

배전계통에서의 직렬보상을 이용한 순시전압강하 보상기

論 文

50B - 1 - 3

Instantaneous Voltage Sag Corrector in Distribution Line Using Series Compensator

李 尚勳* · 崔載昊**
(Sang-Hoon Lee · Jae-Ho Choi)

Abstract – In this paper, a VSC(Voltage Sag Corrector) is discussed for the purpose of power quality enhancement. A fast detecting technique of voltage sag is accomplished through the detection of instantaneous value on synchronous reference frame. A robust characteristic against the noise is available by inserting the first order low pass filter in the detection circuit. The formula and the filter design process is described properly with the mathematical equations. Because the VSC system supply the active power to load, it is required to design the proper size of the energy storage system. In this paper, the capacitor bank is used as an energy storage system, and the size of the capacitor is designed from the point of view of input/output energy as the output power rating and the amplitude and duration time of the voltage sag. The simulation is accomplished by PSCAD/EMTDC.

Key Words : Voltage sag corrector, Power quality, Series compensation, Disturbances detection, Energy storage system,

1. 서 론

현재 산업현장이나 수용가에서 사용하고 있는 전력은 순간적인 정전, 전압의 sag와 swell 그리고 고조파등 많은 왜란을 포함하고 있으며, 이중에서도 전압의 sag가 가장 빈번하게 발생되고 있다. 일반적으로 sag는 다음과 같은 두 가지 원인으로 인해 발생한다. 첫 번째는 번개에 의한 지락사고와 같은 자연적인 원인에 의해 발생하며, 두 번째는 대용량 모터의 기동과 같은 부하에 의해 발생할 수 있다. 실제로 전압 sag의 대부분은 지락사고에 의해 발생하며, 특히 1선지락(Single Line-to-Ground Faults; SLGF)에 의한 sag가 가장 많다.[1],[2]

IEEE Standard Coordinating Committee 22(Power Quality)에 의하면, sag의 특성을 그 크기와 지속시간으로 규정하고 있다. 크기가 공정전압(nominal voltage)의 0.1 ~ 0.9 p.u.(per unit)이며, 지속시간이 60[Hz]의 주파수에 대해 8.3[ms] ~ 1[min]사이에 있을 경우 이것을 sag라고 정의하고 있다. 특히 지속시간이 8.3[ms] ~ 0.5[s]사이의 sag를 instantaneous sag라고 한다. 불과 몇 년 전만 하더라도 이러한 sag는 대부분의 시스템에 큰 영향을 주지 못하였다. 그러나 컴퓨터 시스템을 이용한 자동화 제조과정, 민감한 통신장비, 최첨단 의료시설 그리고 고도의 정밀도를 요구하는 전자장비들에 있어서는 매우 짧은 기간의 sag도 치명적인

결과를 초래할 수 있다.[3] 따라서 과학 기술이 발달된 현대 산업사회의 전력 소비자들에게 있어서는 전력의 품질이 매우 중요한 주제로 대두되고 있으며, 이미 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다.

1993년 Mark F. McGranaghan은 전압의 sag를 보상하는 방법으로 정전압 변압기(Constant Voltage Transformers; CVTs)를 제안하였다.[3] 이 방법은 설치가 용이하고 경제적인 장점을 가지고 있지만, 출력전압이 고정되어 있기 때문에 부하가 가변하거나 큰 유입전류가 흐를 경우 효과적이질 못하다. 최근에 전력전자의 눈부신 발전과 더불어 이러한 단점을 만족시켜 주기 위해 전력변환 장치를 이용한 전압 sag의 보상에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 이중 대표적인 것이 무정전전원장치(Uninterruptible Power Supply; UPS)이다.[9] UPS는 그 성능면에서 매우 우수하지만, 많은 유지·보수가 필요하며 고가이기 때문에 배전 계통에 적용하기는 부적절하다. 따라서 최근에는 직렬 보상기를 이용한 전압강하 보상기(Voltage Sag Corrector; VSC)에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 이러한 방법은 시스템의 동특성이 매우 뛰어나고, UPS에 비해 매우 경제적인 이점을 가지고 있다.[4]-[8]

일반적으로 다음과 같은 부분은 VSC에 있어 매우 중요한 부분을 차지하고 있지만, 위의 연구들은 이 부분에 대한 언급을 하지 않고 있다.

1. Sag 발생시 빠른 검출 기법
2. 잡음에 대한 둔감도
3. ESS(Energy Storage System)의 정격 용량 산정

과거에 사고(sag) 검출을 위해 사용한 방법은 대부분이

* 正會員 : 忠北大工大電氣·電子工學部 博士課程

** 正會員 : 忠北大工大電氣·電子工學部 教授·工博

接受日字 : 2000年 3月 31日

最終完了 : 2000年 12月 13日

LSM(Least Square Method)과 같은 평균치 방법을 이용하였다.[5] 그러나 이러한 방법은 사고에 대한 정확한 검출은 가능하지만, 검출시간이 너무 길다는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 순시적인 검출 기법이 많이 사용되고 있으며, 특히 이를 D-Q 동기좌표계에서 구현함으로써 간단한 제어 알고리즘을 얻을 수 있다.[6] 이러한 순시적인 검출 방법을 통해 사고에 대해 빠른 검출을 할 수 있지만, 잡음 및 왜란에 대해서도 매우 민감하기 때문에 자칫 오동작을 일으킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 순시적인 검출방법에 간단한 1차 저역통과 필터(Low Pass Filter; LPF)를 삽입함으로써 잡음 및 왜란에 강인한 검출 특성을 가지도록 설계하였으며, LPF의 차단주파수와 검출시간과의 관계를 수식화하여 규명하였다. VSC는 부하에 유효전력을 공급하는 것이 주된 목적이므로, 별도의 에너지 저장장치(Energy Storage System; ESS)를 필요로 한다. 이러한 ESS로써는 정류기가 있는 커패시터, 배터리, 플라이휠 시스템[7] 그리고 초전도 에너지 저장장치(Super Magnetic Energy Storage; SMES)등이 있지만, 반드시 경제적인 면이 고려되어야 한다. 본 논문에서는 커패시터를 사용하였으며, 입출력 에너지의 관점에서 커패시터의 용량을 산정하였다.

본 논문은 크게 VSC의 기본적인 이론, sag 검출 방법, 제어 알고리즘, DC 커패시터의 용량 산정 그리고 시뮬레이션 및 결론으로 구성되어 있다. 제어기는 순시전압 제어에 그 기본을 두고 있으며, 제어기의 동특성을 향상시키기 위해 내부 루프로 전류제어기를 삽입한 이중제어구조를 채택하였다.[9] 또한 전압 sag 발생시 만들어지는 3상 불평형 조건에 대해 수식적으로 유도하고 이를 바탕으로 제어기를 설계하였다. 직류전압은 계통으로부터 정류기를 통하여 공급하고 있으며, 평상시에는 계통과 연결되어 있다가 사고 발생시에만 분리된다. 시뮬레이션은 PSCAD/EMTDC 버전 2.0을 이용하였다.

2. VSC의 기본 이론 및 제어 알고리즘

2.1 지락사고와 직렬보상

서론에서 언급한 바와 같이 대부분의 sag는 지락사고에 의해 발생한다. 일반적으로 지락사고는 번개와 같은 자연적인 현상으로 인해 발생하며, 이외에도 나무나 동물(조류), 그리고 절연파괴등에 의해서도 발생할 수 있다. 이를 지락사고의 대부분이 SLGF이며, 드물게 DLGF(Double Line to Ground Fault)나 TLGF(Three Line to Ground Fault)도 나타난다. SLGF의 경우 $\Delta-Y$ 결선의 경우 3선식이나, 4선식 모두 두 개의 상전압이 공칭전압의 58%로 나타나고 있다. $\Delta-\Delta$ 결선에서도 두 개의 선간전압이 공칭전압의 58%로 나타나고 있다. 표1에 SLGF가 발생했을 경우 각각의 변압기 결선에 따른 2차측 전압의 크기를 보여주고 있으며, 지락저항은 $0[\Omega]$ 일 경우이다.

그림 1에 배전계통에 연계된 VSC(Voltage Sag Corrector)가 보여지고 있다. 그림에서 민감한 부하는 최첨단 전자 시스템, switching power supply, control relays, ASD(Adjustable-Speed Motor Drives)등을 모두 포함하며, 이것들은 순시적인 전압강하에도 오동작을 일으킬 수 있다.

표 1 1선 지락사고에 의한 변압기 2차측 전압
Table 1 Transformer secondary voltage(p.u.) under SLGF condition

변압기 결선 (1차측 - 2차측)	선간전압			상전압		
	Vab	Vbc	Vca	Va	Vb	Vc
$\Delta - Y$	0.88	0.88	0.33	0.58	1.0	0.58
$\Delta - \Delta$	0.58	1.0	0.58	-	-	-
Y - Y	0.58	1.0	0.58	0.33	0.88	0.88
Grounded Y - Y	0.58	1.0	0.58	0.0	1.0	1.0

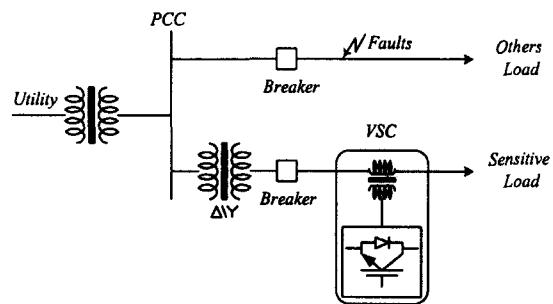


그림 1 배전계통에서의 순시전압강하 보상기

Fig. 1 VSC in distribution line

따라서 VSC는 그림과 같이 사고로부터 민감한 부하를 보호할 것이다. 본 논문에서 제안하고 있는 VSC는 구조면에서는 기존의 TCSC(Thyristor Controlled Series Compensator)와 같은 직렬보상의 형태를 취하고 있지만, 그 목적 및 제어방법에는 많은 차이가 있다. 일반적으로 TCSC의 목적은 선로임피던스를 제어하여 송전용량이 극대화 되도록 하는데 있는 반면에, VSC는 전력변환장치를 이용하여 직렬 변압기 1차측에서 발생하는 전압강하를 제어함으로써 유효전력을 계통에 공급해주는 것이 그 목적이다. 또한 TCSC는 그 스위칭 주파수가 낮기 때문에 이로 인해 고조파가 발생하고, 동특성이 매우 늦기 때문에 순시적인 전압강하 보상에는 적절하지 않다.

2.2 VSC의 수학적 해석

VSC의 목적은 순시적인 sag를 보상하는 것으로써, 위에서 언급한 바와 같이 이러한 sag의 대부분은 SLGF이며, 따라서 VSC에 있어서, 3상 불평형 조건에 대한 해석은 중요한 부분을 차지하고 있다. 먼저 3상 순시 상전압을 식(1)과 같이 표시한다.

$$v_a(t) = \sqrt{2} V_a \cos(\omega t - \theta_a) \quad (1a)$$

$$v_b(t) = \sqrt{2} V_b \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \theta_b) \quad (1b)$$

$$v_c(t) = \sqrt{2} V_c \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \theta_c) \quad (1c)$$

3상 불평형 및 비대칭인 전압, 전류는 3상 평형인 3가지 성분(정상분, 역상분, 영상분)으로 해석이 가능하며, 3상 3선식일 경우, 영상분이 발생하지 않기 때문에 정상분과 역상분만 고려하면 된다. 따라서 순시적인 정상분과 역상분은 식(1)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_p(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} [v_a(t) + av_b(t) + a^2v_c(t)] \quad (2a)$$

$$v_n(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} [v_a(t) + a^2v_b(t) + av_c(t)] \quad (2b)$$

여기서 p는 정상분을 n은 역상분을 각각 의미하며, $a = e^{j\frac{-2\pi}{3}}$, $a^2 = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이다. 식(2)는 극좌표 형식으로 표시되기 때문에 실수부와 허수부로 구분할 수 있다.

$$[Re] v_p(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[v_a(t) - \frac{1}{2}(v_b(t) + v_c(t)) \right] \quad (3a)$$

$$[Im] v_p(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[\frac{\sqrt{3}}{2}(v_b(t) - v_c(t)) \right] \quad (3b)$$

다시 식(3)을 선간전압으로 표시하면,

$$[Re] v_p(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[v_{ab}(t) + \frac{1}{2} v_{bc}(t) \right] \quad (4a)$$

$$[Im] v_p(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} v_{bc}(t) \right] \quad (4b)$$

와 같이 되고, 이는 3상 불평형 및 비대칭 조건에서도 2개의 전압 샘플링을 필요로 하게 된다. 이 값들이 A/D 컨버터를 거치게 되면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$[Re] v_p(m) = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[v_{ab}(m\Delta t) + \frac{1}{2} v_{bc}(m\Delta t) \right] \quad (5a)$$

$$[Im] v_p(m) = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} v_{bc}(m\Delta t) \right] \quad (5b)$$

여기서 m은 샘플링 순서로 0, 1, 2, ···이며, Δt 는 샘플링 간격을 의미한다. 식(5)로부터 실수축과 허수축의 크기를 추정할 수 있다.[10]

$$[Re] V_p = \frac{1}{(m+1)} \sum_{i=1}^m \{ [Re] v_p(i) \sin(i\omega\Delta t) - [Im] v_p(i) \cos(i\omega\Delta t) \} \quad (6a)$$

$$[Im] V_p = \frac{1}{(m+1)} \sum_{i=1}^m \{ [Re] v_p(i) \cos(i\omega\Delta t) + [Im] v_p(i) \sin(i\omega\Delta t) \} \quad (6b)$$

따라서 식(6)으로부터 정상분 v_p 에 대한 크기와 위상을 구할 수 있다.

$$V_p = \sqrt{Re V_p^2 + Im V_p^2} \quad (7a)$$

$$\theta_p = \tan^{-1}[Im V_p / Re V_p] \quad (7b)$$

대칭좌표법의 역상분 성분 v_n 은 정상분 성분 v_p 에 대하여 공액복소수로 나타나기 때문에 식(8)로 쓸 수 있으며, 같은 방법으로 그 크기인 V_n 과 위상인 θ_n 을 구할 수 있다.

$$[Re] v_n(m) = [Re] v_p(m) \quad (8a)$$

$$[Im] v_n(m) = -[Im] v_p(m) \quad (8b)$$

$$V_n = \sqrt{Re V_n^2 + Im V_n^2} \quad (9a)$$

$$\theta_n = \tan^{-1}[Im V_n / Re V_n] \quad (9b)$$

식(7)과 (9)로 표시되는 정상분과, 역상분, 그리고 제어에 필요한 각각의 순시량을 동기좌표계로 바꾸어 주기 위해 다음과 같은 변환행렬을 이용한다.

$$v_{dqP} = T(\theta_P) \cdot v_{abcP} \quad (10a)$$

$$v_{dqN} = T(\theta_N) \cdot v_{abcN} \quad (10b)$$

여기서,

$$v_{dqP} = \begin{bmatrix} v_{dP} \\ v_{qP} \end{bmatrix}, \quad v_{abcP} = \begin{bmatrix} v_{abP} \\ v_{bcP} \\ v_{caP} \end{bmatrix},$$

$$v_{dqN} = \begin{bmatrix} v_{dN} \\ v_{qN} \end{bmatrix}, \quad v_{abcN} = \begin{bmatrix} v_{abN} \\ v_{bcN} \\ v_{caN} \end{bmatrix}$$

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

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

이다.

2.3 동기좌표계에서의 전압 sag 검출

VSC에 있어서, 사고(sag) 검출 회로는 짧은 검출 시간과, 잡음에 대해서 둔감해야 하는 두 가지 조건을 만족시켜야 한다. 기존에 사용되었던 상대오차를 이용하거나, LSM(Least Square Method)과 같은 평균화 기법은 검출에 많은 시간을 필요로 하고, 정확한 zero crossing 검출이 필요하다는 단점을 가지고 있었다. 따라서 본 논문에서는 사고검출을 동기좌표 상에서 구현함으로써 zero crossing 검출이 필요하지 않게 하였고, 또한 잡음에 대해 VSC가 둔감하도록 LPF(Low Pass Filter)를 삽입하였다. 결국 사고 검출 시간은 LPF에 의해 결정이 되게 되며, 이 관계를 수식적으로 유도하고 시뮬레이션 결과를 보이고 있다.

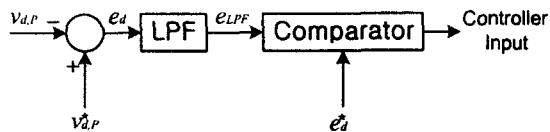


그림 2 검출 블록도

Fig. 2 Detection block diagram

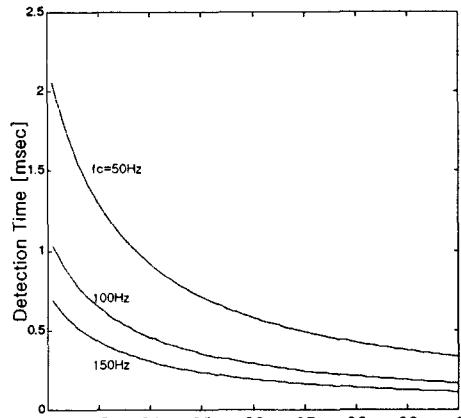
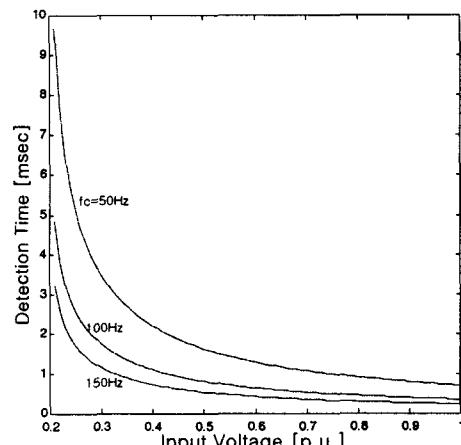
(a) $e_d^* = 0.1$ [p.u.]일 때(b) $e_d^* = 0.2$ [p.u.]일 때

그림 3 입력전압과 검출시간

Fig. 3 Input voltage and detection time

그림 2에 본 논문에서 제안하고 있는 검출 블록도를 보이고 있다. e_{LPF} 가 e_d^* 보다 작을 경우 제어기는 잡음으로 간주하고 동작하지 않을 것이고, e_{LPF} 가 e_d^* 보다 커지게 될 경우에만 제어기가 동작하게 될 것이다.

그림 2에서 e_{LPF} 가 e_d^* 와 같아질 때의 시간이 총 검출시간(T_{det})이 되므로 LPF가 1차 필터이고 그 이외의 시스템 이득을 1이라고 가정하면 전체 전달함수로부터 다음과 같이 쓸 수 있으며, 여기서 f_c 는 LPF의 차단 주파수이다.

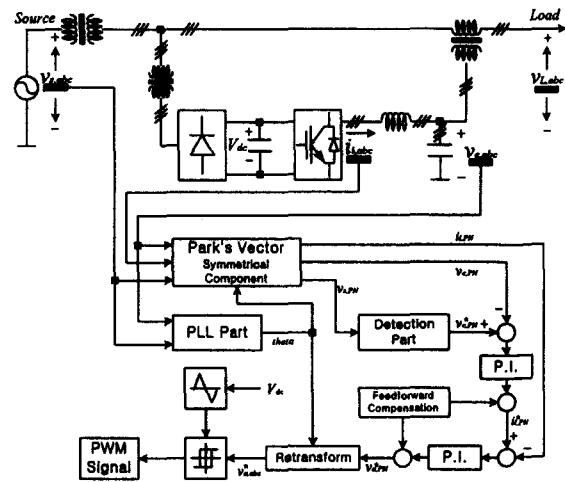


그림 4 제어 블록도

Fig. 4 Control block diagram

$$T_{det} = -\frac{1}{2\pi f_c} \ln \left(1 - \frac{e_d^*}{e_d} \right) \quad (11)$$

식(11)은 사고 검출 시간이 LPF의 차단주파수와 사고의 크기에 의해 결정됨을 의미하여, 이로부터 검출시간, 차단주파수, 그리고 입력전압과의 관계에 대한 matlab 시뮬레이션 결과가 그림 3에 보이고 있다. 그림 3으로부터 차단주파수가 높아질수록 검출시간이 짧아지지만 잡음에 민감해 진다는 사실을 알 수 있다. 결국 검출시간과 잡음에 대한 투감도는 서로 상반되는 관계에 있기 때문에 적절한 LPF의 설계가 필요하다.

2.4 동기좌표계에서의 제어 알고리즘

일반적으로 VSC의 제어기가 가져야 할 조건은 빠른 동특성, 잡음에 대한 둔감성, 그리고 고조파에 대한 절연으로, 본 논문에서는 마지막 조건에 대해서는 언급하지 않는다. 본 논문에서 제안하고 있는 제어 알고리즘은 순시제어를 기반으로 하고 있으며, 제어의 동특성을 높이기 위해 전류제어기를 내부루프로 삽입한 이중제어구조를 가지고 있다.[7] 그림 4에 전체적인 제어블럭도가 보여지고 있으며, 검출회로에서 사고라고 판단이 되는 경우에만 동작을 하게되고 그렇지 않을 경우에는 인버터의 출력전압은 항상 '0'이 될 것이다. 제어부는 그림에서 보듯이 크게 전향보상기, 궤환보상기(전압제어기, 전류제어기), 그리고 PWM 부분으로 구성된다.

전향보상기는 크게 두 가지 역할을 한다. 첫 번째는 좌표변환시 발생하는 상간 간섭을 제거하기 위해 사용한다. 두 번째는 커패시터 전압 및 부하전류를 전향보상하여 인버터 시스템 자체에 포함되어 있는 왜란을 제거할 수 있으며, 예측제어 기법을 적용한다면 제어기의 동특성도 항상 시킬 수 있다. 궤환보상기에서 가장 중요한 문제는 주입해야 할 저령전압을 결정하는 것이다. 식 (10)으로부터 동기좌표계에서 VSC가 주입해야 할 전압의 정상분과 역상분 $v_{c,PN}$ 은 다음과 같다.

$$v_{c,P} = v_{ref,P} - v_{s,dqP} \quad (12a)$$

$$v_{c,N} = v_{ref,N} - v_{s,dqN} \quad (12b)$$

여기서 $v_{ref,P} = |v_{s,abc}|$ 이고, $v_{ref,N} = 0$ 이다.

따라서 전압제어기는 식 (12)에서 구해진 $v_{c,PN}$ 를 입력(지령치)으로 받아서 실제의 커패시터 전압과 비교하여 그에러를 비례·적분기가 보상함으로써 전류제어기의 지령치인 $i_{i,dq}^*$ 를 만드는 역할을 한다. 커패시터 전압의 경우 응답 특성이 느리기 때문에 리액터 전류 제어기를 내부루프로 삽입하면 제어기의 동특성이 매우 향상된다. 전류제어기는 리액터 전류가 $i_{i,dq}^*$ 를 추종하도록 인버터 출력전압의 지령치를 만들어 준다. 이렇게 만들어진 값을 다시 역변환을 통해 실제 인버터의 출력 상전압인 $v_{a,abc}^*$ 로 변환시키게 되고 이것으로 PWM 패턴을 만들어 준다. PWM은 삼각파 비교 방식을 이용하였으며, 출력전압을 일정하게 하기 위해 DC 전압과 비교를 통해 변조도를 가변하였다.

2.5 커패시터 설계

일반적으로 Voltage Sag Corrector는 그림 5에서 보는 바와 같이 크게 에너지 저장 부분, 에너지 변환 부분, 그리고 계통과 연계시켜주는 커플링 부분(직렬변압기)으로 구분할 수 있다. 이중 에너지 저장부분은 정류기를 가진 커패시터, 배터리, FES(Flywheel Energy Storage) 그리고 SMES 등을 이용할 수 있으며, 본 논문에서는 그림과 같이 커패시터를 사용하였다.

이러한 DC 커패시터(C_i)는 평상시 정류기를 통해 충전하고 있다가 사고 발생시에는 계통과는 개방시키고, 인버터에 유효전력을 공급하게 된다. 따라서 커패시턴스를 산정하는데 있어 가장 중요한 조건은 sag의 크기와 그 지속시간이 될 것이다. 결국 이것들에 의해 VSC가 부하에 공급해야 할 전력이 결정할 수 있게 되며, 커패시터의 크기에 직결되는 문제이다. 본 논문에서는 입출력 에너지의 관점에서 커패시턴스를 산정하였으며, 커패시턴스를 구하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- ◆ 스위칭 소자 및 L-C 출력 필터의 손실 무시
- ◆ 변압기의 손실 무시
- ◆ 커패시터의 전압은 선간전압의 1.35배만큼 충전되어 있다. (정상상태)

그림 5에서 VSC의 입·출력 전력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{in} = V_{dc} \cdot I_{dc} [W] \quad (13a)$$

$$P_{out} = \sqrt{3} v_{c,p} i_o \cos \phi [W] \quad (13b)$$

여기서 $V_{dc} = 1.35 \cdot V_{LL}$ 이며, $v_{c,p}$ 는 출력 상전압을 의미한다.

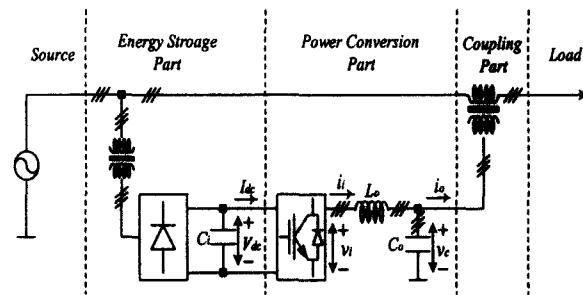


그림 5 VSC 시스템 구조

Fig. 5 Structure of VSC system

따라서 sag의 지속시간을 $T_{duration}$ 이라 하면 VSC가 부하에 공급해야 할 총 에너지는

$$W_{out} = P_{out} \cdot T_{duration} [Wh] \quad (14)$$

이 되고, 입력측 커패시터에 저장되는 에너지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} W_{in} &= \frac{1}{2} C_i (V_{dc} - V_{low})^2 [J] \\ &= \frac{0.24}{860} \frac{1}{2} C_i (V_{dc} - V_{low})^2 [Wh] \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 V_{low} 는 인버터가 선형적으로 사용할 수 있는 직류전압의 하한치이다. 따라서 입·출력 에너지는 같아야 하기 때문에

$$C_i = \frac{860 \cdot 2 \cdot W_{out}}{0.24 \cdot (V_{dc} - V_{low})^2} [F] \quad (16)$$

과 같이 된다. 따라서 보상해야 할 sag의 크기와 지속시간이 결정되고 부하의 용량이 정해진다면 식 (16)에 의해 보상기의 입력 커패시턴스를 계산할 수 있게 된다. 앞에서 언급된 바와 같이 각각의 지락사고에 대한 sag의 크기는 이미 연구 결과가 발표되어 있기 때문에 이를 바탕으로 VSC가 가져야 할 에너지 저장 장치의 용량을 산정 할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 시뮬레이션 결과

표 2에 규정되어 있는 변수들을 사용하여 PSCAD/EMTDC Ver. 2.0으로 시뮬레이션을 수행하였다. 모든 변수는 P.U.로 환산하였으며, 정격전압은 상전압에 대한 최대치이다. 주변압기는 22900/220의 변압비를 가지고 있으며, Δ/Y 결선을 채택하였다. 직렬 및 병렬 변압기는 1:1 권선비를 가진 변압기를 사용하였으며, 직렬 변압기의 1차측에서 영상전류가 발생하지 않도록 Δ 결선하였다. 스위칭소자는 IGBT를 사용하였으며 PWM 기법은 삼각파 비교방식을 사용하였다.

표 2 시뮬레이션 변수

Table 2 Simulation parameters

parameter	value	parameter	value
정격용량	10 [kVA]	스위칭 주파수	5 [kHz]
정격전압	311 [V _{peak}]	임피던스	8.4 [Ω]
정격전류	37.1 [A _{peak}]	DC Link 전압	514 [V]
주파수	60 [Hz]	LPF 차단주파수	100 [Hz]

표 3 지락저항 및 DC 커패시터

Table 3 Fault resistance and DC capacitance

Parameters	SLGF	DLGF	TLGF
Resistance	0.005[Ω]	0.005[Ω]	1.5[Ω]
Capacitance	5.9[mF]	53[mF]	5.9[mF]

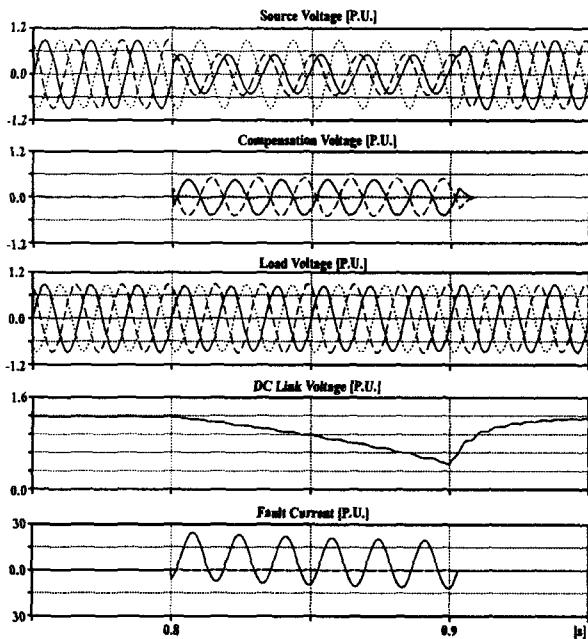


그림 6 SLGF에서의 VSC

Fig. 6 VSC in SLGF

그림 6, 7, 그리고 8은 각각 SLGF, DLGF, 그리고 TLGF가 발생했을 경우에 대한 VSC의 동작을 보여주는 시뮬레이션 결과이다. 모두 위에서부터 주변압기 2차측 전압, VSC의 보상전압, 부하전압, DC Link 전압, 그리고 지락전류를 보여주고 있으며, 각각의 단위는 모두 p.u.이다. 사고시간은 모두 110[msec]로 정하였으며, SLGF와 DLGF의 경우 지락저항을 시뮬레이션상 구현을 위해 0.005[Ω]으로 하였고, TLGF에서는 지락저항을 1.5[Ω]으로 정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 3에 각각의 사고에 대한 지락 저항 및 DC 커패시턴스를 보이고 있으며, 지락저항은 모두 임의로 정한 것으로 검출방법에 대한 연구는 추후 진행 할 계획이다.[11] 지락전류를 보면 사고 발생시 약 25 [p.u.]의 전류가 흐르며, SLGF

와 DLGF에서는 불평형 지락 전류가 흐르며, TLGF에서는 3상 평형 지락 전류가 흐름을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통해 각각의 사고시에 VSC의 보상 전압으로 인해 부하전압은 항상 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있으며, DC 전압이 인버터의 출력 전압 하한치 밑으로 내려가지 않고 있으므로, 제안된 방법에 의해 설계된 DC 커패시턴스 값이 매우 적당함을 증명하고 있다.

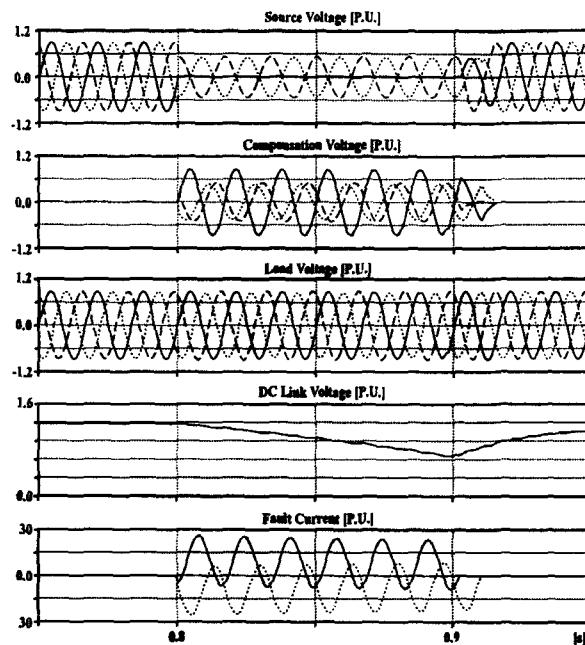


그림 7 DLGF에서의 VSC

Fig. 7 VSC in DLGF

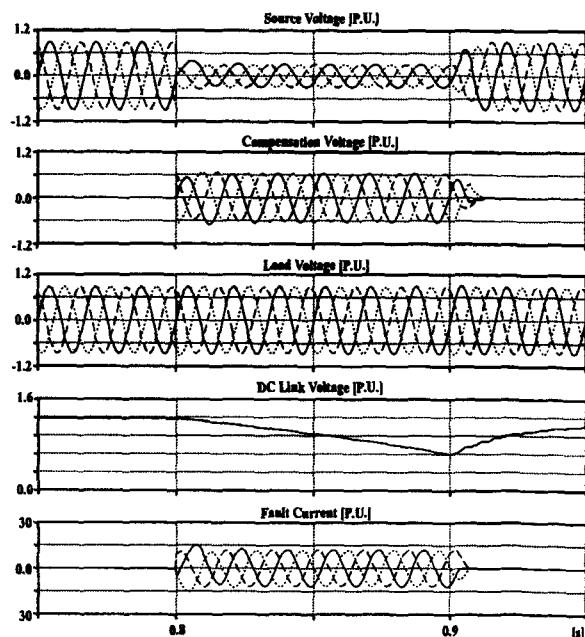


그림 8 TLGF에서의 VSC

Fig. 8 VSC in TLGF

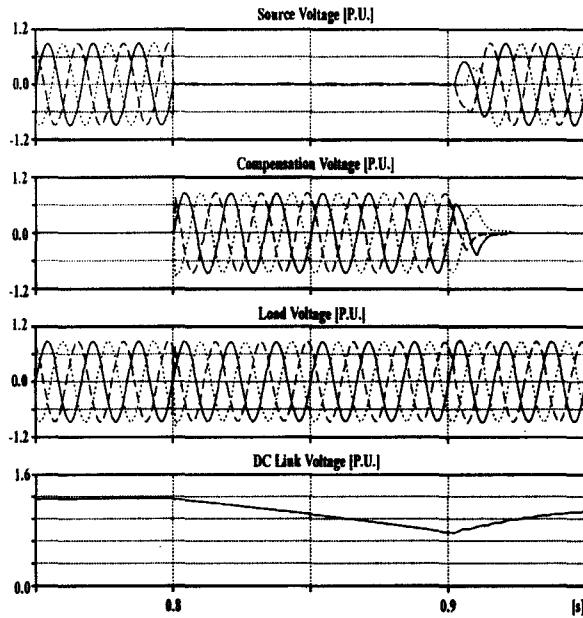


그림 9 일시적인 정전에서의 VSC

Fig. 9 VSC in temporary outage

그림 9는 순간적인 정전에 대한 시뮬레이션 결과이다. 정전기간은 100[msec]이며, DC 커페시턴스는 20[mF]을 사용하였다. 그림으로부터 본 논문에서 제안하고 있는 VSC가 DC 커페시턴스의 값에 따라 어느 정도의 일시적인 정전을 보상 할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 실험 결과

그림 10과 11은 제안된 VSC의 실험 결과이며, 전압강하를 노이즈 삽입을 위하여 "ELGA SW5250A" AC Power Supply를 이용하였다. 대부분의 실험 변수는 표 2의 시뮬레이션 변수와 동일하며, 전원장치의 제약으로 인해 용량을 1[kVA]로 낮추어 실험하였다. 그림 10은 전원의 'a'상, 'b'상 전압이 약 80% 감소했을 때의 실험 결과로써 부하전압을 일정하게 유지하고 있음을 보여주고 있다.

그림 11은 전원에 노이즈가 포함된 경우 둔감성에 대한 실험 결과로써 제안된 VSC가 노이즈 대비 매우 강한 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

표 4 실험 변수

Table 4 Experimental parameters

parameter	value	parameter	value
power rating	1 [kVA]	series transformer	1:2
voltage	160 [V]	switching frequency	4 [kHz]
current	3.61 [A]	fault duration	7 [cycle]
Power supply : ELGA SW5250A DSP : TMS320C31			

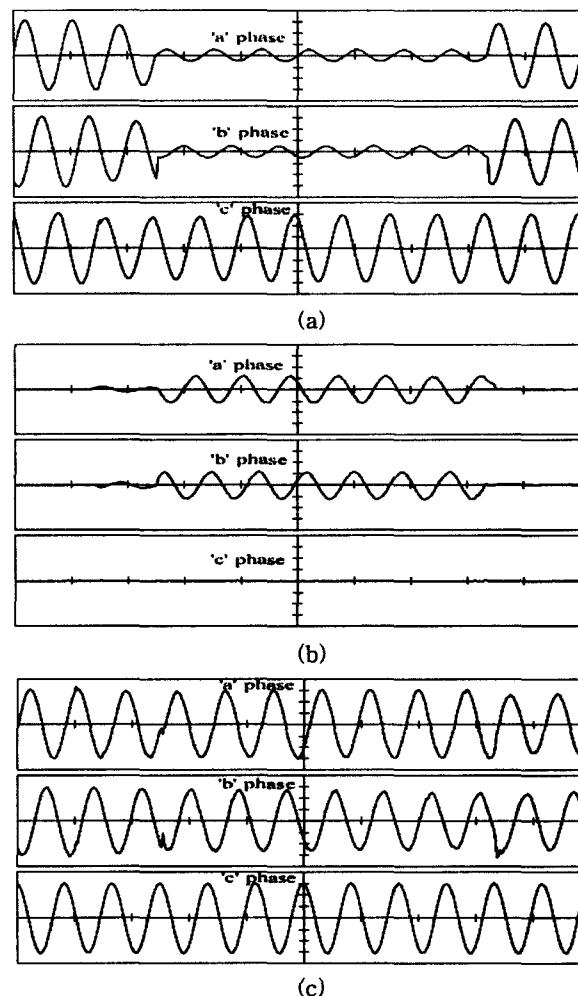


그림 10 순시적인 전압 sag에 대한 실험결과

(a) 전원전압

(b) 보상전압

(c) 부하전압

Fig. 10 Experimental results for instantaneous voltage sag

(a) source voltage

(b) compensation voltage

(c) load voltage

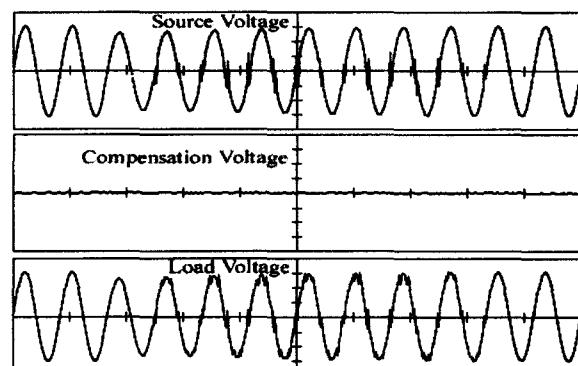


그림 11 노이즈 첨가시 실험결과

Fig. 11 Experimental result for the noise insertion

4. 결 론

본 논문에서는 배전계통에서 지락사고로 인해 발생하는 순시적인 sag를 VSC를 이용하여 보상함으로써, 전체적인 전력 품질을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 매우 간단한 검출회로는 짧은 검출 시간을 가지고 있으며, 동기좌표계에서 구현하였다. 또한 LPF를 추가함으로써 발생되는 지연시간이 검출시간에 미치는 영향을 규명하였으며, 이를 통해 기존의 논문에서는 언급되지 않았던 보상기의 둔감도에 대한 해결책을 제시하였다. 에너지 저장장치는 커패시터를 사용하였고, DC 커패시턴스의 설계를 통해 각각의 지락사고에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 본 논문에서 제안된 VSC는 빠른 동특성과 왜란에 대해 강인한 특성을 지니고 있음을 보였으며, 순시적인 sag나 일시적인 정전으로부터 민감한 부하를 보호할 수 있다는 것을 증명하였다.

참 고 문 현

- [1] Larrey E. Conrad et al, "Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags(Dips) in Revision to IEEE Std 493, the Gold Book", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.30, No.3, pp.805-821, May/June, 1994.
- [2] Erich W. Gunther et al "A Survey of Distribution System power Quality-Preliminary Results" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.10, No.1, pp.322-329, January, 1995.

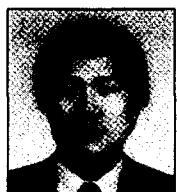
- [3] Mark F. McGranaghan et al, "Voltage Sags in Industrial Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.29, No.2, pp.397-403, March/April, 1993.
- [4] Alexander Kara et al, "Power Supply Quality Improvement with a Dynamic Voltage Restorer (DVR)", IEEE APEC, Vol.2, pp.986-993, 1998.
- [5] R. Tounsi et al, "Series Compensator for Voltage Dips : Control Strategy", EPE, pp.4929-4934, 1997.
- [6] G. Joos, "Three-Phase Static Series Voltage Regulator Control Algorithms for Dynamic Sag Compensation", IEEE ISIE, pp.515-520, 1999.
- [7] R. S. Weissbach et al, "Dynamic Voltage Compensation on Distribution Feeders using Flywheel Energy Storage", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.14, No.2, pp.465-471, April, 1999.
- [8] M. F. Granaghan, "Dynamic Sag Corrector : Cost Effective Industrial Power Line Conditioning", IEEE IAS, pp.1339-1344, 1999.
- [9] J. H. Choi et al, "Double Control Scheme of Three-Phase UPS Inverter with Low THD" Trans. on KIEE, vol.47, No.8, pp.1176-1181, August, 1998.
- [10] G. Andria et al, "Inverter Drive Signal Processing via DFT and EKF", IEE Proc., Vol.137, pt. B, March, 1990.
- [11] T. H. Ortmeyer et al, "Power quality effects of distribution system faults", IEEE Trans. on Electrical and Energy Systems, Vol.18, No.5, pp.323-329, 1996.

저 자 소 개



이 상 훈 (李 尚 勳)

1969년 7월 13일 생. 1994년 충북대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 박사과정
Tel : 043-261-2425, Fax : 043-276-7217
E-mail : shlee@power.chungbuk.ac.kr



최 재 호 (崔 載昊)

1955년 9월 27일 생. 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 졸업(석사). 1989년 동 대학원 졸업(박사). 1981~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1993년~1999년 현재 충북대학교 공과대학 전기전자공학부 교수. 1993년~1994년, 1997년~1998년 University of Toronto (Visiting Professor)
Tel : 043-261-2425, Fax : 043-276-7217
E-mail : choi@power.chungbuk.ac.kr