

## 과도불안정 현상에 대비한 SPS 알고리즘의 구현

박종영<sup>\*</sup>, 박종근<sup>\*</sup>, 추진부<sup>\*\*</sup>, 장병태<sup>\*\*</sup>, 오화진<sup>\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>서울대학교, <sup>\*\*</sup>전력연구원, <sup>\*\*\*</sup>한국전력거래소

### The SPS Algorithm for Maintaining Dynamic Stability in Power Systems

Jong-young Park<sup>\*</sup>, Jong-keun Park<sup>\*</sup>, Jin-bu Chu<sup>\*\*</sup>, Byung-tae Jang<sup>\*\*</sup>, Hwa-jin Oh<sup>\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>Seoul National Univ., <sup>\*\*</sup>Korea Electric Power Research Institute(KEPRI), <sup>\*\*\*</sup>Korea Power Exchange(KPX)

**Abstract** - 발전기 주변의 선로에서 사고가 발생하였을 때, 발전기의 출력이 선로를 통해서 흐르지 못해 그 결과 과도불안정현상이 생길 수 있다. 이러한 과도불안정현상을 막기 위한 SPS가 설치, 운영되고 있는데 그 알고리즘의 하나로써 등면적법을 기반으로 한 알고리즘을 구현하였다. 대상 발전기군을 하나의 등가 발전기로 모델링 한 다음, 유효전력과 무효전력 출력의 측정값을 이용해서 계산을 통해 위상각-출력 곡선을 구하였다. 그런 다음 현재의 운동에너지와 안정도 한계값인 임계에너지의 값을 비교하여 안정도를 판별하고, 만일 불안정한 경우 필요한 발전기의 탈락량을 계산하였다. 이 알고리즘을 6기 5모선 계통에서 모의하여 결과를 검증하였다.

#### 1. 서 론

현대의 전력계통에 있어서 전력계통의 규모가 커지고 복잡화, 광역화됨에 따라 발전, 송배전 설비 등 수많은 요소가 유기적으로 운전되고 있고, 이에 따라 송전선로 고장, 발전기 탈락 등의 외란이 생겼을 때 광역정전 발생의 가능성이 높아지고 있다. 이와 같은 위험성에 대한 대비와 기술 환경의 변화에 따라서 보호대상을 대규모 전력계통 시스템으로 확대하는 추세이며, 이에 따라 긴급보호제어시스템(SPS, Special Protection System) 등이 등장하고 있다.[1]

우리나라의 경우를 살펴보면, 전력산업구조 개편에 따라서 설비 투자에 대한 감소가 예상되며, 설비 부족에 의해 계통 한계점에서의 운전 비중이 현재보다 높아질 것으로 보인다. 그 결과로 인해 사고나 기타 이유에 의한 외란이 발생할 경우 안정도의 문제나 고장파급의 가능성이 더욱 문제가 될 것으로 보인다.[2]

여러 사고 상황 중에서 발전기 주변의 선로에서 사고가 발생하였을 경우, 발전기의 출력이 선로를 통해서 흐르지 못해서 그 에너지가 발전기에 축적되어, 그 결과 과도불안정 현상이 생길 수 있다. 그에 대비해서 SPS를 설치, 운영하고 있으며, 이 논문에서는 그 알고리즘을 유도하고 모델계통에 적용하여 보았다.

#### 2. 시스템의 모델링

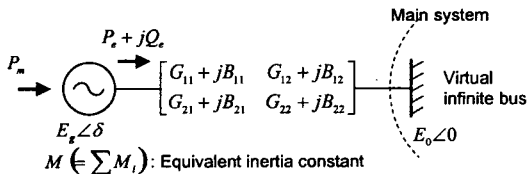


그림 1. 알고리즘 유도를 위한 시스템

그림 1의 모델에서 알고리즘을 유도하였다. 그림 1에서처럼 대상 발전기군을 하나의 발전기로 모델링 하였으며, 계통의 나머지 부분은 무한모선으로 처리하였다. 계통의 나머지 부분이 발전기에 비해 매우 크므로 이는 타

당하다 할 수 있다. 그리고 발전기군과 계통을 연결하는 선로는 어드미턴스 행렬로 나타내었다.

#### 3. 알고리즘의 구현

##### 3.1. 등가발전기의 운동에너지

위 그림 1에서의 등가발전기가 가지고 있는 운동에너지는 에너지 함수법으로부터 다음 수식에 의해 나타낼 수 있다.[3]

$$V_k = \left( \frac{\omega_0 M}{2} \right) \left\{ \frac{\Delta\omega(t)}{\omega_0} \right\}^2 \quad (1)$$

$V_k$ : 운동에너지  
 $\omega_0$ : 기준각속도(p.u.)  
 $M$ : 발전기들의 등가이너서 (=  $\sum M_i$ )  
 $\Delta\omega(t)$ : 시간 t에서의 각속도

##### 3.2. 등면적법에 의한 임계에너지의 계산

발전기의 과도상태에서의 안정도 여부를 판단하기 위한 방법 중의 하나는 등면적법이다. 그림 2와 같은 위상각-출력 곡선에서 안정도의 한계라 할 수 있는 임계에너지 ( $V_c$ )를 알아야 한다. 그것을 알아내는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있으나 다음과 같이 각속도를 이용한 방법을 이용하기로 한다.

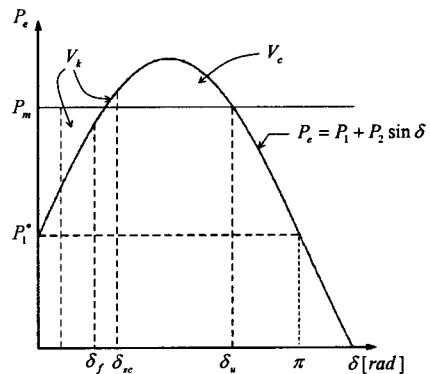


그림 2. 등면적법을 이용한 안정도의 계산

스윙 등식(swing equation)에서 발전기의 각속도는 유효전력출력  $P_e(t)$ 에서 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta\omega(t) = \frac{\omega_0}{M} \int_0^t (P_m - P_e(t)) dt \quad (2)$$

그리고 유효전력출력 ( $P_e$ ) 과 무효전력출력 ( $Q_e$ )

은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} P_e = P_1 + P_2 \sin \delta \\ Q_e = P_3 + P_2 \cos \delta \end{cases} \quad \left( \begin{array}{l} P_1 \equiv E_s^2 G_{11} \\ P_2 \equiv E_s E_0 B_{12} \\ P_3 \equiv -E_s^2 B_{11} \end{array} \right) \quad (3)$$

그리고 위 (3)을 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} dP_e/dt = P_2 \cos \delta \cdot d\delta/dt = P_2 \cos \delta \cdot \Delta\omega \\ dQ_e/dt = P_2 \sin \delta \cdot d\delta/dt = P_2 \sin \delta \cdot \Delta\omega \end{cases} \quad (4)$$

여기에서  $P_e, Q_e$  는 측정을 통해서 얻어낼 수 있는 값들이다. 이 값들을 이용해서  $P_1, P_2$  을 구하게 되면 그림 2의 위상각-출력 곡선을 구해낼 수 있다. 식 (3), (4)에서 그들의 관계를 유도해보면 다음과 같다.

$$\begin{cases} P_1 = P_e - (1/\Delta\omega)(dQ_e/dt) \\ P_2 = (1/\Delta\omega)\sqrt{(dP_e/dt)^2 + (dQ_e/dt)^2} \end{cases} \quad (5)$$

그림 2의 곡선이 구해지면 안정도 임계에너지  $V_c$  를 다음과 같이 구할 수 있다. 그림 2에서  $\delta_f$  는 사고 제거 시,  $\delta_{sc}$  는 안정도 계산시의 발전기의 위상각이다. 위상각  $\delta_{sc}, \delta_u$  는 다음의 식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{cases} \delta_{sc} = \sin^{-1} \{ [P_e(t_{sc}) - P_1^*] / P_2^* \} \\ \delta_u = \pi - \sin^{-1} \{ (P_m - P_1^*) / P_2^* \} \end{cases} \quad (6)$$

이 때, 임계에너지  $V_c$  는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} V_c &= \int_{\delta_f}^{\delta_u} (P_1^* + P_2^* \sin \delta - P_m) d\delta \\ &= P_m^* (\cos \delta_{sc} - \cos \delta_u) + (P_m - P_1^*) (\delta_{sc} - \delta_u) \quad (7) \end{aligned}$$

여기에서 식(1)과 (7)에서  $V_c$  와  $V_k$  가 구할 수 있다. 이 두 값을 비교해서 다음과 같이 안정도를 판별하게 된다.

$$\begin{cases} V_k < V_c \Rightarrow \text{stable} \\ V_k \geq V_c \Rightarrow \text{unstable} \end{cases}$$

### 3.3. 불안정시 발전기 탈락량의 계산

앞에서 기술한 안정도의 계산 결과, 불안정하다고 판단된 경우 SPS는 그에 맞는 보호동작을 시행해야 할 것이다. 발전기 주변에서의 선로 사고의 경우, 과도안정도의 해결을 위해서 발전기 탈락이라는 방법을 사용할 수 있으며, 그 탈락량의 계산을 위해 다음과 같은 알고리즘을 사용하였다.

그림 3에서  $\delta_{trip}$  은 발전기가 탈락되는 시간에서의 위상각이다.  $\delta_{trip}$  의 시간에서 발전기가  $(P_m - P_m')$  만큼 탈락되면, 그 경우의 임계에너지는  $V_c + V_c'$  로 계산되게 된다. 이 새로운 임계에너지는 다음 식들에서 구해줄 수 있다.

우선 그림 3의  $\delta_{trip}$  과  $\delta_u'$  은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_{trip} = t_{trip} \cdot \Delta\omega \quad (8)$$

$$\delta_u' = \pi - \sin^{-1} \{ (P_m' - P_1) / P_2 \} \quad (9)$$

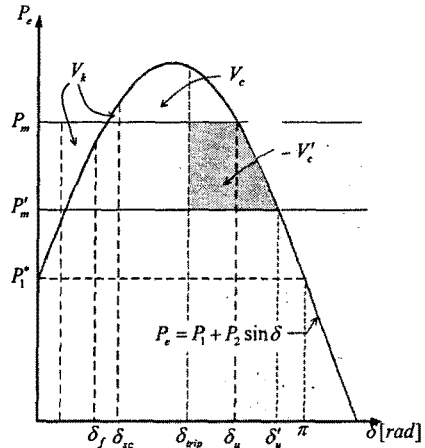


그림 3. 필요한 발전기 탈락량의 계산

이 때, 새로운 임계에너지의 항  $V_c'$  은 다음 식에서 구하게 된다.

$$\begin{aligned} V_c' &= (P_m - P_m') \times (\delta_{sc} - \delta_u) \\ &+ \int_{\delta_{sc}}^{\delta_u'} (P_1 + P_2 \sin \delta - P_m') d\delta \\ &= (P_m - P_m') \times (\delta_{sc} - \delta_u) + P_2 (\cos \delta_u - \cos \delta_u') \\ &+ (P_1 - P_m') (\delta_u' - \delta_u) \quad (10) \end{aligned}$$

위 식으로 구하여진  $V_c'$  의 값에서 아래와 같이 안정도를 판별하게 된다.

$$\begin{cases} V_k < V_c + V_c' \Rightarrow \text{stable} \\ V_k \geq V_c + V_c' \Rightarrow \text{unstable} \end{cases}$$

위의 계산에서, 발전기의 탈락 후에도 여전히 불안정한 경우 발전기 탈락량을 더 크게 하여 안정화될 때까지 계산을 반복해서, 발전기의 탈락량을 결정하게 된다.

## 4. 모델계통에의 적용

### 4.1. 모의 계통

위의 알고리즘을 그림 4와 같은 6기5모선 계통에 적용시켜 보았다. 아래는 대규모 발전단지의 모델링이라 할 수 있다.

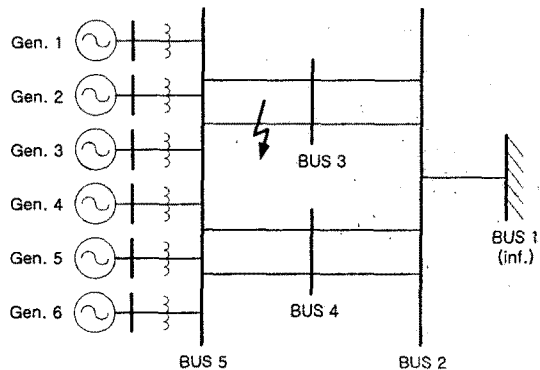


그림 4. 과도안정도 SPS 적용 모의 계통

왼쪽의 발전기들이 그림과 같이 2회선을 통해 계통에

연결되어 있다고 가정하였으며, 두 개의 선로들 중에서 위와 같이 사고가 발생하였다고 가정하였다.

#### 4.2. 모의 결과

그림 5의 두 파형은 3상 지락 사고 발생 후 고장선로가 제거되었을 때의 파형이다. 두 사례의 차이점은 사고 발생 후 얼마 후에 고장선로가 제거되었는가이며, 각각 70msec와 100msec 후에 제거되었다고 가정하였다.

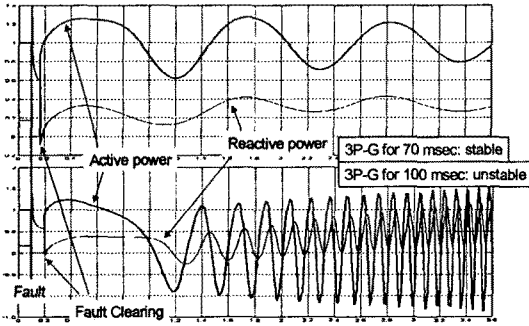


그림 5. 사고 발생시의 출력 파형

그림 5에서 볼 수 있듯이 사고제거 시간에 따라 계통의 안정도가 달라짐을 볼 수 있으며, 사고제거에 걸리는 시간이 짧을수록 더 안정함을 알 수 있다.

그림 6은 출력파형과 그것에서 계산된 위상각-출력 곡선의 관계를 보여주고 있다. 필터링 타임은 계통의 과도 현상시에 측정되는 잡음을 무시하기 위해 설정된 시간으로서, 그 시간 동안의 측정데이터는 무시되게 된다.

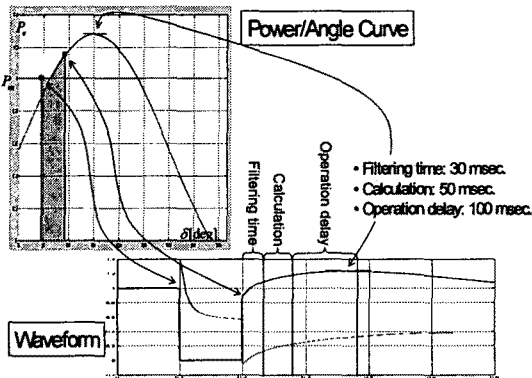


그림 6. 출력파형과 위상각-출력 곡선

표 1. 여러 가지 사고 형태의 계산 결과

Fault	Fault duration (msec)	Stable	Required trip no.	P1	P2	$V_r V_c$	Calculated trip no.
3P-G	70	X	4/10	0.3855	0.3508	0.2074	5/10
2P-G	70	X	3/10	0.3854	0.3896	0.1456	3/10
1P-G	70	X	2/10	0.3070	0.4810	0.0602	2/10
3P-S	70	O	0/10	-0.2188	1.3765	-1.2428	0/10

표 1과 같이 여러 가지 형태의 사고에 대해 위와 같은 알고리즘 적용을 통해 안정도를 계산하고, 필요한 발전기 탈락량을 계산하였다. 위 표를 통해서 볼 수 있듯 만

족한 결과를 얻어낼 수 있었다. 실제 SPS에서는 측정된 신호의 잡음 등이나 안정도의 여유 등을 고려해서 더 개선된 알고리즘을 사용하게 될 것이다.

다음 그림 7의 파형은 위에서 얻어진 결과에 따라 발전기 탈락을 시켰을 경우의 파형으로서, 각각 유효전력, 무효전력, 전압의 파형을 나타내고 있다. 그림 5의 두 번째 사례인 불안정한 사례(사고제거시간 100msec)에 대해서 발전기 탈락을 통해 안정도를 유지한 예가 되겠다. 이처럼 적절한 양의 발전기 탈락을 통해 과도안정도를 유지할 수 있음을 알 수 있다.

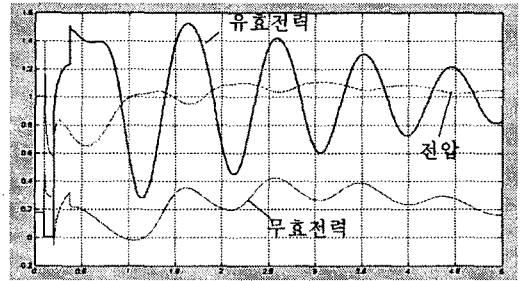


그림 7. SPS에 의한 안정화의 예

#### 5. 결 론

현재 동적, 전압, 주파수 불안정 등 전력계통에서의 다양한 불안정 현상에 대비해서 SPS가 설계, 운영되고 있다. 이 논문에서는 그 중에서 발전기 주변에서의 선로사고에 의해, 발전기가 동기탈조의 위험이 있을 경우에 대응하기 위한 SPS에 적용될 수 있는 알고리즘을 구현하였다. 이 알고리즘에서는 유효, 무효전력의 측정값을 이용해 위상각-출력 곡선을 구해낸 다음, 등면적법에 기초하여 안정도를 판별하고, 필요한 발전기의 탈락량을 계산하였다. 이 알고리즘을 6기 5모선 계통에서 모의하여 결과를 검증하였으며, 만족할 수 있는 결과를 나타내었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] System Protection Schemes in Power Networks, CIGRE Task Force 38.02.19
- [2] 박종영 외, "SPS의 보호동작과 우리나라 계통보호설비 현황," 대한전기학회 2002 하계학술대회, 2002년 7월, pp. 274-276
- [3] Prabha Kundur, Power system stability and control, McGraw-Hill, 1994