

3상 불평형 시스템에서 순간전압 강하 보상기의 PID제어

최현영, 박정균, 오세호, 이용재, 김양모
 충남대학교 전기공학과

PID control of the voltage sag compensator in three-phase unbalanced system

Choi Hyen-Young, Park Jung-Gyun, OH Se-Ho, Yong-Gea Lee, Kim Yang-Mo
 Dept. of Electrical Engineering Chungnam National University

Abstract - High electronic equipments for dem-and improvement and efficiency are requested power quality of superior quality. the compensation system of power quality is processing actively. when voltage sag occurs. we propose to a series voltage compensator and control algorithm using of pid control in unbalanced 3-phase power system.

상하여 부족전압을 보상기를 통해 전원에 공급해주는 동작원리로 구현이 된다. 그림 1은 순간전압 강하 보상기의 구성도이다.

1. 서 론

최근 산업이 급속히 발달함에 따라 많이 보급되어 있는 컴퓨터와 자동화설비는 모두 배전 계통에서 발생하는 과도전압, 순간전압강하, 고조파 등의 전력품질을 저하시키는 교란에 대단히 민감하다. 따라서 이들 교란을 적절히 제거하지 않으면 컴퓨터와 자동화 설비는 고장이나 오동작을 유발하여 막대한 손실을 초래한다. 이와 같은 산업용 뿐 아니라 의료용, 가정용에 이르기까지 모든 장비의 성능 향상과 효율 증대를 위한 고도의 전기 장비는 양질의 전력품질이 요구된다.

특히 전원장애의 가장 큰 원인은 낙뢰나 지락사고 등에 의해 부하에 사고를 일으켜 순간적으로 전원이 감소되는 순간전압 강하로 전체 전원사고 중 87%를 차지하고 있다. 그래서 순간전압 강하에 대해 신속하게 보상해 줌으로써 부하에 전원에 대한 어떤 영향도 미치지 않게 시스템 구현을 할 필요성이 있다.

순간전압 보상 시스템은 전원의 저전압을 검출하여 보상기를 통해 부족분 만큼을 보상해 주는 원리로 구성되어 있다.

보상시스템을 위한 제어 알고리즘에는 일반적으로 복잡하지 않으면서 쉽게 구현이 가능한 장점으로 산업현장에서 주로 쓰이는 PI제어를 주로 사용하여, 외부루프에서 전류를 보상해주고, 다시 내부루프에서 전압을 보상해주는 이중제어를 사용하고 있다.

그러나 PI 이중제어에는 불평형 시스템에서 정상분과 역상분의 분리과 이를 dq변환하여 제어하는데 복잡성을 띄며, 순간전압 보상의 중점인 속도에 영향을 미치게 한다.

이에 본 논문은 PI제어를 한층 보강한 PID제어를 시스템 보상에 구현함으로써 보상속도와 시스템 보상의 영향에 대해 논의해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 보상 시스템의 구성도

순간전압 보상기는 배전계통에 직렬로 연결되어 낙뢰나 지락사고 등에 의해 전원이 순간적으로 감소된 것을 센

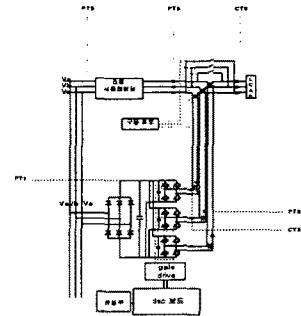


그림 1 순간전압 강하 보상기

그림에서 보는 바와 같이 부족전압은 인버터에 의해 생성되며 LC필터를 거쳐 직렬변압기로 보상된다.

2.2. 시스템 모델링

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

$$\begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} = V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_p) \\ \cos(\omega t + \theta_p - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \theta_p + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_n) \\ \cos(\omega t + \theta_n - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \theta_n + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + V_o \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_o) \\ \cos(\omega t + \theta_o) \\ \cos(\omega t + \theta_o) \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

V_p : 정상분, V_n : 역상분, V_o : 영상분

불평형 전압은 정상분, 역상분, 영상분을 얻는 좌표변환 행렬로 (2-2)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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.

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

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

동기좌표 상에서 인버터 출력전류 성분은 식(2-5), (2-6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{od}^e = I_{Ld}^e + C_f \frac{dv_{od}^e}{dt} + \omega C V_{ca}^e \quad (2-5)$$

$$i_{oq}^e = I_{Lq}^e + C_f \frac{dv_{oq}^e}{dt} - \omega C V_{cd}^e \quad (2-6)$$

인버터 출력전압에 대한 표현식은 식(2-7), (2-8)로 나타내어 질 수 있다.

$$v_{od}^e = v_{cd}^e + L_f \frac{di_{od}^e}{dt} + \omega L i_{oq}^e \quad (2-7)$$

$$v_{oq}^e = v_{ca}^e + L_f \frac{di_{oq}^e}{dt} - \omega L i_{od}^e \quad (2-8)$$

직류링크에 걸리는 캐패시터의 직류전압 모델링은 식(2-9)과 같이 나타내어진다.

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_d i_{od}^e + S_q i_{oq}^e \quad (2-9)$$

2.3. PI 이중제어의 특성

기존에 산업현장에서는 구현이 간단하고, 정교한 시스템을 요구하지 않을 경우 PI제어를 많이 사용한다. 순간전압을 보상하기 위한 시스템에도 대개 가장 쉽게 구현이 가능하기 때문에 PI제어를 사용한다. 그러나 PI제어를 이용하여 전압제어만을 하기에는 무리가 있으므로 이상적인 정현파 출력 전압파형을 구현하기 위하여 출력측 캐패시터 양단의 전압에 대한 외부전압 제어루프와 인덕터에 흐르는 전류에 대한 내부전류 제어루프의 이중 제어 구조를 가진 제어기를 사용하고 있다. 그림2는 PI 이중제어의 블록 다이어그램이다.

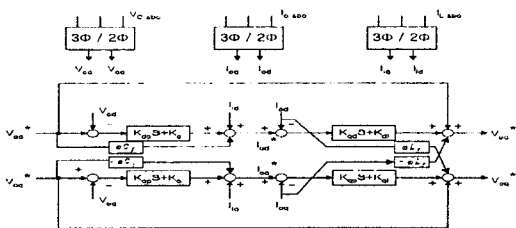


그림 2 제안된 제어기 Block Diagram

그러나 PI 이중제어는 불평형 전원시 정상분, 역상분의 평형이 깨져 dq변환시 보이게 되는 리플로 인해 제어 전에 120Hz의 리플제거 필터를 필요로 하게 된다. 순간전압이 발생하는 것은 대개 한 상 내지, 두상의 저전압이므로 거의 전원의 평형이 깨지게 된다. 이때마다 120Hz의 리플제거로 인한 시간지연은 민감하게 반응하는 장비에 대한 신속한 보상에 큰 저해 요인이 된다. 또 PI제어가 구현이 비교적 간단한 장점과 같은 반면, 정교한 제어가 어려우므로 응답의 정상상태 역시 좋은 결

과를 얻을 수 없다.

2.4. PID제어의 제한

제한된 PID제어는 PI제어로 인한 과도응답능의 영향을 앞의 오차를 예측하여 현재의 출력을 미리 조정하는 미분제어의 성분을 첨가시킴으로써, 과도상태의 개선을 보이고 시스템의 안정도를 개선할 수 있다. 이는 오차에 비례하는 크기의 구동력을 행사함으로써 정밀한 제어를 가능케 하는 비례제어와, 누적된 과거의 오차를 반영함으로써 정상상태 오차를 줄이는 효과를 갖는 적분제어의 장점과 PI제어가 갖는 단점을 보완함으로써 PI 이중제어보다 더 쉽게 구현이 가능하다. 보상시스템에 적용된 PID제어는 불평형 전원에서 번거로운 dq변환 없이 3상에 대한 직접적인 전압 제어방식으로 사용된다. 시스템에 적용된 PID제어의 구현은 컨트roller를 통한 이산시스템에서의 제어이므로 기존의 s-domain에서의 제어함수를 z변환을 하여 z-domain 내에서 적용하였다.

$$G(s) = K_d S + K_p + \frac{K_i}{S} \quad (2-10)$$

식(2-10)에서 forward 방식을 적용하여 $S \Rightarrow \frac{z-1}{T}$ 를 대입하면, 도출된 제어기의 전달함수는 식(2-11)와 같다.

$$G(z) = \frac{K_d z^2 + (K_p T - 2K_d)z + (K_i T^2 - K_p T + 1)}{zT - T} \quad (2-11)$$

시스템에 적용하기 위한 plant 전달함수는 캐패시터에 걸리는 전압 성분이므로, 식(2-12)로 나타내질 수 있다.

$$V_c(s) = \frac{\frac{1}{C_f}}{(L_f s + R_f) + \frac{1}{C_f}} V_s(s) \quad (2-12)$$

역시 z 변환을 통하여 식(2-13)으로 구현이 된다.

$$N(z) = \frac{T}{L_f C_f (z-1)^2 / T + R_f C_f (z-1) + T} \quad (2-13)$$

도출된 두 전달함수에 pole-zero cancelation 기법을 이용하여 식(2-14)와 같은 결과를 얻어야 한다.

$$Y(z) = N(z)G(z) = \frac{TW_c}{(z-1)} \quad (2-14)$$

Kp, Kd, Ki 각각의 제어 계인을 구할 수 있다.

본 논문에서는 z변환 시 s에 forward 방식을 적용했지만, backward 방식 역시 적용해 본 결과 같은 전달 함수 계인을 얻을 수 있었다.

전원전압에 노이즈가 존재하는 경우에는 제어각이 급변하게 되어 시스템이 불안정하게 되므로 위상각의 검출은 PI제어를 통한 PLL 시스템을 도입하여 계산해 내었다. 그림 3은 PLL 시스템의 블록선도를 나타낸 것이다.

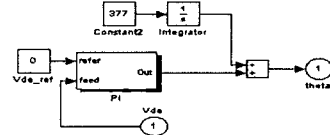


그림 3 PLL 시스템 block diagram

2.4. PID제어를 적용하기 위한 알고리즘

실험을 위한 하드웨어는 크게 제어부, 인버터부, LC필터부, 직렬변압기로 구성이 되었다. 제어부는 TI사의 TMS320C31 마이크로프로세서와 address decoder부 분과 PWM 출력을 위한 논리 회로로 Altra사의 max7000과 FLEX10K를 사용하여 main 컨트롤러와 센싱 검출을 위한 센싱 보드로 구성된다. 인버터 부는 3개의 단상 바이폴라 스위칭 기법으로 구현을 위해 2개의 arm으로 구성된 3개의 인버터로 10KHz의 스위칭을 하도록 하였다. LC필터는 1KHz 이내의 차단주파수를 갖도록 설계되었고, 직렬변압기에는 3개의 탭을 내어 직렬변압기 터비의 영향에 대한 실험을 가능하도록 하였으며, 순간전압 강하 보상기의 사고 시 이를 차단해 주고 전원 전압으로 동작하기 위한 bypass switch를 달아주었다. 전체 제어를 위한 알고리즘은 그림 4와 같다.

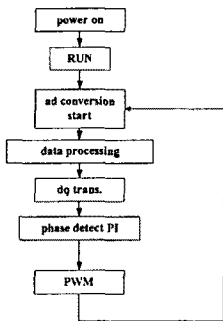


그림 4. 전체 알고리즘

그림 4는 main 프로그램에 사용되는 알고리즘을 간단하게 flowchart로 보인 것이다.

2.4. 시뮬레이션 및 결과

시스템의 제어성능을 보기 위해 matlab의 simulink를 이용하여 시스템을 설계하고 계산된 제어 개인을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 5는 simulink를 이용하여 PID제어를 적용한 시스템 모델이다.

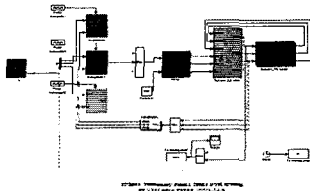


그림 5. PID 제어를 이용한 전압 보상 시스템

PI제어 역시 모델링된 시스템에 적용한 결과 그림 6과 같은 파형을 얻을 수 있었다.

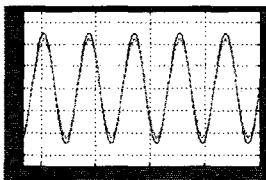


그림 6 PI 제어 출력력 비교

전원 1선 지락사고를 적용하여 4.3e-3(s)에서 voltagesag를 일으켰을 때 7.7e-3(s)에서 정상상태가

됨을 알 수 있었고, 과도 응답의 오버슈트가 2배정도 튀는 것을 알 수 있었다. 또 정상상태 오차가 3%정도임을 알 수 있다. 그림 7은 PID 제어를 시뮬레이션한 결과이다.

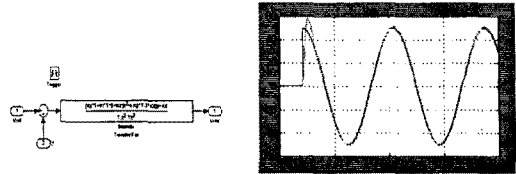


그림 7. PID 제어 출력력 비교

PID제어 4.3e-3(s)에서 사고를 일으켰을 때 6.0e-3(s)에서 정상상태가 됨을 알 수 있었고, 오버슈트도 1.2배로 PI제어를 적용한 결과보다 훨씬 줄어들었음을 알 수 있었다.

3. 결 론

순간전압 강하의 보상시스템 구현에 있어서 기존의 사용방식이던 pi제어는 전류와 전압을 함께 보상하는 이중제어 구조를 가질 뿐 아니라 불평형 전원시 동기좌표의 경우 정상분과 역상분을 분리하여 제어해야 하는 번거로움이 있고, 정지좌표의 경우 역시 영상분까지 보상해야 하므로 dq좌표의 2변수 제어에 큰 의미를 갖지 못한다. 그러나 pid제어를 3상에 적용한 결과 pi제어보다 좀 더 효율성을 갖는 결과 값을 얻을 수 있었다. 그 결과 순간전압강하 시스템의 관건인 신속한 보상 조건에 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] M. McGranaghan, D.Mueller, and M. Samotyj, "Voltage Sags in Industrial System." IEEE/IASI & CPS Annual Meeting, 1991,91CH2990-0, pp.18-24
- [2] 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
- [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.

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