

온라인 과도안정도 판정을 위한 상정사고 고속 스크리닝 알고리즘 개발

論 文

50A-5-3

A Fast Screening Algorithm for On-Line Transient Stability Assessment

李種碩* · 梁正大** · 李炳峻*** · 權世嫻[§] · 南海鯤^{§§} · 秋鎭夫^{§§§} · 李慶極[#] · 尹相鉉^{###} · 朴丙哲^{###}
(Jongseock Lee · Jungdae Yang · Byongjun Lee · Sae-Hyuk Kwon · Hae-Kon Nam · Jin-Boo Choo ·
Koungguk Lee · Sanghyun Yun · Byungcheol Park)

Abstract - SIME(Single Machine Equivalent) method has been recognized as a useful tool to determine transient stability of power systems. In this paper, SIME method is used to develop the KEPCO transient stability assessment (TSA) tool. A new screening algorithm that can be implemented in SIME method is proposed. The salient feature of the proposed screening algorithm is as follows. First, critical generators are identified by a new index in the early stage of the time domain simulation. Thus, computational time required to find OMIB(One Machine Infinite Bus) can be reduced significantly. Second, clustering critical machines can be performed even in very stable cases. It enables to be avoid extra calculation of time trajectory that is needed in SIME for classifying the stable cases. Finally, using power-angle trajectory and subdividing contingency classification have improved the screening capability. This algorithm is applied to the fast TSA of the KEPCO system.

Key Words : Transient stability assessment, Dynamic security assessment, Contingency screening, SIME(Single Machine Equivalent), PASF(Power-Angle Shape Filtering)

1. 서 론

오늘날 전력계통은 경제적 또는 환경적인 이유로 증설보다는 기존의 계통을 최대한 효과적으로 이용하려는 노력이 계속됨에 따라 점점 안정도 한계에 가까운 무리한 조건 하에서 운전되고 있는 실정이다. 따라서 보다 안전한 계통운용을 위해서는 수시로 변동하는 계통 조건 하에서 다양한 상정사고들에 대한 계통의 안정도를 평가할 수 있는 동적 안전도 평가(Dynamic Security Assessment)가 수행되어야 한다[1].

전통적인 과도 안정도(Transient Stability Assessment) 평가 기법으로는 시간 모의법(Time Simulation)과 직접법(Direct Method)이 있다. 시간 모의법은 어떠한 계통에도 적용 가능하며 높은 신뢰도를 제공한다. 하지만 계산시간이

많이 소요되며, 안정·불안정의 판정만 가능하고 안정도 마진을 구하는 정량적 해석이 불가능하다는 단점이 있다. 직접법은 계산시간이 비교적 빠르고, 안정한 경우에는 얼마나 안정하고, 불안정한 경우에는 얼마나 불안정한가를 판단할 수 있는 정량적인 계산이 가능하다. 대표적인 방법으로는 에너지함수(Energy Function)를 이용한 방법과 등면적법(Equal Area Criterion)을 이용한 방법이 있다. 하지만 이러한 방법들은 모델링의 유연성이나 결과의 정확성 면에서 한계를 가지고 있어서 최근에는 시간모의법과 통합하여 안정도를 평가하는 연구들이 진행되고 있다[2,3,4].

본 논문에서 적용한 방법인 SIME(Single Machine Equivalent)는 시간 모의법에 확장 등면적법을 결합한 방법이다. 이 방법은 빠르고 정확하다는 장점이 있지만, 안정한 경우에 발전기 그룹핑이 어렵다는 단점이 있다[5].

본 논문에서는 다음과 같은 기법을 적용해서 보다 신속하고 정확한 과도 안정도 평가를 수행하도록 함으로써 온라인 상에서 과도안정도 판정을 할 수 있도록 하였다.

첫째는 SIME와는 달리 시간모의 초기 단계에서 발전기들을 그룹핑하여 1기 무한 모션으로 구성하고 시간 모의에서 그 시간궤적(Time Trajectory)을 관찰함으로써 안정도 판정을 보다 신속하게 수행함과 동시에 안정한 경우에도 그룹핑이 가능하게 하였다.

둘째는 전력-상차각의 궤적을 그려서 안정도 판별을 네가지로 세분화하여 매우 심각한 사고만 스크리닝하도록 하였다. 또한, 사고지속 시간을 계전기 동작시간에 가깝게 하여 내외삼법을 이용하여 CCT계산함으로써 정확도를 높였다.

이렇게 개선된 방법을 PSS/E 26을 사용하여 212기 7870

* 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 博士課程

** 準 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 碩士課程

*** 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

§ 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

§§ 正 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

§§§ 正 會 員 : 韓電電力研究所 首席研究員 · 工博

正 會 員 : 韓電電力研究所

** 正 會 員 : (주)프로컴시스템 社長

準 會 員 : (주)프로컴시스템

接受日字 : 2001年 2月 2日

最終完了 : 2001年 4月 9日

선 한전 2000년 5월 운용데이터에 적용 검증하였다.

2. SIME의 개요 [2,3,4]

본 논문에서 과도안정도 평가를 위해 적용한 주된 알고리즘은 SIME 알고리즘이다. 이는 60년대 초에 발표된 확장등면적법을 개선시킨 방법으로 시간영역 모의를 조기에 종료하고 모의 결과에 의해 계통을 등가 1기 무한대 계통으로 변환한 후 등면적법을 이용, 안정도 한계 (CCT : Critical Clearing Time, 계통에 사고가 주어졌을 때 발전기가 동요를 잃지 않고 운전할 수 있는 최대 사고지속 시간)을 계산하여 안정도를 판정한다. 보다 상세한 알고리즘을 살펴보면 그림1과 같다.

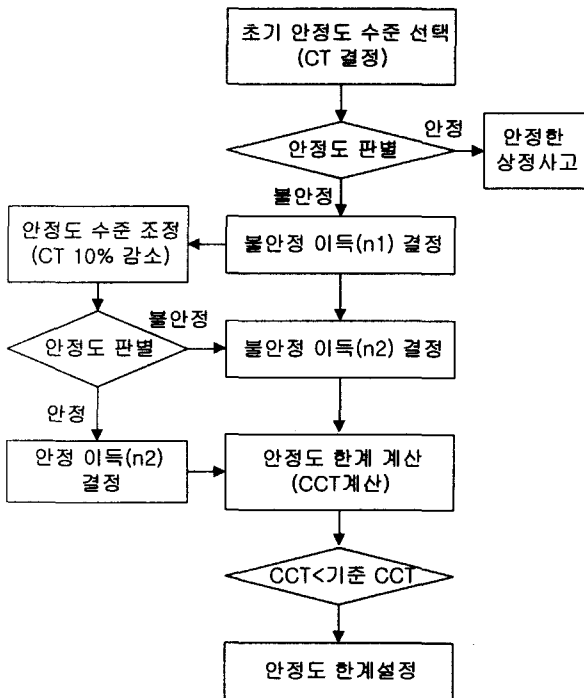


그림 1 SIME에 의한 과도 안정도 한계 설정 알고리즘

그림 1의 과정을 그림 2와 같이 요약할 수 있다. 그림 2는 계통에 사고가 발생한 일정 시간뒤에 사고를 제거하고 난 직후부터의 시간모의를 통해 발전기들을 위험그룹과 나머지그룹으로 나누는 그룹핑 과정과 이렇게 그룹핑된 발전기를 OMIB(One Machine Infinite Bus)로 구성하여 전력상차각 곡선을 그리는 과정, 앞의 전력상차각 곡선으로부터 안정도 마진을 구하여 내·외삽법을 이용해 CCT를 구하는 과정을 나타낸 것이다.

온라인으로 과도 안정도를 평가하기 위해서는 온라인 데이터가 입력되는 한 주기 내에 안정도 평가를 하기 위한 계산 속도가 빠른 알고리즘이 필수적이다. 다음 절에 빠르고 정확한 온라인 과도안정도 판정을 위해 본 논문에서 제시한 방법을 설명하였다.

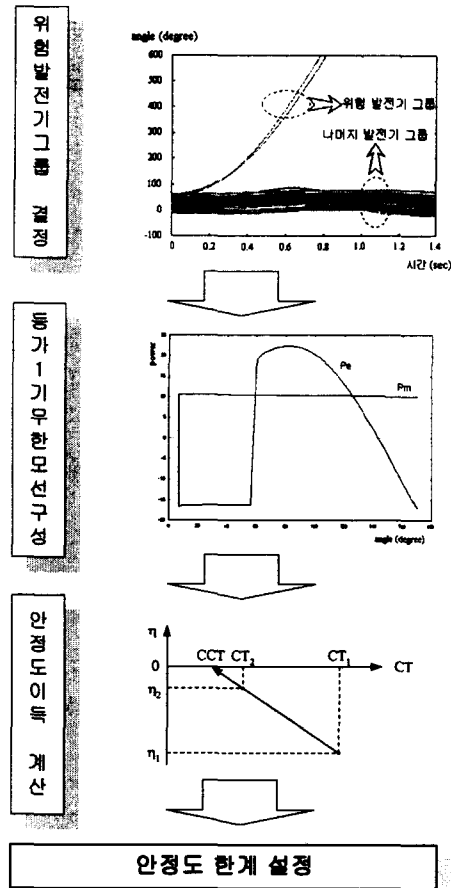


그림 2. SIME에 의한 CCT구하는 과정

3. 과도 안정도 판별 속도 개선

다기 계통을 1기 무한 계통으로 등가화하여 등면적법을 사용해 안정·불안정을 판정하는 SIME법에서 가장 중요한 작업중 하나가 다기계통을 1기 무한계통으로 등가화하기 위해 발전기들을 그룹핑하는 것이다.

기존의 방법은 그림 3과 같이 계통 외란 제거후 발전기의 위상각 차에 의해 그룹핑 하였다. 위상각차에 의한 발전기 그룹핑을 하기 위해서는 우선 시간모의 프로그램을 통해 사고제거 후의 발전기들의 동요 곡선을 계산한다. 이때 각 시간 간격마다 발전기들을 회전자 위상각 크기에 따라 내림차순으로 정렬하여 가장 큰 위상각 차를 찾는다. 이 지점을 기준으로 상위의 발전기들은 위험 발전기 그룹의 후보가 되고 그아래 발전기들은 나머지 발전기 그룹의 후보가 된다. 시간 모의는 보통 위상각 차가 200° 이상 벌어질 때까지 계속 시뮬레이션을 하게 된다. 이렇게 각각의 후보 발전기 그룹이 정해지면 관성정수를 이용해 등가 1기 무한 모선의 시간관례를 계산하여 상정사고의 안정, 불안정 여부를 판정한다. 그림 3은 발전기들의 위상각 변화를 각 모의시간 스텝마다 관찰하면서 그 위상각차가 최대 200° 이상 벌어질 때 상위에 있는 발전기들을 위험발전기 그룹으로 정하고 아래에 있는 발전기들은 나머지 발전기들로 정하는 위상각 차에 의한 그룹핑 방법을 나타낸 것이다[2,3].

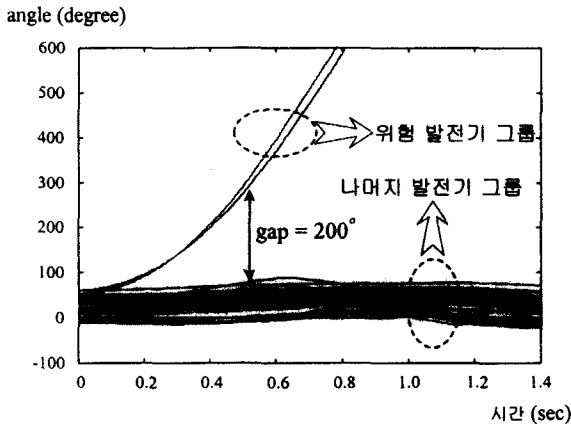


그림 3. 최대 위상각차에 의한 발전기 그룹핑

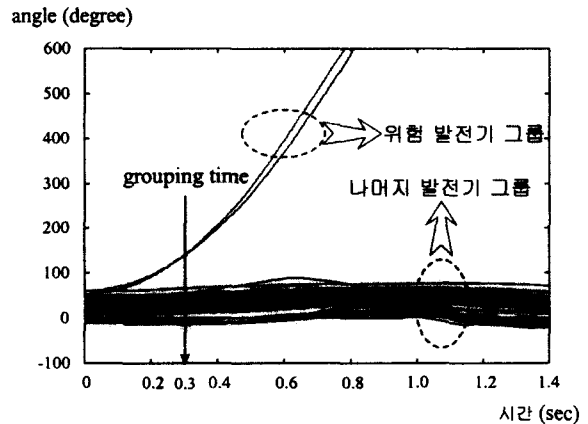


그림 4. AI법에 의한 발전기 그룹핑

3.1 위상각 증분(AI)을 이용한 그룹핑

2절에서 설명한 SIME에서 등가 1기 무한모선 구성을 위해 발전기들을 그룹핑하기 위해서는, 불안정한 시간모의를 전제로 하고 있다. 그러나 시간모의가 안정한 경우 그 자체로는 발전기 그룹핑이 불가능하므로 등가 1기 무한모선을 구성하지 못하고 장시간의 시간모의를 수행하게 된다. 이러한 경우에는 동일한 상정사고에 대해 좀더 불안정한 조건을 고려하여 다시 시간모의를 수행하고 그때 얻어진 발전기 그룹핑 결과를 이용할 수 밖에 없다.

이러한 문제점은 SIME가 발전기 그룹핑 방법으로서 최대 위상각차를 이용하기 때문이다. 최대 위상각차는 시간영역 모의결과가 확실히 불안정한 경우에만 적용할 수 있다. 따라서 극심한 안정도 조건을 고려했음에도 불구하고 모의결과가 안정한 경우에는 발전기 그룹핑을 할 수 없는 문제점을 가지고 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해 본 논문에서는 발전기 위상각 증분(AI : Angle Increment)을 이용하여 안정한 경우에도 그룹핑이 가능하도록 하였다. 위상각 증분법은 시간 모의 초기에 각 발전기들의 위상각이 증가한 정도를 비교하여 상대적으로 많이 가속된 발전기들을 찾아내는 지수이다[6,7].

$$AI_i = (\delta_{oi} - \delta_{ci}) - \frac{\sum_{k=1}^n H_k (\delta_{ok} - \delta_{ck})}{\sum_{k=1}^n H_k} \quad (1)$$

- δ_{oi} : 관찰시각에서의 각 발전기의 위상각
- δ_{ci} : 사고 제거 직후의 각 발전기의 위상각
- H_k : 각 발전기 관성정수
- n : 발전기수

식(1)은 COA(Center Of Angle)로 표현된 관찰시각에서의 발전기 회전자 위상각과 사고제거 직후의 발전기 회전자 위상각의 차로부터 유도한 위상각 증분을 나타내는 식이다.

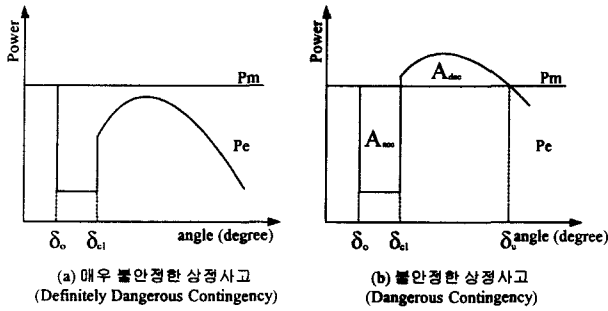
이 식(1)에 의해 각 발전기들은 위상각 증분의 크기에 따라 내림차순으로 정렬되고 위상각 증분의 차이가 가장 큰 지점을 기준으로 상위의 발전기들을 위험발전기 그룹으로 분류한다. 위험 발전기 그룹 외의 나머지 발전기들은 나머지 발전기 그룹으로 분류된다.

이러한 발전기 그룹핑은 어느 시점에 이루어지느냐에 따라 그 결과가 달라질 수 있다. 따라서 정확한 결과를 얻기 위해서는 사고의 영향이 충분히 나타나는 시점에서 (예를 들어 사고제거 후 0.3초 정도) 발전기 그룹핑이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 안정한 경우에도 정확한 발전기 그룹핑을 할 수 있는 위상각 증분법을 이용해 발전기 그룹핑을 하였다.

그림 4는 발전기 그룹핑 시간까지 발전기 위상각들의 증분비를 구하여 발전기를 그룹핑하는 AI법에 의한 발전기 그룹핑 방법을 나타낸 것이다.

3.2 PASF(Power-Angle Shape Filtering)

기존의 SIME은 비교적 정확하고 빠른 계산을 가능하게 하였지만 두 번째 시간 모의시 사고제거 시간 (CT2)가 180ms(CT1이 200ms인 경우)로 일반적인 계전기 동작 시간보다 크므로 현실성이 떨어진다. 그리고 CT1과 CT2의 차이가 작으므로 내·외삽 법으로 CCT를 구할 때 정확도가 떨어진다. 이런 문제점을 해결하기 위해 CT2를 150ms나 그 이하로 줄이게 되면 계전기 동작시간에 근접하게 되고 CCT의 정확도도 증가하게 된다. 하지만 CT2를 작게 하면 두 번째 시간 모의시 안정한 경우로 판정되는 상정사고의 갯수가 늘어나게 된다. 이때 안정한 경우로 판정되는 상정사고 중에서는 매우 안정한 경우도 포함된다. 이러한 상정사고를 전력-상차각 곡선의 모양에 의해 판정하여 매우 안정한 상정사고와 잠정적으로 불안정해질 수 있을 것으로 생각되는 안정한 상정사고로 분류해 내는 것이 본 논문에서 제안한 PASF (Power-Angle Shape Filtering)의 특징이다.



- δ_o : 사고 발생 시 위상각
- δ_{cl} : 사고 제거 시 위상각
- δ_u : 불안정 시점에서의 위상각
- δ_r : 안정한 경우 회귀위상각
- A_{acc} : 발전기 가속 면적
- A_{dec} : 발전기 감속 면적

그림 5. 불안정한 상정사고의 전력상차각곡선

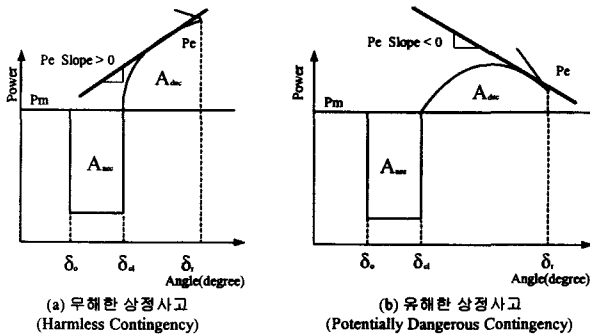


그림 6. Pe Slope를 이용한 안정도 판정

불안정한 상정사고에 대해 시간 모의에 의해 전력상차각 곡선을 구해보면 그림 5와 같이 두 가지 경우로 나타낼 수 있다. 매우 불안정한 상정사고의 경우는 그림 5(a)와 같이 사고를 제거해도 전기적 출력(P_e)이 기계적 입력(P_m)보다 작아서 발전기가 계속 가속하게 된다. 즉, 사고를 제거해도 발전기가 계속 가속되는 아주 불안정한 경우이다. 이와 같은 경우, 다음 식 (2)에 의해 판정한다[7].

$$t_0 < t < t_{obs}, \quad \omega(t) > 0, \quad P_a(t) > 0 \quad (2)$$

- t_0 : 사고 제거 직후의 시간
- t_{obs} : 관찰 시간 (그룹핑 시간 또는 그 이상)
- ω : 발전기 회전자 각속도
- P_a : $P_m - P_e$ (가속화력)

반면에 일반적인 불안정한 상정사고의 경우는 그림 5(b)에서와 같이 가속영역이 감속영역보다 크므로 일정시간 발전기의 회전자 속도가 감속하다가 δ_u 를 지나면서 계속 가속되어 불안정해지게 된다. 이와 같은 경우, 다음과 같은 수식에 의해 판정한다[2,3].

$$t_0 < t, \quad \omega(t) > 0, \quad P_a(t_u) = 0, \quad \left. \frac{dP_a}{dt} \right|_{t=t_u} > 0 \quad (3)$$

t_u : 불안정 판정 시간

전자의 경우를 매우 불안정한 상정사고 (Definitely Dangerous Contingency - DD), 후자를 불안정한 상정사고 (Dangerous Contingency - D)로 정의한다.

그림 6과 같이 안정한 상정사고의 경우 감속영역의 면적이 가속영역의 면적과 같아져서 위상각이 회귀하며 이때의 속도는 0이 되고 가속화력은 음의 값을 갖게 된다. 이 시점을 t_r 로 정의할 때 다음과 같은 수식에 의해 판정한다[2,3].

$$t_0 < t < t_r, \quad \omega(t) > 0, \quad \omega(t_r) = 0, \quad P_a(t_r) < 0 \quad (4)$$

t_r : δ_r 에 대응되는 시간

그림 6(a), (b)는 안정한 경우를 다시 세분화하여 무해한 상정사고(Harmless Contingency - H)와 계통의 상태가 조금만 변화하면 불안정해지는 잠재적으로 위험한 상정사고(Potentially Dangerous Contingency - PD)를 나타낸 것이다. 이때, 전자의 경우는 더 이상 고려하지 않고, 후자의 경우만 상정사고 순위 결정시 포함시켜서 상세한 시뮬레이션이 이루어지도록 한다. 이 두 가지의 경우는 그림 6에서와 같이 회귀 위상각(returning angle)에서의 전력-상차각 곡선 기울기(Pe Slope)를 이용해 기울기가 양(Pe Slope > 0)인 경우에는 무해한 상정사고(H), 기울기가 음(Pe Slope < 0)인 경우에는 잠재적으로 위험한 상정사고(PD)로 정의한다. 무해한 상정사고(H)의 경우, 안정마진이 잠재적으로 위험한 상정사고(PD)의 안정마진 보다 훨씬 크기 때문에 더 안정하다고 할 수 있기 때문이다. 그리고, 잠재적으로 위험한 상정사고(PD)의 경우는 계통의 상태가 변화하면 불안정한 경우로 될 수 있기 때문에 잠재적으로 유해한 상정사고로 분류하여 상정사고 순위를 정하며, 차후에 상세한 시뮬레이션을 하도록 한다. 이는 식(5), (6)과 같이 회귀위상각과, 시간모의시 회귀위상각을 구한 t_r 보다 한 모의 스텝 시간만큼 작은 t_{r-1} 에서 구한 위상각, 그리고 각각에 대응되는 전기적 출력(P_e)에 의한 기울기에 의해 판정한다.

$$\frac{P_e(t_r) - P_e(t_{r-1})}{\delta(t_r) - \delta(t_{r-1})} > 0 \quad (5)$$

$$\frac{P_e(t_r) - P_e(t_{r-1})}{\delta(t_r) - \delta(t_{r-1})} < 0 \quad (6)$$

P_e : 등가발전기(OMIB) 전기적 출력

δ : 등가발전기(OMIB) 회전자 위상각

t_r : 회귀위상각 δ_r 에 대응되는 모의 시간

t_{r-1} : 시간모의시 t_r 에서 한 스텝 전의 시간

그림 7은 PASF 기법을 포함한 과도안정도 평가 알고리즘을 나타낸 것이다. 초기 안정도 수준이 선택되면 이 조건 하에 시간모의하여 안정도 판별을 한다. 이때 안정하다고

판정된 상정사고는 매우 안정한 상정사고로서 더 이상 고려하지 않는다. 불안정한 상정사고에 대해 새로운 안정도 수준으로 다시 한번 시간모의하여 상정사고의 안정도를 판별한다. 이때 불안정한 경우는 매우 불안정한 상정사고(DD)와 불안정한 상정사고(D)로 구분하게 되는데, 매우 불안정한 상정사고의 경우는 최상위 순위에 놓으며, 불안정한 상정사고의 경우에는 기존의 SIME에 의해 CCT를 계산해 순위를 정한다. 안정한 경우에 대해서는 전력-상차각 곡선의 기울기(Pe Slope)를 판별하여 잠정적으로 위험한 상정사고(PD)와 무해한 상정사고(H)로 구분한다. 이때 H에 대해서는 안정한 사고로 간주하여 고려하지 않고 PD에 대해서만 잠재적으로 불안정해질 요소를 가진 것으로 판단하여 상정사고 순위에 포함시킨다. 이때, 식(5)에 의해 무해한 상정사고로, 식(6)에 의해 잠재적으로 위험한 상정사고로 평가된다.

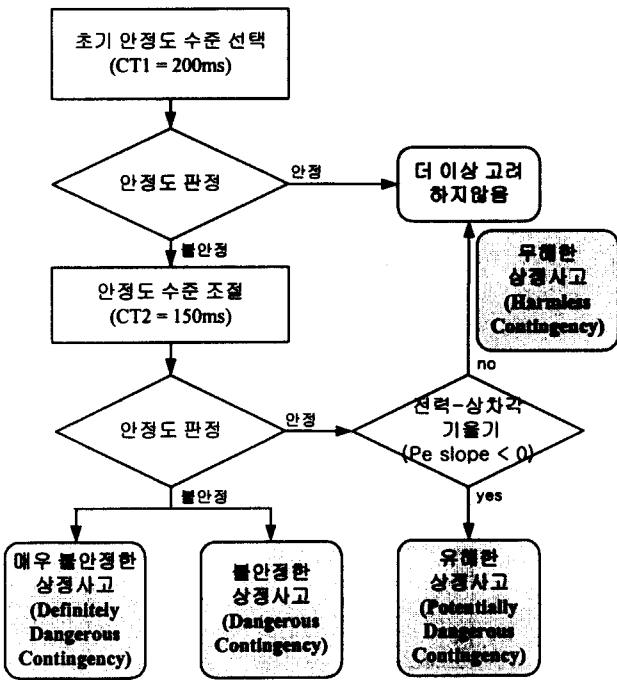


그림 7. PASF를 포함한 과도 안정도 평가 알고리즘

4. PSS/E에서 과도안정도 평가 알고리즘구현

본 논문에서는 2절과 3절에서 설명한 과도안정도 평가를 위한 알고리즘을 시간모의가 가능한 PSS/E 26에서 IPLAN으로 구현하였다. 시간모의는 PSS/E를 이용하였으며 과도안정도 평가와 CCT를 이용한 순위는 PASF법을 적용하여 IPLAN으로 구현하였다.

현재 개발중인 온라인 과도안정도 평가를 위한 개요도는 그림 8과 같다. TSDS(Time Synchronized Data acquisition System)으로부터의 실제계통 데이터(P, Q, V, δ 등)와 NEMS로부터의 데이터(P, Q, V, δ)를 Master System Server에서 과도안정도 감시, 분석을 위한 S/W가 탑재된 Client PC로 15분 간격으로 전송한다. 이 주기내에서는 데이터의 변화가 없다는 가정하에 Client PC에서는 미리 정의된 상정사고

set에 대해 과도안정도 평가를 수행한다. 이를 위하여 전송되는 데이터는 Client PC에 탑재된 시뮬레이션 프로그램 PSS/E의 입력 형식인 PTI 형식으로 변환되거나 또는 15분 전에 사용한 입력데이터의 일부를 입력형식에 맞게 수정하는데 사용된다. 과도안정도 평가가 수행된 다음, 그 결과값은 다시 Master System Server로 전송되게 된다.

PSS/E내의 IPLAN으로 과도안정도 평가 알고리즘을 구현할 때 주의해야 할 부분은 PSS/E의 PU 단위의 base는 네트워크 데이터의 System base 값과 다이내믹 데이터의 Machine base를 사용하고 있다는 것이다. 안정도 평가 시에는 기계적 출력과 machine의 관성정수를 식(7)과 같이 치환해 주어야 한다.

$$P_m' = P_m \times (Machine\ base) / (System\ base) \quad (7)$$

$$H' = H \times (Machine\ base) / (System\ base)$$

일정한 주기로 업데이트되는 계통데이터에 의해 과도안정도평가를 수행하기 위해서는 Client PC가 자동적으로 주기적 계산을 하도록 하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 Client PC의 OS환경으로 windows NT를 사용하고 있다. 과도안정도평가 프로그램을 하나의 배치 파일로 만든 다음 윈도우 환경내에서 자동 예약 실행 기능을 이용하여 1년 365일 동안 일정 주기분마다 과도안정도평가 프로그램을 자동 실행하도록 하였다.

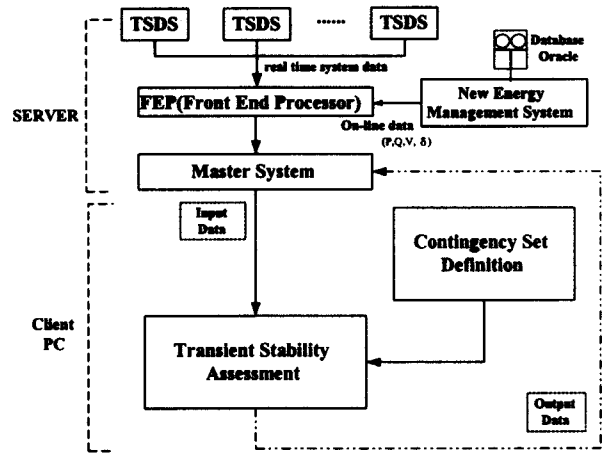


그림 8. 온라인 과도안정도 평가 개요도

5. 사례연구

본 논문에서 제안된 방법을 2000년 5월 운용데이터 212기 787모선과 한전 2010년 계획계통 272기 1119모선에 적용 검증하였다. 2010년 계획계통은 그룹핑 방법인 위상각 증분법(AI)을 검증하였고, 2000년 5월 운용데이터는 PASF방법을 검증하였다.

시간 모의 프로그램으로는 PSS/E 26을 사용하였다. 모든 프로그램은 IPLAN으로 구성하여 PSS/E 26내에서 모든 것이 이루어지도록 하였다. CPU는 Pentium-III450, RAM은 256MB를 사용하였다.

시간 스텝은 0.0083초(0.5 Cycle) 시간간격을 사용했으며, 상정사고는 2회선 3상 지락 사고를 고려하였다. 이때 고려된 상정사고는 발전기 부근의 선로로서 상정사고 발생 시 계통에 아주 큰 영향을 미치는 345kV 선로를 선별하여 사용하였다.

상정사고 시나리오는 초기 사고지속시간(CT1)은 200ms로 아주 크게 하였다. 두 번째 사고지속시간(CT2)은 150ms로 내·외삼으로 CCT 계산시 정확도를 높이도록 하였다. 발전기 그룹핑은 사고가 제거되고 난 후 300ms에 이루어졌다.

5.1 위상각 증분법(AI)의 검증

2010년 계획계통에 대해 주요 발전기로부터의 345kV 3상 2회선 선로에 대한 지락 사고를 시간 모의하여 위상각 증분(AI)법을 검증하였다. 2010년 계획 계통은 전체적으로 매우 안정하므로 사고지속 시간은 200ms로 크게 하였고 그룹핑 시점은 사고가 제거되고 난 후 300ms에 이루어졌다.

표 1은 제안한 방법과 시간모의 방법으로 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. 표 1과 같이 AI법에 의해 사고제거 후 300ms에서 그룹핑한 발전기들과 기존의 SIME에 의해 최대 위상각차 200°가 벌어질때까지 시뮬레이션하여 그룹핑한 발전기들에 의해 안정도를 판정한 결과는 일치하였다. 기존의 방법은 상정사고가 안정한 경우에는 발전기 그룹핑에 오랜 시간이 소요되거나 최대 위상각차가 200°까지 벌

표 1. 발전기 그룹핑 시간 비교

Case No	사고위치	제안한 방법			시간모의법 그룹핑 시간(t_{200°)	판정 결과
		그룹핑 시간	t_r	t_u		
1	5150-5100	0.500	0.499		0.606	안정
2	5100-5010	0.500	0.442		-	안정
3	5150-5600	0.500	0.508		0.606	안정
4	5600-5450	0.500	0.374		0.755	안정
5	5151-5500	0.500	0.458		0.573	안정
6	5500-5700	0.500	0.366		0.706	안정
7	5500-8450	0.500	0.366		0.706	안정
8	7150-7300	0.500		0.299	0.465	불안정
9	7300-7600	0.500	0.390		0.788	안정
10	10150-10250	0.500		0.391	0.581	불안정
11	10150-10600	0.500		0.374	0.581	불안정
12	10150-10700	0.500		0.366	0.581	불안정
13	10400-7900	0.500		0.374	0.589	불안정
14	7900-7100	0.500		0.349	0.722	불안정
15	7900-7250	0.500		0.374	0.722	불안정
16	10401-10301	0.500		0.358	0.462	불안정
17	10301-8800	0.500	0.366		0.681	안정

어지지 않아 발전기 그룹핑을 못한 경우가 있는 반면, 제안한 방법은 300ms에서 모든 상정사고에 대해 발전기 그룹핑을 함으로써 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

또한 표 2는 표 1에서 불안정한 것으로 판정된 상정사고에 대해서 기존의 SIME법과 위상각 증분법에 의해 위험발

전기 그룹으로 분류된 발전기들을 나타낸 것인데, 그 결과가 완전히 일치하여 정확도면에서도 AI법이 유용하다는 것을 알 수 있다. 이러한 위상각 증분법은 발전기 그룹핑 시간이 크면 클수록 더 정확한 결과를 얻을 수 있다.

표 2. 불안정한 경우의 발전기 그룹핑 결과

Case No	기존의 SIME법 (272기)	제안된 방법 (위상각 증분법)
8	27151, 27152 27153, 27154	27151, 27152 27153, 27154
10	30151, 30152	30151, 30152
11	30153, 30154	30153, 30154
12	13155	13155
13	27751, 27752	27751, 27752
14	27751, 27752 27901, 27902	27751, 27752 27901, 27902
15	27903, 27904 27905, 27906	27903, 27904 27905, 27906
16	27753, 27754 27755, 27756	27753, 27754 27755, 27756

5.2 PASF 방법의 검증

그림 9, 10, 11은 10150 - 10800 모선간에 사고지속시간의 변화를 주면서 전력-상차각 곡선의 모양을 관찰한 것이다.

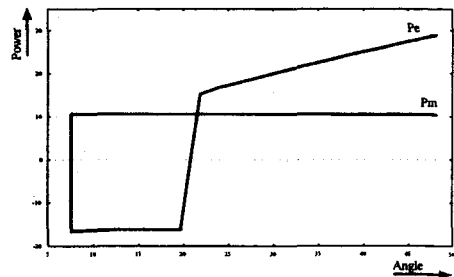


그림 9. CT = 100ms 일때 전력-상차각 곡선

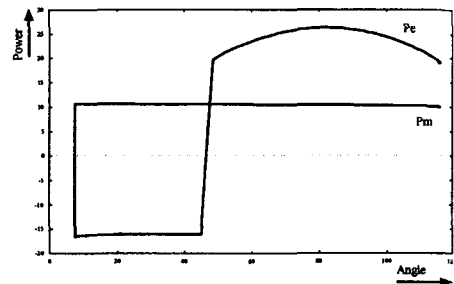


그림 10. CT = 180ms 일때 전력-상차각 곡선

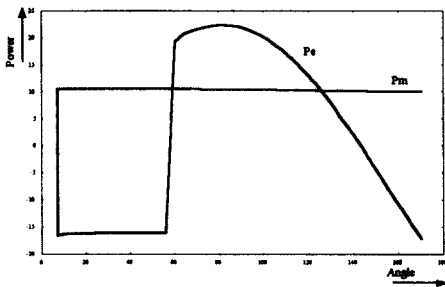


그림 11. CT = 200ms 일때 전력-상차각 곡선

그림 9, 10은 모두 안정한 경우의 상정사고를 나타낸것인데, CT=100ms인 경우는 δ_c 부근의 접선의 기울기가 양인 반면, 사고를 좀더 심각하게 주어 CT=180ms로 한 경우는 안정하더라도 δ_c 근처의 접선의 기울기가 음으로 변한다. 그림 11과 같이 아주 심각한 사고인 CT=200ms인 경우는 불안정하게 된다. 그러므로 상정사고별로 같은 사고지속 시간을 주었을 때 전력-상차각 곡선의 모양을 비교해 보면 어떤 사고가 좀더 불안정한 사고인지를 알 수 있다. 그림 9는 PASF방법을 적용했을 때 무해한 상정사고(H)로 판정하고, 그림 10의 경우는 유해한 상정사고(PD)로 판정한다.

표 3은 40개 상정사고에 대한 기존의 SIME에서 이용한 스크리닝 방법과 본 논문에서 제안한 PASF 방법을 적용하

여 구한 안정도 판정 결과이다. 안정도 판정에 표시한 FSS는 1차 동요 안정(First Swing Stable)로서 처음에 과도한 사고를 주었을 때도 동요가 없는 매우 안정한 상정사고를 나타낸다. 표 3에서와 같이 기존의 SIME에서 안정하다고 판정된 모든 상정사고는 본 논문에서 도입한 방법에 의해 FSS로 판별되어 매우 안정한 사고로 분류된다. 그리고, 기존의 SIME에서 불안정한 것으로 판별된 상정사고 중 6가지는 본 논문에서 도입한 방법에 의해 H로 판정되어 불안정 상정사고 순위에서 빠지게 된다. 이들 상정사고들은 기존의 SIME법으로 구한 CCT에 의해 상정사고 순위를 구해 보면 상당히 큰 CCT를 갖게 되어 최하위로 분류되게 된다. 이렇게 순위 결정에 불필요한 상정사고를 미리 스크리닝함으로써 전체 상정사고 순위 결정 시간을 줄일 수 있게 되었다.

불안정한 경우의 상정사고에 대해 기존의 SIME와 본 논문에 도입한 방법에 의해 구한 CCT와 순위를 서로 비교해 보면 표 4와 같다. 기존의 SIME과 PASF를 적용한 방법의 순위와 정확히 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 PASF와 기존의 SIME에 의해 구한 CCT 오차는 0.00~3.20%로 거의 일치한다. PASF의 CCT가 기존의 SIME 보다 대부분 큰 이유는 PASF에서 CCT를 구하기 위한 첫 번째와 두 번째 시뮬레이션의 사고제거 시간의 차이가 기존의 SIME보다 크기 때문이며 이에 의해 기존의 SIME보다 정확한 CCT를 구할 수 있다.

기존의 SIME보다 불필요한 상정사고 6가지를 미리 스크

표 3. 2000년 5월 운용데이터 과도안정도 판정결과

(FSS : First Swing Stable H : Harmless Contingency PD : Potentially Dangerous D : Dangerous DD : Definitely Dangerous)

사고 번호	사고위치	기존의 SIME		PASF적용		사고 번호	사고위치	기존의 SIME		PASF적용	
		CCT (ms)	안정도 판정	CCT (ms)	안정도 판정			CCT (ms)	안정도 판정	CCT (ms)	안정도 판정
1	1400 - 1500		안정		FSS	21	7155 - 7100	180.0	불안정		H
2	1400 - 1800		안정		FSS	22	7250 - 7900		안정		FSS
3	1700 - 1600		안정		FSS	23	7100 - 7400		안정		FSS
4	4600 - 2400		안정		FSS	24	7900 - 7100		안정		FSS
5	4700 - 2500		안정		FSS	25	8150 - 8155		불안정		DD
6	5150 - 5600		불안정		DD	26	8155 - 8250		안정		FSS
7	5155 - 5150	119.4	불안정	121.3	D	27	8155 - 8500		안정		FSS
8	5155 - 5600		불안정		DD	28	8250 - 8300		안정		FSS
9	5500 - 5700	189.6	불안정		H	29	8250 - 9800		안정		FSS
10	5500 - 8500	115.2	불안정	117.9	D	30	8500 - 8600		안정		FSS
11	5600 - 5700	130.0	불안정	131.2	D	31	8600 - 8400		안정		FSS
12	5700 - 2500	181.8	불안정		H	32	9150 - 9800		안정		FSS
13	6100 - 6800		불안정		DD	33	9250 - 8500		안정		FSS
14	6200 - 6900		불안정		DD	34	10150 - 10700	148.4	불안정	153.2	PD
15	6600 - 4900		안정		FSS	35	10150 - 10600	160.1	불안정	165.4	PD
16	6900 - 6950	131.4	불안정	131.0	D	36	10300 - 10350		안정		FSS
17	7100 - 6600		안정		FSS	37	10300 - 10700		안정		FSS
18	7100 - 7600		안정		FSS	38	10400 - 7900	188.4	불안정		H
19	7150 - 7600	179.7	불안정		H	39	10400 - 10300	172.1	불안정	172.6	PD
20	7155 - 6450	207.8	불안정		H	40	10700 - 10800		안정		FSS

리닝하여 시간의 단축효과도 가져왔다. 표 5에서 보인바와 같이 기존의 SIME법으로 과도 안정도를 평가하는데 소요된 프로그램 총 수행 시간은 40개의 상정사고에 대해 7분 39초였고, 본 논문에서 제안한 PASF 방법을 이용하여 과도 안정도를 평가하는데 소요된 시간은 6분 37초로서 13.5%의 시간 단축 효과를 가져왔다.

표 4. 불안정한 경우의 상정사고 순위 결과

사고 번호	사고위치	기존의 SIME			PASF 적용			ΔCCT (%)
		CCT		Rank	CCT		Rank	
		ms	cycle		ms	cycle		
6	5150-5600	-	-	1	-	-	1	0.00
8	5155-5500	-	-	1	-	-	1	0.00
13	6100-6900	-	-	1	-	-	1	0.00
14	6200-6900	-	-	1	-	-	1	0.00
25	8150-8155	-	-	1	-	-	1	0.00
10	5500-8500	115.2	6.91	6	117.9	7.07	6	2.29
7	5155-5150	119.4	7.16	7	121.3	7.28	7	1.57
11	5600-5700	130.0	7.80	8	131.2	7.87	9	0.91
16	6900-6950	131.4	7.88	9	131.0	7.86	8	-0.31
34	10150-10700	148.4	8.90	10	153.2	9.12	10	3.13
35	10150-10800	160.1	9.61	11	165.4	9.92	11	3.20
39	10400-10300	172.1	10.33	12	172.6	10.36	12	0.29

표 5. 기존의 SIME와 PASF의 시뮬레이션 시간 비교

평가항목	불안정 갯수	시뮬레이션 시간	개선효과
기존의 SIME	18	7분 39초	13.5% 단축
PASF 적용	12	6분 37초	

6. 결론

본 논문에서는 온라인에서 과도안정도를 평가하기 위해서 심각한 상정사고를 선별하는 고속 스크리닝 방법을 제안하였다.

기존의 SIME법에 위상각 증분법과 PASF 기법을 적용하여 개선된 사항은 다음과 같다.

첫째, 위상각 증분을 이용한 스크리닝 방법은 안정한 상정사고에 대해서도 빠른 시간 내에 발전기 그룹핑이 가능하도록 하였다. 불안정한 경우에 대해서도 시간 모의법과 일치하는 그룹핑 결과를 도출하였다.

둘째, PASF기법을 통하여 보다 정확한 CCT 계산을 할 수 있었고, 상정사고 판정결과를 세분화하여 불필요한 상정사고를 선별해냄으로써 상정사고 스크리닝의 기능을 한층 강화 시켰다.

그리고, 위 두 가지 방법을 통해 정확도를 유지하면서 스크리닝 시간을 단축시킬 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Cigre report, "New Trends and Requirements for Dynamic Security Assessment", december, 1997
- [2] Y. Zang, L. Wehenkel, M. Pavella, "SIME : A Comprehensive Approach to Fast Transient Stability Assessment", Tran of IEE Japan, Vol.118-B, No.2, pp. 127-132,1998
- [3] Y. Zang, L. Wehenkel, P. Rousseaux, M. Pavella, " SIME : A Hybrid Approach to Fast Transient Stability Assessment and Contingency Selection", Electric Power & Energy System. Vol.19,Np.3, pp.195-208.1996
- [4] M. Pavella, P. G. Murthy, "Transient Stability of Power Systems: Theory and Practice", John Wiley & Sons, 1994
- [5] Chengjun Fu, Anjan Bose, Contingency Ranking Based on Severity Indices in Dynamic Security Analysis , IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 14, No. 3, August 1999, pp. 980-986
- [6] 이종석, 안태형, 양정대, 이병준, 권세혁. "개선된 SIME법을 이용한 과도안정도 평가", 대한전기학회 1999년도 추계 학술대회 논문집 A권, pp.. 258-260, 1999, 11
- [7] 안태형,이병준, "SIME법의 과도안정도 판정속도 향상을 위한 새로운 발전기 그룹핑 방법", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, A권, pp. 150-152, 1999, 11.

저 자 소 개



이 종 석 (李 鍾 碩)
 1969년 5월 29일 생. 1995년 고려대 공대 전기 공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기·전자·전파공학부 석사과정졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 전기·전자·전파공학부 박사과정.
 Tel : 02-3290-3675
 E-mail : windwing@elec.korea.ac.kr



추 진 부 (秋 鎭 夫)
 1950년 1월 7일 생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기 공학과 졸업(공박). 현재 한전 전력연구원 전력계통 안정화 그룹 수석 연구원



양 정 대 (梁 正 大)
 1973년 6월 6일 생. 1999년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기·전자·전파공학부 석사과정.
 Tel : 02-3290-3675
 E-mail : blueimp@elec.korea.ac.kr



이 경 극 (李 慶 極)
 1990년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 현재 한국전력연구원 근무
 Tel : 042-865-5841
 E-mail : ykk2000@kepeco.co.kr



이 병 준 (李 炳 峻)
 1961년 7월 16일 생. 1987년 고려대 공대 전기 공학과 졸업. 1991년 미국 Iowa State Univ. 전기 공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 졸업(공박). 1994년~1995년 Iowa State Univ. Post Doc. 1995년~1996년 일본 미쯔비시 전기 근무. 현재 고려대학교 전기·전자·전파공학부 부교수.
 Tel : 02-3290-3242, Fax : 02-921-1325/0544
 E-mail : leeb@elec.korea.ac.kr



윤 상 현 (尹 相 鉉)
 1951년 1월 10일 생. 1980년 한양대 전기 공학과 졸업. 1971년~1983년 한국전력공사 전원계획부장대리. 현재 (주)프로컴시스템 대표이사
 Tel : 02-3447-7007, Fax : 02-3446-0115



권 세 혁 (權 世 赫)
 1949년 5월 14일 생. 1974년 서울대 공대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1976년 서울대 교육대학원 공업교육과 졸업(석사). 1980년 미국 Iowa State Univ. 졸업(석사). 1984년 미국 Iowa State Univ. 졸업(공박). 현재 고려대학교 전기·전자·전파공학부 교수.
 Tel : 02-3290-3220, Fax : 02-921-1325/0544
 E-mail : shkwon@elec.korea.ac.kr



박 병 철 (朴 丙 哲)
 1973년 6월 15일 생. 1996년 건국대 전기 공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)프로컴시스템 부설 전력기술연구소 주임연구원
 Tel : 02-3447-7007, Fax : 02-3446-0115
 E-mail : bcpark@procom.co.kr



남 해 곤 (南 海 鯤)
 1950년 10월 16일 생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사). 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(공박). 1975년~1978년 한국 원자력 건설부 근무. 1986년~1988년 한국 전기연구소 근무. 현재 전남대 공대 전기공학과 교수
 Tel : 062-530-1745, Fax : 062-530-1749
 E-mail : hknam@chonnam.chonnam.ac.kr