대규모계통 과도 안정도 평가를 위한 상정사고 고속스크리닝 알고리즘

양정대* 이종석 이병준 권세혁
고려대학교 전기공학과
이경극**
한국전력공사 전력연구원**

A Fast Screening Algorithm for Transient Stability Assessment of Large Power Systems

Jungdae Yang*, Jongseock Lee, Byungjun Lee, Sae-Hyuk Kwon, Lee koungguk**
Dept. of Electrical Engineering, Korea University, KEPRI KEPCO**

Abstract - Transient Stability of a power systems is its ability to maintain synchronous operation of machine when subjected to a large disturbance. This paper presents a new methodology for speed-up transient stability evaluation in SIME. SIME is a hybrid direct method including time simulation to enhance flexibility.

It is difficult to apply the classical SIME to stable cases. To solve this problem, we propose the improved SIME, applicable to stable cases as well as unstable cases. For more fast screening, a reduced order equivalent generator is used in the first step process

1. 서 론

오늘날 전력계통은 경제적 또는 환경 적인 이유로 증설보다는 기존의 계통을 최대한 효과적으로 이용하려는 노력으로 안정도 한계에 가까운 무리한 조건하에서 운전되고 있는 상황이다. 그러므로 수시로 변하는 계통의 조건하에서 다양한 상정사고에 대한 안정도 평가를 수행할 수 있는 동적 안전도 평가(Dynamic Security Assessment)가 수행되어야 한다.

전통적으로 이러한 평가를 위해 시간 모의법(Time-simulation)이 보편적인 방법으로 받아들여지고 있다. 이 방법의 장점은 어떤한 계통에도 바로 적용할 수 있다는 점이고, 단점은 계산시간이 많이 소요되며 안정도 마진을 구할 수 없어 상정사고 스크리닝 도구로 이용할 수 없다는 것이다.

이런 단점들을 극복하기 위해 1960년대부터는 Lyapunov-like direct methods가 개발되기 시작했으며 이 방법으로 과도 안정도 한계와 감도해석에 필요한 안정도 마진의 계산이 가능하게 되었다. 이런 직접법은 1980년대 중반에 등면적법에 근간을 둔 (EEAC : Extended Equal Area Criterion)방법으로 개발되기 시작했다. 이런 직접법의 장점은 시간모의에 비해 계산시간을 단축한 것이며 단점은 계통의 유연성과 정확도면에 한계를 가지고 있다는 것이다.

현재에는 컴퓨터 계산능력의 향상에 힘입어 시간모의법과 직접법을 통합함으로써 상세한 계통 모델에 대한 자세한 해석을 할 수 있게 되었다. 최근 들어 개발된 SIME(SIngle Machine Equivalent)법도 이에 속한다. SIME은 많은 시간의 시간모의를 필요로 하는 것과 안정한 경우에 발전기 그룹핑의 어려움이 있다.[1]

본 논문에서 시간모의 법의 많은 계산시간과 SIME법의 안정한 경우에 그룹핑을 못하는 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 방법을 제안한다.

첫째, 시간모의의 안정도 평가 시 시간 단축을 위해 계통의 같은 모선에 연결된 발전기를 대표 발전기로 등가 축약한 발전기축약법을 이용해 계산 시간을 단축하였다.

둘째, SIME법과 달리 시간모의 초기단계에서 발전기들을 그룹핑 하여 1기 무한모선으로 구성하고 시간모의에서 그 시간궤적(Time Trajectory)을 관찰함으로써 안정도 판정을 보다 신속하게 수행함과 동시에 안정한 경우에도 그룹핑이 가능하게 하였다.

PSS/E 26을 사용하여 2010년 계획계통 272기 1119모선과 이것을 축약한 105기 927모선에 위 방법을 적용하여 본 논문에서 제안한 방법을 검증하였다.

2. SIME

2.1 SIME의 개요[2]

SIME법은 시간영역 모의를 조기에 종료하고 계통을 등가 1기 무한대 계통으로 변환 한 후 등면적법을 이용, 안정도 한계(CCT : 계통에 사고가 주어졌을 때 발전기들이 동기를 잃지 않고 운전할 수 있는 최대 사고 지속시간)를 계산하여 안정도를 평가한다. 여기에서 SIME법에 의한 과도 안정도 한계 설정 과정을 살펴보면 그림 1과 같다.

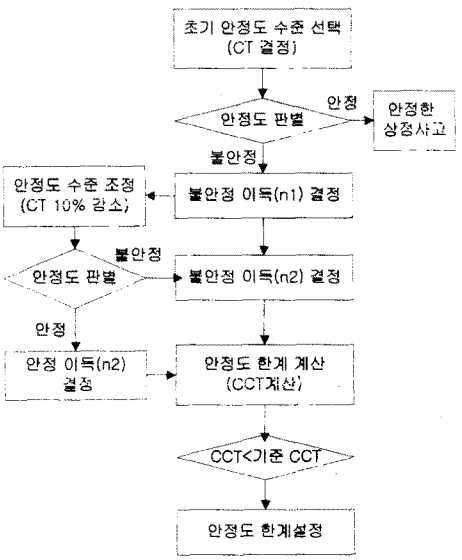

그림1. SIME법에 의한 과도 안정도 한계 설정 알고리즘

2.2 개선된 SIME

본 논문에서는 기존의 SIME법에 다음 두 가지를 추가하였다.

첫째, 앞에서 언급한 SIME법이 안정한 경우에 그룹핑을 하기 어렵다는 점을 개선하기 위한 것으로 위상각 증분(Angle Increment : AI)과 속도증분을 이용한 방

법이고, 두 번째는 SIME법 내에서 안정도 판별 시 계산 속도를 줄이기 위해 발전기 축약을 이용하는 방법이다.

2.2.1 위상각과 속도 증분을 이용한 방법

사고 후 가속된 발전기들 회전자의 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 음을 값을 갖게 된다. 위상각 증분은 식(1)과 같이 표현된다.[3]

$$AI_i = (\delta_{ci} - \delta_{oi}) - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\delta_{ci} - \delta_{oi})}{n} \qquad (1)$$

δ_{oi} : 사고 전의 각 발전기의 위상각
δ_{ci} : 관찰시각에서의 각 발전기의 위상각
n : 발전기수

2.2.2 발전기 축약

연관 발전기 그룹이 결정된 후, 각 발전기 그룹에서 기준 발전기에 대해 나머지 발전기들이 부하와 발전력을 합하여 등가 발전기를 구성하게 된다. 즉, 발전기들은 하나 또는 몇 개의 등가 발전기로 통합된다.

그림2에서 동일 모선에 연결된 발전기 G1,G2,G3가 있다고 할 때 이 세 발전기의 P값이 같더라도 제어기의 타입이 같아야 축약할 수 있다. 즉, G2,G3의 제어기(Exciter, Governor)의 타입이 같고 G1만 제어기 타입이 G2,G3와 다르다고 하자, 그러면 G2,와 G3은 G2′로 축약되고 전체 발전기는 그림2와 같이 G1,G2′만 남는다. 이때 축약된 발전기의 P값은 BASE값을 고려해 더하면 된다.

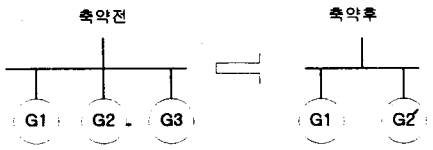

그림2. 발전기축약

3. 상정사고 스크리닝

과도 안정도 평가의 목적은 가능한 모든 상정사고에 대해서 가장 불안정한 상정사고를 선별해 내어 그 상정사고에 대한 상세한 시간모의를 통해 향후 발생할 사고에 대처할 데이터를 확보하고 안정도 한계를 정하는데 있다. 이러한 과도 안정도 평가의 신속성을 위해 아주 안정한 사고를 빨리 선별하여 이 상정사고에 대한 시간모의를 피하고 불안정한 사고에 대해서만 시간모의를 하는 것이 중요하다. 이것을 상정사고 스크리닝이라 한다.[4]

본 논문에서는 상정사고 스크리닝을 위한 제 1필터로서 위상각 증분과 속도증분을 이용하여 발전기를 그룹핑하고 시간모의 초기 단계에서 회귀각을 찾아내어 안정·불안정을 찾아내는 방법을 사용하였다. 이때 그룹핑과 안정도 계산 시 시간단축을 위해 발전기 축약을 동시에 사용하였다.

속도, 위상각 증분을 이용한 그룹핑으로 장시간의 시간모의를 피하고 안정한 경우에도 그룹핑이 가능해 졌으며 입력데이터의 발전기 개수를 줄여서 계산 시간을 크게 단축시켰다. 이는 기존의 SIME법에 비해 월등히 속도

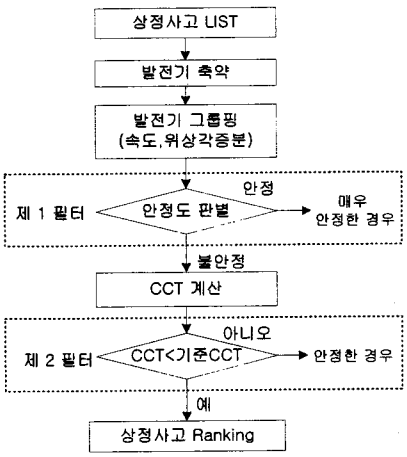

그림3. 상정사고 스크리닝

를 향상시킨 것이다. 스크리닝을 위한 제1 필터와 제2 필터의 역할과 기본개념은 그림 3과 같다.

4. 사례연구

본 논문은 제안한 방법을 2010년 계획계통 272기 1119모선과 이를 축약한 105기 972모선 계통에 대해 검증하였고 시간 모의 프로그램으로는 PSS/E-26을 사용하였다. 시간스텝은 0.0083초 시간간격을 사용했으며 상정사고는 3상 지락사고를 고려하였다. 이때 고려된 상정사고는 발전기 근처의 선로로써 상정사고 발생 시 계통에 아주 큰 영향을 미치는 것 17가지(상정사고모의1)와 345kv 선로 136가지(상정사고모의2)를 뽑아서 사용하였다. 2010년 계획계통이라 전체적으로 매우 안정하므로 사고지속 시간은 200ms로 아주 크게 주었고 발전기 그룹핑은 사고가 제거되고 난 후 200ms에 이루어졌다.

4.1 안정도 판정 및 그룹핑 결과 비교

표 1. 시뮬레이션결과(105기)

Case No	사고위치	제안한 방법		시간모의	판정결과
		t_r	t_u	t_{200}	
1	5150-5100	0.4996		0.6059	안정
2	5100-5010	0.4415		-	안정
3	5150-5600	0.5079		0.6059	안정
4	5600-5450	0.3743		0.7553	안정
5	5151-5500	0.4581		0.5727	안정
6	5500-5700	0.3660		0.7055	안정
7	5500-8450	0.3660		0.7055	안정
8	7150-7300		0.2996	0.4648	불안정
9	7300-7600	0.3909		0.7885	안정
10	10150-10250		0.3909	0.5810	불안정
11	10150-10600		0.3743	0.5810	불안정
12	10150-10700		0.3660	0.5810	불안정
13	10400-7900		0.3743	0.5893	불안정
14	7900-7100		0.3494	0.7221	불안정
15	7900-7250		0.3743	0.7221	불안정
16	10401-10301		0.3577	0.4645	불안정
17	10301-8800	0.366		0.6806	안정

표 1에서는 272기 1119모선을 축약한 105기 계통을 가지고 제안한 방법과 시간모의 방법으로 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. 시간 모의 법에서 그룹핑 시점은 최대 위상각차가 200도 벌어질 때이다. 여기에 나타나듯이 제안한 방법(속도, 위상각 증분이용)은 시간모의법과 안정도 판정결과는 모두 일치한다. 그리고, 시간모의법 보다 발전기 그룹핑 시점을 최대 0.3553초, 최소 0.0645초 앞당겼다. 안정한 상정사고를 빨리 찾아내는 상정사고 스크리닝 툴로써 충분한 역할을 한다고 할 수 있다.

표2는 표1의 판정결과 불안정한 상정사고에 대해서 기존의 SIME법과 제안한 방법(속도, 위상각 증분법)의 그룹핑 결과를 비교한 것이다. 제안한 방법은 다시 272기와 105기에 나우어 적용하였다. 기존의 SIME법과 272기는 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 105기와 차이가 나는 것은 발전기 축약과정에서 없어진 발전기들이며 이것은 대표 발전기가 대신하고 있다. 그리고 그룹핑 시점에 따라 그룹핑 결과가 조금씩 달라지는데, 그룹핑 시점이 커질수록 정확한 그룹핑을 한다.

표2. 불안정한 경우의 발전기 그룹핑 결과

Case No	기존의 SIME법 (272기)	제안된 방법 (위상각 · 속도증분)	
		272기	105기
8	27151, 27152 27153, 27154	27151, 27152 27153, 27154	27151, 27152 27153, 27154
10	30151, 30152 30153, 30154 13155	30151, 30152 30153, 30154 13155	30151, 30153
11			
12			
13	27751, 27752	27751, 27752	30151, 30153 30156
14	27751, 27752 27901, 27902 27903, 27904 27905, 27906	27751, 27752 27901, 27902 27903, 27904 27905, 27906	27901, 27961 27753
15			
16	27753, 27754 27755, 27756	27753, 27754 27755, 27756	27272, 27751 27901, 27961 27963, 27971

4.2 272기와 105기의 CCT와 시뮬레이션 시간비교

표3은, 표2에서 그룹핑한 결과를 가지고 272기와 105기에 상정사고모의1에 적용하여 불안정한 경우의 CCT를 구한 것이다.

표4는 272기와 105기에 상정사고모의2에 적용하여 비교한 것이다. 이때 안정도 판정과 CCT계산은 제안한 방법을 적용한 개선된 SIME으로 구하였다.

표3의 CCT를 비교하면 최대 오차가 4.41% 최소 오차가 0.06%로 아주 정확한 값을 나타내고 있다.

표4를 살펴보면, 272기에서 불안정한 경우를 105에서도 모두 불안정하다고 판정하고 있으며 CCT를 비교해도 272기에서 가장 심각한 사고의 CCT 역시 105기에서도 가장 심각한 사고임을 나타내고 있다. 그리고, 시뮬레이션 총 수행 시간을 비교해 보면 272기가 49분 58초인데 비해 105기는 21분17초로 57.4%의 월등한 시간 단축이 이루어 졌다.

즉, 발전기 축약을 이용한 계통으로도 충분히 정확도를 유지하면서 안정도 판정을 위한 스크리닝과 감도해석

표3.272 vs 105 불안정한 경우의 CCT(상정사고모의1)

Case No	CCT		CCT %error
	272기	105기	
8	0.1502	0.1473	1.93
10	0.1863	0.1857	0.32
11	0.1807	0.1806	0.06
12	0.1774	0.1762	0.67
13	0.1661	0.1659	0.12
14	0.1405	0.1467	4.41
15	0.1667	0.1694	1.62
16	0.1709	0.1688	2.40

표4.전체 상정사고 적용 272기 vs 105 (상정사고모의2)

발전기 개수	불안정 개수	가장 심각한 상정사고	시뮬레이션 총 수행시간
272기	28	7900-1700	49분58초
105기	28	7900-7100	21분17초

지수를 추출하는데 이용 가능하다는 결론을 얻었다.

5. 결 론

본 논문에서는 심각한 상정사고를 선별하기 위한 보다 빠른 스크리닝하는 방법을 제안하였다.

기존의 SIME법에 발전기 축약과 속도, 위상각증분을 적용해 개선된 SIME법을 보였다. 본 논문에서 제시한 방법의 개선 사항은 다음과 같다.

첫째, 발전기 축약모델을 시간모의와 안정도 판정 계산에 이용하여 57.4%의 총 프로그램 수행 시간을 단축시켰다.

둘째, 속도, 위상각 증분을 이용한 스크리닝 방법은 안정한 상정사고에 대해서도 빠른 시간 내에 발전기 그룹핑이 가능하도록 하였다.

위 두 가지 방법을 통해 스크리닝 시간을 월등히 단축시킬 수 있었다.

본 연구에서는 관심대상을 1차 동요 안정도에 국한하였는데 향후에는 2,3차 동요에서 불안정해지는 멀티스윙에 대한 연구와 발전기 축약을 통한 발전기의 개수를 줄이는 것만 아니라 모델축약을 통해 총 프로그램 수행시간을 향상시키는 방법에 대한 연구가 더 진행되어져야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] Y. Zhang, 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

[2] Y. Zhang, L. Wehnkel, P. Rousseaux, M.Pavwlla, "SIME: A Hybrid Approach to Fast Transient Stability Assessment and Contingency Selection", Electric Power & Energy System. Vol.19,No.3,pp.195-208

[3]안태형,이병준,권세혁,"SIME법의 과도안정도 판정속도 향상을 위한 새로운 발전기 그룹핑 방법"대한전기학회 1999년도 추계 학술대회 논문집 A, pp. 150-152,1999. 11. 20

[4]이종석,안태형,양정대,이병준,권세혁." 개선된 SIME법을 이용한 과도안정도 평가",대한전기학회 1999년도 추계 학술대회 논문집 A, pp. 258-260,1999. 11. 20