

Dynamic Voltage Compensator using Series and Shunt Inverters

朴 德 義* · 李 焜 基* · 韓 炳 文** · 蘇 龍 哲*** · 金 顯 宇§

(Duk-Hee Park · Joon-Gee Lee · Byung-Moon Han · Yong-Chul Soh · Hyun-Woo Kim)

Abstract - This paper describes controller design and simulation-model development of a dynamic voltage compensator using series and shunt inverters. The control system was designed using PI controller and vector relationship between the supply voltage and load voltage. A simulation model with EMTP was developed to analyze performance of the controller and the whole system. The simulation and experiment results confirm that the dynamic compensator can restore the load voltage under the fault of the distribution system, such as single-line-to-ground fault, three-line-to-ground fault, and line-to-line fault.

Key Words : UPS(uninterruptible power supply), SPS (standby power supply), DVR(dynamic voltage restorer), FACTS(flexible ac transmission system), UPFC(unified power flow controller)

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 사용이 급증하고 있는 컴퓨터와 사무 자동화기기, 로봇과 생산 자동화기기, 의용 전자기기와 통신기기 등은 동작상 전력을 공급하는 배전 계통에서 발생하는 순간 정전, 순간전압강하, 과전압, 고조파 등과 같은 외란에 대단히 민감하다. 따라서 이 외란을 적절히 제거하지 않으면 관련장비는 고장이나 오동작을 일으켜 생산지연이나 작업중단과 같은 막대한 손실을 초래한다[1, 2, 3].

외란에 관계없이 부하가 요구하는 전압을 공급 할 수 있도록 고안되어 현재 가장 많이 사용중인 장비가 배터리와 전력변환기로 구성되어 있는 UPS이다[4]. 또한 최근에는 초전도코일을 사용한 SPS도 시험 가동중이다[5, 6]. 그런데 UPS의 경우 급전선과 부하가 완전히 분리된 구조로 인버터가 항상 부하의 최대정격으로 동작하여 손실이 큰 단점을 가지고 있다. 초전도 코일을 사용한 SPS는 낮은 정격으로 동작하는 장점은 있으나 초전도코일과 관련된 부분이 고가 임으로 경제성 문제가 대두되어 있다. 한편 에너지저장용 커패시터 뱅크를 사용한 DVR이 순간전압강하를 보상하는 장치로 많은 연구가 진행되어 왔다[7, 8]. DVR의 경우 선로와 직렬로 결합되어 전압강하가 발생한 순간동안 커패시터 뱅크에 저장된 에너지를 방출하여 보상하고 전원전압이 회복되는 순간 부하전압에 영향을 주지 않도록 서

서히 커패시터 뱅크를 충전하고 완전히 충전되면 다음 전압강하에 대비해 대기상태를 유지한다.

본 논문에서 동특성을 분석한 동적전압보상기는 두 대의 인버터로 구성되어 있으며 하나는 전원과 병렬로 그리고 다른 하나는 전원과 직렬로 연결되고 두 인버터의 직류단은 공유된 구조를 갖고 있다. 이 보상기는 FACTS에서 제안된 UPFC와 동일한 구조를 갖고며 궁극적으로 동작원리도 UPFC와 동일하다[9]. 이 보상기는 DVR과 달리 대용량의 에너지저장용 커패시터 뱅크를 요하지 않으며 순간전압강하뿐만 아니라 순간전압상승에도 유효하다. 또한 직류링크단에 별도의 에너지저장기를 부착하면 순간정전에도 사용 가능하다.

2. 보상기의 동작원리

통상 배전 계통은 하나의 모선에 여러 개의 선로가 병렬로 연결되어 있어 단일선로의 고장은 모선이나 타 선로에 정전보다는 전압강하를 유발하며, 그 크기는 전체 회로 중 관련된 선로와 기기의 임피던스에 의해 결정된다. 따라서 타 선로에 연결된 부하에 공급되는 전압의 크기는 정상전압에 비해 적으나 0은 아니다. 미국에서의 통계에 의하면 공급전압의 크기는 정격전압의 60%로 저하하는 경우가 가장 많은 것으로 알려져 있다. 한편 이 고장은 최대 500ms 이내에 해당선로의 차단기를 열어 분리함으로써 순간전압강하는 최대 500ms 동안 지속된다 [7].

그림 1은 동적전압보상기의 개념도를 나타낸 것이다. 동적전압보상기의 출력전압은 부하의 정격전압과 고장 시 강하된 모선전압의 차로 결정되며, 또한 부하전류의 크기와 위상에 의해 결정된다. 동적전압보상기에 흐르는 전류는 이상적으로는 부하전류와 동일하다.

이 전류와 동적전압보상기가 공급하는 전압의 위상관계에

* 準 會 員 : 明知大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 明知大 電氣情報制御工學部 副教授 · 工博

*** 正 會 員 : 京畿工業大學 制御計測科 副教授 · 工博

§ 正 會 員 : 敬啟大學 消防安全管理科 助教授 · 工博

接受日字 : 1999年 7月 28日

最終完了 : 1999年 10月 21日

의해 배전 계통과의 유·무효전력 출입 관계가 형성된다. 특수한 경우에는 무효전력만 공급하여도 전압보상이 가능하나 단위역률 근처에서 발생하는 순간전압강하를 보상할 경우 보상은 유효전력을 공급하여 강화된 전압을 복원해야 한다.

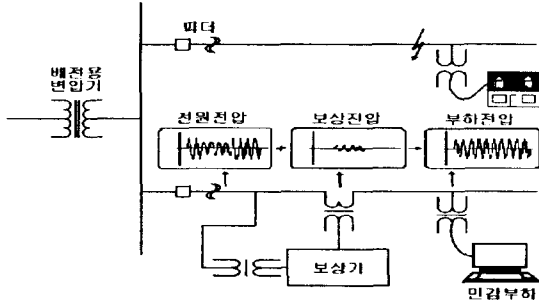


그림 1 보상기의 개념도
Fig. 1 Concept diagram of compensator

그림 2는 동적전압보상기의 동작원리를 설명하는 원리도를 간략히 나타낸 것이다. 2개의 인버터가 직류링크단을 공유하고 인버터 하나는 전원단에 병렬로 그리고 다른 하나는 전원단에 직렬로 결합된 구조를 갖는다. 편의상 병렬로 결합된 인버터를 인버터1 그리고 직렬로 결합된 인버터를 인버터2로 정의한다.

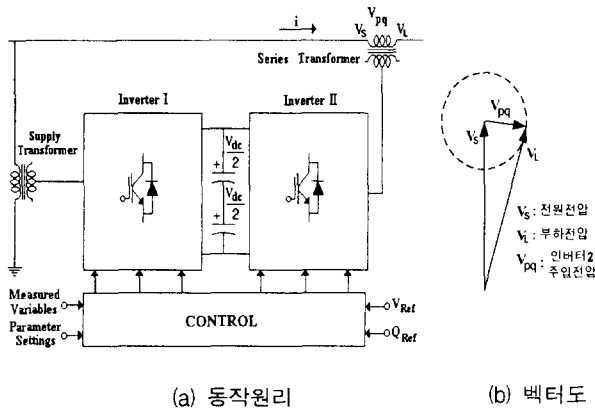


그림 2 보상기의 동작원리
Fig. 2 Principle of compensator

인버터1은 접호각을 조절하여 인버터2가 전압을 주입할 때 필요로 하는 유효전력을 흡수하거나 배전계통에 Swell 시 인버터2가 흡수하는 유효전력을 다시 계통에 방출하는 기능을 갖는다. 인버터2는 변조율과 접호각을 조절하여 주입전압의 크기와 위상각을 제어하여 주입전압 $V_{pq}(t)$ 를 생성한다. 이 주입전압 $V_{pq}(t)$ 는 직렬로 결합된 변압기에 의해 전원전압 $V_s(t)$ 와 벡터적으로 합쳐져 부하전압 $V_L(t)$ 를 생성한다. 이 직렬인버터의 출력 전압은 정상시에는 전원측의 역률을 보상하고 사고발생시 부하전압을 일정 수준으로 유지하는 기능을 한다.

역률 보상 원리는 그림 3에 보여주는 것과 같다. 먼저 전원 전류와 부하전류가 같다고 가정하고 이 전류는 부하전압에 대해서 역률각 만큼 뒤진 전류가 흐른다. 배전선로의 임피던스를 무시할 때 전원전압과 부하전압이 동상이고 크기가 같다고 생

각할 수 있고 이때 직렬인버터가 전압을 주입하여 역률각 만큼 전원전압보다 부하전압을 앞서게 하면 전류는 전원전압과 동상이 된다. 이러한 원리로 사고가 발생하지 않았을 때는 동적전압보상기는 역률보상 기능을 수행한다.

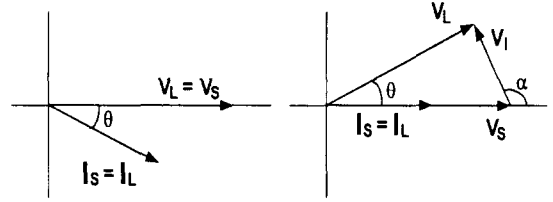


그림 3 역률 보상원리
Fig. 3 Principle of PF correction

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 모형

본 논문에서 제안한 동적전압보상기의 동작특성을 분석하기 위해서 EMTP를 이용하여 그림 4에서 보여지는 것과 같은 시뮬레이션 모형을 구성하였다. 시뮬레이션 모형은 6.6[KV], 1[MVA] 배전선로와 부하 사이에 직렬인버터와 병렬인버터가 DC Link 커패시터를 공유하는 형태로 연결되어있다.

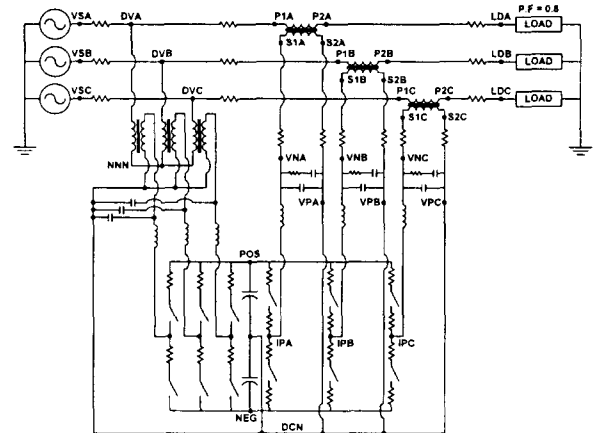


그림 4 시뮬레이션 모형
Fig. 4 Simulation model

병렬인버터는 3-폴 형태로 구성되어 있고, 직렬인버터는 선로와 직렬주입 변압기로 결합되어 있으며 병렬인버터와 동일한 3-폴 형태이다. 또한 선로의 불평형 보상을 하기 위하여 DC Link 커패시터를 두 개로 나누어 그 중간점을 3상 직렬주입 변압기와 각각 연결시킴으로써 단상 Half-Bridge 3대로 3상 인버터를 구성한 형태이다. 부하는 역률 0.8로 구성하였다.

3.2 시뮬레이션 제어기

(1) 병렬인버터 제어기

병렬인버터는 정상시 역률보상이나 선로에 사고가 발생하여 동적전압보상기가 동작할 때 사고상태에 따라서 직렬인버터가

선로에서 유효전력을 흡수할 때는 다시 선로로 유효전력을 방출하고, 직렬인버터가 선로로 유효전력을 공급할 때는 선로에서 유효전력을 흡수하는 기능을 한다. 이러한 기능을 하기 위해서 그림 5에서 보여지는 제어기를 구성하였다.

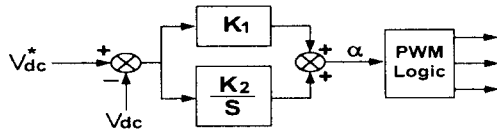


그림 5 병렬인버터 제어기
Fig. 5 Controller of shunt inverter

위 그림에서 나타난 제어기는 STATCOM의 무효전력 보상 시 DC Link 커패시터 전압을 제어하는 원리와 유사하며 직렬 인버터가 선로로 유효전력을 방출하여 DC Link 커패시터의 전압이 하강할 때는 스위칭 위상각(α)을 전원전압보다 뒤지게 하여 DC Link 커패시터의 전압을 상승시키고 반대의 경우는 α 를 전원전압보다 앞서게 하여 DC Link 커패시터의 전압을 떨어트린다. 이 제어기에서 V_{dc}^* 는 5.4KV이다. 이와 같이 동적 전압보상기가 동작할 때 선로가 어떠한 상황이면 DC Link 커패시터 전압을 일정하게 유지함으로써 직렬인버터의 원활한 동작을 보장한다.

(2) 직렬인버터 제어기

직렬인버터는 정상시에는 역률을 보상하고 선로에 사고 발생시 각 상을 독립적으로 제어하여 불평형 3상 고장전압을 보상하며 그 사고가 전압강하(Sag)와 전압상승(Swell)중 어떤 것 인지를 판단하고 적당한 위상과 크기를 갖는 전압을 선로에 직렬로 주입하여 부하전압을 일정하게 유지하는 것을 그 목적으로 한다. 이 기능을 하기 위한 제어기는 그림 6에서 보여진다. 그림 6의 제어기는 한 상에 대한 개략적인 제어방법을 보여준다. 전원전압을 전압센서로 측정하여 전원전압($V_m \sin(\omega t)$)과 90° 위상차를 가지는 신호($V_m \cos(\omega t)$)를 발생하고 본래의 전압신호와 90° 위상차를 가지는 신호가 주파수 변조기로 입력되어 전원전압과 크기는 같고 주파수가 두배인 신호를 발생한다. 이때 주파수가 두배인 신호($2\omega t$)를 만들어 주는 이유는 직렬인버터가 1/8주기 안에 사고를 검출하고 빠른 동작특성을 나타내기 위해서이다.

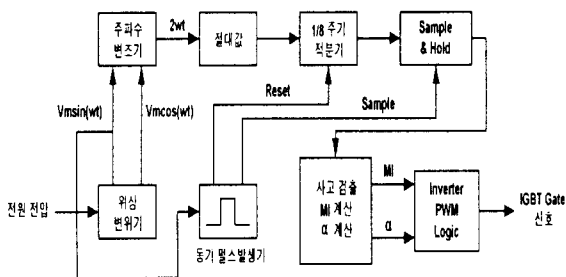


그림 6 직렬인버터 제어기
Fig. 6 Controller of series inverter

전원 주파수에 대해서 주파수가 두 배로 된 신호는 절대값을 취하고 그 신호를 전원전압에 동기 시켜서 발생되는 Reset

신호에 의해서 1/8주기씩 적분이 된다. 이렇게 1/8주기씩 적분된 값은 다시 전원전압에 동기 시켜서 발생된 Sampling 신호에 의해서 Sample & Hold에서 1/8주기 동안 유지된다. Sample & Hold에서 출력된 신호는 사고판단과 직렬인버터의 주입전압에서 위상과 MI를 계산하는데 쓰이며 계산된 MI와 위상은 직렬인버터의 PWM Logic에 들어가서 최종적인 스위칭 신호를 발생한다.

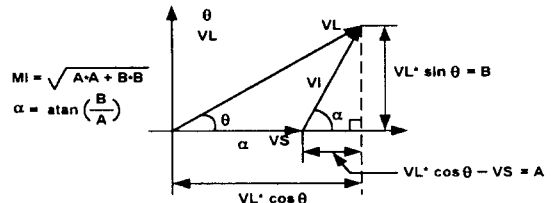


그림 7 MI와 위상 계산
Fig. 7 MI and phase calculation

그림 7에서는 선로에 사고가 발생하여 전원전압이 강하했을 때의 위상과 MI가 계산되는 방법을 벡터도와 수식으로 나타내었다. 여기서 V_L 은 보상하길 원하는 부하전압 이고 θ 는 보상된 부하전압(V_L)과 전원전압(V_S)과의 유효전력 흡수 또는 공급에 따른 적당한 위상각으로 임의로 설정된 값이며 V_L 은 인버터 주입전압이다.

위 두 개의 제어기에서 실제 하드웨어 구현시 마이크로 프로세서가 구현 가능한 MI값의 범위 안에서 빈도수가 잦은 사고를 보상하기 위한 DC Link 커패시터의 전압크기가 고려되어야 하며, 본 논문에서는 전압 Sag를 기준으로 할 때 가장 빈번하게 발생하는 사고(정격전압의 60%)를 보상시 MI값이 약 0.6 선에서 보상이 되도록 V_{dc}^* 를 정하였으며, 이것은 다른 사고의 경우도 보상이 가능하도록 MI값의 여유분을 둔 것이다.

3.3 시뮬레이션결과

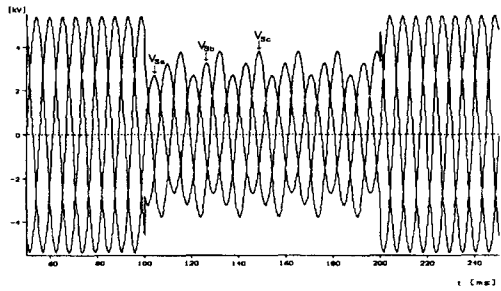
동적전압보상기의 동작특성을 분석하기 위해서 EMTP를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였는데 시뮬레이션의 편의상 선로의 사고시 전원전압이 Sag와 Swell인 경우를 분리하여 시뮬레이션을 수행했으며 시뮬레이션에서 사용된 회로정수는 표 1에 나타나 있다.

표 1 시뮬레이션 회로정수
Table 1 Parameter of simulation

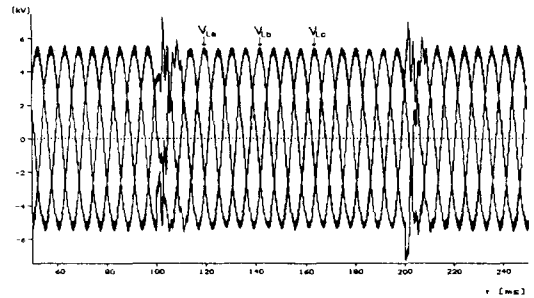
전원 전압(V_s)	6.6KV
전원 주파수	60Hz
DC Link 커패시터	2200 μ F
스위칭 주파수	3KHz
부하 역률	0.8

(1) 전압 Sag시

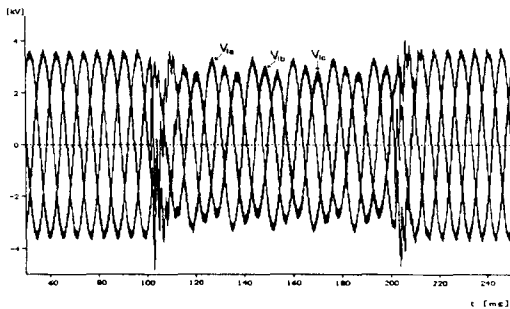
총 시뮬레이션 시간은 0.3s이며 이 시간동안 선로에 사고시간은 0.1~0.2s까지 0.1s 동안이다. 이때 선로의 A, B, C상의 전압은 각각 정상상태의 50%, 60%, 70%로 강하시켰다.



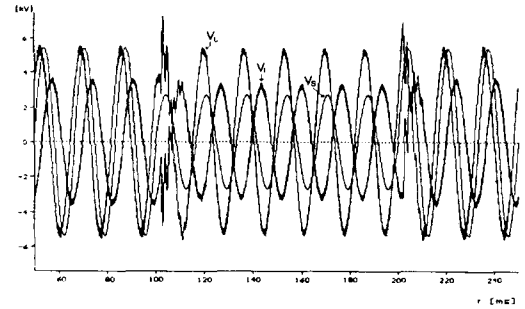
(a) 전원전압



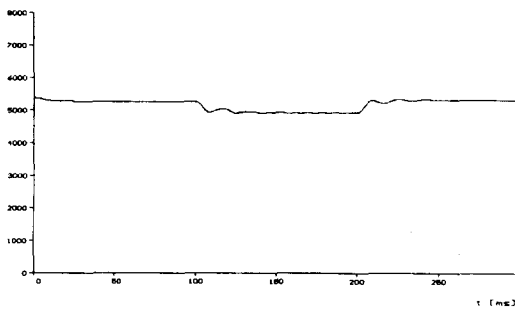
(b) 부하전압



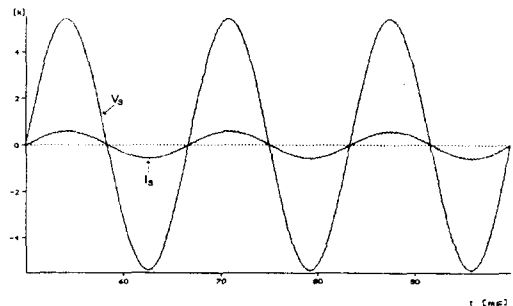
(c) 직렬인버터 주입전압



(d) A상 전원전압(V_s), 부하전압(V_L), 직렬인버터 주입전압(V_i)



(e) DC Link 커패시터전압



(f) 역률 보상시 전원 전압과 전류

그림 8 전압 Sag시 시뮬레이션결과

Fig. 8 Simulation results for voltage sag case

이때 동적전압보상기는 사고 전에는 역률을 보상하고 사고 시에는 선로에서 사고를 감지하여 선로의 사고에 의해서 불평형된 3상전압을 보상하여 부하전압을 일정하게 유지한다. 또한 유효전력은 직렬인버터에서 선로로 공급되며 병렬인버터는 강하하는 DC Link 커패시터의 전압을 선로에서 유효전력을 흡수하여 보상한다. 그림 8에는 시뮬레이션의 결과가 나타나있다.

(2) 전압 Swell시

선로에 사고가 발생하여 전압이 상승한 경우는 위의 전압이

하강한 경우와 유사하게 총 시뮬레이션 시간은 0.3s이며 사고 시간은 0.1s~0.2s까지 0.1s동안이다. 이때 선로의 A, B, C상의 전압은 각각 정상상태의 120%, 130%, 140%로 상승시켰다.

이 경우 동적전압보상기는 Sag의 경우와 동일하게 역률보상을 하다가 선로에 사고가 발생하면 선로의 사고를 감지하여 불평형 3상전압을 보상하고 부하전압을 일정하게 유지한다. 그리고 직렬인버터는 유효전력을 선로에서 흡수하고 이 흡수한 유효전력을 병렬인버터가 다시 선로로 방출한다. 시뮬레이션의 결과는 그림 9에 나타나있다.

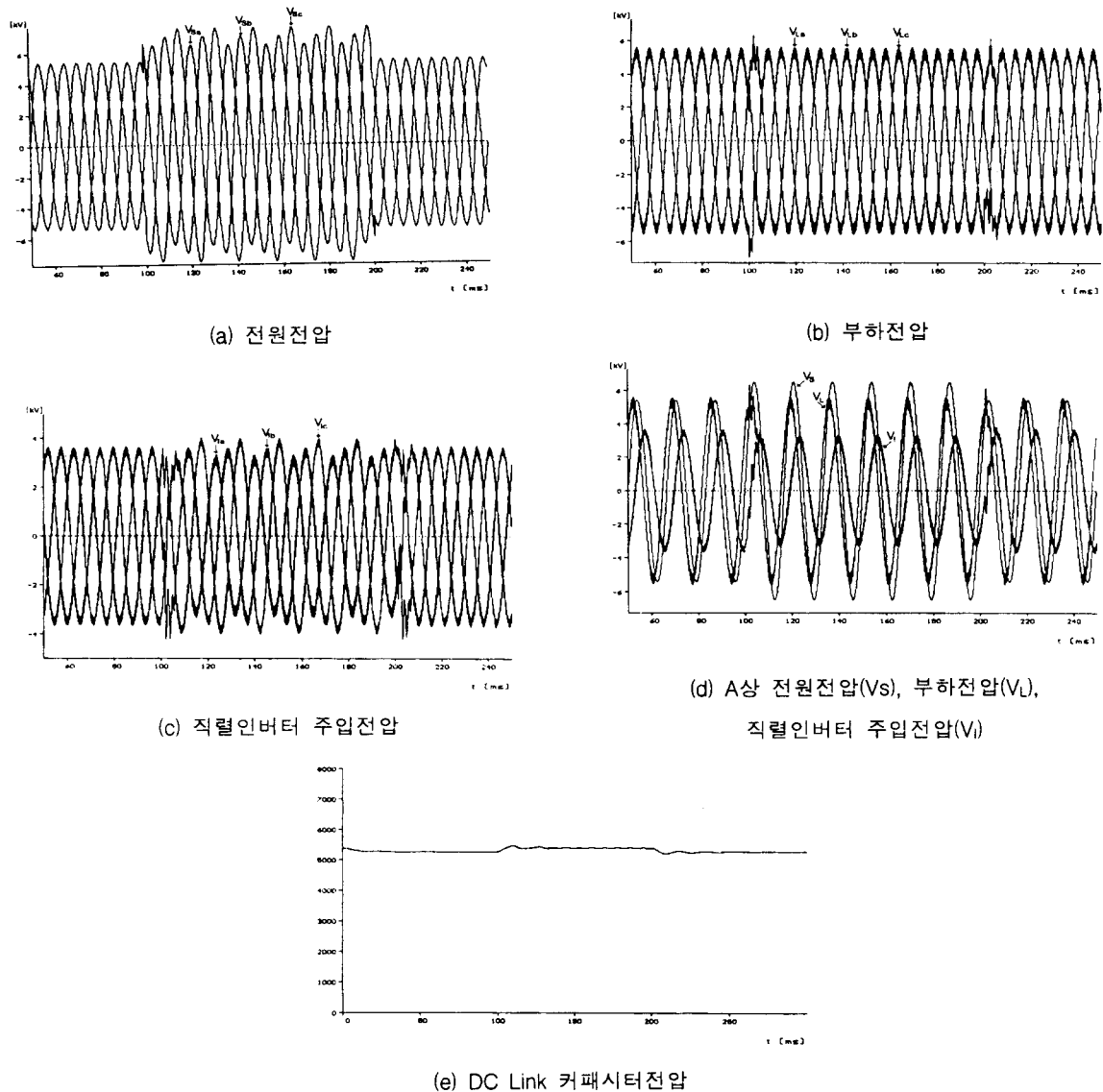


그림 9 전압 Swell시 시뮬레이션결과
 Fig. 9 Simulation results for voltage swell case

4. 실험 결과

4.1 축소 모형

제안하는 동적전압보상기의 동작을 하드웨어적으로 분석하기 위해 그림10과 같이 축소 모형을 제작하여 실험을 실시하였다. 실험은 시뮬레이션과 마찬가지로 선로의 사고 시 전원 전압이 Sag와 Swell인 경우를 분리하여 실시하였으며, 사고 이외의 구간은 역률을 보상한다.

그림 11은 직렬 인버터의 적분기를 통해 나온 신호를 S/Hold한 제어기의 출력 파형이다. 이 출력 파형에 의해 사고를 판단하고 MI를 계산하여 인버터를 동작시키고 비 사고 구간의 역률보상은 인버터의 주입전압으로 전원전압과 동상인 부하전압을 θ 만큼 위상차를 가지게 함으로써 전원전압과 부하전류의 위상을 동상으로 만들어 역률을 보상한다.

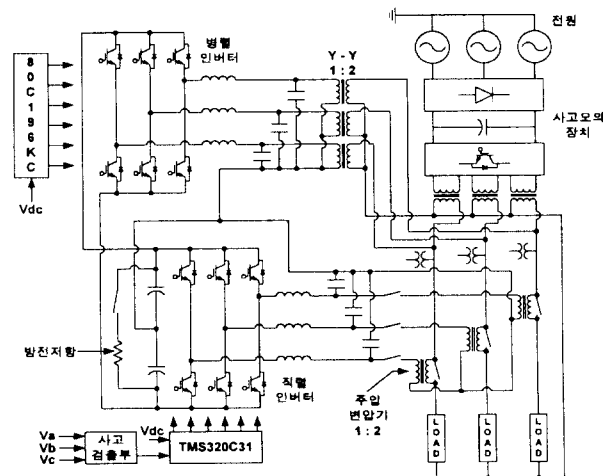


그림 10 축소 모형
 Fig. 10 Scaled model

표 2 실험 회로정수

Table 2 Parameter of experiment

전원 전압(V_{peak})	75V
전원 주파수	60Hz
DC Link 커패시터	1000 μ F
직렬인버터 스위칭 주파수	10KHz
병렬인버터 스위칭 주파수	3KHz
부하 역률	0.81

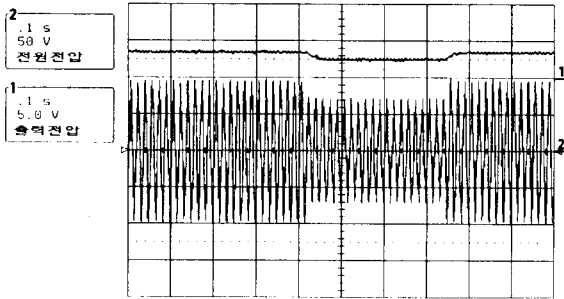
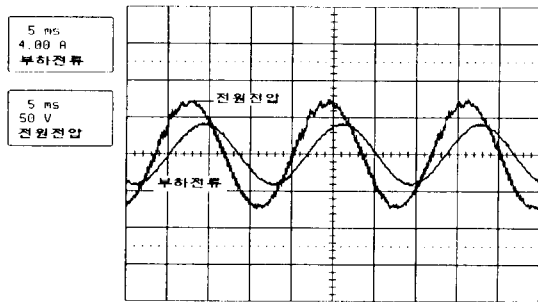
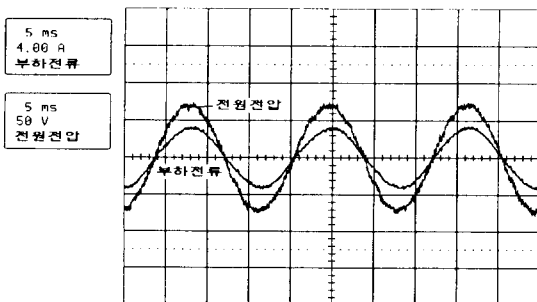


그림 11 제어기 출력파형과 전원전압
Fig. 11 Controller output and source voltage

그림 12는 역률 보상 전과 후의 파형을 도시한 것이다.

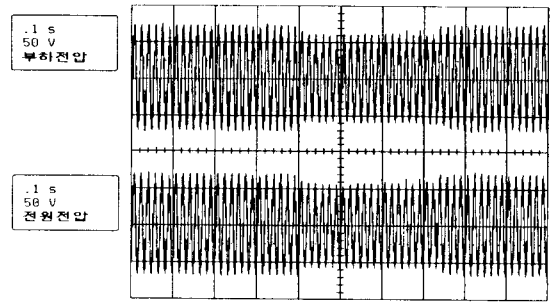


(a) 역률 보상 전 전원전압과 부하전류

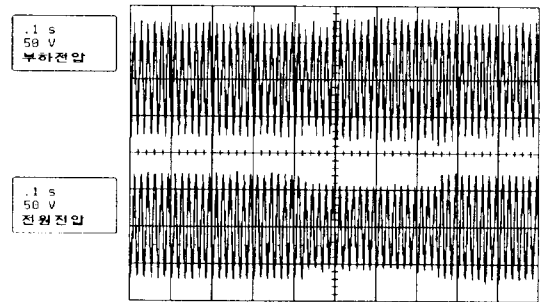


(b) 역률 보상 후 전원전압과 부하전류

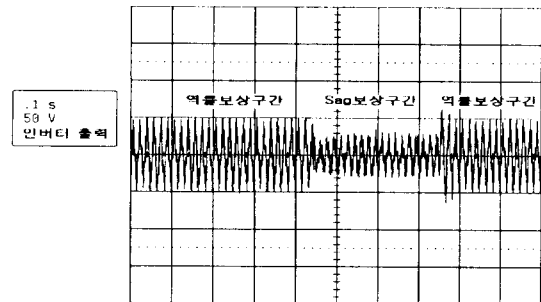
그림 12 역률 보상
Fig. 12 PF correction



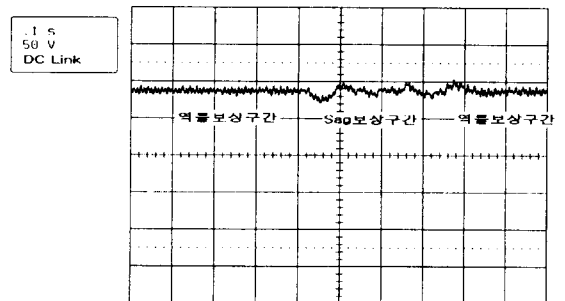
(a) 보상 전 전원전압과 부하전압



(b) 보상 후 전원전압과 부하전압



(c) 인버터 주입전압



(d) DC Link 커패시터전압

그림 13 전압 Sag 시 실험 결과

Fig. 13 Experimental results for voltage sag case

(1) 전압 Sag시

사고 시간은 18주기 0.3s 동안이다. 이때 선로의 A, B, C상의 전압은 각 정상상태의 75%로 강하시켰다. 이때 동적전압보

DC Link 커패시터의 전압을 선로에서 유효전력을 흡수하여 보상한다. 그림 13에는 실험 결과가 나타나있다.

(2) 전압 Swell시

선로에 사고가 발생하여 전압이 상승한 경우는 위의 전압이 하강한 경우와 유사하게 총 사고 시간은 0.3s 동안이며, 이때 선로의 A, B, C상의 전압은 각 정상상태의 120%로 상승시켰다.

이때 동적전압보상기는 선로의 사고를 감지하여 3상전압을 보상하고 부하전압을 일정하게 유지한다. 그리고 직렬인버터는 유효전력을 선로에서 흡수하고 이 흡수한 유효전력을 병렬인버터가 다시 선로로 방출한다. 실험의 결과는 그림 14에 나타나있다.

5. 결 론

본 논문에서는 배전 선로의 사고에 의해 발생하는 모선의 순간전압강하를 연속적으로 보상하는 동적전압보상기를 제안하고 그 동작원리와 제어방식을 이론적으로 분석하였으며, 시스템의 동작과 성능을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다. 향후 추가로 실시해야 할 연구는 고조파 전압, 전류등도 보상하며, 더 빠른 응답을 가지는 제어 알고리즘 개발과 3상 불평형 시에도 동작하는 보상기의 동작 확인 실험이다.

본 논문은 1998년도 한국과학재단 특정기초 지원 과제로 수행한 연구 결과의 일부임.
(과제번호 : 98-0101-90-01-3)

참 고 문 헌

- [1] M. H. J. Bollen, "Voltage sags: Effects, mitigation and prediction," *Power Engineering Journal*, pp. 129-134, June, 1996.
- [2] M. McGranaghan, D. R. Mueller and M. J. Samotyj, "Voltage sags in industrial systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 29, No. 2, March/April 1993.
- [3] D. Povh, K. Pregizer, M. Weinhold and R. Zurowski, "Improvement of Supply Quality in distribution systems," *CIREN'97*, Birmingham, June, 1997.
- [4] M. Yatsu, et al. "Three-phase 200kVA UPS with IGBT Consisting of High Power-factor Converter and Instantaneous Waveform-controlled HF PWM Converter", *IEEE Conference Record, IECON'90*, 1990, pp. 1057-1062.
- [5] C. DeWinkel and J.D. Lamoree "Storing power for critical loads," *IEEE Spectrum*, pp. 38-42, June, 1993.
- [6] J. Hahn, R.K. Babcock and Wilcox "Overview and progress of a mid-sized superconducting magnetic energy storage system," *Power Quality/ Power Proceeding*, sep, 1997.
- [7] Westinghouse Science & Technology Center, "A Novel Approach to Eliminate Distribution System Disturbances", *Westinghouse Research Memo 92M015*,

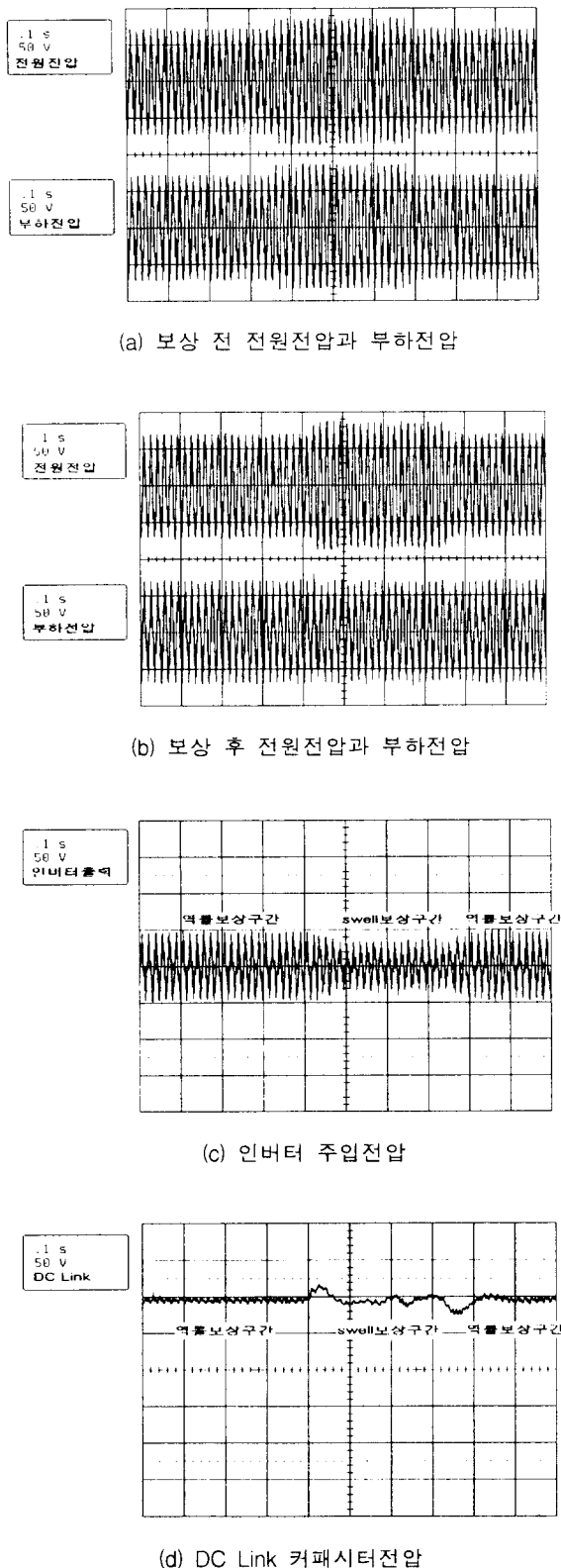


그림 14 전압 Swell 시 실험 결과
Fig. 14 Experimental Results for Voltage Swell Case

상기는 선로에서 사고를 감지하고 선로의 사고에 의해서 3상전압을 보상하여 부하전압을 일정하게 유지한다. 이때 유효전력은 직렬인버터에서 선로로 공급되며 병렬인버터는 강하하는

November, 1992.

- [8] 한병문 외 3, "순간전압강하에 대한 동적전압보상기" 대한 전기학회, 논문지 47권 8호, 1998년 8월.
- [9] L. Gyugyi, et. al., "The Unified Power Flow Controller : A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995.

저 자 소 개



박 덕 희(朴 德 羲)

1973년 2월 9일 생. 1998년 명지대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 동 대학교 전기공학과 석사과정



이 준 기(李 焜 基)

1973년 9월 14일 생. 1998년 명지대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학교 전기공학과 석사과정



한 병 문(韓 炳 文)

1953년 7월 5일 생. 1976년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 미 아리조나주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 미 Westinghouse 중앙연구소 선임연구원. 현재 명지대 전기정보제어공학부 부교수



소 용 철(蘇 龍 哲)

1959년 12월 12일 생. 1985년 명지대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 경기공업대 계측제어과 부교수



김 현 우(金 顯 宇)

1963년 4월 15일 생. 1986년 명지대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 경민대 소방안전관리과 조교수