

SIME법의 과도안정도 판정속도 향상을 위한 새로운 발전기 그룹핑 방법

안태형* 이병준 권세혁
고려대학교 전기공학과

A New Generator Grouping Method for Speed-up of Transient Stability Evaluation in SIME

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

Abstract - This paper presents a new generator grouping method for speed-up of transient stability evaluation in SIME. The critical generators are grouped by new indices in the early stage of time domain simulation. And the simulation can be early terminated by fast stability evaluation using the time trajectory of equivalent one machine infinite bus. The main advantage of the proposed method is that it can be applied to stable cases as well as unstable ones.

The effectiveness of the proposed method is tested on the PSS/E test system.

1. 서 론

오늘날 전력계통은 경제적 또는 환경적인 이유로 계통의 증설보다는 기존의 전력계통을 최대한 효과적으로 이용하려는 노력이 계속됨에 따라 점점 안전도 한계에 가까운 무리한 조건하에서 운전되고 있는 실정이다. 따라서 보다 안전한 계통운용을 위해서는 수시로 변동하는 계통조건하에서 다양한 상정사고들에 대해 계통의 안정도를 평가할 수 있는 동적 안전도 평가(Dynamic Security Assessment)가 수행되어야 한다. 이러한 동적 안전도 평가는 보통 수분 이내의 짧은 시간동안 수많은 상정사고들에 대한 안정도 평가를 내릴 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 그러나, 기존의 시간영역모의(Time Domain Simulation)에 의한 안정도 해석은 많은 계산시간을 요함에 따라 온라인 해석보다는 주로 오프라인 연구에 사용되어 왔다. 그 대안으로서 계산시간 단축을 위해 직접법(Direct Method)을 과도안정도 해석에 적용하려는 시도가 1960년대 초반부터 계속되어 왔다. 대표적인 방법으로는 에너지함수(Energy Function)를 이용한 방법과 등면적법(Equal Area Criterion)을 이용한 방법이 있다. 이 방법들은 모델링의 유연성이나 결과의 정확성 면에서 한계를 가지고 있다. 그리하여 이러한 직접법들은 시간영역방법들과 다양하게 통합됨으로써 상세한 계통모델을 다룰 수 있게 되었다. 최근 들어 개발된 SIME(Single Machine Equivalent)법[1]도 이에 속한다. 이 방법은 시간영역모의를 조기에 종료하고 다기계통을 등가 1기 무한모선(Equivalent One Machine Infinite Bus)계통으로 변환한 후 등면적법에 의해 안정도 한계를 계산하는 방식이다. 그러나, 이 방법에서는 등가 1기 무한모선을 구성하기 위해 일반적인 안정도 조건보다 심각한 조건을 고려해야 하며, 안정한 경우에 대해서는 발전기 그룹핑이 이루어질 수 없으므로 장시간의 시간모의가 불가피하다.

본 논문에서는 새로운 발전기 그룹핑 방법을 제안하여 이러한 문제점을 개선하고자 한다. 제안된 방법에서는 기존의 SIME법과는 달리 시간모의 초기단계에서 발전기들을 그룹핑하여 등가 1기 무한모선을 구성하고 이후

의 시간모의에서 그 시간궤적(Time Trajectory)을 관찰함으로써 안정도 판정을 보다 신속하게 수행한다. 본 방법은 새로운 발전기 그룹핑 지수(Generator Grouping Index)를 도입하여 불안정한 상정사고를 고려할 필요 없이 안정한 상정사고에 대해서도 적절한 등가 1기 무한모선을 구성할 수 있으며, 보다 신속한 과도안정도 판정을 내릴 수 있다.

2. SIME법의 개요와 문제점

SIME법은 하나의 상정사고에 대하여 다수의 시간영역모의를 통해 안정도 한계를 계산하여 안정도를 평가한다[1-2]. 그 과정을 살펴보면 아래와 같다.

- (1) 계통이 불안정해 질 수 있도록 극심한 안정도 조건을 고려하여 발전기들의 위상각이 충분히 벌어질 때까지 다기계통의 시간영역모의를 수행한다.
- (2) 최대 위상각차를 이용하여 발전기를 그룹핑하고 등가 1기 무한모선을 구성한다.
- (3) 등면적법을 적용하여 안정도 이득을 계산한다.
- (4) 불안정한 안정도 조건을 조금 완화하여 다시 위의 과정을 반복, 또다른 안정도 이득을 계산한다.
- (5) 고려한 안정도 조건들과 그때의 안정도 이득을 외삽 또는 내삽하여 안정도 한계를 추정한다.

이와 같이 SIME법에서 등가 1기 무한모선 구성을 위한 발전기 그룹핑은 불안정한 시간모의를 전제로 하고 있다. 그러나 시간모의가 안정한 경우 그 자체로는 발전기 그룹핑이 불가능하므로 등가 1기 무한모선을 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 방법으로서 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.

3. 과도안정도 판정속도 향상을 위한 새로운 방법의 제안

본 논문에서는 이와 같은 문제점들을 개선하여 시간모의 초기단계에서 위험 발전기를 찾아내는 새로운 그룹핑 방법을 제안한다. 제안된 방법은 모의초기단계에서 발전기들을 그룹핑함으로써 안정한 경우, 불안정한 경우 모두에 대해 적용될 수 있으며 보다 빠른 안정도 판정을 가능하게 한다.

3.1 새로운 발전기 그룹핑 방법

본 방법은 SIME법과는 달리 안정여부를 알 수 없는 시간모의 초기단계에 이루어지므로 SIME법과 같이 발전기 위상각의 크기를 이용한 발전기 그룹핑은 적용하기 어렵다. 대신 사고의 영향이 충분히 계통에 반영되는 시점에서 새로운 지수를 이용, 발전기 그룹을 결정한다. 본 연구에서 제안한 발전기 그룹핑 지수는 위상각증분(Angle Increment : AI)과 속도증분(Speed Increment : SI)이다. 위상각증분과 속도증분은 사고 후 가속된 발전기들의 회전자의 각도와 속도를 관찰하여 상대적으로 많이 가속된 발전기들을 찾아내는 지수이다.

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

$$SI_i = (\omega_{ci} - \omega_{oi}) - \frac{\sum_{i=1}^n (\omega_{ci} - \omega_{oi})}{n} \quad (2)$$

$\delta_{oi}(\delta_{ci})$: 사고 전(사고 후) 각 발전기의 위상각
 $\omega_{oi}(\omega_{ci})$: 사고 전(사고제거시) 각 발전기의 속도
 n : 발전기 수

식(1)로 표현되는 위상각증분 AI는 사고제거 후 특정 시각까지 증가한 위상각의 크기를 나타낸다. 식(2)로 표현되는 속도증분 SI는 사고가 지속되는 동안 증가한 속도의 크기를 나타낸다. 두 식에서 첫 번째 항은 사고로 인해 증가한 각 발전기의 위상각과 속도의 증가분을 나타내고, 두 번째 항은 계통 내 발전기들의 위상각과 속도 증가분의 평균값이다. 따라서, 어느 한 발전기가 다른 발전기들에 비해 더 많이 가속되는 경우 양의 값을 갖게 되며 덜 가속되는 경우에는 음의 값을 갖게 된다. 두 지수 모두 큰 양의 값을 갖는 발전기들은 불안정한 경우 탈조 발전기로, 안정한 경우 탈조할 가능성이 있는 위험 발전기로 분류된다. 이렇게 결정된 발전기 그룹은 등가 1기 무한모션으로 변환된다[3].

3.2 등가 1기 무한모션의 시간궤적을 이용한 안정도 판정

SIME법에서는 발전기들간의 위상각이 일정한 값 이상으로 벌어질 때까지 시간모의를 하지만 본 논문에서는 모의시간을 단축시키기 위해 등가 1기 무한모션의 시간궤적을 관찰하여 안정여부가 판정되는 즉시 모의를 중단한다. 따라서, 안정도 판정기준이란 시간모의 종료기준(Stopping Rule)이 된다.

본 논문에서는 전력-상차각 곡선을 이용한 안정도 판정기준을 시간궤적을 이용한 안정도 판정기준으로 바꾸어 사용한다. 여기서 시간궤적이란 속도 ω 와 가속화력 P_a 에 국한한다. 등가 1기 무한모션의 시간궤적에 대한 안정도 판정기준은 아래와 같다.

(1) 안정한 경우

전력-상차각 곡선에서 감속영역의 면적이 가속영역의 면적보다 큰 경우이다. 여기서는 감속영역의 면적이 가속영역의 면적과 같아져서 다시 위상각이 회귀하는 시점을 시각 t_u 로 정의한다. 이 시점에서 속도는 0이 되고 가속화력은 음의 값을 갖는다(그림1 참조). 수식으로 정리하면 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \omega(t) > 0, \quad t_0 < t < t_r \\ \omega(t_r) = 0, \quad P_a(t_r) < 0 \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 불안정한 경우

전력-상차각 곡선에서 감속영역의 면적이 가속영역의 면적보다 작은 경우이다. 여기서는 사고제거 후 전기적 출력 곡선과 기계적 입력 곡선이 만나는 시점을 시각 t_u 로 정의한다. 이 시점에서 가속화력은 0이 되고, 이후 계속 증가하게 된다(그림2 참조). 수식으로 정리하면 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \omega(t) > 0, \quad t > t_0 \\ P_a(t_u) = 0, \quad \left. \frac{dP_a}{dt} \right|_{t=t_u} > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

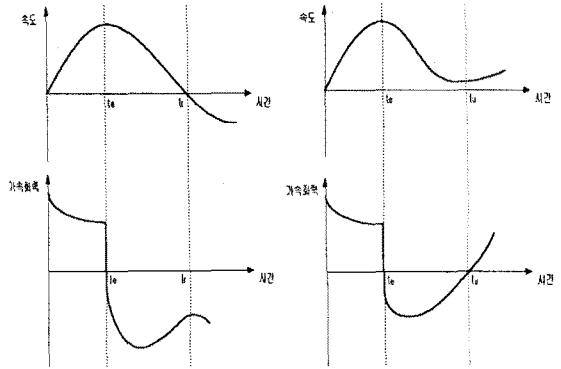


그림 1. 안정한 경우

그림 2. 불안정한 경우

(3) 매우 불안정한 경우

전력-상차각 곡선에서 사고제거 후에도 전기적 출력이 기계적 입력보다 커지지 않는 경우이다. 이때는 사고제거 이후에도 가속화력이 양의 값을 가지며 계속 증가하게 된다(그림3 참조). 가속화력이 증가하기 시작하는 시점을 t_{vu} 로 정의한다. 수식으로 정리하면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \omega(t) > 0, \quad P_a(t) > 0, \quad t > t_0 \\ P_a(t_{vu}) < P_a(t_{vu} - \Delta t), \quad P_a(t_{vu}) < P_a(t_{vu} + \Delta t) \end{aligned} \quad (5)$$

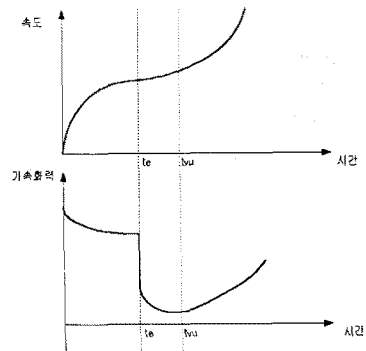


그림 3. 매우 불안정한 경우

제안된 방법에서는 위의 안정도 판정기준 식(3), (4), (5)중 어느 하나를 만족하는 즉시 시간모의를 중단한다. '매우 불안정한 경우'에는 안정도 이득이 존재하지 않으므로 안정도 이득을 계산하기 위해서는 안정도 조건을 완화하여 다시 시간모의를 수행해야 한다.

4. 사례 연구

본 논문에서 제안한 방법은 그림4에 보인 6기 20모선 시험계통에 대해 검증하였다. 시간모의 프로그램은 PSS/E-26을 사용하였다. 모의에서는 0.0083초의 시간간격을 사용하였으며, 상정사고는 가장 심각한 사고인 3상 지락사고를 고려하였다.

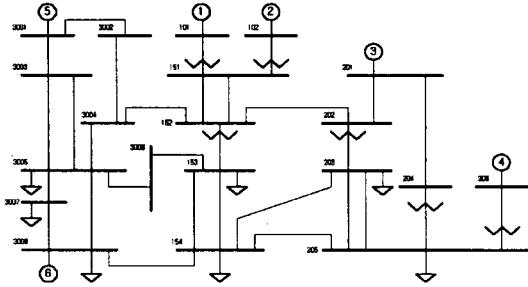


그림 4. 6기 20모선 시험계통

4.1 발전기 그룹핑 및 안정도 판정 결과 비교

본 사례연구에서는 2회선 선로에 각기 다른 사고제거 시각을 부여한 상정사고를 가정하였다. 지수 AI에 의한 발전기 그룹핑은 사고가 제거되고 난 후 200ms 후에 이루어졌다.

표 1. 발전기 그룹핑 지수 결과

사고 제거 시각 (ms)	그룹핑 지수	발전기 번호					
		1	2	3	4	5	6
500	AI	-47.0362	-47.0362	-14.0922	-30.9756	155.6798	-16.5396
	SI	-0.0002	-0.0002	-0.0051	-0.0049	0.0150	-0.0045
400	AI	-40.8279	-40.8279	-1.0939	-15.0573	99.9881	-2.0613
	SI	-0.0028	-0.0028	-0.0028	-0.0018	0.0119	-0.0017
300	AI	-38.1680	-38.1680	8.7660	-4.5154	67.0180	5.0676
	SI	-0.0056	-0.0056	0.0003	0.0008	0.0086	0.0015
200	AI	-34.8207	-34.8207	14.1563	0.9599	45.6013	8.9239
	SI	-0.0062	-0.0062	0.0026	0.0013	0.0057	0.0028
100	AI	-26.8095	-26.8095	14.1705	0.8281	29.7835	8.8271
	SI	-0.0038	-0.0038	0.0025	0.0005	0.0032	0.0015

표1은 사고제거시각에 따른 각 발전기의 그룹핑 지수의 값을 나타낸 것이다. AI의 단위는 degree(°)이며, SI의 단위는 pu이다. 이 두 지수가 양의 값을 갖는 발전기들은 다른 발전기들에 비해 평균 이상으로 가속된 발전기들을 나타내는 것이며 그 크기가 클수록 가속된 정도가 크다. 위의 표에서는 5번 발전기가 타 발전기들에 비해 많이 가속되었음을 확인할 수 있다.

표 2. 발전기 그룹핑 및 안정도 판정 결과

사고제거시각 (ms)	제안된 방법		SIME법	
	발전기그룹	판정결과	발전기그룹	판정결과
500	5	불안정	5	불안정
400	5	불안정	5	불안정
300	5	안정	-	안정
200	5	안정	-	안정
100	5	안정	-	안정

표2는 표1의 그룹핑 지수를 이용한 그룹핑 결과와 SIME법의 그룹핑 결과를 비교한 것이다. 또한, 그룹핑된 결과를 이용하여 내린 안정도 판정결과도 같이 비교

하였다. 내용을 살펴보면 두 방법 모두 동일한 안정도 판정을 내렸으며, 불안정한 경우 두 방법 모두 탈조 발전기들을 정확히 찾아내었다. 그러나, 안정한 경우에 대해서는 본 논문에서 제안한 방법만이 불안정한 경우와 동일한 발전기 그룹핑을 할 수 있었고 SIME법에서는 발전기 그룹핑이 이루어지지 않았다.

4.2 안정도 판정속도 개선효과

표3은 안정도를 판정하는데 소요되는 모의시간을 비교한 것이다. 본 논문에서 제안한 방법에서는 사고제거 시각이 500ms인 경우 발전기 그룹핑 시점인 700ms까지의 시간모의결과판으로 안정도를 판정할 수 있으며 나머지 경우에는 추가적인 시간모의가 수행된 후 안정도가 판정되었다. 그러나, 모두 1초 이내의 짧은 시간모의 결과로부터 안정도 판정을 내릴 수 있었다. SIME법은 불안정한 경우 발전기들간의 위상각이 360° 이상 벌어지는 시점까지 시간모의를 수행하였으며, 안정한 경우에는 장시간의 시간모의를 필요로 하였다. 위 결과로부터 본 논문에서 제안한 방법은 기존의 SIME법에 비해 안정한 경우 안정도를 판정하는데 소요되는 모의시간을 현격하게 단축시킬 수 있었으며 불안정한 경우에도 어느 정도 모의시간을 단축시킬 수 있었다.

표 3. 모의시간 비교

사고제거시각 (msec)	제안된 방법			SIME법의 모의시간 (초)
	그룹핑시각 (초)	판정시각 (초)	모의시간 (초)	
500	0.7000	0.5833	0.7000	0.8750
400	0.6000	0.7167	0.7167	1.1167
300	0.5000	0.6000	0.6000	5 - 15
200	0.4000	0.5417	0.5417	5 - 15
100	0.3000	0.5333	0.5333	5 - 15

5. 결론

본 논문에서는 새로운 발전기 그룹핑 방법을 이용하여 SIME법에서 안정도 판정속도를 개선시키는 방법을 제안하였다. 새로운 발전기 그룹핑 지수는 불안정한 상정사고의 경우 탈조 발전기를 정확히 예측할 수 있으며 안정한 경우에도 등가 1기 무한모션을 구성할 수 있으므로 SIME법에서 반드시 극심한 안정도 조건을 고려해야 하는 번거로움을 덜 수 있다. 또한, 시간모의 초기단계에서 구성된 등가 1기 무한모션의 안정도를 시간간격을 이용하여 신속하게 판정함에 따라 기존의 SIME법에 비해 모의시간을 단축시킬 수 있다.

본 연구에서는 관심대상을 1차 동요 안정도에 국한하였으며 사례연구대상으로서 시험계통을 사용하였다. 향후에서는 다차 동요 안정도에 관한 내용과 함께 실제 적용에 관한 연구를 진행할 예정이다.

(참고 문헌)

- [1] Y. Zhang, L. Wehnel, 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
- [2] 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
- [3] M. Pavella, P. G. Murthy, "Transient Stability of Power Systems : Theory and Practice", John Wiley & Sons, 1994