

발전기 최대 위상각을 이용한 전력계통 과도안정도 평가

이덕재, 장길수, 권세혁 김태균, 추진부
 고려대학교 전기공학과 한전 전력연구원

A Method for Transient Stability Assessment using Maximum Generator Angle

Duck-Jae Lee, Gilsoo Jang, Sae-Hyuk Kwon Tae-Kyun Kim, Jin-Boo Choo
 Department of Electrical Engineering, Korea University KEPRI

Abstract - The time domain simulation method of transient stability presents accuracy and reliability, but it demands much computational time. Therefore it is necessary to filter out very stable and very unstable cases from a large set of contingencies. Following a disturbance, the shape and magnitude of representative generator angle which is most increased after fault clearing are the measure of transient stability. This paper propose a method that is not a calculation of the exact CCT of contingency, but a fast assessment of transient stability. Also it can help operators identify transient stability immediately without analyzing the graphical results. The proposed method is applied to the KEPCO system. The PSS/E is used as a time domain simulation engine by IPLAN.

2. 발전기 위상각 곡선의 특징

2.1 과도안정도 판정

계통에 사고가 발생했을 때, 발전기들이 받는 영향의 정도는 사고의 위치와 종류에 따라 다르다. 사고 제거 후에도 위험 발전기들의 위상각이 나머지 위상각들의 중심에서 크게 벗어나 계속 증가한다면 발전기들은 동기를 잃고 탈조하게 된다. 과도안정도 판정은 시간에 따른 위험 발전기들의 위상각 곡선을 계통의 운영자가 시각적으로 판단하여 결정한다. 어떤 발전기를 위험 발전기로 정할 것인지와 위험 발전기의 위상각의 크기가 불안정으로 판정되는 기준을 없지만 대개의 경우 운영자가 시각적으로 명확하게 판정할 수 있다. 그리고 1개의 발전기라도 동기를 유지할 수 없다면 계통은 불안정한 상태로 판정한다.[2]

2.2 대표 발전기의 선택

과도안정도 평가 시 위험 발전기들 중에서도 사고의 영향을 가장 많이 받는 발전기의 위상각 곡선의 형태를 분석하여 안정 여부를 판정할 수 있다. 이는 계통의 사고 발생시 사고 위치와 인접한 발전기군이 가장 영향을 많이 받으며 비슷한 패턴으로 진행하기 때문에 이 발전기군에서 대표 발전기만을 선택하여도 충분히 안정 여부를 판정할 수 있다. 에너지함수의 관점에서 보면 회전자 위상각과 각속도는 에너지의 변화를 나타낸다. 위상각은 위치에너지(potential energy)와 관련이 있으며 각속도의 변화는 운동에너지(kinetic energy)와 관련이 있다. 사고가 발생하면 계통의 운동에너지는 증가하고 사고 제거 후에 운동에너지는 위치에너지로 전환된다. 이러한 관점에서 회전자의 위상각과 각속도는 발전기의 상태를 나타내는 중요한 파라미터이다. 계통의 중심에서 가장 많이 벗어나는 발전기를 과도안정도 측면에서의 대표발전기라고 한다면 대표 발전기의 위상각에 따라서 계통의 안정·불안정이 결정된다.

대표발전기를 선정하기 위해서는 각각의 발전기들의 관성의 크기 차이를 고려하여 COA(Center Of Angle) 관점에서 발전기의 과도 특성을 표현하고 이를 기준으로 식 (1)과 같이 개별 발전기의 위상각을 표현하는 것이 좋다.

$$\delta_{COA} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i \delta_i}{\sum_{i=1}^N H_i} \quad (1)$$

δ_i : 각 발전기의 회전자 위상각
 N : 발전기 대수
 H_i : 각 발전기의 관성 정수

따라서 COA관점에서의 발전기 위상각은 식(2)와 같이 정의된다.

1. 서 론

전력계통에서의 과도안정도 평가는 사고 후에도 모든 발전기들이 동기를 유지할 수 있는지의 여부로 결정된다. 과도안정도 평가를 위해서 전통적으로 사용된 방법은 시간모의법(Time simulation)과 직접법(Direct Method)이다. 시간모의법은 어떠한 계통에도 적용 가능하며 높은 신뢰도를 제공하지만 계산 시간이 많이 소요되며 안정·불안정의 판정만 가능하고 안정도 마진을 구하는 정량적인 해석이 불가능하다. 에너지함수(Energy Function)나 등면적법(Equal Area Method)을 이용한 직접법은 계산 시간이 비교적 빠르고 안정한 정도의 정량적인 계산이 가능하지만 계통 상태가 바뀔 때마다 수학적 모델링을 다시 해야 하고 정량적 해석 결과가 부정확하다는 단점이 있다. 최근에는 온라인 형태의 과도안정도 평가를 위해 시간모의법과 직접법을 통합한 등가 발전기 해석법(SIME)[1]이 사용되고 있다. 이 방법은 계산이 빠르고 정확하다는 장점이 있지만 등가 1기 무한모션을 구성하기 위해 일반적인 안정도 조건보다 심각한 조건을 고려해야 하고 안정한 경우에는 발전기 그룹핑이 어렵고 장시간의 시간모의를 해야 하는 단점이 있다.

여러 가지 방법들 중에서 시간모의법은 계산 시간이 가장 많이 소요되지만 안정 여부를 가장 정확하게 판별할 수 있다. 이에 본 논문에서는 PSS/E를 이용하여 시간모의법의 계산 시간을 단축시키고 불안정한 상정사고를 판별하기 위한 과도안정도 평가 방법을 제시하였다. 이는 사고 발생시, 계통의 중심위상각(COA)에서 가장 많이 벗어나는 발전기의 회전자 동요곡선의 파형을 분석하여 불필요한 사고의 시간모의를 중지하고 전체 계산 시간을 단축하고자 하였다. 상정사고에 대한 CCT나 안정마진을 계산하지 않고 빠른 안정도 평가를 위해서는 사고제거시간에 대해서 안정·불안정만을 판정하여도 충분하다.

PSS/E를 이용해 얻은 다이내믹 데이터를 이용하여 운영자가 시각적으로 판별해야 하는 과도안정도 평가를 수식으로 판정하는 방법을 제시하고 한전계통에 적용해보았다.

$$\delta_{i,COA} = \delta_i - \delta_{COA} \quad (2)$$

본 논문에서는 발전기의 위상각을 모두 COA 관점에서 위상각의 크기로 표현하고 δ_i 로 표시한다. 대표 발전기는 사고 전의 상대적인 위상차를 제거하고 사고가 제거된 후에 사고의 영향을 가장 많이 받는 발전기를 찾기 위해서 일정 시간 동안에 전체 발전기들 중에서 위상각 크기의 변동이 가장 큰 발전기를 택한다. 대표 발전기의 위상각 δ 는 식 (3)과 같이 정의한다.

$$\delta = \max(\max \delta_i(t) - \delta_i(CT)) \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

$$CT \leq t \leq CT + \Delta T$$

δ : COA에 대한 대표 발전기의 위상각

N : 전체 발전기 대수

CT : 사고 제거 시간

ΔT : 사고 제거 후의 관찰 시간

관찰 시간 ΔT 의 값에 따라서 대표 발전기의 선택이 달라질 수 있으며 ΔT 가 커질수록 정확한 선택을 할 수 있다. 하지만 실제 계통에서는 발전기들이 같은 집단을 형성하고 있으며 대개는 같은 연관성(Coherency)을 갖는 발전기군에서 대표 발전기가 결정되기 때문에 그 차이는 크지 않다. 그리고 계산 시간을 줄이기 위해서 본 연구에서는 사고의 영향이 발전기에게 충분히 미칠 수 있도록 ΔT 의 값을 300ms로 선택하였다.

2.3 발전기 위상각 곡선의 형태

대표 발전기의 위상각 곡선의 형태는 계통의 상태에 따라 달라질 뿐만 아니라 같은 발전기라도 관찰 시간 ΔT 에 따라서도 달라진다.

(1) 급격히 증가하는 경우

사고 제거 후, 1차 관찰 시간 $T1$ 까지 위상각이 감소하지 않고 급격히 증가하는 경우이다. 이는 사고가 매우 극심하여 사고가 제거된 후에도 기계적 입력이 전기적 출력보다 크기 때문에 위상각이 계속 증가하고 각속도 또한 계속 증가한다(그림 1). 식 (4)처럼 사고 제거 시간 CT 에서 $T1$ 까지의 각속도의 크기를 비교하여 각속도가 계속 증가하면 매우 불안정한 경우(Very Unstable)로 판정한다[3].

$$\omega_2 > \omega_1 \quad (4)$$

(2) 증가율이 일정 또는 감소하는 경우

사고를 제거한 후 초기에는 위상각이 거의 일정하게 증가하는 경우이다. 관찰 시간이 짧아서 이후에 급격히 증가하는지 혹은 최대값에 도달한 후에 감소하는지의 여부는 현 시점에서 불가능하다. 따라서 정확한 판정을 위해 1차 동요(first swing)가 나타나는 최소한의 시간 $T2$ 까지 시간 모의를 계속해야 한다(그림 2).

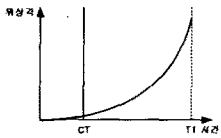


그림 1. 급격하게 증가

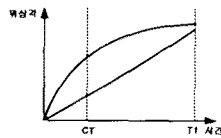


그림 2. 일정 또는 감소

(3) 최대값 도달 후에 감소하는 경우

사고 제거 후에 위상각이 증가하다가 최대값에 도달한 후에 다시 감소한다. 비교적 짧은 시간 내에 대표 발전기의 1차 동요가 끝나고 동기를 유지하는 이러한 경우를 안정한 상태(Stable)라고 할 수 있다. 위상각 곡선에 최대값 혹은 변곡점이 존재하므로 식 (5)과 같이 연속하는 2개의 위상각 크기의 차이를 관찰 시간 초기의 위상각 차이와 계속 비교함으로써 곡선의 증감 여부를 알 수 있다. 연속하는 2개의 값의 증감 여부를 사고 제거 직후의 증감과 계속 비교하여 부호가 같지 않은 구간이 존재한다면 위상각 곡선은 계속 증가하지 않고 감소하는 형태가 된다[4].

$$\text{sign}[\delta(t+1) - \delta(t)] \neq \text{sign}[\delta(CT+1) - \delta(CT)] \quad (5)$$

$$t = CT, CT+1, \dots, T1-1, T1 \text{ (시간 모의 스텝)}$$

sign : (+) 또는 (-)

(4) 위상각이 일정한 경우

사고에 대해서 발전기들이 거의 영향을 받지 않는 매우 안정한 경우(Stable)이다. 대표 발전기의 위상각의 크기가 일정 범위 내에서 작은 값을 가지며 식 (6)과 같이 정의된다. δ_L 은 계통의 특성에 맞게 운영자의 경험과 주관적인 판단으로 결정하는 값이지만 적절히 선택하면 매우 정확한 결과를 얻을 수 있다.

$$\delta_{\max} \leq \delta_L \quad (6)$$

$$CT \leq t \leq T1$$

δ_{\max} : 관찰 시간 내의 최대 값

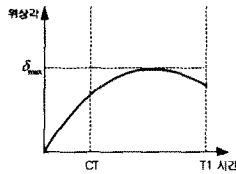


그림 3. 감소하는 경우

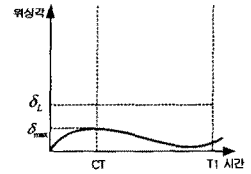


그림 4. 거의 일정한 경우

2.4 안정도 평가 방법

2.3에서 언급한 대표 발전기 위상각 곡선의 특성을 이용한 과도안정도 평가의 기본적인 절차는 다음과 같다.

1) 각각의 상정사고에 대해서 사고를 제거한 후에 1차 관찰 시간($T1$)까지 시뮬레이션을 실시한다.

2) 모든 발전기들 중에서 사고 제거 후에 위상각의 크기가 가장 많이 증가한 발전기를 찾아서 이를 대표 발전기로 정한다. 대표 발전기의 위상각 증가가 δ_H 이상이면 매우 불안정한 경우(Very Unstable), δ_L 보다 작으면 안정한 경우(Stable)라고 판정하고 시간 모의를 종료한 후 다음 상정사고에 대해서 시뮬레이션을 계속한다. 본 논문에서는 δ_H 를 180° 로 정하였다.

3) 대표 발전기 위상각 증가값이 $\delta_L - \delta_H$ 사이에 존재하는 경우, 위상각의 크기가 최대값에 도달한 후에 감소하는 형태라면 안정한 경우(Stable)로 판정하고 안정 판정을 종료한다. 만약에 계속 증가하는 형태라면 다음 단계에서 판정을 수행해야 한다.

4) 위상각 곡선이 급격히 증가하는 형태라면 매우 불안정한 경우(Very Unstable)로 판정하고 다음 상정사고에 대해서 안정도 판정을 계속한다. 그러나 위상각 곡선의 기울기가 일정하거나 감소하는 형태라면 현 시점에서는 판정하기가 힘들기 때문에 2차 관찰 시간 $T2$ 까지 시간 모의를 실시한 후에 다시 안정·불안정을 판정해야 한다.

>> 이차(1)~4)의 과정을 통해 명확하게 안정·불안정이 판정된 상정사고는 시간 모의를 종료하고 다음 상정사고에 대해서 안정도 평가를 수행한다. 그리고 안정판정이 곤란한 상정사고들만을 2차 관찰시각까지 시간 모의를 계속하기 때문에 계산 시간이 많이 단축된다.

5) 2차 시간 모의를 T1에서 T2까지 실시한다. 위상각 폭선이 계속 증가하는 형태라면 불안정한 경우(Unstable), 최대값에 도달한 후에 감소하는 형태라면 잠재적으로 위험한 경우(Potentially Unstable)로 판정한다.

6) 현재의 상정사고에 대한 안정 판정을 종료하고 다음 상정사고에 대해서 안정도 평가를 계속 수행한다.

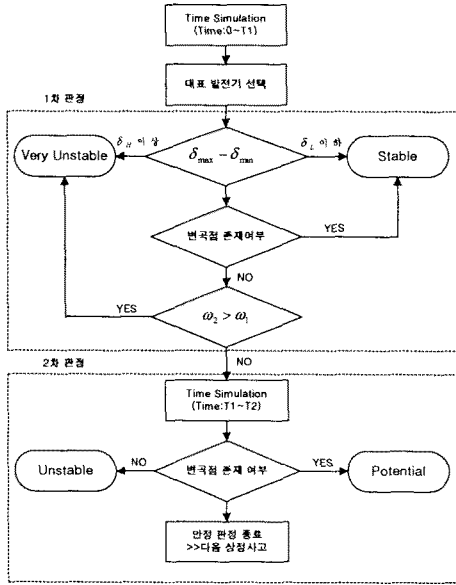


그림 5. 과도안정도 평가 알고리즘

3. 사례 연구

이번 장에서는 2003년 한전 계통에 대해 제안한 대표 발전기의 선택과 위상각 폭선을 이용한 과도안정도 평가 알고리즘을 적용하여 유용성을 검증하고자 한다. 사례 연구에 사용된 2003년 한전 계통은 947모선, 1759선로, 230기 발전기의 규모이다. 2003년 계통 데이터는 본 연구에서 제안한 방법을 검증하고자 사용한 것으로 실제 계통과는 차이가 있으며 그 결과 면에서도 실제 내용과 차이가 있을 수 있다. 시간 모의 프로그램은 PSS/E-28을 사용하였으며 IPLAN으로 구성되어 PSS/E내에서 모든 것이 이루어지도록 하였다. 사고 제거 시간은 실제 계통에서 사용되는 345kV 계전기, 차단기 동작시간인 100ms에서 20ms의 마진을 둔 120ms로 선정하여 안정도 판정을 수행하였다. 따라서 T1=420ms, T2=800ms로 정하였다.

표의 첫 번째 열은 실제에 구한 CCT를 기준으로 한 상정사고의 순위를 나타낸 것이다. 두 번째 열은 모선 번호, 네 번째 열은 2차 판정시각에서의 대표 발전기 위상각을 나타낸다. 결과에서 매우 불안정, 불안정으로 판정된 사고의 실제 CCT는 주어진 CT보다 작은 값을 가진다. CCT가 존재하지 않는 사고들은 매우 불안정한 사고로 판정되고, 7100-7155, 7600-7155 사고들은 CCT가 매우 작은 값을 갖기 때문에 매우 불안정한 경우로 판정해도 무방하다. 실제의 CCT와 비교해본 결과 대표발전기의 위상각, 각속도 폭선과 δ_H 값의 적절한 선택으로 매우 불안정한 상정사고들을 모두 판별할 수 있었다. 잠재적으로 불안정한 사고들은 CT보다 CCT가 크기 때문에

현재는 안정하지만 계통의 상태가 변한다면 충분히 불안정한 상태로 바뀔 수 있는 경우이다.

표 1. 2003년 계통 과도안정도 평가 결과(CT=120ms)

순위	사고 위치	실제 CCT	위상각	안정 판정
1	4400-4450	-	-	very unstable
1	6020-6030	-	-	very unstable
1	6450-7155	-	-	very unstable
1	7150-7600	-	-	very unstable
1	8150-8155	-	-	very unstable
1	9150-9800	-	-	very unstable
1	10300-10350	-	-	very unstable
1	4450-4400	-	-	very unstable
1	6030-6020	-	-	very unstable
1	7155-6450	-	-	very unstable
1	7155-7100	-	-	very unstable
1	8155-8150	-	-	very unstable
1	9800-9150	-	-	very unstable
1	10350-10300	-	-	very unstable
15	7100-7155	0.0333*0.0417	-	very unstable
16	7600-7150	0.0583*0.0667	-	very unstable
17	1400-1800	0.1000*0.1083	171.4	unstable
17	5150-5600	*	179.2	unstable
17	5155-5500	*	172.0	unstable
17	1800-1400	*	190.5	unstable
21	6150-6800	0.1083*0.1167	94.7	unstable
21	6300-6950	0.1167*0.1250	148.0	unstable
21	5155-1500	*	110.3	unstable
21	6030-4010	*	144.9	unstable
21	10400-10300	*	147.8	unstable
26	5150-5155	0.1250*0.1333	87.3	potential
26	5155-5150	*	85.6	potential
28	6100-6300	0.1333*0.1417	81.5	potential
28	7150-7155	*	84.3	potential
28	10150-10700	*	94.4	potential
28	7155-7150	*	85.1	potential

4. 결 론

본 논문에서는 과도안정도 판정의 가장 기본적인 방법인 시간 모의법과 대표 발전기의 위상각 폭선의 파형을 이용한 상정사고 스크리닝 기법을 결합한 평가 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 정확한 CCT나 안정마진을 구할 수는 없지만 주어진 CT에 대한 불안정한 모든 사고들을 판정할 수 있다. 그리고 계통의 운영자가 안정도 판정을 할 때, 직관적이고 시각적인 방법 대신에 IPLAN을 이용하여 해석 프로그램의 내부에서 안정도 판정을 수행함으로써 소요되는 시간을 단축하였다. 제시한 방법으로 한전계통에 적용한 결과 SIME에 비해서 약 70%정도의 계산 시간이 소요되었다. 향후에는 불안정한 상정사고들에 대한 오차를 줄일 수 있도록 연구가 진행되어야 하겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. Zhang, L. Wehnel, P. Rousseaux, M. Pavella, "SIME : A Hybrid Approach to Fast Transient Stability Assessment and Contingency Selection", Electric Power & Energy Systems, Vol. 19, No.3, pp. 195-208, 1997
- [2] 송길영, "신변 전력 계통 공학", 동일출판사, 1998
- [3] 안태형, 이병준, 권세혁, "SIME법의 과도안정도 판정속도 향상을 위한 새로운 발전기 그룹핑 방법", 대한전기학회 추계 학술대회 논문집, pp. 150-152, 1999년
- [4] G.G Karady, M.A Mohamed, "Improving transient stability using fast valving based on tracking rotor-angle and active power" Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE ,Vol. 3, 21-25 pp1576-1581 July 2002