

## PMU 정보를 이용한 분산형 부하 제어 방안에 대한 연구

이윤환\*, 한상욱\*, 이병준\*, 권세혁\*  
고려대학교\*

### A Distributed Load Control Scheme Using PMU Data

Yun-Hwan Lee\*, Sang-Wook Han\*, Byong-Jun Lee\*, Sae-Hyuk Kwon\*  
Korea University\*

**Abstract** - 계통에 심각한 외란이 가해지면 고장이 광역정전으로 발생하여 주변 지역으로 파급되는 현상이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위한 수단으로 부하를 탈락시킴으로써 계통의 전압을 회복시키는 데 가장 효과적이고, 설비 투입에 따른 근본적인 문제 해결 이전에 적용할 수 있는 가장 경제적인 방법인 부하차단이 적용될 수 있다. PMU를 통해서 계통의 상태를 실시간으로 감시하고 취득한 실시간 데이터를 이용하게 되면 계통 내 심각한 사고나 예기치 못한 사고가 발생했을 때 빠른 대응을 할 수 있을 뿐만 아니라, 정확한 부하 차단 용량을 산정할 수 있다. 이에 본 논문에서는 계통의 전압 불안정 현상을 방지하기 위해서 적용할 수 있는 제어 수단인 분산형 부하 제어 방안에 대하여 소개하고 실제 한전 계통에 적용하여 본다.

#### 1. 서 론

최근, 전 세계적으로 전력시장은 점점 포화상태에 가까워 가고 있는 추세이다. 전력 수요 증가율은 점점 낮아지는데 반해서 발전 설비의 증가율은 점점 낮아지고 있어 이와 같은 현상을 반복해오고 있다. 또한, 저렴한 가격으로 전력을 공급하려는 사회적 분위기에 맞추어, 새로운 발전 설비 구축 보다는 현재 설치 되어있는 전력 설비를 최대한 활용하려고 하는 추세이다.

이러한 상태에서 만약 계통에 급격한 외란이 일어났을 경우, 고장이 주변 지역까지 파급되어 심각한 광역정전을 야기 시킬 수 있다. 특히, 우리나라의 경우 집중된 수요 지역인 수도권 지역과 원거리에 위치한 대규모 발전단지 때문에 장거리 송전이 불가피한 현실이며, 이는 다른 국가들에게도 공통적으로 겪고 있는 문제라고 한다. 이러한 문제는 곧바로 전압 불안정 현상을 야기 시키는 요인이 될 수 있다. 따라서 전압 불안정 현상을 해결하기 위한 여러 가지 방안 중에서 다른 요인으로 인한 영향을 받지 않는 방안으로 저전압 부하차단 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 방법으로 고려됨에 따라서 현재 한전에서 이 저전압 부하 차단 시스템을 계통에 적용하여 심각한 사고가 발생했을 때 쓰이는 방법이다.

또한, 좀 더 효율적이고 지능적인 전력망을 구축하기 위하여 기본적으로 전력계통의 여러 가지 이벤트에 대하여 실시간으로 감시 할 수 있어야, 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.

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 시각 동기화되며, 샘플링 주기가 매우 짧아, 더 빠르게 더 많은 정보를 취득할 수 있다. 이러한 특성으로 전력 계통 전체의 다이나믹 스냅샷을 실시간으로 취득하는 것이 가능 해졌다. 이는 기존의 SCADA/EMS 시스템의 단점을 크게 극복할 수 있게 되어 활용도가 매우 높아 졌다고 할 수 있다.[3]

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

#### 2. 부하 제어 방안

##### 2.1 부하 제어 방식에 따른 구분

부하 제어 방식은 중앙 집중형과 분산형으로 두 가지로 구분할 수 있다. 중앙 집중형 방식은 원거리의 제어 개소 및 말단으로부터의 모든 정보가 하나의 중앙 제어센터로 집중되어 SIPS(System Integrity

Protection Schemes)에 대한 의사결정 및 수정제어 동작이 이 하나의 지역에 설치되어 있는 제어기에서 수행되도록 하는 방식이다. 계통의 안정 여부를 판단하는 일은 불필요한 부하차단의 방지 및 부하차단 부동작에 따른 광역정전으로의 파급을 방지하기 위한 것으로 매우 중요하고 신중하게 수행되어야 한다. 이 방식은 전압불안정을 발생시키는 심각한 고장을 경험했거나 이를 계통해석을 통해 일반적으로 특정된 고장의 파급효과를 억제하기 위한 목적으로 적용된다.

중앙 집중형 방식에서는 정보수집 및 동작 개시를 위한 정보전달이 필요하므로, 원격 정보를 수집하고 동작을 개시하도록 하는 통신 링크가 수반되어야 한다. 원거리 측정 결과를 전송받고 제어 신호를 전송해야 하는 통신링크가 필요하며 이를 제어하기 위한 컴퓨터 및 여러 장비를 필요로 하기 때문에 설비 비용이 높은 단점을 가진다.

분산형 방식은 각각의 제어기들이 각 지역에 설치되어 있어 의사결정 및 수정제어 동작이 서로 다른 지역에 설치되어 있는 제어기에서 수행된다. 분산형 방식은 실제로 차단될 부하에 제어기가 설치되어 있는 형태로 제어기가 설치된 모선의 전압이 일정수준 이하로 일정시간동안 유지되면 제어기는 자신의 모선 부하를 일정수준 차단한다. 이러한 제어기가 여러 개소에 분산 설치되어 있는 시스템이며 필요에 따라서는 다른 제어기와와의 협조제어를 수행하여야 하며 이를 위한 통신링크가 필요하

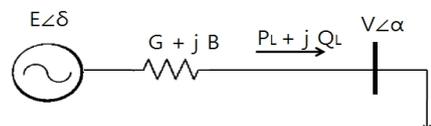
다. 분산형 차단 방식은 개별 개소에서 측정된 전압정보를 이용하여 계통의 안정/불안정 여부를 판단하는 방식이다. 하위 전압단에서의 전압을 측정하게 되면 여러 모선의 전압정보를 이용하는 중앙 집중형 방식에 비해서는 안정/불안정 여부의 판단이 부정확할 수 있으나 디자인이 간단하고 구현하기 쉽다는 장점이 있다.

##### 2.2 분산형 부하 제어 방안

기본적인 저전압 부하 차단 방안은 계통의 불안정 요소를 효율적으로 제거하기 위해서는 저전압 감시를 위한 전압 set point를 효과적으로 선정하여야 한다. set point는 실제 전력계통 시스템을 어떻게 모델링하는냐에 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. 본 논문에서는 제어방법 중에서 최근에 개발된 분산형 부하 제어 알고리즘(Voltage Instability Load Shedding)에 대해서 소개한다. 이 분산형 부하 제어 알고리즘은 EPRI에서 2009년 10월 특허에서 발췌한 내용 바탕으로 한다. 각 부하모선 변전소의 전압과 전류를 취득하여 실시간으로 계통의 안정도 감시하고, 유/무효전력 여유량이 일정 수준 이하가 되면 부하차단 수행하는 방안이다.[1] 정보 획득 위치가 각 변전소로 한정되어, 변전소에 설치되는 PMU를 통해서 전압안정도를 감시 & 제어를 한다면 우리나라 계통 전체의 전압 불안정 현상을 방지할 수 있는 효과를 가져 올 것으로 예상된다.

##### 2.2.1 등가 회로와 전압안정도 여유 계산

분산형 부하 제어는 전압안정도 여유의 계산은 감시하고자 하는 부하 모선에 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.[1]



<그림 1> 테브닌 등가회로로 구성된 1기 2모선 회로도

테브닌 등가회로가 구성되면 전력조류 방정식을 이용하여 부하로 공급되는 부하량 P, Q를 쉽게 계산할 수 있다. 다음 수식은 P, Q 계산식을 나타낸다.

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

위의 식을  $E^2 Y$  로 나누어 정규화를 하면 다음 수식과 같다.

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

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

위의 수식에서  $v^2\cos\beta$ 와  $v^2\sin\beta$ 를 좌변으로 옮긴 다음, 양변을 제곱하게 되면 다음 수식과 같다.

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

위의 수식에서 q를  $\tan\phi$ 를 대체한 후, 적용하여 p의 수식으로 표현하면 다음 수식과 같다.

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

p의 수식을 v로 미분하면 다음 수식과 같다.

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

위의 수식은 v의 4차 방정식이며 v를 v 제곱으로 치환하여 해를 구하면 critical v 값 및 최대 p 값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{critical}^2 &= \frac{1 - \cos(\Phi + \beta)}{2\sin^2(\Phi + \beta)} = \frac{1}{2[1 + \cos(\Phi + \beta)]} \\ p_{max} &= \frac{\cos\phi}{2[1 + \cos(\Phi + \beta)]} \end{aligned} \quad (6)$$

위에서 구해진 값은 다음과 같은 수식으로 표현되어 critical voltage 및 최대 전력전달 가능값을 계산할 수 있으며 이는 전압불안정을 감지하기 위한 자료로 사용될 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{critical} &= E v_{critical} = E\sqrt{\frac{1}{2[1 + \cos(\Phi + \beta)]}} \\ P_{max} &= E^2 Y p_{max} = E^2 Y\sqrt{\frac{\cos\phi}{2[1 + \cos(\Phi + \beta)]}} \\ Q_{max} &= E^2 Y q_{max} = E^2 Y\sqrt{\frac{\sin\phi}{2[1 + \cos(\Phi + \beta)]}} \end{aligned} \quad (7)$$

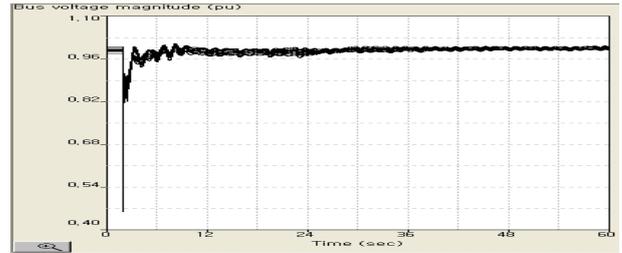
위에서 계산된 수식을 통하여 전압안정도 여유를 계산할 수 있으며 수식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{margin} &= P_{max} - P_L \\ Q_{margin} &= Q_{max} - Q_L \end{aligned} \quad (8)$$

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.

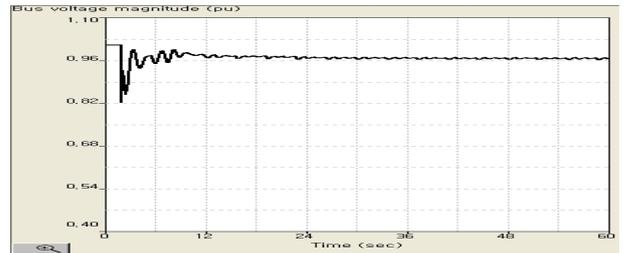
### 3. 사례 연구

분산형 부하 제어 방안을 통하여 연산한 전압안정도 여유의 효용성 검증에 위해서 2008년 한진 철도 계통을 이용하였다. 검증 시나리오는 총 60초 시뮬레이션 수행하게 되는데, 2초에 신서산 - 신안성 선로 사고를 발생시키고, 2.0833초에 신서산 - 신안성 선로 사고 제거하며, 2.15초에 당진 5개 발전기(당진3G, 당진4G, 당진5G, 당진6G, 당진7G)를 탈락시킨다. 해당 10개 부하모선을 차단시킨 후, 서서울 345kV 모선의 전압을 관찰한다.



<그림 2> 차단 부하모선의 전압 변화

<그림 2>는 분산형 부하 제어 방안을 수행한 그림으로 총 15개 부하모선의 전압 변화를 나타내고 있다. <그림 2>에서 볼 수 있듯이 2초에서 사고로 인한 전압 변화가 일어난다. 신서산 - 신안성 선로 사고 후 부하 차단을 하는 모선에서 100% 전량을 차단하였다. 이 모선들은 차단한 모선 때문에 유효전력 여유가 사고가 발생하는 시점에는 심한 변화가 일어났지만, 사고 후 0.5초 후에는 정상 상태를 알 수 있다. 총 차단 부하량은 약 1020 MW 이다.



<그림 3> 서서울 모선의 전압 변화

<그림 3>은 사고 시나리오에서의 서서울 모선의 전압 변화에 관한 그림이다. 서서울 모선의 전압은 사고 전에는 1.0085V이었으나, 사고 직후 전압이 급격히 떨어졌으나, 사고 후 0.5초에 부하 차단을 함에 따라 0.9651V까지 회복하였다.

## 4. 결 론

본 논문은 실시간 감시를 통해 획득할 수 있는 지역 계통 정보만을 이용하여 전압안정도 여유를 실시간으로 감시하면서 제어할 수 있는 분산형 부하 제어 방안을 제시하였다. 본 제어 방안은 부하 모선에서 등가회로를 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. 사례 연구를 통하여 분산형 부하 제어 알고리즘의 효용성 입증하였고, 분산형 부하 제어 알고리즘을 이용하여 심각한 사고 또는 예기치 못한 사고로 인한 전압 불안정 현상을 방지하는데 큰 도움이 될 것으로 기대된다. 추후 연구에서는 실제 PMU 정보를 바탕으로 한 분산형 부하 제어 방안의 효용성을 입증하는 것이 필요할 것이다.

### <감사의 글>

본 연구는 2011년도 한국과학재단의 연구지원에 의해 수행된 연구결과입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Zhang et al. "Method for Voltage Instability Load Shedding using Local Measurements", United States Patent, US 7,603,203 B2, 2009
- [2] 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.
- [3] I C Decker, M.N. Agostini, J.G. Ehrensperger, A.S. e Silvia, A.L. Bettli, S.L. Zimath, 2004. "Synchronized Phasor Measurement System : Development and Applications", IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, May 23-27, 2004.