

3kVA급 선로응동형 동적전압보상기 개발

배병열, 이동근, 윤동진, 한병문
명지대학교

Development of 3kVA Line-interactive DVR(Dynamic Voltage Restorer)

Byung-Yeol Bae, Dong-Geun Lee, Dong-jin Yun, Byung-Moon Han
Myongji University

Abstract - This paper describes the development of a high-performance single-phase line-interactive Dynamic voltage Restorer, which is composed of an H-bridge inverter and super-capacitors. The operational feasibility was verified through computer simulations with PSCAD/EMTDC software, and experimental works with 3kVA prototype. The developed system can compensates the input voltage sag and interruption within 2ms, in which the maximum allowable duration of voltage interruption is 1.5 seconds. The developed system has a simple structure to be easily implemented with commercially available components and to be highly reliable in operation.

1. 서 론

순간정전을 보상하기 위해 개발된 전력전자기기를 DVR이라고 하는데 그동안 여러 연구자에 의해 다양한 연구가 진행된 바 있다. DVR은 에너지저장을 가지고 있어 정상상태에서는 전원에서 전력을 받아 에너지저장에 저장하고 순간정전 발생 시에는 에너지저장에 저장되어 있는 에너지를 방출하여 보상한다. 그동안 커패시터, 초전도코일, 플라이휠 등이 에너지저장으로 연구에 검토되어 왔다. 수퍼커패시터는 기존의 전해커판시티에 비해 에너지저장밀도가 대단히 높고 최근 들어 사용빈도가 증가하면서 가격도 급격히 하락하고 있다. 따라서 경쟁 대상인 초전도코일에 비해 냉각설비가 필요하지 않아 규모가 작고 가격이 저렴하며 신뢰도가 높은 장점을 갖는다. 한편 배터리는 수퍼커패시터에 비해 가격은 저렴하나 충전속도가 아주 느려 DVR에는 적용이 불가능하다.[5]

본 논문에서 제안하는 DVR은 선로응동(line-interactive)형 UPS(Uninterruptible Power Supply)와 동일한 구조로 전압Sag나 순간정전이 발생하였을 때만 지연시간 2ms 이내로 보상이 이루어지도록 설계되어 있다. 그리고 평상시에는 전력이 전원에서 부하로 직접 전달되고 에너지저장용 커패시터의 전압이 기준치 이하일 때만 충전동작을 하도록 설계되어 있다. 시스템의 동작은 EMTDC 소프트웨어로 시뮬레이션모델을 개발하여 확인하였고 하드웨어시스템의 개발을 위해 시작품을 제작하고 다양한 실험을 통해 성능을 검증하였다.

2. Line-Interactive DVR

2.1 동작원리

그림 1은 본 논문에서 제안하는 단상 DVR의 시스템구성을 나타낸 것이다. 평상시에는 양방향 싸이리스터를 통해 전원에서 부하로 직접 전력을 전달하다가 전원전압에 장애가 발생하면 제어기가 이를 신속하게 검출한 후 수퍼커패시터에 저장된 전기에너지를 H-브리지 인버터

와 변압기를 통해 부하와 병렬로 주입한다. 이때 주입된 전압은 양방향 싸이리스터를 차단함과 동시에 부하에 전력을 공급한다. 방전된 수퍼커패시터는 전원전압이 회복되면 변압기와 인버터를 거쳐 충전을 하여 다음 전원장애에 동작할 수 있도록 대비한다.

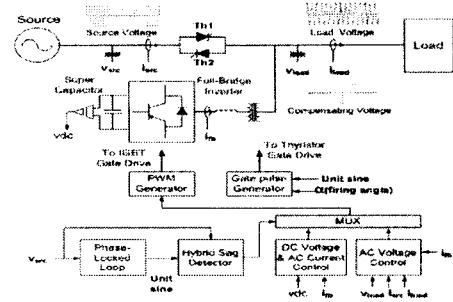


그림 1. 제안하는 단상 DVR의 구성도

Fig. 1. Configuration of proposed single-phase DVR

제안하는 DVR은 H-브리지형태의 단상인버터를 가지고 있는데 출력전압은 정현파 PWM에 의해 생성하도록 되어 있다. 출력전압이 가능한 정현파를 이루기 위해서 모듈레이션인덱스 변화에 따른 고조파분석을 실시하여 보상구간에서 가능한 고조파함유율을 최소화 되도록 하기 위해 MI가 0.6~0.88이내에서 동작하도록 설계하였다.

에너지저장의 용량은 순간정전의 지속시간과 부하용량에 따라 정해진다. 본 연구에서는 순간정전 지속시간을 2초로 정하고 부하용량은 3kVA로 가정하였다. 따라서 수퍼커패시터가 정전 시 공급해야 하는 에너지는 6kJ로 설계하였다. 수퍼커패시터뱅크는 저장에너지의 크기, 직류링크전압, 단일전압전류용량을 고려하여 설계하였다.

2.2 순간전압강하 및 순간정전 검출

일반적인 단상 전원전압은 식(1)과 같이 표현 가능하다.

$$v_s = \sum_{n=1}^N V_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (1)$$

전원전압이 기본파만 있다면 N은 1이고 그렇지 않으면 N은 1보다 큰 정수가 된다. 전자처럼 기본파만 있다면 전원전압의 순시치만으로도 정확하고 신속한 전압강하 검출이 가능할 것이다. 하지만 일반적인 전원은 후자의 경우가 대부분이므로 고조파에 따른 판단오류를 고려하지 않을 수 없다.

그래서 단상 전원의 전압강하 검출기법으로 순시치 방식과 RMS 방식, 이 2가지를 혼합한 하이브리드 구조를 채택하였다.

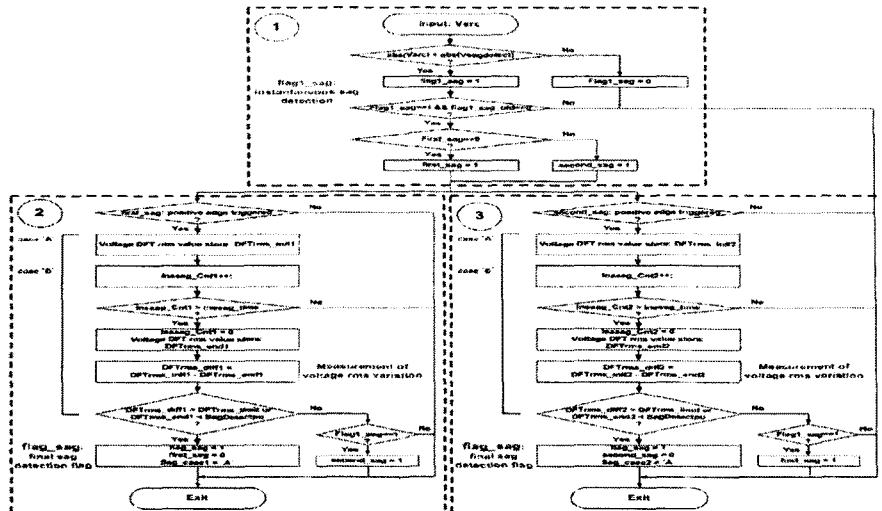


그림 2. 기본파 DFT를 이용한 Sag 검출을 위한 평균치 방식

Fig. 2 Average method for Sag detection using DFT of Fundamental Frequency

2.2.1 순시치 방식

그림 3는 전압강하 또는 순간정전을 감지하기 위한 신호를 전원전압과 같이 보이고 있다. 검출한 전원전압은 순시공정전압 피크값을 이용하여 식(2)와 같이 순시 p.u. 값으로 변환된다.

$$v_{s,pu} = v_s / v_{sp.rated} \quad (2)$$

전압강하검출 임계 순시값은 0교차점 부근의 일정영역은 크기가 작기 때문에 전압강하 검출이 무의미할 뿐만 아니라 불가능하므로 0으로 처리하였다. 전압강하 검출 임계 순시값을 v_{sagdet} 라고 정의하면 전원전압의 위상에 따라 이 값은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$v_{\text{sagdetected}} = \begin{cases} sag.pu^* \sin(epll), & \theta_1 \leq \theta \leq \pi - \theta_1 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

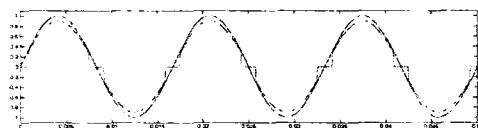


그림 3 술신처 비교방식

Fig. 3 Instantaneous Value Comparison Method

2.2.2 RMS 방식

RMS 방식은 순시치방식에 의한 전압강하 판단 후에 정격 주파수 기본파의 rms값이 전압강하로 진행 중인지 체크하는 방식으로 구성된다. 전원전압의 기본파 실효치는 DFT(Discrete Fourier Transform)를 이용하여 측정하였다.

전원전압 $v(t)$ 를 푸리에 시리즈로 표현하면 식(4)와 같다.

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \sin n\omega_0 t \quad (4)$$

$n=1$ 일 때 실수부와 허수부로 나누어 기본파의 크기를 구한다. n 이 1일 때의 계수는 다음과 같다.

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos \omega_0 t \, dt; \quad v(t) \text{의 Real} \quad (5)$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin \omega_0 t \, dt : v(t) \text{의 Imaginary} \quad (6)$$

식 (5), (6)을 DFT하면 다음과 같다

$$a_1 = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{i=0}^N v\left(t - i \frac{T}{N}\right) \cos\left(2\pi \frac{i}{N}\right) \quad (7)$$

$$b_1 = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{i=0}^N v\left(t - i \frac{T}{N}\right) \sin\left(2\pi \frac{i}{N}\right) \quad (8)$$

$$v_s^{1st} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (9)$$

식 (7)과 (8)의 결과인 a_i 과 b_i 으로 식 (9)를 통해 전원 전압 기본파의 크기인 $v_{i,1}^{(st)}$ 를 계산한다.

그림 2은 RMS 방식의 블록도를 나타내고 있다. 두 개의 흐름도로 구성되어 있으며 순시치 방식에 의한 flag로 어느 블록을 수행할지 결정하는 블록으로 구성되어 있다.

1번 블록은 순시치 방식에 의한 결과인 flag1_sag가 트리거 되면 첫 번째 블록이 수행중인지 아닌지 검사하여 아니면 수행하도록 first_sag를 1로 set 시킨다. 첫 번째 블록이 수행중이면 두 번째 블록을 수행하도록 second_sag를 1로 set 시킨다. 2번 블록은 first_sag가 set되어 있다면 전압 실효치의 현재값을 저장한 후 설정한 시간이 지난 후에 다시 전압 실효치값을 저장한다. 이 두 값의 차가 설정한 제한치보다 크거나 최종 측정한 전압 실효치가 전압강하판단 설정치보다 작다면 Sag로 판단하는 flag_sag를 1로 set 시킨다. 반대로 두 값의 차가 제한치보다 작고 최종 전압 실효치도 전압강하 판단 설정치보다 크다면 순시치 방식에 의한 결과인 flag1_sag가 set되어 있는지 체크 한 후 set 되어 있다면 3번 블록을 수행하도록 second_flag를 set 시킨다. 3번 블록은 2번 블록과 같은 구조로 구성되어 있다.

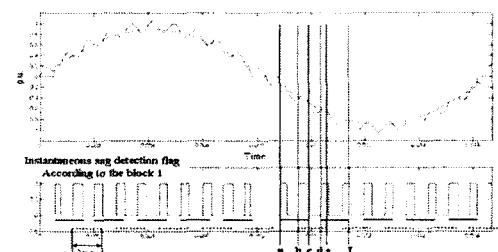


그림 4. Saq 검출 동작

Fig. 4. Saa detection process

그림 4는 그림2의 Sag 검출 블록도의 동작을 보인다. 상단의 그림은 그림 3의 1번 블록의 동작을 보이고 하단의 그림에 그 결과를 보이고 있다. 그리고 하단 그림의 실선과 점선은 2번과 3번 블록의 동작과 소요되는 시간을 나타낸다. 그림 4에서 알 수 있듯이 고조파 전압에 대해 1번 블록의 결과는 빈번하게 트리거 됨을 알 수 있으며 이를 처리하기 위해 블록 2와 3이 연속적으로 수행됨을 확인할 수 있다. 그림 4에서 실제 Sag가 “b” 지점에서 발생되었다고 가정하고 그림 3의 블록도 중 RMS 방식이 블록2만으로 구성되어있다면 그 시점 블록2는 Sag를 판단하지 못하고 다음 시퀀스의 끝 지점인 “f” 지점에 와서야 Sag를 판단하게 된다. 하지만 RMS방식이 그림 3과 같이 상호보완적 개념인 블록2와 블록3로 구성되어있다면 Sag는 “f”지점보다 빠른 “e”지점에서 검출된다.

이와 같이 순시치 방식과 RMS 방식에 의한 상호보완적 구조로 구성한 전압강하 검출 기법은 순시치 방식에 의한 신속성과 RMS 방식에 의한 정확성을 확보하였으며 검출시간은 2ms이내가 되도록 하였다.

3. 프로토타입 제작 및 시험

시뮬레이션 결과를 바탕으로 3kVA 하드웨어 프로토타입을 제작하고 그 동작을 실험으로 검증하였다. 그림 5은 제작한 단상 DVR의 사진을 나타낸 것이다. 하드웨어 시스템은 크게 단상인버터모듈과 싸이리스터스위치, 전압주입용 단상변압기, 에너지저장용 올트라커패시터뱅크, 게이트드라이브기판, 디스플레이회로기판, DSP 제어기판으로 구성되어 있다.

실험을 위해 전원전압의 sag와 정전을 모의 발생하는 별도의 전원장치를 사용하고 부하는 3kVA의 용량의 저항부하와 유도성 부하를 개발한 DVR과 결합하여 실험을 실시하였다.

개발한 DVR 시스템의 가장 큰 특징은 신속한 전압외란의 검출인데 이를 위해 2절에서 설명한 알고리즘을 실시간으로 구현하기 위해서는 고속연산이 가능한 마이크로프로세서를 필요로 한다. 또한 시스템의 동작 상태를 감시하기 위한 디스플레이에 다양한 정보를 실시간으로 연산하고 표시하기 위해서는 고성능 마이크로프로세서를 필요로 한다. 개발된 시스템에서는 TI사에서 제공하는 DSP 칩인 TSM320vc33-150을 기반으로 하는 새로운 제어보드를 설계 제작하여 사용하였다.

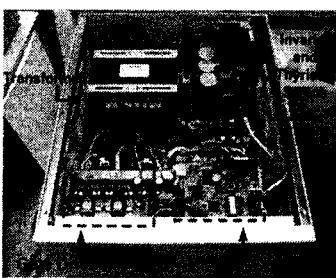


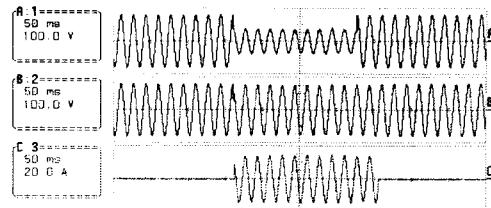
그림 5. 개발한 단상 DVR 시작품

Fig. 5. Prototype of developed single-phase DVR

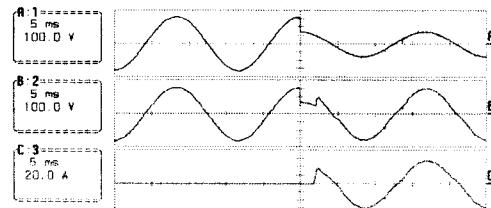
개발된 시스템은 전원 투입과 동시에 전원전압의 주파수를 연산하여 정격 주파수를 자동으로 설정하도록 되어 있으며 모든 동작은 자동으로 동작하도록 구현하였다.

그림 6의 (a)는 50% 순간전압강하가 발생하였을 경우 전원전압과 부하전압 그리고 인버터가 공급하는 보상전류를 나타낸 것이다. 그리고 그림 6의 (b)와 (c)는 보상이 시작되는 점과 종료되는 점의 과형을 확대한 것이다. 순간전압강하가 검출되고 전압주입이 이루어지기까지 약

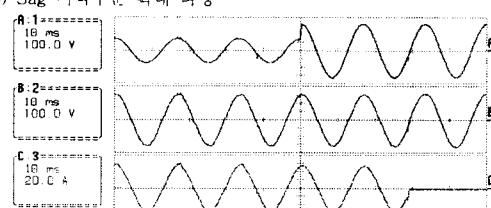
2ms 이내의 지연을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 전원전압이 원상 복귀되고 약 10ms 후에 전압주입을 하던 인버터가 차단됨을 알 수 있다. 따라서 제안하는 시스템은 순간전압강하 발생 시 우수한 보상성능을 가짐을 알 수 있다.



(a) Sag 발생 시 전원전압, 부하전압, 보상전류



(b) Sag 시작부분 확대 과형

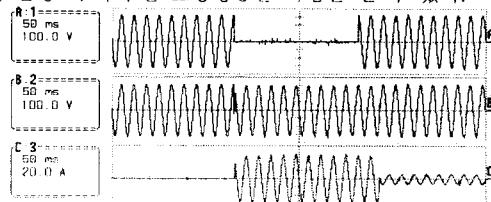


(c) Sag 종료부분 확대 과형

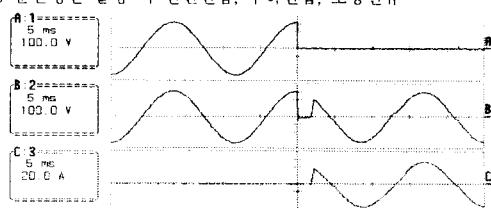
그림 6. Voltage Sag 발생 시 실험 결과

Fig. 6. Experimental results for voltage sag

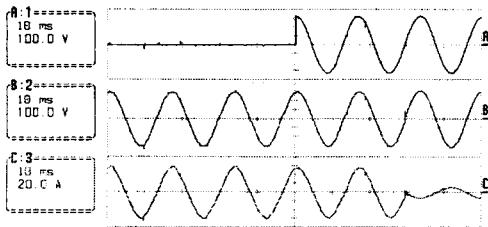
그림 7의 (a)는 순간정전이 발생하였을 경우 전원전압과 부하전압 그리고 인버터가 공급하는 보상전류를 나타낸 것이다. 그리고 그림 7의 (b)와 (c)는 보상이 시작되는 점과 종료되는 점의 과형을 확대한 것이다. 순간전압강하가 검출되고 전압주입이 이루어지기까지 약 2ms 이내의 지연을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 전원전압이 원상 복귀되고 약 10ms 후에 전압주입을 하던 인버터가 차단됨을 알 수 있다. 따라서 제안하는 시스템은 순간정전 발생 시 우수한 보상성능을 가짐을 알 수 있다.



(a) 순간정전 발생 시 전원전압, 부하전압, 보상전류



(b) 순간정전 시작부분 확대 과형



(c) 순간정전 종료부분 확대 과정

그림 7. 순간정전 발생 시 실험 결과

Fig. 7. Experimental results for voltage interruption

4. 결 론

본 논문에서는 수퍼커패시터를 이용한 단상 선로옹동형 DVR을 제안하고 그 동작특성을 EMTDC 소프트웨어로 시뮬레이션을 실시하여 확인하였다. 또한 제품개발을 염두에 두어 시작품을 제작하고 다양한 실험을 실시하여 순간정전과 전압Sag에 대해 보상이 가능한 하드웨어 프로토타입을 개발하였다.

본 논문에서 개발한 DVR은 선로옹동(line-interactive) 형 UPS(Uninterruptible Power supply)와 동일한 구조로 전압Sag나 순간정전이 발생하였을 때만 지연시간 2ms 이내로 보상이 이루어지도록 설계되어있다. 그리고 평상시에는 전력이 전원에서 부하로 직접 전달되고 에너지저장용 커패시터의 전압이 기준치 이하일 때만 충전동작을 하도록 설계되어있다.

본 논문에서 개발한 DVR은 입력전압에 민감하고 24시간 연속적으로 동작하기 때문에 고 신뢰도의 입력전원을 필요로 하는 컴퓨터, 정보통신기기, 자동화기기, 의료용기기, 반도체공정에 효율적으로 활용가능하다.

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

【참 고 문 헌】

- [1] B. Han, B. Bae, H. Kim, S. Baek, "Combined Operation of Unified Power Quality Conditioner with Distributed Generation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.21, No.1, Jan. 2006, pp.330-338.
- [2] N. Woodley, L. Morgan, A. Sundaram, "Experience with an Inverter based Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.14, No.3, July 1999, pp.1181-1186.
- [3] C. Zhan, V. Ramachandaramurthy, A. Arulampalam, C. Fitzter, S. Kromlidis, M. Barnes, N. Jenkins, "Dynamic Voltage Restorer based on Voltage-Space Vector PWM Control", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.37, No.6, Nov.-Dec. 2001, pp.1855-1863.
- [4] M. Newman, D. Holmes, J. Nielsen, F. Blaabjerg, "A Dynamic Voltage Restorer with Selective Harmonic Compensation at Medium Voltage Level", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.41, No.6, Nov.-Dec. 2005, pp.1744-1753.