

# 과도안전도 평가를 위한 개선된 상정고장 선택 및 여과 알고리즘 개발

論 文

54A-6-6

## Development of Enhanced Contingency Screening and Selection Algorithm for On-line Transient Security Assessment

南海鯤<sup>\*</sup> · 金容鶴<sup>\*</sup> · 宋成根<sup>\*\*</sup>

(Hae-Kon Nam · Yong-Hak Kim · Sung-Geun Song)

**Abstract** - In this paper, a new approach that is based on EEAC & only with network solutions for CS&S in the transient stability assessment is developed. The proposed CS&S algorithm in conjunction with EEAC to include the capability of performing on-line TSA without TDS is used to calculate the critical clearing time for stability index. In this algorithm, all generators are represented by classical models and all loads are represented by constant impedance load models. The accelerating & synchronizing power coefficient as an index is determined at its disturbance through solving network equation directly. As mentioned above, a new index for generator is generally used to determine the critical generators group. The generator rotor angle is fixed for non-critical generators group, but has equal angle increments for critical generators group. Finally, the critical clearing time is calculated from the power-angle relationship of equivalent OMIB system. The proposed CS&S algorithm currently being implemented is applied to the KEPCO system. The CS&S result was remarkably similar to TSAT program and SIME. Therefore, it was found to be suitable for a fast & highly efficient CS&S algorithm in TSA. The time of CS&S for the 139 contingencies using proposed CS&S algorithm takes less than 3 seconds on Pentium 4, 3GHz Desktop.

**Key Words** : Transient Stability Assessment, Extended Equal Area Criterion, Single Machine Equivalent, Contingency Selection & Screening, One Machine Infinite Bus, Time Domain Simulation

### 1. 서 론

일반적으로 동적안전도 평가 (Dynamic Security Assessment, DSA)에서는 심각한 상정고장에 대하여 전력계통이 안정하게 유지될 수 있는지 여부와, 만약 계통이 안정하게 유지될 수 없는 경우에 전력계통이 붕괴되는 것을 방지하기 위하여 어떠한 조치가 취해져야 하는지를 결정한다[1-3]. 전력계통의 안전이 위협받는 상황 하에서 안정도를 향상시키기 위한 조치를 결정하는 것은 조치시간, 비용, 위협의 정도 등을 고려하는 복잡한 함수로 주어진다. 따라서 DSA는 많은 계산 시간과 노력을 필요로 하며, 일반적으로 오프라인에서 계통 계획 및 운용계획을 수립하는 경우에 주로 수행되었다. 그러나 현대의 전력산업은 전력부하가 지속적으로 증가하고 전력조류의 패턴이 변경됨에도 불구하고, 이를 뒷받침할 수 있는 송전선로는 환경과 재정상의 이유로 인하여 전력부하의 증가속도에 부합한 신규건설이 어려운 실정이다. 즉, 발전 전력 대비 송전용량은 지속적으로 감소하고 이에 따라 안정도 마진 역시 감소됨에 따라 전력계통은 점차적으로 안정도

한계에 근접되어 운영될 것으로 전망된다. 특히, 안정도가 취약한 전력계통에서 대정전 사고를 미연에 방지하기 위해서는 수시로 DSA를 수행하고 안정도 제약을 급전에 반영하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 DSA 중에서 과도안전도 평가 (Transient Security Assessment, TSA)를 온라인으로 수행하는데 필수적인 고속의 상정고장 선택 및 여과 (Contingency Selection and Screening, CS&S)에 관한 연구결과를 기술한다. TSA를 위해서는 시간영역 모의 (Time Domain Simulation, TDS)가 신뢰도가 높고 보편적인 방법으로 알려져 있다. TDS는 모든 전력계통의 모델에 대해서도 유연하게 적용될 수 있고, 또한 계통외란 이후의 시간에 따른 변화 추이를 자세히 파악할 수 있다는 장점을 갖는 반면에, 단순히 과도 안전도에 대한 안정 또는 불안정 여부만을 제시하며, 만약 계통이 불안정할 경우에 대해서는 불안정 원인 또는 마진을 제시하지 못하는 단점을 갖고 있다. TSA에서는 미리 결정된 많은 수의 상정고장 목록에 대하여 TDS를 수행하고, TDS에서 얻을 수 없는 안정도 마진과 복구조치 (remedial action)에 필요한 감도를 직접법 (direct method)을 사용하여 계산하려는 시도가 1960년대 초반부터 연구 되었다.

최근 개발된 1기 등가법 (Single Machine Equivalent, SIME)은 OMIB (One Machine Infinite Bus)로 축약된 계통에 대해 등면적 기준법 (EAC)을 적용하여 안정도 마진을 계산하는 방법이다[4-8]. 그러나 계통이 안정한 경우에는 안정/불안정 여부를 판별하기 위해서는 장시간의

\* 교신저자, 正 會 員 : 全南大學校 電氣工學科 正教授  
E-mail : hknam@chonnam.ac.kr

\* 正 會 員 : 韓國電力公司 電力研究員, 先任研究員

\*\* 正 會 員 : 全南大學校 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2005年 3月 26日

最終完了 : 2005年 5月 2日

TDS가 불가피하고, 임계고장제거시간 (Critical Clearing Time, CCT)을 계산하기 위해서는 고장제거시간 (clearing time, CT)을 바꾸면서 TDS를 수회 반복적으로 수행해야 한다. 따라서 여과되지 않은 많은 상정고장에 대하여 SIME법으로 TSA를 수행하기 위해서는 과도한 TDS 시간이 필요하게 되어 온라인 적용에 한계가 있다. SIME법의 온라인 적용을 위해서는, 1) 사전에 오프라인으로 계통을 검토하여 중요한 고장만을 선택하고, 이들 고장만을 온라인 TSA에서 검토하여야 할 상정고장의 목록으로 제공하여 상정고장의 수를 줄이거나, 2) SIME법에 상정고장 선택 및 여과 (CS&S) 기능을 내장함으로써 중요하지 않은 고장을 온라인으로 여과하는 방법을 생각할 수 있다. 첫 번째 방법의 경우에는 기존의 SIME법에 비해 상대적으로 TDS를 수행하는 경우의 수를 저감하여 TSA에 소요되는 시간을 줄일 수 있지만, 범용화를 위해서는 CS&S 기능을 온라인 TSA에 내장하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 두 번째 방법에서는 CS&S에 TDS를 사용하고 여기에 소요되는 CPU 시간을 줄이기 위해서 TDS를 조기에 종결하는 (early termination) 기능을 추가하거나 동기기의 고전모델 (classical model)과 같은 간략한 모델을 사용한다. 그러나 이들 역시 근본적으로 TDS를 수행하여야 하므로 상당한 계산시간이 필요하다. 이와 같은 이유로 TSA에서는 TDS에 필요한 컴퓨터 CPU 시간을 경감할 수 있는 알고리즘의 구현이 온라인 TSA의 핵심 기술 중의 하나이고, 계산시간이 온라인 TSA의 중요한 성능지표가 될 수 있다.

TSA에 소요되는 계산시간의 대부분이 TDS에 소요되므로 TDS를 사용하지 않고 주요 상정고장을 여과할 수 있다면 TSA에 필요한 시간을 대폭 절감할 수 있다. 각각의 발전기가 발산 (불안정) 하기 위해서는 각 발전기의 가속면적이 감속면적 보다 커야 한다. 즉, 가속면적이 큰 경우는 가속력이 크거나 고장제거시간이 느린 경우로써, 고장제거시간은 모든 발전기에 공통적으로 작용하므로 가속력은 가속면적을 결정한다. 반면에, 동기화력계수가 크면 감속면적도 커지므로, 가속력과 동기화력계수의 비는 발전기의 발산 (동기탈조) 여부를 결정하는 지표로 사용할 수 있다. 문헌 [9]는 이 지표를 사용하여 위험발전기를 결정하고 (critical cluster) TDS를 사용하지 않고 근사 CCT를 결정하는 방법으로 CS&S를 수행하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 TDS를 수행하지 않고 대수적인 계산만으로 근사 임계고장제거시간을 계산하므로 상정고장을 매우 빠르게 여과하는 장점이 있다. 그러나 발전기의 동기화력 마진이 크지 않은 상태에서 고장에 따른 전로개방으로 인하여 동기화력계수는 크게 감소되지 않으나 감속면적이 크게 감소하면, 이 방법은 위험발전기가 정확하지 않기 때문에 CCT 계산에 큰 오차를 유발하는 단점이 있었다. 본 논문에서는 이 방법의 단점을 보완하기 위하여, 송전선로의 개방으로 인한 동기화력의 감소가 일정량 이상 발생하는 발전기에 대해서는 TDS를 사용하지 않고 감속면적과 가속면적의 차이를 계산하여 그 값을 지표로 사용함으로써, 위험발전기 그룹을 결정하고 SIME법을 모사하여 CCT를 계산하는 방법으로 상정고장을 빠르게 여과하는 방법을 제안하였다. 발전기 모델로는 고전모델, 부하모델로는 일정 임피던스 모델을 사용하였다. 또한, PSS/E의 IPLAN을 사용하여 기본적 기능

만을 구비한 SIME법도 함께 개발함으로써, 제안된 CS&S 알고리즘의 신뢰성을 2003년 우리나라 계통의 최대 및 최소 부하조건에 적용하여 검증하였다. 사례연구 계통에서 139개의 상정고장에 대하여 펜티엄4, 3GHz PC로 CCT를 계산한 결과, 제안된 CS&S 알고리즘으로 약 3.4초, 그리고 고전모델을 사용한 SIME법으로 14분이 소요되었다.

## 2. SIME법

SIME법은 1990년대 중반에 개발된 과도안정도 평가방법으로 반복적인 TDS를 통해서 과도안정도 지표인 CCT를 계산한다. 이와 같은 SIME법은 확장등면적기준(EEAC)에 이론적인 근간을 두고 있으며, TDS와 등면적 기준 (EAC)을 결합시킴으로써 전력계통의 상세모델을 적용하는 것이 가능하기 때문에 정확성과 신뢰성을 향상시킬 수 있고, 또한 안정도 마진의 계산이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 특히, 본 논문에서 제안된 TSA를 위한 고속의 상정고장 선택 및 여과 (CS&S) 알고리즘은 EEAC법에 기초하고 있다. 또한 제안된 CS&S 알고리즘의 신뢰성을 검증하기 위해 PSS/E의 IPLAN을 사용하여 SIME법을 구현하고 CCT를 계산함으로써 CS&S에 대한 기준값을 제시하고 있다. 논문의 원활한 기술을 위하여 먼저 SIME법을 간략히 기술한다 [4-8].

### 2.1 등면적기준법 (EAC)의 재고찰

그림 1은 OMIB 계통의 등면적기준 (EAC)을 보여주고 있다[10]. 고장이 발생하기 이전의 정상상태에서 발전기는 점 A를 통과하는 전력-위상각 (P- $\delta$ ) 곡선을 따라 움직인다. 발전기의 기계적 입력  $P_m$ 은 전기적 출력  $P_e$ 와 같고, 이때의 발전기 위상각은  $\delta_0$ 이다. 등면적 기준법에 의하면, 빗금 친 면적 ABCD는 가속면적, DEF는 감속면적이며, 만약 감속면적이 가속면적보다 크면 발전기는 호 EF상의 한 점에서 회귀하여 점 E를 통과하는 P- $\delta$  곡선을 따라 진동하지만, 만약 감속면적이 가속면적보다 작으면 발전기는 회귀하지 못하고 발전기 위상각은 계속 증가하여 발산 (동기탈조) 하게 된다. 특히, 가속면적과 감속면적이 같으면 임계상태로 안정/불안정을 결정할 수 없게 되며, 임계상태에 이르는 고장제거시간을 임계고장제거시간 (CCT)이라 한다.

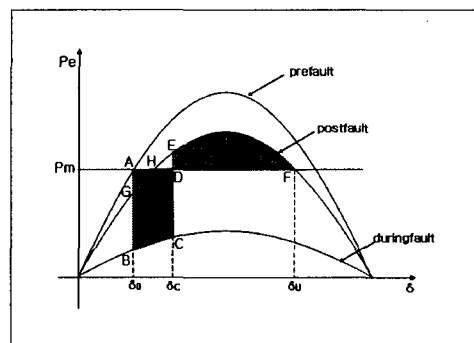


그림 1 일기 무한모선 계통의 등면적기준법 (EAC)

Fig. 1 EAC of single machine infinite bus  
2.2 위험발전기그룹 결정 및 OMIB 계통 구성

SIME법에서는 다기계통을 등가의 OMIB 계통으로 축약하기 위해서 계통내의 모든 발전기를 발산 (불안정) 하는 발전기 그룹과 안정한 발전기 그룹의 2개 coherent 그룹으로 분류한다 (critical clustering). 이를 위하여 SIME법에서는 고장제거시간을 CCT에 비해 크게 인가하고 TDS를 수행하여, 발전기의 위상각 차이 기준 (gap criterion)을 적용함으로써 위험발전기 그룹 (critical generator group, CGG)을 결정하고 있다. 즉, 계통을 불안정하게 할 수 있는 가혹한 고장을 인가하면서 TDS를 수행하여 다기계통의 발전기를 발산하는 그룹 R과 안정한 그룹 B로 분류한다. 분류된 2개의 coherent 발전기 그룹은 관성중심 가중평균을 이용하여 각각 1기의 등가발전기로 축약된다. 이 단계에서 계통은 서로 coherent 하지 않는 2기의 발전기로 축약된 상태이며, 다시 1기 무한모선 (OMIB) 계통으로 축약되는데 그 과정은 다음과 같다.

(1) CGG가 결정되면 OMIB로 축약된 등가계통의 관성정수  $M$ 을 관성중심 원리를 이용하여 아래 식으로 계산된다.

$$M_R = \sum_{k \in R} M_k \tag{1}$$

$$M_B = \sum_{k \in B} M_k \tag{2}$$

$$M = \frac{M_B M_R}{(M_B + M_R)} \tag{3}$$

(2) 등가의 관성정수가 결정되면, OMIB로 축약된 등가계통에 대한 발전기의 기계적 입력, 전기적 출력, 그리고 발전기 위상각의 시간계적은 아래 식으로 계산된다.

$$P_m = M (M_R^{-1} \sum_{k \in R} P_{mk} - M_B^{-1} \sum_{j \in B} P_{mj}) \tag{4}$$

$$P_e = M (M_R^{-1} \sum_{k \in R} P_{ek} - M_B^{-1} \sum_{j \in B} P_{ej}) \tag{5}$$

$$\delta \approx \delta_R - \delta_B = M_R^{-1} \sum_{k \in R} M_k \delta_k - M_B^{-1} \sum_{j \in B} M_j \delta_j \tag{6}$$

여기서  $P_m$ 은 발전기 기계적 입력,  $P_e$ 은 발전기 전기적 출력,  $\delta$ 은 등가발전기 위상각이다.

### 3. 새로운 고속 상정고장 선택 및 여과 알고리즘

#### 3.1 체계적 상정고장 선택

그림 1의 등면적 기준법에 의하면, 감속면적이 가속면적보다 작아 진동을 수반하지 않고 발생하는 일파 불안정 (first swing instability)은 고장에 의해 1) 가속면적이 매우 크거나, 2) 감속면적이 매우 크게 감소하거나, 3) 앞의 두 경우의 중간적 성격으로 가속면적이 크고 동시에 감속면적도 작아지는 경우에 발생한다. 따라서 발산하는 발전기는 선로고장으로 1) 동기화력의 감소가 크지 않으나 고장에 의한 가속력이 매우 커 발산하는 경우, 2) 가속력은 그리 크지 않으나 동기화력의 감소가 매우 커 발산하는 경우, 3) 첫 번째와 두 번째 경우의 중간에 위치하는 경우로서 가속력이 상당한 크기를 갖고 동시에 동기화력의 감소도 상당히 커 발산하는 경우로 요약할 수 있다. 전력계통의 일반적

인 네트워크 토폴로지 하에서는 선로고장이 특정 발전기의 가속력을 크게 하거나 감속력을 크게 감소시키는 선로는 그 발전기에 가까이 위치한다. 즉 발전기의 일파불안정은 지역적 현상이라고 유추하고, 이 원리를 이용하여 아래의 과정을 거쳐 초기 상정사고 목록을 작성하는 것이 가능하다.

(1) 과도안정도 검토가 필요한 발전기 승압변압기의 고압모선에 연결된 선로들의 고장에 대하여 3.2절에 기술된 방법으로 CCT를 계산한다.

(2) 단계 1에서 계산된 CCT 값이 설정치보다 작으면 상정고장 목록에 포함시키고 이 선로의 계통측 모선에 연결된 선로에 대해서 단계 1을 반복한다.

(3) 단계 1에서 계산된 CCT 값이 설정치보다 크면 이 선로와 이후의 선로고장은 상정고장 목록에 포함시키지 않는다.

위에서 얻어진 상정고장 목록은 복잡한 대규모 계통에서 상정고장 목록을 작성하는데 기초 자료로 사용하게 활용할 수 있다.

#### 3.2 가속력과 동기화력 계수의 비를 사용한 위험발전기그룹 결정 [9]

이 방법은 문헌 [9]에서 TDS를 사용하지 않고 상정고장을 여과하는데 사용한 방법이다. 이 절에서 기술한 다른 방법과 함께 상정고장 여과 알고리즘을 구성하므로 간략히 기술한다. 그림 1에서 감속면적은 동기화력에 의해 간접적으로 측정하는 것이 가능하다. 동기화력 계수는 발전기 위상각의 증가에 대한 발전기 출력 증가량의 비로 정의 된다. 즉, 그림 1의 점 G에서 동기화력 계수는 P- $\delta$  곡선의 점 G에서 접선의 기울기이다. 리액턴스  $X$ 를 통하여 무한모선에 연결되는 OMIB 계통에 대한 발전기 출력과 토크각의 관계를 나타내는 아래 식 (7)으로 주어진다.

$$P_e = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \tag{7}$$

식 (7)에서  $V_1$ 과  $V_2$ 는 각각 송전단과 수신단의 전압이고  $\delta$ 는 양단의 위상각 차이를 나타낸다. 양단의 전압  $V_1$ 과  $V_2$ 는 거의 일정한 값을 가지므로 최대 동기화력 ( $P_{\max}$ )는 리액턴스 ( $X$ )에 반비례 한다. 발전기가 위상각 ( $\delta_0$ )에서 운전될 때, 동기화력 계수 (Synchronizing Power Coefficient, SPC)는 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$SPC = \left. \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \right|_{\delta = \delta_0} = \frac{V_1 V_2}{X} \cos \delta_0 = P_{\max} \cos \delta_0 \tag{8}$$

즉, 동기화력 계수는 발전기가 계통에 강하게 연결된 정도 ( $P_{\max}$ )와 발전기가 최대 동기화력에 대비하여 얼마나 고출력에서 운전되는 정도 ( $\cos \delta_0$ )의 곱을 나타내므로 동기화력 계수는 감속력을 간접적으로 나타내는 좋은 지표가 될 수 있다.

그림 1의 계통에서 만약 동기화계수로 감속면적을 비교적 정확하게 측정하는 것이 가능하다면, 위험발전기 그룹

결정은 식 (9)와 같이 가속력과 동기화계수의 비를 사용한 안정도지표 (stability index)  $SI_S$ 를 사용하여 가능하다. 여기서  $SPC_G$ 는 전력-위상각 곡선의 점 G에서의 동기화력 계수를 나타낸다.

$$SI_S = \frac{P_{eA} - P_{eB}}{SPC_G} = \frac{AB}{SPC_G} \quad (9)$$

사례연구 계통으로 사용한 2003년 우리나라 계통에서 대부분의 경우  $SI_S$ 를 사용하여 위험발전기 그룹을 결정하는 것이 가능하였다. 그러나 영광원전과 같은 몇 개의 발전기 그룹에서는 인접선로의 개방으로 인한 동기화력계수의 감소가 상당히 크고, 동기화력의 감소보다 감속면적의 감소 비율이 월등히 큰 경우에는, 이 방법은 위험발전기 그룹 결정하는데 오류를 유발함에 따라 계산된 CCT가 부정확하였다. 그러므로 동기화력의 감소비율이 일정 값을 상회하면 다음 방법으로 위험발전기 그룹을 결정한다.

### 3.3 감속면적과 가속력의 비를 사용한 위험발전기 그룹 결정

만약, 발전기의 출력을 2개의 루트를 통하여 인출하고 이들 루트가 중부하로 운전 중에, 고장으로 인하여 1개 루트를 개방되는 경우, 발전기는 중요 인출경로를 상실함에 따라 동기화력이 크게 감소된다. 최대 동기화력이 발전기의 기계적 입력보다 월등하게 크지 않은 경우, 고장에 의해 최대 동기화력이 크게 감소하면, 그림 1과 같이 감속면적의 감소는 동기화력의 감소보다 정도가 훨씬 더 심각하다. 따라서 이러한 경우는 고장에 의해서 비록 가속력이 작을지라도 감속면적의 감소가 매우 크기 때문에, 이들 발전기가 발전 (불안정)할 수 있다. 그러나 이러한 발전기를 3.2절에서 기술한 방법으로 위험발전기 그룹을 결정하면 가속력의 크기가 작기 때문에, 식 (9)에서 정의한 안정도 지표  $SI_S$  값이 상대적으로 작은 값으로 계산되므로 위험발전기 그룹에서 제외된다.

따라서 본 논문에서는 이를 보완하기 위하여 송전선로의 개방으로 인한 동기화력의 감소가 일정값 이상 발생하는 발전기에 대해서는 감속면적과 가속면적의 차이를 사용함으로써 위험발전기 그룹을 결정하는 방법을 제안하였다. 즉, 그림 1에서 감속면적  $\overline{HEFDH}$ 과 가속면적  $\overline{AHGA}$ 의 차이 값은 고장이 발생하는 동시에 송전선로를 개방하는 경우의 안정도 마진을 의미한다. 즉, 실제계통에서는 고장제거가 일정시간이 경과된 후에 이루어지나, 일반적으로  $(\delta_c - \delta_0)$ 는  $(\delta_u - \delta_0)$ 에 비하여 상대적으로 작으므로 고장이 지속되는 동안에 발전기의 출력이 일정하다고 가정하여도 큰 오차를 유발하지 않는다. 이러한 가정 하에서 가속면적은  $AB \times (\delta_c - \delta_0)$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 각 발전기의 안정도 마진을 가속력  $AB$ 로 나눈 값을 위험발전기 그룹을 결정하기 위한 안정도 지표 (stability index)  $SI_A$ 로 아래 식 (10)과 같이 정의하는 것이 가능하다.

$$SI_A = \frac{\overline{HEFDH} - \overline{AHGA}}{AB} \quad (10)$$

안정도 지표  $SI_A$ 를 사용하여 위험발전기 그룹을 결정하는 과정은 아래와 같다.

(1) 조류계산으로부터 계통전압, 발전기 출력, 발전기 위상각 등을 결정한다.

(2) 발전기 위상각을 고정한 상태에서 상정고장에 대해 네트워크 방정식의 해를 구함으로써 모든 발전기의 가속력과 고장선로를 개방한 상태에서 발전기의 출력을 결정한다.

(3) 동기화력의 감소량을 발전기의 기계적 입력으로 나눈 값  $AG/P_m$ 이 모두 일정값 미만이면 3.2절에서 기술한 방법으로 CCT를 계산한다. 그러나  $AG/P_m$ 값이 일정값 이상인 발전기가 하나 이상 존재하는 경우, 식 (10)으로 정의한  $AB/P_m$  값이 일정값 이상인 발전기와  $AG/P_m$  값이 일정값 이상인 발전기를 CGG로 분류한다.

(4) CGG에 속하지 않는 발전기의 위상각을 초기 값으로 고정한 상태에서, CGG에 속한 발전기의 위상각을 일정량만큼 3회 증가시키면서 발전기의 출력을 결정한다.

(5) 단계 (4)로부터 결정된 총 4개의 데이터를 사용하여 최소자승법 (least square error)으로 CGG 그룹에 속한 각 발전기의 P- $\delta$  곡선을 적합하고, 그리고 식 (10)으로 정의된 안정도 지표  $SI_A$ 를 계산한다.

(6) 단계 (5)에서 계산된 CGG 그룹에 속한 발전기의  $SI_A$ 값을 오름차순으로 정리하고,  $SI_A$ 값이 2보다 작은 발전기를 새로운 CGG로 결정한다.

(7) 만약, 새로 결정한 CGG 발전기와 단계 (4)에서의 CGG 발전기가 서로 일치하면 위험발전기 그룹을 결정하는 작업을 종료하고, 단계 다음절의 방법으로 CCT를 계산한다. 그러나 일치하지 않으면 단계 (4)로 진행하여 새로 결정한 CGG에 속한 발전기를 대상으로 위험발전기 그룹을 결정하는 작업을 반복한다.

### 3.4 과도안정도 지표로서의 CCT 계산

안정도 지표를 사용하여 CGG를 결정하는 과정에서 고장선로를 개방한 상태로 아래의 두 조건에 대한 발전기의 출력과 위상각을 계산한다.

(1) 초기의 발전기 위상각 상태

(2) CGG에 속한 발전기의 위상각만을 일정량만큼 증가시킨 상태

두 번째 상태로부터 CGG에 속한 발전기의 위상각을 다시 균일하게 2회에 걸쳐 일정량씩 증가시키면서 발전기의 출력을 결정하면, 총 4개의 조건 하에서 발전기의 출력과 위상각을 얻을 수 있다. 일파 안정도 (first swing stability) 문제에서 동기탈조에 이르는 시간은 1초 내외로 일반적인 터빈의 시정수에 비하여 매우 작으므로, 발전기의 기계적 입력  $P_m$ 은 모든 조건에서 일정하다고 가정하여도 큰 오차를 유발하지 않는다. 따라서 기계적 입력은 초기조건에서 계산한 값을 나머지 3개의 조건에 사용하여도 무방하다. 본 논문에서는 위험발전기 그룹을 결정하고 P- $\delta$  곡선을 작성하기 위하여, 안정한 그룹의 발전기의 위상각을 고정

한 상태에서 발산하는 그룹의 발전기의 위상각만을 균일하게 증가시켰다. 그러나 실제계통에서는 발전기 출력은 발전기 간의 상호작용에 의해 결정되므로 엄밀하게 말하면, 이러한 가정은 성립되지 않으나, 본 논문의 목적이 상세모델을 사용한 정확한 안정도 마진의 계산이 아니라 중요한 고장만을 고속으로 여과하는 것이기 때문에, 이러한 목적에는 적절하다고 할 수 있다. 즉, 발산하는 발전기의 위상각만이 일정하게 증가하고, 안정한 그룹의 발전기 위상각은 일정하게 유지된다고 가정할지라도 P-δ 곡선을 작성하는 경우에는 큰 차이가 없다. 아울러, 모든 발전기를 고전모델로 표현하고, 부하를 일정 임피던스 (constant impedance) 부하모델로 나타내는 경우, OMIB 계통으로 축약한 계통의 P-δ 곡선은 정현파로 나타내진다[6]. 즉,

$$P_e(\delta) = P_c + P_{\max} \sin(\delta - \nu) = P_c + K_1 \sin \delta + K_2 \cos \delta \quad (11)$$

본 논문에서는 CS&S에 발전기 고전모델과 일정 임피던스 부하모델을 사용하므로, OMIB 계통의 P-δ 곡선은 정확하게 정현파로 나타내진다. 이와 같이 작성된 P-δ 곡선으로부터 CCT는 가속면적과 감속면적이 동일하다는 조건을 사용하여 계산하며, 문제를 보다 간략화 하기 위하여 다음과 같이 추가적인 가정을 도입한다. 즉,

(1) 고장이 지속되는 동안에 발전기의 전기적 출력은 일정하다.

(2) 감속면적을 계산하기 위한 P-δ 곡선은 고장이 발생한 시점의 조건에서 시작하여 CGG에 속한 발전기의 위상각을 균일하게 증가시켜 얻은 것을 사용한다.

임계고장제거시간 (CCT)은 그림 1에서 가속면적과 감속면적이 동일한 OMIB 계통의 임계위상각  $\delta_c$ 를 결정하고, 동요방정식의 해로부터 CCT를 계산하는 순서로 결정한다. 즉, 가속면적  $A_{acc}$ 과 감속면적  $A_{dec}$ 은 각각 식 (12)와 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$A_{acc} = (P_m - P_{ep}) (\delta_c - \delta_0) \quad (12)$$

$$A_{dec} = \int_{\delta_c}^{\delta_u} (P_c + K_1 \sin \delta + K_2 \cos \delta - P_m) d\delta = (P_c - P_m) (\delta_u - \delta_c) - K_1 (\sin \delta_u - \sin \delta_c) + K_2 (\cos \delta_u - \cos \delta_c) \quad (13)$$

가속면적과 감속면적이 동일하기 위한 방정식은,

$$f(\delta_c) = (P_m - P_{ep}) (\delta_c - \delta_0) - (P_c - P_m) (\delta_u - \delta_c) + K_1 (\sin \delta_u - \sin \delta_c) - K_2 (\cos \delta_u - \cos \delta_c) = 0 \quad (14)$$

식 (14)은 변수  $\delta_c$ 에 대한 비선형 방정식이므로 Newton 법을 사용하여 해를 계산한다. 임계위상각  $\delta_c$ 가 계산되면, 임계고장제거시간  $t_c$  (CCT)는 동요방정식을 적분한 식 (15)에 의해서 결정한다. 여기서, H는 발전기의 관성정수이다.

$$\delta_c = \delta_0 + \frac{\omega_s (P_m - P_{ep})}{4H} t_c^2 \quad (15)$$

#### 4. 사례연구

##### 4.1 사례연구 개요

본 논문에서는 제안된 TSA를 위한 CS&S 알고리즘의 신뢰성을 검증하기 위하여, 계통의 운전조건이 반영되지 않은 223기 947모선 계통에 대해 아래와 같이 사례연구를 수행하였다. 여기서, 상중고장은 송전선로의 송/수전단측 모선에 3상 단락고장을 인가하고 송전선로의 개방으로 고장을 제거하는 경우를 상정하였다. 사례연구 과정을 요약하면 다음과 같다.

- (1) CS&S 알고리즘의 신뢰도를 검증하기 위한 CCT의 기준값으로 PSS/E의 IPLAN 환경 하에서 개발된 SIME법의 결과를 사용한다. 이를 위해서는 본 연구에서 개발한 SIME법의 검증이 필요한데, 이를 위해 SIME법으로 얻은 CCT값과 상용 프로그램인 Powertech Labs Inc.,의 TSAT을 사용하여 얻은 값을 비교하였다. 만약, SIME 결과와 TSAT 결과가 상당한 차이를 보이는 경우에는 수작업으로 PSS/E를 사용하여 CCT값을 계산하여 SIME법이 TSAT 결과보다 수작업으로 얻은 결과 (참값)에 더 근접함을 보였다. 결론적으로 본 연구에서 개발한 SIME법으로 계산한 CCT값이 기준값으로 사용할 수 있는 정확도를 가졌음을 보였다.
- (2) 제안된 TSA를 위한 CS&S 알고리즘을 사용하여 계산한 CCT값과 SIME법으로 계산한 CCT값을 비교하여 제안된 CS&S 알고리즘이 TSA를 위한 CS&S에 유용하게 적용될 수 있음을 검증하였다.
- (3) 아울러, 온라인 TSA의 중요한 성능지표인 계산시간을 SIME법, TSAT 및 제안된 CS&S 알고리즘에 대해 평가함으로써, 제안된 알고리즘이 매우 빠르고 효율적임을 검증하였다.

#### 4.2 고전/상세모델과 SIME법/TSAT으로 계산된 CCT의 비교

제안된 CS&S 알고리즘에 대한 기준값으로 사용할 SIME법의 정확도를 검증하기 위하여, 139개의 상중고장에 대하여 발전기 고전모델과 상세모델을 사용하여 SIME법과 TSAT으로 CCT 값을 계산하였다. 보통 차단기 차단시간이 6cycle 정도이므로 보통 SIME법에서는 CCT값이 12 cycle 이하의 고장을 상세히 해석한다. 본 논문에서는 25 cycle 미만인 고장을 비교대상으로 하였고, 총 139개의 고장 중에서 41개가 이에 해당된다. 그림 2는 발전기 고전모델을 사용하여 SIME법과 TSAT으로 계산한 CCT값의 편차를 보여주고 있다. 두 값은 대체로 잘 일치하나 15~25 cycle에서 최대 약 7 cycle의 편차를 보인다. SIME법과 TSAT으로 계산된 CCT값의 편차가 3 cycle 이상인 상중고장에 대해서는 PSS/E를 사용하여, 고장제거시간을 1 cycle 간격으로 변경하면서 CCT값을 계산하여 그림 2에 ("CCT(TSAT+PSS/E)"로 표기) 보였다. 그림 2에서 이 값에 SIME법의 결과가 잘 일치하므로 SIME법의 결과가 정확함을 알 수 있다. 그림 3은 발전기 상세모델에 대해서 위 과정을 반복한 것이다. 여기서도 SIME법으로 계산한 CCT값이 수작업으로 계산한 CCT 값과 잘 일치하여 개발

된 SIME법이 CS&S의 검증을 위한 기준값으로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

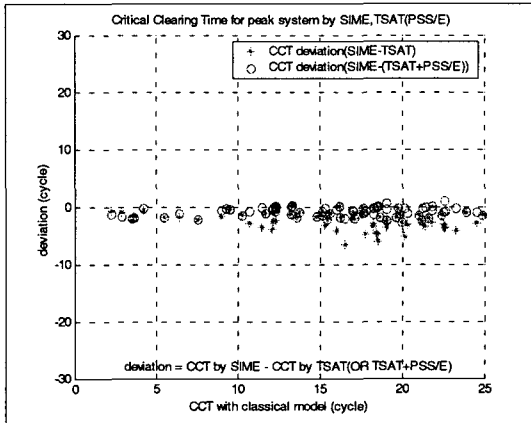


그림 2 고전모델에 대해 SIME법/TSAT으로 계산된 CCT의 편차

Fig. 2 Deviation of CCT values obtained from SIME/TSAT of a classical model

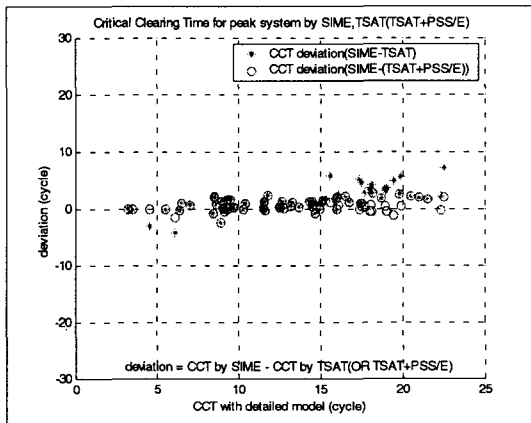


그림 3 상세모델에 대해 SIME법/TSAT으로 계산된 CCT의 편차

Fig. 3 Deviation of CCT values obtained from SIME/TSAT of a detailed model

4.3 SIME법과 제안된 CS&S 알고리즘으로 계산된 CCT의 비교

마지막으로 139개 상정고장에 대해 본 논문에서 제안된 TSA를 위한 CS&S 알고리즘으로 계산한 CCT값과 발전기 고전/상세모델과 SIME법으로 계산한 CCT값을 비교하여 제안된 CS&S 알고리즘을 검증하였다. 그림 4는 CCT값이 25 cycle 미만인 49개의 상정고장에 대하여, 고전모델을 사용한 SIME법의 CCT값과 CS&S 알고리즘으로 계산한 CCT값 사이의 편차를 보여주어 있다. 이 두 값이 최대편차 5 cycle 이내로 잘 일치하고 있어 TDS를 사용하지 않고도 CS&S에 필요한 CCT 값을 계산 할 수 있음을 알 수 있다. 그림 5는 CCT값이 25 cycle 미만인 49개의 상정고장에 대하여, 발전기 상세모델을 사용한 SIME법의 CCT값과 CS&S 알고리즘으로 계산한 CCT값 사이의 편차를 보여주고 있다. 고전모델을 사용한 경우보다는 편차가 크나, 이

두 값의 최대편차 8 cycle 이내로 잘 일치하고 있어 TDS를 사용하지 않고도 CS&S에 필요한 CCT 값을 계산 할 수 있음을 알 수 있다. 이는 CCT 값이 12 cycle 이내의 상정고장을 상세하게 검토하고자 하면 CS&S 알고리즘으로 계산한 CCT 값이 20 cycle이내의 상정고장을 선택하면 된다. 제안된 CS&S 알고리즘으로 계산한 CCT 값이 상세모델과 SIME법을 사용하여 계산한 CCT값보다 고전모델과 SIME법을 사용하여 계산한 CCT 값에 더 가까운 것은 CS&S 알고리즘이 발전기 고전모델을 사용하기 때문에 예측 가능한 결과이다.

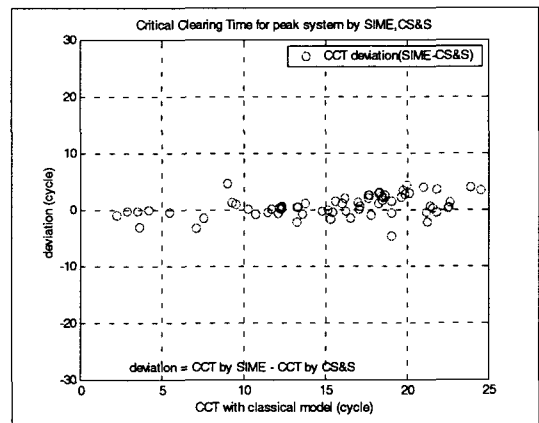


그림 4 고전모델의 SIME법과 제안된 CS&S 알고리즘으로 계산된 CCT의 편차

Fig. 4 Deviation of CCT values obtained from SIME of a classical model and the suggested CS&S algorithm

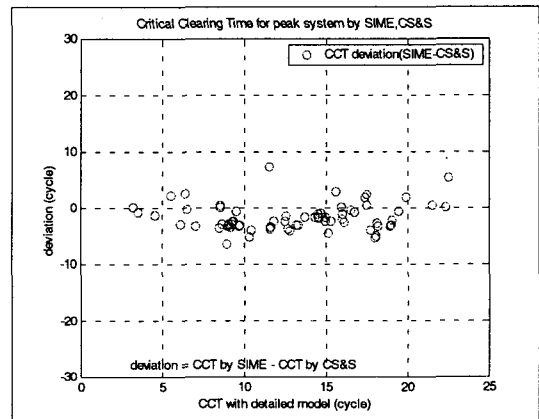


그림 5 상세모델의 SIME법과 제안된 CS&S 알고리즘으로 계산된 CCT의 편차

Fig. 5 Deviation of CCT values obtained from SIME of a detailed model and the suggested CS&S algorithm

표 1은 이 결과 중에서 주요한 것만을 발췌한 것이다. 모선 7155와 7156에 연결된 선로 (좀더 정확하게 기술하면 발전기 G27155, G27156에 인접한 선로)의 경우를 제외하고는 CS&S 알고리즘으로 계산한 CCT 값은 고전모델/상세모델을 사용한 SIME법의 결과와 잘 일치하고 있다. 발전기 G27155~6에 인접한 선로에서 고장이 발생하면 상대적으로 큰 오차가 발생하는데 이유는 다음과 같다. 발전

기 G27155~6은 정상상태에서 두 선로(7101-7156과 6450-7156)를 통하여 전력을 송출하고 있고, 식 (8)에 정의한 발전력 대비 최대동기화력  $P_{max}$ 가 다른 발전기들에 비하여 작다. 즉, 이 두 발전기는 계통에 약하게 연결되어 있다. 두 선로 중의 하나가 개방되는 사고가 발생하면 두 발전기는 두 인출선로 중의 하나를 상실하여 감속면적이 매우 크게 감소한다. 예를 들어 고장이 선로 7100-7155 또는 6450-7155의 모선 B7155 쪽에서 발생하여 이 선로의 2회선 루트가 (7101-7156 또는 6450-7156을 포함) 개방된다고 하자. 이 경우 고장모선에 전기적으로 훨씬 가까운 발전기 G27151~4의 가속력은 매우 크므로 전력 및 위상각 등에서 큰 동요를 수반하는 반면에, G27155~6의 가속력은 이 값에 비하여 작고 동요의 크기도 비교적 작다. 그러나 G27151~4은 감속력이 크므로 안정한 반면에, G27155~6은 감속면적이 매우 크게 감소하여 발산하게 된다. 위 경우에  $SI_S$  지표를 사용하여 위험발전기를 결정하면 G27151~4가 선택되고 G27155~6은 제외된다. 이와 같이 위험발전기 그룹의 결정에서 심각한 오류가 발생하면 CCT 계산은 무의미할 수밖에 없다. 실제로 선로 7100-7155의 모선 7100 (또는 7155)에 고장이 발생하여 1루트 2회선을 개방하는 경우  $SI_S$ 지표를 사용하여 계산된 CCT는 28 (또는 22) cycle인 반면에, 고전모델과 SIME법으로 계산된 CCT는 8.9/3.5 cycle이어서 심각한 오차를 유발하고 있다.

표 1 고전/상세모델에 모델에 대해 SIME법/제안된 CS&S 알고리즘으로 계산된 CCT 값의 비교

Table 1 Comparison of CCT values obtained from SIME of a classical/detailed model and the suggested CS&S algorithm

CCT			SIME (Detailed model)		SIME (Classical model)		CS&S Algorithm	
			Fault location		Fault location		Fault location	
From	To	CKT	From	To	From	To	From	To
4010	6030	1,2	11.807	8.957	16.184	12.254	14.103	12.244
5150	5155	1,2	9.242	9.326	12.319	12.243	11.771	11.745
6100	6900	1,2	9.174	11.575	12.278	15.139	12.073	15.305
6450	7155	1	6.500	3.169	3.593	2.847	6.705	3.075*
	7156	2		불안정	불안정	불안정		불안정
6450	7156	2	6.500	5.500	3.593	2.230	6.705	3.260
	7155	1		불안정	불안정	불안정		불안정
7100	7155	1	11.500	3.500	8.942	4.187	4.300*	4.322
7101	7156	2		불안정		불안정		불안정
7101	7156	2	7.005	6.339	7.070	3.500	10.238	3.750*
7100	7155	1				불안정		불안정
7150	7600	1,2	4.500	6.076	5.471	7.500	5.839	9.000
10300	10400	2	11.610	8.916	17.662	15.127	15.063	15.259
	10401	1						
10300	10401	1	11.610	8.916	17.622	15.127	15.063	15.259
	10400	2						

본 논문에서는 이러한 상정고장에 대해서는 안정도 지표인  $SI_A$ 를 사용하여 위험발전기 그룹을 분류하고 CCT를 계산한다. 이 알고리즘에서는 위험 발전기 그룹은 정확하게 결정되고, CCT 값도  $SI_S$  지표를 사용하는 경우에 비하여 크게 개선되었다. 앞에서 기술한 상정고장에 대하여  $SI_A$ 지

표를 사용하여 계산한 CCT 값은 4.3/3.8 cycle로서 고전모델과 SIME법으로 계산된 CCT는 8.9/3.5 cycle에 근접하고 상정고장 여과에는 충분한 정확도이다. 하지만,  $SI_A$  지표를 사용하더라도 다른 경우에 비하여 CCT 값의 편차가 상대적으로 크게 발생하고 있는데, 이는 TDS를 사용하지 않기 때문에 비록 발산하지 않더라도 큰 동요를 보이는 발전기와 상호작용을 고려하지 않는 제안된 CS&S 알고리즘의 근본적인 한계에 기인한다. 다시 말하면, 앞에서 기술한 상정고장에서 고장 초기에는 안정한 G27151~4가 더 크게 동요하고 발산하는 G27155~6은 상대적으로 작게 동요하는데, 제안된 CS&S 알고리즘은 G27151~4의 위상각은 일정하게 유지되고 G27155~6의 위상각은 균일하게 증가한다고 가정하기 때문이다.

안정도 지표  $SI_A$ 는  $SI_S$ 보다 위험발전기 그룹 결정에 좀더 정확한 결과를 제공하지만 단면적 계산을 위한 계산시간이 증가한다. 따라서  $SI_A$ 는  $SI_S$ 로 만족스러운 결과를 얻을 수 없는 동기화력의 감소가 매우 큰 상정고장에 한정하여 적용하였다. 결론적으로 고장선로의 개방으로 감속면적의 크기가 매우 크게 감소되는 경우에 감속면적과 가속력의 비로 정의되는 안정도 지표  $SI_A$ 를 사용하고, 기타의 경우는 동기화력계수와 가속력의 비로 정의되는 안정도 지표  $SI_S$ 를 사용하여 위험발전기 그룹을 결정한다. 또한, 위험발전기 그룹의 토크각은 균일하게 증가하고 다른 발전기의 토크각은 일정하게 유지된다는 가정 하에서 등면적 기준법을 사용하여 CCT를 계산하면 이 CCT 값은 상정고장을 여과하는데 사용될 수 있다. 사례연구 계통에서 대부분 상정고장 대하여 발전기 상세모델과 SIME법으로 계산한 CCT 값이 고전모델을 사용한 경우에 비하여 오히려 감소하는 것으로 검토되었다. 이러한 결과는 일반적으로 상세모델의 발전기와 여자시스템의 제어를 포함하는 경우, 계통의 외란에 대하여 과도안정도 측면에서 상당한 개선효과가 있는 것으로 알려져 있는 것과 상반된다. 이 결과가 여자기 정수가 최적으로 설계되지 않아서인지 아니면 고전모델이 실제 발전기보다 외란에 강인하게 작용하는 특성이 있는지, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

4.4 TSA의 CS&S를 위한 계산시간 비교

사례연구 계통에서 139개의 상정고장에 대해 펜티엄4, 3GHz PC로 TSA를 위한 CS&S를 수행하는 경우, CS&S에 소요되는 계산시간은 표 2와 같다. 여기서, SIME법은 PSS/E를 사용하므로 기본적으로 Modified Euler법과 8.3ms의 타임스텝으로 계산되는 반면에, TSAT은 4차 Runge-Kutta법과 10ms의 타임스텝을 사용하여 계산하고 있다. 단, TSAT에서는 계산시간의 직접적인 측정이 불가능하여, TSAT의 가동에서 정지까지의 간접적인 측정 결과이므로, 정확한 계산시간 보다는 오히려 전체 소요시간이라 할 수 있다. 표 2로부터 고전모델의 발전기를 사용하여 SIME법과 TSAT으로 CS&S를 수행하는 것에 비해, 본 논문에서 제안된 CS&S 알고리즘이 약 3.4초가 소요되어 매우 빠르게 CS&S가 수행됨을 알 수 있다. 따라서 온라인 TSA의 중요한 성능지표인 계산시간을 평가하는 경우, 제안된 TSA를

위한 CS&S 알고리즘은 기존의 TSA 알고리즘과는 달리 TDS를 수행하지 않으면서, 상세해석이 필요한 상정고장을 신속하게 여과하는 것이 가능하였으며, 또한 계산시간 역시 온라인 적용이 가능할 정도로 빠르기 때문에 매우 효율적인 알고리즘이라고 할 수 있다.

표 2 CS&S를 위한 계산시간 비교  
Table 2 Comparison of calculation time for CS&S

	사례연구 계통		기 타
	고전모델	상세모델	
SIME	14분	34분	펜티엄4, 3GHz PC
TSAT	21분	45분	
CS&S	3.4초	-	

\*SIME: Modified Euler method, 8.333ms  
TSAT: Forth-order Runge-Kutta method, 10ms

5. 결 론

본 논문에서는 온라인 TSA를 위해 TDS를 수행하지 않고, 발전기 고전모델과 일정 임피던스 부하모델을 사용하여 SIME법을 모사하는 방법으로 임계고장제거시간 (CCT)을 계산함으로써, 상정고장을 선택하고 빠르게 여과하는 알고리즘을 개발하였다. 제안된 TSA를 위한 CS&S 알고리즘에서 TDS를 사용하지 않고 위험발전기 그룹을 결정하는 것은 본 논문의 가장 핵심적인 부분으로, 1) 가속력과 동기화력 계수의 비로 정의되는 안정도 지표와, 2) 감속면적과 가속면적의 차이를 초기 가속력으로 나눈 값을 안정도 지표로 사용하였다. 첫 번째 안정도 지표는 대부분의 고장에 적용되지만, 발산하는 발전기가 고장선로의 개방으로 동기화력이 크게 감소함에 따라 감속면적이 현저하게 감소하는 경우에는 위험발전기 그룹의 결정에서 오류를 유발하였다. 이러한 오류를 보완하기 위해서 고장선로의 개방으로 인하여 특정한 발전기의 동기화력 계수가 크게 감소하는 경우에는 이들 발전기를 발산하는 그룹에 포함시켜 두 번째 안정도 지표를 사용하여 위험발전기 그룹을 결정하였다. 그리고 위험발전기 그룹이 결정되면 그 이후의 과정은 SIME법과 동일하다. 즉, 발산하는 그룹의 발전기 토크각을 일정량씩 균일하게 3회 증가시키면서, 초기값을 포함하여 총 4개의 운전 점에서 모든 발전기의 P-δ 관계를 얻는다. 최종적으로 OMIB 계통에서 4개의 P-δ 데이터는 최소자승법에 의해서 정현파의 P-δ 함수로 적합되고, Newton법을 사용하여 CCT를 계산한다.

사례연구 결과, 139개의 상정고장에 대해 CCT를 계산하는 경우에, 제안된 CS&S 알고리즘으로 약 3.4초, 고전모델과 SIME법으로 약 14분, 상세모델과 SIME법으로 약 34분이 소요되었다. 특히, 고전모델을 상정고장의 여과 목적으로 사용할지라도 상세모델과 SIME법의 결과와 비교하면, 계산시간이 약 50% 정도밖에 감소되지 않는 반면에, 제안된 방법은 약 600분의 1로 단축하여 매우 효율적이었다. 상세모델과 SIME법으로 계산한 CCT를 기준값으로 하고, 이 값이 15 cycle 미만인 모든 상정고장에 대하여 감속면적과 가속면적으로 위험발전기 그룹을 결정하는 1개의 경

우를 제외하면, 제안된 방법으로 계산된 CCT의 최대 편차는 5 cycle 이내이다. 즉, 감속면적과 가속면적을 사용하여 위험발전기 그룹을 결정하는 비교적 큰 편차를 유발하는 1개의 상정고장은 동기화력이 크게 감소하기 때문에 궁극적으로 상세해석을 필요로 한다고 할 수 있다.

본 논문에서 제안된 TSA를 위한 CS&S 알고리즘은 일파 (first swing) 안정도를 평가하도록 개발되었다. 따라서 저주파 동요가 발생하는 전력계통에 대해서는 TSA의 CS&S를 수행하는 경우에 상당한 오차를 유발할 수 있으므로, 이에 대한 보완적인 연구가 좀더 필요하다. 또한, 위험발전기 그룹을 결정하기 위해서 감속면적과 가속면적의 차이를 초기 가속력으로 나눈 값을 안정도 지표로 사용하면, 비록 계산된 CCT가 편차가 감소하지만 상대적으로 여전히 상당한 편차를 보였다. 그러므로 이러한 상정고장에 대해서는 발전기 고전모델과 일정 임피던스 부하모델을 사용하여 TDS를 수행하고 CCT를 계산한다면, 매우 신뢰성이 높은 온라인 TSA를 위한 CS&S 알고리즘이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 2001년도 전남대학교 연구년교수연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] G. K. Morison, H. Hamadanizadeh and L. Wang, "Dynamic Security Assessment Tools", IEEE 1999 PES Summer Meeting, Vol 1, pp281-286, June 18-22, 1999
- [2] C. W. Taylor, "The Future in On-line Security Assessment and Wide Area Stability Control", IEEE 2000 PES Winter Meeting, Vol 1, pp78-83, January 24-27, 2000
- [3] P. Kundur, G. K. Morison, L. Wang, "Techniques for On-line Transient Stability Assessment and Control", IEEE 2000 PES Winter Meeting, Vol 1, pp, 46-51, January 24-27, 2000
- [4] E. Vaahedi, et al., "Voltage Stability Contingency Screening and Ranking", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 1, pp256-265, 1999
- [5] M. Pavella, P. G. Murthy, Transient Stability of Power Systems - Theory and Practice, John Wiley & Sons, 1994
- [6] M. Pavella, D. Ernst, D. R. Vega, Transient stability of Power Systems - A Unified Approach to Assessment and Control, Kluwer Academic Publishers, 2000
- [7] Y. Xue and M. Pavella, "Extended Equal Area Criterion: An Analytical Ultra-fast Method for Transient Stability Assessment and Preventive Control of Power Systems", Int. Journal of Electric Power & Energy Systems, Vol. 11, No. 2



- [8] J. Lee, B. Lee, S. H. Kwon, H. K. Nam, J. B. Choo, K. Yi, "Fast Contingency Screening for On-line Transient Stability Monitoring of the KEPCO System", IEEE Power Engineering Society 2001 Summer Meeting, Vol. 1, pp314-319, 2001
- [9] H. K. Nam, Y. H. Kim, S. G. Song and Y. G. Kim, "A Fast Contingency Screening Algorithm for On-line Transient Security Assessment Base on Stability Index", KIEE International Transaction on PE, Vol. 2-A, No. 4, Vol. 2-A, pp131-135, 2002
- [10] J. J. Grainger, W. D. Stevenson JR, Power System Analysis, McGraw-Hill Inc., 1994

## 저 자 소 개



### 남 해 곤 (南海鯤)

1950년 10월 16일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사). 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(공학). 1975년~1978년 한국전력 원자력건설부 근무. 1986년~1988년 한국전기연구소 근무. 1988년~현재 전남대 전기공학과 교수  
Tel : 062-530-1745, Fax : 062-530-1749  
E-mail : hknam@chonnam.ac.kr



### 김 용 학 (金容鶴)

1968년 8월 13일생. 1994년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 전력연구원 근무  
Tel : 042-865-5134, Fax : 042-865-5104  
E-mail : kimyh@kepri.re.kr



### 송 성 근 (宋成根)

1975년 9월 16일생. 1998년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 졸업(석사). 2001~2004년 (주)프로컴 시스템 연구원. 현재 동대학원 전기공학과 전기공학과 박사과정, 세오전자 연구원