

실시간 과도안정도 알고리즘을 적용한 전력계통 안정도 향상방안

장성익, 조시형, 민병욱
한국전력공사

A study for the Improvement in Power Systems Stability with Real-time transient stabilizing algorithm

Sung-ik Jang, Si-Hyung Cho, Byeong-Wook Min
KEPCO

Abstract - 전력계통의 안정도는 계통에 외란이 발생하였을 경우 이를 이겨내고 새로운 안정운전 상태에 도달하게 하는 전력계통의 중요한 특성을 의미한다.

향후 전력부하 성장은 필연적으로 전기에너지를 수송하는 전력계통 송전망을 복잡화시키며, 이는 송전망에 중대고장이 초래될 개연성이 과거보다 높아짐을 의미하고 그에 따른 과도안정도 문제가 더욱 부각되고 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 우리나라에서는 중대고장을 예방할 수 있는 안정도 관련 보호계전기들이 안정도 측면보다는 설비보호 측면에서의 검토가 많이 이루어지고 있다.

따라서 최적안정도 기법을 실 계통에 응용할 수 있도록 실시간 다기계통 적용 알고리즘 보호계전기를 이용하여 안정도 측면도 함께 고려하였다.

1. 서 론

최근 전력계통은 대용량 발전설비의 건설과 송전 시스템의 장거리화로, 계통의 규모가 커지고, 복잡해짐에 따라 안정도 연구가 매우 중요하게 되었다.

긴급 보호제어 시스템(Special Protection System : SPS)은 광역 시스템 감시제어 및 보호기술(System Protection Scheme : SPS)로 외란 시 계통 보호에 따른 전력계통 공급능력 향상을 위한 보호 시스템이다. 긴급 보호제어 시스템은 계통을 보전하고 만족스러운 계통 성능을 제공할 수 있도록, 비정상적인 계통 상황을 감지하여 고장 부분의 차단 외에 다른 조정제어 동작을 취한다. 긴급 보호제어 시스템의 제어 동작으로는 부하 차단과 같은 부하의 변화, 발전기의 차단, 계통 안정도를 유지하기 위한 계통 구성, 전압, 전력조류량의 변화 등을 생각할 수 있다. 긴급 보호제어 시스템은 전체적인 시스템을 구성하기 위해 협조하는 국부 설비로 구성된 경우가 많으며, 많은 경우 통신에 의존한다.

2. 본 론

이런 긴급보호제어로서 부하 차단이나 발전기 차단처럼 안전한 동작 상태에서는 사용되지 않는 제어 동작을 통해 일반적인 보호동작 범위를 벗어난 외란에 대한 계통보호나 다중 신호 제어의 협조로 계통 전 지역에서 운용할 수 있는 광역시스템 보호로 전력 계통운용 향상, 전력 계통의 한계에 가깝게 운용, 계통의 안전도를 유지하면서 송전 전력 한도의 증가와 설비 건설 계획의 지연을 보상하기 위한 일시적 설치로 계통 붕괴를 야기하는 심각한 상정사고에 대한 계통 안전도의 증진하게 된다.

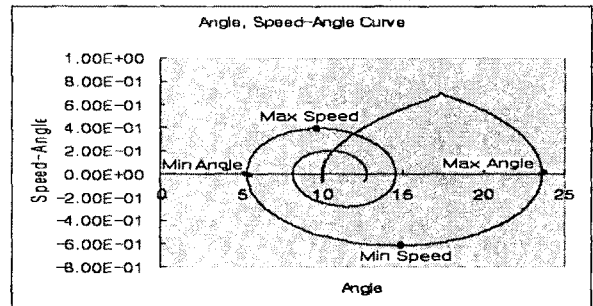
전력계통의 용량, 신뢰성, 안정도 향상을 위한 경제적이고 효과적인 방법으로 자동재폐로 방식을 적용한다. 그러나 영구고장 발생 시 자동재폐로를 수행하면 전력계통과 설비에 심각한 충격을 초래할 수 있어 영구고장과 일시고장을 구분하는 것은 매우 중요하다. 그리고 2차 아크가 소호된 후에도 즉시 송전선로 재폐로를 수행하는 것은 과도 안정도 측면에서는 항상 유리한 것만은 아니다. 따라서 영구고장과 일시고장을 식별하여 각각의 경우에 과도안정도 측면을 고려한 적용재폐로의 필요성이 제기되었다. 재폐로 실패로 인한 계통의 불안정현상을 감소시켜 송전계통의 과도안정도 향상을 피하고자, 송전선로 계통에서 적용되고 있는 재폐로 계전기를 대상으로 재폐로가 안정도에 미치는 영향과 과도안정도를 고려한 송전선로 재폐로계전기 적용방식을 검토하였다.

등가발전기 해석법을 사용하여, 보다 쉽게 재폐로 성공시와 재폐로 실패시의 최적 재폐로 시점을 구하고, 과도안정도 측면에서 안정한 선로에서는 재폐로가 실패하더라도 발전기들이 발산하지 않기 때문에 빈번한 일시고장을 고려하여 재폐로 성공시 최적재폐로 시점을 적용하고, 과도 안정도상 취약한 선로에서 재폐로 실패로 인한 2차 충격으로 불안정해질 수 있는 계통은 재폐로 실패를 고려한 최적 재폐로 시점을 적용하여, 재폐로로 인한 전체 계통의 과도 안정도가 향상되도록 하였다. 최적재폐로 기법을 실 계통에 응용할 수 있도록 최근의 광역 안정제어 시스템(Wide Area Stability Control System : WACS)으로부터 수집된 정보를 이용한 실시간 다기계통 적용 알고리즘을 규명하였다.

2.1 적응형 최적재폐로 시점에 의한 과도안정도

고장유형에 따라서 재폐로가 성공하거나 실패되는데, 일시고장 제거 후 계통안정도 향상을 위해 자동재폐로가 실시되지만 재폐로가 성공된다라도 재폐로 되는 시점에 의해 계통안정도에 미치는 영향이 다르게 되고, 더욱이 영구고장으로 재폐로가 실패되는 경우에는 재폐로 시점에 따라서는 계통에 큰 충격을 가하기도 하여 최적재폐로 시점은 계통안정도 향상에 있어 중요한 요소가 된다.

발전기 위상각-속도 곡선은 초기 운전점에서 고장이 제거되기 전까지의 변화는 고장이 발생했을 때 발전기의 위상각 변화보다는 속도 변화가 뚜렷한 것을 알 수 있어 고장에 의한 과도에너지의 유입은 대부분이 운동에너지란 것을 나타낸다. 같은 고장에 의해 재폐로 되면 초기고장에서 유입되었던 에너지와 비슷한 크기의 운동에너지가 유입된다. 이 유입되는 운동에너지를 가장 잘 상쇄시킬 수 있는 시점이 위상각 속도가 최저일 때가 되는 것이다.

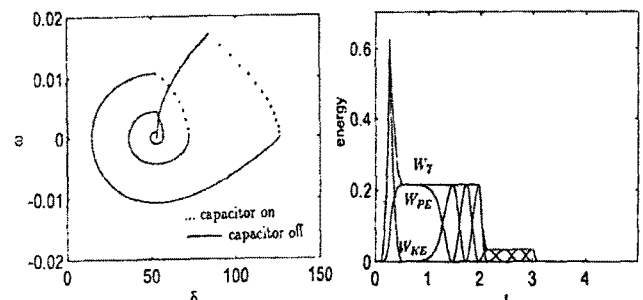


<그림 1> 고장발생 후 위상각-속도 곡선

2.2 TCSC 제어에 의한 전력계통 안정도 향상

발전기차단, 부하차단 등과 병렬저항, 직렬커패시터 투입 등 네트워킹 변경의 적절한 제어장치는 과도안정도를 향상시킬 수 있고, 송전선에서 직렬커패시터 스위칭은 계통 동요를 완화할 수 있다.

운동에너지 위상각속도(KE : $\frac{d\delta}{dt}$)가 0인 동시에 위치에너지(PE)가 최대치에 이르는 순간에 커패시터는 차단된다.



<그림 2> $\delta - t$ 관계 곡선 에너지 변화

2.3 다기계통의 과도안정도 적용

최적재폐로 시점에 의한 과도안정도는 에너지함수법을 이용할 수 있는데 실제 대규모 다기계통에서의 과도안정도를 검토하기 위해 1기무한도선 계통의 등가발전기 해석법으로 해석하였다.

전체 계통의 과도에너지를 나타내는 에너지 함수 V 는 다음 식과

같이 정의된다.

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^n P_{mi} (\theta_i - \theta_i^s) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) - \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \quad (1)$$

단, θ_i^s : 고장 뒤 새로운 평형점에서의 i 모선의 위상각
 $M_i = 2H_i \omega_0 = i$ 번째 발전기의 관성정수(pu)

2.4 다계통 실시간 예측제어

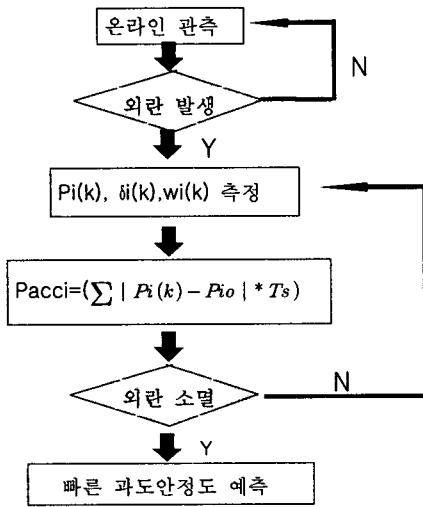
전력계통은 특성상 광범위하고 비선형, 동특성 대규모 계통으로 안정도를 위한 수학적 분석이 어려워 단계적인 수치법에 의해서만 해결되어질 수 있다. 이러한 것들은 많은 시간이 소요되어 실시간제어 요구를 만족할 수 없다.

선정된 법칙은

$$P_{acci} / M_i \quad (2)$$

M_i : 각 발전기 관성정수

M_i 는 일반적으로 크기 때문에 발전기의 회전 각속도는 완만히 변화한다.



〈그림 3〉 과도안정도 예측

2.5 위상각, 속도 예측 제어

위상각속도 $W_i(t)$ 의 변화를 예측하기 위하여 지난 세 점의 시간 t_0, t_1, t_2 에서의 w_i 값을 적용하여 추정하게 된다.

t_0 과 t_2 사이의 고장지속 시간과 고장제거 후의 매우 짧은 시간을 포함한다. 그림 4는 관측시점에 따른 측정값과 예측 위상각의 관계를 나타낸다.

발전기는 매우 큰 관성모멘트를 가지고 있기 때문에 발전기의 각속도 $w(t)$ 는 점진적으로 변화한다. 추정된 w 의 값들을 지나는 곡선을 표시하는 함수가 미래의 값을 예측하기 위하여 사용된다.

$$w_i(t) = w_i(t_2) + a_1(t-t_2) + a_2(t-t_1)(t-t_2) \quad (3)$$

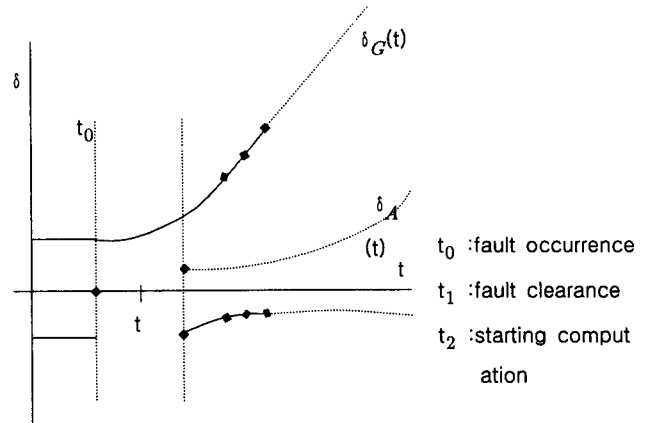
여기서 계수 a_1 과 a_2 는 아래의 식을 이용하여 계산한다.

$$a_0 = (w_i(t_1) - w_i(t_0)) / (t_1 - t_0)$$

$$a_1 = (w_i(t_2) - w_i(t_1)) / (t_2 - t_1)$$

$$a_2 = (a_1 - a_0) / (t_1 - t_0)$$

식 3을 적분하여 전력각 $\delta_i(t)$ 예측하는데 사용한다.



〈그림 4〉 측정값과 예측 위상각 관계

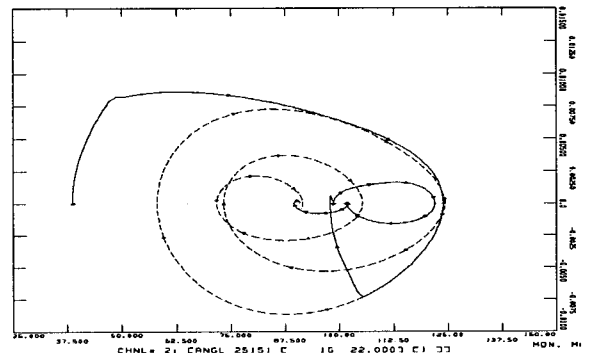
$$\begin{aligned} \delta_i(t) &= \int_{t_0}^t w_i(t) dt + \delta_i(t_0) \quad (4) \\ &= \delta_i(t_0) + w_i(t_2)(t-t_0) + a_1(t^2 - t_0^2)/2 \\ &\quad + a_1 t_2(t-t_0) + a_2[(t^3 - t_0^3)/3 - (t_1 + t_2)(t^2 - t_0^2)/2 + t_1 t_2(t-t_0)] \end{aligned}$$

두 발전기 사이의 전력각은

$$\Delta \delta_{pr}(t) = \delta_r(t) - \delta_p(t) + \Delta \delta_{pr}(0)$$

2.6 계통모의 결과

상정사고에 대한 발전기의 위상각을 나타내는 모의는 같은 조건에서 재폐로 하지 않았을 때와 시간을 달리하며 재폐로 하였을 경우를 비교 하였다.



〈그림 5〉 발전기(샘플) Speed-Angle 곡선

3. 결 론

과도 안정도를 향상시키기 위하여 적용형 최적재폐로 시점 재폐로를 적용하고, 영구고장으로 재폐로가 실패하는 경우에도 불구하고 재폐로 하지 않은 경우보다 계통을 더욱 안정하게 할 수 있다는 것을 보여주고, 각 송전선고장에 따른 최적재폐로 시간은 다양하고 한 선로에서의 최적재폐로 시간이 다른 선로에서는 계통을 더욱 불안정하게 만들 수 있는 시점이 될 수도 있다는 것을 보여주었다.

최적 시점을 구하는 과정에서 본 논문에서는 등가 발전기해석법을 이용하고, 최근의 광역측정 장치와 고속 전송기술을 적용하여 실시간으로 취득된 데이터로부터 적용형 최적재폐로를 적용하므로써 대규모 실 계통에도 온라인 제어가 되도록 하여 계통운영의 신뢰도를 높일 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] Li Yi-qun, Tenglin, Lin Waang-shun, Lin Jian-fei "The St. on Real-time Transient Stability Emergency Control Power Control System" IEE E Con. 2002
- [2] 장성익, 신명철 "A Study on Adaptive Autoreclosure Scheme with Real-time Transient Stability" KIEE Voll. pp8-15. 2006