

**변전소 환경에서의 전압 무효전력 제어 알고리즘 개발**

강상균, 진웅재, 이병준, 권세혁  
Korea university

**Development of voltage-reactive power control algorithm in substation system**

Sanggyun Kang, Wongjae Jeon, Byongjun Lee, Sae-hyuk Kwon  
Korea university

**Abstract** - 전력계통에 대한 감시, 해석, 진단 및 제어에서 방재, 보안기능에 이르기까지 변전소에서 행하여지는 모든 기능을 통합, 기능의 극대화, 공간의 최소화, 관리의 효율화 등을 도모하기 위하여 변전소자동화(Station Automation : SA)라는 개념이 대두되었다. 하지만 계통의 상태에 따라서 OLTC의 tap동작은 오히려 전압안정성을 저해하는 방향으로 동작할 수도 있다. 또한 변전소에 연결되어 있는 switched capacitor와 OLTC의 잘못된 co-ordination 동작은 쓸데없는 tap 동작을 야기시킨다. 본 논문에서는 단일 변전소 환경하에서 전압 무효전력을 제어하는 알고리즘에 대해서 논의할 것이다.

**1. 서 론**

지속적인 전력 수요의 증가 및 다양한 전력전자 기기 등의 사용으로 오늘날의 전력계통은 점점 거대해지고 운용측면에서 감시, 해석 및 제어가 점점 어려워지고 있다. 특히 우리나라의 경우 경인지역에 부하가 집중(전체 부하의 42% 정도)되어 있고, 남부 해안지역에 발전소가 집중되어 있다. 이와 같은 계통의 특성 때문에 우리는 부하단에서의 전압안정도라는 문제를 항상 고려해야 한다. 전압안정도는 국부적인 현상이 뚜렷하게 나타난다. 따라서 이에 대한 문제의 해결을 위해서는 중앙 급전실에서 전압안정성 문제를 제어하는 것보다 부하단에 가장 가까운 변전소 환경하에서 제어하는 것이 보다 효과적이다. 또한 중앙 제어 방식을 사용하기 위해서는 각 모선에서 들어오는 방대한 data를 총괄적으로 처리해야 하기 때문에 국부적 상황이 강한 전압안정성 문제의 해결책으로써 비효율적이다.

또한 오늘날의 전력계통은 계통의 감시, 해석, 진단 및 제어에서 방재, 보안 기능에 이르기까지 변전소에서 행해지는 모든 기능을 통합, 기능의 극대화, 공간의 최소화, 관리의 효율화 등을 도모하기 위한 변전소 자동화(SA : Station Automation)에 초점을 맞추고 있다. 또한 눈부시게 발전한 정보통신 및 시스템 H/W, S/W 기술을 접목한다면, 기존의 변전소의 기능을 훨씬 뛰어넘는 기능 구현이 가능하다. 특히 우리나라의 정보통신 기술이 세계에서 수준급임을 감안한다면 전력 분야의 세계 기술을 선도할 수 있는 최적의 분야로 사료된다. 본 연구에서는 변전소의 가장 핵심적인 기능인 전압 및 무효전력설비 자동화 핵심 기술 개발을 목표로 설정하였다.

그 동안 진행되어온 전압안정도 해석은 off-line을 기반으로 행해졌다. 반면에 긴급한 경우 전압 방지를 위한 제어 또는 전압붕괴를 방지하기 위한 제어 또는 보호방안에 대한 연구는 아직도 어려운 문제로 남아있다. 전압 안정도 향상을 위한 방법으로는 shunt capacitor 투입, OLTC tap blocking, load shedding 등이 있다. 하지만 이는 대부분 수동으로 운전되어 긴급한 경우 전압 붕괴를 방지하기에 부족하다. 현재까지는 저전압 계전기(undervoltage relay)에 의한 부하차단 방안이 거의 유일한 계통 보호 방안으로 알려져 있고, 국내외 많은 전력회사에서 채택하여 운용하고 있다. 부하차단은 가장 확실한 계통 보호 방안이기는 하지만 정전최소화라는 운영자 측면에서 가장 피해야 할 방안이다. 전압 붕괴 현상은 저전압 현상일 때 이외에도 경부하이거나 무효전력이 과다상되어 있는 경우에도 발생할 수 있다. 따라서 현재 사용되는 저전압 현상 자체만으로 계통의 전압 안정성을 판단하는 방법에는 문제가 있다. 따라서 지역 계통 정보를 이용하여 전압 안정도 지수를 함께 이용함으로써 계통의 전압안정성 판단에 보다 신뢰성을 높일 수 있다.

**2. 본 론**

**2.1 전압안정도 지수**

전압안정도는 주어진 계통 상태에서 계통 전압을 안정하게 유지하는 능력을 말하며(IEEE 정의), 사고에 의한 계통 임피던스 증가 또는 부하의 증가 시 전력과 전압을 제어할 수 있는 능력을 의미한다. 특히 장기 전압 불안정 현상은 사고 후 OLTC, 발전기의 무효전력 공급능력의 한계 및 부하 회복 특성에 의하여 발생되며, 계통 고장의 심각성에 따라 전압붕괴에 이르게 된다.

**2.1.1 유효전력 여유(Active Power margin) 지수**

유효전력여유는 부하 증가를 전압 불안정 요인으로 보고 계통의 전체적인 부하를 증가시켜 나가면서 발전단으로부터 부하단으로 공급할 수 있는 최대 유효전력 전송량을 계산하여 현재 부하 수준에서 전압 붕괴 전까지의 유효전력의 증가 여유를 나타낸다. 유효전력여유 해석을 통해 계통 전체의 특성을 쉽게 알 수 있으나, 취약 지역의 검토에 필요한 정보는 제공하지 않

는다.

**2.1.2 무효전력 여유(Reactive power margin) 지수**

무효전력해석은 전압 불안정 현상이 부하단에서의 무효전력 수급 악화로부터 기인한다는 점에 초점을 두고, 모선 별로 추가 소모할 수 있는 무효전력의 최대량을 무효전력여유로서 나타내며, 계통 전체의 특성보다는 전압안정도의 지역적인 지수로서 각 모선 또는 지역별로 계통으로부터 공급받을 수 있는 무효 전력의 한계 정보를 제공한다. V-Q곡선은 주어진 모선에서의 무효전력 공급량 Qc와 모선 전압 사이의 관계를 나타낸다. 모선에 무효전력 공급을 표현하기 위해 유효전력 발전은 하지 않는 가상의 무효전력 발전기를 해당 모선에 투입한다. 다양한 전압 값에 대한 무효전력 발전량과의 관계를 도식화한 그래프가 V-Q곡선이다.

**2.1.3 Z 지수**

Z지수의 원리를 살펴보면, 계통의 변화에 따라 부하의 임피던스가 테브난 임피던스에 가까워진다는 사실에 착안하여, 시간에 따른 부하의 임피던스 제적을 통해 전압 안정도 측면에서 사고의 심각성을 판별하게 된다.

전력 계통에서의 최대전력전달 조건은 부하의 임피던스와 계통 임피던스가 같게 될 때이다.

$$|Z_h| = |Z_{app}| \quad (1)$$

Z지수는 기존의 저전압 계전기와 연계되어 온라인 계통 보호 차원에서 매우 유용하게 사용될 수 있으나, 계통 전체의 전압 안정도 해석 차원으로 사용되기는 힘들다. 그러나 모선 전압으로부터 테브난 임피던스와 테브난 전압을 구하는 방법을 통해 긴급한 경우 계통의 지역정보만으로 전압 불안정 현상을 제어할 수 있다.

**2.2 지역 정보를 이용한 전압안정도 평가 방안**

**2.2.1 기본 원리**

Z 지수에 대해 좀 더 자세히 알아보면 임의의 부하모선에서 바라본 전체 계통의 나머지 부분을 축약하여 테브난 등가회로로 표현할 수 있다. 최대전력 전달법칙과 같이 테브난 등가전원이 부하에 전달할 수 있는 최대전력은 테브난임피던스와 부하임피던스의 크기가 같아질 때이고, 계통의 안정조건은 식 (2)와 같다.

$$\frac{|Z_{Th}|}{|Z_{app}|} < 1 \quad (2)$$

Zapp : apparent impedance  
Zth : Thevenin impedance

**2.2.1 최소자승법을 이용한 상태 추정**

앞에서 설명한 바와 같이 계통의 전압안정성을 감시하려면 우선 실시간으로 변화하는 테브난 임피던스를 먼저 알아야 한다. 테브난 임피던스는 계통 전체의 정보를 포함하는 양이므로 계통 전체의 정보에 대해 알아야 하지만 전력계통도 하나의 회로이고 임의의 시간과 공간에서도 회로이론의 법칙을 만족해야 한다는 사실을 이용하면 부족한 정보를 이용하여 테브난 임피던스를 구하는 것이 가능해진다. 테브난 등가회로에서 회로방정식을 세우면 식 (3)과 같다.

$$\overline{E_{Th}} = \overline{V} + \overline{Z_{Th}} \overline{I} \quad (3)$$

이 식의 변수들을  $\overline{E_{Th}} = E_r + jE_i$ ,  $\overline{Z_{Th}} = R_{Th} + jX_{Th}$ ,  $\overline{V} = c + jd$ ,  $\overline{I} = a + jb$ 로 놓으면 식 (3)은 식 (4)로 변형된다.

$$\begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{Th} \\ X_{Th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \\ d \\ a \\ b \end{bmatrix} \quad (4)$$

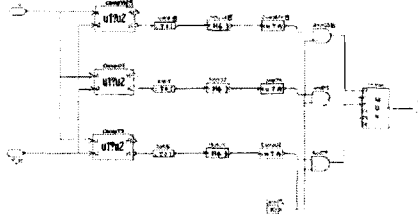
PMU와 같은 실시간 측정기기는 부하모선에서 전압, 전류, 유효 및 무효전력 등을 실시간으로 측정하여 곧바로 데이터베이스로 저장하거나 SCADA와 연계하여 계통정보로 활용할 수 있도록 하는 역할을 수행한다. 따라서 실시간 측정기기에서 제공하는 지역 계통운용정보를 가공하여 연속적으로 테브난 임피던스를 구할 수 있다. 세 개 이상의 데이터셋을 중첩하여 만든 방정식을 이용하여 해를 구할 때는 소위 "overdetermined" 상태가 되므로

최소자승법을 이용하면 오차를 줄일 수 있게 된다. 데이터창을 시간에 따라 움직여가면서 연속적으로 최소자승법을 적용하여 해를 구해나가면 실시간으로 테브난 임피던스를 추적하는 것이 되며, 각 스텝마다 동시에 계산되는 부하임피던스와 비교해나가면 계통의 전압안정성을 연속적으로 감시할 수 있게 된다.

### 2.3 전압을 고려한 Shunt capacitor 와 OLTC 제어

#### 2.3.1 Shunt Capacitor

변전소에서 capacitor bank를 동작시키기 위해서 전압 크기를 고려하여 shunt를 투입하게 된다. 단일 변전소에 여러 개의 capacitor bank가 존재하는 경우 각 전압 레벨을 설정하여 저전압 현상이 심한 경우 동시에 여러 개의 capacitor bank를 투입하는 방법을 생각할 수 있다. 그림 1은 shunt를 자동투입하기 위한 control block이다. control block은 실시간 digital simulator인 hypersim에서 구현되었다.

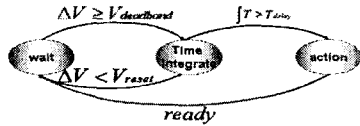


<그림 1> capacitor 자동 투입을 위한 control block

#### 2.3.2 OLTC Tap changer

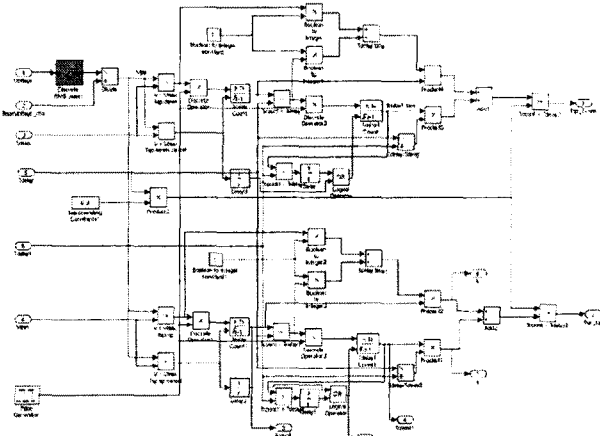
OLTC의 일반적인 동작은 다음과 같다.

1. 모선의 전압이 Deadband를 벗어나는 경우 time count 시작
2. Tdelay동안 전압이 deadband를 벗어나 있는 경우 tap이 동작 if, 일정시간이 지나기 전에 전압이 deadband 안쪽으로 회복되는 경우 tap은 동작하지 않고 그림 2에서의 wait 상태로 되돌아감
3. tap이 동작한 이후에도 계속적으로 전압이 deadband를 벗어나 있는 경우 Tdelay'를 이전의 Tdelay와 다르게 적용(일반적으로 Tdelay>Tdelay')



<그림 2> OLTC conventional control

OLTC의 자동 tap 투입을 위한 control block은 그림 3에 있다.

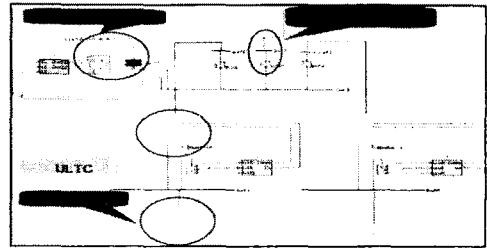


<그림 3> OLTC 자동 tap changer control block

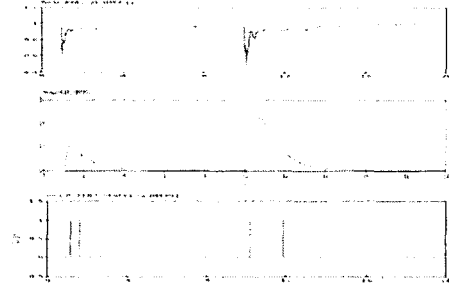
### 3. 사례연구

실시간 simulator인 Hypersim에서 3기 10모선 계통을 이용하여 변전소 환경을 구축하여, 여러 사고를 모의하였다. 구현된 변전소 환경은 그림 4와 같다. 154kV와 22.9kV 사이에 OLTC가 있고, 변전소에서 지역 계통 정보를 이용하여 Shunt Capacitor, OLTC Tap 동작, Load shedding 등을 제어할 수 있다

그림 1에서 구현된 자동 capacitor 투입 알고리즘에 대한 모의 결과는 그림 5에 나타나 있다. shunt 투입 알고리즘은 threshold voltage를 정하고 그 값을 일정시간 벗어나는 경우 shunt가 투입되게 되어있다. 만일 2개 이상의 shunt가 투입되는 것을 제어하기 위해서는 각 shunt의 threshold voltage를 서로 다르게 설정함으로써 심각한 저전압, 과도한 과전압시에 동시에 여러 개의 shunt가 동시에 투입되도록 구현할 수 있다.

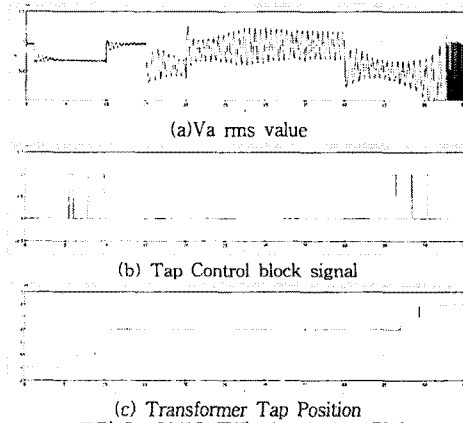


<그림 4> Hypersim에서 변전소 환경 구축



<그림 5> capacitor bank 투입 알고리즘 simulation 결과

그림 3에서 구현된 OLTC tap 동작 알고리즘은 아래 그림6과 같다. 그림 6(b)에서 signal이 0이 된 경우 tap은 동작하지 않고 signal이 1인 경우 tap을 up시키는 signal을 발생시킴을 의미한다. 사고시 과전압이 발생되지 않았기 때문에 signal이 -1의 값을 갖지는 않았다.(signal이 -1이라는 것은 tap이 down됨을 의미)



<그림 6> OLTC 동작 simulation 결과

### 4. 결 론

본 논문은 실시간 계통 안정도 평가 시스템의 운영을 위해 설치 환경이 아닌 순시치 환경에서 과도 모의를 Digital Simulator인 Hypersim을 이용하여 실시하였다. 지역 계통 정보변전소 환경에서 실시간으로 얻을 수 있는 data를 이용하여 shunt capacitor와 OLTC를 제어하는 방안에 대하여 모의 하였다. 지역 계통 data를 이용하여 Z-index와 같은 값을 hypersim에서 구현하는데 어려움이 있었기 때문에, 이에 대한 연구는 추후 반영되어야 할 것이다. 또한 Z-index로 전압 불안정성을 감시할 수는 있으나 변전소 환경에서 무효전력을 제어하기 위한 shunt 양을 산정할 수 없다는 단점이 있기 때문에 Z-index 이외의 다른 지수의 개발이 필요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Mats Larsson, Christian Rehtanz, Joachim Bertsch, "Real Time Voltage Stability Assessment of Transmission Corridors"
- [2] 김상암, 이병준, "계통 지역정보를 이용한 전압안정성 감시 및 보호계전 기에의 적용"
- [3] Mats Larsson, Coordinated Tap changer Control : theory and practice, Lund 1997
- [4] M. Begovic, et. al, "Summary of System Protection and Voltage Stability", IEEE Transactions of Power Systems, Vol. 10, No. 2, April, 1995, pp. 631-638.
- [5] Vu, k, M M Begovic, D novosel and M M saha, "Use of local Measurement to Estimate Voltage Margin", 20th International Conference on Power Industry Computer Application. IEEE.