

안정도 지수와 에너지 마진을 이용한 불안정 발전기의 clustering 법

論 文

54A-9-3

A Novel Method for Clustering Critical Generator by using Stability Indices and Energy Margin

張東煥* · 鄭然在* · 全瑩煥[†] · 南海鯤**

(Dong-Hwan Chang · Yun-Jae Jung · Yeonghan Chun · Hae-Kon Nam)

Abstract - On-line dynamic security assessment is becoming more and more important for the stable operation of power systems as load level increases. The necessity is getting apparent under Electricity Market environments, as operation of power system is exposed to more various operating conditions. For on-line dynamic security assessment, fast transient stability analysis tool is required for contingency selection. The TEF(Transient Energy Function) method is a good candidate for this purpose. The clustering of critical generators is crucial for the precise and fast calculation of energy margin. In this paper, we propose a new method for fast decision of mode of instability by using stability indices. Case study shows very promising results.

Key Words : Transient Stability, Stability Index, Clustering, Energy Function, On-Line Dynamic Security Assessment

1. 서 론

전력계통의 동적안전도 평가는 심각한 상정사고에 대하여 계통의 안정도 여부를 판단하고 계통이 불안정한 경우 방어적 운전을 위한 조치를 위해서 앞으로 계통운영의 중요한 기능이 될 것으로 보인다. 안정도 문제는 계통에 외란이 발생할 때 야기되며, 외란의 성질과 크기에 밀접한 관계가 있다. 전력계통에는 급작스런 부하 및 발전력의 변화, 사고 혹은 line switching 등과 같은 대규모의 외란이 발생하기 마련인데, 과도 안정도 평가는 이러한 대규모 외란 발생 시 발전기가 동기를 유지할 수 있는지를 평가하는 것이다. 우리나라는 부하의 지속적인 증가와 더불어 전력산업의 구조개편으로 인해 전력계통의 운용 환경이 더욱 어려워지고 있다. 또한, 환경에 대한 국민들의 관심이 높아짐에 따라 송전선로의 건설이 부하 증가에 따르지 못할 것으로 예상되며, 이는 안정도의 위협요소로 작용하게 될 것이다.

현재 과도안정도 해석은 주로 시간모의법에 의해서 이루어지고 있지만, on-line 과도 안정도 해석을 위한 노력은 오래전부터 이루어져왔다. 1980년대에 미국 Iowa State University와 캐나다 Ontario Hydro에서 개발한 TEF(Transient Energy Function) 법이 Ontario Hydro 회사의 실계통에서 운용이 되었다. 에너지 함수법은 에너지 마진을 직

접 계산하여 안정도를 판별하는 방법으로 동적안전도 평가에 적합한 방법이지만, 제어불안정 평형점을 계산하기 위한 불안정 모드 결정에 많은 계산 시간이 필요했다. 불안정 모드를 결정하는 일반적인 방법으로는, 모든 발전기 조합을 불안정 후보 모드로 결정하고 이 후보 모드 전부에 대해 에너지 마진을 계산해서 불안정 모드를 계산하는데, 이 때 많은 계산 노력이 필요하다는 것이다. 이를 피하기 위해서는 사전 해석에 의한 모드의 결정이 필요한데, 이는 전적으로 엔지니어의 판단에 의존했다. 1990년대 들어 벨기에 Liege 대학에서 처음 제안한 SIME법[4,5]은 직접법과 시간 영역 모의법을 통합하여 안정도를 평가하려는 시도를 하였다. 이 방법은 과도 안정도를 빠르게 판정하는데 그 목적을 가지고 사전에 시간 모의를 미리 수행하여 상정 사고에 대한 위험 발전기 클러스터링을 미리 수행해 놓는 방법을 사용하였다. 그러나 SIME법은 계통이 안정한 경우 발전기 클러스터링이 어렵고, 계산 시간이 오래 걸리는 시간 모의 방법을 시스템이 불안정해질 때까지 사용한다는 단점이 있었다. 2005년 2월 김용학등[7]은 상정고장 선택 및 여파를 위해서 확장 등면적 기준법에 기초하고, 네트워크 방정식의 해 만으로 상정사고 선택 및 여파가 가능한 방법을 제안하였다. 이 방법은, 시간 영역 모의법을 사용하지 않고 확장 등면적 기준법과 네트워크 방정식의 해를 가지고 안정도 지수를 계산하여 클러스터링을 한다. 그러나, 불안정 발전기 그룹의 판단 기준 설정에 여전히 개선의 여지가 있다. 본 논문에서는 안정도 지수를 사용하여 위험발전기 후보군을 선택하고, 에너지 마진을 이용하여 불안정 모드를 결정하는 새로운 방법을 제안한다. 이로써, 시간 모의를 짧게 수행하고, 후보 모드의 개수를 획기적으로 줄임으로써 기존의 방법에 비해 불안정 모드 선정을 정확하고 빠르게 수행할 수 있다.

[†] 교신저자, 正會員 : 弘益大學校 電氣電子工學科 助教授 · 工博
E-mail : yhchun@hongik.ac.kr

* 學生會員 : 弘益大學校 電氣電子工學科 碩士課程

** 正會員 : 全南大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 6月 10日

最終完了 : 2005年 8月 22日

2. 본 론

2.1 SIME 법과 에너지 함수법의 비교

2.1.1 SIME법에서의 위험 발전기 그룹 결정

SIME법은 등면적 기준법을 다기 계통에 확장 적용한 방법으로써, 고장 제거 시간을 바꾸어 가면서 시간 영역 모의를 수행함으로써 위험 발전기 그룹과 안정도 마진을 결정하는 방법이다. 이 방법은 시간 영역 모의를 사용하기 때문에 모델의 종류에 제약받지 않으므로 유연성과 신뢰도가 높다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 시간 영역 모의법을 계통이 불안정해질 때까지 사용하므로 상대적으로 긴 시간 모의로 인하여 계산이 오래 걸리고, 시스템이 안정할 경우 클러스터링이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 고전 모델을 사용하거나, 상정 사고의 개수를 줄이기 위한 오프라인 해석 또는, 엔지니어의 경험에 의한 중요 상정 사고만을 여과하는 방법 등의 시도들이 있었다. 기존의 SIME 법에서의 위험 발전기 결정 방법은 아래와 같다.[6] SIME 법에서는 계통 내의 모든 발전기를 불안정 발전기 그룹과 안정한 발전기 그룹의 2개 그룹으로 분류하고 다기계통을 1기무한모선(OMIB) 계통으로 축약하여 안정도를 판별한다. 불안정 발전기 그룹을 결정하기 위해 시간 영역 모의법을 수행하여 발전기 위상각 차이 기준(gap criterion)을 적용한다. 이 때, 시간모의는 고장지속시간을 충분히 크게 인가하고 시간 영역 모의를 통하여 각각의 발전기에 대한 발전기 위상각의 시간 궤적을 작성한다. 이 후, 매 시간마다 위상각이 큰 발전기 순서대로 나열한 뒤, 인접한 발전기의 위상각 차이가 가장 큰 발전기를 결정하고 이 위상각 차이가 기준값을 초과하는 경우 위상각 차이 기준의 상위에 위치한 발전기를 불안정 발전기 그룹으로 분류한다. 이 과정을 각 시간 간격마다 수행하고 각 시간 간격 별로 일기 무한대 모선을 구성 [1]하여 가장 먼저 불안정한 조건을 만족하는 일기 무한대 모선의 위험 발전기군을 위험 발전기로 상정한다.

2.1.2 에너지 함수에 의한 위험 발전기 그룹 결정

에너지 함수법[3]에서의 불안정 모드의 판별기법은 미국 Iowa State University에서 개발된 기법이 일반적으로 쓰이고 있다. 이 기법은 외란 제거 후 계통의 궤적 진행방향에서 가장 취약하게 연계된 발전기 군이 외란의 영향을 가장 크게 받는다는 사실에 근거를 두고 있다. 에너지 함수법 역시 외란 지속 기간 동안 유입된 과도 에너지를 계산하기 위하여 시간 영역 모의법을 사용하지만, 외란 지속 기간 동안만 시간 영역 모의를 하기 때문에, 발전기의 위상각차가 일정 간격 이상 벌어질 때까지 시간모의를 시행하는 SIME 법에 비하여 시간 모의 기간이 상대적으로 매우 짧다.

에너지 해석에 의한 과도 안정도 해석은 외란이 지속되는 기간 동안 계통에 유입된 과도 에너지(Transient Energy)를 시간 영역 모의를 통한 적분법으로 계산하고, 이 에너지를 흡수하여 다른 형태의 에너지로 변환시키는 계통의 에너지 흡수 능력을 평가 비교하여 이루어진다. 즉, 계통이 안정하기 위해서는 계통의 에너지 흡수 능력이 해석하고자 하는 외란

에 의해 계통에 유입된 과도 에너지보다 커야한다. 이 에너지 흡수 능력은 외란 제거 후 계통의 위치 에너지 등고선과 외란이 상당한 기간 동안 충분히 지속되었을 때 계통 궤적이 통과하게 된 위치 에너지 지형의 특정 구간에 의해 영향을 받게 된다. 위치 에너지 등고선으로 표현되어지는 에너지 지형 (Terrain)은 외란으로 유입된 단위 과도 에너지 당 발전기 회전자 변위량을 나타낸다.(그림 1 참조) 그림에서 볼 수 있듯이 에너지 표면은 높고 낮은 봉우리(Ridge)로 둘러싸여 있으며, 발전기 회전자 궤적에 따라 불안정에 이르게 될 때까지의 회전자가 움직이는 양이 다르게 된다. 만일 계통 궤적(System Trajectory)이 높은 능선쪽으로 움직이게 되면 과도 에너지를 흡수 변환할 수 있는 능력이 크게 되어 낮은 능선쪽으로 접근하는 궤적보다 큰 외란에도 견딜 수 있게 된다. 위치 에너지 표면 능선을 위치 에너지 경계표면 (Potential Energy Boundary Surface, PEBS)이라 하고 이 능선은 높고 낮은 봉우리와 안장점(Saddle Point)를 갖게 되는데 이런 점을 위치 에너지 경계표면으로 연결된 불안정 평형점(Unstable Equilibrium Point, UEP)라 부른다. 이 무수히 많은 불안정 평형점 중에서 안정도 판정에 영향을 미치는 제어 불안정 평형점에서의 위치에너지와 과도에너지를 비교하여 안정도를 판정하는데, 이 때, 제어 불안정 평형점을 계산하기 위해서 결정하는 불안정 모드의 결정이 바로 위험 발전기 그룹을 결정하는 것과 같다. 즉, 불안정 모드는 제어 불안정 평형점(the controlling UEP)에서 위상이 앞서서 발전기 군이다.

위의 사실에 기반하여 에너지 함수법에서의 발전기 절차를 순차적으로 표현하면 아래와 같다. 또한, 아래의 절차에 대한 부연 설명을 절차 아래에 상세히 기술하였다.

1. 관성 중심 기준축을 이용하여 에너지 함수를 구한다.
2. 위치에너지 경계면(PEBS)를 구성한다.
3. 계통 분리에 작용하지 않는 운동에너지를 제거한다.
4. 발전기 전부를 위험 발전기로 가정하고 모든 조합을 후보 모드로 가정하여 각 모드별 근사 불안정 평형점을 설정한다.
5. 불안정 모드의 판정 기준에 의해 근사 불안정 평형점 가운데 가장 낮은 정규화된 위치에너지 마진을 갖게 되는 점을 불안정 모드로 정한다.
6. 위에서 정해진 모드에 대한 정확한 제어 불안정 평형점을 정확히 계산한다.

위치에너지 경계면(PEBS)구성

위치 에너지 경계면 (PEBS)은 다음과 같이 구성된다. 관성중심 기준 축으로 표현한 발전기 위상각 공간에서 외란 제거 후 평형점에서 모든 방향으로 직선을 그어 이 직선 (Ray)을 따라 위치에너지를 계산하여 최초로 극대에 도달하는 점을 찾는다. 이렇게 얻어진 점들의 집합이 위치에너지 경계면을 구성한다. 해석적으로 직선 (Ray)을 따라 계산되는 위치 에너지 함수의 방향 도함수를 0으로 하는 방정식의 해가 위치에너지 경계면을 구성한다.

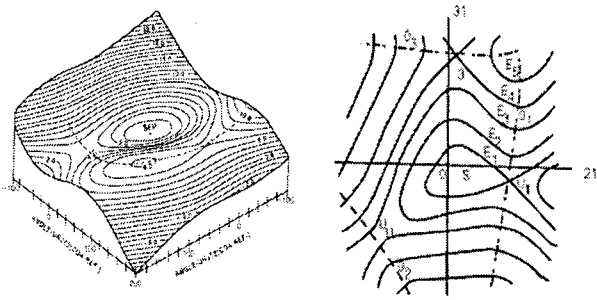


그림 1 위치에너지등고선 및 Contour
Fig 1. Potential energy boundary surface (PEBS) and Contour

관성중심 기준축에 의한 정식화

이 정식화의 중요한 의미는 계통 분리에 영향을 미치는 과도 에너지 중 계통 분리에 영향을 미치지 아니하고 관성 중심축의 가속과 변화에 사용된 에너지를 분리시킨다는 것이다. 또한 이 정식화는 transfer conductance 항을 포함시키는 작업을 용이하게 한다. 이를 수식으로 전개하여 정리하면 (2.1)과 같은 수식을 얻을 수 있다. 또한 관성중심 기준축에 의한 정식화된 수식을 적분하여 (2.2)와 같은 에너지 함수를 얻을 수 있다.

$$M_i \ddot{\omega}_i = -D_i \dot{\omega}_i + P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_v} P_{cor} \quad \theta_i = \dot{\omega}_i \quad (2.1)$$

$$V = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n [M_i \dot{\omega}_i - P_i + P_{ei} + \frac{M_i}{M_v} P_{cor}] \theta_i dt \quad (2.2)$$

- $\dot{\omega}_i$: i 번째 발전기의 회전자 속도
- D_i : i 번째 발전기의 댐핑
- P_{ei} : i 번째 발전기의 전기적 출력
- P_i : i 번째 발전기의 기계적 입력
- $P_{cor} = \sum_{i=1}^n (P_i - P_{ei})$
- θ_i : i 번째 발전기의 위상각과 관성중심 위상각과의 차

운동에너지의 정정

운동에너지의 개념은 다음과 같다. 과도에너지 중 모든 운동에너지가 계통 분리에 작용하지 아니하고 일부 운동에너지는 발전기를 계통으로부터 분리 하려는 그룹과 나머지 그룹을 구분할 때 그룹 내 발전기 상호 운동에 관련되어 있어 이에 해당하는 양 만큼의 운동에너지를 제거하는 과정을 수행한다. 이러한 운동에너지 제거를 운동에너지 정정이라 부른다. 이러한 운동에너지 정정은 2기 이상의 발전기가 불안정하게 될 때 계통 분리는 이들 발전기와 나머지 계통과의 상호그룹운동(gross motion)에 의해 결정된다는 것을 의미한다.

불안정 모드의 판별 기준

에너지 함수법에서의 불안정 모드 판별법은 외란 제거후의 계통 궤적 진행 방향에서 가장 취약하게 연계된 발전기 군들이 외란의 영향을 가장 크게 받게 된다는 사실에 근거를 두고 있다. 다기계통에서 외란이 발생하면 발전기들은 운전 평형점으로 부터 이탈하게 되고, 과도 기간 중 동기 유지 여부는 외란에 의해 계통에 유입된 과도 에너지를 외란 제거 후 계통이 흡수하여 위치에너지로 변환 할 수 있는 능력의 보유 유무로 결정하게 된다. 이를 수식적으로 설명하면 식 (2.3)과 같다. 불안정 평형점에 나타난 불안정 모드에 의한 정정된 운동에너지를 식(2.4)이라 하면, 정정된 위치에너지로 정규화 한 위치에너지 마진은 식(2.5)가 된다.

$$\Delta V_{PE} = \text{위치에너지마진} = V_{PE}^u - V_{PE}^d \quad (2.3)$$

$$= - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i^u - \theta_i^d) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} (\cos \theta_{ij}^u - \cos \theta_{ij}^d)$$

V_{PE}^u : 임계에너지 (= V^u), V_{PE}^d : 과도위치에너지

$$V_{KE\text{ Corr}} = \frac{1}{2} M_{eq} \omega_{eq}^2 \quad (2.4)$$

$$\Delta V_{PE-n} = \frac{\Delta V_{PE}}{V_{KE\text{ Corr}}} \quad (2.5)$$

제어 불안정 평형점은 외란이 충분히 커서 외란 제거후의 계통 궤적이 위치에너지 경계면(PEBS)에 접근하게 될 때 궤적 진행 방향 근방에 있는 불안정 평형점들 중에서 가장 낮은 정규화된 위치에너지 마진을 갖는 불안정 평형점 근방을 통과하게 된다는 사실과 일치하게 되고 이때 외란의 영향을 크게 받은 위상이 앞선 발전기들이 계통으로부터 분리되려한다.

에너지 함수법의 clustering 알고리즘

기존의 에너지 함수법에 의한 clustering 알고리즘은 아래와 같다, 기존의 방법은 발전기의 개수가 많으면 불안정 후보 모드의 개수가 기하급수적으로 증가하여 계산시간이 오래 걸린다는 문제가 있었다. 그림2는 에너지 함수법을 이용한 클러스터링 알고리즘을 순서도로 표현한 것이다.

1. 입력 데이터를 load 한다.
2. 조류계산을 통하여 초기값을 설정한다.
3. 모든 발전기들의 조합을 후보모드로 상정한다.
4. 각 후보모드에 대한 근사 불안정 평형점을 설정한다.
5. 관성 중심축 변화에 의한 보정을 실행한다.
6. Ray Point 계산에 의해 정확한 불안정 평형점을 계산한다.
7. 불안정 모드의 판별기준에 의해 후보모드 중 하나의 불안정 모드를 결정한다.

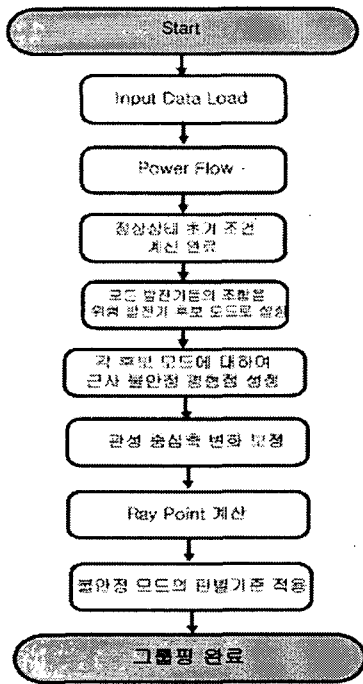


그림 2 기존의 에너지 함수법 클러스터링 알고리즘
 Fig. 2 Conventional clustering algorithm for energy function method

2.2 등면적법과 SI 지수

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, 이 때의 발전기 토크각은 δ_0 이다. 점 A에서 평형상태로 운전되고 있는 계통에서 고장이 발생하면, 발전기 출력은 점 B로 이동하기 때문에 AB만큼의 가속력이 작용되므로, 발전기 위상각은 점 B를 통과하는 $P-\delta$ 곡선을 따라 증가하게 된다. 발전기 위상각이 점 C에 도달하는 순간에 차단기가 동작하여 고장선로가 개방되면, 발전기 출력은 점 E로 이동하고 발전기 출력이 기계적 입력보다 크므로 감속을 시작한다. 그러나 이러한 순간에 발전기 속도는 동기속도보다 크므로 감속력이 작용하더라도 발전기 토크각은 계속 증가하고, 발전기 속도가 동기속도에 도달하는 순간부터 (안정한 경우) 발전기 토크각은 감소하기 시작하여 점 E를 통과하는 $P-\delta$ 곡선을 따라 진동을 시작한다. 색칠된 면적 ABCD는 가속면적, DEF는 감속면적이라 한다. 등면적 기준[2]에 의하면, 만약 감속면적이 가속면적보다 크면 발전기는 호 EF 상의 한점에서 회귀하여 점 E를 통과하는 $P-\delta$ 곡선을 따라 진동하지만, 만약 감속면적이 가속면적보다 작으면 발전기는 회귀하지 못하고 발전기 토크각은 계속 증가하여 발산 (동기탈조) 하게 된다. 특히, 가속면적과 감속면적이 같으면 임계상태로 안정/불안정을 결정할 수 없게 되며, 임계상태에 이르는 고장제거시간을 임계 고장제거시간 (CCT)이라 한다. 감속면적이 가속면적보다 작아 진동을 수반하지 않고 발생하는 일과 불안정 (first swing instability)은 가속면적이 매우 크거나 감속면적이 매우 작거나, 또는 가속면적이 크고 동시에 감속면적도 작은 경우에 발

생한다. 이에 본 논문에서는 가속력과 감속력 두 가지를 각각 고려하여 2종류의 지수를 사용하였다.[7]

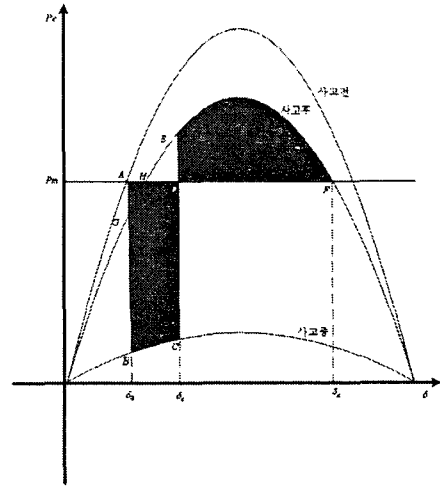


그림 3 1기 무한모선 계통의 등면적 기준법
 Fig. 3 Equal area criterion of one machine infinite bus

2.2.1 SI_s

동기화력 계수 (Synchronizing Power Coefficient, SPC)는 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$SPC = \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \quad \delta = \delta_0 = \frac{V_1 V_2}{X} \cos \delta_0 = P_{max} \cos \delta_0 \quad (2.6)$$

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. 또한 그림 3에서 선로의 개방에 의한 퍼센트로 나타낸 동기화력의 감소는 AG/P_m 로 표현되며, 이 값이 크면 감속면적이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 선로가 개방된 상태에서 동기화력 계수는 감속면적을 결정하는 중요한 요소이다. 그러므로 그림 3에서 가속력 AB와 점 G에서의 동기화력 계수 ($P-\delta$ 곡선의 점 G에서 접선의 기울기)는 발전기의 발산 (동기탈조) 여부를 결정하는 지표로 사용할 수 있다. 따라서 아래의 식 (2.7)과 같이 정의하여 안정도 지표 (Stability Index) SI_s 를 계산할 수 있으며, 이 안정도 지표를 위험발전기 그룹의 결정에 사용한다.

$$SI_s = \frac{P_{eA} - P_{eB}}{SPC_G} = \frac{AB}{SPC_G} \quad (2.7)$$

2.2.2 SI_a

그림 3에서 감속면적 \overline{HEFDH} 과 가속면적 \overline{AHGA} 의 차이 값은 고장이 발생하는 동시에 송전선로를 개방하는 경우의 안정도 마진을 의미한다. 즉, 실 계통에서는 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 AB로 나눈 값을 위험발전기 그룹을 결정하기 위한 안정도 지표 (stability index) SI_A 로 아래의 식 (2.8)과 같이 정의하는 것이 가능하다.

$$SI_A = \frac{HEFDH - AHGA}{AB} \quad (2.8)$$

2.3 SI 지수와 에너지 함수법을 이용한 clustering 알고리즘

클러스터링 순서는 다음과 같다. 아래 그림4는 본 논문의 주제인 안정도지수와 에너지 함수법을 이용한 불안정 발전기군의 클러스터링 방법을 순서도로 표현한 것이다.

1. 안정도 평가에 필요한 입력데이터를 로드한다. 입력 자료는 전력조류 계산에 필요한 입력데이터와 발전기 특성정수, 사고 모션과 선로, 사고 제거시간 등이다.
2. 전력조류 방정식을 풀고 네트워크 축약을 수행한다. 이때, 발전모션을 제외한 나머지 모션은 축약시켜 제거하고, 부하는 정입피던스 모델을 사용하여 Y-Matrix의 diagonal term에 더해준다. 또한 발전기 내부모션의 임피던스도 고려하여 최종적인 Y-Matrix를 구성한다.
3. 각 발전기별 관성 중심 위상각(COI)을 계산한다. 즉, 각각의 하나의 발전기와 나머지 전부의 발전기에 대한 관성 중심 위상각을 결정한다. 이 과정은 각각의 모든 발전기를 위험 발전기로 가정하여 일기 무한대 모션을 구성하는 다음 과정의 준비 절차이다.
4. 위의 결과를 이용하여 각 발전기별 일기 무한대 모션을 구성한다. 이는 물리적으로 에너지 함수법에서 모든 발전기를 불안정 발전기 후보로 상정하는 것과 같은 의미이다. 다만, 본 논문에서는 에너지 함수법의 클러스터링 방법처럼 모든 조합에 대해서는 계산하지 않는데, 그 이유는, 하나의 위험 발전기 후보를 제외한 나머지 발전기 중 위험 발전기가 있더라도 나머지 안전한 대부분의 발전기와 합쳐서 안정 그룹을 만든다면, 그 영향력은 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하였다. 이로써 발전기 개수 만큼의 각각의 일기 무한대 모션에서의 SI지수는, 위험 발전기로 가정된 하나의 발전기에 의해 결정될 것이고, 결정된 SI 지수에 따라 아래의 과정을 거쳐 위험 발전기 후보를 결정하게 된다.
5. 가속력과 동기화력계수의 비인 SIS 지수와 감속면적과 가속력의 비인 SIA 구하여 불안정 지수가 큰 발전기 순으로 정렬한다. 이때 지수를 두 개로 쓰는 이유는 발전기가 동기 탈조를 하는 두 가지 원인인 발전기의 가

속 화력이 큰 경우와 발전기의 감속화력이 작은 경우의 두 가지 경우를 모두 고려하기 위함이다.

6. 각 지수별 최대 간격을 경계로 삼고, 경계보다 높은 불안정 지수를 가진 발전기들을 에너지 함수법의 후보 불안정모드로 결정한다. 향후, 조금 더 실제적이고 효과적으로 경계를 정할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다. 아래의 과정부터는 기존의 에너지 함수법에서의 클러스터링 방법과 동일하다. 다만, 위험 발전기 후보의 개수가 줄어들어서 모드의 결정시간이 기존의 에너지 함수 방법에 비하여 비약적으로 줄어들게 된다.
7. 근사 불안정 평형점을 설정하고, 관성 중심축의 보정과 Ray Point 보정을 통하여 정정된 위치에너지를 정규화된 위치에너지 여유가 가장 작은 모드를 찾는다. 이 기준은 현재 일반적으로 사용되고 있는 미국 Iowa State University에서 개발한 기준과 동일하다.
8. 7에서 구한 불안정 평형점에서 나타난 불안정 모드를 위험 발전기군으로 분류한다.

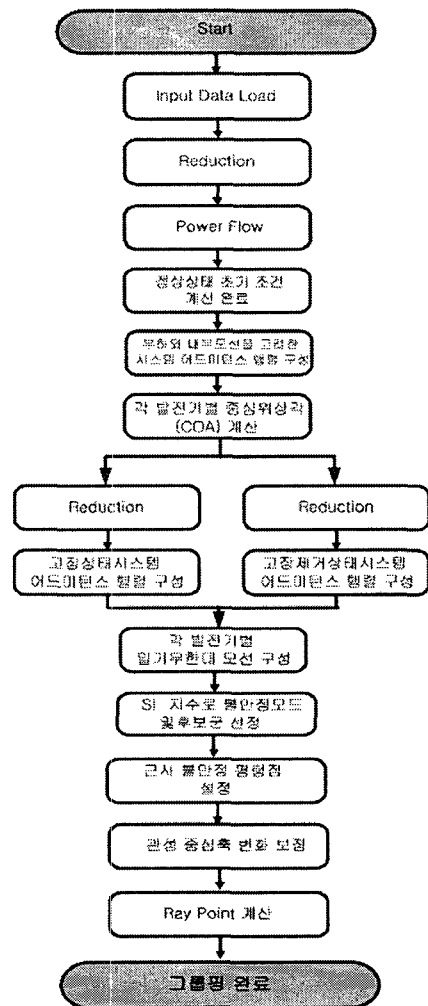


그림 4 개선된 클러스터링 알고리즘
Fig. 4 Improved clustering algorithm

2.4 사례 연구

본 논문에서 사용된 계통은 그림과 같다. 사례 연구의 계통은 한국의 계통의 특성을 반영하여 6기 10모선 계통으로 축약하여 만든 것으로써, 각 모선의 데이터들은 단위값(p.u)으로 환산하였다. 선로 사고는 같은 선로의 사고라도 사고의 위치에 따라 사고의 심각성이 달라질 수 있는데, 본 논문에서는 가장 심각한 사고를 상정하여, 고장 어드미턴스를 무한대로 가지고 사고 모선이 지락되는 경우를 상정하여 사례연구하였다. 즉, 14개의 선로에서 일어날 수 있는 28개의 사고를 study 하였다. 이 중 뚜렷하게 불안정한 발전기가 나타나는 2개의 사례에 대하여 수록하였다. 또한, 사고 제거 시간은 특성을 확실하게 반영하고자 사고 후 0.2초로 하였다.

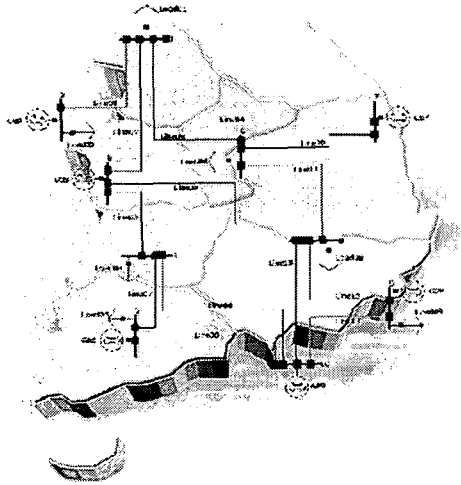


그림 5 사례연구 계통도
Fig. 5 Power system for case study

표 1 사례 계통의 운전조건[pu]
Table 1 Operation condition of the system

	전압	위상각	발전유효전력	발전무효전력	부하유효전력	부하무효전력	발전기 관성계수	발전기 내부임피던스
1번 모선	-	-	-	-	12.8	1.90	-	-
2번 모선	1.03	-	2.38	-	3	0.1	2	0.044
3번 모선	1.014	-	3.79	-	-	-	3	0.042
4번 모선	-	-	-	-	3	1.43	-	-
5번 모선	1.03	-	6.72	-	3	0.98	4	0.0375
6번 모선	-	-	-	-	4	1.07	-	-
7번 모선	1.028	-	8.885	-	-	-	4.5	0.0342
8번 모선	-	-	-	-	3	0.48	-	-
9번 모선	0.987	-	9.385	-	7.95	1.92	5.5	0.0200
10번 모선	1.019	-	10.00	-	-	-	5.5	0.0285

표 2 사례 계통의 선로 데이터(Y-Matrix)
Table 2 Y-Matrix of the system

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25.851 172.77i	-6.011 47.337i	-13.137 60.944i	0	0	-6.011 47.337i	-0.6923 17.373i	0	0	0
2	-6.011 47.337i	6.011 47.25i	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-13.137 60.944i	0	19.777 127.88i	-6.011 47.337i	0	0	0	-0.6288 19.631i	0	0
4	0	0	-6.011 47.337i	25.159 155.52i	-6.011 47.337i	0	0	0	0	-13.137 60.944i
5	0	0	0	-6.011 47.337i	9.0511 56.813i	0	0	0	0	-3.0401 9.5966i
6	-6.011 47.337i	0	0	0	0	22.975 180.94i	-8.4819 66.812i	-8.4819 66.812i	0	0
7	-0.6923 17.373i	0	0	0	0	-8.4819 66.812i	9.1741 84.061i	0	0	0
8	0	0	-0.6288 19.631i	0	0	-8.4819 66.812i	0	30.727 214.16i	-8.4796 66.803i	-13.137 60.944i
9	0	0	0	0	0	0	0	-8.4796 66.803i	16.962 133.6i	-8.4819 66.812i
10	0	0	0	-13.137 60.944i	-3.0401 9.5966i	0	0	-13.137 60.944i	-8.4819 66.812i	37.796 198.25i

<사례1> 모선 6번과 7번 사이에 line fault 가 발생하였을 때, 각 발전기별 SIS 지수와 SIA지수는 다음과 같다.

표 3 사례1의 SI 지수들
Table 3 Stability indices of case 1

모선번호	SIs	모선번호	Sia
7	-0.02613	10	-0.03249
2	-0.08745	9	-0.01344
9	-0.09833	5	0.077136
10	-0.10098	7	0.10495
5	-0.12063	3	0.13162
3	-0.13812	2	0.13688

각 지수별로 최대 gap을 찾아보면, SIs지수는 7번 모선과 2번 모선사이, Sia는 9번 모선과 5번 모선 사이에서 최대 gap을 찾을 수 있다. 즉, SIs 지수로 7번 모선과, Sia 지수로 10번 모선과 9번 모선이 불안정 발전기 후보군으로 선정되었다. 아래는 7번 모선과 9번 모선, 그리고 10번 모선을 불안정 발전기 후보로 입력하고 에너지 함수법을 이용하여 모드를 구한 모습을 나타내고 있다.

표 4 사례1의 Clustering 결과

Table 4 Clustering result of case 1

모선 번호 (1)	모선 번호 (2)	모선 정격 전압	정규화된 기계적 입력	정규화된 관성정수	회전자 각도		불안정모드
					라디안	각도	
1020	BUS 02	154	1.05553	0.05250	-0.23042	-13.20204	
1030	BUS 03	154	3.07440	0.09740	-0.21001	-12.03246	
1050	BUS 05	154	5.28919	0.15977	-0.23106	-13.23886	
1070	BUS 07	154	10.94759	0.25688	1.62374	98.03370	ADVANCED
1090	BUS 09	154	7.81583	0.35773	-0.42771	-24.50571	
1100	BUS 10	154	3.76295	0.35773	-0.53111	-30.43049	

에너지 함수법을 사용하여 모드를 구한 결과, 불안정 그룹은 발전기 7번임을 알 수 있다.

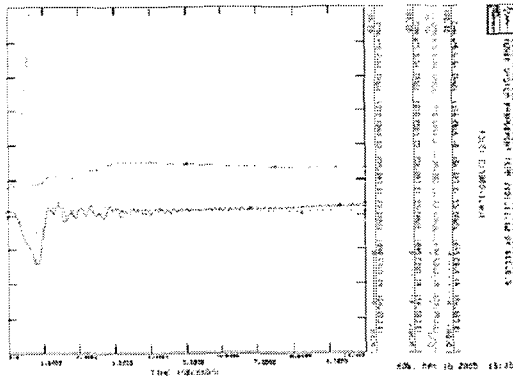


그림 6 사례1의 시간모의 결과
Fig. 6 Time domain simulation result of case 1

이를 시간 모의 프로그램으로 검증한 결과 본 논문의 알고리즘대로 7번이 위험 발전기임이 증명되었다.

<사례2> 모선 10번과 8번 사이에 line fault 가 발생하였을 때, 각 발전기별 SIS 지수와 SIA지수는 다음과 같다.

표 5 사례2의 SI 지수들
Table 5 Stability indices of case 2

모선번호	SIs	모선번호	SIA
10	0.021567	10	-0.03006
9	-0.02418	9	-0.01757
5	-0.03636	5	0.077039
2	-0.04076	7	0.10166
3	-0.06633	3	0.13148
7	-0.0942	2	0.13667

사례1과 같은 방법으로 불안정 발전기 후보군으로 10번, 9번 발전기를 선정하였다.

표 6 사례2의 Clustering 결과

Table 6. Clustering result of case 2

모선 번호 (1)	모선 번호 (2)	모선 정격 전압	정규화된 기계적 입력	정규화된 관성정수	회전자 각도		불안정모드
					라디안	각도	
1020	BUS 02	154	0.72413	0.05250	-1.08873	-52.37990	
1030	BUS 03	154	2.89911	0.09740	-0.91212	-52.25045	
1050	BUS 05	154	5.35187	0.15977	-0.78710	-45.09745	
1070	BUS 07	154	7.54555	0.25588	-0.84998	-48.70014	
1090	BUS 09	154	8.95790	0.35773	2.13839	122.52101	ADVANCED
1100	BUS 10	154	7.44941	0.35773	-0.71554	-41.00293	

에너지 함수법을 사용하여 모드를 구한 결과, 불안정 그룹은 발전기 9번임을 알 수 있다.

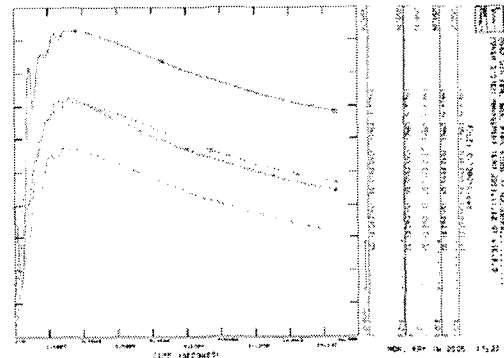


그림 7 사례2의 시간모의 결과
Fig. 7. Time domain simulation result of case 2

이 경우, 발전기가 발산하고 있지는 않지만, 가장 위상각이 벌어진 발전기가 9번임을 비추어 볼 때, 본 논문에서 구한 모드가 시간 모의를 통하여 구한 모드와 일치함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 온라인으로 과도 안정도 평가를 하는데 있어서 가장 문제가 되고 있는 빠른 불안정 그룹 선별을 위하여 기존의 SI 지수와 에너지 함수방법을 이용하였다. 본 논문의 알고리즘은 6기 10모선 계통을 통하여 사례연구를 하였고, 시간 모의 프로그램인 PSS/E를 가지고 검증하였다. 기존의 에너지 함수법에서 발전기의 모든 조합의 모드를 계산하여 불안정 모드를 정하는 방법(6기 예제의 경우 6개의 발전기의 조합에 의한 62개의 후보 모드)을 사례1의 경우 3개의 위험 발전기의 조합에 의한 7개의 후보 모드로, 사례2의 경우 2개의 위험 발전기 조합에 의한 3개의 후보 모드로 줄임으로써

계산 시간의 단축을 이룰 수 있었다. 실제 대규모 계통에 적용할 경우 계산시간의 단축 효과는 더욱 커질 것으로 예상된다. 향후, 실제통 검증을 통해 보다 효율적인 알고리즘 검토가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 홍익대학교 학술연구 조성비로 연구되었음.

참 고 문 헌

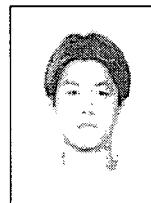
- [1] Edward Wilson Kimbark, "Power System Stability", John Wiley & Sons, Inc. 1947, chapter 4
- [2] P. Kundur, " Power System Stability and Control", McGraw-Hill 1994, pp.831-835
- [3] A. A. Fouad, Vijay Vittal " Power System Transient analysis Using the Transient Energy Function Method", Prentice Hall 1992, chapter 3~4
- [4] 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
- [5] 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, No.3, pp.195-208. 1996
- [6] Bettiol, A.L.; Zhang, Y.; Wehenkel, L.; Pavella, M. "Transient stability investigations on a Brazilian network by SIME" Advances in Power System Control, Operation and Management, 1997. APSCOM-97. Fourth International Conference on (Conf. Publ. No. 450) Volume 1, 11-14 Nov. 1997 Page(s):L1 - L6 vol.1
- [7] 김용학, "온라인 과도안전도 평가를 위한 새로운 고속 상정고장 선택 및 여과 알고리즘", 전남대학교 전기공학과 대학원. 2005. 2
- [8] 이종석, "전력계통에서의 온라인 과도안전도 평가방법", 고려대학교 전기공학과 대학원. 2002. 12

저 자 소 개



장 동 환 (張 東 煥)

1978년 7월 27일생. 2003년 홍익대 공대 전자전기공학부 졸업. 2005년 현재 동 대학원 전기정보제어공학과 석사과정.
Tel : 02-320-1620, Fax : 02-320-1110
E-mail : 3347821@dreamwiz.com



정 연 재 (鄭 然 在)

1976년 11월 21일생. 2003년 홍익대 공대 전자전기공학부 졸업. 2005년 현재 동 대학원 전기정보제어공학과 석사과정.
Tel : 02-320-1620, Fax : 02-320-1110
E-mail : wintertree1228@msn.com



전 영 환 (全 瑩 煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1985 - 1994년 한국전기연구소 근무. 1997년 동경대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996년 - 1998년 동경대 조수 역임. 1998 - 2002년 한국전기연구원 그룹장. 2002년 - 현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 02-320-1620, Fax : 02-320-1110
E-mail : yhchun@hongik.ac.kr



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(공박). 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