

Voltage Sag 보상을 위한 Anti-Wind up을 이용한 PI제어 알고리즘

이교성*, 최현영, 이용재, 김양모
 충남대학교 전기공학과

Anti-Windup PI Control Algorithm for Voltage Sag Compensation

Lee Kyo-Sung, Choi Hyun-Young, Lee Yong-Jae, Kim Yang-Mo
 Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - Of all known power quality problems, voltage sags provide the largest reason for concern. Sags occurs more frequently than outages and therefore tend to be more costly for industry as modern technical equipment becomes all the more sensitive to the quality and reliability of supply.

Therefore we designed for a new model for Voltage Sag compensator, and we will implement Anti-Windup PI Controller with IP Block.

1. 서 론

첨단기술의 발달 특히 반도체 분야의 고속 성장은 각종 컴퓨터 및 자동화 설비의 발전을 가져왔으나 배전계통에서 발생하는 과도전압, 순간전압강하, 고조파 등에 더욱 민감하게 반응하고 있다. 이들은 산업 전반에 걸쳐 발생하는 각종 전력품질 문제의 주된 원인으로 적절한 조치를 취하지 않으면 장비의 오동작 및 고장을 유발하여 막대한 손실을 가져온다. 산업용뿐만 아니라 가정용, 의료용에 이르기까지 현대 산업기술에 사용되는 고도의 전기장비는 성능 향상 및 효율증대를 위해서 양질의 전력품질이 요구된다.

특히 순간전압강하는 그 발생빈도가 가장 높으며 장비에 미치는 영향도 가장 크다. 따라서 그 대응책으로 고품질 정밀형 voltage Sag 보상기에 대한 연구 및 개발이 필요하다. Voltage Sag 보상기의 핵심은 빠른 시간 내의 보상과 안정된 정상상태를 구현하는 것이고, 또한 컨트롤러 운용을 위한 제어라 할 수 있다.

보상기의 출력측에는 출력 전압파형의 고조파 성분을 제거하기 위하여 LC필터 구조를 가진다. 이에 따라 비선형 부하가 연결되었거나 부하가 급변하는 상황에서 출력파형이 합물되는 문제가 있다. 따라서 부하가 급변하는 과도상태에서 빠른 응답특성을 가지는 제어기법이 필요하다.

본 논문에서는 이상적인 정현파 출력 전압파형을 구현하기 위하여 출력측 커패시터 양단의 전압에 대한 외부 전압 제어루프와 인덕터에 흐르는 전류에 대한 내부전류 제어루프의 이중제어 구조를 가진 제어기를 제안하고, 제어방식으로 가장 많이 사용되는 PI제어를 사용하였으며 PI를 보완하기 위하여 IP제어를 병행하여 사용하였다.

제어기의 출력이 제한되는 경우 적분기의 오차누적에 의해 발생하게 되는 Windup 현상을 보완하기 위한 Anti-Windup 기법을 적용하였고 시뮬레이션을 통하여 제안된 제어기의 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 PI제어와 IP제어의 특성

PI 제어기는 적분제어의 정상상태오차 감소기능과 비례제어의 과도응답 성능개선 기능의 장점을 지닌다. 그러나 PI제어는 비례 제어의 특성으로 인해 보다 큰 오버슈트를 가지게 된다. 반면 IP제어는 PI제어와 상반되는

특성을 지닌다. 그림1은 plant에 대한 PI제어의 블록 다이어그램이다.

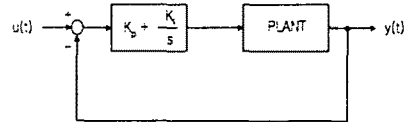


그림 1 PI Block Diagram

plant를 시스템에 간단히 적용하여 각각을 C, L성분으로 가정하고, 입력 U(s)에 대한 출력 C(s)의 전달함수를 도출하면 다음과 같다.

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{K_p s + K_I}{C \cdot s^2 + K_p s + K_I} \quad (1)$$

$$\frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{K_p s + K_I}{L s^2 + K_p s + K_I} \quad (2)$$

위의 (1)과 (2)식은 시스템의 PI 이중제어를 적용하여 두 개의 전달함수를 도출한 것이다.

이에 반해 IP는 비례제어에 대한 피드백으로 나타내어진다. 다음은 IP제어의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다.

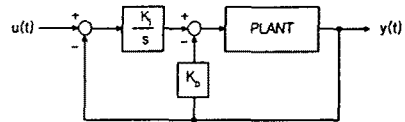


그림 2 IP Block Diagram

역시 IP제어기의 전달함수는

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{K_I}{C s^2 + K_p s + K_I} \quad (3)$$

$$\frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{K_I}{L s^2 + K_p s + K_I} \quad (4)$$

로 나타내어 질 수 있다. 아래 그림은 위의 전달함수를 바탕으로 PI와 IP의 특성을 나타낸 파형이다.

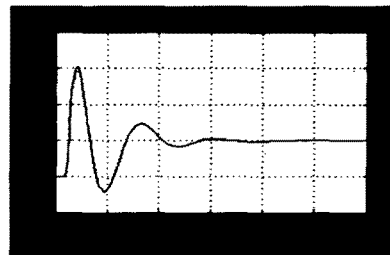


그림 3 PI 제어기 응답특성

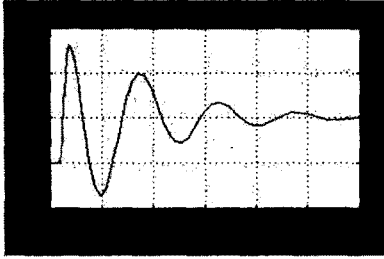


그림 4 IP 제어기 응답특성

파형에서 알 수 있듯이 IP제어기는 PI제어기에 비해 오버슈트가 현저하게 감소하게 된다. 그러나 IP제어기는 PI제어기보다 안정화 시간(Settling Time)이 길어진다는 단점이 있다.

2.2 적분제어기의 Windup

적분제어기는 오차가 존재하는 한 계속해서 출력의 크기를 증가시켜 나감으로써 그 오차를 제거하려는 노력을 멈추지 않는다. 그런데 제어기의 출력을 받아 직접 플랜트나 공정에 물리력을 가하는 부하의 힘이 한계에 달해서 이미 그보다 더 큰 힘을 낼 수 없는 상황이 발생하는 경우, 부하는 플랜트의 출력에 관계없이 그 한계치에 머무르게 되어 제어기의 피드백이 차단된 것과 같은 현상이 발생하고 오차의 누적량에 비례하는 출력을 내는 적분제어기의 출력은 이상적으로 증대된다. 그러다가 시스템이 정상적인 운전상황으로 돌아온 후에도 제어기의 출력이 적절한 값으로 감소될 때까지 상당히 오랜 시간이 걸리게 된다. 따라서 제어기의 과도상태가 길어지게 되고 응답에 큰 오버슈트나 진동이 야기된다.

부하 출력의 제한치가 작을수록 적분제어기의 출력이 더 커지고 응답의 Settling time이 길어지게 된다.

2.3 Anti-Windup

Windup은 부하가 포화된 상태에서 적분제어기의 출력이 이상적으로 증가하면서 발생한다. 따라서 포화시 증가를 감소시켜야 한다. 부하가 포화하면 제어기 출력과 실제 측정된 부하의 출력이 달라지게 되는데, 이 편차를 이득 $1/K_a$ 를 통해 적분제어기의 입력으로 피드백하여 적분제어기의 입력을 감소시켜준다. 부하의 출력이 적분제어기의 출력과 일치되면 피드백 된 부가적인 편차신호는 "0"이 되고 정상적인 동작을 하게 된다. 이처럼 Windup 현상을 막기 위한 구조를 Anti-Windup 기법이라 한다. 부하의 출력과 적분제어기의 출력이 다른 경우 그림 5에서 $K_a = K_p$ 를 사용하여 Anti-Windup을 적용할 수 있다. 이와 같은 방식($K_a = K_p$)을 Conditioning Technique이라 한다. 그러나 제한치가 너무 작은 경우 $K_a = K_p$ 라 할지라도 진동이 발생할 수 있으므로 적당한 이득값의 선정이 중요하다.

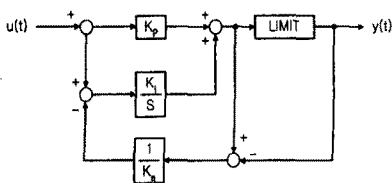


그림 5 Anti-Windup 제어기

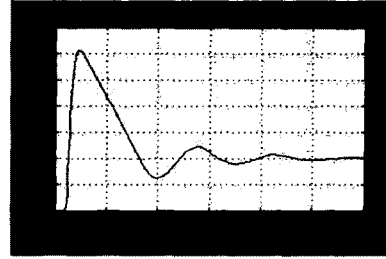


그림 6 PI+Anti-Windup+IP

그림 6은 PI제어기에 Anti-Windup 기법과 IP제어기를 적용한 것이다. 적분기의 Windup을 보상하여 진동이 감소하며 정상상태로 접근함을 알 수 있다.

본 논문에서는 위의 PI, IP, windup의 특성을 이용하여 시스템을 모델링하고 시뮬레이션 해보았다.

2.4 시스템 모델링

전원의 상전압이 다음과 같다면,

$$v_a = V_m \cos \theta,$$

$$v_b = V_m \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi)$$

$$v_c = V_m \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi)$$

$$v_a + v_b + v_c = 0 \text{이라 가정한다.}$$

이때 DC link단의 커패시터에 걸리는 직류전압은

$$C_{dc} \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{ca} + S_b i_{cb} + S_c i_{cc} \quad (6)$$

이고, 인버터를 통해서 공급된 전압이 필터의 커패시터에 걸리는 전류는 다음과 같다.

$$C_f \frac{dV_{fa}}{dt} = i_{ca} - i_{fa} \quad (7)$$

$$C_f \frac{dV_{fb}}{dt} = i_{cb} - i_{fb} \quad (8)$$

$$C_f \frac{dV_{fc}}{dt} = i_{cc} - i_{fc} \quad (9)$$

인버터의 저항손실성분을 무시한 경우 인버터에 걸리는 전압은 다음과 같다.

$$L \frac{di_{ca}}{dt} = V_{ca} - V_{fa} \quad (10)$$

$$L \frac{di_{cb}}{dt} = V_{cb} - V_{fb} \quad (11)$$

$$L \frac{di_{cc}}{dt} = V_{cc} - V_{fc} \quad (12)$$

(7)~(12)를 d-q 변환하면 다음과 같다.

$$i_{o\alpha} = I_{L\alpha} + C \frac{dv_{c\alpha}}{dt} + \omega C v_{c\alpha} \quad (13)$$

$$i_{o\beta} = I_{L\beta} + C \frac{dv_{c\beta}}{dt} - \omega C v_{c\beta} \quad (14)$$

$$v_{o\alpha} = v_{c\alpha} + L \frac{di_{o\alpha}}{dt} + \omega L i_{o\beta} \quad (15)$$

$$v_{o\beta} = v_{c\beta} + L \frac{di_{o\beta}}{dt} - \omega L i_{o\alpha} \quad (16)$$

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_q i_{o\alpha} + S_d i_{o\beta} \quad (17)$$

각 성분의 전달함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{v_{cq}}{v_{cq}^*} = \frac{K_{qp} s + K_{qt}}{C s^2 + K_{dp} s + K_{dt}} \quad \text{q축}$$

$$\frac{v_{cd}}{v_{cd}^*} = \frac{K_{dp} s + K_{dt}}{C s^2 + K_{dp} s + K_{dt}} \quad \text{d축}$$

$$\frac{i_{oq}}{i_{oq}^*} = \frac{K_{qp} s + K_{qt}}{L s^2 + K_{sp} s + K_{st}} \quad \text{q축}$$

$$\frac{i_{od}}{i_{od}^*} = \frac{K_{dp} s + K_{dt}}{L s^2 + K_{dp} s + K_{dt}} \quad \text{d축}$$

2.5. 제안된 제어기 및 시물레이션

위의 전달함수는 다변수 PI제어이론을 도입하여 도출한 것으로 위의 시스템 모델링을 바탕으로 그림 7에 제안된 제어기를 나타내었다.

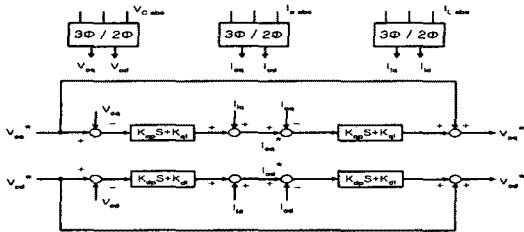


그림 7 제안된 제어기 Block Diagram

제안된 제어 알고리즘의 우수성을 입증하기 위해 시물레이션을 수행하였다. 시물레이션은 Matlab Simulink 사용하였다.

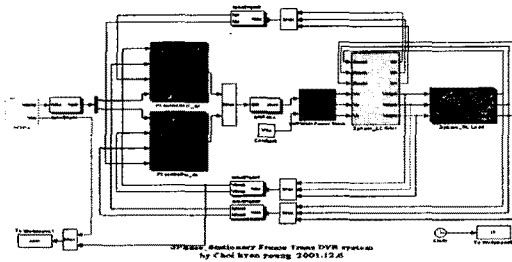


그림 8 Anti-Windup PI 제어기

그림 8은 Simulink로 구성한 제어 시스템을 나타낸다.

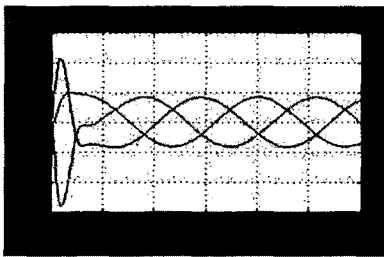


그림 9 PI 제어만 했을 때의 전원

그림 9는 PI제어기만 사용하였을 때 커패시터 양단에 걸리는 3상전원이고 그림 10은 IP제어기만을 사용하여 얻은 결과이다. PI제어기를 사용한 경우보다 오버슈트가 감소하였으나 정상상태에 도달하는 시간이 길어짐을 알 수 있다.

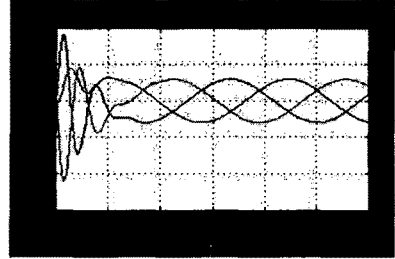


그림 10 IP 제어만 했을 때의 전원

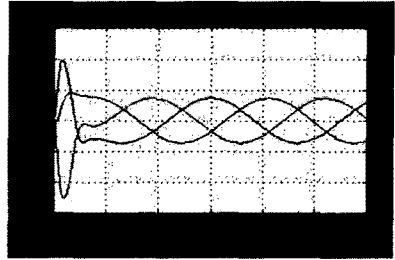


그림 11 PI+IP+Anti-Windup

그림 11은 PI제어기에 IP제어기법과 Anti-Windup 기법을 적용하여 얻은 결과이다. PI제어기에 비하여 오버슈트가 작고 빠른 정상상태 응답을 보이고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

현재 국내외에서 전력품질 향상을 위한 연구에 대한 관심이 증가하고 있으며 특히 전원장해에 가장 큰 부분을 차지하는 Voltage Sag의 보상은 전력품질 향상에 있어 중요한 과제이다. 보상기 제어를 위한 알고리즘으로 PI제어기를 기본으로 IP제어와 Anti-Windup 기법을 적용한 이중제어 기법을 도출하였으며 시물레이션을 통하여 그 우수성을 확인하였다.

IP제어기는 오버슈트의 크기를 줄이지만 안정화 시간(Settling Time)이 길어지는 단점을 지니며, 적분기의 Windup을 방지하기 위해 Anti-Windup 기법을 적용하여 그 우수성을 확인하였다.

차후 제안된 기법과 알고리즘을 바탕으로 좀더 간단하고 효율적인 제어 알고리즘의 도출과 보상기에 적용하여 실험을 통한 검증이 향후 과제라 하겠다.

(참 고 문 헌)

- [1] F.I.Ahmed, A.M.EL-Tobshy, A.A.Mafouz, M.M.S.Ibrahim, "P-I and I-P Controllers In A Colsed Loop For DC Motor Driver", Power Conversion Conference - Nagaoka 1997, Proceedings of the, Vol 2, pp. 613-618, 1997
- [2] Youbin Peng, Damir Vrancic, Raymond Hanus, "Anti-Windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques for PID Controllers", IEEE Trans. on Control System, Vol. 16, No. 4, pp.48-57, 1996
- [3] Vrancic, D. Peng, Y, "Some Practical Recommendations In Anti-windup Design", Control '96, UKACC International Conference on(Conf. Publ. No. 427), Vol : 1, 2-5, pp 108-113, 1996

본 연구는 한국과학재단
목적기초연구지원으로 수행되었음.