

온라인 동적 안전도평가 시스템의 개발

남 해근[†] 송 성근[†] 심 관식^{**} 문 채주^{***}
[†] 전남대학교 전기공학과 ^{**} 서남대학교 전기공학과 ^{***} 목포대학교 전기공학과

Development of On-line Dynamic Security Assessment System

[†]H. K. Nam [†]S. G. Song ^{**}K. S. Shim ^{***}C. J. Moon

Department of Electrical Engineering,

[†] Chonnam National University ^{**} Seonam University ^{***} Mokpo National University

Abstract: This paper presents a new systematic contingency selection, screening and ranking method for on-line transient security assessment. Transient stability of a particular generator is influenced most by fault near it. Fault at the transmission lines adjacent to the generators are selected as contingency. Two screening methods are developed using the sensitivity of modal synchronizing torque coefficient and computing an approximate critical clearing time (CCT) without time simulation. The first method, which considers only synchronizing power, may mislead in some cases since it does not consider the acceleration power. The approximate CCT method, which consider both the acceleration and deceleration power, worked well. Finally the Single Machine Equivalent (SIME) method is implemented using IPLAN of PSS/E for detailed stability analysis.

Keywords: transient stability, contingency screening and ranking, synchronizing power coefficient, critical clearing time, Single Machine Equivalent.

1. 서론

현대 전력산업은 '적은 투자로 더 많은 일을 수행'해야 하는 난제에 직면하고 있다 [1]. 부하가 지속적으로 증가하고 조류의 패턴이 바뀌는데도 이를 뒷받침하여야 하는 송전선로는 환경과 재정상의 이유로 부하의 증가속도로 새로 건설하는 것이 어렵다. 즉, 발전력 대비 송전용량은 지속적으로 감소하여 안정도마진도 감소되어 왔다. 다행히 최근까지 발전/송전/배전 업무가 한 전력회사에 통합 소유/운영되어 네트워크상의 제약을 극복하는 보수적 계획운전

이 가능하였고, 계통의 동적 안전도평가 (dynamic security assessment, DSA)를 off-line으로 수행하여도 무방하였다. 그러나, 최근 전 세계적으로 진행되고 있는 전력산업의 구조개편으로 전력은 입찰에 의해 결정되고 조류의 패턴은 예상할 수 없는 불확실성을 가지게 된다. 따라서 보수적 계획운전이 거의 불가능하여 계통의 안전도도 더욱더 위협받을 것으로 예상된다. 이러한 새로운 전력계통 운용환경 하에서 적절한 신뢰도를 확보하기 위한 온라인 DSA의 역할이 증대될 전망이다 [1-3].

DSA는 최악의 상정사고에 대하여 계통이 견딜 (tolerate) 수 있는지 여부와 또는 만약 견딜 수 없는 경우 계통이 붕괴되는 것을 방지하기 위하여 어떤 조치가 취해져야 하는지를 결정한다 [1-3]. 본 연구의 1차 년도에서는 과도/전압/미소신호 안정도 중에서 온라인 과도안전도 평가 (transient security assessment, TSA)을 위한 상정사고 선택 및 여과 알고리즘, 그리고 상세한 TSA 또는 상정사고의 순위결정 (ranking)을 위한 일기 등가 (Single Machine Equivalent, SIME)법을 개발한 결과를 기술하였다. 편의상 SIME법, 상정사고 여과, 상정사고 선택, 그리고 한전 계통에 적용한 사례연구의 순서로 기술한다.

2. SIME 법

SIME법에서는 일기무한모션 (OMIB) 계통에 적용되는 등면적 기준을 다기 계통에 확장한다 [4]. 이를 위해서 고장지속시간을 임계 고장제거시간 (CCT)보다 크게 주고 시간영역 모의를 수행한다. 이때 발전기는 그림 1(a)처럼 발산하는 그룹과 안정한 두 개의 coherent 그룹으로 나뉜다. 각 그룹에 속하는 발전기는 각각 coherent 그룹을 이루므로 다시 가중평균을 이용하여 각각 1기의 등가발전기로 축약된다. 이 단계에서 계통은 coherent하지 않은 두 기

의 발전기로 축약된 상태이며, 다시 OMIB 계통으로 축약된다. 이 OMIB 계통의 안정도마진은 잘 알려진 등면적법에 의하여 쉽게 계산될 수 있다. 그 과정을 간단히 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고장시간을 충분히 크게 하고 시간영역모의에 의해 그림 1(a)와 같은 각 발전기의 내부각 궤적을 그려, 모든 발전기를 발산하는 그룹 R 과 발산하지 않는 그룹 B 나눈다.
- 2) 각 그룹에 속한 발전기는 관성중심 원리를 이용하여 아래 식과 같이 각각 1기로 축약된다.

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

$$M_B = \sum_{k \in B} M_k \quad \delta_B \approx M_B^{-1} \sum_{k \in B} M_k \delta_k, \quad (2)$$

여기서 M 은 발전기 관성계수, δ 는 발전기 내부각, k 는 발전기 인덱스이다.

- 3) 위 과정에서 축약된 시스템은 coherent 하지 않은 두개의 발전기로 구성되어 있다. 두 개의 coherent 하지 않은 발전기를 OMIB 계통으로 축약하기 위하여 OMIB 계통의 발전기 내부각, 관성계수, 기계적 및 전기적 출력을 다음과 같이 정의한다.

$$\delta \approx \delta_R - \delta_B \quad (3)$$

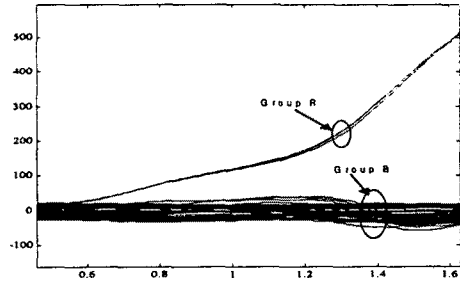
$$M = M_B M_R / (M_B + M_R) \quad (4)$$

$$P_m = M \left(M_R^{-1} \sum_{k \in R} P_{mk} - M_B^{-1} \sum_{j \in B} P_{mj} \right) \quad (5)$$

$$P_e = M \left(M_R^{-1} \sum_{k \in R} P_{ek} - M_B^{-1} \sum_{j \in B} P_{ej} \right) \quad (6)$$

위의 과정에 의해 계산된 OMIB 계통의 $P-\delta$ 간의 곡선을 그리면 그림 1(b)와 같다. 그림에서 A_1 은 가속 면적이며, A_2 를 감속 면적으로, 계통이 안정한 경우에는 A_1 이 A_2 보다 작으며, 불안정한 경우는 그 반대가 된다. A_1 과 A_2 의 면적이 같아 지는 CCT는 interpolation에 의해 계산하는 그 과정은 보고서에 기술되어 있다 [5].

(a) time simulation



(b) OMIB의 전력-상차각 곡선

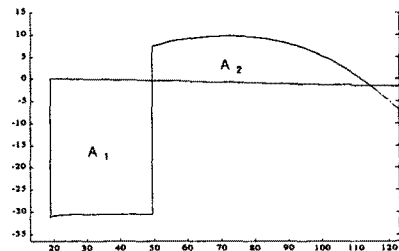


그림 1. 시간영역 해석 및 $P-\delta$ 곡선

3. 상정사고 여과

SIME법은 매우 신뢰도가 매우 높아 주요 상정 사고만을 정밀 해석하는데 최적으로 판단된다. 그러나 발전기 상세 모델을 사용하여 시간영역 모의를 필요로 하므로 많은 시간을 필요로 하는 단점이 있어 실시간 TSA를 위해서는 상정사고를 체계적으로 선택하고 이 중에서 과도안정도에 심각한 위협이 되는 주요 상정사고만을 여과하여 SIME법에 사용될 상정사고로 제공하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 동기화 토크계수 변동율과 시간영역 모의를 사용하지 않고 근사 CCT 값을 계산하는 두 가지 방법으로 상정사고를 여과하는 방법을 개발하였다. 동기화 토크계수 변동율에 의한 상정사고의 여과는 보고서에 기술한 단점을 가지고 있어 실용상 문제가 있었다 [5]. 여기서는 지면제약으로 두 번째 방법만을 기술한다.

3.1 Critical cluster

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. 위의 같은 관점과 그림 2의 OMIB 계통의 등면적 기준을 사용하

여 아래 식과 같은 critical clustering을 위한 안정도지표의 유도가 가능하다.

$$S_{inx} = (AB/SYNCF) \times (AG/P_m)^2 \quad (7)$$

위에서 AB는 가속력, SYNCF는 동기화력 (발전기가 얼마나 강하게 계통에 연결된 정도), $(AG/P_m)^2$ 은 선로의 개방에 의한 감속면적의 감소를 나타낸다.

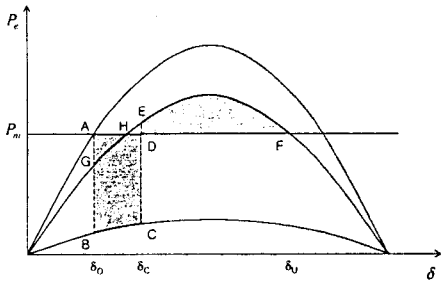


그림 2. OMIB계통의 등면적 기준

식 (7)의 안정도지표를 사용하여 critical clustering을 다음과 같이 수행하였다.

1. 조류계산으로 계통전압, 발전기 출력, 내부각 등을 결정한다. 발전기 모델은 고전모델을 사용한다.
2. 발전기 내부각을 고정한 상태에서 상정사고에 대하여 네트워크 방정식을 풀어 발전기 출력을 결정한다.
3. 고장상태에서 발전기 출력이 발전기 기계적 출력의 일정 값 이하인 발전기를 critical cluster로 분류한다.
4. Critical cluster에 속하는 발전기의 내부각을 모두 일정한 양만큼 증가시켜 동기화계수 "SYNCF"를 계산하고 식 (7)의 안정도지표를 계산한다.
5. Critical cluster에 속한 발전기의 안정도지표를 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 critical cluster로 정하고 단계 4로 간다.
7. 최대 gap이 정해진 값보다 작으면, 안정도지표가 (최대 안정도지표-일정값)보다 큰 발전기를 critical cluster로 정한다.

3.2 안정도마진으로서의 CCT 결정

Critical cluster가 결정되면 안정도마진으로 CCT를 결정하여야 한다. 발전기를 고전모델로 모의하고 부하를 일정 임피던스부하로 모의하면 각 발전기 또는 계통을 OMIB로 축약한 계통의 $P-\delta$ 곡선은 정현파로 나타내진다. 즉

$$\begin{aligned} P_e &= P_c + P_{\max} \sin(\delta - \nu) \\ &= P_c + K_1 \sin \delta + K_2 \cos \delta \quad (8) \end{aligned}$$

CCT를 결정하기 위하여 고장선로를 개방한 상태에서 critical cluster에 포함된 각 발전기의 내부각을 균등하게 증가시키면서 네트워크 방정식을 풀면 이 cluster에 포함된 발전기의 전기적 출력과 내부각 사이의 관계가 얻어진다. 초기 내부각 δ_0 에서의 데이터를 포함하여 4개의 상태에서 발전기출력과 내부각 사이의 관계가 얻어지면, 각 발전기에 대하여 최소자승오차 (least square error)법에 의하여 식 (8)의 계수를 얻는다. 발전기 $P-\delta$ 곡선이 얻어지면 가속면적과 감속면적이 같아지는 임계각 δ_c 와 CCT 값을 Newton법으로 계산한다.

3. 상정사고 선택

합리적으로 설계된 계통이라면 어느 정도의 동기화력을 가지므로, 특정 발전기의 과도불안정은 고장이 지속되는 동안 큰 가속력을 유발하는 발전소 인근의 선로고장이다. 결론적으로 과도안정도는 발전기 부근의 선로고장에 의하여 영향을 받는 지역적 현상이다. 이와 같은 과도안정도의 특성에 의하여 다음과 같은 체계적인 상정사고 선택이 가능하다.

그림 3은 전형적인 발전기와 네트워크의 연결 트리 (tree)를 보여주고 있다. 송전선로의 고장확률이 변압기에 비해 매우 크므로, 상정사고로 선로사고만을 고려한다. 일반적으로 발전기 모선에 가까운 곳에서의 고장이 가속력과 동기화력의 감소를 더 크게 하므로, 1번 모선에 연결된 발전기의 과도안정도 해석은 상정사고의 선택은 1번 모선에서 시작하여 네트워크 방향으로 이동하면서 차례로 선로들을 선택하면 된다. 예를 들면 발전기에 가장 가까운 선로 1-2와 1-3을 선택하고 앞에서 기술한 상정사고여과 방법으로 이들 선로고장에 대한 CCT를 계산한다. 만약 한 선로의 고장에 대한 CCT 값이 기준 값 이상으로 크면 그 선로 이후의 선로고장에 대한 CCT 값은 더 클 것이 예상되므로 이후의 선로는 더 이상

고려하지 않아도 된다.

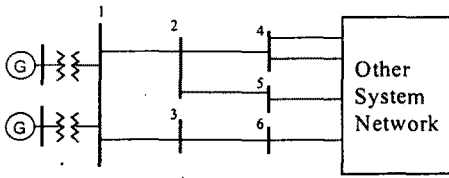


그림 3. 발전기와 네트워크의 연결구조

5. 사례연구

제안된 방법을 2003년 한전계통의 침두부하와 비침두부하의 두 경우에 대하여 시험하였으나 지면의 제약으로 비침두부하의 결과 중에서 과도안정도에 취약한 몇 개의 경우만을 발췌하여 표 1에 보였다. 표에서 "SIME"는 정확한 안정도 마진을 계산하기 위하여 발전기 상세모델을 사용하여 2절에서 기술한 SIME 법으로 계산한 CCT 값이고, "제안된 여과법"은 발전기 모델로 고전모델을 사용하고 3절에서 제안한 방법으로 계산한 CCT 값이다. 표의 "CCT" 열에서 "From"은 선로의 From 모선 쪽에 그리고 "To"는 To 모선에 3상 고장을 모의하고 CCT 값을 계산한 결과이다.

표 1. 2003년 한전계통의 TSA 결과

선로상정사고		CCT [cycle]			
모선 번호		SIME		제안된 여과법	
From	To	From	To	From	To
1500	5150		6.95	13.0	7.0
4400	6950	11.29	7.95	10.8	8.7
5150	5500	6.9	12.87	6.9	10.7
5150	5600	7.25	11.36	7.2	10.6
6450	7151	4.77	2.33	6.8	4.6
7100	7151	5.43	3.49	6.8	4.6
6020	6030	9.0	9.5	10.9	10.9

제안된 상정사고 여과방법으로 계산한 경우와 SIME법으로 CCT 값을 계산한 것이 대부분 잘 일치하고 있어 제안된 방법이 과도안전도의 상정사고 선택 및 여과에 유용하게 쓰일 수 있음을 보여주고 있다. 표 1에 표시하지 않았으나 영서 모선과 동서울에 연결된 선로의 사고 등 극히 일부 경우에 대하여 제안된 방법과 SIME 방법으로 계산한 CCT 값이 상당한 차이를 보이는데, 이는 제안된 방법이 어떤 경우에 불필요하게 많은 상정사고를 선택하는데 기인한다. 이들 사고에 대한 정확성의 개선 작업은

2차 년도에 다양한 안정도 지표를 시험하여 개선할 예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 대규모 전력계통의 온라인 DSA 알고리즘을 개발하기 위해 우선 온라인 TSA 알고리즘을 개발하였다.

과도안정도를 결정하는 중요 요소가 고장이 지속되는 동안의 가속적인 점에 착안하여, 발전기 모션으로부터 시작하여 네트워크 쪽으로 이동하면서 상정사고를 선택하고, 시간영역모의를 사용하지 않고 안정도 지표와 네트워크 방정식으로 근사 CCT 값을 계산하여 상정사고를 선택하고 여과하는 매우 효율적인 방법을 개발하였다. 이 방법은 한전계통의 약 270개 상정사고를 선택하고 여과하는데 1.2 GHz PC로 15초 정도 소요되어 온라인 TSA에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 정확한 TSA를 위해 PSS/E의 IPLAN을 사용한 SIME 법도 구현하였다.

2차 년도에는 TSA 상정사고 여과하는 방법의 신뢰도를 높여 TSA를 완성하고 전압안전도평가를, 3차 년도에는 미소신호안전도 평가 알고리즘을 개발하여 종합적 온라인 DSA 알고리즘의 개발을 완성한다.

참고문헌

- [1] 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
- [2] G. K. Morison, H. Hamadanizadeh and L. Wang, "Dynamic Security Assessment Tools," IEEE 1999 PES Summer Meeting, June 18-22, 1999, Edmonton
- [3] 남 해곤, 송 성근, 새로운 전력계통 운용환경에서의 온라인 동적 안전도 평가의 역할, 전기학회지, 49권, 3호, pp 4-11, 2000. 3.
- [4] Y. Zhang, L. Wehenkel, P. Rousseaux and M. Pavella, "SIME: a Hybrid Approach to Fast Transient Stability Assessment and Contingency Selection," Int. Journal of EPES, Vol. 19, No. 3, 1997, pp. 195-208
- [5] 남 해곤, 온라인 동적 안전도 평가 시스템의 개발에 관한 연구 (중간보고서), 기초전력공학공동연구소, 2001. 9.