

온라인 과도안전도 평가 알고리즘 개발

김용학* 차승태* 김태균* 김홍균* 전명렬* 추진부* 남해곤**
한국전력공사 전력연구원* 전남대학교**

Development of on-line Transient Security Assessment Algorithm

Kim Y.H.* Cha S. T.* Kim T. K.* Kim H. K.* Jeon M. R. Choo J. B.* Nam H. K.**
Korea Electric Power Research Institute* Chonnam Univ.**

Abstract - This paper is to develop the fast screening algorithm for on line transient security assessment. All generators are represented in a classical model and stability index is defined as a ratio between acceleration power and deceleration power. Critical machines and remaining machines are identified based on stability index and aggregated into two equivalent machines. And finally equivalent machines are reduced into OMIB system then CCT is computed. The proposed algorithm is applied to the KEPCO system and obtained the reasonable results compared with TSA Tool.

하여 계산한다. 또한, 시영역모의에 필요한 계통 데이터는 EMS(Energy Management System)으로부터 온라인으로 취득한다. TSA에서 대부분의 CPU 시간이 시영역모의에 소요되므로, 시영역모의에 필요한 컴퓨터 CPU 시간을 경감할 수 있는 알고리즘의 구현이 온라인 TSA의 핵심 기술이다. 이를 위해서 현재 시영역모의의 조기종결 기능과 동기기의 고전모델과 같은 축약 모델이 널리 사용되고 있다. 즉, 계통규모에 관계없이 가능한 모든 상정사고에 대하여 실시간으로 안정도 마진을 계산하고, 사고복구를 위한 조치를 결정하기 위해서는 계산시간이 온라인 TSA의 중요한 성능지표가 될 수 있다.

1. 서 론

전력계통 규모의 확충과 대전력 수송 및 전력수송 밀도의 고도화가 진전됨에 따라 계통의 안정적인 전력공급을 위해서는 계통의 정밀한 안정성 감시 및 분석이 요구된다. 계통의 구조적인 문제점에 대한 보완 대책으로 일부지역에서는 모선분리 및 선로분리 등의 계통 구성 형태를 변경하여 운전 중에 있으며, 계통의 구조적인 취약 형태 극복 및 계통의 안정성 향상을 위해 신규 시스템 기술 도입 적용을 추진 중에 있다. 이러한 계통의 유기적인 운영을 위해서는 고속으로 안정도를 감시 및 분석하여 불안정 현상을 예측하고 대책을 제시하여 전력계통의 안정운용을 도모할 필요가 있다.

따라서 보다 안정한 계통운용을 위해서는 수시로 변동하는 계통 조건하에서 다양한 상정사고들에 대한 계통의 안정도를 평가할 수 있는 동적안전도평가(Dynamic Security Assessment)가 수행되어야 한다. 이러한 전력계통 동적안전도평가를 위해서는 시영역모의(Time-domain simulation)가 보다 편리하고 보편적인 방법으로 받아들여지고 있다. 시영역모의의 장점은 어떠한 전력계통에 대해서도 사용될 수 있고, 사고후 시간에 따른 물리적 현상을 자세히 알 수 있다는 장점이 있지만, 단순히 과도안전도에 대한 안정/불안정 여부를 결정하며, 불안정 요인/정도는 제시하지 못한다는 단점을 갖고 있다. 특히, 시영역모의는 계산시간이 많이 소요된다는 것도 문제점으로 대두되고 있다. 최근 전력산업계가 WSCC와 브라질 등에서 광역/정전사고를 겪고, 구조개편으로 계통운전 조건이 더욱 열악해지는 환경으로 인하여 선진국을 중심으로 광역의 온라인 DSA 시스템을 구축하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재, 이들 연구는 과도안전도 평가(Transient Security Assessment, TSA)가 주류를 이루고 있다. 지금까지 보고된 TSA에서는 많은 수의 미리 정해진 상정사고 목록에 대하여 시영역모의를 수행하고, 시영역 모의에서 얻을 수 없는 안정도 마진과 사고복구에 필요한 감도를 확장등면적법(Extended Equal Area Criterion, EEAC), 에너지합수법, 발전기 감속력 지표 등을 사용

2. 확장 등면적법에 의한 TSA

2.1 1기 무한모선 계통의 등면적 기준

그림 2.1은 1기의 발전기가 무한모선에 연결된 1기 무한모선 계통의 등면적 기준을 보여주고 있다. 점 A에서 평형상태로 운전되고 있던 계통에 사고가 발생하면, 발전기 출력은 B점으로 이동하고 AB만큼의 가속력이 작용되어 발전기 내부각은 증가하게 된다. 발전기 내부각이 C점에 도달한 순간 차단기의 개방에 의해 고장선로를 제거하면 발전기 출력이 증가하여 감속을 시작한다. 빗금친 면적 ABCD는 가속면적에 해당하고 DEF는 감속면적에 해당한다. 감속면적이 가속면적보다 크면 발전기는 새로운 평형점 H에 수렴하여 안정 운전된다. 만약 감속면적이 가속면적보다 작으면 내부각은 점점 증가하여 발전기는 불안정하게 된다. 가속면적과 감속면적이 같으면 임계상태로 안정/불안정을 결정할 수 없다. 임계상태에 이르는 고장제거 시간을 임계고장제거시간(Critical Clearing Time, CCT)이라 한다.

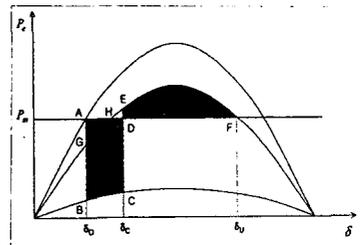


그림 2.1 과도안전도의 등면적 기준

고장시점에서 계통이 건전한 상태에 있으면 P-δ 곡선은 점 A를 통과하지만 고장선로를 개방하면 GHE를 통과하여 동기화력이 상당히 감소되고 계통의 과도안전도가 취약해짐을 알 수 있다. 건전한 계통의 동기화력 계수는 점 A에서 P-δ 곡선의 접선 기울기이며 사고선로가 개방된 사고후 계통의 동기화력 계수는 점 G에서의 P-δ

곡선의 기울기이다.

2.2 다기계통의 확장 등면적법

확장 등면적법에서는 정량적인 안정도 마진을 구하기 위해 고장지속시간을 CCT 보다 크게 증가하고 시영역 모의를 수행한다. 이때 발전기는 그림 2.2처럼 발산하는 그룹과 안정한 2개의 Coherent 그룹으로 분류된다. 각 그룹에 속하는 발전기는 각각 Coherent 그룹을 형성하므로 다시 가중 평균을 이용하여 각각 1기의 등가 발전기로 축약된다. 이와 같은 단계에서 계통은 Coherent 하지 않는 2기의 발전기로 축약된 상태이며, 다시 1기 무한모션(OMIB) 계통으로 축약된다. OMIB 계통의 안정도 마진은 잘 알려진 등면적법에 의하여 쉽게 계산될 수 있으며, 간략하게 요약하면 다음과 같다.

(1) 고장시간을 충분히 크게 하고, TDS에 의해 그림 2.2과 같은 각 발전기의 내부각 제적을 작성하고, 모든 발전기를 발산하는 그룹 R과 발산하지 않는 그룹 B로 분류한다.

(2) 각 그룹에 속한 발전기는 관성중심 원리를 이용하여 다음과 같이 각각 1기 발전기로 축약된다.

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

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

여기서, M은 발전기 관성계수, δ 는 발전기 내부각, k는 발전기 인덱스이다.

(3) 위 과정에서 축약된 시스템은 Coherent 하지 않는 2기의 발전기로 구성된다. 2기의 Coherent하지 않는 발전기를 OMIB 계통으로 축약하기 위하여, OMIB 계통의 발전기 내부각, 관성계수, 기계적 및 전기적 출력을 다음과 같이 정의한다.

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

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

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

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

위의 과정에 의해 계산된 OMIB 계통의 P- δ 간의 곡선을 작성하면 그림 2.3과 같다. 그림 2.3에서 A_1 은 가속 면적이며 A_2 를 감속면적으로 계통이 안정한 경우에는 A_1 이 A_2 보다 크며 불안정한 경우는 그 반대가 된다. 앞에서 기술한 바와 같이 EEAC법에서는 이 OMIB의 P- δ 간의 곡선을 이용하여 그림 2.3의 A_1 과 A_2 의 면적이 같아지는 CCT를 계산할 수 있다.

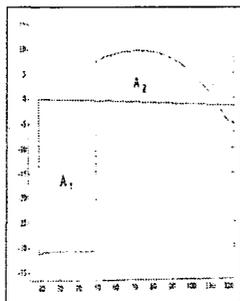
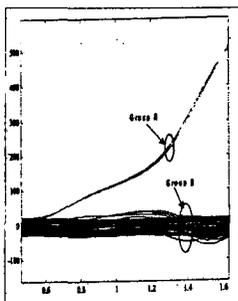


그림 2.2 과도안정도 TDS 그림 2.3 OMIB P- δ 곡선

3. 상정사고 선택 및 여과

3.1 안정도 지표에 의한 Critical Clustering

SIME법에서는 TDS에 의하여 2기 발전기 그룹간의 위상각 차이가 설정된 값을 초과하는 것을 관찰하여 계통을 발산하는 발전기그룹과 발산하지 않는 발전기 그룹으로 분류한다. 본 논문에서는 TDS를 수행하지 않고 상정사고의 여과를 하는데 있으며, 이를 위해선 발전기들을 TDS를 사용하지 않고 Clustering하여야 한다. 각 발전기가 발산하기 위해서는 각 발전기의 가속면적이 감속면적보다 커야 된다. 발전기가 불안정하기 위해서는 정상적인 계통이라면 우선 가속력이 크고 선로개방이 감속력의 크기에 큰 영향을 주어야 한다. 가속력이 커야 한다는 조건은 과도안정도는 발전기 인근의 선로고장에 영향을 받는 지역적 현상임을 의미한다. 위와 같은 관점에서 과도안정도에 크게 영향을 미치는 요소를 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 가속력: 그림 2.1에서 AB로 나타내지며 동기화력과 함께 과도안정도를 결정하는 가장 중요한 요소의 하나이다.

(2) 동기화력계수: 감속력은 동기화력 계수에 간접적으로 측정할 수 있다.

위의 해석에서 다음과 같은 Clustering을 위한 안정도 지표의 유도가 가능하다.

$$S_{\max} = \left(\frac{AB}{\text{SYNCF}} \right) \quad (2.7)$$

수식 (2.7)의 안정도 지표를 사용하여 Clustering을 다음과 같이 수행하였다.

(1) 조류계산으로 계통전압, 발전기 출력, 내부각 등을 결정한다.

(2) 발전기 내부각을 고정된 상태에서 상정사고에 대하여 네트워크 방정식을 풀어 발전기 출력을 결정한다.

(3) 고장상태에서 발전기 출력이 발전기 기계적 출력의 일정값 이하인 발전기를 임계 Cluster로 분류한다.

(4) 임계 Cluster에 속하는 발전기의 내부각을 모두 일정한 양만큼 증가시켜 동기화계수 "SYNCF"를 계산하고 식(2.7)의 안정도 지표를 계산한다.

(5) 임계 Cluster에 속한 발전기의 안정도 지표를 그 크기가 큰 순서로 배열하여 순위가 인접한 두 발전기의 gap이 가장 큰 발전기를 결정한다.

(6) 최대 Gap이 미리 정해진 값보다 크면 경계선보다 하위에 있는 발전기만을 임계 cluster로 정하고 단계 4를 수행한다.

(7) 최대 Gap이 정해진 값보다 작으면 안정도지표가 (최대 안정도 지표-일정값)보다 큰 발전기를 임계 cluster로 결정한다.

3.2 안정도 마진으로서의 CCT 결정

임계 cluster가 결정되면 안정도 마진으로 CCT를 결정하여야 한다. CCT가 차단기의 동작시간보다 크면 발전기는 안정하고 CCT가 차단기의 동작시간보다 작으면 발전기는 상정사고에 대하여 불안정하다. 따라서 CCT는 좋은 안정도 지표가 될 수 있다. CCT를 결정하기 위하여 고장선로를 개방한 상태에서 임계 cluster에 포함된 각 발전기의 내부각을 균등하게 증가시켜면서 네트워크 방정식을 풀면 이 cluster에 포함된 발전기의 전기적 출력과 내부각 사이의 관계가 얻어진다. 발전기 P- δ 곡선이 얻어지면 가속면적과 감속면적이 같아지는 임계각과 CCT를 Newton법으로 계산하는 것이 가능하다. 본 논

문에서는 계산편의상 고장상태에서 전기적 출력은 일정한 것으로 하였다. 발전기를 고전모델로 모의하였고 임계 cluster에 포함된 발전기의 내부각이 균등하게 증가한다는 가정하에서 얻어진 P- δ 곡선은 시간에 따른 발전기 내부각의 궤적과는 다를 수 있으므로 본 논문에서 계산한 CCT는 오차를 포함할 수 있지만, 제안된 알고리즘은 상정사고의 여과함으로써, SIME법에 필요한 주요 상정사고 목록을 제공하는데 목적이 있으므로 제안된 알고리즘에 의해 계산된 근사 CCT로 충분하다.

4. 사례분석

제안된 상정사고 선택 및 여과 알고리즘의 정확성을 확인하기 위해 2003년 한전계통의 첨두부하에 적용하여 검토하였다.

표 4.1 제안된 CS&S에 의한 CCG

상정사고		Critical Clustering Generator					
FROM	TO	기존 SIME		TSA		CS&S	
1500	5155	울진1-4 영동1,2 동해1,2 강릉1,2		울진1-4		울진1-4	
5150	5155	울진1-4	울진1-4	울진1-4	울진1-4	울진1-4	울진1-4
6100	6300	태안1-6	태안1-6	태안1-6	태안1-6	태안1-6	태안1-6
6450	6500	영광5,6		영광5,6		영광5,6	
7100	7600	영광1-6		영광1-6		영광1-4	영광1-4
7900	10400	여수1,2 호남1,2 하동1-6	하동1,2,3	여수1,2 호남1,2 하동1-6	하동1,2,3	여수1,2 호남1,2 하동1-6	하동1,2,3
8155	8500	함성1,2,3		함성1,2,3		함성1,2,3	
10150	10700	삼천포1-6	삼천포1-6	삼천포1-6	삼천포1-6	삼천포1-6	삼천포1-6

표 4.2 제안된 CS&S에 의한 CCT

상정사고		Critical Clearing Time(cycle)					
FROM	TO	기존 SIME		TSA		CS&S	
1500	5155	>20	9.5	>20	7.7	>20	10.3
5150	5155	9.2	9.3	7.6	7.5	11.7	11.7
6100	6300	9.0	10.4	8.8	9.2	11.9	13.1
6450	6500	16.7	>20	15.4	>20	17.3	>20
7100	7600	>20	14.6	19.6	15.1	>20	15.5
7900	10400	14.3	10.3	12.9	10.2	15.6	12.7
8155	8500	15.5	>20	13.3	>20	17.4	>20
10150	10700	8.4	12.5	8.9	12.0	12.8	15.8

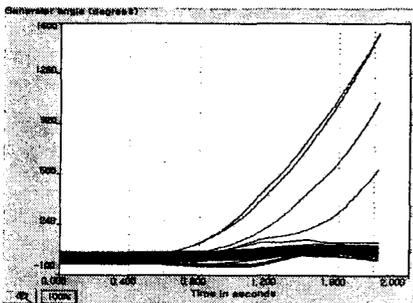


그림 2.4 상정사고(5150-5155)시 발전기 위상각

표 4.1에서는 체계적인 상정사고 선택법으로 결정된 181개의 상정사고에 대하여 CCG를 수행한 결과의 일부를 나타내고 있으며, 표 4.2에서는 CCT를 SIME법, TSA(Powertec) 및 제안된 CS&S 방법으로 계산한 결과를 보여주고 있다. 제안된 CS&S법으로 계산한 CCT가 SIME법 및 TSA를 이용하여 계산한 결과와 일치하

고 있어 제안된 방법이 과도안전도의 CS&S에 유용하게 적용될 수 있음을 보여주고 있다.

5. 결론

과도안전도평가(TSA)를 위해 TDS를 사용하지 않고 1기 등가법(SIME)을 모의하여, 안정도 지표로 임계고장제거시간(CCT)을 계산하는 방법을 개발하였다. SIME법에서는 고장제거시간을 CCT보다 크게 하고 TDS를 수행하여 각 발전기의 시간궤적을 구하고, 이를 사용하여 발전기를 발산하는 그룹과 발산하지 않는 2개의 Coherent 그룹으로 분류한 후, 다시 2개의 그룹의 발전기를 1기 무한도전(OMIB) 계통으로 축약하여 OMIB 계통의 전력-상차각 곡선을 작성함으로써, CCT를 계산한다. 이 방법은 신뢰성이 높고 효율적이며, 엔지니어가 단순히 고장제거시간을 변경하면서 TDS를 수행하여 CCT를 예측하는 방법보다 체계적으로 TSA를 수행할 수 있기 때문에, TSA 프로그램의 주종을 이루고 있다. 그러나 TDS를 사용하기 때문에 상당한 계산시간이 소요되어 온라인으로 사용하기 위해서는 주요 상정사고만을 미리 여과할 필요가 있다는 단점을 갖고 있다.

본 논문에서 제안한 CS&S법은 TDS를 사용하지 않고 SIME법을 모의하여 CCT를 계산한다. 모든 발전기를 고전모델로 표현하고, 사고가 발생한 순간의 가속력과 동기화 계수를 네트워크 방정식으로 풀어 결정한다. 가속력과 동기화 계수의 비를 안정도 지표로 하고, 이 지표에 따라 Critical Clustering을 수행함으로써, 발산하는 발전기 그룹을 결정하고 CCT를 계산한다. 제안된 알고리즘을 2003년 첨두부하 계통에 적용한 결과, 상세 발전기 모델을 사용하는 SIME법과 Powertech의 TSA 결과와 유사한 결과를 보여 CS&S 알고리즘으로 적합하였다.

[참고 문헌]

- [1] P. Kundur, G.K. Morison, L. Wang, "Techniques for On-line Transient Stability Assessment and Control," IEEE 2000 PES Winter Meeting, January 24-27, 2000, Singapore
- [2] G.K. Morison, H. Hamadanizadeh and L. Wang, "Dynamic Security Assessment Tools," IEEE 1999 PES Summer Meeting, July 18-22, 1999, Edmonton
- [3] C. W. Taylor, "The Future in On-line Security Assessment and Wide Area Stability Control," IEEE 2000 PES Winter Meeting, January 24-27, 2000, Singapore
- [4] Y. Zhang, L. Wehnel, M. Pavella, "SIME : A Comprehensive Approach to Fast Transient Stability Assessment", Trans. of IEE Japan, Vol.118-B, No.2, pp.127-132, 1998
- [5] Mania Pavella " Power system transient stability assessment - traditional VS modern methods" Control Engineering Practice 6, pp. 1233 ~ 1246, 1998