

DVR(Dynamic Voltage Restorer)에서의 직류에너지 제어 방법

論 文

50A - 12 - 5

The DC Link Energy Control Method of Dynamic Voltage Restorer System

丁一燁* · 朴相永* · 元東俊* · 文承逸** · 朴鍾根*** · 韓炳文§

(Il-Yop Chung · Sang-Young Park · Dong-Jun Won · Seung-Il Moon · Jong-Keun Park · Byung-Moon Han)

Abstract - Dynamic Voltage Restorer(DVR) which is installed between the supply and a critical load can restore voltage disturbances in distribution system. The restoration is based on injecting the same voltages as voltage sags. The ideal restoration is compensation to make the load voltages be unchanged. But voltage restoration involves real power or energy injection and the capability of energy storage is limited. So it must be considered how injection energy can be minimized and voltages can be made close to the voltages before fault. This paper describes conventional restoration techniques, which draw minimum energy from the DVR in order to correct a given voltage sag or swell. And this paper proposes a new concept of restoration technique to inject minimum energy. The proposed method is based on the definition of voltage tolerance in load side. Hence using the proposed method a particular disturbance can be corrected with less amount of storage energy compared to those of conventional methods.

Key Words : Dynamic Voltage Restorer (DVR), DC Link Energy, Custom Power, Power Quality

1. 서 론

전력 품질은 공급의 신뢰성을 유지하면서 정상 전압을 정격 주파수로 수용가에 공급하는 능력에 의하여 결정된다. 최근 전력의 수요가 매년 급격히 증가하고 있으며 전력 시스템에 각종 전력 전자 기기 및 비선형 기기의 연결이 증가함에 따라 전압 및 전류에 왜곡이 발생하여 좋은 품질의 전력을 신뢰성 있게 공급하는 것이 점점 어려워지고 있다. 반면에 정보 통신 기기, 정밀 제어 기기, 반도체 공정 등 고속의 정밀한 동작을 필요로 하는 첨단의 전기 기기는 외부의 전압 변동에 민감하게 동작하여 고품질의 전력 공급을 요구하고 있으며 24시간 돌아가는 자동 생산라인이나 병원 등 응급시설 등에서는 높은 신뢰도의 전력 공급을 필요로 한다. 이에 따라 전력 품질에 대한 기준을 세우는 연구가 세계적으로 진행 중에 있으며 대응 방안으로 전력 전자 회로를 이용한 커스텀 파워(Custom Power) 기기에 대한 연구가 진행 중이다.

전력 품질에 영향을 주는 것은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있는데 하나는 장시간동안 전압 혹은 전류의 파형에 변동(Variation)이 발생하는 것이고 다른 하나는 송전선이나 인근 부하에서 발생하는 지락 사고 등에 의해서 순간적으로 발생하는 전압 변화 사고(Event)이다[1][2]. 전자의 경우는 필터를

사용하여 제거가 가능하지만 후자의 경우를 보상하기 위해서는 순간적으로 많은 에너지 출력이 있어야 하므로 에너지를 저장하여 능동적으로 전압을 보상할 수 있는 커스텀 파워 기기를 사용하여야 한다. DVR(Dynamic Voltage Restorer)은 커스텀 파워 기기의 한가지로 전력 에너지를 직류 커패시터에 저장하였다가 순시 전압 강하(Voltage Sag)가 발생하였을 때 전력선에 직렬로 전압을 주입하여 부하의 전압을 보상하는 기기이다[3].

DVR의 이상적인 전압 보상 방법은 전압을 사고 이전과 동일하게 보상하여 주는 방법이지만 이 경우에는 DVR에서 계통에 유효 전력을 주입하게 되어 직류 커패시터에 저장해 둔 에너지를 소모하면 정상적인 보상이 더 이상 불가능해진다는 단점이 있다. 이상적인 전압 보상 시 현재 제작되고 있는 DVR은 단상 사고에 대해서는 정격 전압의 50%까지, 3상 사고의 경우는 정격 전압의 38%까지 보상이 가능한 것으로 알려져 있고 보상할 수 있는 사고 시간은 최대 150 ms, 즉 10 주기 미만인 것으로 보고되고 있다[3]. 이에 따라 DVR이 전압을 보상할 때, 공급하는 유효 전력을 줄여서 저장해 놓은 에너지 공급을 줄이는 방법이 연구되어 왔다[4]. 보상 전압의 크기를 최소화하는 방법과 전류에 수직으로 전압을 공급하여 공급하는 유효 전력을 0으로 만드는 방법 등이 제안되었으며[5], 이를 축소 DVR 모형에 적용하는 실험이 수행되었다[6]. 그러나 기존의 방법에서는 부하의 전압 변동 허용 특성을 고려하지 않은 채 부하의 전압 크기를 사고 이전의 전압 크기와 동일하게 보상하여 주는 방식이기 때문에 순시 전압 강하가 큰 폭으로 발생하였을 경우 DVR에서 공급하는 유효 전력을 0으로 만드는데 한계가 있었다[4][5][6].

본 논문에서는 부하의 전압 허용치를 기준으로 보상된 전

* 正 會 員 : 서울대 電氣工學部 博士課程

** 正 會 員 : 서울대 電氣工學部 副教授 · 工博

*** 正 會 員 : 서울대 電氣工學部 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 명지대 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2001年 7月 9日

最終完了 : 2001年 10月 27日

압의 위상 뿐 아니라 보상 전압의 크기를 전압 허용치 안에서 변동시킴으로써 DVR에서 공급하는 유효 전력을 0으로 만들 수 있는 전압 제어 영역을 확대하는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법으로 보상된 부하 전압의 크기는 사고 이전의 전압과 동일하거나 약간 감소하지만 부하의 전압 변동 허용 영역 안에 있으므로 부하의 정상적인 동작에는 큰 문제가 없으며 사고 전압이 순시적으로 큰 폭으로 떨어졌을 경우에도 DVR에서 부하에 공급하는 유효 전력을 최소화 할 수 있어 DVR에서 저장하고 있는 에너지를 최소로 사용할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 시뮬레이션의 전압 변동 허용 영역은 IEC(International Electrotechnical Commission)와 IEEE의 규정을 참고로 하여 설정하였으며 기존의 방법과 본 논문에서 제안한 방법을 비교하였다.

2. 본 론

2.1 DVR의 보상 기본 원리

배전 계통에서 지락 사고가 발생하였을 때의 전압 등가 모델은 사고 전류가 같은 전원에 연결된 다른 부하에 흐르는 전류보다 훨씬 크므로 그림 1과 같이 전원 임피던스(Z_S)와 사고 임피던스(Z_F)의 전압 분배 모델로 등가화 될 수 있다.

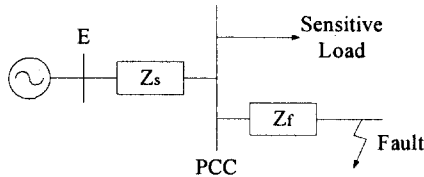


그림 1. 배전 계통 사고 시 전압 분배 모델
Fig 1. Voltage divider model with fault

그림 1에서와 같이 전압 변동에 민감한 부하에 공급되는 전압은 PCC(Point of Common Coupling)에서의 전압(V_{sag})이 되며 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$V_{sag} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} E \quad (1)$$

이때 사고 임피던스(Z_F)는 떨어진 선로와 지면 사이의 임피던스 뿐 아니라 PCC에서 사고 지점까지의 전송 선로의 임피던스를 포함하는 값이다. 일반적으로 배전 선로의 경우 송전 선로에 비해서 R/X 비가 크며 단위 거리 당 퍼센트 임피던스 값이 매우 크다. 예를 들어, 154kV의 송전선로 ACSR 410 mm²의 정상 임피던스는 0.0177+j0.1371 (%/km)인데 비해 22kV의 배전선로 ACSR 100 mm²의 정상 임피던스는 7.67+j8.04 (%/km) 이다[7]. 따라서 지락 사고가 발생한 경우에도 선로의 임피던스(Z_F) 값이 비교적 큰 값이므로 PCC에서의 전압이 0으로 떨어지지 않고 사고 전 전압의 10% ~ 90% 정도로 떨어지는 순시 전압 강하(Voltage Sag)가 발생한다.

순시 전압 강하가 발생하면 전압에 위상이 점프하게 되는데 이는 전원 임피던스와 사고 임피던스의 R/X비의 차이에 의해 발생하며 위상 변화의 크기는 식 (2)와 같다.

$$\Delta\phi = \arg(V_{sag}) = \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \arctan\left(\frac{X_S + X_F}{R_S + R_F}\right) \quad (2)$$

DVR은 민감한 부하에 순시 전압 강하가 발생하였을 때 전원의 전압 변동이 부하에 전달되지 않도록 보상 전압을 직렬로 주입해주는 기기이다. DVR의 구성은 그림 2와 같이 전압원 PWM(Pulse Width Modulation) 인버터, 출력 전압의 리플 성분을 제거하기 위한 LC 필터, 직렬 주입 변압기 그리고 직류 에너지 저장장치로 구성된다.

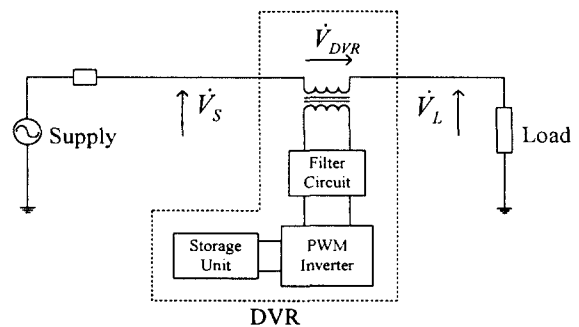


그림 2. DVR의 구성
Fig 2. Typical schematic of DVR

이상적인 DVR의 동작은 아래 식 (3)과 같이 전압 강하가 발생하였을 때 사고 이전의 부하 전압(V_{Lpre}) 정보를 유지하여 현재 공급되는 전원 전압(V_S)과의 차이를 보상함으로써 부하 전압에 전압 변동이 전달되지 않도록 하는 것이다.

$$V_{DVR} = V_{Lpre} - V_S \quad (3)$$

이상적으로 전압 보상을 하는 경우 보상 전압(V_{DVR})과 선로에 흐르는 전류(I) 사이의 위상 차이(ϕ)에 따라 인버터에 연결되어 있는 에너지 저장 장치에서 선로로 유효 전력을 공급하게 된다. 식 (4)는 DVR에서 공급하는 유효전력을 구하는 식이다.

$$P_{DVR} = V_{DVR} \cdot I \cdot \cos\phi \quad (4)$$

사고 시간이 길어지면 에너지 저장 장치에 DC 전압의 형태로 저장되어 있는 에너지가 공급하는 유효전력과 시간의 곱만큼 점점 소모되며 저장된 에너지가 완전히 소모되는 순간부터 DVR 보상이 더 이상 불가능하게 된다. 더욱이 소모된 에너지 저장 장치를 재충전하기 위해서는 수분의 시간이 걸리므로 DVR의 동작 시간을 증가시키기 위해서는 DVR에서 공급하는 유효전력을 줄이는 보상 기법이 필요하다.

한편 식 (4)에서 ϕ 에 따라 DVR에서 공급하는 유효전력이 0보다 작아지는 경우가 발생할 수 있는데 이는 선로에서

DVR로 유효 전력이 거꾸로 유입되는 것으로 DVR 내에서 이를 소모하기 위한 장치가 별도로 필요하게 되므로 추가 비용이 필요하게 된다. 따라서 DVR의 동작 시간을 늘이면서 장치 비용을 줄이기 위해서는 DVR에서 선로에 공급하는 유효전력이 0인 경우가 가장 좋은 경우이다.

2.2 기존의 DVR 전압 보상 방법

기존의 DVR 전압 보상 방법은 사고 이전과 동일한 상태로 보상하는 방법(Pre-sag compensation), 보상 전압의 크기를 최소로 하는 방법(In-phase compensation) 그리고 유효 전력 공급을 줄이기 위한 방법(Phase Advance Method)으로 크게 나눌 수 있다.

2.2.1 사고 이전과 동일하게 보상하는 방법 (Pre-sag compensation)

이 방법은 그림 3에 도시한 바와 같이 순시 전압 강하에 의해 부하 전압의 크기(V_{sag})와 위상(δ)이 바뀌었을 때 부하 전압을 사고 전의 크기, 위상과 동일하게 보상해 주는 방법으로 부하의 입장에서 가장 이상적인 보상 방법이다. 그러나 식 (4)를 계산하여 보면 DVR에서 유효 전력을 공급해야 하므로 보상 시간에 제약이 있다는 단점이 있어서 사고 발생 시간이 길어지면 DVR 보상에 한계가 있다.

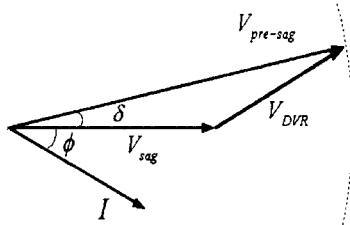


그림 3. Pre-sag 보상의 전압 벡터도
Fig 3. Voltage vector diagram of pre-sag compensation

2.2.2 보상 전압의 크기를 최소로 보상하는 방법 (In-phase compensation)

이 방법은 DVR에서 공급하는 전압을 사고 전압과 같은 위상으로 공급하는 방법으로 DVR 보상 전압의 크기가 최소화된다는 장점을 가지고 있다. 그러나 DVR에서 공급하는 유효전력을 식 (4)를 통해 구해보면 0보다 큰 값이 주입된다는 단점을 가진다.

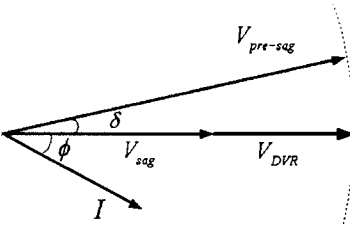


그림 4. In-Phase 보상의 전압 벡터도
Fig 4. Voltage vector diagram of in-phase compensation

2.2.3 보상 전압의 위상을 변화하여 공급 유효 전력을 제어하는 방법 (Phase Advance Method)

DVR에서 공급할 수 있는 유효전력량 즉 에너지는 DC 링크에 저장되어 있는 에너지량에 한정된다. DC 링크에 저장되어 있는 에너지가 방전되면 충전 장치를 통해서 재충전이 되기는 하지만 재충전에 걸리는 시간이 많이 들기 때문에 DVR 보상 동작 중에 충전을 하여서 사용하는 것은 불가능하다. 이에 따라 DVR 공급 유효 전력을 최소화하기 위한 방법이 제안되었다[5][6].

기본적인 원리는 그림 5와 같이 DVR에서 보상하는 전압을 전류와 수직에 가깝게 만드는 것이다. 즉 전압과 전류의 역률을 0에 근사시켜 DVR에서 공급하는 유효 전력의 양을 0에 가깝게 제어하는 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 보상된 부하 전압은 사고 이전과 크기는 같지만 α 만큼 앞선 위상을 갖게 된다. 이때 α 를 선행 위상(Advance Angle)이라고 부르고 이러한 제어 방식을 부하 위상 선행법(Phase Advance Method)이라고 한다.

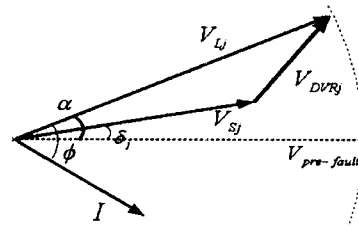


그림 5. 부하 위상 선행법의 전압 벡터도
Fig 5. Vector diagram of phase advance method

전원에서 공급하는 유효 전력(P_{in})과 부하에 도달하는 유효 전력(P_{out})은 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{in} = \sum_j V_{Sj} I_j \cos(\phi - \alpha + \delta_j) \tag{5}$$

$$P_{out} = \sum_j V_{Lj} I_j \cos(\phi) \tag{6}$$

이 때 j 는 A, B, C 상을 의미한다. 부하가 평형 부하이고 보상된 전압이 평형이라고 가정하면 각 상의 전류와 전압의 크기는 각각 같으므로 DVR에서 공급하는 유효전력(P_{DVR})은 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{DVR} = P_{out} - P_{in} = 3 V_L I \cos(\phi) - \sum_j V_{Sj} I \cos(\phi - \alpha + \delta_j) \tag{7}$$

식 (7)에서 부하 전압(V_L)은 사고 이전과 동일한 값이고 사고 전원 전압(V_{Sj})과 전압 위상 점프(δ_j), 전류(I) 및 위상각(ϕ)는 주어지는 값이므로 DVR 공급 유효전력을 조절할 수 있는 변수는 선행 위상(α)이다. 한편 DVR에서 공급하는 유효전력은 2.1에서 언급하였듯이 0이 될 때가 가장 좋은 경우이다. 따라서 DVR에서 공급하는 유효전력이 0이 되게 식 (7)을 만족시키는 선행 위상을 찾는 것이 필요하다. 그런데 전원의 사고 전압이 크게 낮아지면 DVR에서 공급하는 유효

전력을 0 이하로 만들 수 없게 된다. 이 경우에는 유효전력을 최소로 주입할 수 있는 선행 위상을 찾는다.

선행 위상을 찾는 과정을 요약하면 다음과 같다.

$$[(\sum_j V_{Sj} \cos(\delta_j))^2 + (\sum_j V_{Sj} \sin(\delta_j))^2]^{1/2} \geq 3 V_L \cos(\phi) \quad (8)$$

를 만족한다면,

$$\alpha_{opt} = \phi + \beta - \arccos\left(\frac{3 V_L \cos \phi}{\sqrt{(\sum V_{Sj} \cos \delta_j)^2 + (\sum V_{Sj} \sin \delta_j)^2}}\right) \quad (9)$$

만족하지 않는다면

$$\alpha_{opt} = \phi + \beta \quad (10)$$

로 구할 수 있다.

이때 $\beta = \arctan((\sum_j V_{Sj} \sin \delta_j) / (\sum_j V_{Sj} \cos \delta_j))$ 이다.

전압 강하가 큰 폭으로 발생하지 않는 경우에는 식 (8)의 조건을 만족하여 식 (9)를 통해 구한 선행 위상으로 부하 전압을 제어하여 DVR 공급 유효전력을 0으로 만들 수 있으며 전압 강하가 큰 폭으로 발생하는 경우에는 식(10)을 통해 구한 선행 위상으로 부하 전압을 제어하여 유효전력 공급을 줄일 수 있다 [5][6].

2.3 제안하는 방법

2.2절에서 정리한 기존의 제어 방법들은 각각의 특징들이 있으나 공통적으로 부하 전압을 사고 전과 같은 크기를 같도록 보상하도록 하고 있는 반면에 부하 전압의 위상은 사고 전과 다르게 보상되고 있다. 특히 마지막에 살펴본 유효전력을 제어하는 알고리즘의 경우 부하 전압의 위상을 경우에 따라 바꾸어 줌으로써 제어 목적을 달성한다. 그러나 전압 강하가 큰 사고의 경우 부하 전압의 위상을 바꾸어 주는 것만으로는 공급유효전력을 0에 가깝게 줄일 수 없는 한계가 있다.

본 논문에서는 부하 전압의 위상과 함께 부하 전압의 크기를 바꾸어 줌으로써 DVR에서 공급하는 유효전력을 줄이는 방법을 제안한다. 이에 대해 보상 전압의 크기를 바꾸어 주는 것이 가능한지 그리고 부하 전압의 위상 제어와 더불어 크기를 제어하는 방법과 그것이 어떤 장점을 가지고 있는지를 살펴보도록 하겠다.

2.3.1 보상된 부하 전압의 크기와 위상 허용 영역

자동 생산라인의 제어기와 정보처리 기기 및 컴퓨터 등 전압 변동에 민감한 부하에 대한 전압 변동 허용 영역에 대해 CBEMA(Computer Business Equipment Manufacturers Association), IEC 및 IEEE 등에서 많은 연구가 진행되었으며 전압 변동 허용의 규제 기준에 대해 활발하게 논의되고 있다. CBEMA에서는 전압 변동이 컴퓨터에 미치는 영향에 대해 많은 데이터를 통계하여 그림 6과 같은 전압 변동 허용 영역을 제안하였다. 최근에는 ITIC(Information Technology Industry Council)에서 CBEMA 기준을 강화한 전압 변화 허용 한도 곡선을 제안하였다[8]. 그림 6의 CBEMA 곡선에서 부하 전압의 크기가 정격의 87%~106% 사이이면 전압 변동이 부하에 미치는 영향이 적다는 것을 알 수 있다.

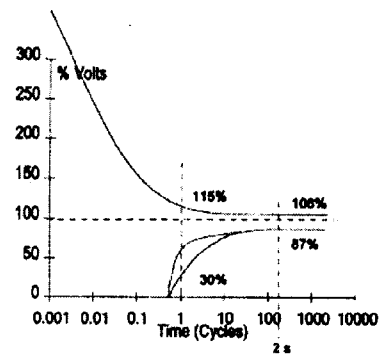


그림 6. CBEMA 곡선

Fig 6. CBEMA Curve

IEC에서는 유럽의 규제안인 EN 50160의 제안을 따라 정격 전압의 90%~110%, IEEE의 기준안인 IEEE 1159에서도 90%~110% 사이로 전압을 유지할 것을 제안하고 있다. 이상의 연구 결과들을 통해 부하의 전압의 크기가 90%이상으로 유지되면 부하가 정상적으로 동작한다는 것을 알 수 있다[1].

한편 부하 전압의 위상 변동이 크게 발생하는 경우 전력 반도체 소자를 이용하여 스위칭을 하는 부하에서 전류 실패(Commutation Failure) 등의 문제가 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 부하에 영향을 주지 않는 순시 위상 변화 가능 범위가 있으며 이는 대략 5%~10% 정도이다.

이상의 전압 크기와 위상의 순시 변동 허용 영역을 정리한 것이 그림 7이다[1]. 그림 7의 전압 변동 허용 오차(Voltage Tolerance) 영역은 정격 운전 전압(Normal Operating Voltage)을 기준으로 전압의 크기와 위상변화에 대해 허용오차를 나타내는 영역이며 이 영역 내에서는 부하가 정상적으로 작동된다는 것을 의미하는 영역이다. 즉 DVR에서 보상하는 전압이 사고 이전의 전압에 대해 전압 변동 허용 오차 내에서 크기와 위상의 여분을 갖는다는 것을 의미한다. 전압 변동 허용 오차 영역 어디에 부하 전압 벡터가 위치하여도 부하의 동작에 영향을 미치지 않기 때문에 허용 영역 안에서 직류 전원의 공급 유효 전력을 최소로 할 수 있는 보상 전압을 구할 수 있다는 것이 본 논문에서 제안하는 것이다.

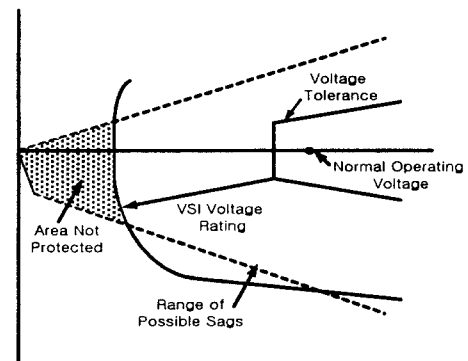


그림 7. DVR 보상 전압의 크기와 위상 허용 한도 [1]

Fig 7. Part of the complex plane protected by DVR with the indicated voltage rating [1]

2.3.2 DVR 공급 유효 전력을 0으로 만들 수 있는 제어 방법 제안

본 논문에서 제안하는 방법은 DVR에서 보상하는 부하의 전압의 크기와 위상을 허용 오차 한도 내에서 변동하여 DVR에서 공급하는 유효전력을 줄이는 방법이다. DVR에서 공급하는 유효전력(P_{DVR})은 식 (7)과 같으며 기존의 방법에서는 부하 전압의 선행 위상(α)만을 제어 변수로 사용하였으나 부하 전압의 위상뿐 아니라 부하 전압의 크기(V_L)를 동시에 제어하여 아래 식 (11)과 같이 DVR에서 공급하는 유효전력을 0으로 만드는 것이 제어 목적이다. 0으로 제어하는 이유는 2.1에서 언급하였듯이 DVR에서 유효전력이 양의 값으로 공급되는 경우에는 에너지 저장 장치의 에너지가 소모되어 DVR의 보상에 한계가 생기며 유효전력이 음의 값으로 공급되는 경우에는 유효전력이 선로에서 DVR로 흐르게되어 이를 소모시킬 부가적인 회로가 필요하게 되기 때문이다.

$$3 V_L I \cos \phi - \sum_{Sj} V_{Sj} I \cos (\phi - \alpha + \delta_j) = 0 \quad (11)$$

식 (11)을 만족시키는 부하 전압의 크기(V_L)와 부하 전압의 선행 위상(α)은 그림 7의 전압 변동 허용 오차 내에 있어야 하므로 제약 조건은 다음 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} V_{\min} \leq V_L \leq V_{\max} \\ \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \end{aligned} \quad (12)$$

V_{\min} 과 V_{\max} 는 전압 크기 허용 오차의 경계 값이며 α_{\min} 과 α_{\max} 는 전압 위상 허용 오차의 경계 값이다. 전압 변동 허용 기준은 2.3.1에서 언급한 바와 같이 전압 크기 변동이 90%~110%이며 위상 변동은 5%~10% 정도이다.

식 (11)의 등호 제약 조건과 식 (12)의 제약 조건을 만족시키는 부하 전압 크기(V_L)와 위상(α)의 쌍은 유일하지 않으며 매우 많은 해가 존재한다. 보상 전압의 크기를 사고 전에 가깝게 유지하는 것이 보상 전압의 위상을 유지하는 것보다 중요하다는 조건을 이용하여 많은 해 중에 유일한 DVR의 동작점을 결정할 수 있다. 즉 보상 전압의 오차를 최소로 하는 목적함수를 다음 식 (13)과 같이 정한다.

$$J = (V_{prefault} - V_L)^2 \quad (13)$$

이상의 DVR에서 공급하는 유효 전력을 0으로 만드는 보상 전압의 크기와 위상을 구하기 위한 과정을 요약하면 식 (12)의 경계 조건을 만족하면서 식 (11)의 등호 제약 조건을 만족하는 해들 중에 식 (13)을 최소화하는 해를 찾는 것이다. 본 논문에서는 비선형 방정식과 제약 조건인 식 (11), (12), (13)을 만족하는 해를 MATLAB과 GAMS라는 프로그램을 이용하여 최적의 해를 찾아내었다.

2.3.3 기존의 방법과 제안하는 방법 비교

기존의 부하 위상 선행법을 그림 7의 전압의 크기와 위상 오차 허용 한도를 나타내는 그림 위에 나타내어 보면 그림 8과 같다. 즉 보상된 부하전압의 크기가 사고 전의 전압 크기와 동일하며 보상하는 DVR 전압이 선로에 흐르는 전류와 90° 에 가까운 차이가 나게 주입되어 DVR에서 공급하는 유효전력을 0으로 줄일 수 있다. 그러나 순시 전압 강하가 크게 발생하면 부하 전압의 위상을 바꾸어 주는 것만으로는 유효전력을 0으로 만들 수 없다는 한계를 가지고 있다.

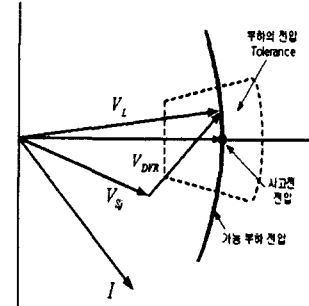


그림 8. 부하 위상 선행법의 벡터도
Fig 8. Vector diagram of phase advance method

그림 9는 부하 위상 선행법과는 반대로 부하 전압의 위상을 사고 전과 같게 유지하고 부하 전압의 크기(V_L)를 전압 변동 허용 오차 내에서 변화시키는 방법을 보여준다.

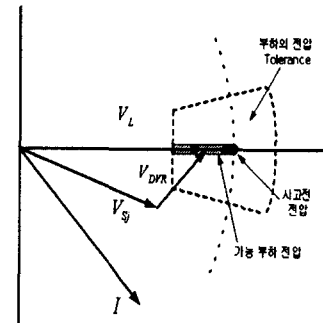


그림 9. V_L 의 크기 변화를 이용한 제어 방법의 벡터도
Fig 9. Vector diagram with changing the magnitude of V_L

전압의 크기(V_L)에 0~1사이의 스케일링 상수 k 를 곱하여 변동된 전압 크기를 kV_L 로 나타내면 전류 I 는 kV_L/Z_L 이므로 이를 식 (7)에 대입하면 DVR에서 공급하는 유효전력은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (7)과 비교하여 선행 위상(α)이 0이 되어 사라졌음을 볼 수 있다.

$$P_{DVR} = \frac{3(k \cdot V_L)^2}{Z_L} \cos \phi - \sum_{Sj} \frac{V_{Sj} \cdot k \cdot V_L}{Z_L} \cos(\phi - \delta_j) \quad (14)$$

본 논문에서 제안하는 방법은 그림 10에서 나타낸 바와 같

이 부하 전압의 크기(V_L)와 선행 위상(α)을 같이 이용하는 것이다. 전압의 크기와 선행 위상 중 어느 하나는 고정시키고 다른 하나만으로 보상하는 앞의 두 경우에 비해 제안하는 방법을 이용하면 DVR이 보상할 수 있는 전압 영역이 확대된다.

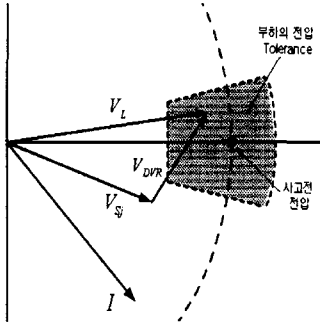


그림 10. 제안하는 방법의 전압 벡터도
Fig 10. Vector diagram of proposed control

제안하는 방법은 DVR에서 공급하는 유효전력을 0으로 만드는 해 중에서 전압 크기의 변동이 가장 적은 값을 찾는 것으로 기존의 부하 위상 선행법과는 다음과 같은 관계가 있다. 순시 전압 강하가 적게 발생하여 위상 선행 제어 방식으로 유효 전력을 0으로 만들 수 있는 경우, 즉 부등식 (8)이 성립되는 경우에는 제안한 방법과 위상 선행 제어 방식의 부하 전압의 크기와 위상을 계산한 결과가 같으며 순시 전압 강하가 크게 발생하여 부등식 (8)을 만족하지 못하는 경우에는 부하 위상 선행법에서는 DVR에서 유효전력을 공급할 수 밖에 없지만 제안한 방법에서는 부하 전압의 크기를 줄임으로써 유효전력 공급을 0으로 만들 수 있다.

2.4 Case Study

그림 11과 같은 배전 계통을 전력계통 동적 해석 프로그램인 EMTDC/PSCAD을 이용하여 모의하였다. 전체 계통은 3상 4선식 다중 접지 계통이며 각 급전선(feeder)이 분기하는 지점에 리클로저가 연결되어 있다. 주급전선은 22.9kV로, 각 급전선의 부하의 전압 정격은 220V로 가정하였고 사고 전 부하 전압은 18.38kV였다. 부하는 역률이 0.95로 일정하다고 가정하였다.

사고는 그림 11에 표시한 사고지점('Fault Point')에서 A상에 단상 지락사고를 내었으며 DVR은 인근 급전선에 연결하였다. 단상 지락사고는 사고 저항과 PCC로부터의 사고 거리를 변화시키면서 임의적으로 a상 전압이 15.83%, 41.30% 그리고 59.74%가 발생시켰다. 표 1은 각각의 사고에 대해서 DVR이 설치된 부하에 나타나는 순시 전압 강하의 크기와 위상, 그리고 전류의 값을 정리한 것이다.

식 (12)에서 부하 전압의 크기와 위상의 오차 허용 경계의 값은 해외의 전압 변동 기준에 따르면 전압 크기 변동이 90%~110%이며 위상 변동은 5%~10% 정도이다. 본 논문에서 제안하는 방법은 부하 전압의 크기 변동 허용 오차가 크면 클수록 좋은 효과를 가져올 수 있다. 본 논문에서는 부하가 해외의 전압 변동 기준보다 전압 강하에 민감하여 98%~102% 사이에서만 전압의 크기 변동이 가능한 경우와 해외의

전압 변동 기준인 90%~110%의 경우로 크게 두 가지의 경우를 가정하여 각각의 사고 케이스 별로 기존의 방법과 제안하는 방법의 유효 전력 공급량을 비교하였다.

첫 번째 전압 크기 허용 오차를 98%~102%로 둔 경우에는 케이스 1과 케이스 2를 통해 기존의 방법과 제안하는 방법을 비교하였고 두 번째로 순시 전압 강하가 크게 발생하는 케이스 3의 경우에는 전압 크기 허용 오차를 90%~110%로 두어 기존의 방법과 제안하는 방법을 비교하여 보았다. 한편 부하 전압 위상의 허용 오차는 5%~10% 사이인 -30° 에서 30° 사이로 두었다. 이상의 기준을 표 2에 정리하였다.

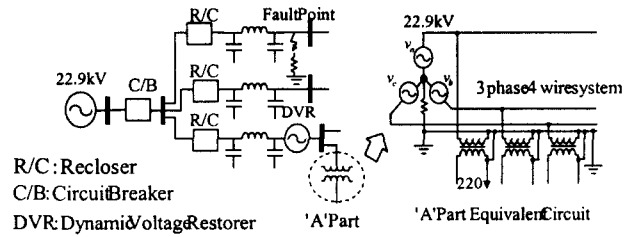


그림 11. 전체 테스트 배전 계통의 구성
Fig 11. Configuration of overall distribution network

표 1. 각 사고 별 전압, 전류 측정값

Table 1. Voltages and Currents Value in Each Case

사고 모의		Case 1	Case 2	Case 3
사고 종류		a상 15.83% 전압강하	a상 41.30% 전압강하	a상 59.74% 전압강하
선로 전류 (I)		0.01076 kA	0.01076 kA	0.01076kA
사고 전압 크기	a상 (V_{S1})	15.47 kV	10.79 kV	7.399 kV
	b상 (V_{S2})	18.79 kV	17.82 kV	16.30 kV
	c상 (V_{S3})	19.98 kV	22.02 kV	23.32 kV
사고 전압 위상	a상 (δ_1)	-10.780°	-15.270°	-1.470°
	b상 (δ_2)	-5.853°	-11.700°	-14.630°
	c상 (δ_3)	3.310°	2.600°	-0.704°
역률각 (ϕ)		23.51°	23.51°	23.51°

표 2. 부하 전압의 크기와 위상 허용 오차 조건

Table 2. Boundary Conditions of Voltage Tolerance

허용 오차	대상	범위
부하 전압 크기	케이스 1, 2	$0.98 \leq V_L \leq 1.02$
허용 오차	케이스 3	$0.90 \leq V_L \leq 1.10$
부하 전압 위상	케이스 1, 2, 3	$-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$

2.4.1 케이스 1: a상 순시 전압 강하가 15.83% 발생하였을 때

a상 전압이 순시적으로 15.83% 강하한 경우 부하 전압의 위상과 크기를 사고 이전과 동일하게 보상하면 DVR에서 공급하는 유효전력은 -1.4 kW가 필요하다. 유효 전력이 0보다 작은 경우에는 DVR 내부에 유효 전력을 소모할 장치의 설치가 필요하므로 설치비 등의 추가 부담이 발생한다. 따라서 유효 전력을 0에 가깝게 제어하는 것이 필요하다.

식 (7)을 이용하여 선행 위상(α)과 DVR 공급 유효전력의 관계를 구하면 그림 12와 같다. 이 경우는 순시 전압 강하가 비교적 작게 발생하여 식 (8)을 만족하므로 그림 12에서와 같이 선행 위상의 제어만으로 공급하는 유효 전력을 0으로 만들 수 있다.

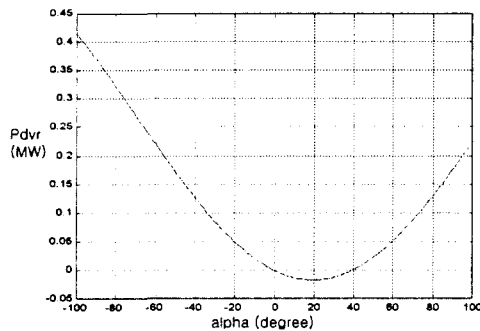


그림 12. a상 15.83% 순시 전압 강하 시 α 와 P_{DVR}
 Fig 12, α vs P_{DVR} with 15.83% voltage sag in phase A

표 3은 기존의 부하 전압을 사고 이전과 동일하게 보상하는 방법, 부하 위상 선행법과 제안하는 방법의 결과를 비교한 표이다. 케이스 1에서는 순시 전압 강하가 15.83%로 비교적 작기 때문에 제안하는 방법과 부하 위상 선행법이 같은 결과가 나온다. 이것은 보상되는 전압의 크기 변동을 위상의 변동에 우선하여 최소화하게 제어 값을 결정했기 때문이다. 즉, 부하의 전압 변동 허용 한도 내에서 전압의 크기 변화 없이 위상의 변화만으로 DVR에서 공급하는 유효 전력을 0으로 만들 수 있다. 그림 13은 제안한 방법을 적용하였을 때 부하 전압 파형이다. 0.25초에 15.83%의 a상 순시 전압 강하가 발생하였으나 DVR의 보상으로 부하에서는 전압이 보상되었음을 확인할 수 있다. 0.3초에는 사고 급전선의 리클로저가 사고 선로를 계통에서 분리하여 순시 전압 강하가 끝나는 시점으로 선로와 변압기의 동적 특성에 의해 과도 상태 전압이 순간 발생한다.

표 3. 케이스 1에서 각 제어 방법 비교
 Table 3. The comparisons of control methods in case 1

	이상적인 보상 방법	부하 위상 선행법	제안한 방법
α	0°	1.03°	1.03°
V_L	1.0 p.u.	1.0 p.u.	1.0 p.u.
P_{DVR}	-1.4 kW	0.388 kW	0.388 kW

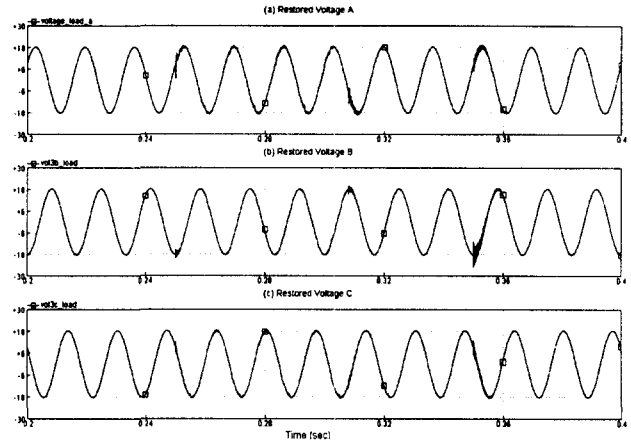


그림 13. 제안하는 DVR 보상 시 부하 전압 파형 (케이스 1)
 Fig 13. Load voltages with DVR compensation in proposed method (Case 1)

2.4.2 케이스 2: a상 순시 전압 강하가 41.3% 발생하였을 때

a상 순시 전압 강하가 41.3% 발생한 경우에는 부하 전압을 사고 이전으로 완벽하게 보상하는 경우 DVR에서 14.4kW의 유효전력 공급이 필요하다.

식 (7)을 이용하여 선행 위상과 DVR에서 공급하는 유효전력의 관계를 그림 14에 나타내었다. 부하 위상 선행법에서는 식 (8)을 만족시키지 못할 정도로 케이스 2의 순시 전압 강하가 크기 때문에 선행 위상은 식 (7)을 선행 위상으로 미분하여 DVR에서 공급하는 유효전력을 최소로 만드는 부하 전압의 위상을 찾는다. 이때 DVR에서 공급하는 유효 전력을 0으로 만들 수 없다.

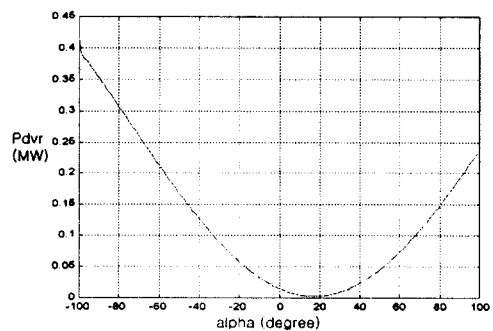


그림 14. a상 41.3% 순시 전압 강하 시 α 와 P_{DVR}
 Fig 14. α vs P_{DVR} with 41.3% voltage sag in phase A

표 4는 기존의 제어 방법과 제안한 방법의 결과를 비교한 표이다. 케이스 2는 식 (8)을 만족하지 못할 정도로 비교적 큰 전압 강하가 발생하였기 때문에 제안한 방법에서는 부하 위상 선행법에서는 불가능한 방법인 부하 전압의 크기를 줄여주는 것을 통해 DVR에서 공급하는 유효전력을 줄일 수 있다. 그 결과 제안하는 방법을 사용한 경우 부하 전압의 크기가 0.6% 줄어들지만 이는 전압 변동 허용 오차 안에 있으므로 부하에는 영향을 미치지 않으며 DVR에서 공급하는 유효

전력을 기존의 방법에 비해 상당히 줄일 수 있었다.

그림 15는 제안한 방법을 적용하였을 때 부하 전압 파형이다. 0.25초에 41.3%의 a상 순시 전압 강하가 발생하였으나 DVR의 보상으로 부하에서는 전압이 보상되었음을 확인할 수 있다.

표 4. 케이스 2에서 각 제어 방법 비교

Table 4. The comparisons of control methods in case 2

	이상적인 보상방법	부하 위상 선행법	제안한 방법
α	0°	17.2641°	17.2460°
V_L	1.0 p.u.	1.0 p.u.	0.994 p.u.
P_{DVR}	14.4 kW	2.2 kW	0.568 kW

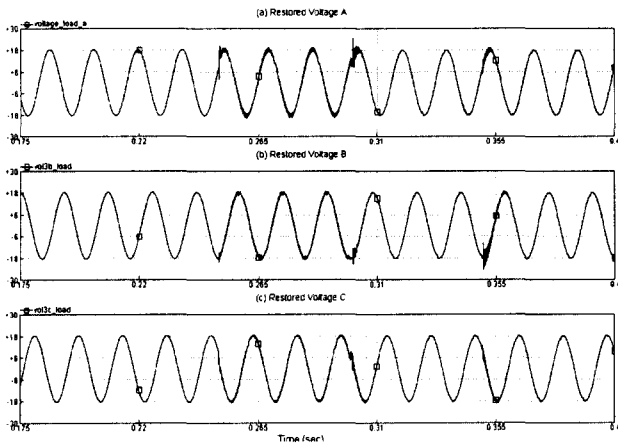


그림 15. 제안하는 DVR 보상 시 부하 전압 파형 (케이스 2)
Fig 15. Load voltages with DVR compensation in proposed method (Case 2)

2.4.3 케이스 3: a상 순시 전압 강하가 59.74% 발생하였을 때

a상 순시 전압 강하가 59.74% 발생한 경우, DVR 보상 전압의 위상과 크기를 사고 이전과 동일하게 보상하면 DVR에서 32.8kW의 유효전력 공급이 필요하다.

식 (7)을 이용하여 부하 전압의 선행 위상과 DVR에서 공급하는 유효전력의 관계를 그림 16에 나타내었다. 케이스 3의 경우는 케이스 2와 같이 순시 전압 강하가 크게 발생하여 식 (8)을 만족시키지 못하므로 부하 위상 선행법으로는 DVR에서 공급하는 유효 전력을 0으로 만들 수 없다.

표 5는 기존의 제어 방법과 제안한 방법을 비교한 표이다. 사고에 의해서 전압 강하가 크게 일어났으므로 부하 전압을 사고 이전과 동일하게 보상하는 방법에서는 DVR에서 큰 유효전력이 공급되고 있다. 부하 위상 선행법의 경우에도 부하 전압의 위상 변화만으로는 유효전력 공급량을 줄이는 데 한계가 있다. 반면에 제안하는 방법의 경우 부하 전압의 크기는 7.5% 감소하였으나 DVR에서 공급하는 유효전력이 0.312 kW로 다른 제어 방법에 비해 유효전력을 줄이는 효과가 뛰어나함을 확인하였다.

그림 17은 제안한 에너지 최적화 알고리즘을 적용하였을 때 부하 전압 파형이다. 0.25초에 59.74%의 a상 순시 전압 강하가 발생하였으나 DVR의 보상으로 부하에서는 전압이 보상되었음을 확인할 수 있다.

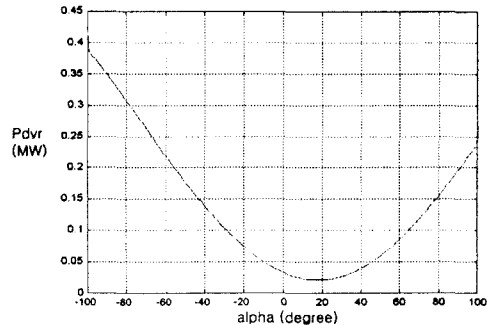


그림 16. a상 59.74% 순시 전압 강하 시 α 와 P_{DVR}
Fig 16, α vs P_{DVR} with 59.74% voltage sag in phase A

표 5. 케이스 3에서 각 제어 방법 비교

Table 5. The comparisons of control methods in case 3

	이상적인 보상방법	부하 위상 선행법	제안한 방법
α	0°	17.8669°	17.8763°
V_L	1.0 p.u.	1.0 p.u.	0.925 p.u.
P_{DVR}	32.8 kW	20.7 kW	0.312 kW

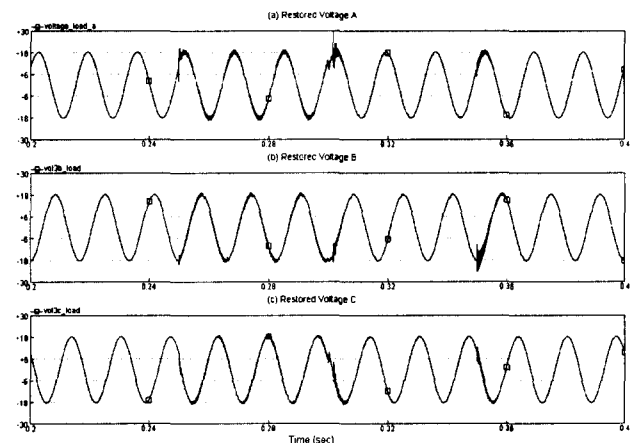


그림 17. 제안하는 DVR 보상 시 부하 전압 파형 (케이스 3)
Fig 17. Load voltages with DVR compensation in proposed method (Case 3)

3. 결론

DVR의 전압 보상 시에 전압과 전류의 크기 및 위상에 따라 DVR의 에너지 저장 장치에서 선로로 유효전력이 공급되어 저장된 에너지가 소모된다. 저장된 에너지가 완전 소모되면 더 이상 DVR에서 유효 전력을 선로에 공급할 수 없고 다시 에너지를 충전하는 데에 시간을 많이 필요로 하는 등 여

리 가지 문제가 발생한다.

기존의 논문에서는 부하 전압의 위상을 변동시킴으로써 DVR에서 공급하는 유효전력의 양을 줄이는 방법 등이 제시되었다. 그러나 순시 전압 강하(Voltage Sag)가 큰 폭으로 발생하는 경우 기존의 방법으로는 DVR에서 공급하는 유효전력을 줄이는데 한계가 있었다.

본 논문에서는 CBEMA(Computer Business Equipment Manufacturers Association), IEC, IEEE 등에서 제안하고 있는 부하 전압 유지에 대한 규제를 기반으로 부하에서 허용하는 전압의 크기와 위상 변동의 허용 오차를 도출하였고 이를 이용하여 DVR의 전압 보상 가능 영역을 도출하였다. 또한 DVR 보상 가능 영역을 통해 DVR에서 공급하는 유효전력을 0으로 만들기 위한 변수로 부하 전압의 위상뿐 아니라 부하 전압의 크기를 이용하는 것을 제안하였다. 이에 따라 DVR에서 공급하는 유효전력을 0으로 만들 수 있게 하는 부하 전압의 위상과 크기를 구하는 과정을 제안하였다.

본 논문에서는 EMTDC/PSCAD를 이용하여 시뮬레이션용 배전 계통을 꾸며서 여러 가지 순시 전압 강하에 대해서 기존의 방법과 제안하는 방법을 시뮬레이션 하여 보았다. 그 결과 제안하는 방법이 유효전력을 0으로 줄일 수 있는 성능이 우수한 것을 확인하였고 특히 순시 전압 강하가 큰 레벨로 발생하였을 때 그 효과가 더욱 커짐을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Math H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, New York, IEEE Press, 1999.
- [2] Johan H.R. Enslin, "Unified Approach to Power Quality Mitigation," Industrial Electronics, Proceedings. ISIE '98. IEEE International Symposium on Volume: 1, pp.8-20.
- [3] K. Chan and A. Kara, "Voltage Sags Mitigation with an Integrated Gate Commutated Thyristor Based Dynamic Voltage Restorer," Harmonics and Quality of Power Proceedings, Proceedings. 8th International Conference On Volume:1, 1998, pp.561-565.
- [4] John Godsk Nielsen, Frede Blaabjerg and Ned Mohan, "Control Strategies for Dynamic Voltage Restorer Compensating Voltage Sags with Phase Jump," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE, Volume: 2, 2001 pp.1267 -1273.
- [5] A.A.D.R Perera, M. Vilathgamuwa and S.S Choi, "Sag Correction with Minimum Storage Capacity," Proc. of the International Power Engineering Conference, Singapore, 1999.
- [6] M. Vilathgamuwa, A.A.D Ranjith Perera, S.S. Choi and K.J. Tseng, "Control of Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer," Industrial Electronics Society, IECON Proceedings The 25th Annual Conference of the IEEE Volume:2 1999, pp873-878
- [7] 한국전력공사 발전처, 전력계통운용 자료집, 1986

- [8] J. Arrillaga, N.R. Watson and S. Chen, Power System Quality Assessment, John Wiley & Sons, 2000

저 자 소 개



정 일 업 (丁 一 燁)

1976년 3월 16일 생. 1999년 서울대 공대 전기 공학부 졸업. 2001년 동 대학원 전기 공학부 졸업(석사). 2001년~현재 동 대학원 전기공학부 박사과정

Tel : 02-886-3101, Fax : 02-886-3102

E-mail : iryop@powerlab.snu.ac.kr



박 상 영 (朴 相 永)

1967년 4월 28일 생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료

Tel : 02-6413-9121, Fax : 02-878-1452

E-mail : sypark@eotechnics.com



원 동 준 (元 東 俊)

1975년 1월 1일 생. 1998년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2000년~현재 동 대학원 전기공학부 박사과정

Tel : 02-886-3101, Fax : 02-886-3102

E-mail: donjuan@powerlab.snu.ac.kr

문 승 일 (文 承 逸)

전기학회논문지 제49A권 제12호 참조

박 종 근 (朴 鍾 根)

전기학회논문지 제50A권 제3호 참조



한 병 문 (韓 炳 文)

1953년 7월 5일 생. 1976년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 Arizona State University 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년~1996년 인천대 전기공학과 조교수.

1996년~현재 명지대 전기공학과 부교수

Tel : 031-330-6366, Fax : 031-321-0271

E-mail : erichan@wh.myongji.ac.kr