

개선된 SIME법을 이용한 과도 안정도 평가

이종석* 안태형 양정대 이병준 권세혁
고려대학교 전기공학과

Transient Stability Assessment Using Improved SIME

Jongseock Lee*, Taehyung Ahn, Jungdae Yang, Byongjun Lee, Sae-Hyuk Kwon
Dept. of Electrical Engineering, Korea University

Abstract - The Single Machine Equivalent (SIME) is a hybrid method resulting from the coupling of a time-domain program with the equal-area criterion. This paper presents the efficient filtering algorithm using improved SIME for Transient Stability Assessment. The main feature of the method is cascading contingency filtering. First contingency filtering is conducted by using the first-swing stability of equivalent One Machine Infinite Bus(OMIB) system. This stability is evaluated by checking its time trajectory. Selected cases through the first step are assessed on the second step using SIME under the detailed model of power systems. The efficiency of the algorithm is tested on PSS/E test system.

1. 서 론

전력 계통 과도 안정도 평가는 계통운용과 계획을 위한 지수로서 사용된다. 이러한 평가를 위해 시간 모의법이 편리하고 보편적으로 받아들여지고 있는데 이 방법은 어떠한 전력계통 시스템 모델에 대해서도 사용될 수 있고, 사고 후 시간에 따른 물리적 현상을 자세히 알 수 있다는 장점이 있다. 하지만 단순히 과도안정도에 대한 안정, 불안정 여부만을 알려주며 어떠한 파라미터에 의해 불안정해지는지, 그리고 (불)안정의 정도는 어느 정도인지는 제시하지 못하며 계산시간이 많이 소요된다는 문제점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해 direct Lyapunov-like methods 가 60년대 초반부터 개발되기 시작했다. 그 중 과도에너지함수법의 개발이 유력하게 진행되어왔으며 80년대 중반 등면적법에 근간을 둔 직접법(EEAC : Extended Equal Area Criterion)이 개발되기 시작했다. 이후 EEAC와 시간 모의 방법의 장점을 취한 Single Machine Equivalent(SIME)법에 대한 연구가 활발히 진행중이다.

온라인 과도 안정도 평가를 위해서는 각 상정사고에 대해서 안정도를 평가하여 심각한 상정사고들을 선별하는 스크리닝 방법이 매우 중요하다. 기존의 EEAC에 의한 스크리닝 방법은 한 상정사고에 대해, 임계사고제거 시간을 반복 계산하여 연관발전기 그룹을 나누기 때문에 매우 많은 계산 시간을 필요로 한다.(3)

SIME법은, EEAC와 시간 영역 시뮬레이션의 장점을 취함으로써 보다 빠르게 과도 안정도 한계를 구할 수 있으며, 안정도 마진 또한 계산할 수 있다. 하지만 SIME법에 의한 스크리닝 방법은, 지수로서 사용되는 임계사고제거시간(CCT : Critical Clearing Time)을 구하기 위해 보다 긴 시간 모의를 필요로 하며, 상정사고가 안정한 경우에는 등가 1기 무한 모한모션(OMIB : One Machine Infinite Bus)의 구성을 위한 발전기

그룹핑이 되지 않아 다시 불안정한 경우를 모의하여 그 결과에 의한 발전기 그룹핑을 이용해야 하므로 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다.

본 논문에서는 개선된 SIME법을 스크리닝 방법으로 이용함으로써 기존의 SIME법을 이용한 2단계 스크리닝에 의한 과도 안정도 평가 시간을 단축하고자 한다.

위상각 증분과 속도 증분을 이용하여 사고에 대해 동요를 보이는 발전기들을 그룹핑함으로써 상정사고가 안정한 경우 기존 SIME법이 갖는 발전기 그룹핑문제를 해결하고자 한다. 또한 시간 모의 초기 단계에서 회귀각을 찾아내어 안정, 불안정 여부를 판별함으로써 스크리닝을 위한 첫 번째 필터로서의 역할을 하도록 하였다. 다음 단계에서 상정사고의 상세모델링에 의한 SIME법을 스크리닝 필터로 사용함으로써 기존의 SIME법이 시간이 많이 소요되는 안정한 상정사고를 고려하지 않아도 되도록 하였다.

개선된 SIME법에 의한 상정사고 스크리닝 방법은 고속으로 상정사고를 선별해낼수 있기 때문에 온라인 과도 안정도 평가에 유용하게 응용될 수 있다.

2. SIME (Single Machine Equivalent)

과도 안정도 평가를 위해 실제로 사용하게 되는 안정도 한계는 전력한계(송전전력 또는 발전전력 한계)와 임계 사고 제거 시간(CCT)이다. 이러한 안정도 한계를 구하기 위한 SIME법의 일반적 단계는 다음과 같다.[1-2]

- ① 초기 안정도 수준의 선택
 - 시간 모의 결과 계통이 불안정해지도록 충분히 큰 CT(clearing Time) 설정
- ② 시간 모의 결과가 안정
 - 상정사고는 안정한 것으로 분류
- ③ 시간 모의 결과가 불안정
 - 등가 OMIB로 구성, 음의 불안정 이득을 구함
- ④ 새로운 안정도 수준의 선택
 - 초기 안정도 수준보다 10% 낮게 CT를 설정
- ⑤ 등가 OMIB를 구성, 안정도 판별
 - 불안정: 음의 불안정 이득 계산
 - 안정: 회귀각(δ_r)을 구하고 불안정 위상각(δ_u)을 추정, 양의 안정이득 구함
- ⑥ 안정도 한계(CCT나 전력한계) 계산
 - 보간법으로 이득 $\eta=0$ 이 되는 안정도한계 계산
- ⑦ 안정도 한계의 결정
 - 두 번 구한 안정도 한계의 차이가 일정 범위 안에 들면 그것을 주어진 상정사고에 대한 안정도 한계(CCT나 전력한계)로 결정
 - 일정 범위내에 들지 않는다면 새로운 안정도 수준을 선택하여 ⑤,⑥의 과정을 반복

이상의 과정을 그림으로 나타내면 그림1과 같다.

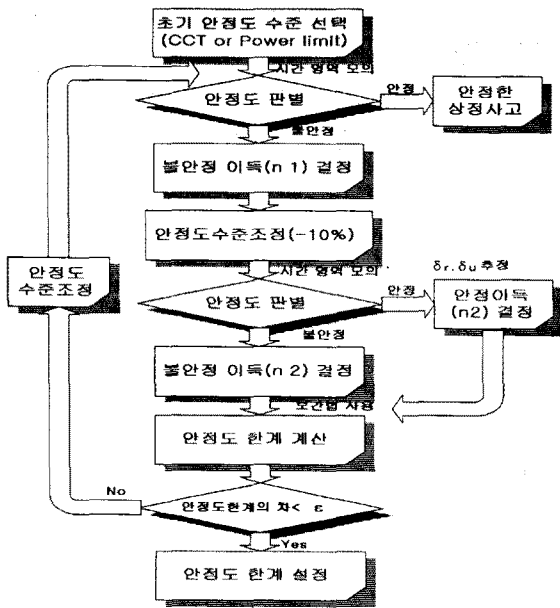


그림 1. SIME법에 의한 안정도 한계 설정 과정

3. 개선된 SIME(4)

기존의 SIME법에서 등가 1기 무한모션 구성을 위한 발전기 그룹핑은 불안정한 시간모의를 전제로 하고 있다. 그러나 시간모의가 안정한 경우, 그 자체로는 발전기 그룹핑이 불가능하므로 등가 1기 무한모션을 구성하지 못하고 장시간의 시간모의를 수행하게 된다. 이러한 경우에는 동일한 상정사고에 대해 좀더 불안정한 조건을 고려하여 다시 시간모의를 수행하고 그때 얻어진 발전기 그룹핑 결과를 이용할 수 밖에 없다.

이러한 문제점은 SIME법이 발전기 그룹핑 방법으로 최대 위상각차를 이용하기 때문이다. 최대 위상각차는 시간영역모의결과가 확실히 불안정한 경우에만 적용할 수 있다. 따라서 극심한 안정도 조건을 고려했음에도 불구하고 모의결과가 안정한 경우, 사용할 수 없는 한계를 가지고 있다.

이와 같은 문제점들을 개선하기 위하여 시간모의 초기 단계에서 위험 발전기를 찾아내는 새로운 그룹핑 방법을 사용한다. (4) 위상각 증분(Angle Increment : AI)과 속도 증분(Speed Increment : SI)은 사고 후 가속된 발전기들의 회전자 각도와 속도를 관찰하여 상대적으로 많이 가속된 발전기들을 찾아내는 지수로서 어느 한 발전기가 다른 발전기들에 비해 더 많이 가속되는 경우 양의 값을 갖게 되며 덜 가속되는 경우에는 음의 값을 갖게 된다. 이 지수에 의해 결정된 발전기 그룹은 1기 무한모션으로 변환된다.

또한 기존의 SIME법이 안정한 상정사고의 경우에 장시간의 시간 모의를 하는 것을 개선하기 위하여 시간모의중 회귀각(δ_r)이 존재하는 경우 즉시 시간모의를 중지하고 등면적법에 의해 안정 이득을 계산하도록 하였다. (4)

4. 상정사고 스크리닝

과도 안정도 평가의 목적은 가능한 모든 상정사고에 대해서 가장 불안정한 상정사고를 선별해 내어 그 상정

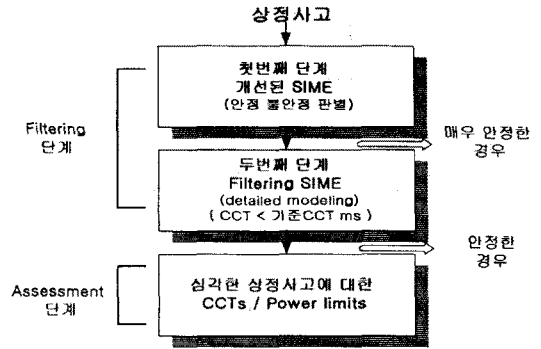


그림 2. 상정사고 스크리닝

사고에 대한 상세한 시간 모의를 통해 향후 발생할 사고에 대처할 데이터를 확보하고 안정도 한계를 정하는데 있다. 이러한 과도안정도평가의 신속성을 위해서는 수많은 상정사고에 대해 불안정한 경우만 선별하기 위한 과정이 매우 중요하다.

본 논문에서는 상정사고 스크리닝을 위한 제1필터로서 위상각 증분과 속도 증분을 이용하여 사고에 대해 동요를 보이는 발전기들을 그룹핑하고 시간 모의 초기 단계에서 회귀각을 찾아내어 안정, 불안정을 찾아내는 방법을 사용하였다.

새로운 발전기 그룹핑 지수는 불안정한 상정사고에 대해 탈조 발전기를 정확히 예측할 수 있으며, 안정한 경우에도 적절한 등가 1기 무한모션을 구성할 수 있으므로 기존의 SIME법에서 반드시 극심한 안정도 조건을 고려해야 하는 번거로움을 덜 수 있다.

또한 시간모의 초기단계에서 등가 1기 무한모션을 구성함으로써 안정도 판정을 보다 신속하게 내릴 수 있게 하였다. 이는 기존의 SIME법이 안정한 상정사고의 경우 장시간의 시간모의를 했던 것에 비해 월등히 속도를 향상시킨 것이다.

제2필터로서는 앞 절에서 설명한 상세모델링에 의해 SIME법에서 구한 CCT를 사용한다. 제1필터에 의해 안정한 상정사고는 배제됨으로써 기존 SIME법의 안정한 상정사고에 대한 발전기 그룹핑 문제와 장시간 시뮬레이션문제를 해결하고, 선별된 불안정한 경우에 대해서만 SIME법을 적용하면 되므로 안정도 한계를 구하기 위한 속도가 매우 개선되게 된다. 제2필터는 선별된 상정사고에 대해 상세 모델링의 SIME법을 적용하여 CCT를 구한 다음, 그 값이 기준 CCT값 이하일 때 보다 심각한 상정사고로 분류한다. 이 과정에서 구한 심각한 상정사고의 안정도한계를 과도안정도 평가를 위한 지수로서 사용한다. 이상의 상정사고 스크리닝을 위한 단계를 그림 2에 보였다.

5. 사례연구

본 논문에서 제안한 상정사고 스크리닝 방법을 그림 3에 보인 6기 20모션 시험계통에 대해 검증하였다. 시간모의 프로그램은 PSS/E-26을 사용하였다. 모의에서는 0.0083초의 시간 스텝(time step)을 사용하였으며 상정사고는 가장 심각한 사고인 3상 지락사고를 고려하였다.

스크리닝과정중 제1필터에서는 CT 값에 의해 선별되는 상정사고의 개수가 달라질 수 있으므로 사고 발생후 각 발전기 위상각의 최대차가 200° 이상 벌어지는 시간을 CT로 삼아 가장 큰 필터로서의 역할을 하도록 했다. [1]

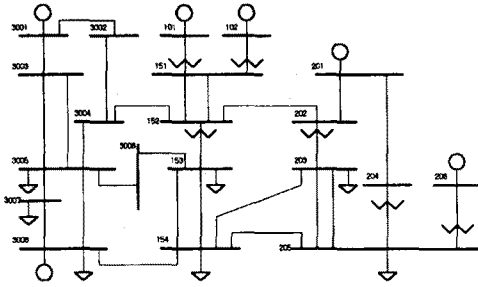


그림 3. 6기 20모선 시험계통

표1은 6기 20모선 시험계통에서 다양한 상정사고들을 제1필터에 의해 스크리닝한 결과이다. 고려된 상정사고의 위치는 주요 2회선 선로, 1회선 선로, 모선이다. 사고후 발전기 위상각의 최대차가 200° 이상 벌어지는 시간 t_{200} 를 보면, 결과가 나오지 않는 1,2,7번 사고는 사고후에도 위상각 차가 벌어지지 않아 매우 안정했으며 모의결과 불안정한 것으로 판정된 5,6번 사고의 경우 발전기 위상각이 심각하게 벌어질때까지 많은 시간이 소요됨을 알 수 있다. 이러한 경우 기존의 SIME법을 사용할 때 전체 CCT를 구하는 시간이 매우 길어질 수 있으나 본 논문에서의 개선된 SIME법에 의해 초기 시간 모의에서 발전기 그룹핑을 함으로써 속도 향상을 시킬 수 있었다.

본 사례연구에서는 시험 계통이 매우 안정하기 때문에 불안정한 경우를 만들기 위해 사고지속시간은 0.4초로 일반적인 값보다 크게 가정하였다. 발전기 그룹핑은 사고제거 후 0.2초 후(0.6초)에 이루어졌다.

제2필터에서는 제1필터에서 스크리닝된 불안정한 상정사고(5번, 6번)에 대해서 상세모델링에 의한 SIME법을 적용하여 CCT를 구하였다.

표 1. 제1필터에 의한 상정사고 스크리닝 결과

사고 번호	사고위치	발전기 그룹	판정 결과	t_{200} (sec)
1	203	3, 4	안정	-
2	154	4	안정	-
3	152-153	3	안정	0.5583
4	202-203	3	안정	0.7167
5	3003-3005	5	불안정	1.3330
6	3001-3003	5	불안정	1.2583
7	203-205	3, 4	안정	-
8	3001-3002	5	안정	1.2583

표 2. 상정사고별 CCT

사고 번호	사고위치	CT (sec)	이득 η	CCT (sec)	t_k (sec)
5	3003-3005	0.400	-12.4053	-	0.7003
		0.360	0.2899	0.3609	0.7500
6	3001-3003	0.400	-52.7313	-	0.5507
		0.360	-29.2606	0.3101	0.5955
		0.330	-6.9031	0.3207	0.7305
		0.321	-2.2473	0.3167	0.8648

표2에서 보는 바와 같이 5번 상정사고의 경우 CT를 0.4초로 주었을 때 불안정 이득 -12.4053을 얻었으며, 다음 시간 모의에서 안정도 수준(CT=0.4초)을 초기 안정도 수준보다 10% 낮게 하여 CT를 0.360초로 주었다. 이때는 안정 이득 0.2899를 얻었으며 이득 η 가 0 이 되는 안정도 수준을 내삽법에 의해 결정하여 5번 상정사고의 CCT 0.3609초를 구하였다. 6번 상정사고의 경우 초기 CT값이 0.4초일 때 불안정 이득 -52.7313을 얻었고 정확한 값을 구하기 위해 계속 10%씩 낮추어 외삽법에 의해 CCT를 구하였다. 마지막에는 보다 정확한 CCT를 구하기 위해 전단계에서 구한 CCT를 CT로 정해 시간 모의를 하여 6번 상정사고에 대한 CCT 0.3167초를 구하였다.

6번 상정사고의 CCT는 0.3167초로서 5번 상정사고 CCT 0.3609초보다 작음을 알 수 있다. 이로써 6번 상정사고가 5번에 비해 심각한 사고임을 알 수 있다. 제2필터에서는 기존의 CCT와 각 상정사고의 CCT를 비교하여 보다 심각한 사고를 선별해 내도록 하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 개선된 SIME법을 적용하여 가능한 모든 상정사고에 대해 보다 심각한 상정사고를 고속으로 스크리닝해 내는 방법을 제안하였다.

기존의 SIME법에 의한 스크리닝 방법은, 안정한 상정사고에 대해서는 발전기 그룹핑을 할 수 없기 때문에, 불안정한 사고가 되도록 다시 안정도 수준은 조정하여 발전기 그룹핑을 하고 있으며 또한 장시간의 시간 모의를 하여야만 한다.

본 논문에서 제시한 개선된 SIME법은 안정한 상정사고에 대해서 발전기 그룹핑 문제 뿐 아니라 시간 모의 초기에 안정도를 판정함으로써 뒤이은 스크리닝 과정에서 불안정한 경우에 대해서만 기존의 SIME법을 적용토록 하였다.

이로써 기존의 SIME법에 의한 상정사고 스크리닝보다 월등히 속도를 향상시킬 수 있었다.

이 방법은 고속으로 수많은 상정사고를 선별해냄으로써 온라인 과도 안정도 평가에 적합하리라 생각된다.

스크리닝후 심각한 상정사고에 대해서 보다 정확한 안정도 한계를 구하기 위해서는, 안정마진을 구하기 위한 δ_c 를 정밀하게 추정하여야 하는데 이러한 추정기법의 개선과 1차동요에서는 안정하다가 2,3차 동요에서 불안정해지는 멀티스윙에 대한 연구가 향후에 심도있게 이루어져야 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] Y. Zhang, L. Wehnkel, M. Pavella, "SIME : A Comprehensive Approach to Fast Transient Stability Assessment", Trans. of IEE Japan, Vol.118-B, No.2, pp.127-132, 1998
- [2] Y. Zhang, L. Wehnkel, P. Rousseaux, M. Pavella, "SIME : A Hybrid Approach to Fast Transient Stability Assessment and Contingency Selection", Electric Power & Energy Systems, Vol.19, No.3, pp.195-208, 1997
- [3] M. Pavella, P. G. Murthy, "Transient Stability of Power Systems", John Wiley, 1994
- [4] 안태형, 이병준, 권세혁, "SIME법의 과도 안정도 판정속도 향상을 위한 새로운 발전기 그룹핑 방법", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 1999