

위상지연을 이용한 불평형 시스템에서의 직렬보상기

최현영, 오세호, 김도훈, 이교성, 김양모  
충남대학교 전기공학과

The series voltage compensator in unbalanced system using a phase-delay

Choi Hyen-Young, Oh Se-Ho, Kim Do-Hoon, Lee Kyo-Sung, Kim Yang-Mo  
Dept. of Electrical Engineering Chungnam National University

**Abstract** - Voltage sag is discussed a important problem of power quality in transmission sys-tem. So recently The study on the compensatio-n for voltage sag is made good progress. Especially a compensation in unbalance sources system is difficult. In this paper, we proposed a series voltage compensator and a rejection of voltage ripple from synchronous frame in unbal-anced sources

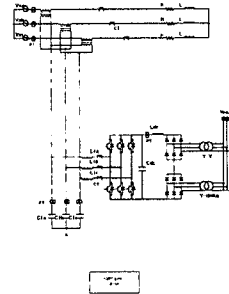


그림 1 직렬보상기 구성도

1. 서 론

최근 고도 기술의 진보의 눈부신 진행에 따라 컴퓨터를 대표적으로 일렉트로닉스 응용기는 각종 산업 현장에서 부터 가정까지 확대 침투되어 있다. 그러나 이러한 기기들 대부분 정전, 순시 전압 강하 등의 공급 전원이나 고조파, 노이즈 등의 전력품질을 저해하는 요소에 의해 민감하게 반응하며 이에 따른 이상이 있을 시에는 그 기능을 상실 하고 만다. 따라서 이러한 기기들의 신뢰성의 확보가 무엇보다 중요하기 때문에 여기에 공급되는 전원의 신뢰성 확보와 전력품질의 향상이 요구되고 있는 실정이다.

이 중 전원장애로 가장 큰 원인이 되는 것이 바로 voltage sag이다. voltage sag는 전력계통에서 낙뢰 등에 의해 고장이 발생한 경우 차단기로 그것을 전력계 통에서 제거하기까지의 사이 시간 내에, 고장점을 중심 으로 전압이 저하하는 현상을 말한다. 이 voltage sag 의 경우 전원장에 원인의 87%를 차지하고 있다.

그래서 voltage sag를 보상하기 위한 연구가 대두되고 있는데 전원 시스템에 따라 제어조건이 달라지게 된다. 평형 3상인 경우는 정상분과 역상분, 영상분이 평형을 이루므로 별도로 제어를 할 필요가 없다.

그러나 voltage sag가 발생하는 대개의 경우가 한 상 단락사고나 두상 지락사고일 경우가 많으며, 이때는 3상 이 평형이 깨져버리게 된다.

그러나 이 3상의 제어를 용이하게 하기 위한 dq 변환 시 불평형 3상으로 인한 정상분과 역상분의, 평형이 깨 어지게 되어 노이즈를 포함하게 된다. 이에 제어에 앞서 불평형 전원에서의 리플을 분리해내야만 한다.

본 논문은 불평형 시스템일 때 전원전압 리플의 검출 과 이에 대한 순간전압 보상에 대해 논의한다.

2. 본 론

2.1. 시스템 구동 원리

그림 1은 순간전압 강하 보상을 위한 고품질 정밀형 순 간전압 강하 보상 시스템의 회로도이다.

보상 시스템은 단상 인버터 3개로 구성되어 있으며 각 단상 바이폴라 PWM 스위칭을 한다. 보상원리는 전원 전압을 센싱하여 전압강하가 발생하면 부족전압 즉, 보 상전압을 직렬보상기를 통해 흘려주어 전원 전압을 보상 하게 된다.

2.2 불평형 전원의 dq 특성

송배전 사고에는 1상 지락, 2상 지락, 선간 단락, 3 상 지락 등이 있으나 1상이 지락되는 사고가 대부분이 다. 이러한 경우 크기와 위상이 변화는 불평형 전압이 부하에 인가된다. 불평형 전압은 대칭좌표변환에 의해 식 (2-1)과 같이 정상분, 역상분, 영상분으로 분리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} = V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_p) \\ \cos(\omega t + \theta_p - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \theta_p + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_n) \\ \cos(\omega t + \theta_n - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \theta_n + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + V_o \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_o) \\ \cos(\omega t + \theta_o) \\ \cos(\omega t + \theta_o) \end{bmatrix}$$

$V_p$ : 정상분,  $V_n$ : 역상분,  $V_o$ : 영상분 (2-1)

정상분, 역상분, 영상분을 얻는 좌표변환 행렬은 (2-2) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$
 (2-3)

위의 3상 변수를 서로 직교하는 2상 변수로 변환할 수 있는 dq 동기 좌표변환은 행렬 T를 이용한다.

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

이를 이용하면 3상의 변수는 식(2-4)와 같은 d,q성분으로 표현이 된다.

$$e_d = \frac{2}{3} (e_a - \frac{e_b}{2} - \frac{e_c}{2}) \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} (e_b - e_c) \sin \theta$$

$$e_q = \frac{2}{3} (e_a - \frac{e_b}{2} - \frac{e_c}{2}) \sin \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} (e_b - e_c) \cos \theta \quad (2-4)$$

식(2-4)를 식(2-1)에 대한 표현식으로 바꾸면 (2-5)와 같은 3상 불평형 전압의 dq전압을 볼 수 있다.

$$E_d = E_p \cos \phi_p + E_n \cos(2\omega t + \phi_n)$$

$$E_q = -E_p \sin \phi_p + E_n \sin(2\omega t + \phi_n) \quad (2-5)$$

식(2-5)에서 알 수 있듯이 불평형 전원에 대한 dq상에는 직류성분과 정적주파수의 2차 고조파 리플이 함유되어 있다.

### 2.3. 전압 보상분 검출 방법

2차 리플이 존재할 때, 부족전압을 보상한다 하더라도 인버터 출력단 전압 역시, 2차 리플이 그대로 존재하므로 제대로 된 보상이 불가능하게 된다. 그림 2, 3, 4는 120Hz의 리플이 존재할 때, d,q축 전압과 버터 출력전압을 나타낸 것이다.



그림 2 d축 리플전압      그림 3 q축 리플전압

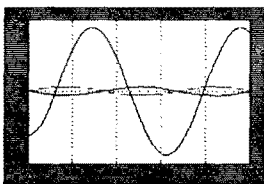


그림 4 인버터 출력전압

전압을 보상에 주기 위해서는 동기좌표 dq축 전압에서 나타나는 2차 리플성분을 제거해야 한다. 120Hz의 리플은 두 가지 필터를 통해 제거해 줄 수 있다.

#### 2.3.1 Delay equalizer를 이용한 전압 검출

delay equalizer를 이용한 120Hz 리플제거는 그림 5의 블록다이어그램을 통해 설명되고 있다..

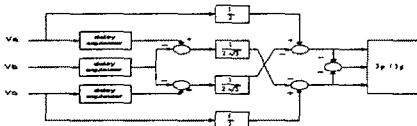


그림 5 delay equalizer block diagram

delay equalizer는 식(2-6)과 같이 나타내어진다.

$$N(s) = \frac{s^2 - a_1s + a_0}{s^2 - a_1s + a_0} \quad (2-6)$$

이 전달함수의 특성을 보드선도로 나타내보면 그림 5와 같이 크기는 0(dB)로 변화가 없고, 위상은 60Hz일 때, 90 shift됨을 알 수 있다.

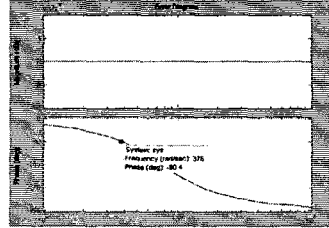


그림 6 전달함수의 보드선도

위의 그림에서 알 수 있듯이 delay equalizer를 이용하여 위상을 동기시켜 정상분과 역상분을 분리하여 각각 보상할 수 있다. 그림 7,8은 delay equalizer를 이용하여 불평형 3상에서 정상분과 역상분을 각각 걸러낸 것이다.

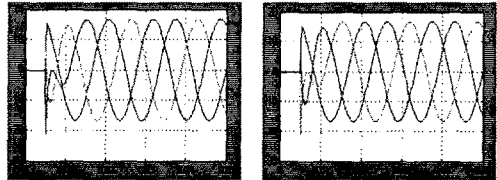


그림 7 전원전압 정상분      그림 8 전원전압 역상분

그림 9,10은 걸러진 정상분을 dq변환 시 동기좌표계에서 리플이 없는 일정한 직류로 나타내고 있다.

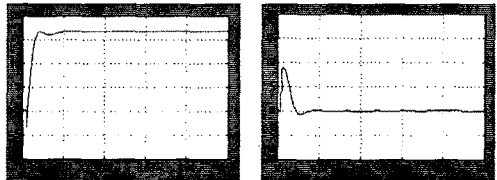


그림 9 정상분 q축      그림 10 정상분 d축

#### 2.3.2 notch filter를 이용한 전압 검출

리플을 제거하기 위한 또 하나의 방법으로 notch filter를 사용한다. 그림 7은 notch filter를 이용한 리플제거 블록 다이어그램이다.

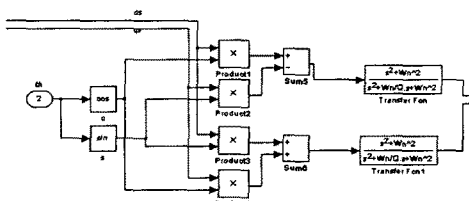


그림 11 notch filter block diagram

notch filter의 전달함수는 식(2-7)과 같이 표현되며,

그 특성은 그림 8의 보드선도를 통해 알 수 있다.

$$N(s) = \frac{s^2 + W_e^2}{s^2 + W_e/Qs + W_e^2} \quad (2-7)$$

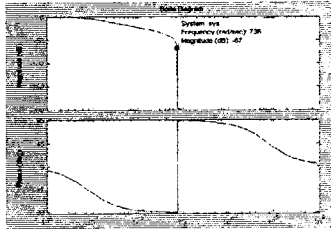


그림 12 전달함수의 보드선도

그림에서 보듯이 notch filter는 120Hz의 주파수 성분만을 걸러주고 있다. 그러므로 dq변환된 전압은 리플성분이 남아있지 않게 된다.

그림 13, 14는 동기좌표에서의 dq변환 후 notch filter를 적용하지 않은 d축 전압과 notch filter 적용한 d축 전압을 나타낸 것이다.

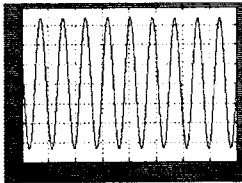


그림 13 d축 전압

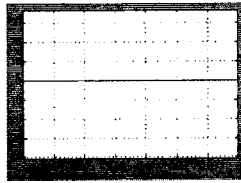


그림 14 필터링 후 전압

그림 13은 120Hz의 고조파 리플을 함유하고 있음을 볼 수 있다. notch filter를 적용한 그림 14는 리플성분이 모두 제거되어 0임을 보여주고 있다.

### 2.3.2 시뮬레이션 및 결과

불평형 전원에서 dq변환을 이용한 pi 이중제어를 하기 위해 delay equalizer를 이용한 시스템 시뮬레이션을 구현하여 보았다. 시뮬레이션 tool로는 matlab의 simulink를 이용하여 시스템을 설계하고 계산된 제어게인을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 14는 simulink를 이용하여 PI제어를 적용한 시스템 모델이다.

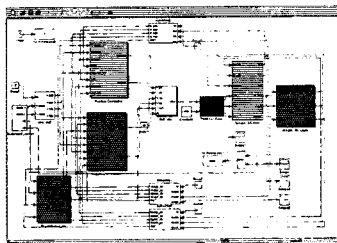


그림 14. PI 동기좌표 시뮬레이션

시뮬레이션에서 볼 수 있듯이 불평형 전원을 정상분, 역상분, 영상분으로 각각 분리하여 정상분의 d, q 성분과 역상분의 d, q 성분을 제어하고 영상분 제어가까지 구현하여 5변수 제어를 하였다. 또 실제 실험에 가까운 구현을 위해 디지털 제어를 설계하여 시뮬레이션 하였다.

그림 15는 pi 시뮬레이션의 결과이다.

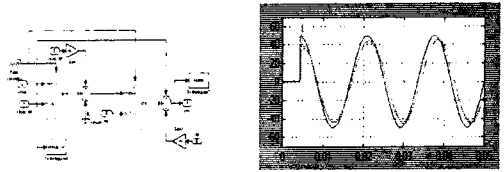


그림 16 입력전압과 출력전압 비교

스위칭 주파수를 10Khz로 하고, L,C 필터의 값은 각각 0.6mH, 40uF로 설정하여 전원단에서 4.3ms일 때 a상에서 sag가 발생하도록 하여 보상해준 결과이다. 지령치 50V전압의 1.2배 정도의 오버슈트가 있는 것을 있었고, 대략 4.5ms 안에 정상치를 찾는 것을 볼 수 있었다. 그림 16에서는 동기 좌표계에서의 구현이므로 동기좌표의 단점인 약간의 위상지연이 존재하는 것이 나타나고 있다.

### 3. 결 론

sag의 발생으로 인한 불평형 전원시 정상분과 역상분의 불평형으로 인한 전원전압의 리플을 제거하기 위한 방법으로 delay equalizer와 notch filter를 구현하여 리플이 제거됨을 보였다. notch filter의 경우 매 dq변환 시마다 전원단의 리플을 제거하기 위해 사용되는 번거롭다는 단점이 있기 때문에 큰 효율성을 갖지 못하고, delay equalizer를 이용하여 불평형 전원을 정상, 역상, 영상으로 분리하여 제어하였다. 그 결과 원하는 지령치에 대한 출력값을 얻을 수 있었다. 향후 과제로는 제어 게인값을 튜닝함으로써 동기좌표의 장점인 동특성 확보에 연구해야 할 것이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Seung-yo Lee, Seok-woo Han, Hyung-soo Mok, Gyu-Ha Choe, "A Novel Active Series Voltage Compensator with Harmonic Current Compensating Capability" IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive System, PEDS'99, July 1999, pp.1054-1059
- [2] M. McGranaghan, D.Mueller, and M. Samotyj, "Voltage Sags in Industrial System." IEEE/IASI & CP-S Annual Meeting, 1991.91CH2990-0, pp.18-24
- [3] Md. Abdul Matin, Dariush Divsalar, "Digital State Feedback Control of a 3 phase sinusoidal PWM Inverter." in conf. Rec. IEEE Decision and Control, pp.615-616, 1994
- [4] A. Kara, P.Daehler, D.Amhof, H.Gruening, "PowerSupply Quality Improvement with a Dynamic voltage Restorer", in Conf. Rec. PESC, pp.248-254,1998
- [5] B.J. Kim, J.H. Choi, J.S.Kim, and C.H. Choi "Digital control Scheme of UPS Inverter to Improve the Dynamic Response." in Conf. Rec. KIEE ICPE'95, pp. 184-189, 1995.
- [6] A. Campos, G. Joos, P. Zogas, J. Lindsay, "Analysis and Design of a Series Voltage Compensator for 3-phase unbalanced sources", IEEE Trans. on Ind. Electron., Vol.39, No.2, pp.159-167, 1992

본 연구는 한국과학재단  
목적기초연구지원으로 수행되었음.  
과제번호: R01-2000-000267-0