

온라인 과도안정도 판정을 위한 상정사고 고속 스크리닝 알고리즘 개발

양정대* 이종석 이병준 권세혁
고려대학교 전기공학과

이경국**
한국전력공사 전력연구원**

A Fast Screening Algorithm for On-Line Transient Stability Assessment

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.

The First features of the proposed method are that generator grouping can be performed even in very stable cases and that the stability of a contingency can be evaluated from a short period of time simulation results.

The second features of the proposed method are that using Power-angle trajectory and subdividing contingency classification have improved the screening capability

전기들을 그룹핑 하여 1기 무한모션으로 구성하고 시간 모의에서 그 시간간격적(Time Trajectory)을 관찰함으로써 안정도 판정을 보다 신속하게 수행함과 동시에 안정한 경우에도 그룹핑이 가능하게 하였다.

두 번째는 전력-상차각의 궤적을 그려서 안정도 판별을 네 가지로 세분화하여 매우 심각한 사고만 골라내도록 하였다. 즉, SIME에서 걸러진 사고 중 불필요한 안정한 사고를 걸러내어, 스크리닝 기능을 개선하였다 그리고 사고제거시간이 기존의 SIME에서는 첫 번째 사고 제거 시간의 10% 인 것을 이보다 더 작게 하였다. 즉, 사고지속 시간을 계전기 동작시간에 가깝게 하고 내·외 삼법을 이용하여 CCT계산 시 정확도를 높였다.

이렇게 개선된 방법을 PSS/E 26을 사용하여 한전 2000년 5월 운용데이터에 212기 787모션에 위 방법을 적용하여 본 논문에서 제안한 방법을 검증하였다.

1. 서 론

전통적 과도안정도 평가 기법으로는 Off-Line에서 이루어지는 시간모의법(Time-Simulation)과 직접법이 있다.

시간모의법(Time-simulation)은 어떤 계통에도 바로 적용할 수 있고 높은 신뢰도를 제공한다. 하지만 계산시간이 많이 소요되며 안정, 불안정만 판정할 수 있는 정성적 판정만 가능하고 안정도 마진을 구하는 정량적 해석이 불가능하다는 단점이 있다.

직접법은 계산시간이 아주 빠르고, 안정한 경우에는 얼마나 안정하고, 불안정한 경우는 얼마나 불안정한가를 판단할 수 있는 정량적인 계산이 가능하다.

하지만 직접법을 계산하기 위해서는 계통 데이터의 변환이 필요하다. 그러므로 신뢰성이 떨어진다는 단점이 있다. 이런 직접법의 대표적인 방법으로는 에너지 함수를 이용하는 방법과 확장등면적법(Extend Equal Area Criterion)을 이용한 방법이 있다.

컴퓨터의 발달과 더불어 과도안정도 해석도 Off-Line에서 On-Line으로 발전하게 되었다. On-Line 과도안정도 해석은 계통 운영의 관점으로 계통 데이터를 주기적으로 받아 들여서, 그 주기 안에 과도안정도 판정을 끝마치는 것이다. 이때 많이 사용되는 방법이 시간모의법과 직접법을 결합한 Hybrid Method이다. SIME은 시간모의법과 확장등면적법을 결합한 Hybrid Method이다.

본 논문에서 적용한 SIME은 빠르고 정확하다는 장점이 있지만, 안정한 경우에 발전기 그룹핑의 어려움이 있다. [1]

본 논문에서는 다음과 같은 기법을 적용해서 보다 신속하고 정확한 과도안정도 평가를 수행할 수 있도록 하였다.

첫 번째는 SIME법과 달리 시간모의 초기단계에서 발

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 지속 시간)를 계산하여 안정도를 평가한다. (그림1) [2]

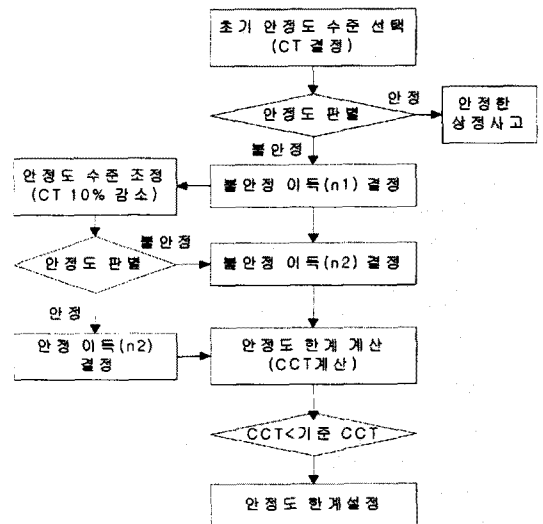


그림 1 SIME에 의한 과도안정도 평가 알고리즘

위 과정을 그림으로 나타내면 그림 2와 같이 요약할 수 있다.

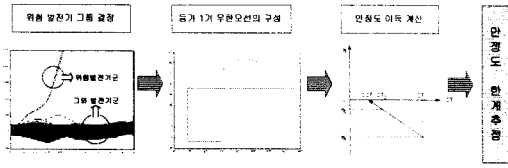


그림 2 SIME에 의한 CCT 구하는 과정

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)을 이용한 방법이고, 두 번째는 전력-상차각 곡선 모양으로 불필요한 사고를 걸러내어 보다 정확하고 빠르게 하여 스크리닝 기능을 개선하였다.

2.2.1 위상각 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 음의 값을 갖게 된다. 위상각 증분은 식(1)과 같이 표현된다.[4]

$$AI_i = (\delta_{ci} - \delta_{oi}) - \frac{\sum_{j=1}^n (\delta_{cj} - \delta_{oj})}{n} \quad (1)$$

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

2.2.2 PASF(Power-Angle Shape Filtering)

기존의 SIME은 비교적 정확하고 빠른 계산을 가능하게 하였지만 두 번째 사고제거 시간이 180ms(CT1이 200ms인 경우)로 비교적 계전기 동작 시간보다 커서 현실성이 떨어진다. 그리고 CT1과 CT2의 차이가 작아 내·외삼법으로 CCT를 구할 때 정확도가 떨어진다.

이런 문제점을 해결하기 위해 CT2를 150ms나 그 이하로 줄이면 계전기 동작시간에 접근하게 되고 CCT의 정확도도 증가하게 된다.

하지만 CT2를 적게 주면 당연히 2번째 마진 계산에서 안정한 경우가 늘어나게 된다. 이때 판정된 안정한 경우 중에서는 매우 안정한 경우도 포함된다. 이런 상정사고를 전력-상차각 곡선의 모양으로 판정하여 걸러내는 것이 PASF의 핵심이다.

CT2에서 불안정한 경우를 살펴보면 그림3과 그림4의 경우와 같이 두 가지로 나타나는 것을 알 수 있다. 그림3의 경우는 사고를 제거해도 전기적 출력(Electric Power)이 기계적 출력(Mechanical Power)보다 적어서 발전기가 계속 가속하는 매우 불안정한 경우를 나타낸다. 그림4의 경우는 발전기의 감속이 이루어지나 가속 면적보다 적어 발전기가 일정시간은 감속하다 결국은 가속되어 불안정해지는 일반적인 불안정한 경우를 나타낸

다. 전자의 경우를 Definitely Dangerous Contingency(DD), 후자의 경우를 Dangerous Contingency(D)로 정의한다.

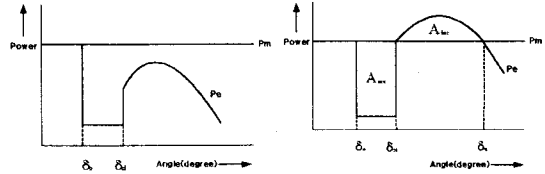


그림 3 Definitely Dangerous Contingency

그림 4 Dangerous Contingency

그림5는 안정한 경우를 다시 세분화하여 매우 안정한 경우(Harmless Contingency - H)와 계통의 상태가 조금만 변하면 불안정해지는 경우(Potentially Dangerous Contingency - PD)로 세분화한다. 즉, 전자의 경우는 더 이상 고려하지 않고, 후자의 경우만 상정사고 랭킹 시 포함시켜서 상세한 시뮬레이션이 이루어지도록 한다.

이 두 가지의 경우는 리터닝 앵글 근처의 Pe 기울기(Pe Slope)를 이용해 Pe Slope>0인 경우에는 H, Pe Slope<0인 경우에는 PD로 정의한다.

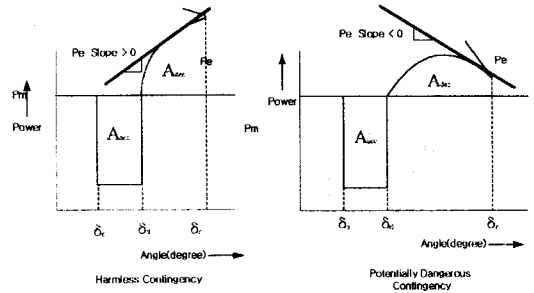


그림 5 Pe Slope를 이용한 안정도 판정

위 과정을 포함한 PASF기법을 알고리즘을 나타내면 다음과 같다.(그림6)

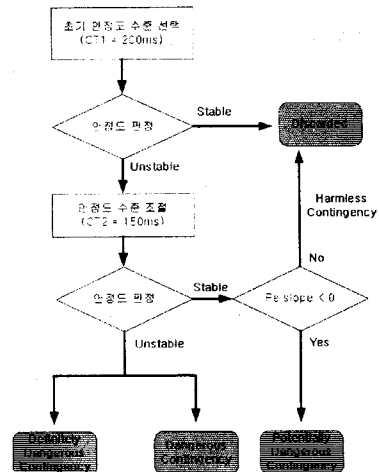


그림 6 PASF 기법

Pe Slope의 부호를 판정하는 수식은 다음과 같다.

$$(\delta_r - \delta_{r-1}) / (P_e - P_{e-1}) > 0 \quad (2)$$

$$(\delta_r - \delta_{r-1}) / (P_e - P_{e-1}) < 0 \quad (3)$$

r : Retuning Angle

r-1 : Returning Angle 보다 한 Step 전 Angle

여기서, 식(2)는 H, 식(3)은 PD이다.

3. 사례연구

본 논문은 제안한 방법을 2000년 5월 운용데이터 2127기 787모선에 적용 검증하였고 시간 모의 프로그램으로는 PSS/E-26을 사용하였다. 시간스텝은 0.0083초 시간간격을 사용했으며 상정사고는 2회선 3상 지락 사고를 고려하였다. 이때 고려된 상정사고는 발전기 근처의 선로로써 상정사고 발생 시 계통에 아주 큰 영향을 미치는 것 40가지 345kV 선로를 뽑아서 사용하였다. 한전 계통은 전체적으로 매우 안정하므로 초기 사고지속 시간은 200ms로 아주 크게 주었고, 두 번째 사고지속 시간은 150ms로 내·외삽으로 CCT 계산 시 정확도를 높이도록 하였다. 발전기 그룹 평은 사고가 제거되고 난 후 300ms에 이루어 졌다.

표 1 2000년 5월 운용데이터 과도 안정도 판별(40가지)

사고 번호	사고위치	기존의 SIME		PASF 적용	
		CCT(ms)	안정도 판정	CCT(ms)	안정도 판정
1	양주 345 - 외경부 3		안정		FSS
2	양주 345 - 중부 3		안정		FSS
3	미금 345 - 상동 345		안정		FSS
4	서서울 3 - 열서 345		안정		FSS
5	신용인 3 - 동서울 3		안정		FSS
6	울진 #1.2 - 동해345		불안정	600	PD
7	울진 #3.4 - 신영주 3	1194	불안정	716	PD
8	울진 #3.4 - 신영주 3	1194	불안정	716	PD
9	태안 T/P3 - 신당진3	1194	불안정	716	PD
10	태안 T/P3 - 신당진3	1194	불안정	716	PD
11	동해 345 - 신계천 3	1300	불안정	780	PD
12	동해 345 - 신계천 3	1300	불안정	780	PD
13	신당진 3 - 아산 345	1314	불안정	788	PD
14	신당진 3 - 아산 345	1314	불안정	788	PD
15	신속원 3 - 평원 345		안정		FSS
16	신속원 3 - 평원 345		안정		FSS
17	신남원 3 - 신곡원 3		안정		FSS
18	신남원 3 - 신곡원 3		안정		FSS
19	영광 345 - 신남원 3	1194	불안정	716	PD
20	영광 345 - 신남원 3	1194	불안정	716	PD
21	영광 345 - 신남원 3	1194	불안정	716	PD
22	영광 345 - 신남원 3	1194	불안정	716	PD
23	영광 345 - 신남원 3	1194	불안정	716	PD
24	영광 345 - 신남원 3	1194	불안정	716	PD
25	월성 #1 - 월성 #2.3		불안정	600	PD
26	월성 #2.3 - 울주 3		안정		FSS
27	월성 #2.3 - 신포항 3		안정		FSS
28	울주 - 신경산 3		안정		FSS
29	신포항 3 - 서대구 3		안정		FSS
30	신포항 3 - 서대구 3		안정		FSS
31	서대구 3 - 전산 345		안정		FSS
32	고리 NP12 - 신출산 3		안정		FSS
33	고리 NP34 - 신포항 3		안정		FSS
34	의령 3 - 신영주 3		불안정	716	PD
35	의령 3 - 신영주 3		불안정	716	PD
36	의령 3 - 신영주 3		안정		FSS
37	의령 3 - 신영주 3		안정		FSS
38	의령 3 - 신영주 3		안정		FSS
39	의령 3 - 신영주 3		불안정	716	PD
40	신안산 - 신김해 3		안정		FSS

(표1)에서 FSS는 First Swing Stable로써 처음에 과도한 사고를 주었을 때도 안정해 지는 매우 안정한 경우를 나타낸다.

불안정한 경우의 상정사고를 CCT와 랭킹을 서로 비교해 보면 (표2)와 같다. 기존의 SIME과 PASF를 적용한 방법의 랭킹이 정확히 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 PASF와 SIME의 CCT는 0.00 ~ 3.60(%)으로 거의 일치한다. 여기서 PASF의 CCT가 기존의 SIME보다 대부분 큰 이유는 PASF의 CCT를 구하기 위한

사고제거 시간의 차이가 기존의 CT 보다 크기 때문이다. 이것으로 내·외삽법으로 CCT를 구할 때 보다 더 정확한 CCT를 구할 수 있다.

기존의 SIME보다 불필요한 상정사고 6가지를 미리 골라내어 시간의 단축효과도 가져왔다. 기존의 SIME법으로 과도 안정도를 평가하는데 걸린 프로그램 총 수행 시간은 7분 39초였고, 본 논문에서 제안한 PASF 기법을 이용하여 과도안정도를 평가하는데 걸린 시간은 6분 37초로 26.6%의 시간단축을 가져왔다.(표3)

표 2 불안정한 경우의 상정사고

사고 번호	사고위치	기존의 SIME			PASF 적용			△CCT (%)
		CCT		Rank	CCT		Rank	
		ms	cycle		ms	cycle		
6	울진 #1.2 - 동해345	-	-	1	-	-	1	0.00
8	울진 #3.4 - 신영주 3	-	-	1	-	-	1	0.00
13	태안 T/P3 - 신당진3	-	-	1	-	-	1	0.00
14	태안 T/P3 - 신당진3	-	-	1	-	-	1	0.00
25	월성 #1 - 월성 #2.3	-	-	1	-	-	1	0.00
10	신영주 3 - 신포항3	1152	6.91	6	117.9	7.07	6	2.29
7	울진 #3.4 - 울진 #1.2	1194	7.16	7	121.3	7.28	7	1.57
11	동해 345 - 신계천 3	1300	7.80	8	131.2	7.87	9	0.91
16	신당진 3 - 아산 345	1314	7.88	9	131.0	7.86	8	-0.31
34	의령 3 - 신영주 3	716	8.81	10	134.2	8.19	10	1.31
35	의령 3 - 신영주 3	716	8.81	11	135.1	8.27	11	1.33
39	의령 3 - 신영주 3	716	8.81	12	135.6	8.26	12	1.35

표 3 기존의 SIME과 PASF 기술 비교

평가항목	불안정 갯수	시뮬레이션 시간	개선효과
기존의 SIME	18	9분 27초	28.9% 단축
PASF 적용	12	7분 53초	

4. 결 론

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

기존의 SIME법에 위상각 증분과 PASF기법을 이용해 개선한 사항은 다음과 같다.

첫째, 속도, 위상각 증분을 이용한 스크리닝 방법은 안정한 상정사고에 대해서도 빠른 시간 내에 발전기 그룹 평가 가능하도록 하였다.

둘째, PASF기법을 통하여 보다 정확한 CCT 계산과 불필요한 상정사고를 걸러냄으로써 상정사고 스크리닝의 기능을 한층 강화 시켰다.

그리고, 위 두 가지 방법을 통해 정확도를 유지하면 스크리닝 시간을 단축시킬 수 있었다.

(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. Wehenkel, 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] Rene Avila Rosales, Daniel Ruiz-Vega "On-line Transient Stability Constrained ATC Calculations" Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Vol 2, 2000, pp. 931 - 936

[4] 양정대, 이종석, 이병준, 권세혁, 이경극, "대규모계통 과도 안정도 평가를 위한 상정사고 고속 스크리닝 알고리즘", 대한 전기학회, 2000년도 하계학술대회 논문집 A, pp 69 - 71, 2000. 7. 17 - 7. 20