

$$\frac{\partial I_{qi}}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \frac{\partial I_{qi}}{\partial V_{bj}} \Delta V_{bj} + \frac{\partial I_{qi}}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} + \frac{\partial I_{iqj}}{\partial V_{bj}} \Delta V_{bj} + \frac{\partial I_{iqj}}{\partial V_{qj}} \Delta V_{qj} - \frac{\partial (Y_i V) q}{\partial V_b} \Delta V_b + \frac{\partial (Y_i V) q}{\partial V_q} \Delta V_q \quad (2.4)$$

식 (2.3) 와 (2.4) 을 $\Delta \delta$ 와 ΔV 로 정리하여 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial \delta} \end{bmatrix} \Delta \delta = \begin{bmatrix} J_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

여기서 식 표현의 편리를 위하여 앞부분에 발전기 모선을 배치하고 뒷부분에 부하 모선을 배치하였다.

정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} D \delta & \Delta \delta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{v1} & J_{v2} \\ J_{v3} & J_{v4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

여기서 $[D \delta] [\Delta \delta]$ 는

$$= \begin{bmatrix} \partial I_{D1} / \partial \delta_1 * \Delta \delta_1, \partial I_{Q1} / \partial \delta_1 * \Delta \delta_1, \dots \\ \partial I_{Dng} / \partial \delta_{ng} * \Delta \delta_{ng}, \partial I_{Qng} / \partial \delta_{ng} * \Delta \delta_{ng}, \\ 0, 0, \dots, 0, 0 \end{bmatrix}$$

(2.6) 식을 정리하여 발전기단의 모션전압을 구하면

$$\begin{aligned} [\Delta V_1] &= \{ [J_{v1}] - [J_{v2}][J_{v3}]^{-1}[J_{v4}] \} [D \delta \Delta \delta] \\ &= [J]^{-1} [D \delta \Delta \delta] \\ &= [Z] [D \delta \Delta \delta] \end{aligned}$$

단, $[\Delta V_1]$: 발전기가 달린 모션전압의 변화분 벡터
 $[\Delta V_2]$: 부하만 달린 모션전압의 변화분 벡터

따라서, 발전기가 달린 제 j 모션전압 변화분을 D 즉, Q 축으로 정리하면 ΔV_{bj} 와 ΔV_{qj} 는 다음과 같다.

$$\Delta V_{bj} = \sum_{k=1}^{ng} S_{b,jk} \Delta \delta_k \quad (2.8)$$

$$\Delta V_{qj} = \sum_{k=1}^{ng} S_{q,jk} \Delta \delta_k \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } S_{b,jk} &= Z_{Dj,jk} D_{Dsk} + Z_{Qj,jk} D_{Qsk} \\ S_{q,jk} &= Z_{Qj,jk} D_{Dsk} + Z_{Qj,jk} D_{Qsk} \end{aligned}$$

회로망 모션전압을 위에서 유도한 식 (2.8),

(2.9) 와 같이 전압-위상각 감도행렬을 써서 근사적으로 계산함으로써 전체적인 계산부담을 줄일 수 있다.

2.2 비선형 천이행렬을 이용한 위상각

계산 알고리즘

본 논문에서는 관심있는 발전기와 같은 중요 중에 있는 발전기중 기준발전기만 직접 미분방정식으로 해석하고 나머지 발전기들은 비선형 천이행

렬법 [Ref.6] 을 변형시켜 위상각과 주파수 변화량을 구하여 2.1 절의 전압감도행렬을 이용하여 발전기 모션전압을 계산한다.

일반적으로 전력계통의 동특성 기본모형은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{X}(t) = A X(t) + g(X(t), U(t)) \quad (2.10)$$

단, A : 선형부분에 대한 상태 계수 행렬

$g(X(t), U(t))$: 비선형 부분을 표시하는 함수벡터

이 식에서의 $g(X(t), U(t))$ 가 해석적 함수이면 이 미분방정식의 해는 비선형 천이행렬법 [Ref.6]의 정리에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$X(t+\tau) = \Phi_0 X(t) + \sum_{k=1}^{\tau} \Phi_k \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}} \{g(X(t), U(t))\} \quad (2.11)$$

- 여기서, $X(t)$: 상태 벡터
- $U(t)$: 입력 벡터
- Φ_0 : 선형 상태 천이행렬
- Φ_k : k 계 비선형 천이행렬
- τ : 시간 간격

발전기의 동요방정식을 식(2.12)의 관계식을 적용하여 선형부분과 비선형부분으로 분리하면 다음과 같다.

$$\dot{X} = [A] X + [g(X, U)] \quad (2.12)$$

여기서,

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -D & -D \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[g(X, U)] = \begin{bmatrix} 0 \\ (P_m - P_e) / M \end{bmatrix}$$

$$[X] = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_{ng} \\ \Delta \omega_1 \\ \Delta \omega_{ng} \end{bmatrix}$$

$$[D] = \text{diag} [D'1/M, \dots, D'ng/Mng] = \text{diag} [D_1, D_2, \dots, D_{ng}]$$

비선형 천이행렬법을 사용하여 식(2.13)을 3차 이상을 무시하고 $k = 2$ 까지만 전개하면

$$[X(t+\tau)] = \Phi_0 [X(t)] + \Phi_1 [g(X, U)] + \Phi_2 [\ddot{g}(X, U)] \quad (2.14)$$

그런데 Φ_0, Φ_1, Φ_2 를 구하기 위하여 $[A]$ 의 곱을 살펴보면

$$[A]^2 = \begin{bmatrix} 0 & -D \\ -D & D \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & -D \\ 0 & D \end{bmatrix}$$

여기서

$$D = \text{diag} [D_1, D_2, \dots, D_g]$$

$$D = \text{diag} [D_1, D_2, \dots, D_g]$$

τ 은 매우 작으므로 Φ_0 를 3차까지 고려하여 전개하면

$$\Phi_0 = \sum_{i=0}^3 \frac{1}{i!} \tau^i A^i \quad (2.16)$$

$$= \begin{bmatrix} I & \tau I - 1/2 * \tau^2 D + 1/6 * \tau^3 D^2 \\ 0 & I - \tau D + 1/2 * \tau^2 D^2 - 1/6 * \tau^3 D^3 \end{bmatrix}$$

Φ_1 을 2차까지만 전개하면

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{i!} \tau^i A^i \quad (2.17)$$

$$= \begin{bmatrix} \tau I & 1/2 * \tau^2 I - 1/6 * \tau^3 D \\ 0 & \tau I - 1/2 * \tau^2 D + 1/6 * \tau^3 D^2 \end{bmatrix}$$

Φ_2 을 1차까지만 전개하면

$$\Phi_2 = \sum_{i=2}^3 \frac{1}{i!} \tau^i A^i \quad (2.18)$$

$$= \begin{bmatrix} 1/2 * \tau^2 I & 1/6 * \tau^3 I \\ 0 & 1/2 * \tau^2 I - 1/6 * \tau^3 D \end{bmatrix}$$

그리고 비선형부분의 전개는 다음과 같다.

$$[g(X,U)] = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ g_{ng+1} \\ \vdots \\ g_{2ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ (P_{ei} - P_{ei})/M_i \\ \vdots \\ (P_{ng} - P_{ng})/M_{ng} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$[g(X,U)] = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ g_{ng+1} \\ \vdots \\ g_{2ng} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

또한 g_{ng+1} 에 대하여 정리하면

$$g_{ng+1} = \frac{1}{M_i} \frac{\partial P_{ei}}{\partial \delta_i} \frac{d \delta_i}{dt} + \frac{\partial P_{ei}}{\partial V_{bi}} \frac{d V_{bi}}{dt} + \frac{\partial P_{ei}}{\partial V_{qi}} \frac{d V_{qi}}{dt}$$

$$= \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{ng} S_{ij} \frac{d \delta_j}{dt} = \text{Trb}(i) \quad (2.21)$$

단 $S_{ij} \begin{cases} = \frac{\partial P_{ei}}{\partial V_{bi}} * (Z_{Dij} + Z_{Qij}) \\ + \frac{\partial P_{ei}}{\partial V_{qi}} * (Z_{Dij} + Z_{Qij}) + \frac{\partial P_{ei}}{\partial V_{qi}} \quad (i=j) \\ = \frac{\partial P_{ei}}{\partial V_{bj}} * (Z_{Dij} + Z_{Qij}) \\ + \frac{\partial P_{ei}}{\partial V_{qj}} * (Z_{Dij} + Z_{Qij}) \quad (i \neq j) \end{cases} \quad (2.22)$

식(2.13)에 식(2.14) - (2.21)를 대입하여 i 발 전기의 $\delta_i(t+\tau)$ 와 $\Delta \omega_i(t+\tau)$ 값을 살펴보면

$$\delta_i(t+\tau) = \delta_i(t) + \tau \Delta \omega_i(t) + \frac{\tau^2 \Delta \omega_i(t)}{2} + \frac{\tau^3 \text{Trb}(i)}{6} \quad (2.22)$$

$$\Delta \omega_i(t+\tau) = \{1 - \tau D_i + 0.5 \tau^2 D_i^2 - (\tau^3 D_i^3)/6\} \Delta \omega_i(t) + \{ \tau - 0.5 \tau^2 D_i + (\tau^3 D_i^3)/6 \} * \text{Pacc}(i) + \{0.5 \tau^2 - (\tau^3 D_i^3)/6\} * \text{Trb}(i) \quad (2.23)$$

따라서, 식(2.22)결과와 직접 미방을 해석하는 발 전기의 위상각 변화를 식(2.7), (2.8)에 대입하면 필요한 발전기의 모션전압을 구할 수 있다.

2.3 입력변수인 모션전압 변화를 고려한 계통 미분방정식 해석기법

지금까지 과도 및 동태 안정도 해석에서 동특성 부분의 해석은 Runge-Kutta 방법 및 Trapezoidal 방법 등이 많이 이용되어왔다. 그중 가장 빈번히 사용되는 Runge-kutta 방법의 해석은 다음과 같다.

$$\frac{dX(t)}{dt} = f(X(t), U(t), t), \quad X(t_0) = X_0 \quad (2.24)$$

식(2.24)과 같은 미분방정식이 주어져 있을 경우 초기치로부터 단계적으로 τ 시간후의 값을 계산하면

$$X(t+\tau) = X(t) + \tau * f(X(t), U(t), t) \quad (2.25)$$

단, $K_0 = f(X, t, U(t))$

$$K_1 = f(X + 0.5\tau K_0, t + 0.5\tau, U(t))$$

$$K_2 = f(X + \tau K_1, t + \tau, U(t))$$

$$K_3 = f(X + \tau K_2, t + \tau, U(t))$$

τ : 시간 증가분

$U(t)$: 입력변수로서 전력계통에서는 모션전압

그러나, 이 방법은 상태변수가 $X(t)$ 에서 $X(t+\tau)$ 로 변하는 동안 모션전압이 일정하다는 가정 하에 지금까지 적용해 왔다. 그러나 좀더 정확한 과도 안정도 해석을 위해서는 모션전압변화를 고려해야 한다. 본 논문에서는 전압감도식을 이용하여 미방해석 무턴내에서 다음과 같이 고려하였다. 즉

$$V_{bj}(t+\tau) = V_{bj}(t) + S_{bij} \Delta \delta_i \quad (2.26)$$

$$V_{qj}(t+\tau) = V_{qj}(t) + S_{qij} \Delta \delta_i \quad (2.27)$$

이 $V_{bj}(t+\tau)$, $V_{qj}(t+\tau)$ 을 Runge-Kutta 무턴내에서 정확한 해를 구하는동안 이용하고 난 후 회로망 식을 풀어 재차 수정하면 지금까지 Runge-Kutta 무턴내에서 모션전압을 고정한 경우보다 더 정확한 해를 구할 수

있다.

2.4 시스템 응답이 빠른모형과 늦은

모형과의 결합

증장기 모형의 시정수는 수 초에서 수십 초에 이르는데 이것을 시정수가 빠른 여자기나 발전기와 같은 시간간격으로 미분방정식을 해석하는 것은 비경제적이다. 본 논문에서는 동태해석을 행할 때 시정수가 빠른 모형과 늦은 모형의 시간간격을 다르게 사용하여 시정수가 빠른 모형은 $\Delta t = 0.02$ 초, 늦은 모형은 $Trn = 0.25$ 초마다 계산하였다.

시정수가 다른 두 모형의 결합은 증계장치 (interface) 를 필요로 한다. 즉, 빠른 모형해석에서 사용되는 증기압력 등은 Trn 구간내에서 일정하다고 보았으며 증장기 동태모형에서 사용하는 빠른 모형의 상태변수 (전기력 출력, 조속기 출력신호 등) 는 그림 2-1같은 저주파 통과 필터를 이용하여 상태변동의 경향만을 입력으로 사용하였다. 이들의 결합관계는 그림 2-1과 같다.

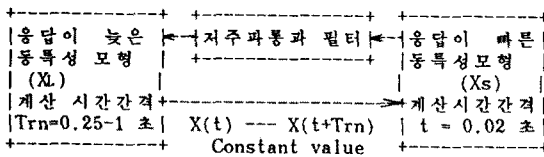


그림 2-1 응답특성이 빠른 모형과 늦은 모형과의 결합
Fig. 2-1 Relationship of fast response mode with slow response mode

4. 사례연구 및 검토

본 논문에서 제시하는 전압감도와 위상각 계산 알고리즘을 이용한 증장기 동태 안정도 해석방법의 효용성을 입증하기 위하여 14 모선, 21선로, 10 대의 발전기가 있는 계통을 모델로 선택하였다. 이 계통 모델은 A 지역과 B 지역으로 나누어지며 두 지역은 2개의 연계선으로 연결되어 있다. [Ref.3] 이것에 대한 결과는 그림 4-1에 표시하였다. 알고리즘의 적용은 계통해석중 미분방정식의 해를 구할 때마다 회로방정식을 풀지 않고 전압감도 행렬을 이용하여 모션전압을 구하고 오차를 줄이기 위하여 일정한 시간간격 (Trn) 마다 회로방정식을 풀어 계통 전체의 전압을 다시 구함으로써 필요한 제어입력을 얻고,

이때 감도 행렬을 재구성하여 사용하였다.

이 때 $Trn = 0.25$ 초이며 미분방정식을 푸는 시간간격은 $\Delta t = 0.02$ 초로 하였다.

이들 결과에서 기존방법을 적용한 시뮬레이션의 결과는 Conv. 로 표시하였으며 계산시간의 단축을 위해 본 논문에서 제시한 알고리즘을 적용한 결과는 Prop. 로 표시하였다.

계산결과의 정확도는 이미 발표한 논문 및 본 논문의 결과를 비교하여 볼 때 미세한 오차범에는 발생하지 않았다. 계산시간을 비교하기 위하여 30여 가지의 사례연구를 수행한 결과 CPU 시간은 기존방법의 35 - 40% 정도에 지나지 않았다. 여기에서 사용된 컴퓨터는 VAX-11/750 이다.

5. 결 론

- 1) 증장기 동태해석에서 압감도 알고리즘을 이용하여 발전기의 위상각 변화에 대한 모션전압의 변화를 계산함으로써 계산시간을 줄일 수 있었다.
- 2) 동특성의 해를 구하기 위하여 비선형 천이행렬법을 이용한 위상각 계산 알고리즘을 적용하여 미방을 해석하는 발전기수를 줄임으로써 계산시간을 줄일 수 있었다.
- 3) 동태 안정도 해석시 미분방정식 해법 프로그램 내에서 전압감도 행렬을 이용하여 모션전압의 변화를 고려함으로써 정확한 동특성해를 구할 수 있었으며, 과도안정도 해석에의 응용이 기대된다.
- 4) 동특성 해석에서 응답특성이 낮은 부분과 빠른 부분에 대해 시간간격을 각각 다르게 하여 계산시간을 줄일 수 있었다.
- 5) 본 논문에서 제시한 알고리즘의 효용성을 검토하기 위하여 적용한 계통 모델은 리비아의 실제계통으로써 공용계통에 연계선을 통하여 연결된 발전소가 재철소와 같은 주기적인 변동부하에 전력을 공급하도록 되어 있다. 이와같은 계통에 대한 사례연구를 통하여 제시한 알고리즘으로 계산시간의 부담을 65% 정도 경감 시켰다.

인용문헌

1. Esko G. Cate, D.P. Gelopulos, "Time Frame Notion and Time Response of the Models in

Transient, Mid-term and Long-term Stability Programs", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No. 1, Jan 1984, pp. 143-151.

2. K. Hemplardh, J.W. Lamont "Considerations for A Long-term Dynamics Simulation Program", IEEE Vol. PWRS-1, No. 1, February 1986, pp. 129-136.

3. Y.M.Park, J.K.Park, J.C.Kim, B.H.Kim, "Anticipatory Generation Control of Fossil Power Plant for Large and Rapid Recurring Load Fluctuation", TKIEE Vol. 35, No.6, 1986.6, PP.237-245

4. Y.M. Park, J.K. Park, J.C. Kim et al., "Final Report of Special Studies On Misurata Power and Desalination Plant", Hyundai Engineering CO. LTD., Oct. 1985.

5. Y.M. Park, "A New Algorithm for Power System Stability Calculations", TKIEE Vol. 29, No. 3 March 1980, pp. 59-66.

6. J.H.Kim, "Analysis of Power System Dynamics using Nonlinear Transition Matrix", Ph.D. Thesis Seoul National University, KOREA, 1985.

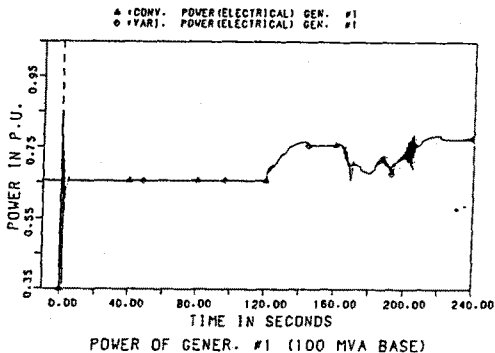
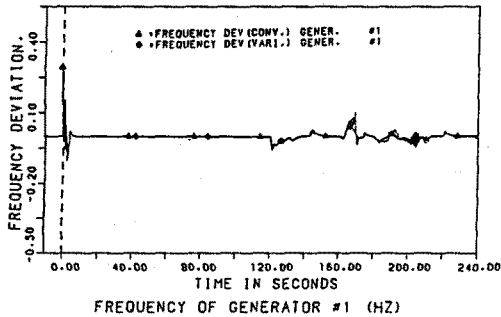


그림 4-5 4 분의 주기적인 부하가 연결된 계통에서 기본방법과 제안한방법의 결과비교

