

시간영역 과도안정도 프로그램을 이용한 에너지 함수 적용 기초 연구

김동준, 문영환, 신정훈*
한국전기연구원, 전력연구원*

A Basic Study of Applying the Energy Function Using Time-domain Transient Stability Program

Dong-Joon Kim Young-Hwan Moon Jung-Hoon Shin*
KERI, KEPRI*

Abstract - This paper presents new contingency screen and ranking method using the time-domain simulation program and energy function. Since the suggested method is very simple and has fast computation time to calculate energy margin and list the contingency according to the its severity, it can be used in connection with the on-line TSA which has accurate binary search algorithm in parallel or distributed computing environment. The suggested method has been tested by applying to 3-machine and 9-bus system, and its effectiveness has been verified.

용어 정의

TSA: Transient Security Assessment, 과도안정도평가
BS: Binary Search, 이분 탐색법
EAC: Equal-Area Criterion, 등가면적판별법
CCT: Critical Clear Time, 임계제거시간
CT: Clear Time, 제거시간
CSR: Contingency Screen/Ranking법,
TD 프로그램: Time-domain transient stability 프로그램
TEF: Transient Energy Function, 과도에너지함수
EM: Energy Margin, 에너지 마진
KE: Kinetic Energy, 운동 에너지
PE: Potential Energy, 위치 에너지
RKE: Remained Kinetic Energy, 잔존 운동에너지

1. 서 론

대형정전사고를 방지하기 위한 중요한 해석중 하나는 온라인 또는 실시간으로 과도안정도를 평가 (이하 TSA) 하는 것이다. TSA [1-3] 프로그램은 기존의 과도안정도를 판별 해줄 뿐만 아니라 적절한 마진과 안정도 향상 제어방향을 제시해야 한다.

TSA에서 안정도 마진을 평가하는 방법은 임계제거시간 (이하 CCT)를 계산하는 방법과 전력송전 한계 (Transfer Power limit) 운전점용 계산하는 방법을 사용한다. 전자는 유럽에서 많이 사용하는 방법이며 후자는 북미에서 주로 사용한다.

TSA에서 CCT를 계산하는 일반적인 방법은 시행착오법인 이분 탐색법 (이하 BS)이며, BS법은 정확한 결과를 제공하나 많은 반복 시뮬레이션을 통하여 CCT점을 구해야 하는 단점이 있다. 이 방법은 시간이 많이 요구되는 경향이 있어 기존에는 온라인 TSA에 적용하는 것이 어려워 보였다. 이러한 대안으로 직접법인 과도에너지함수법 (이하 TEF)이나 시간영역 과도안정도 프로그램을 사용한 다양한 등가면적판별법(이하 EAC)이 다수 제안되었다. 그러나 TEF는 간단하고 중소모 규모의 시스템에서는 사용가능하나 복잡한 대형전력계통에 적용하는 것은 어렵다[4,5]. 그리고 EAC 류의 방법은 단일

CPU 컴퓨터 환경에서의 계산속도 문제점을 해결해주면서 어느 정도의 정확한 결과를 제공해준다. 그러나 비선형 특성이 강한 과도안정도 해석에서 정확한 결과를 기대하는 것은 어렵다[6]. 따라서 EAC 류의 방법은 상정사고의 Screen/Ranking (이하 CSR법)에 매우 적합한 알고리즘이나 정확한 계산결과는 제공하는 데는 한계가 있다.

최근 가격이 싼 병렬컴퓨터나 분산컴퓨터 기술이 개발됨에 따라 다시 BS법은 계산속도의 단점을 보완할 수 있으면서 정확한 계산결과를 제공할 수 있는 환경이 조성되고 있다. 그러나 여전히 BS법은 많은 반복계산을 해야 하는 부담이 있기 때문에 다른 CSR법과 연계해서 사용해야 하는 문제가 있다.

본 논문은 병렬컴퓨팅 또는 분산컴퓨팅 환경을 사용하는 TSA에서 BS법을 사용할 때 BS법과 연계해서 사용할 수 있는 새로운 CSR법을 제안한다. 제안된 방법은 TD 프로그램에서 모의하여 시간영역결과를 이용하여 운동에너지와 위치에너지를 계산하여 에너지 마진을 도출하고 상정사고를 Ranking 하는 방법이다. 제안된 방법은 계산방법이 매우 간단하고 계산속도가 매우 빠르기 때문에 향후 BS법과 연계해서 실시간 TSA에 적용가능하다.

2. 본 론

2.1 TD 프로그램에 에너지 함수 적용

TEF법은 시스템 규모나 복잡성 때문에 대형전력계통에 적용하는 것이 어렵다. 이러한 이유로 TD 프로그램을 이용하여 에너지 마진을 계산하는 하이브리드 방법이 제안되어 오고 있다[7-9]. 본 논문도 TD 프로그램과 에너지 함수를 적용하여 새로운 CSR법을 제안한다.

2.1.1 에너지 함수 방정식

TD 프로그램에서 사용된 스윙 방정식은 식 (1)과 같다.

$$2H \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e = P_a \quad (1)$$

여기서,

$$\omega = \text{relative speed}, \quad \omega = \frac{\omega_r}{\omega_0} = \frac{\omega - \omega_r}{\omega_0}$$

2H = 관성정수
Pm = 기계적 출력
Pe = 전기적 출력
Pa = 가속력

식 (1)을 속도에 대해서 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\omega = \frac{1}{2H} \int P_a dt \quad (2)$$

아래와 같이 수식 전개하면,

$$2H \frac{d\omega}{dt} \frac{d\delta}{d\delta} = P_a,$$

$$H \frac{(2 \cdot \omega \cdot d\omega) \omega_0}{d\delta} = H \frac{d(\omega^2) \omega_0}{d\delta} = P_a,$$

$$\frac{1}{2} \omega_0 \omega^2 M = \int P_a d\delta.$$

운동에너지(이하 KE)와 위치에너지(이하 PE)는 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 쓸 수 있다. PE는 시간에 대한 적분으로 표현 가능하다.

$$KE = \frac{1}{2} \omega_0 \omega^2 M \quad (3)$$

$$PE = \int P_a d\delta = \int P_a \omega_0 dt \quad (4)$$

고장사고가 제거된 상태에서는 감속력이 발생하고 PE를 증가하게 된다. 이 증가된 PE는 고장사고시 증가된 KE를 감소시키는데, 본 논문은 아래와 같이 잔존 운동에너지(이하 RKE)라 정의한다:

$$RKE = \frac{1}{2} \omega_0 \omega^2 M - \int P_a \omega_0 dt \quad (5)$$

2.1.1 제안된 TD 프로그램을 이용한 CSR법

제안된 CSR 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1. 설정된 상정사고에 3상 단락사고를 200 msec 동안 발생한다. 상정사고 중 매우 안정한 case와 불안정한 case를 구분하기 위해서 임의적으로 CCT를 200 msec로 구분한다. (다른 값으로 설정할 수 있음) 200 msec동안 단락사고 짧은 시간동안에는 KE를 각 발전기마다 계산한다. 이것은 고장사고 동안에는 고장에너지가 KE만 증가하기 때문이다.

단계 2. 고장사고가 제거되는 200msec 이후에는 PE와 RKE를 계산하고, RKE가 영(zero)인 경우 안정한 case라고 판단하고 모의를 종료한다. 안정하다고 판단된 case는 상정사고 Ranking에서 고려하지 않는다.

단계 3. 발산하는 case는 PE 에너지가 줄어들면서 급격히 RKE가 증가하는 경우이다. 각 발전기별 에너지 마인스(이하 EM)은 고장사고 제거 후의 최저 RKE 값의 마이너스 값과 같다. EM이 아주 작은 값일수록 더 불안정하고, CCT값도 작아진다.

단계 4. 불안정한 각 발전기의 EM은 발전기 용량에 맞게 변환되어 총 EM을 계산한다.

$$EM = \sum_{i=1}^k EM_i = \sum_{i=1}^k (-RKE_i) \quad (6)$$

여기서,

k= 불안정한 발전기 수

단계 6. 다음 상정사고를 수행하기 위해서 단계 1로 간다. 만약, 지정된 상정사고가 없다면 단계 7로 간다.

단계 7. 각 상정사고별 EM을 기초로 하여 사고를 Ranking 한다.

이와 같이 계산된 Ranking은 TSA의 BS알고리즘을 통해서 가장 불안정한 사고부터 CCT를 계산 하게하고, EM은 초기 제거시간(이하 CT)을 결정하는데 사용된다. 즉 EM이 아주 작은 값이면 초기 CT를 아주 작은 값부터 시작하고, 상대적으로 큰 값이면 CT를 200m sec 근

치의 값부터 시작한다.

2.2 3기 9모선 적용

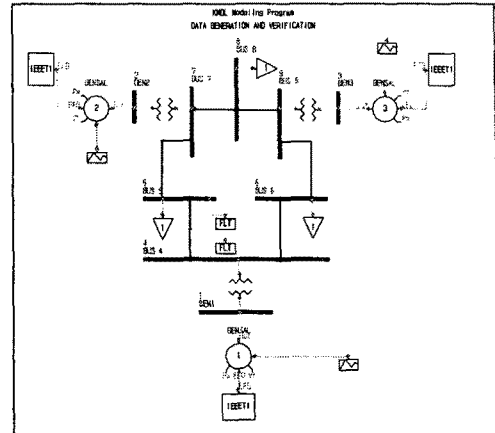


그림 1. 3기 9모선 계통도

제안된 방법은 그림 1의 3기 9모선 계통에 적용하였고, 상정사고는 문헌 [10]과 같이 적용하였다. TD 프로그램은 PSS/E를 이용하여 CCT 계산과 EM을 별도로 계산하였다. CCT 계산은 제안된 방법에 의해서 계산된 EM의 정확도를 확인하기 위해서 별도로 계산한 것이다. EM 알고리즘은 PSS/E에 약간의 코드를 삽입하여 계산하였다. 계산 결과는 표 1과 같다. 가장 불안정한 상정사고는 #2로서 모선 7에 200 msec 고장을 발생하고 선로 5-7번을 트립 시키는 경우이다. 이 경우가 EM이 가장 낮은 경우이다. 그림 2는 #2의 상정사고인 경우 CT에 따른 EM 결과를 보여준다. CT=200 msec인 경우는 불안정한 경우를 보여준다. (고장사고는 1.0 초에 발생한다.) CT=91.8 msec인 경우도 불안정한 경우의 EM의 결과를 보여준다. CT=91.7 msec인 경우는 안정한 경우로서 약 1.90초에서 EM이 양의 결과가 됨을 보여준다.

특이 사항으로서 상정사고 #6은 계산된 EM이 양의 값임에도 불구하고 First Swing이 불안정한 경우가 발생하였다.

표 1. CCT 계산과 EM 계산 결과
(CT = 200 msec, FSS = First Swing Stable)

Cont. #	Faulted bus	Line tripped	CCT (epsilon)	Critical Mach.	Ranking (EM)
1	5	5-7	175 msec (1 msec)	m2, m3	4 (-0.603)
2	7	5-7	91.7 msec (0.1 msec)	m2, m3	1 (-1.512)
3	7	7-8	133.4 msec (0.1 msec)	m2	2 (-1.283)
4	8	7-8	FSS	-	-
5	8	8-9	FSS	-	-
6	9	8-9	191 msec (1 msec)	m3	5 (0.197)
7	9	9-6	150 msec (1 msec)	m2, m3	3 (-0.833)
8	6	9-6	FSS	-	-
9	6	6-4	FSS	-	-
10	4	6-4	FSS	-	-
11	4	4-5	FSS	-	-
12	5	4-5	FSS	-	-

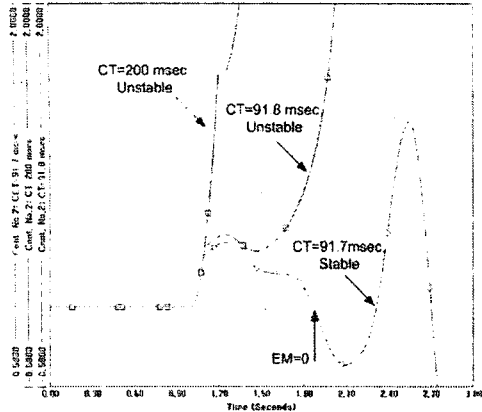


그림 2. Cont #2 CT에 따른 EM 계산결과
(CT=200 msec, 91.8 msec, 91.7 msec)

그림 3은 상정사고 #6의 EM을 보여준다. 이 사고는 CCT가 191 msec로 매우 안정한 case로서, CT가 200 msec인 경우 발전기 과속이 그리 크지 않아 사고시 KE 이 아주 낮은 경우이다. 이와 같이 매우 안정한 그들을 구분해주는 CT와 실제 CCT가 비슷할 때 제안된 EM은 약간의 문제를 발생할 수 있다. 그러나 이것은 약간의 알고리즘을 보완하면 이러한 현상을 쉽게 해결할 수 있다.

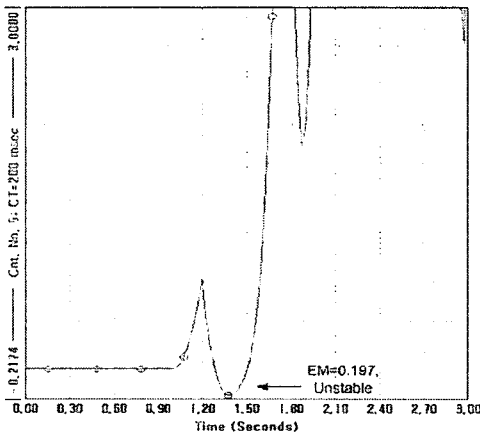


그림 3. Cont. #6, EM 계산결과
(CT=200 msec)

3. 결 론

본 논문에서는 병렬컴퓨팅 또는 분산 컴퓨팅 환경을 사용하는 TSA에서 이분 탐색법 (BS)을 사용할 때 BS 법과 연결해서 사용할 수 있는 새로운 상정사고 Screen/Ranking법을 제안하였다. 제안된 방법은 TD 프로그램을 실행하여 계산된 결과를 이용하여 운동에너지와 위치에너지를 계산하고, 에너지 마진을 도출하여 상정사고를 Ranking 하는 방법이다.

제안된 방법은 3기 9모선 시스템에 적용하여 그 유효성을 확인하였다. 시간영역 과도 안정도 해석 프로그램을 사용하는 본 방법은 계산이 정확하고, 계산방법이 매우 간단하며, 계산속도가 매우 빠르기 때문에 향후 BS 법과 연결해서 실시간 TSA에 적용가능하다.

- [1] Rober Schainker, Peter Miller, Wadad Dubbelday, Peter Hirsch, and Guorui Zhang, " Real Time Dynamic Security Assessment", IEEE Power & Energy magazine, march/april 2006
- [2] Lei Wang and Kip Morison, " Implementation of Online Security Assessment", IEEE Power & Energy magazine, Sep/Oct 2006
- [3] D.cirio, E. Gaglioti S.Massucco A. Pitto F.Silvestro, " An extensive Dynamic Security Assesemnt Analysis on a large realistic electric power system", IEEE Powertech 2007, Lausanne July, 2007
- [4] V.Vittal S.Rajagopal M.A.El-Kady, E.Vaahedi, "Transient Stability Analysis of Stressed Power Systems using the Energy Function Method", IEEE Trans. Power Syst. Vol.3, No.1, February 1988
- [5] G.D.Irisarri, G.C.Ejebe, J.G. Waight, and W.F. Tinney, " Efficient Solution for Equilibrium Points in Transient energy Function analysis," IEEE Trans. Power Syst., Vol.9, No.2, May 1994
- [6] Daiel Ruiz-Vega and Mania Pavella, " Online Assessment and Control of Transient Oscillations Damping", IEEE Trans. Power Syst. Vol 19, No.2, May 2004
- [7] Y. Mansour, E.Vaahedi, A.Y.Chang, B.R.Corns, B.W.Garrett, K.Demarce, T.Athay, and K.Cheung, "B.C. Hydro's on-line Transient Stability Assessment(TSA) Model Development Analysis and Post-processing, IEEE Trans. Power Syst. Vol.10, No.1, February 1995
- [8] C.K. Tang, C.E. Graham, M. El -Kady, and R.T.H. Alden, " Transient Stability Index from Conventional Time Domain Simulation", IEEE Trans. Power Syst. Vol.9, No.3, August 1994
- [9] Ebrahim Vaahedi, Yakout Mansour, A.Y. Chang, B.R. Corns, and E.K. Tse, "Enhanced "second kick" Methods for on-line Dynamic Security Assessment", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 11, No.4, November 1996
- [10] Mania Pavella, Transient Stability of Power Systems: A Unified Approach to Assessment and Control, pp 215-217, Kluwer Academic Publishers, 2000