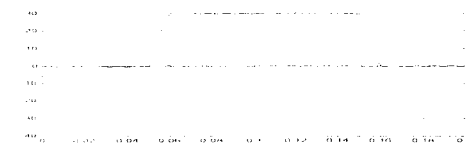


그림 4.5 역상성분만을 검출한 결과

그림 4.4와 4.5의 값을 부하에서 요구하는 기준전압과 비교하여 그 오차를 PI제어기를 거쳐 2상 3상으로 좌표변환을 시키고 두 성분을 더하면 그림 4.6과 같이 되며 이는 제어기의 출력이다.

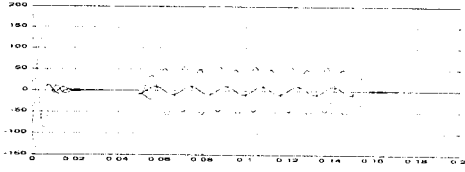


그림 4.6 제어기의 출력전압

위의 결과(그림 4.6)와 불평형이 발생한 전원전압을 가산을 해보면 그림 4.7과 같이 나타나며 이는 부하전압을 나타낸 것으로 부하에는 계속 일정전압이 공급되고 있음을 의미한다.

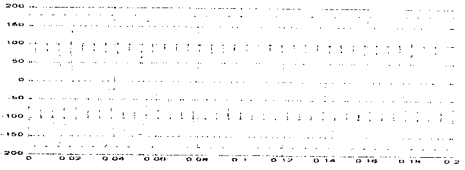


그림 4.7 DVR제어기로 보상한 부하전압

5. 축소모형제작 및 실험

5.1 DVR

그림 5.1은 2.5kW의 DVR 시스템 내부를 나타낸 것으로 크게 주입변압기부, 정류부, 인버터부로 구분하였는데 주입변압기는 계통과 DVR 시스템을 직렬로 연결하게 하며 누설 인덕턴스를 최소가 되게 설계하였다. 정류부는 3상 3선식 변압기를 사용하여 정류기를 통해 인버터의 dc bank에 저장되며 인버터는 단상 인버터로 불평형전압을 보상할 수 있게 되어있다. 표 5.1에 실험에 사용된 DVR의 회로정수를 나타내었다.

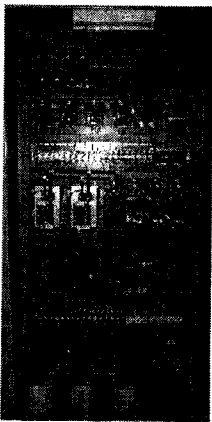


그림 5.1 2.5kW급 DVR시스템

표 5.1 실험회로 정수

전원전압 (V _{L-L RMS})	220[V]
전원주파수	60[Hz]
DC Link 커패시터	2200[uF]
직렬인버터 스위칭 주파수	5000[Hz]
인버터 출력 필터 L	7.5[mH]
인버터 출력 필터 C	15[uF]

5.2 실험결과

그림 5.2는 사고모의 장치가 동작하여 전원전압에 불평형이 발생하여 부하전압(V_{ab})이 순간적으로 감소되는 것을 나타낸 것이다.

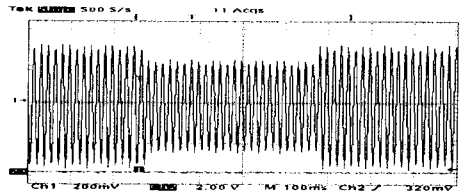


그림 5.2 고장발생시 부하전압

그림 5.3은 전원전압에 사고가 그림 5.2와 같이 발생하여 DVR이 전압보상을 하였을 경우의 부하전압을 나타낸 것으로 제어기 내부의 비례이득(K_p)을 2로 적분이득(K_i)을 0.02로 하였을 경우이다. 전원전압이 사고가 발생하여 DVR이 동작하는 구간은 그림 5.3의 하단부에 있는 신호가 high되는 구간이다.

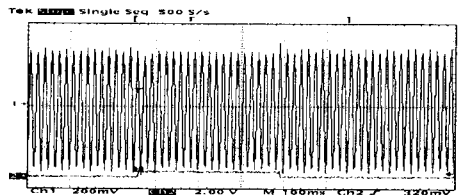


그림 5.3(a) 전압보상시 부하전압(V_{ab})

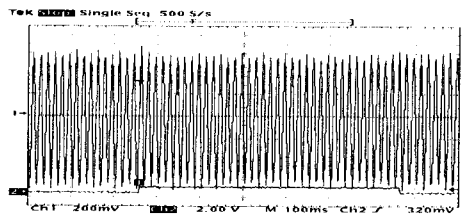


그림 5.3(b) 전압보상시 부하전압(V_{bc})

그림 5.4는 DVR이 동작하는 구간을 확대한 그림으로 이득은 5.3의 경우와 동일하며 부하전압 V_{bc} 를 나타낸 것이다. 고장구간은 그림 5.3과 동일하게 하단부의 신호가 high로 되는 구간이다.

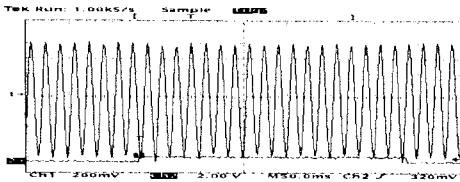


그림 5.4(a) 전압보상시 부하전압

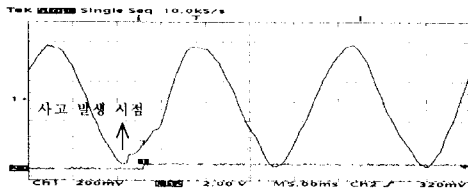


그림 5.4(b) 전압보상시 부하전압

그림 5.4(2)와 같이 고장이 발생한 후 2ms 이내에 고장을 인식하여 보상을 시작하며 부하에는 전원전압에 이상이 발생하여도 반주기 이내에 부하에서 필요로 하는 일정전압이 공급되어 지고 있음을 실험을 통해 확인 할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 송전선로 등의 사고에 의해 발생하는 불평형 전원전압을 연속적으로 보상하는 DVR제어기를 제안하고 그 동작원리와 제어방식을 분석, 확인하였다. Matlab을 이용하여 시스템의 동작과 성능을 확인하였고 또한 하드웨어구현의 타당성을 확인하였다. 시뮬레이션결과를 비교 검증하기 위해 직렬 단상 인버터 3개로 구성된 DVR, 사고모의 장치, 그리고 부하 등의 실험장비를 이용하여 축소모형을 제작하고 실험을 실시하여 제안하는 DVR 제어기가 계통의 전압에 순간전압강하와 같은 외란을 보상 할 수 있음을 검증하였다. 향후 추가로 실시해야 할 연구는 고조파 전압, 전류 등도 보상하는 성능을 가지는 제어 알고리즘의 개발과 상용성에 관한 연구이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kevork Haddad, Geza Joos, A Fast Algorithm for Voltage Unbalance Compensation and Regulation in Faulted Distribution System, APEC conference, pp.963-969, 1998.
- [2] Alexandre Campos, Geza Joos, Analysis and Design of a Series Voltage Unbalance Compensator Based on a Three-Phase VSI Operating With Unbalanced Switching Function, IEEE Trans. Power Elec. vol.9, no.3, pp.269-274, May 1994.
- [3] M. F. McGranaghan, D. R. Mueller, and M. J. Samotyj, Voltage Sags in Industrial System, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.29, pp.397-403, Mar./Apr. 1993.
- [4] N. H. Woodley, L.Morgan, A. Sundaram, Experience

with An inverter-Based Dynamic Voltage Restorer, IEEE Trans. On Power Delivery, vol.14, no.3, pp.1181-1186, July 1999.

[5] Ming Fang, Gardiner A.I., MacDougall A., Mathieson G.A., A Novel Series Dynamic Voltage Restorer for Distribution Systems, Proceedings of POWERCON98, Beijing, pp. 38-42, Aug. 1998.

[6] M.H. J. Bollen, Voltage Sags: Effects, Mitigation and Prediction, Power Engineering Journal, pp.129-134, June, 1996.

[7] Toni Wunderlin, David Amhof, Peter Dahler, Horst Gruning, Power Supply Quality Improvement with a Dynamic Voltage Restorer(DVR), Proc. of EMPD98, pp. 518-525, Mar. 3-5, Singapore, 1998.

[8] Geza joos, Three-Phase Static Series Regulator Control Algorithms for Dynamic Sag Compensation, ISIE99 Bled, Slovenia pp.515-520, 1999

[9] K. Haddad and G. Joos, Distribution System Voltage Regulation Under Fault Conditions Using Static Series Regulators, IEEE Ind. Appl. IAS97 Conf. Rec., New Orleans, pp. 1383-1389, Oct. 1997.

[10] 한병문 외 2, 순간전압강하에 대한 동적전압보상기, 전기학회논문지 47권 8호, 8월, 1998.

[11] 한병문 외 3, 직, 병렬 인버터를 이용한 동적전압보상기, 전기학회논문지 48권 11호, 11월, 1999.

[12] 김제홍, 최재호, 부정전 전원장치용 디지털 위상동기화 기법, 조명.전기설비학회지, vol.11, no.3, pp.106-113, 1997.