

직렬형 전압보상기의 단상 전력회로 해석

임용빈\*, 임수생, 이은웅, 김홍권  
 충남대학교\*, 한국전력공사

Single Phase Power Circuit Analysis of a Series Voltage Compensator

Lim, Yong-Bin\*, Lim, Su-Saeng, Lee, Eun-Woong, Kim, Hong-Kwon  
 Chungnam Nat'l Univ. Energy Conversion Lab.\*, KEPCO

**Abstract** - Voltage sag and swell are the most severe factors affecting power quality in distribution systems. This paper discusses an approach to ensure a high quality power supply to critical loads applying voltage-sag compensator. The proposed system consists of a PWM voltage source inverter, connected in series with the line through a single-phase transformer.

The operation principle and power circuit configuration of the proposed voltage sag compensator are introduced. And then the transfer function of compensator is derived from simplified single phase power circuit, and simulated so that the benefits of this proposed compensator is confirmed through the open loop response.

1. 서 론

최근 반도체의 발달로 반도체를 이용한 기기 및 시스템이 산업용에서부터 가정에 이르기까지 다양하게 보급되면서 전원의 고품질화에 대한 요구가 높아지고 있다. 특히 순간적인 전압 변동은 가장 큰 문제점으로 지적될 수 있는데 전원장에 중 순간저전압(voltage sag)에 의해 발생하는 사고는 전체사고의 약 87%를 차지하고 있다 [1]. 이러한 전원장애에 대한 대책으로 사용되고 있는 보호장치로는 기존의 UPS(Uninterruptible Power Supply)가 있으나 고가장비이고, 배터리의 유지, 보수를 필요로 한다. 또 부하의 전체 용량을 보상하는 전전압 보상방법을 쓰고 있기 때문에 용량이 크다.

최근에는 정전에 대한 대책보다는 전원 트러블의 대부분을 차지하는 순간저전압에 대한 대책으로써 순간저전압 보상기에 대한 연구가 많이 진행되고 있다 [2]. 순간 저전압 보상기는 저전압 발생시 부족분의 전압을 인버터가 만들어서 직렬변압기로 인가함으로써 부하 측 전원을 일정하게 하는 방법이다. 이러한 보상방법은 정적 전압의 약 40%정도에 대한 저전압을 보상하므로 UPS에 비해 용량을 줄일 수 있는 장점이 있다 [3]. 또 6~10주기 정도를 보상하므로 배터리를 사용하지 않고 커패시터에 저장된 에너지로 충분히 보상할 수 있는 장점도 가지고 있다.

본 논문에서는 직렬형 순간 저전압 보상기의 구조 및 동작원리를 소개하고, 간략화시킨 단상전력회로를 통해 제안된 보상기의 전달함수를 도출한다. 보상결과는 도출된 전달함수를 시뮬레이션 함으로써 전압보상의 응답 특성을 얻고, 제안된 보상기의 특성을 확인한다.

2. 직렬형 전압 보상기의 동작원리

2.1 순간저전압

순간저전압이란 송배전 계통에서 생기는 전압 이상현상으로 수 주기동안 발생하는 일시적인 전압 강하 현상

으로서 일반적인 정전의 의미와는 다르다. 송전계통에서 발생원인의 대부분은 낙뢰나 지락사고에 의한 것이며, 배전계통에서는 대형 모터구동이나 아크로, 전력변환장치 등의 비선형 부하에 의해 발생한다. 특히, 스위칭부하에 의해 스위칭 순간 구형파나 펄스형태의 전류가 흐르게 되고 이로 인하여 스위칭 전후에 큰 전류변화가 나타나므로 배전계통의 내부인피던스에 의한 전압강하의 불연속성으로 전원전압에 심한 왜곡을 가져온다.

따라서 전원전압에 불필요한 고조파전류를 발생시켜 수용가측의 민감성 부하나 전력시스템의 운영에 바람직하지 못한 현상을 초래하게 된다.

2.2 구조 및 동작원리

그림 1은 순간 저전압을 보상하기 위해 제안된 단상 직렬형 전압 보상기 시스템의 구조를 간략화 시킨 것이다. 제안된 시스템은 단상 PWM 전압원 인버터로 구성되어지며 변압기를 통해 선로에 직렬로 연결된다. 에너지 저장 장치로서는 dc link 커패시터를 사용하고, 인버터 스택, 스위칭 주파수를 필터링하기 위한 LC 필터, 그리고 전압을 직렬로 가감해줄 직렬 변압기로 구성되어 있다. 그밖에 전원측 전압센서, 인버터 출력전류센서, 커패시터 전압센서로 이루어진 센서부가 있고, 인버터를 구동시킬 게이트 드라이브와 프로세서부로 구성되어 있다.

직렬형 전압 보상기는 평상시에 상용전원으로부터 부하에 전력을 공급한다. 이때 인버터는 제어회로로만 동작하는 대기상태에 있게 된다. 순간 전압 변동이 발생한 때에는 제어회로에서 입력 전압 강하분에 해당하는 전압을 인버터에서 커패시터나 배터리에 축적된 에너지를 이용하여 전압변동분 만큼 직렬변압기를 통해 상용전원에 직렬로 가산하게 된다.

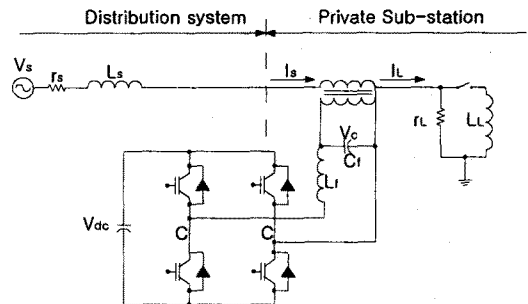
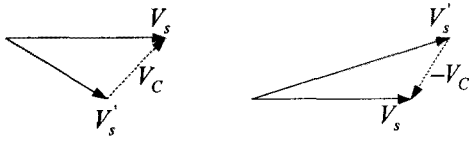


그림 1 직렬형 전압보상기의 전체 구성도

그림 2는 제안된 보상기의 전압 보상원리를 나타낸 벡터도이다. Vs과 Vc는 각각 순간전원전압과 인버터 주입전압을 나타낸다. 전압새그가 발생할 때에는 인버터 출력전압을 직렬변압기를 통해 전압강하분 만큼의 전압을 가산하게 되고, 전압 스웰이 발생하면 전압상승

분 만큼의 전압을 위상 반전시켜 가산하게 되어 일정한 전원전압을 공급하게 된다. 따라서 부하에는 입력전압이 정상일때와 거의 동일한 전압이 인가되도록 한다. 입력 전압이 다시 정상으로 회복되면 순간전압변동은 없게 되어 인버터는 다시 대기상태로 된다.



(a) 전압새그 발생시 (b) 전압스웰 발생시  
그림 2 전압보상 벡터도

### 3. 단상전력회로 해석

#### 3.1 필터해석

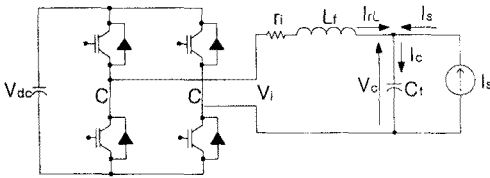


그림 3 간략화시킨 필터회로

표 1 보상기 전력회로정수

정격전원전압 $V_s$	220V
정격공급주파수	60Hz
배전단 선로저항 $r_s$	0.314Ω
배전단 선로리액턴스 $x_s$	0.0165Ω
부하저항 $r_L$	24.2Ω
부하 리액턴스 $x_L$	8.43Ω
직렬변압기 턴비	2 : 1
Dc bus voltage $V_{dc}$	300V
보상기 스위칭 주파수	15kHz
스위칭 손실 등가저항 $r_i$	0.34Ω

그림 3은 그림1의 필터부분을 구체화시킨 것이다. 본 연구에 사용된 필터는 인덕터와 커패시터로 구성된 서역통과 필터로 입력전압  $V_i(s)$ 와 컨버터 출력전압  $V_C(s)$  사이의 전달함수  $G_P(s)$ 는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

식(1)에서 공진 각주파수  $\omega_n$ 은 식(2)와 같고, 댐핑계수  $\zeta$ 는 식(3)과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{L_f C_f}} \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{r_L}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \quad (3)$$

LC 필터가 원활한 필터링을 수행하기 위해서는 인버

터의 스위칭 주파수에 비해 공진 주파수가 낮아야 하며 전원주파수 보다는 높아야 한다. 스위칭 주파수에 비해 공진 주파수가 낮을수록 필터링 특성은 좋아지나 필터의 용량이 커지게 된다. 따라서 제한된 시스템의 공진 주파수는 스위칭 주파수의 1/10인 1.5kHz로 설정한다 [4, 5, 6].

공진 주파수가 정해지면 L, C값은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 빠른 응답특성과 시스템 공진 및 스위칭 리플이 최소로 되는 관점에서 설계되어진다. 표 2는 결정된 공진주파수에서 댐핑계수를 달리했을 때 식 (2)와 (3)을 (5)에 대입하여 보상기 필터의 회로정수 L, C값을 구해놓은 것이다.

표 2 보상기 필터회로정수

댐핑계수 $\zeta$	필터인덕턴스 $L_f[\mu H]$	필터커패시턴스 $C_f[\mu F]$
0.036	500	22.54
0.3	60	186.90
0.5	36	312.03
1	18	324.42

#### 3.2 개루프 해석

제한된 시스템은 공진을 최소화하기 위해 최소전류제환을 이용한다. 즉 스위칭 리플을 효과적으로 억제하기 위해서는 그림 4와 같은 간단한 전류 피드백을 사용함으로써 가능하다 [7].

그림 3에서 커패시터 전류  $i_C$ 를 그림 4와 같이 인버터 기준전압  $V_i^*$ 에 피드백 시킨다. 간략화 시키기 위해 PWM 인버터가 선형적인 증폭기라고 가정한다.

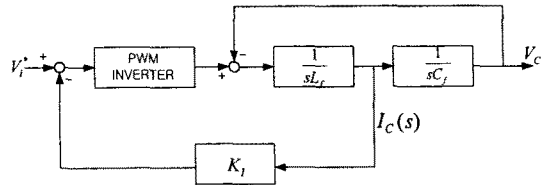


그림 4 커패시터 전류 피드백을 포함한 제어구성도

PWM 인버터의 기준전압  $V_i^*$ 와 출력전압  $V_C(s)$ 의 전달함수  $G_{P2}(s)$ 는 식(4)와 같다.

$$G_{P2}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + \frac{1}{L_f} K_I s + \omega_n^2} \quad (4)$$

식(1)과 (4)를 비교하여 식(5)를 얻을 수 있다.

$$2\zeta\omega_n = \frac{1}{L_f} K_I \quad (5)$$

식(5)에서 커패시터 전류  $i_C$ 의 피드백 게인  $K_I$ 를 가변시켜 식(1)의 댐핑계수  $\zeta$ 를 제어할 수 있음을 알 수 있다.

필터에 의한 공진을 최소화시키기 위해  $\zeta=1$  일때의 피드백 이득  $K_I$ 를 표2의 보상기 필터회로정수를 대입하여 (6)과 같이 얻을 수 있다.

$$K_I = 0.339 \quad (6)$$

### 3.2 결과 파형

그림 5, 6, 7은 앞에서 설계한 LC 필터의 회로정수와 전류 피드백 이득을 식(5)에 대입하여 댐핑계수  $\zeta$ 를 표2처럼 달리 했을 때 각각의 스텝응답과 보드선도를 나타낸다.

그림 5에서  $\zeta=1$ 일 때 1[msec](0.06cycle)에서 정상상태에 이르게되어 인버터 기준전압에 가장 빨리 응답함을 알 수 있다.

또한 그림 6, 7에서 알 수 있듯이  $\zeta$ 가 1일 때 필터에 의한 공진을 최소화 할 수 있다.

따라서 제안된 보상기는 댐핑계수  $\zeta=1$ 로 선택하고 필터인덕턴스  $L_f=18[\mu H]$ , 필터커패시턴스  $C_f=324.42[\mu F]$ 로 선정하여 가장 이상적인 응답특성을 얻을 수 있다.

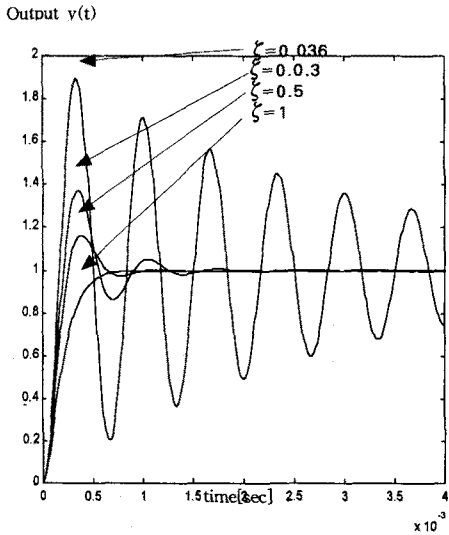


그림 5 각각의  $\zeta$ 에 대한 단위시스템 응답

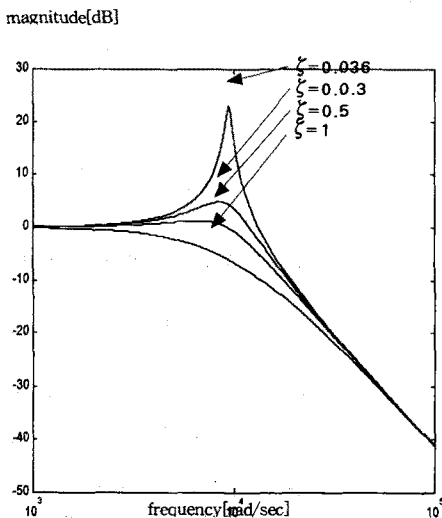


그림 6 각각의  $\zeta$ 에 대한 Bode 선도 (Magnitude)

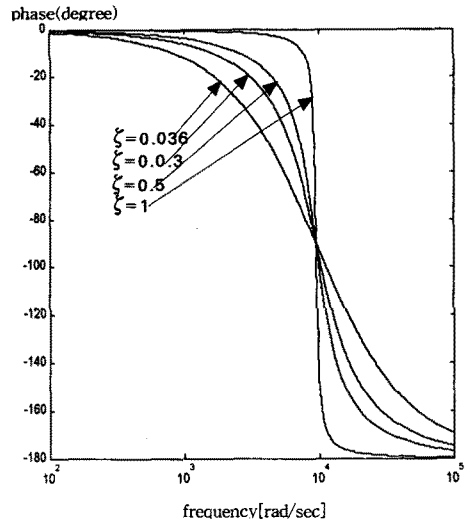


그림 7 각각의  $\zeta$ 에 대한 Bode 선도 (Phase)

### 4. 결론

본 논문에서는 직렬형 단상 순간 저전압 보상기의 제어구성도를 제안하고, 직렬형 능동 필터의 특성을 해석하였다.

제안된 보상기 시스템에서는 원활한 필터링을 위해 직렬보상기 2차 필터의 공진주파수를 스위칭 주파수의 1/10으로 설정하였고, 최소 전류 제한법을 사용하여 댐핑계수  $\zeta$ 를 1로하여 직렬형 능동 필터의 출력측에 있는 작은 정격의 인덕터와 커패시터 사이에서의 공진을 제거할 수 있었다. 또한 여러 개의  $\zeta$ 에 대해 선정된  $K_I$  값이 오버슈트 없이 인버터 기준전압에 신속히 추종할 수 있는 보상전압을 공급할 수 있음을 확인하였다.

앞으로, 인버터의 내부상태변수를 고려한 보다 정확한 해석과 제어시스템에 대한 연구가 필요하다.

### (참고 문헌)

- [1] Kevork Haddad, Geza Joos, "A fast algorithm for voltage unbalance compensation and regulation in Faulted distribution systems", IEEE APEC Annual Meeting, pp.963-969, 1998
- [2] V.B. Bhavaraju, Prasad N. Enfeti, "An Active Line Conditioner to balance voltages in a three-phase system", IEEE Trans, Industry Application. Vol. 32, No. 2, pp. 287-292, 1996
- [3] Ping Hsu, Michae Behnke, "A three-phase synchronous frame controller for unbalanced load", 98APEC conference, pp. 1369-1374, 1998
- [4] A. Kawamura and R. G. Hoft, "Analysis of PWM inverter with instantaneous feedback control", IEEJ IPEC-Tokyo'88, pp.981, 1983
- [5] T. Inoue, S. Gamou, and H. Kashiwagi, "Voltage feedback control of PWM inverter", Trans. of IEEF. vol. 112D, no. 4, 1992(in Japanese)
- [6] A. Nabae, M. Kitamura, Y. Okuyama, and F. Z. Peng, "A novel inverter with sinusoidal voltage and current outputs", IEEE/IAS Ann. Meeting, 1993
- [7] A. Kawamura and R. G. Hoft, "Instantaneous feedback controlled PWM inverter with adaptive hysteresis", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. LA-20, pp.769, 1984