

# 모터부하를 고려한 상정사고 발생 시 저전압 부하차단 적용 방안에 대한 연구

## A Study on the Application of Under Voltage Load Shedding Scheme in Line Contingency considering Motor Load

이 윤 환<sup>†</sup>  
(Yun-Hwan Lee)

**Abstract** - Failure of high-voltage transmission line, which is responsible for large-scale power transmission, can be reason for system voltage instability. There are many methods to prevent voltage instability like adjustment of equipment, the generator voltage setting, and load shedding. Among them, the load shedding, have a problem of economic loss and cascading effect to power system. Therefore, the execution of load shedding, amount and timing is very important. Conventionally, the load shedding setting is decided by the preformed simulation. Now, it is possible to monitor the power system in real time by the appearance of PMU(Phasor Measurement Unit). By this reason, some of research is performed about decentralized load shedding. The characteristics of the load can impact to amount and timing of decentralized load shedding. Especially, it is necessary to consider the influence of the induction motor loads. This paper review recent topic about under voltage load shedding and compare with decentralized load shedding scheme with conventional load shedding scheme. And simulations show the effectiveness of proposed method in resolving the delayed voltage recovery in the Korean Power System.

**Key Words** : Voltage stability, Phasor measurement unit application, Under voltage load shedding scheme

### 1. 서 론

근래의 국내 전력계통에는 다양한 분산자원과 장거리 송전의 안정성 향상을 위한 직렬보상장치 등 새로운 설비가 지속적으로 투입되고 있다. 계통에 수많은 설비들이 설치되어 운영되고 있기 때문에 모든 설비의 고장에 의한 계통 영향력을 판단하기 위해서는 많은 노력과 시간이 요구된다. 이러한 예상치 못한 고장에 대해 효과적인 제어가 수행되지 않으면 광역정전으로 파급 될 수 있는 가능성이 있다. 특히, 최근에 발생한 대부분의 광역정전 사례를 살펴보면 전압불안정에 의한 계통의 전압 붕괴가 주된 원인으로 분석되고 있다. 국내 계통은 수도권 지역에 부하 수요가 집중되어 있어 원거리에 위치한 비수도권 지역의 발전단지로부터 전력을 유통하기 위한 장거리 전력전송이 이루어지고 있다. 6개 유통선로 중 하나의 선로에서 사고가 발생할 경우 수도권 지역의 전압불안정 현상을 야기할 수 있는데, 사고에 의한 광역정전을 예방하기 위하여 유통한계를 설정하여 계통을 운영하고 있다. 유통한계는 유통선로 중 어떠한 사고가 발생하여도 계통이 안정하도록 운영되어야 하는 최대 전송 가능 용량을 의미하며 이 기준에 따라 계통이 운영될 경우 유통선로 중 어떠한 사고에 대해서도 계통이 안정화 되어야 한다. 이러한 전압불안정 현상에 정확하고 신속하게 대응하기 위해 온라인 계통해석 및 제어시스템 개발에 대한

연구가 활발히 이루어지고 있다[1, 2].

이러한 전압불안정 현상을 해결하기 위해서 여러 가지 방안 중 다른 요인에 의해 영향을 받지 않는 저전압 부하차단 방안을 활용할 수 있다. 부하를 탈락시킴으로써 계통의 전압을 회복시키는 데 가장 효과적이고, 설비 투입에 따른 근본적인 문제 해결 이전에 적용할 수 있는 가장 경제적인 방법이다. 현재 국내 전력계통은 765kV 선로고장을 대비한 UVLS(Under Voltage Load Shedding) 시스템을 도입하고 운용 중에 있는데, 오프라인 시뮬레이션을 통하여 미리 결정된 판단기준을 적용함으로써 예기치 못한 계통사고나 실시간 계통운전 상황이 정확히 반영하지 않을 수 있다. 또한, 산정된 부하차단 용량을 일괄적으로 차단하도록 구성되어 있는 중앙집중형 방안을 적용하고 있어 불필요한 부하차단에 따른 경제적 손실을 야기할 수 있는 가능성이 있다. 이에 계통의 위험한 상태를 정확하게 판단하여 잘 반영할 수 있도록 실시간 측정 장비인 PMU(Phasor Measurement Unit)를 통해 보다 정확한 부하차단을 수행하는 연구가 많은 연구 기관 및 전력 회사에서 진행 중에 있다. PMU를 통해서 부하지역을 제어할 수 있는 알고리즘을 적용한 분산형 방안을 국내 계통에서 활용한다면 계통 내 심각한 사고나 예기치 못한 사고가 발생했을 때 빠른 대응을 할 수 있을 뿐만 아니라, 보다 효과적인 부하차단을 수행할 수 있다[3, 4].

또한, 계통을 구성하고 있는 부하의 특성이 변경되고 있으며 계통의 형태가 복잡해지면서 실제 현실 상황을 가정한 모의가 진행될 필요성이 증대되고 있다. 여러 전력회사에서 부하의 적절한 모델을 찾기 위한 연구가 진행되어 왔고, 세계적으로도 다양한 방법으로 부하모델을 찾기 위한 연구가 진행되고 있다.

<sup>†</sup> Corresponding Author : Coon Tec, Korea

E-mail : yunan2@naver.com

접수일자 : 2017년 2월 3일

최종완료 : 2017년 2월 27일

공장의 대형 모터부하부터 소형 가정용 모터부하의 특성을 반영하는 유도전동기 모델을 고려할 경우 FIDVR(Fault Induced Delayed Voltage Recovery)현상이 발생하여 전압 회복에 영향력을 미쳐 계통운영 측면에서의 전압안정도 확보 방안이 마련되어야 한다[5-7].

이에 본 논문에서는 모터부하 고려한 경우 상정사고 발생 시 계통에 발생하는 전압 지연 회복 현상을 완화하여 계통안정화를 달성하기 위해 부하차단 방안을 적용하며, 기존의 중앙집중형 방안과 분산형 방안의 비교 분석을 통해 실제 활용 가능성 여부를 검토한다. 또한, 실제 한전 계통 데이터를 이용한 동적 해석을 수행하였으며, 가장 심각한 상정사고인 765kV 선로 사고 발생 시 재폐로 시간 및 발전기 안정화 장치 운영현황 등을 고려한 사례연구를 통해 제안 방안의 효용성을 분석한다.

## 2. 국내 저전압 부하차단 현황 분석

국내 전력계통은 수도권 지역에 많은 부하가 밀집해 있지만 그에 상응하는 발전량이 많지 않아 비수도권 지역에서 생산된 발전량을 용통선로를 통해 공급받는 복잡조류의 특징을 가지고 있다. 복잡조류 공급선로는 주요 345kV 및 765kV 선로이며, 수도권으로 많은 조류가 흐르는 용통선로에 고장이 발생하면 계통은 심각한 영향을 받게 된다. 6개의 용통선로 중 어떠한 사고가 발생하여 계통이 안정하도록 운전되는 경우 비수도권 으로부터 운송될 수 있는 전력의 양은 매우 적어지게 되므로 비경제적인 계통운전을 수행할 수 있게 된다. 또한, 수도권 지역은 무효전력 수급 불균형으로 인한 전압불안정 현상이 발생하게 된다. 특히, 신안성-신서산 765kV 상정고장(1루트 2회선 차단)시에는 계통운영 측면에서 전압불안정 현상을 제어할 수 없어, 광역정전으로의 확대를 방지하기 위해 최후의 수단으로 해당 발전력에 상응하는 수도권 지역의 부하를 차단 해야 한다. 이를 위해 현재 국내 계통에서는 고장과급방지를 위한 수도권 부하차단 시스템을 운용하고 있다[8].

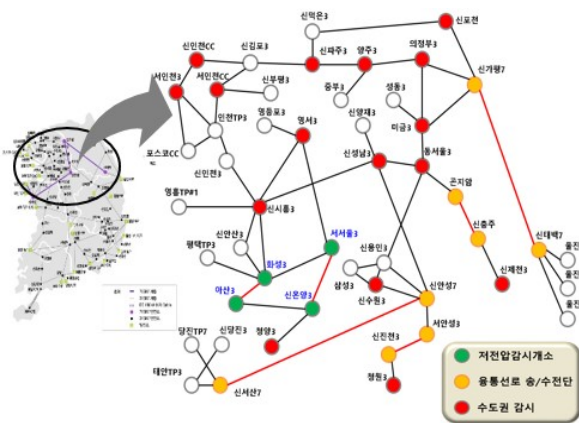


그림 1 WAMAC과제의 PMU 설치 현황  
Fig. 1 PMU installation places of WAMAC project

전력 시스템 운영자는 전압 불안정 현상을 사전에 방지하기 위해 용통선로의 조류의 크기를 모니터링하고 있는데, 효율적인 전력 시스템의 운영을 위해 K-WAMS(Wide Area Monitoring System) 과제를 통해 실시간 전력계통 감시시스템을 개발

하였다. K-WAMS 과제를 통해 4개의 PMU를 한전 전력 시스템에 설치하였으며, 계통의 전압, 전류의 위상(Phasor)을 시각 동기화하여 중앙시스템에서 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발하여 미래 전력 시스템 제어기술의 기반을 마련하였다[9, 10].

또한, WAMS와 WACS(Wide Area Control System)를 결합한 개념인 WAMAC(Wide Area Monitoring And Control)과제를 통해 심각한 상정고장에 대비할 수 있는 광역 모니터링 및 제어 시스템을 개발하였다. PMU의 실시간 정보를 사용하여 부하차단 및 다단계 부하차단에 대한 연구가 진행되었으며, WAMAC의 안정성과 가용성을 향상시키기 위해 총 40 대의 PMU가 한전 계통에 설치되었다. 이를 통해 계통을 실시간으로 모니터링하여 계통운영의 안정성 및 효율성을 향상시킬 수 있게 되었다. 그림 1은 한전 계통의 PMU 설치 현황을 나타낸다.

### 2.1 중앙집중형 부하차단 방안

중앙집중형 방안은 여러 개소에서 측정된 전압정보 및 기타 여러 정보들이 하나의 제어기로 모여 중앙 제어기에서 계통의 불안정 여부를 판단하는 방식이다. 따라서 여러 정보를 이용하여 계통 불안정 여부를 판단하므로 정확하고 빠르게 부하차단 동작을 수행할 수 있다. 일반적으로 특정된 고장의 과급효과를 억제하기 위한 목적으로 적용된다. 차단되는 부하량은 계통해석 결과를 바탕으로 미리 선정된 양을 차단 하게 되며 여러 단계로 차단할 수 있도록 설정할 수 있다. 지금까지는 오프라인 환경에서 차단용량을 미리 결정하여 계통이 부하차단 조건을 만족할 경우 차단하는 방안에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이러한 방안은 너무 보수적인 경우 불필요한 부하차단이 진행될 수 있고, 너무 경제적인 경우 전압불안정을 방지하지 못할 수도 있다는 단점이 있다. 계통의 상황에 따라 다양한 결과가 나올 수 있으므로 정확한 상태를 반영 하기에는 어려움이 있다. 따라서 계통의 안정성이 최우선임을 고려하여 가장 안정적인 방향으로 계획하여야 할 것이다.

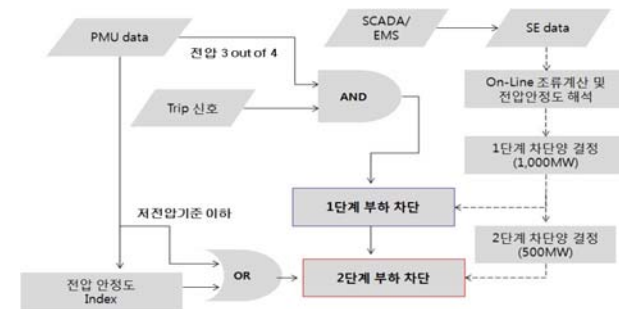


그림 2 중앙집중형 부하차단 방안 수행 절차  
Fig. 2 Centralized UVLS scheme procedure

현재 국내 전력시스템에 적용되고 있는 중앙집중형 방안은 앞서 언급한 WAMAC 기술을 기반으로 운영되고 있다. 수도권 부하 집중 지역의 765kV 선로 사고 발생 시 광역정전을 예방하기 위해 설계되어 있다. 계통에 심각한 사고가 발생 할 경우 송전선로는 5cycle이내에 트립(Trip)되며, 선로의 차단기가 오픈 되어 트립신호가 송출되거나 선로에 흐르는 조류의 크기를 검출하여 일정수준 이하가 될 경우 중앙의 SCADA 시스템으로 비상 신호를 전송하게 된다. 감시모선의 전압이 저전압 감시

기준인 340kV이하로 200msec 동안 지속되면 UVR(Under Voltage Relay)에 의한 차단신호가 SCADA 시스템으로 전송된다. SCADA 시스템은 전압 붕괴를 피하기 위해 신호를 수신하여 미리 결정된 판단기준에 의해 부하차단을 수행하게 된다. 그림 2는 중앙집중형 부하차단 방안이 구현되는 절차를 나타낸다.

### 2.2 분산형 부하차단 방안

분산형 방안은 개별 개소에서 측정된 전압정보를 이용하여 계통의 안정/불안정 여부를 판단하는 방식이다. 실제로 차단될 부하에 제어가 분산 설비되어 있는 시스템으로 필요에 따라서는 다른 제어기와의 협조제어를 수행하여야 하므로 이를 위한 통신링크가 필요하다. 분산형 방안은 예측되지 않은 다양한 사고를 방지할 수 있도록 설계할 때 유용하게 활용 가능하며, 계통의 하위 전압단에서 전압수준을 관찰하여 계통의 위험이 감지되면 해당 모선의 부하를 차단하게 된다. 실시간 모니터링 시스템에 의해 계통의 말단, 즉 부하단의 PMU에서 취득된 데이터를 이용해서 실시간으로 계통 내 부하모선을 개별적으로 감시한다. 또한 실시간으로 계통의 위험상태를 판단할 뿐 아니라 실시간으로 유효전력 여유량이 계산되므로 위험이 감지되면 최적의 차단량을 산정할 수 있다. 계통의 부하단에 PMU가 설치되어 전압, 전류 정보를 취득하며, 이를 바탕으로 계통 전체를 테브닌(Thevenin) 등가회로로 구성하여 실시간 유효, 무효전력 여유를 계산한다. 계산된 유효, 무효전력 여유가 일정 수준 이하로 감소할 경우 부하차단을 수행하게 된다. 실시간 전압안정도 여유는 전력 시스템의 계통 운영자에게 부하차단을 위한 정보로써 제공 될 수 있으며, 다른 변전소와의 협조제어를 지속적으로 수행하여 계통의 전압안정성을 유지할 수 있게 된다.

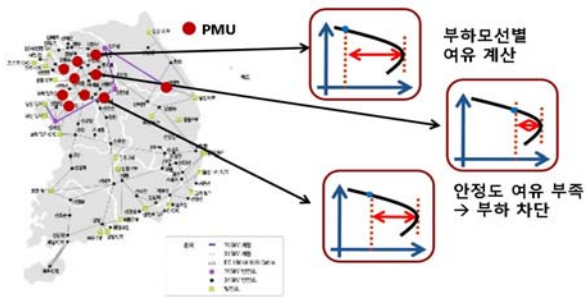


그림 3 분산형 부하차단 방안 개념도  
Fig. 3 Decentralized UVLS scheme concept

먼저 PMU와 같은 실측 장비를 통해 실시간으로 전압과 전류를 취득한 것을 바탕으로 부하로 공급되는 P, Q 부하량을 계산하고, 추정을 통해서 계통을 등가회로로 구성한다. 각 부하 모선의 등가 전압과 등가 임피던스를 추정된 값을 이용하여 각 부하모선에서 최대 전력 전달 가능한 값에서 부하 P, Q 값을 제외한 값이 부하 각각의 유효전력 여유, 무효전력 여유가 된다. 이를 통해 일정 수준 이하로 떨어지게 되면 부하차단을 수행하게 된다. 분산형 부하차단 시스템은 PMU 데이터를 이용하여 계통을 실시간으로 감시하고 계통의 위험상태를 실시간으로 판단하여 계통을 효율적으로 운영할 수 있다. 계통 상태를 정확하게 반영하여 최소한의 부하제어를 수행하여 부하차단에 따른 경제적 손실을 최소화 할 수 있다. 또한, 효율적인 부하

제어를 통해 계통안정화를 달성 할 수 있어 지능형 부하제어 시스템을 구현하는데 활용 될 수 있다. 그림 3은 분산형 부하차단 방안의 개념도를 나타낸다.

### 3. 모터부하 고려에 따른 전압 지연 회복 특성 분석

최근 가정용 에어컨 부하의 급증으로 인하여 하계 최대 부하 시 모터부하가 차지하는 비율은 지속적으로 증가하는 추세에 있다. 따라서 동특성 해석에서 전압안정도를 평가하기 위해서는 모터부하의 적용이 필수적이다. 계통 내 모터부하의 비율이 낮은 경우 사고 발생 시 전압의 지연 회복 현상이 나타나지 않지만 모터부하의 비율이 높을 경우 전압의 지연 회복 현상이 나타나거나 전압붕괴로 이어지게 된다. 또한 계통의 전압이 일정 수준이하로 지속 될 경우 모터의 실속(Stall)에 의해 무효전력을 급격하게 소모하여 계통의 안정화에 영향을 미치게 되는 FIDVR 현상이 발생 할 수 있다.

모터부하를 적용하기 위해서는 기본적으로 부하모델링이 수행되어야 한다. 현재 부하차단 시스템에서는 모터부하를 고려하지 않은 상태에서 동적해석을 수행하고 있다. 부하 특성에 따른 시스템 상태의 변화는 부하차단 용량을 계산하는데 있어 영향을 미칠 수 있다. 특히, 전압안정도를 확보하기 위해서는 부하의 전압 특성이 중요하므로, 본 논문에서는 문헌상에서 제시하고 있는 동적모델을 활용한다[11, 12].

#### 3.1 모터부하 모델링

모터부하의 동적 모델은 과도 리액턴스인  $V_d'$ ,  $V_q'$ 와 슬립 파라미터인  $s$ 로 구성되어 있으며, 모터부하모델의 동적 수식은 다음과 같다.

$$\frac{dV_d'}{dt} = -\frac{1}{T_r} [V_d' - (X_s - X_s')i_d] + s\omega_0 V_q' \quad (1)$$

$$\frac{dV_q'}{dt} = -\frac{1}{T_r} [V_q' + (X_s - X_s')i_q] - s\omega_0 V_d' \quad (2)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H_r} [V_d' i_d + V_q' i_q - T_L] \quad (3)$$

여기서,  $I_d, I_q$  : 고정자 전류,  $\omega_0$  : 동기 속도  
 $H$  : 관성 상수,  $T_r$  : 시간 상수  
 $s$  : 회전자 슬립,  $T_L$  : 부하 토크  
 $X_s$  : 동기 리액턴스,  $X_s'$  : 과도 저항

모터부하 임피던스는 다음식과 같다.

$$Z_{load} = \frac{R}{Slip} + jX \quad (4)$$

계통이 정상상태에 있을 경우 모터 슬립의 값은 동기 속도를 나타내는 0의 값에 근접하게 된다. 하지만 모터 슬립의 값은 고정된 회전자 전류 상태에서는 1에 근접하게 된다. 이 경우

부하전압이 감소하고 슬립이 증가함에 따라 실속상태가 되어 전력 시스템의 전압이 지연 회복 되는 현상이 발생하게 된다.

### 3.2 전압지연회복(FIDVR)현상 완화 방안

FIDVR 현상을 완화하기 위한 제어 솔루션은 공급측면과 수요측면에서 분류 해 볼 수 있다. 전력회사에서 적용하는 가장 보편적인 공급측면의 솔루션은 무효전력의 보상을 위해 FACTS(Flexible AC Transmission System)장치를 설치하는 방안이 있으나, 비용적인 측면에서 단점이 있다. 전압 지연 현상의 영향을 완화하기 위한 수요측의 솔루션은 활용하기 위해서는 지역의 특성과 비율을 우선적으로 검토해야 한다. 사고 제거 시간에 따라 전압 변화의 복구 특성이 크게 영향을 받을 수 있으므로 사고 제거 시간을 단축 할 수 있는 방안과 계전기의 작동 시간을 빠른 시간에 차단 할 수 있도록 재설정하는 방법이 있다. 또한, UVLS 방안은 빠른 계통 붕괴에 효과적으로 대응할 수 있으며, 계전기의 활용으로 사고에 대한 전압안정성의 확보가 가능하다. UVLS 방안의 목적은 계통의 불안정을 방지하는 것이다. 일반적으로 단기 전압 불안정은 모터부하의 기기적인 특성에 의하여 발생하는데, 심각한 고장에 의해 계통에 불안정이 발생하면 계통의 안정화 시키는 목적으로 부하차단을 수행된다.

이에 본 논문에서는 모터부하 고려 시 전압 지연 회복 현상이 관찰되면 부하를 차단하여 계통의 전압을 회복시키는 UVLS 방안을 활용하여 전압 지연 회복 현상을 완화시키는 방안을 검토한다.

## 4. 국내 전력계통 적용 사례연구

본 논문에서는 저전압 부하차단 방안을 적용하여 모터부하 고려에 따른 전압 지연 회복 현상을 완화시키는 사례연구를 실제 한전 계통 데이터를 활용하여 동적 해석을 수행하였다. 전력시스템을 계획하고 운영하는 데 있어 동적 해석 시뮬레이션을 활용하고 있는데, 모터부하의 유무에 따라 결과에서 차이를 보이게 되므로 모터부하를 고려하여 계통 모의를 수행하여야 정확한 검토가 가능하다. 가장 심각한 765kV 선로고장을 적용한 전압불안정 시나리오를 선정하였고, 모의 시 부하차단을 수행하는 부하 모선은 총 20개이다. 계통 안정화를 위해 우선적으로 중앙집중형 방안을 적용하여 부하차단을 수행하며, 중앙집중형 방안에서 차단된 후보 부하모선들의 유효전력 여유를 관찰한 후 분산형 방안을 적용하여 부하차단을 수행한다. 이러한 결과를 바탕으로 중앙집중형과 분산형 방안의 부하차단 용량과 계통 안정화 달성 여부의 결과를 비교 분석한다. 동특성 모의 시뮬레이션을 위해 PowerTech의 TSAT 10.0을 이용하였다.

UVLS의 기본적인 목적은 계통의 저전압을 감지하여 계통을 안정화 시키는 것이며, FIDVR 현상과 같은 예기치 못한 상황에 대한 제어전략을 수립하여 광역정전을 미연에 방지할 수 있는 것이다. 최적의 UVLS를 수행하기 위해서는 부하차단 용량, 위치, 지연시간 등이 계통의 상황에 맞게 결정되어야 하며 통신링크를 통해 빠른 시간 안에 구현되어야 한다. 다음은 본 논문에서 가정한 전압불안정 시나리오와 사례연구의 수행절차를 보인다.

표 1 UVLS 방안의 사례연구 수행절차

Table 1 Review Case Study Procedure of UVLS Scheme

Step	시간(sec)	수행내용
1	1.0000	신서산 - 신안성 TL 선로 사고 적용
		선트 리액터 탈락
2	1.0833	선로 사고 제거
3	1.1500	발전기 탈락
4	1.5000	부하차단 수행
5	20.000	감시모선 전압 관찰

### 4.1 중앙집중형 방안 적용 사례

중앙집중형 방안은 원거리에 있는 부하모선에서의 전압 및 위반 시간 등에 대한 정보를 통신수단을 통하여 중앙의 제어기로 전달한다. 부하차단 로직에 따라 부하차단 여부를 결정하며 실제 차단되는 부하 지역으로 신호를 전송하여, 신호를 수신한 각 부하모선에서 부하차단을 수행한다. 중앙집중형 방안은 상정사고 발생 후 0.5초에 일괄적으로 부하차단을 수행한다. 부하차단을 수행하는 모선은 총20개의 모선으로 각 모선의 부하를 100% 전량 차단하게 되며, 부하차단 용량은 1,320.972 MW이다.

표 2 지연 시간 및 부하차단 용량(중앙집중형)

Table 2 Delay Time and Amount of Shedding(Centralized)

Bus No.	Delay Time[sec]	Amount [MW]
1	1.5000	58.488
2	1.5000	135.572
3	1.5000	5.597
4	1.5000	83.528
5	1.5000	138.353
6	1.5000	40.704
7	1.5000	101.819
8	1.5000	81.425
9	1.5000	32.546
10	1.5000	141.443
11	1.5000	93.793
12	1.5000	69.306
13	1.5000	162.766
14	1.5000	39.422
15	1.5000	32.011
16	1.5000	6.857
17	1.5000	49.537
18	1.5000	9.435
19	1.5000	10.261
20	1.5000	28.109
Total		1,320.972

그림 4는 중앙집중형 방안을 적용한 사례의 전압변동을 나타낸다. 사고 발생 후 전압이 급격하게 강하하는 모습을

보이지만, 부하차단 수행 후 전압이 정상상태로 회복하는 것을 볼 수 있다.

사고 전 감시모선의 전압은 1.0027V~1.0309V로 관찰되었으며, 부하차단 수행 후 감시모선의 전압은 1.0076V~1.0541V로 회복되는 모습을 보이고 있어 부하차단 방안이 계통을 안정화 할 수 있는데 효과가 있음을 확인하였다.

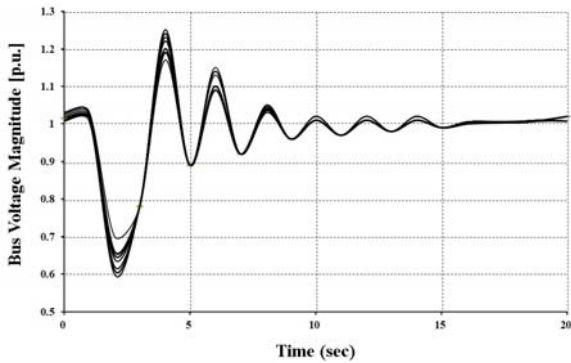


그림 4 감시모선의 전압 변동(중앙집중형)  
Fig. 4 Voltage Magnitude at the Monitoring Bus(Centralized)

#### 4.2 분산형 방안 적용 사례

분산형 방안은 실제로 차단될 부하에 제어가 설비되어 있는 형태로 해당 부하모선의 유효전력 여유가 일정 수준 이하로 강하할 경우에 자기 모선의 부하를 일정수준 차단하게 된다. 상정사고 발생 시 전압이 강화하게 됨과 동시에 유효전력의 여유 또한 감소하게 된다. 이러한 계통의 상황을 PMU를 통해 실시간으로 정보를 취득하여 계통의 안정화 달성에 활용하므로, 좀 더 정확한 부하차단 용량을 산정할 수 있게 된다.

본 논문에서 적용한 분산형 방안은 변전소 내의 PMU로부터 값을 취득하여 테브닌 등가 전압과 임피던스를 계산하여 해당 부하 모선의 유효전력 여유가 일정 수준 이하(20%)로 떨어지게 되면 부하를 차단하는 알고리즘으로 구성 되어 있다.

그림 5는 분산형 방안을 적용한 사례의 전압변동을 나타낸다. 사고 발생 후 전압이 급격하게 강하하는 모습을 보이지만, 부하차단 수행 후 전압이 정상상태로 회복하는 것을 볼 수 있다.

사고 전 감시모선의 전압은 1.0027V~1.0309V로 관찰되었으며, 부하차단 수행 후 감시모선의 전압은 1.0088V~1.0550V로 회복되는 모습을 보이고 있어 부하차단 방안이 계통을 안정화 할 수 있는데 효과가 있음을 확인하였다.

20개의 부하 모선 중, 모선 3,14,15,16은 유효전력 여유가 20% 이하로 떨어지지 않아 부하차단을 수행하지 않는다. 그 외 대부분의 부하모선은 2초 이내에 부하차단이 수행되었으며, 각각의 부하모선을 100% 전량 차단하며, 부하차단 용량은 1,237.085 MW이다.

중앙집중형 방안과 분산형 방안을 적용하여 상정사고 시 부하차단을 수행하여 계통의 안정화를 달성하였다. 두 가지 방안의 감시모선의 전압이 유사하게 회복하는 모습을 보이고 있지만, 총 부하차단 용량에서는 차이를 보이고 있다. 분산형 방안의 부하차단 용량이 중앙집중형 방안에

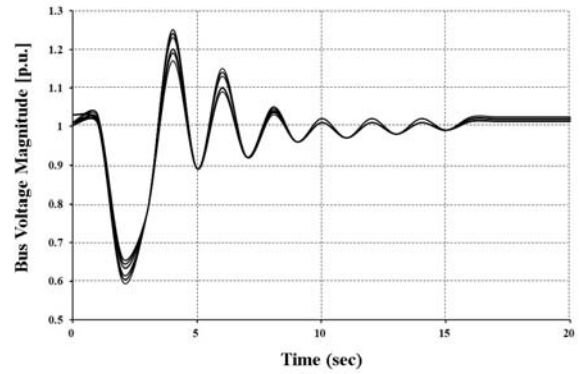


그림 5 감시모선의 전압 변동(분산형)  
Fig. 5 Voltage Magnitude at the Monitoring Bus(Decentralized)

표 3 지연 시간 및 부하차단 용량(분산형)

Table 3 Delay Time and Amount of Shedding(Decentralized)

Bus No.	Delay Time[sec]	Amount [MW]
1	1.8750	58.488
2	1.8750	135.572
4	1.5417	83.528
5	1.1250	138.353
6	1.1250	40.704
7	1.1250	101.819
8	1.5417	81.425
9	1.5417	32.546
10	1.5417	141.443
11	1.5417	93.793
12	1.5417	69.306
13	1.5417	162.766
17	1.6667	49.537
18	1.5417	9.435
19	1.5417	10.261
20	1.5417	28.109
Total		1,237.085

비해 83.887 MW가 감소하는 효과를 볼 수 있었다. 분산형 부하차단 방안이 실제 시스템에서 좀 더 효용성 있는 방안으로 고려 될 수 있는 결과로 판단된다.

#### 5. 결 론

본 논문은 모터부하 고려 시 발생하게 되는 FIDVR 현상을 완화하고 심각한 상정고장에 의한 전압불안정을 해결하기 위해 UVLS 방안을 구현하여 계통의 안정화를 달성하였다. 분산형 방안은 PMU를 통해 취득한 실시간 정보를 바탕으로 각 부하모선의 유효전력 여유 분석을 통해 부하차단을 수행하게 되며 심각한 고장에 의한 전압 지연 회복 현상을 분산형 방안의 적용을 통해 완화시키는 결과를 사례연구를 통해 그 효용성을 입증하였다. 효율적인 계통



감시를 바탕으로 계통의 불안정 요인이 발생할 경우 부하 차단을 통한 수동제어 동작이 요구되며 계통의 안정성을 확보할 수 있을 만큼 충분히 큰 용량이어야 하며 동시에 과도한 차단에 따른 경제적 손실을 최소화하기 위한 최소 용량을 차단하여야 한다. 이를 위해 기존의 중앙집중형 방안과 분산형 방안의 부하차단 용량을 비교 분석하여 제안 방안의 효용성을 입증하였다.

향후에는 계통의 상태를 효율적으로 감시할 수 있는 PMU를 활용하여 현재의 계통 감시방안을 보완하여 기존의 감시 알고리즘과 병행 수행할 수 있는 알고리즘으로의 개발이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 실시간 계통상태 판단에 기반을 두어 상황에 따른 최적의 부하차단을 수행하는 지능형 부하제어 시스템의 개발이 수행되어야 할 것이다.

### References

- [1] B. Hoseinzadeh, F. Faria Silva, and C. Leth Bak, "Adaptive tuning of frequency thresholds using voltage drop data in decentralized load shedding", *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 4, pp. 2055-2062, July 2015.
- [2] B. Hoseinzadeh, F. Faria Silva, and C. Leth Bak, "Decentralized coordination of load shedding and plant protection considering high share of RESs", *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2015.
- [3] Sachin K. Jain, Preeti Jain, Sri Niwas Singh, "A Fast Harmonic Phasor Measurement Method for Smart Grid Applications", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, Jan, 2017.
- [4] Emily R. Fernandes, Scott G. Ghiocce, "Application of a Phasor-Only State Estimator to a Large Power System Using Real PMU Data", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, Jan, 2017.
- [5] Michael W. Fisher, Ian A. Hiskens, "Phase Boundary Computation for Fault Induced Delayed Voltage Recovery", 2015 IEEE 54th Annual CDC, 2015.
- [6] Zhang Yue1,a, Li Xiaoming, "Dynamic Voltage/Var Sensitivity Approach for Improving Fault-induced Voltage Delayed Recovery Problems", International Power, Electronics and Materials Engineering Conference, 2015.
- [7] Krishnanjan Gubba Ravikumar, Scott Manson, "Analysis of Fault-Induced Delayed Voltage Recovery Using EMTP Simulations", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2016.
- [8] KPX, "Power System Operation Guide", 2012.
- [9] Jeonghoon Shin, Suchul Nam, Jaegul Lee, Youngdo Choy, Taekyun Kim, Hwachang Song, "Application of Multi-step Undervoltage Load Shedding Schemes to the KEPCO System" *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 4 no. 4, p. 476-484, 2009.
- [10] Jeonghoon Shin, Suchul Nam, Seungmook Baek, Jaegul Lee, Seungpil Moon, Taekyun Kim, "Study on the Development of Load Shedding Scheme for Improving Voltage Stability of Seoul Metropolitan Area using Synchro-phasor Data", *Trans. KIEE*. vol. 59, no. 9, SEP, 2010.
- [11] Yunhwan Lee, "Using the Under Voltage Load Shedding for Stability Enhancement of Power Systems Considering Induction Motor Load", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* vol. 65P, no. 1, pp. 1~6, 2016.
- [12] Prabha Kundur, "Power System Stability and Control", 1994.

### 저 자 소 개



#### 이 윤 환 (李 允 煥)

2010년 고려대 일반대학원 전자전기공학과 졸업(석사), 2014년 동대학원 졸업(박사).  
 2014년~2016년 한국스마트그리드사업단  
 신사업추진실 대리, 2016년~쿤텍(주)  
 기술연구소 선임연구원  
 E-mail : yunan2@naver.com