

직렬 전압주입에 의한 순간전압강하 보상기기에 관한 연구

全瑩換 · 金志元 · 全鎮洪

한국전기연구원

A Study on the Instantaneous Voltage Drop Compensator through the Series Voltage Injection

Yeong-Han Chun, Ji-Won Kim and Jin-Hong Jeon

Korea Electrotechnology Research Institute

요 약

동일한 변압기에서 인출된 서로 다른 선로중 하나의 선로에서 고장이 발생하는 경우 다른 선로에서는 순간적인 전압강하 현상을 경험하게 된다. 이렇게 발생하는 순간전압강하 현상은 비록 선로의 계전기에 의해 사고가 제거되기까지의 짧은 기간동안 지속되지만 기기에 따라서는 막대한 피해를 유발할 수 있다. 예로서, 반도체 공장의 정밀 공정중 순간전압강하가 발생하면 공정이 중단되거나 공정의 재시작등으로 인하여 막대한 경제적 손실을 유발하게 된다. 또한 각종 정밀기기 등에는 기기의 수명저하를 유발하기도 한다. 본 논문에서는 전력계통에 직렬로 연결되는 인버터 시스템을 이용하여 계통에 전압을 주입함으로써 순간전압강하를 보상할 수 있는 시스템에 관하여 연구하고 운전 알고리즘을 제시하였다. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 제시한 운전알고리즘의 유효성을 입증하였다.

Abstract — The instantaneous voltage drop is occurred when the fault is happened on the nearby feeders. The instantaneous voltage drop is continued during relatively short period. But, the effect of it can be very severe to some sensitive devices. That is, it can be the reason of restart or malfunction of some devices. And these phenomenons can cause the enormous economical damage and shorten the lifetime of the devices. In this paper, the device which can compensate the instantaneous voltage drop, is studied. The device injects the voltage to the power system through the series transformer. The validity of the proposed algorithm using peak detection method is verified through the computer simulation and experiments.

1. 서 론

산업이 발달하고 각종 기기들이 고도화 및 정밀화됨에 따라 전원에 민감한 기기들이 많은 산업 현장에 사용되게 되었다^[1]. 이러한 전원에 민감한 기기는 일반적인 정전뿐만 아니라 순간적으로 입력전압의 크기가 작아지는 순간전압강하에도 큰 영향을 받게 된다^[2]. 이러한 순간전압강하의 피해사례를 보면 미국의 경우 순간전압강하 등의 전력품질 문제에 의한 손실액이 연간 26억 달러에 이르고 있는 것으로 추정된다^[3]. 국내의 경우는 전체적인 피해액이 조사되고 있지는 않지만, 반도체 공장의 경우 1회 순간전압강하 발생시 약 100억원의 손실이 발생하여 연간 약 2,000억원의 손실이 발생하는 것

으로 보도되기도 하였다. 이러한 현상에 대처하기 위하여 현재까지는 무정전 전원 공급장치(USP)가 널리 사용되어 왔다. 그러나 무정전 전원 공급장치는 기본적으로 정전에 대비한 장치로 순간전압강하가 발생하는 경우에도 입력전원을 차단하고 무정전 전원 공급장치가 모든 부하를 담당하게 된다. 실제적으로 50[%]의 전압강하가 발생하더라도 무정전 전원 공급장치는 100[%]의 전력을 부하에 공급해야 한다. 예를 들면 100[kVA]의 부하가 연결된 곳에 무정전 전원 공급장치를 설치하려면 최소한 부하와 같은 용량인 100[kVA]의 무정전 전원 공급장치를 설치해야한다. 그러나 앞에서 설명한 바와 같이 실제로 문제가 되고 있는 것은 정전보다는 순간적인 전압강하 현상인데 이를 위해서 부하용량의

100[%]되는 기기를 설치하는 것은 효율적이지 못하다. 순간전압강화 보상기기는 이러한 문제에 효율적으로 대처하기 위한 기기로 입력전압에서 강하된 부분만큼의 부족한 부분만 공급하도록 하는 장치이다. 즉 입력전압이 50[%] 강하했을 때 무정전 전원 공급장치와 같이 입력전원을 차단하고 100[%]의 전원을 공급하는 대신 입력전원에 나머지 50[%]의 전압을 더해서 부하에 항상 일정한 크기의 전압을 공급하도록 하는 장치이다. 이렇게 동작하는 순간전압강화 보상기기의 경우 전압강하분만 보상하기 때문에 무정전 전원 공급장치에 비해 용량이 현격하게 줄어들 수 있다는 장점이 있다. 따라서 순간전압강화 보상기기가 상용화된 경우 기존의 무정전 전원 공급장치 시장을 상당부분 대체할 수 있는 기기이다.

2. 순간전압강화 보상기기의 구성

순간전압강화 보상기기는 한 선로에서 지락 및 단락 사고 등이 발생할 때 동일 변압기에서 인출된 다른 선로에 연결된 부하에 순간 전압강하현상이 일어나는 것을 방지하기 위한 장치이다. 일반적으로 순간전압강화 보상기기는 3상 인버터로 구성되어 있으며, 직렬 삽입 변압기를 통하여 계통에 전압을 주입하도록 구성된다. 전체적인 계통연계 구성도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 보듯이 순간전압강화 보상기기는 F 지점에 사고가 발생하여 V_s 지점에 전압 강하가 발생할 경우 계통에 직렬로 연결된 변압기를 통하여 전압을 주입함으로써 V_L 에서는 순간 전압 강하를 경험하지 않도록 하는 장치이다. 즉, 전원전압, 부하전압 및 순간 전압강화 보상기기의 직렬변압기 2차측 출력전압을 각각 V_s , V_L , 및 V_{IVDC} 라고 할 때, 식(1)과 같이 키르히호프의 전압 법칙에 의하여 순간전압강화 보상기기 출력 전압을 조정함으로써 부하전압을 일정하게 유지할 수 있다.

$$V_L = V_s + V_{IVDC} \tag{1}$$

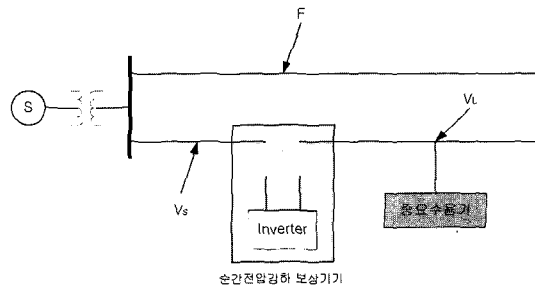


Fig. 1. Interconnection to the power system.

3. 순간전압강화 보상기기의 보상 알고리즘

제어기 내부에서 부하전압의 기준을 설정하기 위해서 전원전압의 최대 값을 검출하고 이를 정규화(normalize)시키는 방법을 이용하였다. 전원전압이 식(2)이라고 할 때 식(2)에서 전원전압의 크기 V_m 을 구하면, 전원전압과 위상이 같은 정규화된 파형을 얻을 수 있다.

$$V_s(t) = V_m \sin(\omega t + \theta) \tag{2}$$

식(2)에서 V_m 은 $V_s(t)$ 의 미분값이 0이 되는 순간의 $V_s(t)$ 의 절대값이 된다. 이렇게 구한 $V_s(t)$ 의 최대 값을 V_{md} 라고 하면, 식(3)과 같은 $V_s(t)$ 의 정규화된 값을 얻을 수 있다.

$$V_{sn}(t) = \frac{V_m}{V_{md}} \sin(\omega t + \theta) = \sin(\omega t + \theta) \tag{3}$$

여기서 V_{md} 는 $V_s(t)$ 의 반주기마다 갱신되기 때문에 전원 전압에 DC offset이 없다고 가정하면, 이론적으로 전원 전압에 변동이 있는 경우 반주기 동안의 오차를 갖는 내부 기준전압을 식(4)와 같이 얻을 수 있다.

$$V_{ref}(t) = V_{pre} V_{sn}(t) \tag{4}$$

여기서 V_{pre} 는 내부적으로 미리 설정한 부하전압의 크기이다. 따라서 순간전압강화 보상기에서 공급하여야 하는

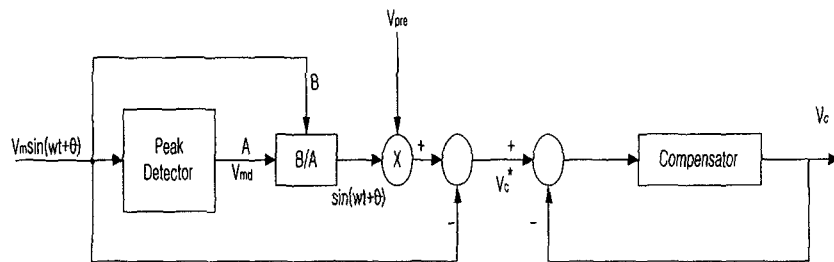


Fig. 2. Control block diagram.

보상전압은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_c^*(t) = V_{ref}(t) - V_s(t) \quad (5)$$

본 연구에서는 식(5)에서 구한 기준치를 이용하여 폐루프 제어를 수행하였다. Fig. 2에 순간전압강하 보상기기의 제어 블록도를 나타내었다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서는 앞 절에서 제시한 보상 알고리즘의 검증 을 위해서 PSCAD/EMTDC를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3에 본 논문에서 구성한 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 PSCAD/EMTDC의 시스템 모델을

을 제시하였다.

Fig. 3에 나타난 시스템 모델에는 3상 계통과 인버터를 이용한 순간전압강하 보상기기, 모의 지락사고 발생 장치 및 IGBT 구동기(Driver) 등이 포함되어 있다. 본 시뮬레이션에서는 동일한 변압기에서 인출된 두 선로 중에서 하나의 선로에 지락 또는 단락 사고가 발생하였을 경우 이로 인하여 다른 선로에 전압강하 현상을 발생시키는 것을 모의하였다. Fig. 4에는 본 시뮬레이션 모델의 기본 테스트 결과로 A상 전원전압에 순간전압 강하가 발생하는 경우의 최대 값 검출의 결과를 나타내었다.

Fig. 4에서 a는 최대 값 검출 결과를 나타내고 있고 b는 전원전압을 나타내고 있다. Fig. 4에서 보듯이 순간 전압강하 발생시에도 최대 값을 잘 추종하고 있음을 알

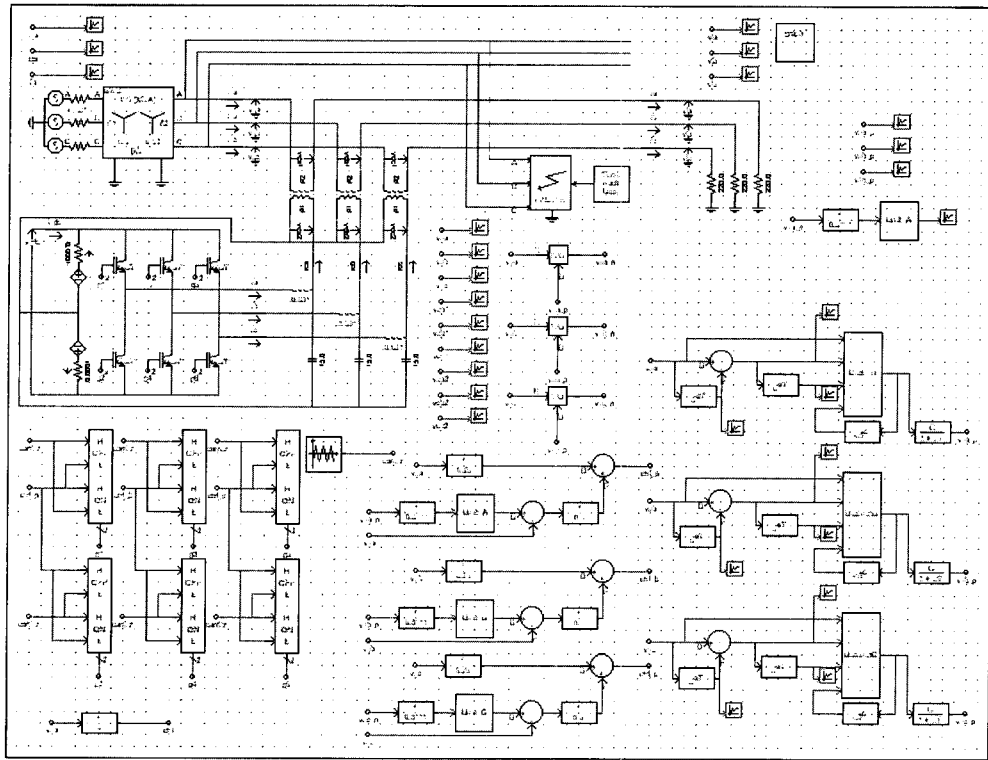


Fig. 3. EMTDC system model for computer simulation.

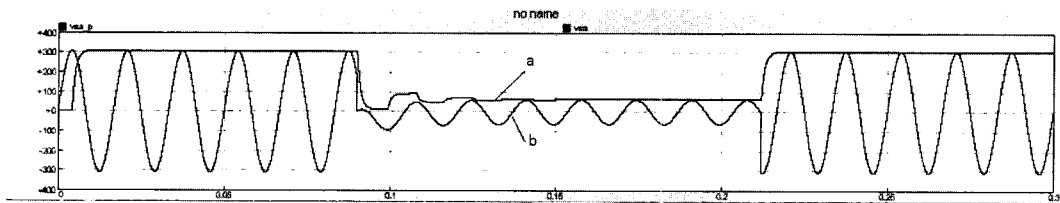


Fig. 4. Peak detection result when instantaneous voltage drop occurred.

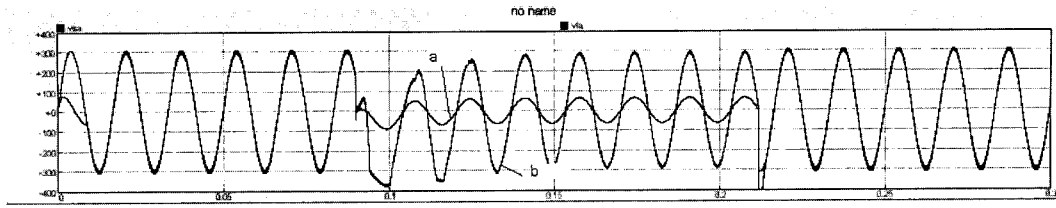


Fig. 5. Compensation result when instantaneous voltage drop occurred.

수 있다. 다음으로 Fig. 5에 순간전압강화 발생시 보상 결과를 나타내었다.

Fig. 5에서 a는 A상 전원전압을 나타내고, b는 보상된 A상 부하전압을 나타낸다. Fig. 5에서 보듯이 전원 전압에 순간전압강화 현상이 나타나는 경우 순간전압강화 보상기기의 동작에 의하여 부하전압은 약간의 과도 상태(transient)를 갖지만 약 80[%]~90[%] 정도로 일정한 크기의 전압을 유지하는 것을 알 수 있다.

5. 실험장치의 설계 및 제작

본 논문에서는 실험을 위하여 Dynamic Voltage Restorer 시제품을 제작하였다. 본 논문에서 제작한 시스템은 IGBT를 이용한 3상 인버터와 DC 링크 전압 공급

을 위한 DC-DC 컨버터로 구성된다. 제어기로는 TI사의 TMS320C32 DSP를 이용한 제어보드를 사용하였다. Fig. 6에 전체시스템의 구성도를 나타내었다.

Fig. 6에서 보듯이 순간전압강화 보상기기는 3상 인버터와 DC-DC 컨버터 및 계통연계 장치로 구성된다. 3상 인버터는 각 상을 독립적으로 제어 가능하게 하기 위하여 “split-capacitor” 구조로 구성하였으며, 일본 Fuji사의 2MB100L-120 IGBT를 사용하였다. 2MB100L-120 IGBT는 1200[V]/100[A]을 정격으로 하며, 1 module이 한 상을 구성하는 half-bridge 형태이다. 인버터 모듈에는 고장시 과전류로부터 시스템을 보호하기 위한 휴즈와 스위칭시 발생하는 순간적인 과전압으로부터 스위칭 소자를 보호하기 위한 스너버 회로가 부착되어 있다. 인버터 시스템을 구동하기 위한 IGBT 게이트 드라이버는

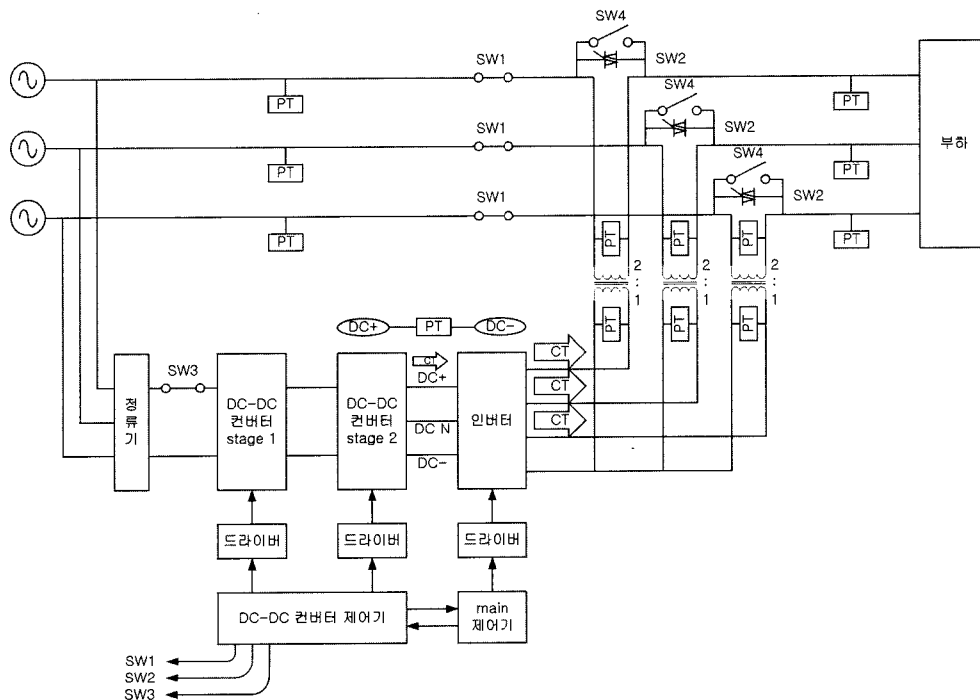


Fig. 6. Diagram of the total system.

자체적으로 제작하였으며, 드라이버 내에서 dead-time을 조정할 수 있도록 하였다. DC-DC 컨버터는 인버터의 DC 링크 전원을 확보하기 위해 설치된 것으로 일반적으로 순간전압강하 보상기에는 캐패시터 뱅크나 배터리 뱅크를 연결하여 사용한다. 그러나 캐패시터 뱅크를 이용할 경우 한번 실험을 한 후 캐패시터 뱅크를 재 충전해야 하는 번거로움이 있고, 배터리 뱅크를 사용할 경우 시스템의 크기가 커진다는 단점이 있기 때문에 본 연구에서는 DC-DC 컨버터를 사용하였다. 계통연계 장치는 고조파 필터와 연계변압기 그리고 바이패스(bypass) 스위치로 구성되어 있다. 직렬변압기는 변압비 1:2인 단상 변압기 3대를 사용하였으며 각 상당 10[kVA]의 용량을 갖는다. 고조파 필터는 10[mH]의 리액터와 5[μF]의 캐패시터를 사용하여 구성하였으며, 12[kHz]의 스위칭 노이즈를 제거하게 된다. 바이패스 스위치의 경우 순간전압강하 보상기의 고장이나 점검으로 동작이 불가능할 경우 부하에 전원을 계속해서 공급하기 위한 것으로, 마그네틱 콘택트(MC)와 SCR을 이용하여 구성하였다. Fig. 7에 제작된 순간전압강하 보상기 시제품의 사진을 나타내었다.

순간전압강하 보상기의 주 제어기로 사용된 DSP 제어기는 매우 빠른 동작 속도와 고정밀도를 갖는 제어기로 24개의 아날로그 입력 채널과 4개의 아날로그 출력

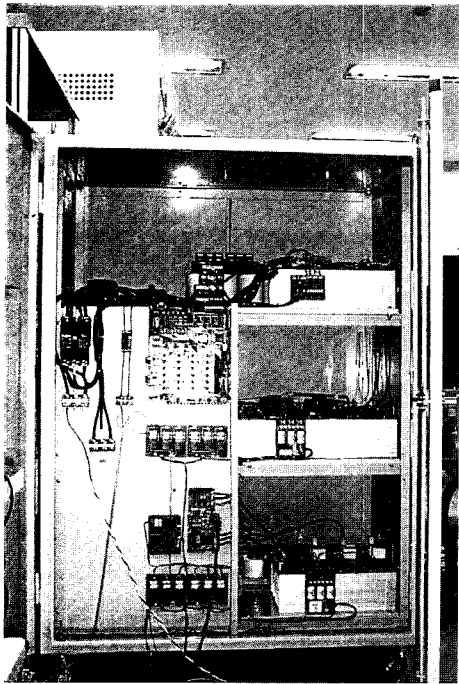
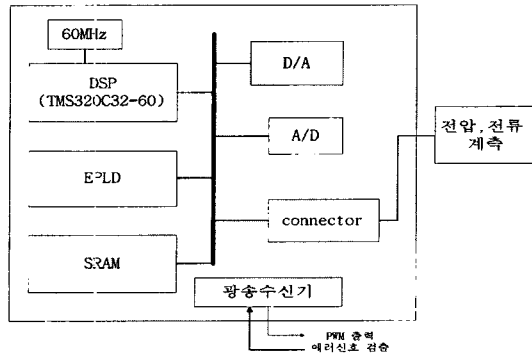


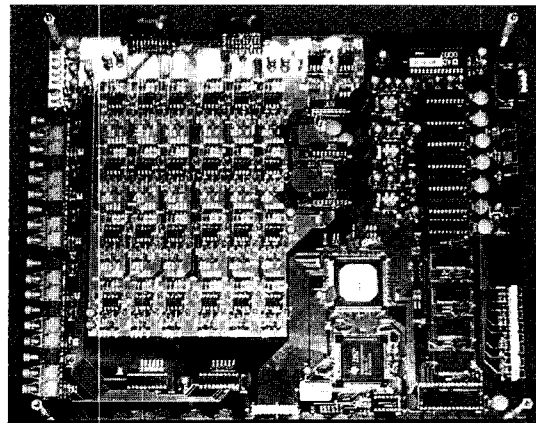
Fig. 7. Instantaneous voltage drop compensator.

채널을 보유하고, 20개의 디지털 입/출력 채널을 사용할 수 있도록 제작하였다. 본 논문에서는 14개의 아날로그 채널을 사용하여 전원전압, 인버터 출력전압, 부하전압, 인버터 출력전류 그리고 DC 링크 전압과 전류를 센싱하며 2개의 디지털 채널을 이용하여 마그네틱 콘택트와 바이패스 스위치를 구동한다. 제어기의 PWM 출력은 광 케이블을 이용하여 IGBT 드라이버로 연결된다. Fig. 8에는 제작된 DSP 제어기의 사진을 나타내었다. 제어보드에는 보드내의 각종 디지털 로직을 처리하는 EPLD가 있는데, 여기서는 ALTERA사의 EPM9560RC240-20을 사용하였다. EPM9560RC240-20은 pin to pin delay가 20[ns]이고 240개의 pin을 가진 EPLD이다. 이 IC내에는 PWM 신호 발생기, 각종 보호회로 및 각종 디코더 회로가 구현되어 있다.

계통의 고장으로 인한 순간전압 강하를 모의하기 위해서는 Fig. 9의 모의 순간전압 강하장치를 구성하였다. Fig. 9의 모의 순간전압 강하장치는 3상을 독립적으로 50[%]와 80[%]의 순간전압 현상을 모의 할 수 있는 장치로



(a) block diagram of the DSP control board



(b) photograph of the DSP control board

Fig. 8. DSP control board.

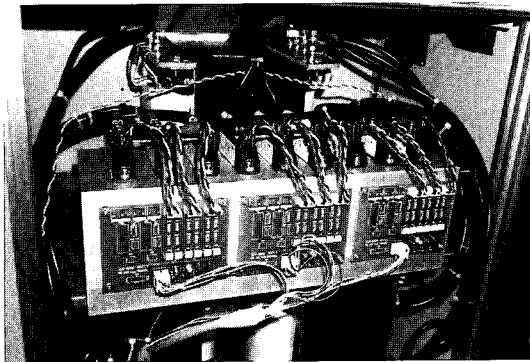


Fig. 9. Instantaneous voltage drop generator.

변압기의 탭 절환을 이용하여 장치를 구성하였다.

6. 실험 및 결과

본 논문에서는 약 0.7[sec] 정도의 순간전압 강하를 모의하고 이때 순간전압강하 보상기기의 동작으로 부하전압의 크기가 유지되는 것을 확인하였다. 먼저 Fig. 10에 Fig. 9에 나타난 장치를 이용하여 순간전압강하를 모의한 전압파형을 나타내었다.

Fig. 10에서 위쪽은 긴시간 동안의 파형을 나타내었고, 아래쪽의 그림은 순간전압강하가 발생이 시작되는 부분을 확대한 파형이다. Fig. 10과 같은 순간전압강하 현상이 계통에 발생하였을 때, 최대 값 검출을 수행한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 위쪽 파형은 전원전압의 최대 값 검출결과를 나타내고, 아래쪽 그림은 전원전압을 나타낸다.

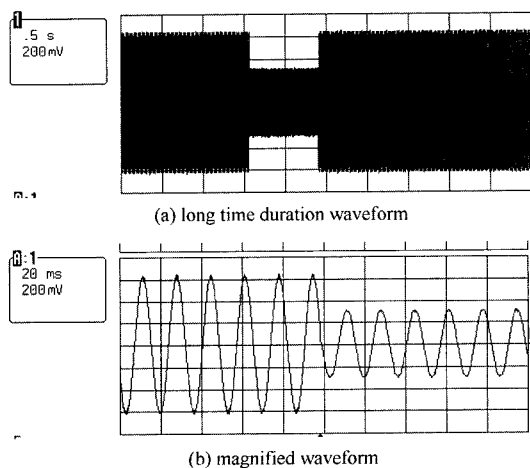


Fig. 10. Instantaneous voltage drop of the source voltage.

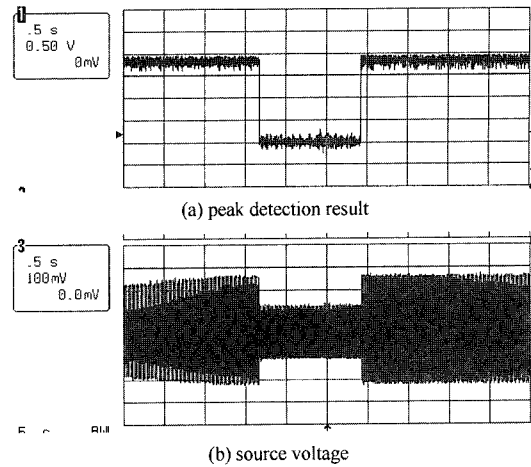


Fig. 11. Peak detect result of the source voltage.

Fig. 12와 Fig. 13에서는 각각 순간전압강하 보상기기의 보상 결과를 나타내고 있다. Fig. 12는 시간축을 길게한 경우의 파형을 나타내고 있으며, Fig. 13은 계통에 순간전압강하가 발생하여 순간전압강하 보상기기가 보상에 들어가기 시작할 때의 파형을 확대한 것이다. Fig. 12와 13에서 첫 번째 그림은 전원전압, 두 번째 그림은 인버터의 출력전압, 세 번째 그림은 부하전압 그리고 마지막 그림은 최대 값 검출 결과를 나타내고 있다. 그림 12에서 살펴보면 부하전압의 크기가 전원전압이 50[%] 까지 강하된 경우에도 90[%] 이상을 유지하고 있는 것을 알 수 있으며, Fig. 13에서 보듯이 순간전압강하 발

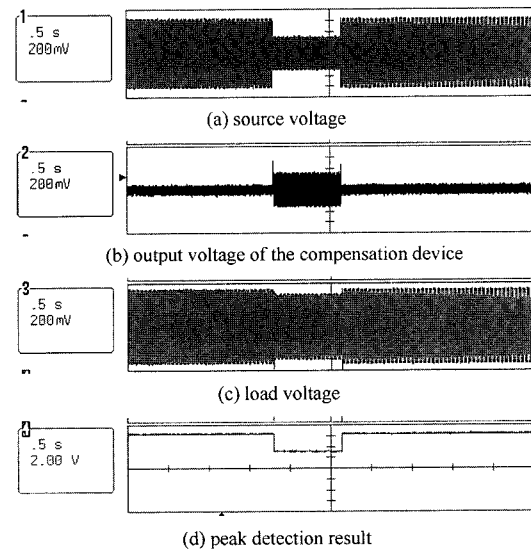


Fig. 12. Compensation result.

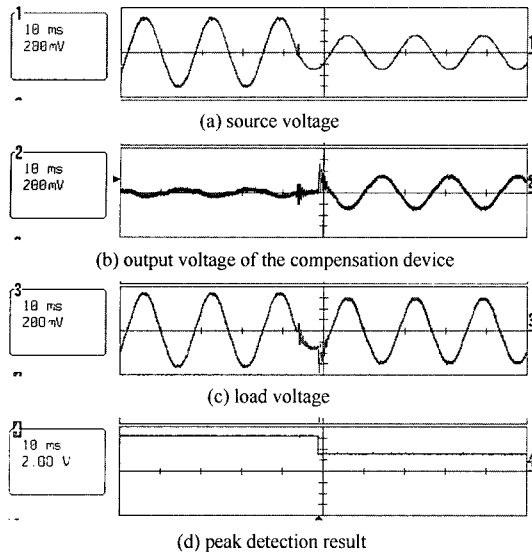


Fig. 13. Compensation result (Magnified).

생이 시작되는 부분과 끝나는 부분에서의 과도상태를 제외하면, 대체적으로 파형도 양호한 것을 알 수 있다.

이상과 같이 실험을 통하여 전원전압에 순간전압강하가 발생하더라도 부하에 공급되는 전압은 정격전압의 90[%] 이상을 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 기기를 현장에 적용하는 경우, 전원측의 순간전압 강하에 의한 기기의 재시동을 방지하여 상당한 경제적 손실을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 이상과 같이 본 논문에서는 순간전압강하 보상기기 시제품을 설계 및 제작하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증된 제어 알고리즘을 적용하여 순간전압강하 보상기기 시제품의 동작에 대한 유효성을 확인하였다.

7. 결 론

본 논문에서는 순간전압강하 보상기기에 관한 연구를 수행하였다. 순간전압강하 보상기기에 대한 제어 알고리즘을 제시하였으며, PSCAD/EMTDC를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션과 순간전압강하 보상기기 시제품 제작을 통한 실험으로 제시된 알고리즘의 유효성을 확인하였다. 본 연구에서 제작한 순간전압강하 보상기기 시제품은 전원전압에서 50[%]까지의 순간전압강하가 발생하는 경우 이를 보상할 수 있도록 설계되었으며, 보상 가능 시간은 현재 DC 링크의 에너지를 전원전압에서 충전시켜주는 형태이기 때문에 정전이 발생하지 않는 이상 계속하여 보상이 가능하다. 시뮬레이션과 실험 결과 본 연구를 통한 순간전압강하 보상기기는 전원측에 순간전압강하가

발생하는 경우에도 부하에는 그 영향이 미치지 않도록 하는 것을 확인하였다. 추후의 과제로는 순간전압강하가 발생하여 순간전압강하 보상기기가 제어동작을 수행하는 시점과 순간전압강하가 종료되어 순간전압강하 보상기기가 제어동작을 멈추는 순간에서의 과도현상을 줄이는 문제에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 본 논문에서는 보상하는 동안 전압의 크기가 순간전압강하가 발생하지 않았을 경우에 비해 90[%] 정도로 유지되는데, 이것을 개선하는 연구가 필요할 것으로 생각된다. 즉, 시스템에 대한 정밀한 모델링과 최신 제어이론을 적용한 제어기 설계로 시스템의 성능향상을 위한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Nishida, Y., Miyashita, O., Haneyoshi, T., Tomita, H. and Maeda, A.: "A Predictive Instantaneous Current PWM Controlled Rectifier with AC Side Harmonic Current Reduction", IEEE Trans. on IE, 44(3), June (1997).
2. Woodley, N.H.: "Tomorrow's Custom Energy Center Using Emerging Power Electronics", <http://www.powerquality.com/art0038/art1.htm>.
3. Woodley, N.H., Morgan, L. and Sundaram, A.: "Experience with an Inverter Based Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans. on PD, 14(3), July (1999).
4. Juan, W. Dixon, Jaime J. Garcia and Luis Moran, "Control System for Three Phase Active Power Filter which Simultaneously Compensates Power Factor and Unbalanced Loads", IEEE Trans. on IE, 42(6) (1995)
5. Collins, Jr. E.R. and Morgan, R.L.: "A Three Phase Sag Generator for Testing Industrial Equipment", IEEE Trans. on PD, 11(1), January (1996).
6. Chiang, S.J., Huang, S.O. and Liaw, C.M.: "Three Phase Multifunctional Battery Energy Storage System", IEEE Proc. Electr. Power Appl., 142(4), July (1995).
7. Edson H. Watanabe, Richard M. Stephan, and Mauricio Aredes: "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads", IEEE Trans. on PD, 8(2), April (1993).
8. David M. Brod and Donald W. Novotny: "Current Control of VSI PWM Inverters", IEEE Trans. on IA, IA-21(4), May/June (1985).
9. Steven R. Ashcraft and S. Mark Halpin, "DC-AC Inverters for Static Condenser and Dynamic Voltage Restorer Applications", Proc. of the Twenty Eighteenth Southeastern Symposium on System Theory, 31, March - 2, April (1996).

10. Nelson, R.J., Woodley, N.H., Ramey, D.G. and Gulachenski, E.M.: "Requirements for Dynamic Voltage Restoration to Relieve Distribution System Voltage Sags", American Power Conference, April (1995).
11. Chan, K. and Kara, A.: "Voltage Sags Mitigation with an Integrated Gate Commutated Thyristor Based Dynamic Voltage Restorer", 8th Intern. Conf. on Harmonics and Quality of Power, October 14-16 (1998).