2002년도 대한전자공학회/대한전기학회 시스템 및 제어분야 합동 추계학술대회 논문집(2002.11.30)

dq 좌표변환을 이용한 전력외란 보상 연구

이 교 성*, 이 용 재, 김 도 훈, 김 양 모
충남대학교 전기공학과

A Study of Power Quality Disturbance Compensation using dq Transformation

Kyo-Sung Lee, Yong-Jae Lee, Do-Hun Kim, Yang-Mo Kim
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University
E-mail : sacsac75@hanmail.net

Abstract

In this paper, we use the PI dual control using dq transformation(dq stationary frame and dq synchronous rotating frame) for series voltage sag and swell compensation algorithm. Analysis, simulation results are presented for voltage sags and swells on a three-phase unbalanced voltage source.

I. 서 론

최근 전력품질에 대한 관심이 높아지고 있는데, 이는 가정 및 산업체 전반에 걸쳐 사용이 급증하고 있는 컴퓨터, 통신기기 등 전기적으로 민감한 전자부품 또는 전력전자 장비 사용의 증가하고 있기 때문이다. 특히 전력산업의 민영화로 수용가 측에서 더 좋은 전력을 선택할 수 있는 길이 열림으로써 더 좋은 전력품질에 대한 수요와 관심이 증가하고 있다.

전력품질을 저하시키는 외란의 종류에는 순간전압강하(Voltage sag), 순간전압상승(Voltage swell), 순간정전, 고조파 등 여러 가지가 있다. 이 중에서 순간전압강하는 그 발생빈도가 가장 높을 뿐만 아니라 미치는 영향 또한 가장 크다.

본 논문에서는 순간전압강하 및 순간전압상승의 보상을 위해 dq 좌표변환을 이용한 PI 이중제어기법을 사용하였다. dq 좌표는 변환과정에서 정지좌표계와 동기 좌표계로 표현이 가능하다. 따라서 정지좌표계에서의 보상과 동기좌표계에서의 보상을 구현하여 그 성능을 비교하였다.

II. 순간전압강하 / 순간전압상승

2.1 순간전압강하(Voltage Sag)

순간전압강하는 송배전 계통상에서 지락사고나 대용량 부하의 기동으로 인해 발생하는 현상으로 IEEE Std. 1159-1195는 0.5주기에서 1분동안 전력계통에서 전압이 rms 값으로 0.1pu ~ 0.9pu 이내로 감소하는 현상이라고 정의하고 있다.

표 1. 순간전압강하의 종류

구 분	지속시간	전압 크기
Instantaneous	0.5~30 cycles	0.1~0.9 pu
Momentary	30 cycles~3s	0.1~0.9 pu
Temporary	3s~1min	0.1~0.9 pu

순간전압강하는 여러 전력외란 중에서 그 발생빈도가 가장 높고 산업전반에 걸쳐 막대한 경제적 손실을 야기하고 있다. 주로 지락사고나 대용량 부하의 기동에 의해 발생하는 순간전압강하에 대한 방안은 크게 두 가지 측면에서 고려할 수 있다. 첫 번째 송배전 계통로의 경우 사고의 발생 빈도를 줄이고, 사고 발생시

이를 빠른 시간 내에 처리하기 위하여 퓨리기나 절연체의 성능을 향상시키고 설치를 늘리며 지상선로를 지하선로로 바꿔 사고를 방지할 수 있으며 고성능 차단기를 설치하여 피해를 줄일 수 있다. 그러나 이는 경제적 부담이 커서 수용가 측에서의 보상 방안에 대한 관심이 증대되고 있다. 대표적인 방안으로 UPS(Uninterruptable Power Supply)를 사용하고 있으나 이는 고가이고 베터리의 유지, 보수가 필요하고 전원의 전체용량을 보상하는 방법을 사용하고 있으므로 용량이 커진다. 따라서 최근에는 불평형 전원의 전압을 보상하기 위해 직렬변압기를 이용하여 부족분이나 초과분 전압을 보상하는 DVR(Dynamic Voltage Restorer)에 대한 연구 및 관심이 증대하고 있다.

2.2 순간전압상승(Voltage Swell)

순간전압상승은 전압이 rms 값으로 1.1pu ~ 1.8pu로 증가하는 현상으로 3상 전원에서 한 상이 지락되는 경우 사고가 발생하지 않은 상에서 자주 나타나며 갑작스런 부하의 감소, 느슨한 접속상태로 인한 아크발생 등이 주된 원인이다. 표 2에 IEEE Std. 1159-1195에 정의된 순간전압상승을 나타내었다.

표 2. 순간전압상승의 종류

구 분	지속시간	전압 크기
Instantaneous	0.5~30 cycles	1.1~1.8 pu
Momentary	30cycles~3s	1.1~1.4 pu
Temporary	3s~1min	1.1~1.2 pu

순간전압상승은 전기설비, 전자소자에 큰 자극으로 작용하여 장비의 노쇠화로 인해 수명을 단축시키고, 장비의 오손이나 오동작, 시스템의 재시동 등을 발생시킨다.

III. 시스템 구성

3.1 dq 좌표변환

순간전압강하나 순간전압상승이 발생하는 경우 크기와 위상이 변화로 인하여 불평형 전압이 부하에 인가된다.

$$\begin{bmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = V_p \begin{bmatrix} \cos(wt+\alpha_p) \\ \cos(wt+\alpha_p-\frac{2}{3}\pi) \\ \cos(wt+\alpha_p+\frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} + V_n \begin{bmatrix} \cos(wt+\alpha_n) \\ \cos(wt+\alpha_n+\frac{2}{3}\pi) \\ \cos(wt+\alpha_n-\frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} + V_0 \begin{bmatrix} \cos(wt+\alpha_0) \\ \cos(wt+\alpha_0) \\ \cos(wt+\alpha_0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

V_p : 정상분, V_n : 역상분, V_0 : 영상분

식 (1)의 불평형 전압은 식 (2)에 의해서 정상분, 역상분, 영상분으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix}, \quad a = e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad (2)$$

위의 3상 변수를 서로 직교하는 2상 변수로 나타내기 위해서 dq 좌표변환(식 3)을 이용한다.

$$\begin{bmatrix} v_d^e \\ v_q^e \\ v_0^e \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

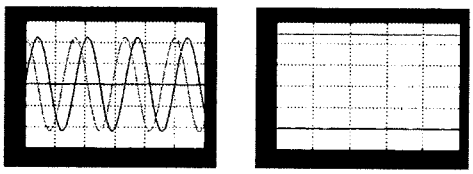
dq 좌표계는 정지좌표계와 동기좌표계로 표현이 가능하며 정지좌표계에서 임의의 위상각(θ)에 동기된 2상으로 변환하면 동기좌표계로 표현할 수 있다. θ=0인 경우, 정지좌표계로 표현할 수 있으며 dq축 상의 변수는 (4)와 같다.

$$V_d^e = \frac{2}{3}(V_a - \frac{1}{2}V_b - \frac{1}{2}V_c)$$
$$V_q^e = -\frac{1}{\sqrt{3}}(V_b - V_c) \quad (4)$$

정지좌표계의 dq성분을 전원전압과 같은 각속도 $w(\theta = wt)$로 회전하는 동기좌표계로 변환하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d^e = \frac{2}{3}(V_a - \frac{1}{2}V_b - \frac{1}{2}V_c)\cos\theta + \frac{1}{\sqrt{3}}(V_b - V_c)\sin\theta$$
$$V_q^e = \frac{2}{3}(V_a - \frac{1}{2}V_b - \frac{1}{2}V_c)\sin\theta - \frac{1}{\sqrt{3}}(V_b - V_c)\cos\theta \quad (5)$$

외란이 발생하지 않은 경우 정지좌표계로 표현하면 각속도가 0이므로 변환하기 이전과 마찬가지로 dq축 성분은 사인파의 형태를 가진다. 반면 동기좌표계로 표현하면 변환하기 이전의 상과 같은 각속도로 동기시키므로 dq축 성분은 직류값을 나타낸다.



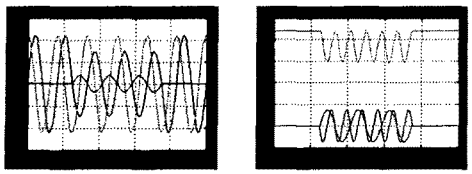
(a) 정지좌표계 (b) 동기좌표계

그림 1. 정지 및 동기좌표계로 표현한 3상 평형전원

식 (5)를 정상분과 역상분, 영상분으로 표현하면

$$V_d^e = V_p\cos\alpha_p + V_n\cos(2wt+\alpha_n)$$
$$V_e^e = -V_p\sin\alpha_p + V_n\sin(2wt+\alpha_n) \quad (6)$$

이며, 불평형 전원의 정상분은 직류 성분으로, 역상분은 정격주파수의 2고조파로 나타난다.



(a) 정지좌표계 (b) 동기좌표계

그림 2. 정지 및 동기좌표계로 표현한 불평형 전원 (한 상 50% 순간전압강하시)

그림 2는 한 상에서 50% 순간전압강하가 발생하였을 경우를 정지 및 동기좌표계로 나타낸 것으로 동기좌표계로 표현하는 경우 2고조파가 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2 시스템 구성

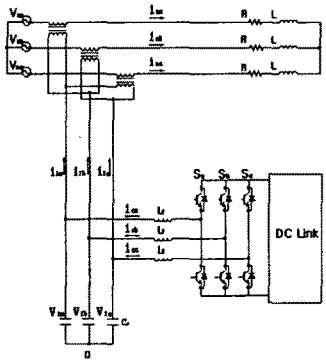


그림 3. 전체 시스템 구성도

그림 3은 보상기의 전체 구성도이다. 평상시에는 상용 전원이 부하에 전력을 공급하며 순간전압강하나 순간 전압 상승이 발생하는 경우 부하측 전압을 조정하기 위해서 인버터가 LC 필터를 거쳐서 직렬변압기를 통해 입력전원과 직렬로 가산되도록 하여 부하에 일정한 전압이 인가되도록 한다.

3.3 제어 기법

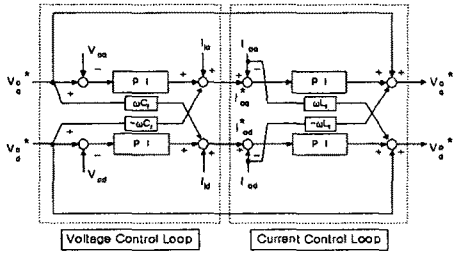


그림 4. PI 이중제어 Block Diagram

보상기의 제어를 위해서 쉽게 구현이 가능한 PI 제어를 사용하였으며 이상적인 정현파 출력 전압파형을 얻기 위해서 LC 필터의 커패시터 양단의 전압에 대한 전압제어루프와 인덕터에 흐르는 전류에 대한 전류제어루프를 가지는 PI 이중 제어기를 구현하였다.

Ⅳ. Simulation

사고 전압을 보상하기 위한 제어기를 설계하고 정지좌표계와 동기좌표계 내에서 구현하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며 Matlab Simulink를 사용하였다.

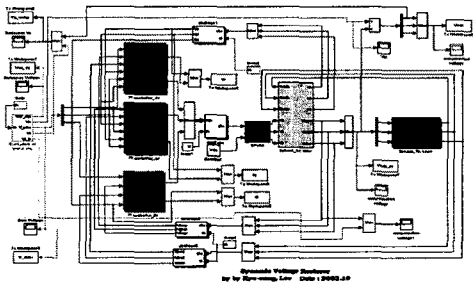


그림 5. Matlab Simulink Simulation

그림 5는 Simulink로 구성한 보상 시스템이다. 구현된 시스템의 인버터의 스위칭을 위해서 SPWM 방식을 이용하여 5kHz 스위칭 함수를 발생하도록 하였다.

4.1 순간전압강하 보상

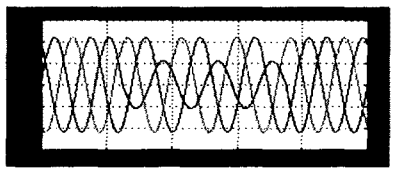
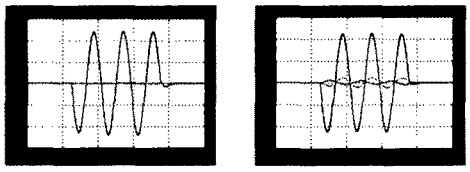


그림 6. Single phase Sag (0.5pu)

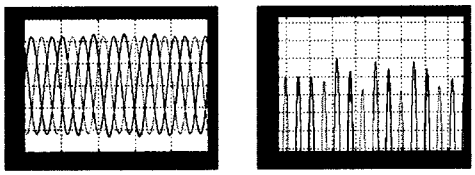
그림 6은 하나의 상에서 50ms동안 순간전압강하가 발생한 경우의 불평형 전압을 나타낸다. 이에 대한 보상을 정지 및 동기좌표계로 구현하였다. 이 때 불평형 전압을 dq 좌표변환하여 나타낸 것은 그림 2와 같다.



(a) 보상전압(정지좌표계) (b) 보상전압(동기좌표계)

그림 7. 직렬변압기를 통해 주입되는 순간전압강하 보상전압

그림 7은 보상기의 제어를 통해서 직렬변압기를 통해 입력전원에 인가되는 전압이다. 동기좌표계의 경우 dq 변환시의 2고조파의 영향으로 보상전압 이외의 성분이 나타난다.



(a) 정지좌표계 (b) 동기좌표계

그림 8. 보상된 전압(순간전압강하)

그림 8은 보상된 전압파형을 나타낸다. 동기좌표계의 경우 보상전압 이외의 성분으로 인하여 완벽한 보상이 이루어지지 않는다.

4.2 순간전압상승 보상

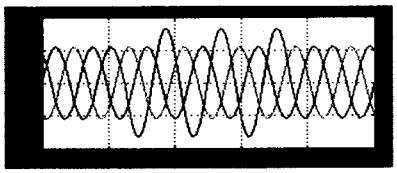
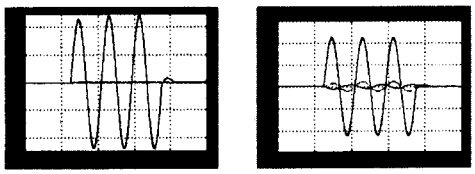


그림 9. Single phase swell (1.5pu)

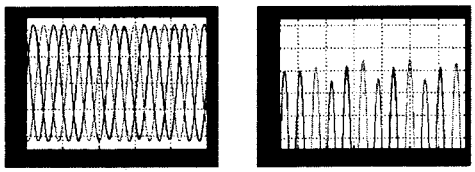
한 상에서 1.5pu의 순간전압상승이 발생하였을 경우에도 보상을 구현하였다.



(a)보상전압(정지좌표계) (b)보상전압(동기좌표계)

그림 10. 직렬변압기를 통해 주입되는 순간전압상승 보상전압

그림 10은 순간전압상승에 대한 보상전압으로 그림 7과는 반대되는 값을 가져서 상승분을 보상한다.



(a) 정지좌표계 (b) 동기좌표계

그림 11. 보상된 전압(순간전압상승)

순간전압상승의 경우에도 정지좌표계로의 보상이 완벽하게 이루어지지 않았다. 그러나 3상 모두 순간전압강하 혹은 순간전압상승이 발생한 경우, 동기좌표계에서 dq 성분에 2고조파가 발생하지 않으므로 정확한 보상이 가능하다.

V. 결 론

본 논문에서는 불평형 전원 전압의 보상을 위해서 dq 좌표변환을 이용한 PI 이중제어기법을 사용하여 시스템을 구성하고 그 타당성을 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다.

시뮬레이션은 정지좌표계와 동기좌표계에서 순간전압강하와 순간전압상승에 대한 보상을 구현하였다. 정지좌표계의 경우 보상이 이루어졌으나 동기좌표계로 보상시에는 보상이 완벽하게 이루어지지 않았다.

전원이 평형을 이루고 있는 경우에는 dq좌표변환을 통하여 2변수 제어가 가능하므로 효율적이나 불평형 전원의 경우 영상분의 제어가 필요하므로 dq 좌표변환을 통한 2변수 제어가 의미를 갖지 못한다. 특히 동기좌표계로 구현하는 경우 완벽한 보상을 구현하기 위해서는 2고조파를 제거하기 위한 시스템의 추가가 필요하므로 효율성이 크게 떨어졌다.

향후 제안된 기법을 실험을 통해 확인하고 더 효율적인 제어 알고리즘을 개발하여 적용하고자 한다.

Reference

[1] M.F.McGranaghan, D.R.Mueller, M.J.Samotyj, "Voltage Sags in Industrial Systems", IEEE Trans. Industry Applications, Vol.29, No.2, pp397-403, 1993

[2] Lee,S-Y, Chae,J-S, Cho, G-H, Choe, H-S, Mok,H-S, Jang, D-H, "A new control strategy for instantaneous voltage compensator using 3-phase PWM inverter", PESC 98, 29th Annual IEEE, Vol. 1, pp248-254, 1998

[3] Haddad.K, Joos.G, Chen.S, "Control Algorithms for Series Static Voltage Regulators in Faulted Distribution Systems", Power Electronics Specialists Conference, PESC 99, 30th Annual IEEE, Vol.1, pp418-423, 1999

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