

발전기의 예비력 마진을 고려한 전압 제어에 관한 연구

정승완, 송성환, 문승일, 윤용태  
서울대학교

The Study on Power System Voltage Control Considering Reserve Margin of Generator

Seung-Wan Jung, Sung-Hwan Song, Seung-Il Moon, YongTae Yoon  
School of Electrical Engineering, Seoul National University

**Abstract** - 본 논문에서는 전력시스템에서 상정 사고로 인해서 부하가 급변할 때 계통의 신뢰도를 유지하기 위해서 발전 모선의 전압을 조절하여 부하 모선의 전압을 정상상태의 범위에서 유지시키기 위한 알고리즘을 구조개편 후 비상시에 취할 수 있는 중요한 조치 중 하나로써 재조명한다. 이에 먼저 전력 계통의 상태를 발전기의 예비력을 기준으로 정상상태와 비상상태로 나누고, 계통에서 발생한 상정사고에 대하여 발전 모선의 전압 변동을 통해서 부하 모선의 전압을 정상상태의 범위에서 유지하도록 한다. 하지만 심각한 상정사고가 발생하여 발전기의 출력이 정상상태의 예비력 기준을 초과하여 발전을 해야만 하는 상황이면, 이를 계통의 비상상태로 선언하고, 이를 다시 정상상태로 회복시킬 수 있도록 하는 새로운 알고리즘을 제안하였다.

주제어 : 계통 상태(System State), 전압 제어, 예비력 마진

1. 서 론

정의된 계통의 상태에 따라서 전력 계통 운영이 시정체제 하에서 이루어질지 아니면 전력거래소와 같이 계통 운영자에 의해서 경제성이 아닌 신뢰도 유지를 최우선으로 하여 이루어질지가 결정되기 때문에 계통의 정상상태와 비상상태의 명확한 구분이 필요시 된다. 이는 비상시에는 경제성을 고려할 시간적 여유가 없으며, Rolling Blackout 등 여러 조치들의 비용을 책정하기가 힘들기 때문이다.

태풍의 발생과 같은 예기치 못한 사태에 의해서 계통에 심각한 상정사고가 발생하게 되면, 계통의 신뢰도가 위협받게 되고, 이에 따라 대규모 정전이 우려되는 상황에 까지 이를 수가 있다. 이때 대규모 정전을 막기 위해 계통 운영자가 취할 수 있는 최후의 조치는 부하를 차단하는 방법이다. 하지만 부하 차단은 전기를 사용하는 고객에게 큰 불편함을 주고 혼란을 야기시킬 수 있기 때문에, 계통의 붕괴가 임박한 상황에서만 실시를 하게 되어 있다. 이러한 비상상태가 발생했을 때 부하 모선의 전압을 정격 전압보다 이하로 유지하여 부하의 감소효과를 얻고, 결국 발전 출력의 양을 줄일 수 있는 방법이 미국에서 사용되어 오곤 하였다.

본 논문에서는 먼저 발전기의 예비력에 근거하여 계통의 상태를 구분한다. 그리고 비상상태가 발생했을 때, 정상상태에서 발전기 예비력의 유지 범위에 근거해서 계통이 정상상태에 도달할 수 있을 때까지 발전 모선의 전압을 조절하여 총부하량을 줄이는 알고리즘을 제안한다. 이는 계통의 비상상태에서 계통의 대규모 정전을 방지할 수 있는 방법이 될 수 있을 뿐 아니라 소비자에게 정전이라는 불편함을 주지 않는 방법이 될 수가 있다.

2. 본 론

2.1 계통의 상태 구분

현재 국내에서는 계통 운영시 다음과 같이 예비력을 기준으로 계통의 상태를 정상상태와 비상상태로 나누고 있다.

표 1. 정상상태와 비상상태의 구분

	정상상태	비상상태
예비력 용량	2000MW 이상	2000MW 이하

미국의 NYISO에서는 전압, 주파수, 예비력, 선로조류 등 다양한 지표들의 값에 따라서 계통을 5개의 상태로 구분해 놓았다. 이와 비슷하게 우리나라의 경우에도 '전력계통신뢰도및전기품질유지기준'에서 계통의 정상상태에서 계통주파수, 전압, 예비력 등이 유지해야하는 기준 범위가 제시되어 있다. 이 중에서 예비력의 용량은 계통의 현재 상태를 나타내는 가장 중요한 지표로서 예비력의 용량이 2000MW이하로 떨어지게 되면 전력거래소에서는 이를 비상상태로 정의하고 이를 해결하기 위해 발전단과 부하 모선에서 필요한 조치사항들을 각 전기사업자(발전사업자, 송전사업자)에게 지시하게 된다.

따라서 이 논문에서는 계통의 상황을 구분하는 지표로서 예비력 용량을 사용하였고, 발전단에서 출력할 수 있는 최대 출력용량의 10%를 예비력으로 지정하고, 예비력이 최대 출력 용량의 10% 내에서 운영되면 정상상태, 그리고 이를 초과하면 비상상태로 정의하였다.

2.2 최소자승법을 이용한 전압 변동의 최소화

본 절에서는 모든 부하 모선의 전압이 사전에 정의된 유지범위를 유지하기 위해서 전압의 변동의 자승을 최소화시키는 방법으로 [2]에서 제안된 내용을 되살핀다.

우리가 알고 있는 무효전력 방정식을 행렬 형태로 바꾸면

$$B^{nom} V^{nom} - Q^{nom} / V^{nom} = 0 \tag{1}$$

와 같은 식을 얻을 수가 있다. 여기서  $Q^{nom} / V^{nom}$ 은 두 벡터  $Q^{nom}$ 과  $V^{nom}$ 의 각 성분끼리 나눗셈을 한 것이다. 여기서 각 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V^{nom} &= [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_i \ \dots \ V_{l+g}]^T \\ Q^{nom} &= [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_i \ \dots \ Q_{l+g}]^T \end{aligned} \tag{2}$$

$$B_{ii}^{nom} = \left[ \left( \sum_{j=1}^{l+g} B_{ij} \right) - 1 \right], \quad B_{ij}^{nom} = -(B_{ij} \cos \theta_{ij} + G_{ij} \sin \theta_{ij})$$

부하의 변동이나 송전시스템의 변화와 같은 계통의 외란이 발생한 후에는 새로운 조류 계산의 해에 의해서 계통 운영이 결정된다. 즉, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$BV - Q / V = 0 \tag{3}$$

$V^{nom}$ 이 전압 유지를 위한 목표 전압값이라고 할 때,  $V^{nom}$ 으로부터의 전압 변동으로 인해서 무효전력량의 오차가 발생한다.

$$BV^{nom} - Q / V^{nom} = D \tag{4}$$

식(4)에서 식(3)를 빼면

$$D = BV^{nom} - BV - Q / V^{nom} + Q / V \tag{5}$$

와 같은 식을 얻을 수 있다. 여기서 벡터  $D$ 는 계통의 변화가 생기기 전과 후에 서로 다른 조류 계산의 해에서 나타나는 무효전력의 오차분이라고 할 수 있다.

$\Delta V$ 를  $\Delta V = V - V^{nom}$ 이라고 정의하면

$$D = -B\Delta V + \text{diag} \frac{-Q_i \Delta V_i}{(V_i^{nom}(V_i^{nom} + \Delta V_i))} \mathbf{1} \quad (6)$$

이 된다. 여기서  $\mathbf{1}$ 은 모든 원소가 1인 벡터이다. 대각 행렬 내의 대각 성분들을 테일러 급수로 전개하여 상위 차수 항들을 무시하면 식 (6)은

$$D \approx -B\Delta V + \text{diag} \frac{-Q_i}{(V_i^{nom})^2} (\Delta V) \quad (7)$$

$$T \approx -[B + \text{diag} \frac{Q_i}{(V_i^{nom})^2}] \Delta V$$

와 같이 표현이 된다. 위 (7)식에서 다음을 얻을 수가 있다.

$$H = -[B + \text{diag} \frac{Q_i}{(V_i^{nom})^2}]$$

$$H_{ii} = -B_{ii} + b_i - \frac{Q_i}{(V_i^{nom})^2}, \quad H_{ij} = B_{ij} \cos(\theta_{ij}) + G_{ij} \sin(\theta_{ij})$$

식 (7)을 부하와 발전기 오차로 나누면 다음과 같은 행렬 형태를 갖는다.

$$\begin{bmatrix} D_L \\ D_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{LL} & H_{LG} \\ H_{GL} & H_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_L \\ \Delta V_G \end{bmatrix} \quad (8)$$

위 식에서 부하의 변동분만을 따로 살펴보면

$$D_L = H\Delta V = [H_{LL} \ H_{LG}] [\Delta V_L \ \Delta V_G]^T$$

$$\Delta V_L = H_{LL}^{-1} D_L - H_{LL}^{-1} H_{LG} \Delta V_G \quad (9)$$

와 같이 식이 표현되고 위 식으로부터  $\Delta V_L$ 과  $\Delta V_G$ 의 관계식을 얻을 수가 있다.

식 (9)로부터 부하의 전압 변동분을 최소화시키는 발전기의 전압 조절량을 구해보면, 즉  $\min \|\Delta V_L\|_2$ 을 구해보면,

$$\Delta V_G = [H_{LL}^{-1} H_{LG}]^{-1} (H_{LL}^{-1} H_{LG})^T H_{LL}^{-1} D_L$$

$$\Delta V_G = [H_{LL}^{-1} H_{LG}]^{-1} H_{LL}^{-1} D_L \quad (10)$$

와 같은 식을 얻을 수가 있다.

### 2.3 발전기의 예비력 미진을 고려한 전압제어 알고리즘 제안

그림 1은 본 논문에서 새롭게 제안된 알고리즘이다. 일반적으로 발전기의 예비력을  $P_G^{max}$ 의 10%로 정의하였을 때,  $0 < P_G < 0.9P_G^{max}$ 의 범위에서 발전기의 출력이 운영되는 경우를 정상상태로 정의한다. 하지만 발전 출력이 위의 범위를 벗어나서  $0.9P_G^{max} \leq P_G \leq P_G^{max}$ 에서 운영되면 이는 10%의 예비력 기준을 벗어난 것이므로 비상상태로 선언을 하게 된다.

그림 1의 알고리즘에서는 계통 데이터 중 부하 모선의 전압을 감시하고 있다가 계통의 외란에 의해 부하 모선의 전압이 변동을 하였을 때, 10% 예비력을 유지할 수 있는 범위 내에서 발전기 출력을 조절하여 부하 모선의 전압을 제어한다. 하지만 심각한 전력계통의 외란에 의하여 부하 모선의 전압이 급변하고 이에 따라 발전기의 출력을 조절하여야 하는 상황에서 발전기의 출력 조절 범위가 10% 예비력 유지 기준을 지키지 못할 경우가 발생할 수가 있다. 계통 운영자는 이런 상황을 비상상태로 선포를 하고 발전기의 10% 예비력 기준을 만족할 수 있는 범위 내에서만 발전기 출력을 조절하여 부하 모선의 전압을 조절하게 된다. 부하 모선의 전압을 정상상태 내에서 조절할 만큼의 충분한 발전 출력을 내지 못하는 상황이므로 부하 모선의 전압은 기준 전압에 약간은 미치지 못하는 낮은 전압이 나타나게 되고, 전기 고객들은

충분한 전력을 사용하지 못하겠지만, 이를 통해서 계통의 비상상태를 대규모정도로 이어지는 상황을 막을 수가 있다.

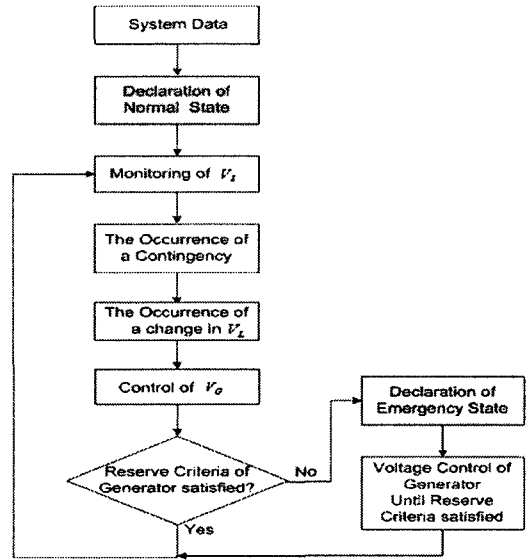


그림 1. 발전기의 예비력 기준에 따라 제안된 알고리즘

### 3. 사례연구

본 논문에서는 그림 2과 같이 IEEE 9 모선 시스템을 대상으로 발전기의 10% 예비력 기준에 따라서 계통의 상태를 각각 정상상태와 비상상태로 구분하고, 예비력이 비상상태 기준에 포함되는 상황이 발생하면 예비력 기준이 정상상태 범위에 포함될 때까지 부하 모선의 전압을 낮추어서 계통을 운영하는 알고리즘을 모의 실험하였다.

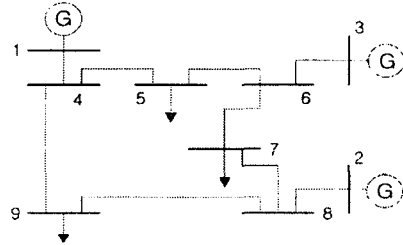


그림 2 IEEE 9 모선 시스템

표 2와 표 3은 위 IEEE 9 모선 시스템의 각 부하 모선에서 부하량을 각각 120%, 150%, 180%, 200%로 순차적으로 높였을 때 부하 모선에서의 전압  $V_L$ 의 값을 나타낸 표이다. 표 2에서 볼 수 있듯이 발전 모선의 전압 조절을 하기 전 부하 모선의 전압은 점차 과부하가 걸림에 따라서 저전압 현상이 두드러지게 나타나게 된다.

표 2. 발전기 전압 조절 전 부하 변동시 각 부하 모선의 전압 (단위 pu)

bus #	부하 120%	부하 150%	부하 180%	부하 200%
1	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000
3	1.000	1.000	1.000	1.000
4	0.977	0.972	0.968	0.935
5	0.959	0.943	0.925	0.880
7	0.983	0.965	0.945	0.970

하지만 부하 모션에서의 전압 변화를 감지하고 부하 모션의 전압을 유지하기 위하여 발전 모션의 전압 조절을 실시한다면 표 3에서 볼 수 있는 것처럼 부하 모션에서의 전압이 일정 범위 내에서 유지될 수가 있다.

표 3. 발전기 전압 조절 후 부하 변동시 각 부하 모션의 전압 (단위 pu)

bus #	부하 120%	부하 150%	부하 180%	부하 200%
1	1.077	1.090	1.100	1.100
2	1.097	1.100	1.100	1.100
3	1.096	1.100	1.100	1.100
4	1.066	1.061	1.054	1.043
5	1.057	1.096	1.022	1.004
7	1.085	1.077	1.065	1.054

그런데 200%의 부하가 걸리게 되는 상황이 발생하면, 발전기의 최대 공급 가능 용량이 656MW이고 10% 예비력을 기준으로 할 때 발전 가능 용량은 590.4MW이 되고, 이 때 200%의 부하량은 발전기의 10% 예비력을 기준으로한 발전 용량을 초과하는 630MW이므로 예비력이 1.12%만이 남은 상황이 된다. 이때 계통 운영자는 이러한 상황을 비상상태로 선언하고, 즉시 이를 해결할 수 있는 조치를 취해야 한다.

표 4. 부하 변동시 발전기 예비력 마진

	부하 120%	부하 150%	부하 180%	부하 200%
발전기 예비력 마진	41.57%	26.69%	11.66%	1.12%

이러한 사태는 즉시 조치가 취해지지 않는다면 계통을 대규모 정전으로 몰고 갈 수도 있는 긴급한 상황이다. 따라서 계통운영자는 대규모 정전 사태를 막기 위하여 일부 부하를 차단함으로써 계통을 안정화시키려는 노력을 할 수도 있겠지만, 부하 차단이라는 방법은 전기를 공급받지 못하는 수용가에게 큰 불편함과 혼란을 야기시킬 수 있다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 계통 운영자가 계통의 급박한 상황에서 부하를 차단하기 전에 고려해 볼 수 있는 방법이다.

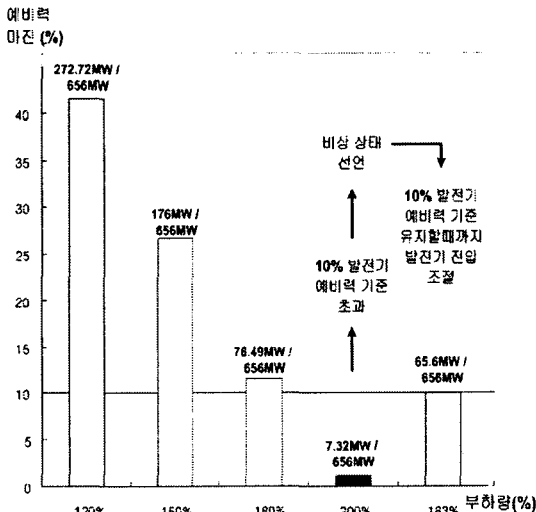


그림 3. 예비력의 기준에 따라 비상상태 선언시 계통 운영 방법

먼저 계통 운영자는 현재 1.12%의 예비력으로 운영되고 있는 발전기 출력을 점차적으로 감소시킬 수 있도록 발전 모션의 전압을 조절하여 10% 예비력을 확보할 수 있는 범위까지 조절한다. 즉 10% 예비력 기준을 만족시킬 수 있도록 발전 출력을 590.4MW까지 감소시키면, 이에 따라서 총 부하도 630MW에 대하여 576.76MW가 될 때까지 점차적으로 감소하게 된다. 이 때의 계통의 부하량은 전체 200%에 미치지 못하는 182%의 부하만을 갖게 된다.

이렇게 계산된 부족한 조류량을 계통의 부하에 공급하게 되면, 전기를 사용하는 수용가에서는 정전에 미치지 못하는 전기를 공급받게 되므로 전등 불빛이 좀 약해지는 등의 불편함을 겪게 될 수도 있지만, 계통 운영자 입장에서 부하 차단이라는 최후의 방법을 선택하기 전에 고려해 볼 수 있는 방법이 한 개 더 생기게 되고, 계통이 심각한 외란에 의하여 대규모 정전 사태로 갈 수 있는 최악의 사태를 피할 수도 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 발전기의 예비력에 근거하여 계통의 상태를 정상상태와 비상상태로 정의하고, 계통에 심각한 외란이 발생하여 계통의 신뢰도가 위협을 받아 대규모 정전 사태가 우려될 때 계통 운영자가 참고할 수 있는 운영 알고리즘을 제안하였다.

계통의 상황 악화로 인하여 발전기가 사전에 정의된 10% 예비력 기준을 초과하여 운전을 하게 될 경우를 계통의 비상상태로 정의하고, 발전기의 예비력 부족으로 인하여 전체 전력 계통이 붕괴될 수 있는 최악의 상황을 피하기 위해서 우선적으로 10% 예비력 기준을 초과하여 운전되던 발전기 출력을 줄일 수 있도록 발전 모션의 전압을 조절하여 발전기의 예비력 기준인 10%를 충족시켜 운영되도록 하였다. 다시 발전기의 10% 예비력 기준이 만족되면 계통 운영자는 계통의 상황이 다시 정상상태로 회복되었음을 선언하고, 그 이후 계통의 상황에 맞게 필요한 조치를 취하여 좀더 안전성있게 계통을 운영하기 위하여 예비력을 확보해야 할 것이다.

본 논문과 관련하여 추후에는 정상상태에서의 예비력 기준뿐만 아니라 전압이나 주파수의 기준을 적용하여 좀더 안전하게 계통을 운영하는 새로운 운영 알고리즘 개발이 요구된다. 그리고 전압 제어와 관련하여 무효전력의 가격을 산정하는 추가적인 연구가 필요할 것이고, 계통 운영자가 계통의 상황이 악화되어 부하 차단이라는 극단적인 수단을 사용해야 하는 상황에서 Voltage Reduction이라는 개념을 이용하여 부하량과 발전량을 동시에 감소시킬 수 있는 방법에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Carson W. Taylor, "Power System Voltage Stability", McGraw Hill, Inc, pp. 80, 216
- [2] Assef Zobian, Marija D. Ilic, "A Steady State Voltage Monitoring and Control Algorithm Using Localized Least Square Minimization of Load Voltage Deviation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996
- [3] Marija Ilic, William Stobart, "Development of a Smart Algorithm for Voltage Monitoring and Control", IEEE TRANsactions on Opwer Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990