

고품질 정밀형 voltage sag 보상기 설계 및 해석

오세호, 최현영, 박정균, 류형선, 김양모  
 충남대학교 전기공학과

Design and Analysis of the High Quality Accuracy Voltage Sag Compensator

Oh Se-Ho, Choi Hyun-Young, Park Jung-Gyun, Ryu Hyoung-Sun, Kim Yang-Mo.  
 Dept. of Electrical Engineering Chungnam National University

**Abstract** - Voltage sags are known as a serious problem causing mal-operation of equipment, process controllers and adjustable-speed drives.

We understand problems of the voltage sag that have a bad effect to the load and then we design for a new model of the compensator.

We accomplished system modeling for both sensorless part and sensing part, and compare the merits and demerits of both.

전전압 방식을 쓰고 있기 때문에 용량이 크므로, 순수한 순간전압에 대한 대책으로는 DVR(dynamic voltage restorer)의 방식을 선호하고 있다. 본 연구에서는 DVR의 성격을 띠는 고품질 정밀형 voltage sag 보상기를 고안하였다.

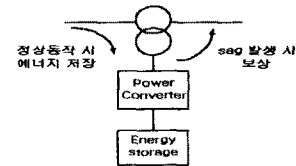


그림 1. 고품질 정밀형 voltage sag 보상기

서론

최근 산업이 급속히 발달함에 따라 많이 보급되어 있는 컴퓨터와 자동화설비는 모두 배전 계통에서 발생하는 과도전압, 순간전압강하, 고조파 등의 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 전기장비는 양질의 전력품질이 요구된다.

특히 전원의 순간적인 전압변동이 가장 큰 문제점으로 등장하고 있다. 미국의 NPL(National Power Laboratory)이 1990년부터 1995년까지 미국과 캐나다의 235개 지역에서 측정 조사한 전원장에 데이터에 따르면 전체 전원사고 중 순간전압 강하 (voltage sag)에 의해 발생하는 사고가 약 87%를 차지하며, 순간전압 상승이 7.4%, 정전이 약 4.7%, 그 밖의 사고가 약 1% 정도로 분석된다.

이 중 가장 큰 비율을 차지하고 있는 순간전압 강하는 컴퓨터나 조명기구, 가정용 기기 같은 민감한 장비에 순간전압 강하로 인한 정전 같은 큰 영향을 미치고 있다.

이에 본 연구는 순간전압 강하를 보상해 줄 수 있는 Sagcom을 설계하고 시뮬레이션 하기 위한 시스템 모델링을 구현하고자 한다.

고안된 고품질 정밀형 voltage sag 보상장치, 즉 sagcom은 평상시 상용전원으로부터 부하에 전력을 공급하고 voltage sag가 발생할 때 인버터에 콘덴서에 축적된 에너지를 이용하여 전압강하 분만큼의 전압을 발생시켜 상용전원에 직렬로 더해줌으로써 출력전압을 유지시켜 준다.

그림 2는 제시된 sagcom의 회로도이다. 인버터에서 발생된 전압은 필터를 거쳐 직렬변압기에 통하여 전원전압에 부족전압을 더하여 준다.

이러한 sagcom은 0.2s동안의 voltage sag를 보상할 수 있어야 하고, 전압강하 분의 60%이하에 대한 보상과 전원주파수와 동기된 전압을 인가하는 조건을 만족해야 한다.

본론

2.1 DVR 성격을 갖는 Sagcom

현재 품질을 보상하기 위한 보상장치로서 UPS나 DVR이 대두되고 있는 실정이지만, UPS는 순간전압 저하뿐만 아니라 고조파나 노이즈 등의 품질의 비효율적인 요소에서 정전까지 보상해 줌으로써 전원공급의 효율성을 높이고 있으나 시스템은 고가장비이고 배터리의 유지, 보수도 필요하다. 또 부하의 전체용량을 보상하는

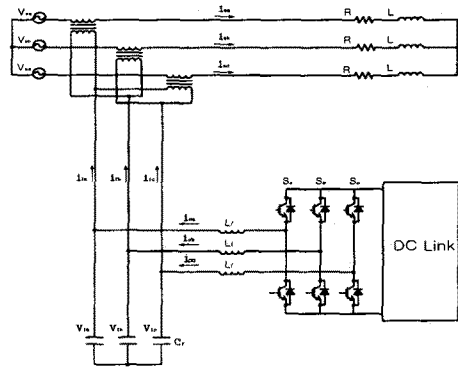


그림 2. sagcom 회로도

## 2.2 d-q 변환을 이용한 불평형 전원 해석

식 (1)은 3상 불평형 전원전압을 영상분, 정상분, 역상분으로 분리하여 행렬로 나타내고 있다.

$$\begin{bmatrix} E_{an} \\ E_{bn} \\ E_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_o \\ E_p \\ E_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  이고  $E_o, E_p, E_n$ 는 영상분, 정상분, 역상분 행렬 분들이다.  $E_{an}, E_{bn}, E_{cn}$ 은 물론 각각의 3상  $e_{an}(t), e_{bn}(t), e_{cn}(t)$ 의 전압 패이저를 나타낸다. 식 (1)을 이용함으로써 불평형 3상 전원 전압은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 선로는 중성선이 없는 3상 3선식을 가정 한 것이다. 이 세 성분들을 d-q 변환 행렬 (3)을 이용하여 불평형 3상 전원전압을 2상 d-q으로 변환시키면, 표현은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_a(t) \\ e_b(t) \\ e_c(t) \end{bmatrix} = V_{mp} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_p) \\ \cos(\omega t + \alpha_p - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \alpha_p + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} + V_{mn} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_n) \\ \cos(\omega t + \alpha_n + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \alpha_n - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} + V_{mo} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_o) \\ \cos(\omega t + \alpha_o) \\ \cos(\omega t + \alpha_o) \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned} e_q^e &= V_{mp} \cos \alpha_p + V_{mn} \cos(2\omega t + \alpha_n) \\ e_d^e &= -V_{mp} \sin \alpha_p + V_{mn} \sin(2\omega t + \alpha_n) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 q는 q축 성분 d는 d축 성분을 나타낸다.

### 2.3 전체 시스템의 모델링

Sagcom의 제어기를 설계하기 위한 시스템 모델링을 하기 위하여 전원단, 인버터단으로 분리하고 전원단과 인버터단 각각을 d-q변환을 이용하여 변환하였다. 이때 전원단의 부하에 흐르는 전류는 직렬변압기를 통해 공급되는 전류와 동일하므로, 전원단과 인버터단 전체를 통합하여 시스템을 완성하였다.

식 (5)와 (6)은 전원단을 표현한 것이다.

$$V_{sa} + V_{da} - L_d \cdot \frac{dI_{sa}}{dt} = R i_{sa} + L \cdot \frac{dI_{sa}}{dt} \quad (5)$$

$$V_{sb} + V_{db} - L_d \cdot \frac{dI_{sb}}{dt} = R i_{sb} + L \cdot \frac{dI_{sb}}{dt} \quad (6)$$

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad V_I = \begin{bmatrix} V_{la} \\ V_{lb} \\ V_{lc} \end{bmatrix} \quad I_s = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

d-q 변환을 이용하여 (7), (8)의 식을 대입하여 (9),(10)식을 얻었다.

$$V_{dq} = \omega L_d \cdot i_{sd} + L_d \cdot \frac{d i_{sq}}{dt} \quad (7)$$

$$V_{dd} = -\omega L_q \cdot i_{sq} + L_q \cdot \frac{d i_{sd}}{dt} \quad (8)$$

$$V_{sq} + V_{lq} = R i_{sq} + \omega(L + L_d) i_{sd} + (L_d + L) \frac{d i_{sq}}{dt} \quad (9)$$

$$V_{sd} + V_{ld} = R i_{sd} + \omega(L_d - L) i_{sq} + (L - L_d) \frac{d i_{sd}}{dt} \quad (10)$$

직렬 변압기 전압 성분  $V_{lq}, V_{ld}$ 에 (11)과 (12)를 대입시키면,

$$\omega L i_{cd} + L \cdot \frac{d i_{cq}}{dt} + R_F \cdot i_{cq} = V_{cq} - V_{lq} \quad (11)$$

$$-\omega L i_{cq} + L \cdot \frac{d i_{cd}}{dt} + R_F \cdot i_{cd} = V_{cd} - V_{ld} \quad (12)$$

(13),(14)식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{sq} - V_{cd} + \omega L i_{cq} + L \cdot \frac{d i_{cd}}{dt} + R_F \cdot i_{cd} \\ = R i_{sq} + \omega(L + L_d) i_{sd} + (L_d + L) \frac{d i_{sq}}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} V_{sd} - V_{cd} - \omega L i_{cq} + L \cdot \frac{d i_{cd}}{dt} + R_F \cdot i_{cd} \\ = R i_{sd} + \omega(L_d - L) i_{sq} + (L - L_d) \frac{d i_{sd}}{dt} \end{aligned} \quad (14)$$

위의 시스템 모델링은 부하의 변수까지 모두 고려되기 때문에 부하의 변수를 예측하여 제어할 수 있으므로 특정한 센서를 요하지 않으나 제한된 부하를 사용해야 한다. 그러나 순간전압 저하 보상은 일반 수용가나 산업 현장에 나타나는 순간정전을 보상하기 위해 고안된 시스템이므로 부하가 고정적일 수 없다.

### 2.4 sagcom 모델링

순간 전압저하는 선로에 전압을 공급하여 부하에 전류가 흐르고 있는 정상상태에서 발생하므로 제한된 용량안에서는 부하를 고려하지 않고 시스템 모델링하는 것이 가능하다.

인버터부분의 시스템 모델링을 하기 전에

$$\begin{aligned} V_{la} + V_{lb} + V_{lc} &= 0 \\ i_{la} + i_{lb} + i_{lc} &= 0 \end{aligned}$$

이라 가정한다. 스위칭 성분은,

$$\begin{aligned} S_a, S_b, S_c &= 1 && \text{upper - on} \\ S_a, S_b, S_c &= 0 && \text{lower - on} \end{aligned}$$

이다.

이때 dc link단의 캐패시터에 걸리는 직류전압은

$$C_{dc} \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{ca} + S_b i_{cb} + S_c i_{cc} \quad (15)$$

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

$$C_f \cdot \frac{dV_{Ia}}{dt} = i_{ca} - i_{Ia} \quad (16)$$

$$C_f \cdot \frac{dV_{Ib}}{dt} = i_{cb} - i_{Ib} \quad (17)$$

$$C_f \cdot \frac{dV_{Ic}}{dt} = i_{cc} - i_{Ic} \quad (18)$$

d-q 변환을 이용하여,

$$i_{cq} - i_{Iq} = C \cdot \frac{dV_{Iq}}{dt} + \omega C V_{Id} \quad (19)$$

$$i_{cd} - i_{Id} = C \cdot \frac{dV_{Id}}{dt} - \omega C V_{Iq} \quad (20)$$

로 나타낸다.

인덕터에 걸리는 전압을 모델링하기 전에 인버터의 손실 성분으로  $R_f$ 를 고려하여 주어야 한다.

$$R i_{ca} + L \cdot \frac{di_{ca}}{dt} = V_{ca} - V_{Ia} \quad (21)$$

$$R i_{cb} + L \cdot \frac{di_{cb}}{dt} = V_{cb} - V_{Ib} \quad (22)$$

$$R i_{cc} + L \cdot \frac{di_{cc}}{dt} = V_{cc} - V_{Ic} \quad (23)$$

d-q 변환을 하면

$$V_{cq} - V_{Iq} = L \cdot \frac{di_{cq}}{dt} + \omega L i_{cd} + R i_{cq} \quad (24)$$

$$V_{cd} - V_{Id} = L \cdot \frac{di_{cd}}{dt} - \omega L i_{cq} + R i_{cd} \quad (25)$$

이를 등가회로로 나타내는 것이 가능하다. 그림 2는 모델링된 시스템의 등가회로이다.

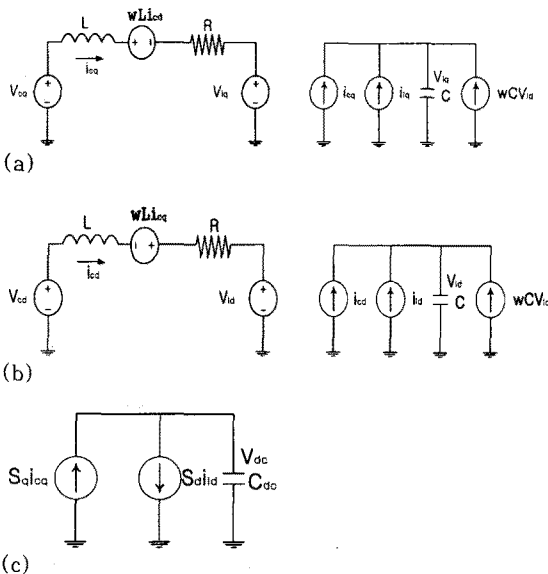


그림 3. (a) q 축 등가회로 (b) d 축 등가회로  
(c) 인버터부의 등가회로

이로써 모델링된 시스템으로 순간전압 보상기의 제어가 가능하다. 이 모델링은 전원전압과 부하전류를 센싱하여 부족분을 보상해 주어야 한다. 전원단에 저전압이 발생하면 고속 컨트롤러를 이용하여 보상이 가능하고 부하전류를 항상 센싱하여 주므로 전압 보상에 대한 효율성이 향상된다.

### 3. 결 론

현재 국내 뿐 아니라 해외에서도 전력의 품질을 향상시키기 위해 발빠르게 움직이고 있다. 본 연구는 전원장에 중 가장 큰 사고 발생의 원인을 차지할 voltage sag를 보상할 수 있는 sagcom을 설계하고 sagcom에 대한 시스템 모델링 방식을 각 부분으로 분리하여 전체적인 시스템 모델링을 해 보았다. 센서리스 보상기와 무부하시 보상기를 비교함으로써 각 보상기의 이점을 알아보고 그에 따른 보상기의 모델링을 함으로써 이 보상기를 제어할 수 있는 알고리즘이나 특성을 알 수 있는 기틀을 마련했다고 본다. 앞으로 모델링된 방정식으로 효율적이고 간단한 제어 알고리즘의 도출과 시뮬레이션을 통하여 보상기의 성능을 점검하고 실험을 통하여 검증하는 일이 향후 과제라 하겠다.

### (참 고 문 헌)

- (1) ANSI/IEEE Standard 446-1987, IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power for Industrial and Commercial Applications, New York: IEEE, 1987, pp.74-75
- (2) M. McGranaghan, D. Mueller, and M. Samotyj, "Voltage Sags In Industrial Systems," IEEE/IAS&CPS Annual Meeting, 1991, 91CH2990-0, pp.18-24
- (3) V.E. Wagneer, A.A. Andreshak, and J.P. Staniak, "Power Quality and Factory Automation," IAS Annual Meeting, Vol. 35, No. 6, pp. 1391-1396
- (4) Math H. J. Bollen, Member, "The Influence of Motor Reacceleration on voltage sags" IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, No. 4, July/August 1995
- (5) 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 Systems, PEDS'99, July 1999, pp.1054-1059

본 연구는 한국과학재단  
목적기초연구지원으로 수행되었음.