

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} = f_i \quad (2)$$

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

$$P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii} \quad (4)$$

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

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

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_{M_i} = mechanical input of Machine i

E_i = internal voltage magnitude of Machine i

G_{ij}, B_{ij} = elements of the internal Y-matrix

$C_{ij}, D_{ij} = E_i E_j B_{ij}, E_i E_j G_{ij}$

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

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

$$V_{PE}(\theta) = - \sum_{i=1}^N P_i (\theta_i - \theta_i^s) - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N [C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) + \int_{\theta_i^s + \theta_j}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j)] \quad (9)$$

여기서 θ^s is stable equilibrium point

식 (9)의 경로의존 적분은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

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

고전적인 시스템에 대하여 임계에너지 V_{cr} 을 계산하는 두 가지 방법은 제어 UEP(2)방법, PEBS(3)접근법이 있는데 이 방법에서는 사고지속 궤도에서 첫 번째 포텐셜 에너지 피크가 V_{cr} 이다. 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. 왜냐하면 그것이 대상 시스템의 절대 안정도를 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 PEBS를 교차할 때 시스템에 남아있는 운동에너지이다. 안정한 경우 궤도가 PEBS를 교차하지 않는다. 이 경우 주입된 외란의 모든 운동에너지는 위치에너지로 바뀐다. 불안정한 경우(시스템 궤도가 PEBS를 가로지른다)는 $f \cdot (\theta - \theta_s)$ 의 부호가 변하면 PEBS를 지났다는 의미이므로 시간모의 중지한다. 안정한 경우 첫 번째 위치에너지의 피크가 탐지되면 곧 모의를 중단한다. 위치에너지의 피크는 사고제거 후 궤도를 따라 운동에너

지의 최소점에 해당된다. 운동에너지를 구하는 것이 위치에너지값을 구하는 것보다 매우 쉽기 때문에 PEBS 교차 또는 포텐셜 에너지 피크에서 위상각과 속도 최소 KE의 위치를 구하는 다음의 테크닉에 의해 계산된다.

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

2.2 안정도 해석 알고리즘

단계1: 시스템의 사고전의 전력조류계산 데이터를 입력하고, 발전기 데이터를 입력한다. 발전기 및 발전기 서브시스템을 그림1과 같이 객체지향적인 방법으로 모델링하여 시간영역에서 모의를 하여 사고상태에서의 발전기의 회전자각과 속도를 계산한다. 이때 발전기를 제외한 선로는 발전기를 제외한 축약된 Ybus로 구성하고, 선로의 과도현상은 무시한다.

단계2: 사고후 시스템의 Ybus를 구성하고 사고후 시스템의 안정한 평형점(Stable Equilibrium Point)을 계산한다.

단계3: 사고상태에서 시간모의를 지속하고, PEBS를 교차했는지를 판단한다. PEBS를 교차하면 시스템이 주어진 고장 제거시간(t_{cl})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.

$$EM = V_{cr} - V_{cl} \quad (11)$$

여기서 $V_{cr} = V(\theta^*, 0)$, $V_{cl} = V(\theta(t_{cl}), \omega(t_{cl}))$ 이다.

단계 4: 사고상태에서 PEBS를 교차하지않고, 사고제거 후 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^0 에서 시스템에 임의로 사고를 인가하고 PEBS를 교차하는 θ^{**} 을 구한다.

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

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

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

2.3 사례연구

사례연구는 잘 알려진 3기 9모선 시스템을 대상으로 한다.

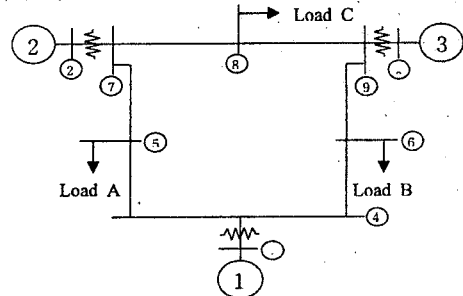


Fig. 2 Three machine, nine bus system

그림3은 고장제거 시간을 $t_{cl}=0.15s$ 로 했을 때의 발전기 위상각의 시간응답이다. 이 경우는 시스템이 안정함을 알 수 있다.

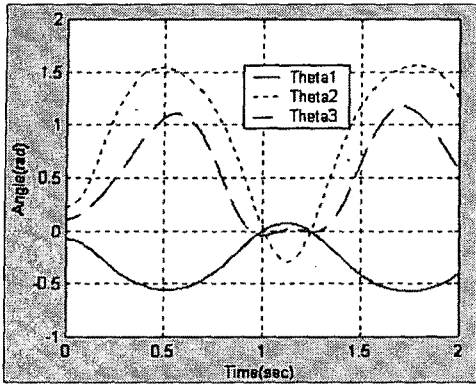


Fig 3. Generator angles, $t_{cl} = 0.15s$

그림 4는 고장제거 시간을 $t_{cl}=0.22s$ 로 했을 때의 발전기 위상각의 시간응답이다. 이 경우는 시스템이 불안정하다.

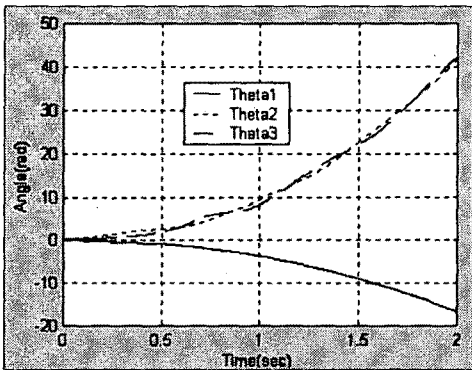


Fig 4. Generator angles, $t_{cl} = 0.22s$

그림 5는 고장제거 시간을 $t_{cl}=0.22s$ 로 했을 때의 시간 변화에 대한 $DP = f' \cdot (\theta - \theta_0)$ 의 값을 구한 결과이다. 그림에서 $t=0.417s$ 에서 PEBS를 교차함을 알 수 있다. 즉 시스템은 불안정하다.

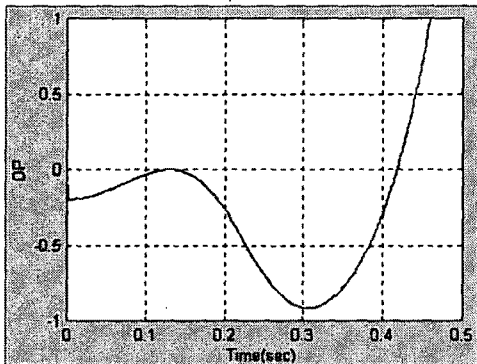


Fig. 5 Zero crossing of DP

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.

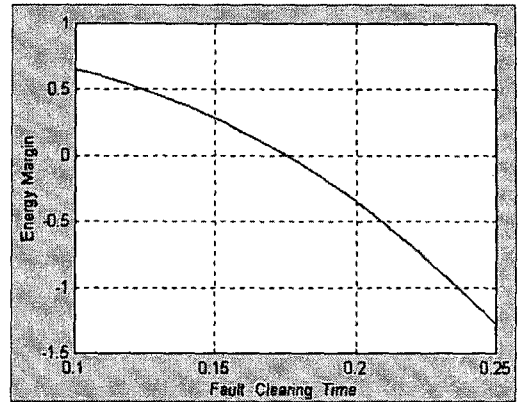


Fig. 6 Variation of stability margin

3. 결 론

본 논문에서는 전력계통의 안정도 해석에 시간영역의 모의 방법과 에너지함수를 이용하는 직접법을 결합한 하이브리드형 해석방법을 적용하였다. 대체지향기법을 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.

(참 고 문 헌)

- [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, pp573-584
- [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, pp1524~1530
- [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, pp499-506
- [6] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, New York, 1994.