2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005. 7. 18 - 20

안정도 지수와 에너지 마진을 이용한 불안정 발전기의 clustering 법

장동환, 정연재, 전영환, 남해곤*
홍익대학교 전기 · 정보 · 제어공학과 *전남대학교 전기공학과

A Novel Method of Clustering Critical Generator by using Stability Indices and Energy Function

Dong-Hwan Chang Yun-Jae Jung Yeonghan Chun Hae-Kon Nam*
Hong-Ik univ. *Chun-nam univ.

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 due to more various operating conditions. 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.

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 switching등과 같은 대규모의 외란이 발생하기 마련인데, 과도 안정도 평가는 이러한 대규모 외란의 발생 시 계통이 안정운전이 가능한지를 평가하는 것이다. 최근 부하의 지속적인 증가와 더불어 전력산업의 구조개편은 전력계통의 운용 환경을 더욱 열악하게 만들고 있다. 따라서, 앞으로 송전선로에 대한 투자가 부하의 지속적인 증가세에 비하여 상대적으로 적을 것으로 예상되며, 이는 안정도의 위협요소로 작용하게 될 것이다. 이에 따라, 급전계획 단계에서부터 과도안정도를 고려한 발전기 운영이 필요하다. 현재 대부분의 과도 안정도 평가 기법은 위험 발전기군의 선별을 위하여 시간 모의 방법을 거치게 된다. 이 경우, 계산시간이 길어지게 되므로 온라인 과도 안정도 평가에는 적합하지 않다. 온라인으로 계산하는 동적안전도 평가의 특성상 수많은 상정사고를 Screen하기 위해서는 시간모의 방법보다 정확성이 결여되더라도 빠른 시간 안에 안정도를 판별할 수 있는 기법이 필요하며, 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 에너지 함수 방법은 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 방법 중 하나이지만, 상정사고 발생 시 불안정 모드를 결정하는 방법에는 개선의 여지가 많았다. 본 논문에서는 안정도 지수를 사용하여 위험 발전기 후보군을 선택하고, 에너지 마진을 이용하여 불안정 모드를 결정하는 새로운 방법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 SI(Stability Index) 지수

2.1.1 일기무한모선

사고 발생 시 모든 과도 에너지가 시스템 탈조의 원인이 되지는 않는다. 시스템의 동기 탈조는 일부 불안정 그룹의 과도 에너지에 영향을 받는다. 즉, 이 특정그룹의 과도 에너지는 위험 그룹을 안정 그룹에서 탈조시키는 역할을 한다. 따라서, 동적 과도 안정도 평가 시 위험 그룹과 안정한 그룹을 나누어 2기 계통으로 만들고, 이를 다시 1기 무한 모선으로 바꾸어 전체 시스템의 안정도를 판정하는 기법이 일반적으로 쓰이고 있다.[1] 본 논문에서는 전 계통의 각각의 발전기들을 모두 위험 발전기로 가정하여 일기 무한 모선[2]으로 만들고, 이를 근거로 각 발전기별 SI 지수를 계산하는 방법을 사용하였다.

(1) 각 그룹에 속한 발전기는 관성 중심원리를 이용하여 아래와 같이 각각의 1기 등가발전기로 축약된다.

$$M_R = \sum_{k\in R} M_k \qquad \delta_R \simeq M_R^{-1} \sum_{k\in R} M_k \delta_k \quad (2.1)$$

$$M_B = \sum_{k\in B} M_k \qquad \delta_B \simeq M_B^{-1} \sum_{k\in b} M_k \delta_k \quad (2.2)$$

여기서, M은 발전기 관성 계수, δ는 발전기 위상각
R은 가정된 위험 발전기, k는 발전기 인덱스
B는 안정한 발전기 그룹

(2) 위의 과정에서 축약된 계통은 coherent 하지 않은 2개의 발전기로 구성되므로, 다시 이들 2개의 coherent 하지 않은 발전기를 1기 무한 모선(OMIB)계통으로 축약하기 위해서, OMIB 계통의 발전기 위상각, 관성계수, 기계적 입력 및 전기적 출력을 다음과 같이 정의 한다.

$$\delta \simeq \delta_R - \delta_B \quad (2.3)$$

$$M = \frac{M_B M_R}{(M_B + M_R)} \quad (2.4)$$

$$P_m = M(M_R^{-1} \sum_{k\in R} P_{mk} - M_B^{-1} \sum_{j\in B} P_{mj}) \quad (2.5)$$

$$P_e = M(M_R^{-1} \sum_{k\in R} P_{ek} - M_B^{-1} \sum_{j\in B} P_{ej}) \quad (2.6)$$

여기서, P_m는 발전기 기계적 입력
P_e는 발전기 전기적 출력

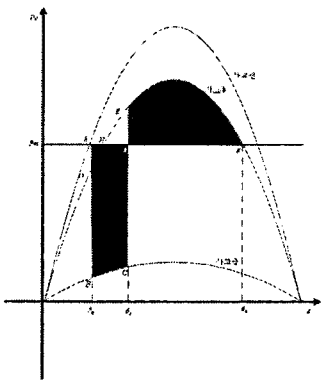
따라서, 식 (2.1)~(2.6)로부터 OMIB 계통에서의 가속력을

P_a로 나타내면, OMIB 계통에 대한 동특성은 식 (2.7)과 같은 동요방정식으로 표현할 수 있다.

$$M\delta = M\omega = P_m - P_e = P_a \qquad (2.7)$$

여기서, ω는 발전기 속도, P_a는 발전기 가속력

2.1.2 등면적법



<그림 1>

고장이 발생하기 이전의 정상상태에서 발전기는 점 A를 통과하는 전력-위상각 $(P-\delta)$곡선을 따라 움직인다. 발전기의 기계적 입력 P_m은 전기적 출력 P_e와 같고, 이 때의 발전기 토크각은 δ_0이다. 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[3]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 임계고장제거시간 (CCT)이라 한다. 감속면적이 가속면적보다 작아 진동을 수반하지 않고 발생하는 일파 불안정 (first swing instability)은 가속면적이 매우 크거나 감속면적이 매우 작거나, 또는 가속면적이 크고 동시에 감속면적도 작은 경우에 발생한다. 이에 본 논문에서는 가속력과 감속력 두 가지를 각각 고려하여 2종류의 지수를 사용하였다.[4]

2.1.3 SI_s

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

$$SPC = \frac{\partial P_e}{\partial \delta}_{\delta=\delta_0} = \frac{V_1 V_2}{X}\cos\delta_0 = P_{max}\cos\delta_0 \qquad (2.8)$$

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. 또한 <그림 1>에서 선로의 개방에 의한 퍼센트로 나타낸 동기화력의 감소는 AG/P_m로 표현되며, 이 값이 크면 감속면적이 크게 감소하는 것을 알 수 있다.선로가 개방된 상태에서 동기화력 계수는 감속면적을 결정하는 중요한 요소이다. 그러므로 <그림 1>에서 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 (2.9)과 같이 정의하여 안정도 지표 (Stability Index) SI_s를 계산할 수 있으며, 이 안정도 지표를 위험 발전기 그룹의 결정에 사용한다.

$$SI_s = \frac{P_{eA} - P_{eB}}{SPC_G} = \frac{AB}{SPC_G} \qquad (2.9)$$

2.1.4 SI_a

<그림 1>에서 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_A로 아래의 식 (2.10)과 같이 정의하는 것이 가능하다.

$$SI_A = \frac{\overline{HEFDH} - \overline{AHGA}}{AB} \qquad (2.10)$$

2.2 에너지 함수법

에너지 함수법[5]에서의 불안정 모드의 판별기법은 미국 Iowa State University에서 개발된 기법이 일반적으로 쓰이고 있다. 이 기법은 외란 제거 후 계통의 궤적 진행 방향에서 가장 취약하게 연계된 발전기 군이 외란의 영향을 가장 크게 받는다는 사실에 근거를 두고 있다.

2.2.1 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 분리시킨다는것이다. 또한 이 정식화는 transfer conductance 항을 포함시키는 작업을 용이하게 한다.

$$M_i \dot{\tilde{w}}_i = -D_i \tilde{w}_i + P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_t} P_{COI}$$
$$\dot{\theta}_i = \tilde{w}_i \qquad (2.11)$$

2.2.2 운동에너지의 정정

과도에너지 중 모든 운동에너지가 계통 분리에 작용하

지 아니하고 일부 운동에너지는 발전기를 계통으로부터 분리 하려는 그룹과 나머지 그룹을 구분할 때 그룹내 발전기 상호 운동에 관련되어 있어 이에 해당하는 양 만큼의 운동에너지를 제거하는 것이 임계고장 제거 시간 계산 측면에서 상당한 개선을 가져왔다. 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.

2.2.3 불안정 모드의 판별 기준

$$\Delta V_{PE} = \text{위치에너지마진} = V_{PE}^{u} - V_{PE}^{cl}$$
$$= -\sum_{i=1}^{n} P_i(\theta_i^u - \theta_i^{cl}) - \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} C_{ij}(\cos\theta_{ij}^u - \cos\theta_{ij}^{cl}) \quad (2.12)$$

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

불안정 평형점에 나타난 불안정 모드에 의한 정정된 운동에너지를 식(2.11)이라 하면, 정정된 위치에너지로 정규화 한 위치에너지 마진은 식 (2.12)가 된다.

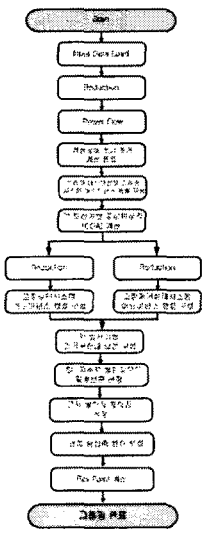
$$V_{KE\,Corr} = \frac{1}{2} M_{eq}\omega_{eq}^2 \quad (2.11)$$

$$\Delta V_{PE_n} = \frac{\Delta V_{PE}}{V_{KE\,Corr}} \quad (2.12)$$

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 일치 하게 되고 이때 외란의 영향을 크게 받은 위상이 앞선 발전기들이 계통으로부터 分離되려한다.

2.3 알고리즘 및 사례연구

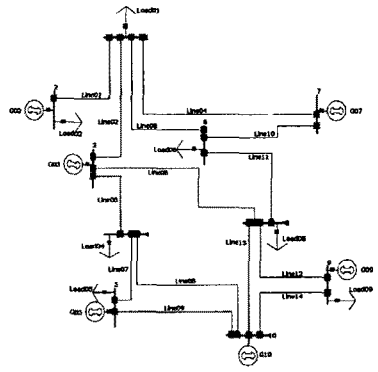
2.3.1 clustering 알고리즘



<그림 2>

2.3.2 사례연구

본 논문에서 사용된 계통은 그림과 같다. 각 모선의 데이터들은 단위값(p.u)으로 환산되었으며 선로의 용량 제한은 없다고 가정하였다. 사례연구는 6기 10모선 계통을 사용하였다. 14개의 선로 사고 중 뚜렷하게 불안정한 발전기가 나타나는 3개의 사례에 대하여 수록하였다. 또한, 에너지 함수법의 사고 제거 시간은 사고 후 0.2초로 하였다.



<그림 3>

	전압	위상각	발전유효전력	발전무효전력	부하유효전력	부하무효전력	발전기관성정수	발전기제부임피던스
1번 모선	-	-	-	-	12.8	1.90	-	-
2번 모선	1.03	-	2.36	-	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 1> 사례 계통의 운전조건[pu]

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

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

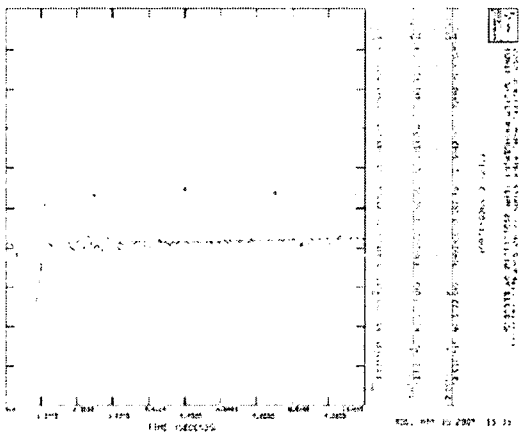
<표 2> 사례1의 SI 지수들

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 지수로는 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.

INT BUS#	LF BUS#	STATION NAME	EMECH- V+V+G(J)	INERTIA (M)	LEEP STARTING POINT (RADIANS)	(DEGREES)	MODE OF INSTABILITY
1	1010	BUS 01	154 1.05653	0.05350	-0.23042	-13.20304	
2	1030	BUS 03	154 3.07440	0.09740	-0.21031	-12.01245	
3	1050	BUS 05	154 5.28819	0.16977	-0.23106	-13.23285	
4	1070	BUS 07	154 10.94759	0.25688	1.62374	93.03570	ADVANCED
5	1090	BUS 09	154 7.81683	0.35773	-0.47711	-24.50571	
6	1100	BUS 10	154 8.76296	0.35773	-0.53111	-30.43049	

<표 3> 사례1의 Clustering 결과

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



<그림 4> 사례1의 시간모의 결과

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 SI_S 지수와 SI_A지수는 다음과 같다.

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

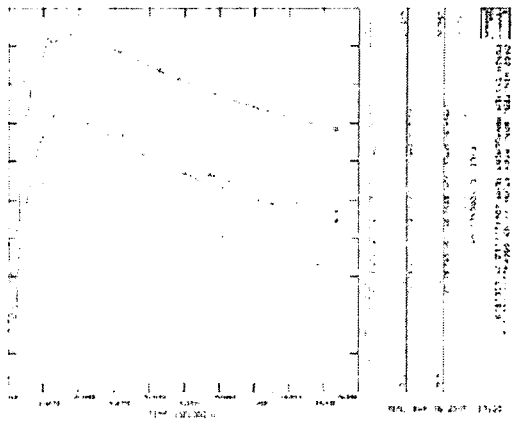
<표 4> 사례2의 SI 지수들

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

INT BUS#	LF BUS#	STATION NAME	EMECH- V+V+G(J)	INERTIA (M)	LEEP STARTING POINT (RADIANS)	(DEGREES)	MODE OF INSTABILITY
1	1010	BUS 01	154 0.72413	0.05350	-1.08573	-62.37590	
2	1030	BUS 03	154 2.89811	0.09740	-0.91212	-52.26045	
3	1050	BUS 05	154 5.36357	0.16977	-0.78710	-45.09745	
4	1070	BUS 07	154 7.54655	0.25688	-0.86598	-49.70014	
5	1090	BUS 09	154 8.86780	0.35773	2.13639	122.42101	ADVANCED
6	1100	BUS 10	154 7.44981	0.35773	-0.71554	-41.00288	

<표 5> 사례2의 SI 지수들

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



<그림 4> 사례1의 시간모의 결과

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

전력 산업의 구조 개편과 더불어 부하 수요의 지속적인 증가는 앞으로 안정도의 위협요소로 작용하게 될 것이다. 이에 따라, 과거 오프라인에서만 행해지던 과도 안정도 평가가 이제는 급전계획에 반영할 수 있도록 온라인으로 평가할 필요성이 대두되고 있다. 본 논문에서는 온라인으로 과도 안정도 평가를 하는데 있어서 가장 문제가 되고 있는 빠른 불안정 그룹 선별을 위하여 기존의 SI 지수와 에너지 함수방법을 이용하였다. 이로써 수분주기로 업데이트되는 급전 계획에서도 온라인 과도 안정도 평가를 가능하게 하는 Clustering 기법이 개발되었다. 본 논문의 알고리즘은 6기 10모선 계통을 통하여 사례연구를 하였고, 시간 모의 프로그램인 PSS/E를 가지고 검증하였다. 향후, 본 논문의 사례연구에 사용된 계통 보다 더 큰 규모의 계통을 가지고 사례연구를 하여 더 빠르고 정확한 알고리즘을 검토 및 수정하여야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] 이종석, "전력계통에서의 온라인 과도안정도 평가방법", 고려대학교 전기공학과 대학원. 2002. 12

[2] Edward Wilson Kimbark, "Power System Stability", John Wiley & Sons, Inc. 1947, chapter 4

[3] P. Kundur, " Power System Stability and Control", McGraw-Hill 1994, pp.831-835

[4] 김용학, "온라인 과도안전도 평가를 위한 새로운 고속 상정 고장 선택 및 여과 알고리즘", 전남대학교 전기공학과 대학원. 2005. 2

[5] A. A. Fouad, Vijay Vittal " Power System Transient analysis Using the Transient Energy Function Method", Prentice Hall 1992, chapter 3~4

[6] 김용수, "MATLAB 입문과 활용", 높이깊이 2003

[7] "SIMULINK-Using SIMULINK", MathWorks,Inc., 1997

[8] 김상복, 김창근, 박재홍 "배우기 쉬운 FORTRAN", 브레인코리아 2003