

광역정전 예방을 위한 분산형 부하 제어 방안에 대한 연구

A Study on Decentralized under Voltage Load Shedding Scheme for Preventing Wide-area Black Out

이 윤 환[†]
(Yun-Hwan Lee)

Abstract - An electric power system sometimes fails because of disturbances that occur unexpectedly, such as the uncontrolled loss of load that developed from cascading blackout. Which make stability through a little of under voltage load shedding should work. The development of phasor measurement unit(PMU) makes network supervision possible. The information obtained from PMU is synchronized by global positioning system(GPS). There are many real-time algorithms which are monitoring the voltage stability. This paper presents the study on the VILS(Voltage Instability Load Shedding) using PMU data. This algorithm computes Voltage Stability Margin Index(VSMI) continuously to track the voltage stability margin at local bus level. The VSMI is expressed as active and reactive power. The VSMI is used as an criterion for load shedding. In order to examine the algorithm is effective, applied to KEPCO system.

Key Words : PMU, Under voltage load shedding, Voltage instability load shedding(VILS), Voltage stability margin

1. 서 론

최근 전력계통은 고도의 기술발전과 산업화에 따른 전력 수요의 증가로 인해 대규모의 전력의 안정적인 공급과 높은 전력품질 유지가 요구되고 있다. 하지만 전력계통은 복잡하게 분포 되어 있어 부하나 설비요소들이 운용측면에서 감시, 해석, 제어가 점점 어려워지고 있는 실정이다. 또한 전력계통의 대형화, 복잡화는 계통사고에 대한 위험성을 내포하고 있으며 다양한 외란에 노출되는 취약성을 가지게 되었다.

이러한 경우 계통에 대한 제어가 적절히 이루어 지지 않게 되면, 산업 및 경제적인 심각한 피해를 입히는 부분적 정전 또는 광역 정전 등을 야기 할 수 있다. 우리나라 전력계통의 경우 전체부하의 40%를 넘는 전력수요가 수도권 지역에 집중되어 있으나, 대규모 발전단지는 경제적, 환경적인 요인으로 인하여 비수도권 지역에 분포하고 있어 수도권 유통선로를 통해 대규모 전력전송이 이루어진다. 수도권에 있는 발전기는 대부분 발전단가가 비싼 가스터빈 등의 발전기로 이루어져 있으며, 경제적 이익을 추구하는 전력시장 환경에서 대용량의 수도권 유통전력의 경향은 더욱 더 심각해질 것으로 예상된다. 이러한 집중된 부하, 장거리 송전, 지속적인 부하증가 등의 원인으로 우리나라 전력계통은 전압 불안정(Voltage Instability) 및 전압 붕괴(Voltage Collapse)에 대한 구조적 취약성을 내포한다. 이러한 국내 전력계통이 갖는 특수성으로 인한 운영의 복잡화는 광역 정전 발생 확률을 증가시키고 있는 실정이다. 따라서 전력계통의 효율적인 운용을 위하여 계통의 전압안정성 유지측면에서 효과적

이며 경제성 있는 제어방안의 수립이 필요하다.[6]

따라서 전압 불안정 현상을 해결하기 위한 여러 가지 방안 중에서 다른 요인의 영향을 받지 않는 저전압 부하 차단 방안을 들 수 있다. 이는 부하를 탈락시킴으로써 계통의 전압을 회복시키는 데 가장 효과적이고, 설비 투입에 따른 근본적인 문제 해결 이전에 적용할 수 있는 가장 경제적인 방법으로써 심각한 사고가 발생했을 때 이 저전압 부하 차단 시스템이 활용 되고 있다. 또한, 좀 더 효율적이고 지능적인 전력망을 구축하기 위하여 기본적으로 전력계통의 여러 가지 이벤트에 대하여 실시간으로 감시 할 수 있게 된다면 심각한 사고 발생 시 전체 계통으로 파급되어지는 것을 전략적으로 차단 할 수 있을 것이다. 이에 계통의 위험한 상태를 정확하게 잘 반영할 수 있는 실시간 측정 장비인 PMU(Phasor Measurement Unit)를 통해서 보다 정확한 부하 제어를 수행하는 연구가 진행 중에 있다.[1]

PMU는 계통의 변전소 등에 연결 되어 실시간으로 전압과 전류를 Phasor 형태로 측정하는 장치이다. 기존의 측정 장비와는 다르게 GPS(Global Positioning System)를 통하여 매우 정밀하게 시각동기화 되며, 샘플링 주기가 매우 짧아, 더 빠르게 더 많은 정보를 취득할 수 있다. 이러한 특성으로 전력 계통 전체의 다이내믹 스냅샷을 실시간으로 취득하는 것이 가능 해졌다. 이는 기존의 SCADA/EMS 시스템의 단점을 크게 극복할 수 있게 되어 활용도가 매우 높아 졌다고 할 수 있다.[4]-[6],[10]

따라서 PMU를 통해서 부하지역을 제어할 수 있는 방안이 우리나라 계통에 활용한다면 계통 내 심각한 사고나 예측하지 못한 사고가 발생했을 때 빠른 대응을 할 수 있을 뿐만 아니라, 정확한 부하 차단 용량을 산정할 수 있다.

본 논문에서는 해외에서 제안 된 분산형 부하 제어 시스템을 국내 계통에 적용하여 문제점 및 향후 연구개발 방향에 대하여 검토하고자 한다. 또한, 사례연구를 실제 한전 하계

[†] 교신저자, 정회원 : 고려대학교 전기전자공학과 박사

E-mail : yunan2@korea.ac.kr

접수일자 : 2013년 11월 15일

수정일자 : 2013년 12월 11일

최종완료 : 2014년 1월 22일

철두부하 계통을 이용하였으며 상정사고 중 가장 심각한 고장인 765kV 선로고장을 적용하여 효용성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 부하 제어 방식에 따른 구분

최근 발생한 여러 나라의 대정전 사례에서 미루어 보면, 계통 운영자 (system operators)가 계통에서 아주 빠르게 진행되는 연속 고장 (cascading outages)을 예방하거나 제어하는 데 있어 한계가 있음을 알 수 있다. 이러한 연속 고장 발생의 초기단계에서 신뢰성이 있으며 또한 시기적절하도록 자동화된 제어 동작을 계통에 취함으로써 대규모 광역정전을 회피하도록 하는 방안이 심각하게 고려되어야 한다.

부하제어를 수행하는 절차는 그 방식에 따라서 중앙집중형 방식과 분산형 방식으로 나눌 수 있다.

2.1.1 중앙집중형 방식

원거리의 제어 개소 및 말단으로부터의 모든 정보가 하나의 중앙 제어센터로 집중되어 SIPS(System Integrity Protection Schemes)에 대한 의사결정 및 수정제어 동작이 하나의 지역에 설치되어 있는 제어기에서 수행되도록 하는 방식이다. 이에 포함되는 모든 함수는 EMS 함수 제어센터에 설치된 PLC 또는 변전소의 RTU들로 구현될 수 있다. 원거리에 있는 관찰모선에서의 전압 및 위반 시간 등에 대한 정보는 통신수단을 통하여 중앙의 제어기로 전달되고 제어기는 부하차단 로직에 따라 부하차단 여부를 결정하여 실제 차단되는 부하 지역으로 신호를 전송하게 된다. 신호를 수신한 각 부하는 실제 부하를 차단하는 절차를 수행한다. 따라서 중앙집중형 방식에서는 정보수집 및 동작 개시를 위한 정보전달이 필요하므로, 원격 정보를 수집하고 동작을 개시하도록 하는 통신 링크가 수반되어야 한다.[6]

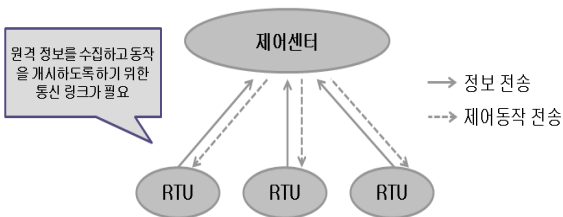


그림 1 중앙집중형 방식
Fig. 1 Centralized scheme

계통의 안정 여부를 판단하는 일은 불필요한 부하차단의 방지 및 부하차단 오/부동작에 따른 광역정전으로의 파급을 방지하기 위한 것으로 매우 중요하고 신중하게 수행되어야 한다.

중앙집중형 차단 방식은 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 부하차

단 여부에 대한 의사결정의 판단이 정확하고 보다 민감하게 계통 불안정에 대응할 수 있으며 보다 빠르게 부하차단 동작을 수행할 수 있는 장점이 있다. 차단되는 부하량은 계통 해석 결과를 바탕으로 미리 선정된 양을 차단하게 되며 여러 단계로 차단하도록 설정할 수 있다. 또한 부하차단 외에도 캐패시터 뱅크 스위칭이나 HVDC 전력 변화, 발전기 단자전압의 변동, 위험한 발전기의 탈락 등 기타 여러 가지 가능한 제어동작을 병행하여 수행할 수 있다. 하지만 이러한 중앙집중형 방식은 원거리 측정 결과를 전송받고 제어 신호를 전송해야 하는 통신링크가 필요하며 이를 제어하기 위한 컴퓨터 및 여러 장비를 필요로 하기 때문에 설비비용이 높은 단점을 가진다.

본 방식은 전압불안정을 발생시키는 심각한 고장을 경험했거나 이를 계통해석을 통해 인지한 경우의 전력회사에서 주로 적용하는 방식이다. 즉, 일반적으로 특정된 고장의 파급효과를 억제하기 위한 목적으로 적용된다.

2.1.2 분산형 방식

중앙집중형 방식은 정보의 수집 및 부하차단 로직이 중앙의 하나의 로직에서 수행되지만 분산형 방식은 각각의 제어기들이 각 지역에 설치되어 있어 의사결정 및 수정제어 동작이 서로 다른 지역에 설치되어 있는 제어기에서 수행된다. 계통의 온건성(Integrity) 보호 함수는 협조 운전과 분산형 제어기들의 제어 동작에 의하여 구현된다.

분산형 방식은 실제로 차단될 부하에 제어기가 설치되어 있는 형태로 제어기가 설치된 모선의 전압이 일정수준 이하로 일정시간동안 유지되면 제어기는 자기 모선의 부하를 일정수준 차단한다. 이러한 제어기가 여러 개소에 분산 설치되어 있는 시스템이며 필요에 따라서는 다른 제어기와의 협조 제어를 수행하여야 하며 이를 위한 통신링크가 필요하다.[6]

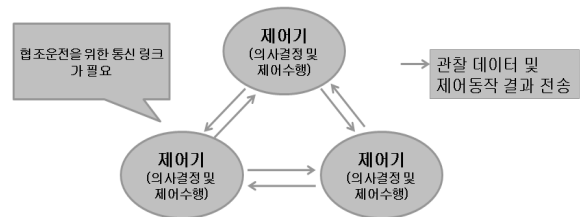


그림 2 분산형 방식
Fig. 2 Decentralized scheme

분산형 방식은 개별 개소에서 전압정보를 측정하여 계통의 안정/불안정 여부를 판단한다. 실제로 차단될 부하의 변전소에서 전압을 측정하고 위험하다고 판단될 경우 자기 변전소의 부하를 차단하는 방식이므로 관찰되는 모선의 전압수준은 하위 전압단의 전압을 관찰하여야 한다. 이는 중앙집중형 방식과는 대조적인 부분이며 하위 전압수준을 관측하기 때문에 계통의 심각성 여부를 보다 늦게 판단하게 될 가능성 및 정확한 판단이 어려운 단점을 가진다.

분산형 차단 방식은 개별 개소에서 측정된 전압정보를 이용하여 계통의 안정/불안정 여부를 판단하는 방식이다. 하위 전압단에서의 전압을 측정하게 되며 여러 모선의 전압정보

를 이용하는 중앙집중형 방식에 비해서는 안정/불안정 여부의 판단이 부정확할 수 있으나 디자인이 간단하고 구현하기 쉽다는 장점이 있다.

본 방식을 적용한 전력회사들은 주로 발생확률이 낮아 계통 계획에 포함되지 않는 고장을 고려하는 목적으로 분산형 UVLS 시스템을 채택하고 있다. [5]

2.2 분산형 부하 제어 방안 (Voltage Instability Load Shedding)

UVLS는 기본적으로 저전압을 감지하여 계통의 위험을 사전에 방지하기 위해서 부하를 차단하는 방안이다. 계통의 불필요한 부하차단을 방지하면서 동시에 계통의 불안정 요소를 효율적으로 제거하기 위해서는 저전압 감시를 위한 전압 set point를 효과적으로 선정하여야 한다. 이때 전압 set point가 지나치게 낮을 경우 계통의 심각한 외란을 방지하지 못할 수도 있으며 반대로 지나치게 높을 경우 불필요한 부하차단을 수행하게 될 수도 있다. 따라서 적절한 전압 set point를 설정하는 절차는 매우 어렵고 힘든 일이라 할 수 있다. 기존의 UVLS set point는 PV해석, 또는 국내의 경우 FV 해석을 통하여 결정된다.

이러한 방법은 실제 전력계통 시스템을 어떻게 모델링하느냐에 따라 그 정확도가 크게 의존하게 된다. 따라서 정확한 모델링이 수행되지 않을 경우 큰 오차를 범할 수 있으며 고정된 fixed set-point를 선정하여 적용하는 것은 불필요한 부하차단이 수행되거나 또는 부하차단 실패에 따른 광역정전을 야기할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 PMU와 같은 고속 측정 장치를 이용하여 계통을 실시간으로 감시하면서 실시간 전압안정도 지수를 산출하여 이를 바탕으로 계통의 불안정 현상에 효과적으로 대처하는 방안이 연구되고 있다. 분산형 부하 제어 방안의 장점으로는 substation에서의 측정 데이터만을 사용하여 수행되고, local bus에서의 실시간 전압안정도 여유를 계통 운영자에게 제공할 수 있다. 또한 계통붕괴를 방지하기 위한 적응형 부하차단을 수행하고 wide-area voltage stability monitoring and control을 위한 다른 변전소와의 협조 제어가 가능하다.[1]

2.2.1 등가 회로와 전압안정도 여유 계산 [1]

분산형 부하 제어는 전압안정도 여유 계산은 감시하고자 하는 부하 모선에서 측정된 실시간 정보와 계산된 부하로 공급되는 P, Q를 계산하고, PMU와 같은 고속 측정 장비를 이용하여 실시간으로 계통을 감시한다. 등가 전압과 임피던스를 이용하여 테브닌 등가회로로 구성한다. 다음은 테브닌 등가회로로 구성된 1기 2모선 회로이다.

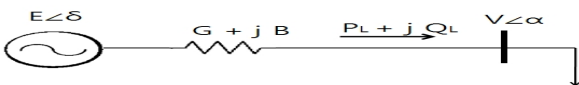


그림 3 테브닌 등가회로의 구성 (1기 2모선)
Fig. 3 Depicts the Thevenin equivalent system

테브닌 등가회로가 구성되면 전력 조류 방정식을 이용하여 부하로 공급되는 부하 량 P, Q를 쉽게 계산이 가능하다. 식 (1)은 P, Q 계산식을 나타낸다.

$$\begin{aligned} P_L &= EVY\cos(\alpha - \delta - \beta) - V^2G \\ Q_L &= EVY\sin(\alpha - \delta - \beta) + V^2B \end{aligned} \quad (1)$$

v, α : 부하 모선의 전압 크기 및 위상
Y, β : 등가 어미드턴스(G+jB)의 크기 및 위상
E, δ : 등가 전압의 크기 및 위상

위의 식을 E^2Y 로 나누어 정규화를 하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} p &= v\cos(\alpha - \delta - \beta) - v^2\cos\beta \\ q &= v\sin(\alpha - \delta - \beta) - v^2\sin\beta \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{where, } p = \frac{P_L}{E^2Y}, q = \frac{Q_L}{E^2Y}, v = \frac{V}{E}$$

식 (2)의 $v^2\cos\beta$ 과 $v^2\sin\beta$ 를 좌변으로 옮긴 다음, 양변을 제곱을 하게 되면 식 (3)과 같다.

$$(p + v^2\cos\beta)^2 + (q - v^2\sin\beta)^2 = v^2 \quad (3)$$

위의 수식에서 q를 $p\tan\phi$ 로 대체하면 식 (4)와 같다. (ϕ : 부하 역률)

$$p = -v^2\cos\phi\cos(\Phi + \beta) + \cos\phi\sqrt{v^2 - v^4\sin^2(\Phi + \beta)} \quad (4)$$

p의 수식을 v로 미분하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial p}{\partial v} = 1 - 4v^2 + 4v^4\sin^2(\Phi + \beta) = 0 \quad (5)$$

식 (14)는 v에 관한 4차 방정식이며, v를 v^2 으로 치환하여 해를 구하게 되면 식 (6)과 같은 Critical v값과 최대 p값을 구할 수 있다.

$$v_{critical}^2 = \frac{1 - \cos(\Phi + \beta)}{2\sin^2(\Phi + \beta)} = \frac{1}{2[1 + \cos(\Phi + \beta)]} \quad (6)$$

$$p_{max} = \frac{\cos\phi}{2[1 + \cos(\Phi + \beta)]}$$

$$q_{max} = \frac{\sin\phi}{2[1 + \cos(\Phi + \beta)]}$$

위에서 구한 값은 다음과 같은 수식으로 표현되어 Critical Voltage 및 최대 전력 전달 가능 값을 계산할 수 있으며 이는 전압불안정 현상을 감시할 수 있는 요소로 사용될 수 있다.

$$V_{critical} = Ev_{critical} = E\sqrt{\frac{1}{2[1+\cos(\Phi+\beta)]}} \quad (7)$$

$$P_{max} = E^2 Y_{P_{max}} = E^2 Y \cdot \frac{\cos\Phi}{2[1+\cos(\Phi+\beta)]}$$

$$Q_{max} = E^2 Y_{Q_{max}} = E^2 Y \cdot \frac{\sin\Phi}{2[1+\cos(\Phi+\beta)]}$$

위에서 계산된 수식을 통하여 전압안정도 여유를 계산할 수 있으며 수식으로 식 (8)과 같이 표현된다.

$$P_{margin} = P_{max} - P_L \quad (8)$$

$$Q_{margin} = Q_{max} - Q_L$$

$$S_{margin} = \sqrt{P_{max}^2 + Q_{max}^2} - S_L$$

위에서 계산된 실시간 유효전력 여유를 통하여 실제 계통의 실시간 전압안정도를 판별이 가능해졌으며 이를 통해서 부하 차단이 필요할 경우, 각 변전소에 부하 차단을 알릴 수 있는 지표로 사용된다.

2.2.2 기본원리

분산형 부하 제어 방안은 PMU와 같은 측정 장비를 통해서 취득된 데이터를 이용해서 실시간으로 계통 내 부하모선을 개별적으로 감시한다. 또한 실시간으로 계통의 위험상태를 판단할 뿐 아니라 실시간으로 유효전력 여유 량이 계산되므로 위험이 감지되면 최적의 차단 량을 실시간으로 제어할 수 있다.

분산형 부하 제어 방안의 수행절차는 다음 그림 4와 같다.[1]

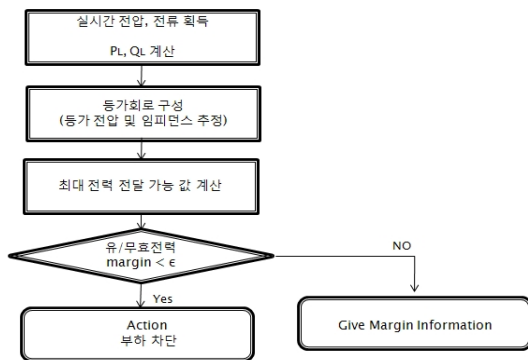


그림 4 분산형 부하 제어 방안 흐름도

Fig. 4 Flow chart of Decentralized Scheme

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 통해서 일정 수준 이하로 떨어

지게 되면 부하 차단을 하게 된다.

3. 사례 연구

한전 실 계통에 적용하여 분산형 부하 제어 방안의 효용성에 대한 사례연구를 진행하였다. 계통에 전압 불안정 현상이 일어나는 사고를 모의하고, 전압안정도 여유를 계속 추적하도록 한다. 우리나라 계통은 수도권 지역에 많은 부하가 모여 있는 것에 반해 그에 대응하는 발전량이 많지 않아서 대부분의 전력이 비 수도권지역에서 공급되고 있다. 이러한 특성으로 인하여 수도권으로 들어오는 선로 중에서 많은 조류가 흐르게 되는 선로에 사고가 났을 경우, 수도권 지역에 심각한 영향이 끼칠 수 있다.

모의 시 부하 제어를 하게 되는 부하 모선은 총 14개 모선이다. 이 모선들은 한전 계통에서 가장 심각한 사고인 신서산-신안성 765 kV 선로에 고장이 났을 경우, 수도권 내부하모선 중에서 민감한 변화를 보이게 되는 모선이다.

모의 데이터는 한전의 하계 첨두 부하 계통 데이터를 이용하고, 동특성 모의 시뮬레이터는 PowerTech의 TSAT 10.0을 이용하였다.

3.1 Case 1 (중앙집중형 방안)

제안한 방안의 효용성을 입증하기 위해서는 전압 붕괴를 가능케 하는 전압 불안정 시나리오가 필요하다. 다음은 상정 사고 시나리오와 수행 및 검토 절차를 보인다.

i) 상정 사고 시나리오

2초 : 신서산 - 신안성 TL 선로 사고 적용
선트 리액터 탈락

2.0833초 : 선로 사고 제거

2.15초 : 발전기 탈락(당진 화력 3,4,5,6,7 호기)

표 1 지연 시간 및 부하 차단 용량

Table 1 Delay Time and Amount of Shedding

Bus No.	Delay Time[sec]	Amount of shedding[MW]
1	2.5	70.609
2	2.5	38.195
3	2.5	68.466
4	2.5	38.195
5	2.5	68.466
6	2.5	42.402
7	2.5	127.309
8	2.5	259.744
9	2.5	73.376
10	2.5	169.721
11	2.5	106.792
12	2.5	114.714
13	2.5	69.609
14	2.5	120.392

ii) 수행 및 검토 절차

- Step 1 : 모의 시간 총 10초 수행
- Step 2 : 사고 후 0.5초 후에 부하 차단
- Step 3 : 해당 부하모선의 실시간 유효전력 여유 관찰
- Step 4 : 감시 (서서울 345 kV) 모선의 전압 관찰

2초에 신서산 - 신안성 선로에 루트 사고를 내면 사고로 인한 전압 변화가 일어난다. 사고가 발생하면 저전압 부하 차단 시스템에 의해서 사고 후 0.5초에 부하를 일괄적으로 차단하여 제어하게 된다.

부하 차단을 하는 모선은 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 모선으로 각 모선의 부하를 100%를 전량 차단한다. 총 14개의 부하를 차단하는데 총 부하 차단량은 1,367.99 MW이다.

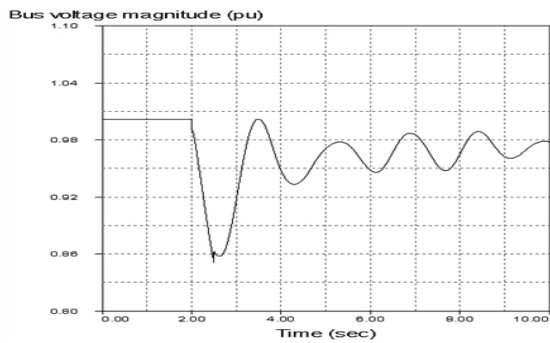


그림 5 Case 1에서의 감시 모선의 전압
Fig. 5 Voltage Magnitude of the Monitoring Bus at Case 1

그림 5는 중앙집중형 방안을 수행 한 후의 감시 모선인 서서울 모선의 전압을 나타낸다. 서서울 모선의 사고 전 전압은 1.0084 [P.U]이고, 사고 직후 전압이 급격히 떨어졌으나, 사고 후 0.5초에 부하 차단을 함에 따라서 0.9779 [P.U]까지 회복하였다.

3.2 Case 2 (분산형 방안)

Case 2는 Case 1과 동일한 전압 불안정 시나리오와 수행 및 검토 절차를 보이지만, Case 1과는 다르게 해당 모선별 유효전력 여유가 10% 이하로 떨어질 경우에 부하를 차단한다. 2초에 신서산 - 신안성 선로에 루트 사고를 내면 Case 1과 마찬가지로 전압이 많이 떨어짐에 따라서 유효전력 여유 또한 감소하게 된다. 분산형 방안에서의 PMU(Phasor Measurement Unit)는 실시간으로 전압과 전류를 Phasor 형태로 측정하는 취득 장치로 사용된다. 분산형 방안은 변전소 내의 PMU로부터 값을 취득하여 테브닌 등가 전압과 임피던스를 계산하여 해당 부하 모선의 유효전력 여유가 일정 수준 이하(10%)로 떨어지게 되면 부하를 차단하는 알고리즘으로 구성 되어 있다. 다음은 전압 불안정 시나리오와 수행 및 검토 절차를 보인다.

i) 상정 사고 시나리오

- 2초 : 신서산 - 신안성 TL 선로 사고 적용
선트 리액터 탈락
- 2.0833초 : 선로 사고 제거
- 2.15초 : 발전기 탈락(당진 화력 3,4,5,6,7 호기)

ii) 수행 및 검토 절차

- Step 1 : 모의 시간 총 10초 수행
- Step 2 : 해당 부하모선의 실시간 유효전력 여유가 10%이하로 떨어졌을 시 부하차단
- Step 3 : 해당 부하모선의 실시간 유효전력 여유 관찰
- Step 4 : 감시 (서서울 345 kV) 모선의 전압 관찰

부하 모선 중, 모선 13은 2.2832초에 유효전력 여유가 10% 밑으로 떨어져서 부하 차단을 하게 된다. 그 이후로 2.3999초에 모선 7을 차단하고, 2.4166초에 모선 6을 차단, 2.4832초에 모선 9를 차단, 2.5082초에 모선 14를 차단, 2.5165초에 모선 8을 차단, 2.5915초에 모선 4를 차단, 5.2903초에 모선 12를 차단, 5.9650초에 모선 11을 차단, 5.9900초에 모선 1을 차단한다. 2, 3, 5, 10 모선은 유효전력 여유가 10% 밑으로 떨어지지 않게 되므로 부하 차단을 하지 않는다. 총 10개 부하 모선을 차단하게 되고, 총 부하 차단량은 1,021.90 MW이다.

표 2 지연 시간 및 부하 차단 용량
Table 2 Delay Time and Amount of Shedding

Bus No.	Delay Time[sec]	Amount of shedding[MW]
13	2.2832	68.466
7	2.3999	127.309
6	2.4166	42.402
9	2.4832	73.376
14	2.5082	120.293
8	2.5165	259.744
4	2.5915	38.195
12	5.2903	114.714
11	5.9650	106.792
1	5.9900	70.609

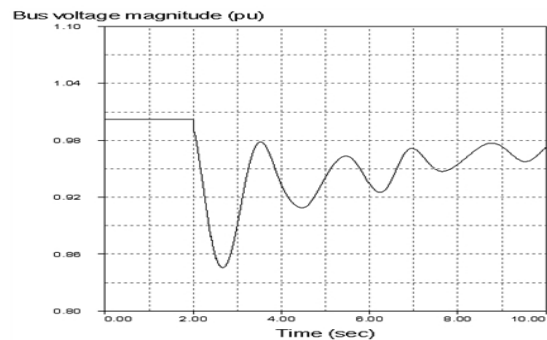


그림 6 Case 2에서의 감시 모선의 전압
Fig. 6 Voltage Magnitude of the Monitoring Bus at Case 2

서서울 모선의 사고 전 전압은 1.0084 [P.U]이고, 사고 직후 Case1과 같이 전압이 급격히 떨어졌다. 모선 별 유효전력 여유가 10% 이하로 떨어졌을 때 개별적으로 차단함으로써 0.9730 [P.U]까지 회복하였다. 그림 6은 분산형 방안을 수행 한 후의 감시 모선인 서서울 모선의 전압을 나타낸다.

표 3 Case 1과 Case2 의 비교

Table 3 Compare Case 1 with Case 2

	Case 1	Case 2	차이
감시 모선 전압	0.9779 [P.U]	0.9730 [P.U]	0.0049 [P.U]
부하차단 용량	1,367.99 [MW]	1,020.90 [MW]	346.09 [MW]

Case 1과 Case 2의 사고 후(부하 차단 후) 감시 모선의 전압이 유사하게 회복하는 모습을 볼 수 있다. 하지만 Case 1과 Case 2의 부하 차단 량은 차이가 나게 된다. Case 2의 부하 차단량이 Case 1의 부하 차단량 보다 346.090 MW 만큼 줄어들음으로써 좀 더 좋은 효과를 볼 수 있었다. 본 논문에서 제안한 분산형 부하 차단 방안을 실제 시스템에 적용하여 효용성을 입증하였다.

3. 결 론

본 논문은 실시간 감시 장치를 통해 획득할 수 있는 지역 계통 정보만을 가지고 전압안정도 여유를 실시간으로 감시 하면서 제어할 수 있는 분산형 부하 제어 방안을 제안하였다. 본 제어 방안은 부하 모선에서 등가 회로를 구성하여 추정된 등가 전압과 등가 임피던스를 통해서 전압안정도 여유를 계산할 수 있었다. 전압 불안정 현상이 발생했을 때, 중앙에서 일괄적으로 부하 차단하는 것이 아닌 부하 모선 각각 개별적으로 제어가 가능하고 전압의 크기가 아닌 유효전력 여유 량의 관찰을 통해서 판단할 수 있다.

수도권 지역 중에서도 신서산 - 신안성 선로 사고 시에 민감한 반응을 보이는 14개 모선에 먼저 적용하여 제어 방안의 활용 가능성을 보였다. 신서산 - 신안성 사고가 났을 때, 각 부하 모선의 실시간 유효전력 여유 량이 사고 전에 비해 10% 떨어졌을 때 부하를 차단하였다. 사례 연구를 통하여 분산 형 부하 제어 방안의 효용성 입증하였고, 분산형 부하 제어 방안을 이용하여 심각한 사고 또는 예기치 못한 사고로 인한 전압 불안정 현상을 방지하는데 큰 도움이 될 것으로 기대된다. 추후 연구 에서는 실제 PMU 정보를 바탕으로 한 분산형 부하 제어 방안의 효용성을 입증하는 것이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Zhang et al., "Method For Voltage Instability Load Shedding Using Local Measurements", United State Patent No. US 7,603,203 B2, 2009
 [2] DSA POWER TOOLS, "TSAT User Manual", TSAT, Power-Tech
 [3] Vu, k, M M Begovic, D Novosel and M M Saha, "Use

of local Measurements to Estimate Voltage Stability Margin", 20th International Conference on Power Industry Computer Application. IEEE.

[4] I.C Decker, M.N. Agostini, J.G. Ehrensperger, A.S. e Silvia, A.L. Bettiol, S.L. Zimath, "Synchronized Phasor Measurement System : Development and Applications", IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, May 23-27, 2004.
 [5] Corsi, S., " Wide area voltage protection", Generation, Transmission & Distribution, IET, October 2010, On page: 1164 - 1179 . Vol.4.
 [6] "Undervoltage Load Shedding Protection ", Working Group C-13, System Protection Subcommittee IEEE PES Power System Relaying Committee Draft 4.1
 [7] Milosevic, B., Begovic, M., "Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements", On page(s): 121 - 127, Vol.18, Power Systems, IEEE Transactions on, Feb 2003.
 [8] Glavic, M., Van Cutsem, T., "Adaptive wide-area closed-loop undervoltage load shedding using synchronized measurements", On page(s): 1 - 8, Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, 25-29 July 2010.
 [9] Karlsson, D., Lindahl, S., "Wide area protection and emergency control", On page(s): 5 Vol.1, Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE, 6-10 June 2004.
 [10] D. Novosel, V. Madani, B. Bhargava, K. Vu, J. Cole, "Dawn of the grid synchronization", Power and Energy Magazine, IEEE, Vol. 6, pp.49-60, 2008.

저 자 소 개



이 윤 환 (李 允 煥)

He received the M.S. degree in electrical engineering from Korea University, Seoul, Korea, in 2010. He is currently a Ph.D. candidate in the Department of Electrical Engineering, Korea University.