Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2010) 24(10) : 21~25
DOI : 10.5207/JIEIE.2010.24.10.021

논문 24-10-4

하이브리드 방법을 이용한 전력계통 안정도 해석

(Power System Stability Analysis Using a Hybrid Approach)

서규석* · 박지호
(Gyu-Seok Seo · Ji-Ho Park)

Abstract

This paper explains hybrid method that combines Time domain simulation technique with the direct method of Transient stability analysis. First, it calculate trajectory of real system by Time domain Simulation using OOP(Object Oriented Programming method) and evaluate Transient Energy Function to induce stability index to calculate Transient stability margin. Once the status of system(stable or unstable) has been identified, proper criteria are proposed to stop time-domain simulation to reduce CPU time.

Key Words : Power System Stability, Hybrid Method, Time Domain Simulation Technique, Direct Method of Transient Stability

1. 서 론

본 논문은 시간영역 모의 테크닉과 과도안정도 해석 직접법을 결합한 하이브리드형 방법을 이용하여 전력계통의 안정도 해석을 모의한다. 먼저 시간영역 모의를 통해 실제 시스템의 궤도를 계산하고, 과도안정도 여유도를 계산하기 위한 안정도 지수를 유도하기 위해 과도 에너지함수(TEF: Transient Energy Function)를 평가한다. 시간영역 모의 방법의 장점은 모델링의 제한이 없다는 점이다. 또한 안정도 현상의 자세한 고찰을 위한 시스템의 모든 양들의 시간응답을 볼 수 있다. 하지만 시간영역모의 방법은 미분방정식을 풀기위하여 스텝 바이 스텝으로 적분하기 때문에 매우 느리다. 또한 안정도 문제에 대하여 '예' 또는 '아니오' 형의 답만 제시한다. 즉 안정도 한계를 계산하기 위한 시스템의 민감도 정보가 부족하다. 그래서 시행 착오법을 이용하여 안정도 여유도를 계산하는데 이는 매우 많은 시간을 필요로 한다. 본 논문에서는 시간영역의 모의는 객체지향적인 접근법을 이용하여 복잡한 다수 발전기 시스템을 효율적으로 모의할 수 있게 하고, 일단 시스템의 어떤 상태(안정 또는 불안정)가 확인되면 CPU 시간을 줄이기 위해 시간영역모의를 중단하기 위한 적절한 기준이 제시되었다. 기존의 시간영역 모의와 에너지함수를 이용한 안정도 여유도의 계산법을 결합하여 안정도를 판별하는 복합적인 방법을 이용하면 각각의 방법이 단독으로 적용되었을 때의 문제점을 극복할 수 있는 장점을 지닌다.

* 주저자 : 거제대학 선박전기과 교수
Tel : 055-680-1558, Fax : 055-680-1558
E-mail : gsseo@koje.ac.kr
접수일자 : 2010년 3월 14일
1차심사 : 2010년 3월 18일
심사완료 : 2010년 4월 26일

2. 하이브리드 안정도 해석 방법

하이브리드 방법을 사용한 과도안정도 해석의 목적은 시간영역모의와 과도에너지 함수평가를 결합하여 과도에너지 여유를 산출하는 것이다. 직접법을 사용한 과도안정도 해석에서 안정도의 등급은 제어 불안정평형점(UEP)에서의 포텐셜에너지와 사고에 의해 시스템에 주입된 과도에너지의 양을 비교하여 정해진다. 본 논문에서는 먼저 객체지향기법을 적용하여 시간영역모의를 통하여 실제의 시스템 궤도를 계산한다. 그리고 TEF를 평가하여 안정도 등급을 계산한다. 또한 UEP를 계산을 피하므로 수렴에 대한 문제가 없다. 빠른 안정도 여유도의 계산을 위하여 적절한 중단 기준이 제시되었다. 전력계통의 안정도해석 소프트웨어의 설계에 객체지향기법을 적용하면 보다 효율적인 소프트웨어를 설계할 수 있다. 객체지향프로그램에서 객체라는 말의 의미는 실세계의 물리적인 소자를 디지털 컴퓨터의 프로그램에서 원래의 물리적 의미를 구현한 것을 말한다. 물리적 작용을 데이터와 이를 조작하는 함수를 하나로 묶어서 모듈화를 하는 것이다. 객체들의 상호연결은 실세계의 소자들의 물리적 연결과 같은 의미를 가질 수 있다. 복잡한 시스템의 구성을 단순한 소자들의 구성으로 구현하는 것이다. 식 (1)과 같은 미분방정식을 풀기 위한 방법을 그림 1에서 아날로그 컴퓨터의 구성과 디지털 컴퓨터에서의 객체의 구성을 비교하였다.

$$\dot{V}_F = (V_F + V_R - Ri)/T \tag{1}$$

즉 본 논문에서는 기본 객체들의 상호연결을 이진트리를 이용하여 구현하였다. 일단 이진트리의 구성이 완성되면 수치해석 방법을 적용하여 해를 구할 수 있다. 시스템을 모델링하는 식들은 미분방정식 부분과 대수방정식 부분으로 나눌 수 있는데, 이들의 상호간의 연결도 이진트리를 이용하면 구현할 수 있다. 그러므로 시스템의 상태에 따라 이진트리의 구성만 다르게 하면 된다.

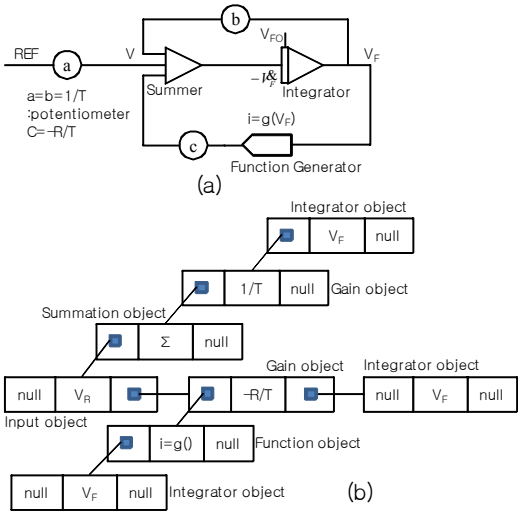

그림 1. (a) 식 (1)의 아날로그 컴퓨터 구성
(b) 이진트리 객체 구성

Fig. 1. (a) Analog computer configuration of Eq. (1).
(b) Binary tree of basic object elements

대상시스템은 식 (1)~(6)으로 모델링된다. 그리고 에너지 함수는 식 (7)~(10)을 사용한다.

$$M_i \frac{dw_i}{dt} = P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} = f_i \tag{2}$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} \omega_i, \quad i = 1, N \tag{3}$$

$$P_i = P_{m_i} - E_i^2 G_{ii} \tag{4}$$

$$P_{COA} = \sum_{i=1}^{N} (P_i - P_{ei}) \tag{5}$$

$$P_{ei} = \sum_{j=1,\, j \neq 1}^{N} C_{jj} \sin(\theta_i - \theta_j) + D_{jj} \cos(\theta_i - \theta_j) \tag{6}$$

여기서

θ_i, ω_i: rotor angle and speed of Machine i in the Centre of inertia(COI) frame

M_i: inertia constant of machine i

P_{Mi}: mechanical input of Machine i

E_i: internal voltage magnitude of Machine I

P_{ei}: electrical input of generator

P_{COA}: center of inertia
G_{ij}, B_{ij}: elements of the internal Y-matrix
C_{ij}, $D_{ij} = E_i E_j B_{ij}, E_i E_j G_{ij}$

$$V(\theta,\omega) = V_{KE}(\omega) + V_{PE}(\theta) \tag{7}$$

$$V_{KE}(\omega) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} M_i \omega_i^2 \tag{8}$$

$$V_{PE}(\theta) = -\sum_{i=1}^{N} P_i\left(\theta_i - \theta_i^s\right) - \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\left[\begin{array}{l} C_{ij}\left(\cos\theta_{ij} - \cos\theta_{ij}^s\right) \\ + \int_{\theta_i^s+\theta_j^s}^{\theta_i+\theta_j} D_{ij}\cos\theta_{ij}\, d\left(\theta_i + \theta_j\right) \end{array}\right] \tag{9}$$

여기서 θ^s는 stable equilibrium point

식 (9)의 경로의존 적분은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$I_{ij} = D_{ij}\frac{\theta_i + \theta_j - \theta_i^s - \theta_j^s}{\theta_i - \theta_j - \theta_j^s + \theta_j}\left(\sin\theta_{ij} - \sin\theta_{ij}^s\right) \tag{10}$$

고전적인 시스템에 대하여 임계에너지 V_{cr}을 계산하는 두 가지 방법은 제어 UEP 방법, PEBS(Potential Energy Boundary Surface) 접근법이 있는데 이 방법에서는 사고지속 궤도에서 첫 번째 포텐셜 에너지 피크가 V_{cr}이다[2-3]. 기존의 시간영역모의에 에너지 여유도 계산을 첨가함에 있어 계산상으로 효과적이고 어떠한 시간모의 프로그램에도 쉽게 결합시킬 있어야 한다. PEBS접근법은 이러한 목적에 이상적이다. 시간영역모의에서 생성된 에너지 여유도의 정확도는 느슨하게 할 수 있다. 왜냐면 그것이 대상 시스템의 절대안정도를 판별하는 것이 아니기 때문이다. 절대안정도는 발전기 위상각과 같은 여러 개의 시스템의 양들이 시간응답에 의해 정확하게 판단된다.

사고제거 후에 시스템의 궤도를 형성하기 위해 시간영역 모의를 한다. 만약 시스템이 불안정하면 그 궤도는 PEBS를 교차하게 된다. 불안정한 경우 안정도 지수는 PEBS을 교차할 때 시스템에 남아있는 운동에너지이다. 안정한 경우 궤도가 PEBS을 교차하지 않는다. 이 경우 주입된 외란의 모든 운동에너지는 위치에너지로 바뀐다. 불안정한 경우(시스템 궤도가 PEBS를 가로 지른다)는 $f^t \cdot (\theta - \theta_s)$의 부호가 변하면 PEBS를 지났다는 의미이므로 시간모의 중지한다. 안정한 경우 첫 번째 위치에너지의 피크가 탐지되면 곧 모의를 중단한다.

위치에너지의 피크는 사고제거 후 궤도를 따라 운동에너지의 최소점에 해당된다. 운동에너지를 구하는 것이 위치에너지 값을 구하는 것보다 매우 쉽기 때문에 PEBS 교차 또는 포텐셜 에너지 피크에서 위상각과 속도 최소 KE의 위치를 구하는 다음의 테크닉에 의해 계산된다.

$V_{KE}(t_k) > V_{KE}(t_{k-1}) < V_{KE}(t_{k-2}) < V_{KE}(t_{k-3}) < \cdots$ 이면 $t = t_{k-1}$에서 최소값을 가진다.

3. 안정도 해석 알고리즘

단계 1 : 시스템의 사고전의 전력조류계산 데이터를 입력하고, 발전기 데이터를 입력한다. 발전기 및 발전기 서브시스템을 그림 1과 같이 객체지향적인 방법으로 모델링하여 시간영역에서 모의를 하여 사고상태에서의 발전기의 회전자각과 속도를 계산한다. 이때 발전기를 제외한 선로는 발전기를 제외한 축약된 Ybus로 구성하고, 선로의 과도현상은 무시한다.

단계 2 : 사고 후 시스템의 Ybus를 구성하고 사고 후 시스템의 안정한 평형점(Stable Equilibrium Point)을 계산한다.

단계 3 : 사고상태에서 시간모의를 지속하고, PEBS를 교차했는지를 판단한다. PEBS을 교차하면 시스템이 주어진 고장 제거시간(t_d)에 대하여 불안정한 경우이다. 이 교차점에서의 각 발전기 위상각(θ^*)을 계산하고, 식 (9)를 사용하여 위치에너지를 계산한다. 안정도 여유도(Energy Margin)는 다음 식을 이용하여 구한다.

$$EM = V_{cr} - V_d \tag{11}$$

여기서

$$V_{cr} = V(\theta^*, 0),\ V_d = V(\theta(t_d), \omega(t_d))$$

단계 4 : 사고상태에서 PEBS을 교차하지 않고, 사고제거후 포텐셜에너지가 최고치에 도달하면 시스템에 주입된 모든 운동에너지가 시스템에 흡수된 상태 즉 안정한 상태이다. 이 경우는 안정한 사고후 궤도에 대하여 안정도 여유도를 계산하기 위해 포텐셜 에너지의 피크치 위상각 θ^0에서 시스템에 임의로 사고를 인가하고 PEBS을 교차하는 θ^{**}을 구한다.

$$EM = V(\theta^{**}, 0) - V(\theta^0, 0) \tag{12}$$

실제의 에너지 함수의 계산에 있어서 식 (10)을 다음의 사다리꼴 근사화법을 쓰면 더욱 정확한 계산을 할 수 있다.

$$I_{ij} = \frac{1}{2} D_{ij}\left[\cos(\theta_i - \theta_j) + \cos(\theta_i^s - \theta_j^s)\right] \tag{13}$$
$$\times \left[(\theta_i + \theta_j) - (\theta_i^s + \theta_j^s)\right]$$

4. 사례 연구

사례연구는 잘 알려진 3기 9모선 시스템을 대상으로 한다.

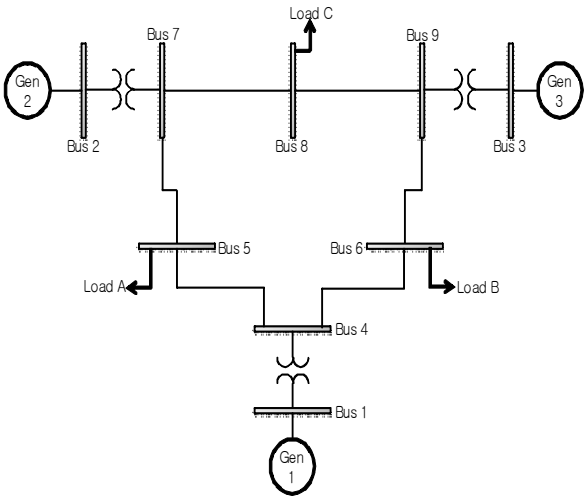

그림 2. 3기 9모선 시스템
Fig. 2. Three machine, nine bus system

그림 3은 고장제거 시간을 t_d=0.15s로 했을 때의 발전기 위상각의 시간응답이다. 이 경우는 시스템이 안정함을 알 수 있다.

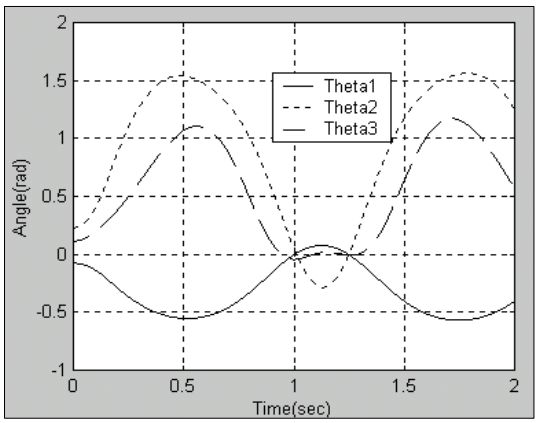

그림 3. 0.15초 고장 제거 시 발전기 위상각
Fig. 3. Generator angles, t_d=0.15s

그림 4는 고장제거 시간을 t_d=0.22s로 했을 때의 발전기 위상각의 시간응답이다. 이 경우는 시스템이 불안정하다.

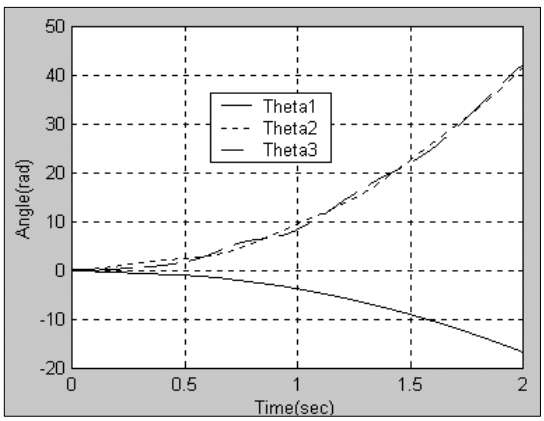

그림 4. 0.22초 고장 제거 시 발전기 위상각
Fig. 4. Generator angles, t_d=0.22s

그림 5는 고장제거 시간을 $t_d = 0.22s$로 했을 때의 시간 변화에 대한 $DP = f^t \cdot (\theta - \theta_s)$의 값을 구한 결과이다. 그림에서 $t = 0.417s$에서 PEBS을 교차함을 알 수 있다. 즉 시스템은 불안정하다.

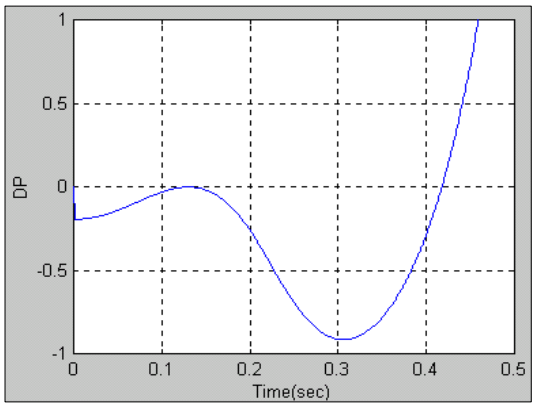

그림 5. 시간 변화에 대한 DP 값
Fig. 5. Zero crossing of DP

그림 6은 서로 다른 고장제거시간에 대한 에너지 여유도를 계산한 결과이다. 그림에서 곡선이 0을 통과하는 순간의 고장제거시간이 시스템의 임계 고장제거시간이고 선형 보간법을 이용하면 쉽게 구할 수 있다.

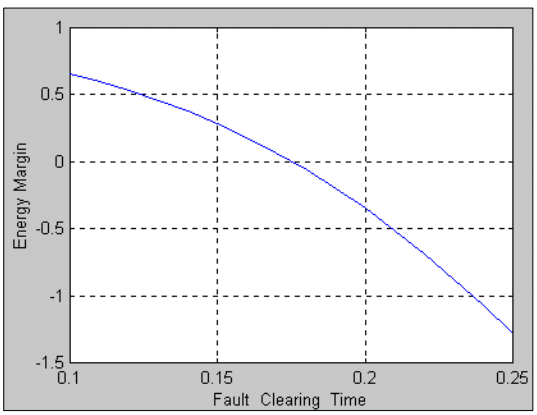

그림 6. 에너지 여유도
Fig. 6. Variation of stability margin

5. 결 론

본 논문에서는 전력계통의 안정도 해석에 시간영역의 모의 방법과 에너지함수를 이용하는 직접법을 결합한 하이브리드형 해석방법을 적용하였다. 객체지향 기법을 적용한 시간영역모의는 복잡한 미분방정식의 해를 구하는데 편리함을 제공하고, 에너지함수를 이용하는 직접법과 쉽게 결합이 된다. 이것을 3기 9모선 시스템에 대하여 모의하고 결과를 보였다. 시간영역의 모의와 직접법 모두는 장단점을 가지므로 두 가지 방법의 결합은 서로의 두 방법의 장점을 모두 이용할 수 있으므로 최근의 안정도 해석의 경향이라 할 수 있다.

References

[1] Ji-Ho Park and Young-Sik Baek, "The Power System Analysis method Using Object-oriented Programming", The International Conference On Electrical Engineering, July 21-25 1988. Kyungju Korea, Vol.II pp. 285-288.

[2] T. Athay, R. Podmore and S. Virmani, "A practical method for the direct analysis of transient stability," IEEE Trans. PAS-98, No. 2, March/April 1979. pp.573-584.

[3] H.D. Ching, F.F. Wu and P.P. Variya, "Foundations of the potential energy boundary surface method for power system transient stability analysis - IEEE Trans. Circuit and systems, Vol. 35, No. 6, June 1988. pp. 712-728.

[4] C.K. tang, C.E. Grahm, M. El-Kady and R.T.H Alden, "Transient Stability Index From Conventional Time Domain Simulation," IEEE Trans. Power Systems. Vol. 9, No. 3, Aug. 1994. pp.1524~1530.

[5] P.W. Sauer, A.K. Behera, M.A. Pai, J.R. Winkelman and J.H. Chow, "Trajectory approximations for direct energy methods that use sustained faults with detailed system models," IEEE Trans. Power Systems. Vol. 4, No.2, May 1989. pp.499-506.

[6] P. kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, New York, 1994.

◇ 저자소개 ◇

서규석(徐圭錫)
1975년 11월 4일생. 2003년 경북대학교 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 거제대학 선박전기과 전임강사.

박지호(朴志皓)
1991년 2월 경북대학교 전기공학과 졸업. 1996년 8월 동대학원 졸업(석사). 2001년 2월 동대학원 졸업(박사).