

모선전압 변화율을 고려한 안정도 해석법에 관한 연구

김 춘 현* 박 영 문
서울대학교 전기공학부

A Study on the Stability Analysis Method Considering Bus Voltage Derivatives.

Chun Hyeon Kim* Young Moon Park
Dept. of Electrical Eng. Seoul National University.

ABSTRACT

Stability analysis is an essential work in the operation and planning of power system. There are two categories, direct method and indirect method, and indirect method calculates the trajectories of states by numerical methods. Popular method using explicit integration has relatively low accuracy, so a more accurate method is requested. By the consideration of bus voltage variation, Runge-Kutta 4th order method can be made more accurate, but this scheme need much computation time. Through three recipes, computational cost of proposed method can be reduced. So the proposed method has improved accuracy and slight rise in cost. the method was tested on the IEEE 14 bus system.

1. 서론

안정도 해석은 전력 계통 공학에서 가장 중요한 연구 분야 중의 하나로서 어떤 외란이 발생한 상황에서 전력 계통이 평형 상태를 유지한 채 운용될 수 있는지를 판정할 수 있게 해 준다.

심각한 외란은 발전기의 기계적 입력과 전기적 출력 사이의 균형을 깨뜨리고, 그 결과 발전기의 회전자각이 가속되거나 감속되며 회전자각은 넓은 대역에 걸쳐 변화를 거치므로써 계통의 동기화된 상태가 영향을 받게 된다. 동기화 상태는 회로 차단기의 적절하고도 신속한 동작을 통해 유지될 수 있도록 해야한다. 그렇지 못할 경우에는 발전기의 주파수와 단자전압이 정상값으로부터 멀리 벗어나므로써 잇따른 정전과 계통 분리가 발생하게 된다.

과도 안정도 모의 실험 연구는 이러한 현상을 보다 깊이 이해하기 위한 것이며 이로부터 얻은 정보는 계통 운용자가 계통 보호 구도를 효율적으로 계획하고 조정할 수 있게 해 준다. 또 회로 차단기의 적절한 작동 시간을 계산할 수 있게 해주며 거리 계전기의 보호 구역도 조정할 수 있도록 해 준다. 여기에 더하여 제어 기법의 검증에 위해서도 안정도 모의 실험은 중요하게 사용된다.

안정도 해석은 두 개의 큰 방정식군을 푸는 것으로 이루어지는데 하나는 발전기의 동태를 기술해 주는 비선형 미분방정식군이며 다른 하나는 계통의 에너지 평형식에 해당하는 대수방정식군이다. 미분방정식을 어떻게 다루느냐에 따라 해석법은 직접법과 간접법으로 나뉘어지는데 간접법은 수치 적분법을 통해 미분방정식을 풀어 상태변수의 추이를 직접 구하는 방법이며 직접법은 미분방정식을 풀지 않고 직접 안정도 판별법을 사용해 문제를 해결하는 방법이다. 직접법에는 고유치를 이용한 방법, Lyapunov 함수를 이용한 방법, 그리고 패턴 인식에 의한 방법 등이 포함된다. 그러나 직접법은 전력 계통의 복잡성으로 인해 정밀한 해석을 요하는 경우에는 그리 적절한 방법은 되지 못하고 있다. 간접법은 '양적분법'(explicit integration)을 이용하는 방법과 '음적분법'(implicit integration)을 이용하는 방법으로 나뉘어지는데 양적분법에는 Euler 법, Runge-Kutta 법, Adams-Bashforth 법 등이 있으며 음적분법에는 predictor-corrector 알고리즘, 역방향 Euler 법, trapezoidal rule 등의 반복 구도를 채용하는 방법들이 있다. 이들 중에서 널리 사용되는 방법은 양적분법에 속하는 Runge-Kutta 4차법인데 미분방정식과 대수방정식 사이의 접속(interface)방식에 따라 정확도에 큰 영향을 미치게 된다. 보통은 계산 비용을 줄이기 위해 미분방정식 풀이과정에서 모선 전압을 상수로 두고 있으나 이로 인해 정확도는 상당히 희생된다.

본 논문에서는 조류 계산을 하지 않고서도 한 계산구간 내에서 전압의 변화를 고려할 수 있는 기법을 제시하였으며, 이 기법은 모선 전압을 상수로 둔 경우에 비해 뛰어난 정확도를 보임을 보였다. 동시에 적절한 대책을 통해 계산시간의 증가를 피할 수 있음도 보였다.

2. 수치 적분법의 수학적 고찰

2.1 상미분방정식의 해법

일반적으로 양적분법(explicit integration)에 의한 초기치 문제의 해법은 아래와 같이 나타내어진다.

문제: $\dot{x} = f(t, x) \quad x(0) = x_0$
 해법: $w_0 = x_0 \quad w : x$ 를 근사한 값.
 $w_{i+1} = w_i + h \cdot \phi(t_i, w_i) \quad h : \text{step size}$

위 식에서 $\phi(t_i, w_i)$ 는 시간 t_i 와 t_{i+1} 사이에서의 변수 x 의 평균변화율을 근사한 값이라는 의미를 가지며 이를 얻는 방식에 따라 각 기법의 특징이 결정된다. n차의 Taylor 법은 이론적으로 $x(t)$ 에 대한 n차까지의 Taylor 전개에 근거하고 있다.

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + h \cdot x'(t_i) + \frac{h^2}{2!} \cdot x''(t_i) + \dots \\ &\quad + \frac{h^n}{n!} \cdot x^{(n)}(t_i) + R_{n+1} \\ &= x_i + h \cdot f(t_i, x_i) + \frac{h^2}{2!} \cdot f'(t_i, x_i) + \dots \\ &\quad + \frac{h^n}{n!} \cdot f^{(n-1)}(t_i, x_i) + R_{n+1} \\ x(t) &= x_i \quad x(t+h) = x_{i+1} \\ R_{n+1} &= \frac{h^{n+1}}{(n+1)!} \cdot x^{(n+1)}(\zeta) \quad \{ \zeta \in [t_i \leq t \leq t_{i+1}] \} \end{aligned}$$

이로부터 근사화된 평균 기울기의 식 $\phi(\cdot)$ 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\phi(t_i, w_i) = f(t_i, w_i) + \frac{h}{2!} \cdot f'(t_i, w_i) + \dots + \frac{h^{(n-1)}}{n!} \cdot f^{(n-1)}(t_i, w_i)$$

수치 적분법의 정확도를 나타내는 지표로서는 Local Truncation Error (LTE)를 사용하며 다음과 같이 정의된다.

$$LTE = \frac{x_{i+1} - x_i}{h} - \phi(t_i, w_i)$$

n차의 Taylor 법에서는

$$LTE = \frac{h^n}{(n+1)!} \cdot f^{(n)}(\zeta, x(\zeta)) \quad \text{가 된다.}$$

Taylor 법은 고차 미분항을 계산해야 하는 부담 때문에 실제 문제에는 사용되지 않고 이를 근사하면서 고차 미분항을 쓰지 않는 방법들이 실제로 사용된다. 보편적으로 사용되는 것은 Runge-Kutta 법인데, n차 Runge-Kutta 법의 $\phi(\cdot)$ 는 n차 Taylor 법의 $\phi(\cdot)$ 를 h^n 에 비례하는 오차로서 근사화한다. 4차 Runge-Kutta 법은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + \frac{1}{6} \cdot (k_0 + 2k_1 + 2k_2 + k_3) \quad LTE = O(h^4) \\ k_0 &= h \cdot f(t_i, x_i) \\ k_1 &= h \cdot f(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{k_0}{2}) \\ k_2 &= h \cdot f(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{k_1}{2}) \\ k_3 &= h \cdot f(t_i + h, x_i + k_2) \end{aligned}$$

2.2 전력 계통에서의 적용

전력 계통을 표현하는 비선형 미분 방정식과 회로망 방정식은 아래와 같다.

미분 방정식 :

$$\dot{X} = f(X, Y) \quad \dots \dots (1)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \quad x_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \vdots \\ x_{is} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_N \\ v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix}$$

m : 발전기의 수
 s_i : i 번째 발전기 및 부속기기의 상태변수 갯수
 N : 모선의 갯수

회로망 방정식 :

$$g(X, Y) = 0 \quad \dots (2)$$

$$g(X, Y) = \begin{bmatrix} P_{n1} - P_{g1} + P_{11} \\ P_{n2} - P_{g2} + P_{12} \\ \vdots \\ P_{nN} - P_{gN} + P_{1N} \\ P_{n1} - P_{g1} + P_{11} \\ P_{n2} - P_{g2} + P_{12} \\ \vdots \\ P_{nN} - P_{gN} + P_{1N} \end{bmatrix}$$

$P_{ni} Q_{ni}$: i 번째 모선의 계통 유입 전력
 $P_{gi} Q_{gi}$: i 번째 모선의 발전기 출력
 $P_{si} Q_{si}$: i 번째 모선의 부하량

여기서 각 전력은 다음과 같다.

$$P_{ni} = \sum_{j=1}^N [v_i \cdot v_j \cdot (g_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + b_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j))]$$

$$Q_{ni} = \sum_{j=1}^N [v_i \cdot v_j \cdot (g_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) - b_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j))]$$

g_{ij} : 모선 i 와 j 사이의 conductance
 b_{ij} : 모선 i 와 j 사이의 susceptance

$$P_{gi} = \frac{E_{qi} \cdot V_i \cdot \sin(\delta_i - \theta_i)}{X_{di}} + \frac{V_i^2 \cdot \sin(2 \cdot (\delta_i - \theta_i)) \cdot (X'_{qi} - X_{qi})}{2 \cdot X_{di} \cdot X_{qi}}$$

$$Q_{gi} = \frac{E_{qi} \cdot V_i \cdot \cos(\delta_i - \theta_i)}{X_{di}} - \frac{V_i^2 \cdot [\cos^2(\delta_i - \theta_i) \cdot X_{qi} + \sin^2(\delta_i - \theta_i) \cdot X'_{di}]}{X_{di} \cdot X_{qi}}$$

E_{qi} : i 모선 발전기의 평균 과도 reactance 전압
 δ : i 모선 발전기의 회전각
 X_{qi} : i 모선 발전기의 평균 동기 reactance
 X'_{di} : i 모선 발전기의 직류 과도 reactance

$$P_{1i} = P_{10i} \cdot \left(\frac{V_i}{V_{0i}}\right)^{K_{pi}} \cdot (1 + \beta_{pi} \cdot M_i)$$

$$Q_{1i} = Q_{10i} \cdot \left(\frac{V_i}{V_{0i}}\right)^{K_{qi}} \cdot (1 + \beta_{qi} \cdot M_i)$$

P_{10i}, Q_{10i}, V_{0i} : 시간 t 에서의 전력과 전압의 크기
 M_i : 주파수 변동량
 K_{pi}, K_{qi} : 전압의 전력에 대한 연관 상수
 β_{pi}, β_{qi} : 주파수의 전력에 대한 연관 상수

위와 같이 전력계통은 미분방정식 뿐만 아니라 방대한 규모의 대수방정식과 더불어 표현되므로 대수방정식과의 접속(interface)문제가 대두된다. 음적분법은 반복 구도를 통해 한 계산구간 내에서 여러번의 접속 과정을 거치지만 양적분법은 보통 계산 시간의 감소를 위해 그리 정밀한 접속을 하지 않는다. 흔히 사용되는 Runge-Kutta법에 의한 해석법은 미분방정식 (1)을 푸는 과정 중 계산구간 h 의 마지막에 Constraints 에 해당하는 대수식 즉 (2)식을 풀어 모선 전압을 새로 구하는 구도를 취하고 있다. 이러한 방식은 큰 비용을 필요로 하는 조류 계산의 시행 횟수가 비교적 적어서 좋으나, 실제 물리계는 연속적인 상호 작용을 한다는 점에서 이러한 방식은 정확도 면에서 상당히 취약하다. 이 방식의 구도된 정식화 하면 아래와 같다.

STEP 1 : 시간 t 에서 주어진 값 X_i 와 Y_i 를 이용하여 X_{i+1} 을 구한다. 세부 계산 과정에서 Y_i 는 상수이다.

$$X_{i+1} = X_i + \frac{1}{6} \cdot (k_0 + 2k_1 + 2k_2 + k_3)$$

$$k_0 = h \cdot f(X_i, Y_i)$$

$$k_1 = h \cdot f\left(X_i + \frac{k_0}{2}, Y_i\right)$$

$$k_2 = h \cdot f\left(X_i + \frac{k_1}{2}, Y_i\right)$$

$$k_3 = h \cdot f(X_i + k_2, Y_i)$$

STEP 2 : (접속 과정) 구해진 X_{i+1} 을 사용하여 회로망 방정식 (2)를 풀어 Y_{i+1} 을 구한다. 회로망 방정식은 보통 Newton-Raphson 법으로 푼다.

STEP 3 : 시간을 개선한다. STEP 1 으로 간다.

Runge-Kutta법을 위와 같이 적용하였을 경우 발생하는 정확도상의 문제점을 Runge-Kutta 2차 법의 하나인 Midpoint 법을 고찰함으로써 개념적으로 파악할 수 있다.

Midpoint Method : 변수 x 에 대한 부분만 적으면,
 $\dot{x} = f(x, y)$ $\dot{y} = r(x, y)$

$$\phi(x_i, y_i) = f\left(x_i + \frac{h}{2}, f(x_i, y_i), y_i + \frac{h}{2} \cdot r(x_i, y_i)\right)$$

Taylor 1차 전개를 하면

$$= f(x_i, y_i) + \frac{h}{2} \cdot f'(x_i, y_i) \cdot \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_i) + \frac{h}{2} \cdot r(x_i, y_i) \cdot \frac{\partial f}{\partial y}(x_i, y_i) + R_2$$

($R_2 \propto h^2$)

2차 Taylor Method : $T^{(2)}(x_i, y_i) = \phi(x_i, y_i)$

$$T^{(2)}(x_i, y_i) = f(x_i, y_i) + \frac{h}{2} \cdot f'(x_i, y_i)$$

$$= f(x_i, y_i) + \frac{h}{2} \cdot f(x_i, y_i) \cdot \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_i) + \frac{h}{2} \cdot r(x_i, y_i) \cdot \frac{\partial f}{\partial y}(x_i, y_i)$$

$$\therefore f'(x_i, y_i) = \frac{df}{dt}(x_i, y_i) = \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_i) \cdot f(x_i, y_i) + \frac{\partial f}{\partial y}(x_i, y_i) \cdot r(x_i, y_i)$$

두 방법 사이의 오차는 R_2 임을 알 수 있는데, 변수 y 를 상수로 취급하게 되면 h 와 비례하는 오차가 더 생기게 된다. 이 경우,

$$T^{(2)}(x_i, y_i) - \phi(x_i, y_i) = \frac{h}{2} \cdot r(x_i, y_i) \cdot \frac{\partial f}{\partial y}(x_i, y_i) - R_2$$

같은 방법으로 해석해 보면 Runge-kutta 4차법을 위와 같이 적용하였을 경우의 오차가 다음과 같이 됨을 알 수 있게 된다.

$$T^{(4)} - \phi(X_i, Y_i) = a \cdot h + b \cdot h^2 + c \cdot h^3 + d \cdot h^4$$

결과적으로 위의 방식에서의 LTE는 부분적으로 $O(h)$ 의 수준이 되어 높은 정확도를 필요로 하는 경우에는 사용하기가 곤란하다. 따라서 변수 Y 의 변화를 세부 계산 구간에서 고려함으로써 정확도를 향상시킨 새로운 방식이 요구된다.

3. 모선 전압 변화의 고려

발전기의 상태 변수를 정확히 구하기 위해 k_i 를 구할 때마다 조류 계산을 해 모선 전압을 개선한다면 계산 시간 증가가 너무 커 효율이 극히 낮아진다. 그러나 Runge-Kutta 법은 변수의 일차 미분값만을 필요로 하는 방법이기 때문에 모선 전압의 기울기를 구하면 그것들에 대해서도 적용이 가능해져 조류 계산을 하지 않고서도 모선 전압의 변화를 고려할 수 있게 된다. 모선전압의 기울기는 회로망 방정식을 미분함으로써 얻어질 수 있으며 각 세부계산시마다 기울기를 얻으면 $O(h^4)$ 수준의 LTE로서 시간 $t+h$ 에서의 상태변수와 모선전압의 값을 모두 얻을 수 있게 된다. 모선 전압의 기울기는 다음의 과정을 통해 얻어진다.

$$g(X, Y) = 0$$

$$\frac{dg(X, Y)}{dt} = \frac{\partial g}{\partial X} \cdot \frac{dX}{dt} + \frac{\partial g}{\partial Y} \cdot \frac{dY}{dt} = 0$$

$$\frac{dY}{dt} = - \left[\frac{\partial g}{\partial Y} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial g}{\partial X} \cdot X$$

$$= - \left[\frac{\partial g}{\partial Y} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial g}{\partial X} \cdot f(X, Y)$$

위의 관계를 이용하여 모선 전압을 포함시킨 Runge-Kutta 4차 법은 다음과 같이 표현된다.

$$X = f(X, Y) \quad Y = r(X, Y)$$

$$= -J^{-1} \cdot G \cdot f(X, Y), \quad G = \frac{\partial g}{\partial X}$$

$$X_{i+1} = X_i + \frac{1}{6} \cdot (k_0 + 2k_1 + 2k_2 + k_3)$$

$$k_0 = h \cdot f(X_i, Y_i)$$

$$k_1 = h \cdot f\left(X_i + \frac{k_0}{2}, Y_i + \frac{l_0}{2}\right)$$

$$k_2 = h \cdot f\left(X_i + \frac{k_1}{2}, Y_i + \frac{l_1}{2}\right)$$

$$k_3 = h \cdot f(X_i + k_2, Y_i + l_2)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + \frac{1}{6} \cdot (l_0 + 2l_1 + 2l_2 + l_3)$$

$$l_0 = h \cdot r(X_i, Y_i)$$

$$l_1 = h \cdot r\left(X_i + \frac{k_0}{2}, Y_i + \frac{l_0}{2}\right)$$

$$l_2 = h \cdot r\left(X_i + \frac{k_1}{2}, Y_i + \frac{l_1}{2}\right)$$

$$l_3 = h \cdot r(X_i + k_2, Y_i + l_2)$$

위의 방법을 적용한 안정도 해석법의 수행 순서는 다음과 같다.

STEP 1 : 조류 계산을 시행하여 각 모선의 전압과 각 전력량을 얻는다

STEP 2 : 각 발전기 및 부속기기의 상태변수의 초기치를 구한다.

STEP 3 : 사고를 상정한다.

- STEP 4 : 정해진 시간까지 다음을 반복한다.
- STEP 5 : 조류계산을 시행한다.
- STEP 6 : Runge-Kutta 법을 적용해 상태변수 및 모션 전압의 다음 값을 얻는다.
- STEP 7 : 시간을 한 단계 증가시킨다.
- step 8 : 끝낸다.

이러한 방법은 항상 정확도를 보장해 주지만 모션 전압의 기술기불 일기 위해 많은 시간이 드는 함수 $r(t)$ 의 계산을 한 구간 내에서 네 차례나 해야 하기 때문에 계산 비용이 많이 든다. 따라서 위의 방법이 가진 정확도를 유지하면서 비용을 절감할 수 있는 방안이 필요한데, 이러한 방안은 주로 step 6 내부의 시행과 관련이 된다.

방안 1 :

t_1 과 t_2 는 모두 $t+h/2$ 에서의 기술기에 근거해 구해진 모션 전압의 중분이다. t_1 은 $O(h)$ 의 LTE로 구한 $t+h/2$ 에서의 예측값으로부터 구해지고 t_2 은 $O(h^2)$ 의 LTE로 구해진 값에서 얻어져 보통의 경우 이 둘은 거의 차이가 나지 않는다. 그 결과 $t_2=t_1$ 의 관계로 정확도의 희생없이 이용할 수 있으며 한 계산구간 내의 $r(t)$ 의 계산 회수는 세번으로 줄게 된다. 적용 결과는 $r(t)$ 의 계산을 네차례 한 경우와 차이가 나지 않음을 보여 준다.

방안 2 :

발전기 상태 변수만을 $O(h^2)$ 의 LTE로 구하게 되면 필요한 정보는 t_1 t_2 로 줄게 되어 방안 1과 함께 적용될 경우 $r(t)$ 의 계산 회수는 두 번으로 줄게 된다. 이럴 경우 더이상 모션 전압은 $O(h^2)$ 의 LTE로 얻을 수 없게 되고 대신 Midpoint 법을 사용해 $O(h^2)$ 의 LTE로서 얻게 된다. 즉 t_1 을 직접 모션 전압의 중분으로 사용하게 된다. 이러한 변화는 STEP 5 에서 조류계산의 수렴성에 약간의 차이를 유발할 뿐 전체적인 정확도에는 전혀 영향이 가지 않는다. 왜냐 하면 STEP 5 의 과정은 두 변수들 사이의 접속과정이어서 모션전압 값이 다소 다르더라도 상태변수의 값이 같으면 수렴 후 결과는 같기 때문이다. 구해진 모션 전압 값의 정확도가 약간 떨어지지만 조류계산 내의 반복회수는 거의 늘어나지 않게 된다. 결국 전체적인 계산시간이 상당히 줄게 된다.

방안 3 :

모션 전압을 STEP 6에서 이미 개선했기 때문에 STEP 5의 조류계산을 선택적으로 적절히 생략할 경우 정확도는 큰 영향을 받지 않는다. 계통의 형태가 변하는 순간(사고 발생 순간, 고장 제거 순간)과 그 직후에는 충실히 조류계산을 해 주되 나머지 계산구간에서는 수 회에 한 번씩 계산을 하여도 결과는 큰 영향을 받지 않는다.

이상의 세 가지 방안을 종합적으로 적용함으로써 모션 전압을 고려하지 않은 경우와 비교해 비슷한 계산 시간으로 상당한 수준의 정확도 향상을 얻을 수 있게 된다.

4. 사례연구

제안된 방법을 IEEE 14 모션 계통에 적용하여 결과를 검증하였다. 상정 사고는 1번 모션과 5번 모션 사이의 선로가 끊어지는 것으로 잡았으며 0.2초 후 선로가 다시 연결되도록 했다. 사고의 영향을 가장 크게 받는 1번 발전기의 회전각자의 5초 동안 궤적을 그림 2, 3, 4, 5에 나타내었다. 4 가지의 방법을 비교하였는데, 첫번째 것은 모션전압을 고려하지 않았으며, 둘째는 모션 전압을 $O(h^2)$ 의 LTE로 얻는 방법이며, 셋째는 모션 전압을 Midpoint 법으로 얻는 방법이다. 마지막 방법은 세 번째 방법과 같으나 조류 계산을 선택적으로 줄인 경우이다. 계산 결과 정확도가 둘째 방법이 가장 좋으며 셋째 방법은 둘째 방법과 차이가 나지 않았다. 네째 방법은 약간의 차이가 있다. 이들 세 방법은 모두 첫번째 방법과 상당히 다른 결과를 보여 주고 있다. 계산시간은 아래의 표 1에 비교하였다.

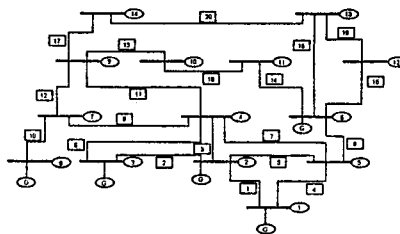


그림 1. IEEE 14 모션 계통도

	$h = 0.01$	$h = 0.02$	$h = 0.04$	$h = 0.05$
방법 1	914 / 0	480 / 0	257 / 0	202 / 0
방법 2	631 / 2000	367 / 1000	207 / 500	173 / 400
방법 3	630 / 1000	363 / 500	203 / 250	167 / 200
방법 4	209 / 1000	106 / 500	65 / 250	104 / 200

(조류계산의 J^1 / 적분과정의 J^1)
표 1. J^1 계산회수의 비교

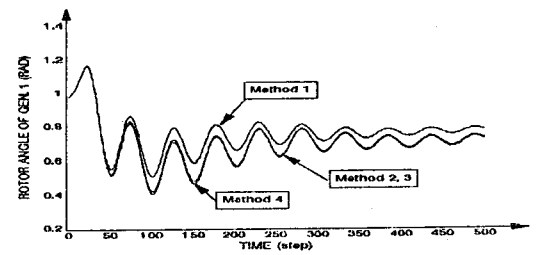


그림 2. $h=0.01$ 일 때의 결과.

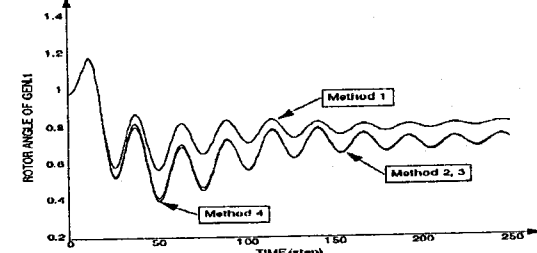


그림 3. $h=0.02$ 일 때의 결과.

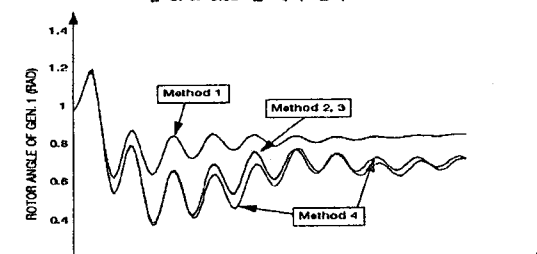


그림 4. $h=0.04$ 일 때의 결과.

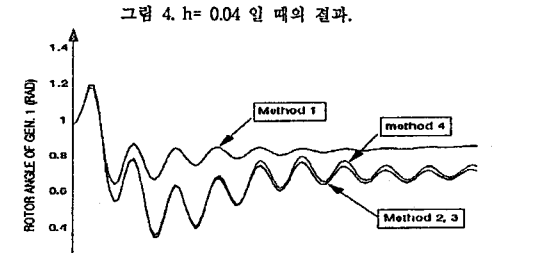


그림 5. $h=0.05$ 일 때의 결과.

5. 결론

모션 전압의 변화율을 고려하지 않은 Runge-Kutta 법은 부분적으로 $O(h)$ 의 LTE를 가짐을 알 수 있었으며, 상태변수의 기술기로부터 모션 전압의 변화율을 구해 Runge-Kutta 법을 모션 전압에도 적용함으로써 정확도를 $O(h^2)$ 수준으로 향상시켰다. 변화율을 구하는 과정에서 발생하는 계산 시간의 증가를 상쇄하는 세가지 방안을 도입해 변화율을 고려하지 않은 경우와 비교해 유사한 수준의 계산 시간이 들도록 하였다. 사례연구를 통해 step size 가 클수록 정확도의 차이도 커짐을 알 수 있었다. 조류 계산의 생략 여부를 판단하는 방법을 더욱 발전시키면 전체 효율이 크게 향상되리라 기대된다. 본 논문의 결과는 제어 기법 검증용 위한 Simulation system 구성에 적용될 예정이다.

REFERENCES

- [1] Yao-non Yu, "Electric Power System Dynamics", Academic press, 1983.
- [2] G. W. Stagg, A. H. El-Abiad, "Computer Methods in Power system Analysis", McGraw Hill Inc., 1968.
- [3] A. R. Burgen, "Power System Analysis", Prentice-Hall Inc., 1986.
- [4] 박종배, "A Comparative Study on the Transient Stability Analysis Methods", 서울대학교 석사논문, 1991.
- [5] K. Saikawa, et al, "Real Time Simulation System of Large-Scale Power System Dynamics for a Dispatcher Training Simulator", IEEE Trans. Vol. PAS-103, No 12, pp 3496-3501, 1984.
- [6] H. W. Dommel, N. Sato, "Fast Transient Stability Solution", IEEE Trans. Vol. PAS-91, No 4, pp 1643-1650, 1972.
- [7] 한국전력공사, 서울대학교 공학연구소, "발전기 제어계 적정 파라미터 선정에 관한 연구", KRC-88S-J01, 한국전력공사 기술연구원.