

동적전압보상기(DVR)를 구성하기 위한 순시전압강하의 검출기법 비교

손진근\* · 석원엽\*\* · 박종찬\*\*\* · 나재동§  
 \*경원전문대학 \*\*인천기능대학 \*\*\*오산대학 §동서울대학

A Comparative Analysis of Voltage Sag Detecting Techniques for Dynamic Voltage Restorer

JinGeun Shon \* · WonYeob Suk \*\* · JongChan Park\*\*\* · ChaeDong Na§  
 \*Kyungwon College \*\*Incheon PolyTechnic College \*\*\*Osan College · §DONG SEOUL College

**Abstract** - The recent growth in the use of impactive and nonlinear loads, electronic devices sensitive to power quality has caused many power quality problems. Dynamic voltage restorers(DVR) are known as the best effective and economic means to compensate for power quality problems(especially, voltage sag and swell). In this paper, we address the detecting algorithms and implementation techniques of a voltage sag for operating DVR.

1. 서 론

전력품질의 저하문제는 뇌, 스위칭 써어지, 바람, 동물, 나무흔죽 등과 같은 자연적 원인과 대형부하의 스위칭, 전력전자소자 및 재폐로 보호방식 등의 인위적 원인 때문에 발생한다. 이러한 전력품질 문제는 거의 대부분 계통상에서 순간정전 또는 순시전압강하 등 전압의 크기문제가 상당부분을 차지하고, 그 피해 또한 매우 크게 나타난다.

이러한 전압의 크기문제는 주로 생산라인에서 전기적 외란에 민감한 장비를 가동정지 또는 오동작을 유발시켜서, 생산성 감소는 물론 컴퓨터 데이터 유실 등과 같은 불편을 겪게 한다. 이러한 문제 해결을 위한 효과적인 대안으로써 지금까지는 전력품질에 매우 민감한 부하들을 중심으로 무정전전원장치(UPS)를 설치하는 방안이 보편적으로 사용되어 왔다.

그러나 UPS는 개별 부하별로 설치할 경우 극히 제한적인 범위에 적용되는 등 효율과 비용 및 운영상에 많은 문제점을 안고 있어 최근에는 배전시스템의 광범위한 구간에서 순시전압강하 보상 등 전력품질 개선을 위한 대책이 강구되고 있으며, 그 일환으로 직렬보상장치 또는 동적전압보상기(DVR)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-3]. 이러한 DVR은 평상시 Stand-by 상태에 있다가, 순시전압강하 및 순간정전이 발생하는 순간에만 Off-line 방식으로 전압을 보상하는 방식이기 때문에 운전효율이 높은 효과적인 방식이라는 평가를 받고 있다[4-5].

따라서 본 연구에서는 DVR을 구성하기 위한 순시전압강하의 검출기법을 다양하게 검토하고, 이에 따른 구현기법을 제시하여 3상의 DVR시스템에 적용하고자 한다. 또한 본 논문을 통하여서, DVR시스템에 대한 이론검토와 회로구성에 대한 동작과정을 검증·분석하고, 실제시스템을 구현하기 위한 사전 자료로 활용하고자 한다.

2. DVR의 이론적 배경

순시전압강하의 동적전압보상장치(DVR)는 근접한 곳에서의 지락사고 및 인위적인 재폐로 보호방식으로 인하

여 발생하는 전원의 순시전압강하로부터 민감한 단위부하를 보상하기 위하여 배전계통과 직렬로 연결되어 사용된다. 이 때문에 이러한 보상장치를 직렬전압보상장치(series voltage compensator; SVC)라고도 한다.

따라서 DVR은 그림 2.1과 같이 부하에 대해 직렬 전압원으로 동작하게 되며, 부하전압을 항상 일정하게 유지하기 위해 전원전압의 부족분을 보상해 주는 장치이다. 이러한 DVR의 전력회로 주된 구성은 1) 필터를 포함한 DC/AC 에너지 변환 부분(인버터 회로), 2) AC/DC 에너지 변환 부분 및 에너지저장 디바이스, 3) 전력계통과 연결시켜주는 커플링부분(직렬 또는 매칭변압기)으로 크게 나눌 수 있다.

이때, 민감부하로 이루어진 부하전압  $v_L$  은 전원전압  $v_S$ 과 인버터(inverter)에 의한 보상전압  $v_C$ 의 합이 되며 회로의 전압방정식을 쓰면 식 (1)과 같고, 이에 대한 등가회로를 그림 2.2로 표현할 수 있다.

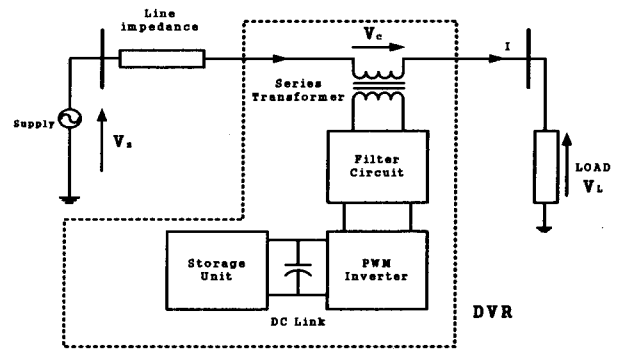


그림 2.1 DVR의 전력회로 구성

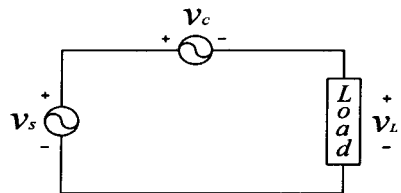


그림 2.2 DVR 시스템의 단상 등가회로

$$v_L = v_S + v_C \tag{1}$$

식 (1)에서 부하전압의 크기는 1[p.u.]로 산정하여 기준 전압으로 가정하고, 부하의 역률각이  $\phi$  라고 가정했을

경우에 부하전압과 부하전류를 극좌표 형식으로 나타내면 식 (2)와 식 (3)과 같이 표시할 수 있다.

$$v_L = 1 \quad (2)$$

$$i_L = \cos\phi - j\sin\phi \quad (3)$$

실제 배전계통에서 전원전압의 변동은 크게 두 가지의 경우를 산정할 수 있다. 첫 번째는, 사고전압이 위상은 동상이고 단순히 크기만 변하는 경우를 들 수 있는데 이때에는 부하에 유효전력만 공급하면 될 수 있다. 두 번째는, 위상과 크기가 동시에 변한 경우인데 이때의 DVR은 유효전력뿐만 아니라 무효전력도 부하에 공급해야 한다.

이러한 경우에 만일 지락사고가 발생하여 전원전압이 크기  $V$ 와 위상변위  $\theta$ 를 가진다면 전원전압은 다시 식 (4)와 같이 표시할 수 있다.

$$v_s = V\cos\theta + jV\sin\theta \quad (4)$$

따라서 위에서 표현한 식들을 이용하여 부하 및 전원의 유효전력  $P_{LS}$ 와 무효전력  $Q_{LS}$ 를 구할 수 있는데 이는 식 (5), 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$P_L + jQ_L = v_L \cdot i_L^* = \cos\phi + j\sin\phi \quad (5)$$

$$P_S + jQ_S = v_s \cdot i_L^* = V\cos(\phi + \theta) + jV\sin(\phi + \theta) \quad (6)$$

결국 위의 식 (5)와 식 (6)으로부터 인버터가 부담해야 할 보상유효전력  $P_C$  및 무효전력  $Q_C$ 는 식 (7)과 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_C = P_L - P_S = \left[1 - \frac{V\cos(\phi + \theta)}{\cos\phi}\right] \cdot P_L \quad (7)$$

$$Q_C = Q_L - Q_S = \left[1 - \frac{V\sin(\phi + \theta)}{\sin\phi}\right] \cdot Q_L \quad (8)$$

위의 계산에서 전원전압이 위상 변이가 없이 크기만 단순히 줄었다면 인버터가 보상해야 할 무효전력은 '0'이 되고, 이에 따라 식 (7)의 보상유효전력은 식 (9)와 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$P_C = [1 - V] \cdot P_L \quad (9)$$

그러므로 식 (9)는 위상 변이가 없는 전압강하의 경우 인버터의 용량은 전원전압의 크기에 의해서만 선형적으로 결정되는 것을 보여주고 있다. 그러나 위상 변이가 있는 경우에는 식 (7)과 식 (8)처럼 인버터의 용량이 위상변이와 부하의 역률에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이러한 부하의 역률은 시스템 용량뿐만 아니라 제어의 선형성 또는 인버터 입력전압(DC Link 전압)과도 깊은 관계를 가지게 됨을 알 수 있다.

### 3. 순시전압강하의 검출기법

#### 3.1 평균치 기법

순시전압강하 검출을 위한 디지털로 처리하기 위한 일반적인 기법은 평균치를 이용한 검출 방법이 있을 수 있다. 이 방법은 정해진 매 주기마다 샘플링 값을 얻어 전압을 계산하는 방식으로 정확한 검출과 잡음에는 강인한 특성을 가지지만 검출시간이 비교적 길다는 단점이 있

다. 그림 3.1의 파형은 PSIM 시뮬레이션 툴을 이용한 평균치기법의 결과 예를 나타낸 전압강하 모의파형이다.

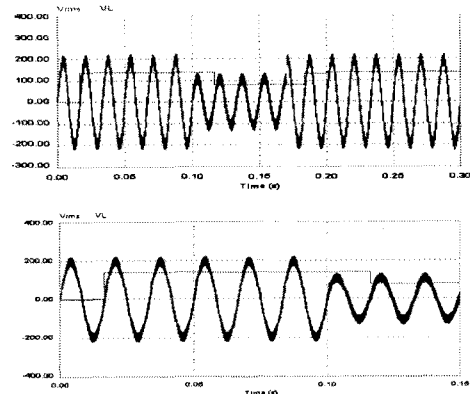


그림 3.1 순간전압강하의 평균치 기법 검출 파형

#### 3.2 순시치 기법

평균치 기법이 가지고 있는 단점을 보완하기 위한 방법으로 순시치(Instantaneous value) 알고리즘을 생각할 수 있는데, 이에 대한 개념도는 그림 3.2와 같이 표현할 수 있다. 이는 최초의 반주기동안은 정해진 샘플링 수 만큼의 정보를 저장하여 계산하게 되고, 이후의 계산은 하나의 샘플링값을 취할 때 마다 계산이 이루어지는 방식을 갖고 있는데, 이는 처음의 반주기 동안은 식 (10)을 수행하도록 하고, 이후에는 식(11)과 식(12)를 차례로 수행하도록 하면 된다.

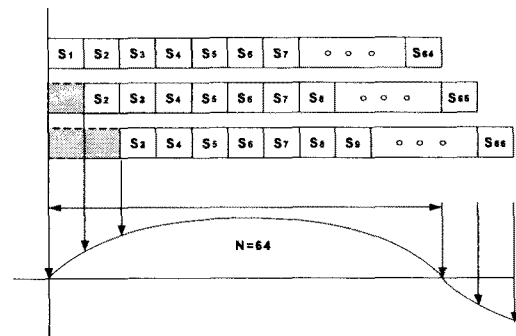


그림 3.2 순시치 검출기법의 개념도

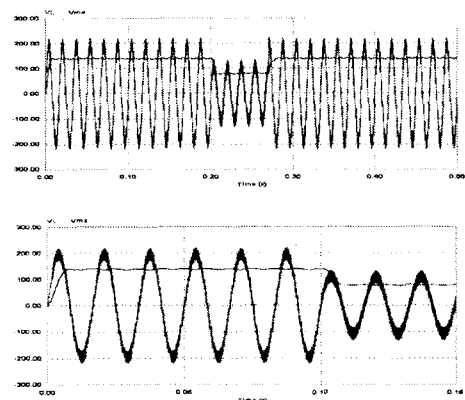


그림 3.3 순간전압강하의 순시치 검출 파형

$$R_1 = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \cdots + S_N^2}{N}} \quad (10)$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 \cdots + S_{N+1}^2}{N}} \quad (11)$$

$$R_3 = \sqrt{\frac{S_3^2 + S_4^2 + S_5^2 \cdots + S_{N+2}^2}{N}} \quad (12)$$

### 3.3 적분치 기법

DVR의 제어기법은 2장에서 설명한 바와 같이 전원에서부터 이상전압을 검출하여 보상을 수행하는 것으로 이에 대한 전압의 보상판별은 다음과 같이 적분치 기법을 적용할 수 있다. 이는 전력계통으로부터 검출된 전원전압  $v_s$ 와 기준전압(계통의 전원전압과 동기되고 있는 전압)  $v_s^*$ 와의 전압 오차를 적분하고, 이를 전과정류 하여 1/4 주기 내에서 적분을 수행, 그 결과와 보상판정 기준전압을 비교·판별하여 전압을 보상하게 된다. 이때의 전압오차에 대한 적분 누적값이 일정 한도까지 증가할 때에는 리셋신호를 추가하여 적분치는 0점으로부터 다시 시작시킬 수 있는 적분리셋회로가 필요하다.

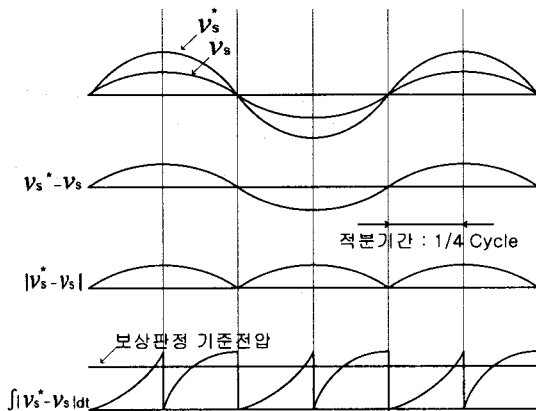


그림 3.4 적분치를 이용한 검출 알고리즘

## 4. DVR의 시스템 구성과 모의실험

### 4.1 DVR의 시스템 구성과 동작

본 논문에서 수행한 3상 DVR시스템의 전체 블럭다이어그램을 그림 4.1에 나타내었다. 시스템의 구성은 그림 2.1에서 설명한 부분 이외에도, 모드 전환스위치  $S_a, S_b, S_c$  와 에너지저장장치에 대한 고성능 DC/DC 컨버터가 추가되었으며, 이에 대한 동작은 다음과 같다.

#### ① 정상시 DVR의 동작

정상시 DVR의 동작은 다음과 같다. 즉, 전원과 부하 사이에 있는 각 상의 절환 스위치인 싸이리스터  $S_a, S_b, S_c$  가 ON되고, 필터를 포함한 각 상의 인버터는 OFF되어 계통의 전압은 싸이리스터를 통하여 부하측에 공급된다. 이때 에너지저장장치는 3상 정류기 및 고성능 DC/DC 컨버터를 통하여 전하를 축적하게 된다.

#### ② 순시적 전압강하 및 순간정전시의 DVR동작

전력계통에 순시적 전압강하 또는 순간정전이 발생하면 싸이리스터  $S_a, S_b, S_c$  가 OFF되고, 각 상의 인버터는 ON되어 계통의 부족전압 또는 정전전압이 인버터에서 발생된 전압과 더해져서 부하측에 전압을 공급하게

된다. 이때에는 에너지저장장치에 축적된 전하를 이용하여 각 상의 인버터가 전압강하분 또는 정전전압을 보상하기 때문에 부하측의 전압이 정상적으로 공급될 수 있다.

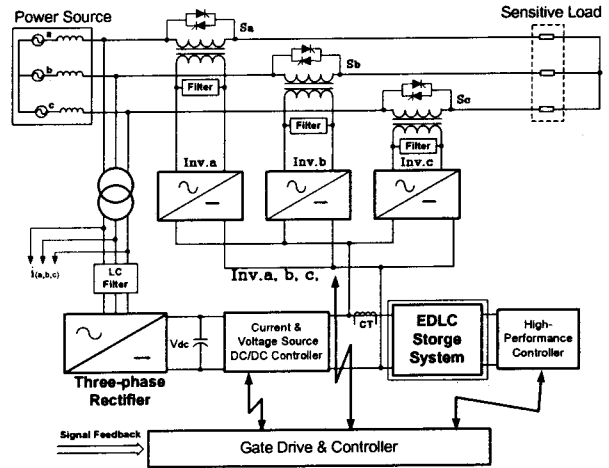


그림 4.1 DVR시스템의 전체구성도

### 4.2 모의실험 및 결과

DVR을 동작시키기 위한 적분치를 이용한 전압검출 알고리즘은 그림 3.4에서 설명한 바와 같은 순서로 진행되며, 이에 대한 동작확인 결과파형을 그림 4.2, 그림 4.3에 나타내었다.

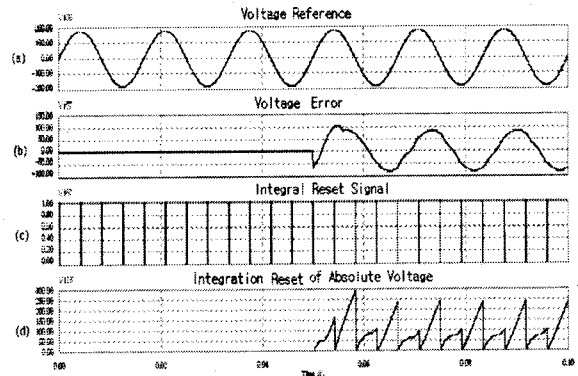


그림 4.2 DVR의 보상 판별회로 동작(1)

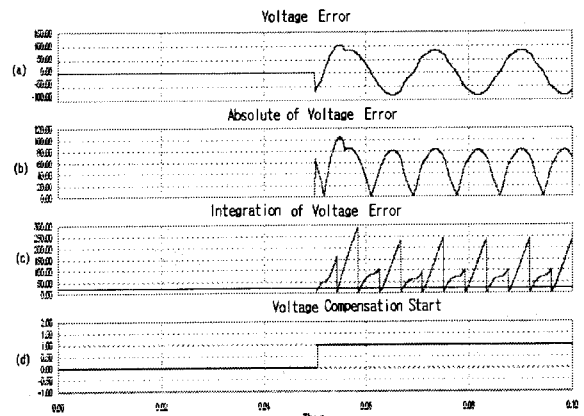


그림 4.3 DVR의 보상 판별회로 동작(2)

그림 4.2의 (a)는 오차전압을 발생하기 위한 계통전압의 기준신호, (b)는 오차전압, (c)는 적분리셋 회로의 리셋신호이고, (d)는 적분리셋에 의한 오차전압의 절대치로 연산결과를 나타낸 것이다. 그림 4.3의 (a)는 보상하기 위한 오차전압을 나타내고, (b)는 오차전압의 절대치로 연산결과를, (c)는 적분리셋에 의한 오차전압의 절대치로 연산결과를 나타낸 것이고, (d)는 절대치로 연산결과와 보상판정라인 기준전압과의 비교에 의한 보상판별 시작 신호를 각각 나타낸 것이다.

그림 4.1과 같은 전력계통 회로구성 및 그림 3.4와 같은 알고리즘을 이용하여, 약 50[ms]지점에서 순시전압 강하를 발생시켜, 부족전압에 대해서는 DVR 인버터와 매칭변압기에 의하여 보상되도록 하는 모의실험 결과를 그림 4.4에 나타내었다. 이때의 입력전압은 선간전압을 220[V] 60[Hz]로 하였으며, 전압분배 저항은 각 상 모두 5.5[Ω]로 평형인 상태로 하였으며, 부하는 7.2[Ω], 25[mH]인 유도성 부하로 하여 약 20[%]의 순시전압강하가 발생하도록 하였다.

이때 그림 4.4(a)는 계통상의 입력전압을 나타내고 있으며, (b)는 부하전압 즉, DVR 인버터에 의한 보상전압을 나타낸 그림이다. 또 (c)는 A상에 대한 DVR 인버터 출력전압을 나타내고 있는데 이는 보상하고자 하는 전압과 잘 일치되고 있음을 보여주고 있다.

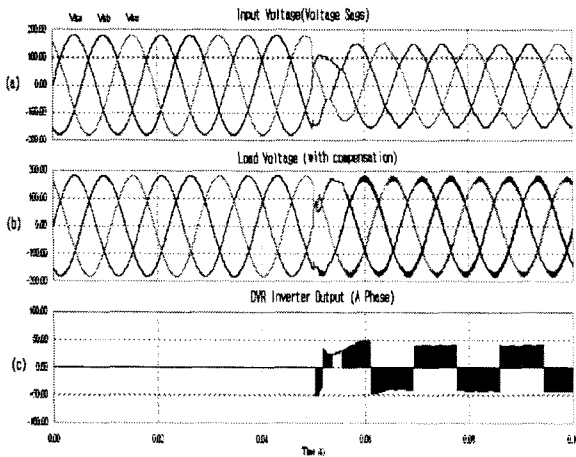


그림 4.4 Voltage Sag와 전압보상 파형(평형조건)

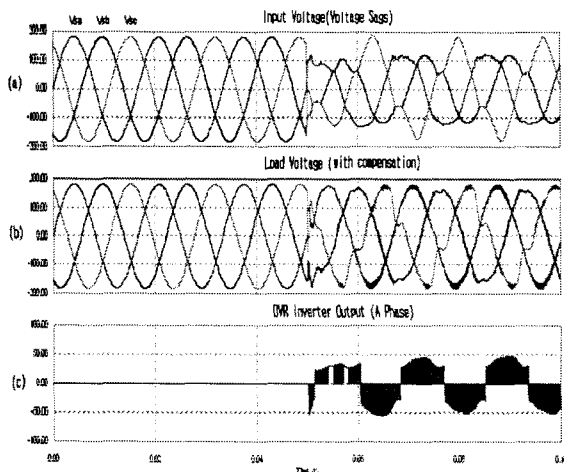


그림 4.5 Voltage Sag와 전압보상 파형(불평형조건)

그림 4.5는 입력전압이 불평형이 나타나도록 각 상의 전압분배 저항을 5.5[Ω], 11.0[Ω], 16.5[Ω]로 하였을 때의 입력과 출력파형을 나타낸 그림이고, 그림 4.6은 입력전압이 평형인 조건에서, 계통상의 부하가 불평형인 유도성 부하의 경우를 모의실험한 결과파형이다.

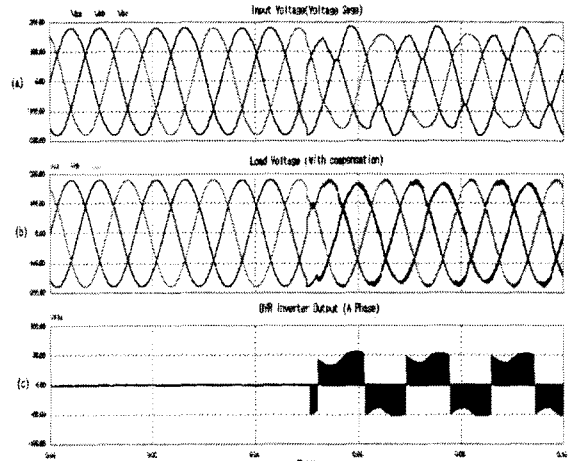


그림 4.6 불평형 부하시의 DVR의 출력전압 보상파형

## 5. 결론

본 논문에서는 전력품질의 문제에 의해서 발생하는 생산활동의 경제적 피해를 차단하기 위한 수단으로 최근에 연구되고 있는 동적전압보상기(DVR)에 관한 연구를 수행하였다. DVR에 대한 이론적 배경을 서술하고, 또한 이들 시스템을 모의 구성하여 이론의 타당성 및 동작특성을 확인하였다.

이때의 DVR은 전압의 기준과 실제의 계통전압을 계측하여 동작하게 되는데, 이러한 계측기법은 다양한 방법이 있을 수 있으나 본 논문에서는 평균치, 순시치 그리고 적분치의 기법을 각각 제시 및 구현하는 기법을 기술하였다. 이러한 기법들은 계산시간, 응답속도, 필터의 사용여부, 계측오차, 구현의 용이성 및 가격, 그리고 신뢰성 등 다양한 성능 평가함수를 거쳐 설계시 고려해야 할 것이며, 이에 대한 보다 심층적이고 또한 다양한 연구가 지속적으로 행해져야 할 것으로 본다.

## [참 고 문 헌]

- [1] D. Mahinda Vilathgamuwa *et al*, "Voltage Sag Compensation With Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer", *IEEE Trans., POWER DELIVERY*, Vol.18, NO.3, pp.928-936, July 2003.
- [2] 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.
- [3] Neil H. Woodley, L. Morgan, A. Sundaram, "Experience With An Inverter-Based Dynamic Voltage Restorer", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, July 1999
- [4] Eric John, "Experience with a Static Series Compensation Device(DVR) at a Semiconductor Facility", *ABB Power T&D Company Inc.*, April 1999
- [5] L. Heinemann, G. Mauthe, J.J. Maillet, and M. Hellum, "Power-Quality - The New Paradigm for MV Power Distribution", *ABB Review: Focus on Transmission and Distribution*, The corporate Technical Journal of the ABB Group, No.3, pp.49-56, 2000.