

과도안정도 시모의해석법의 계산속도 개선 및 프로그램 개발에 관한 연구

문 영현

연세대학교 전기공학과

Development of efficient method to reduce the computation time for transient stability time simulation program

Young-Hyun Moon

Electrical Engineering, Yonsei Univ.

1. Abstract

본 연구에서는 전력계통의 다이내믹스를 정확하게 표현할 수 있는 기계적 시스템인 등가역학 모델(Equivalent Mechanical Model: EMM)을 제안하고, 이를 기초로 확고한 수학적 해석을 통해 에너지 함수의 유도 방법을 체계화 하고 물리적 의미를 파악함으로써 에너지 함수를 이용한 시스템 해석에 대한 이론적 배경을 마련한다. 또한 시영역 모의법을 이용한 과도안정도 해석의 간접법에서 SI법중 Trapezoidal법에서의 오차를 줄일수 있는 알고리즘을 제시한다. 먼저 수학적 이론을 바탕으로 전력계통에 적용하여 상태변수를 업데이트 시킴으로써 Trapezoidal법에서보다 더 정확한 데이터를 얻고자 한다. 본 연구에서는 명확한 수학적 이론의 적용을 위해 1기 무한대 모션을 모델로 시뮬레이션 하였으며 결과의 비교분석을 위해 Runge-Kutta법에 의한 시영역 모의와 비교하였다.

2. 본 론

과도 안정도 해석은 시모의(Time Simulation)방법, Lyapunov 직접법과 두 방법을 같이 이용하는 방법등 다양한 방법으로

수행될 수 있다. 시모의법은 온라인 TSA(과도안정도 해석)을 위한 가장 기본적인 접근방법이다.

최근에 과도안정도 시뮬레이션의 속도를 높이는 데 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 대부분의 전통적인 알고리즘은 온라인 과도안정도 해석이 요구하는

계산속도를 만족시켜주지 못하고 있다. 그 이유는 발전기의 돌극성 효과를 고려하는 반복적인 계산과정 때문이다. Dandeno 와 Kundur[]는 발전기의 돌극성을 제거하여 비반복 알고리즘을 개발하는 시도를 하였다. 그들의 알고리즘은 상당히 개선된 것이다.

1. Polarized Linear Network

전력계통은 그림 1과 같이 발전기의 돌극성을 고려한 모델로 표현될 수 있다. 과도안정도 해석에서는 흔히 다음의 두가지 어려운 점이 있다. 그 하나는 발전기의 돌극성을 다뤄야한다는 점이고, 두 번째로는 부하의 비선형성을 다뤄야 한다는 점이다.

모든 전통적인 Time Simulation 알고리즘은 위의 두가지 문제점을 해결하기 위해서 반복적인 알고리즘을 이용한다. 이 반복적인 과정은 매 시간격마다 행해진다. 이 때문에 계산시간이 길어지게 된다. 그러나, 발전기의 돌극성과 부하의 비선형성이 제거 되면 계산 시간이 상당히 단축된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 부하의 비선형성은 다이내믹 부하모델을 사용하면 약간의 오차를 가지고 제거될 수 있다. 부하의 비선형성을 제거하기위해 다음과같은 동적 전류원을 고려해 보자.

$$T_{Li} \dot{I}_{Li} = -I_{Li} + [P_{Li}(V_i) - jQ_{Li}(V_i)]/V_i \quad (2.1)$$

여기서, $V_i = |V_i|$

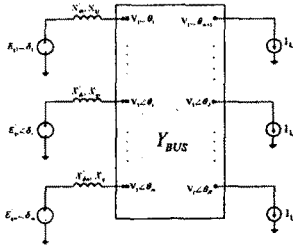


그림 1. 발전기 돌극성을 고려한 전력계통
Fig. 1. Power System considering Generator Saliency

위의 식에서 정상상태의 전류를 알 수 있다.

$$I_{Li} = [P_{Li}(V_i) - jQ_{Li}(V_i)] / V_i^* \quad (2.2)$$

식 (2.1)에 나타난 부하모델은 정상상태의 전력계통을 항상 만족시킨다. 시간격 T_{Li} 가 충분히 작다면, 전류원모델이 그림 1의 이상적인 부하모델에 비해 무시할 수 있는 에러를 가진다. 또한, 식 (2.1)의 부하모델은 갑작스런 전압의 변화에 대해서도 정상상태를 유지할 수 있는 이상적인 부하를 가지지 않기 때문에 더욱 실제적인 모델이다. 전력계통에서 대부분의 모션 부하는 무시할 수 없는 정도의 시정수를 가지고 있고, 동요후에 과도기간 동안에 일정 임피던스 부하로 여겨진다. 이상적인 모델과 실제적인 모델과의 중간적인 모델을 얻기위해서, 본 연구에서는 시정수를 적분의 시간격과 같도록 하였다. 이 경우에 식 (2.1)의 전류는 다음의 간단한 식으로 갱신될 수 있다.

$$I_i(t_{k+1}) = [P_{Li}(V_i(t_k)) - jQ_{Li}(V_i(t_k))] / V_i^*(t_k) \quad (2.3)$$

위 식의 모든 부하에 동적인 전류원모델을 이용함으로써, 그림 1의 전력계통은 다음의 Polarized Linear Network으로 표현될 수 있다. 이 계통은 반복되지 않는 선형 방정식을 풀으므로 해석될 수 있다.

본 연구에서는 간단하게 하기 위해서 발전기 모델을 E_q' 모델을 사용하였다. 각 발전기에 대해 다음의 상태방정식이 주어진다.

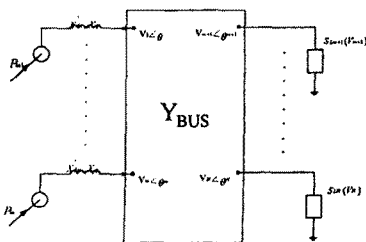


그림 2. Polarized 선형 계통

Fig. 2. Polarized Linear System

$$T_{do}' \frac{dE_q'}{dt} = -E_q' - (X_d - X_d')I_d + E_{fd} \quad (2.4a)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.4b)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_M - E_q'I_q - (X_q - X_d')I_d I_q - T_{FW} \quad (2.4c)$$

$$T_E \frac{dE_{fd}}{dt} = -(K_E + S_E(E_{fd}))E_{fd} + V_R \quad (2.5a)$$

$$T_F \frac{dR_f}{dt} = -R_f + \frac{K_F}{T_F} E_{fd} \quad (2.5b)$$

$$T_A \frac{dV_R}{dt} = -V_R + K_A R_F - \frac{K_A K_F}{T_F} E_{fd} + K_A (V_{ref} - V) \quad (2.5c)$$

$$T_{CH} \frac{dT_M}{dt} = -T_M + P_{SV} \quad (2.6a)$$

$$T_{SV} \frac{dP_{SV}}{dt} = -P_{SV} + P_C - \frac{1}{R_D} \left(\frac{\omega}{\omega_s} - 1 \right) \quad (2.6b)$$

Limit Constraints

$$V_i^{min} \leq V_R \leq V_R^{max} \\ 0 \leq P_{SV} \leq P_{SV}^{max} \quad (2.7)$$

2. 제안된 방법에 의한 안정도 해석

먼저 발전기 댐핑이 고려되지 않은 동요방정식에 대해 제안된 방법에 대해 식을 유도 해보기로 한다. 댐핑이 고려되지 않은 동요방정식은 다음의 식 (2.8), 식(2.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{i+1} - \frac{1}{3} (\omega_{i+1} - \omega_0) \\ = \delta_i + \frac{2}{3} \Delta T (\omega_i - \omega_0) + \frac{1}{6} \Delta T^2 A(t) \quad (2.8)$$

$$\omega_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T \frac{\pi f_0}{H} \left[P_m - \frac{EV}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) \right] \\ = \omega_i + \frac{2}{3} \Delta T \frac{\pi f_0}{H} \left[P_m - \frac{EV}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) \right] + \frac{1}{6} \Delta T^2 A(t) \quad (2.9)$$

$A(t)$ 를 구하면 식(2.10)과 같다.

$$A(t) \\ = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\pi f_0}{H} \frac{EV}{X} \cos(\delta_i - \theta_i) \\ \omega_i - \omega_0 \\ \frac{\pi f_0}{H} \left(P_m - \frac{EV}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) \right) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \frac{\pi f_0}{H} \left(P_m - \frac{EV}{X} \sin(\delta - \theta) \right) \\ \frac{\pi f_0}{H} \frac{EV}{X} \cos(\delta_i - \theta_i) (\omega_i - \omega_0) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

식(2.10)을 식(2.8), 식(2.9)에 대입해서 정리하면 식(2.11), 식(2.12)과 같다.

$$\delta_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T \omega_{i+1}$$

$$= \delta_i + \frac{2}{3} \omega_i \Delta T + \frac{1}{6} \frac{\pi f_0}{H} \left(P_m - \frac{EV}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) \right) \Delta T^2 - \omega_0 \Delta T \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \omega_{i+1} + \frac{1}{3} \frac{\pi f_0}{X} \frac{EV}{H} \sin(\delta_{i+1} - \theta_{i+1}) \Delta T \\ = \omega_i - \frac{2}{3} \frac{EV}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) \Delta T \\ - \frac{1}{6} \frac{\pi f_0 EV}{HX} \Delta T^2 (\cos \delta_i - \theta_i) (\omega_i - \omega_0) \\ + \frac{\pi f_0}{H} P_m \Delta T \end{aligned} \quad (2.12)$$

제안된 방법에 대해 댐핑이 고려된 동요방정식을 유도해보자. 댐핑이 고려된 동요방정식은 다음의 식(2.13), 식(2.14)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \delta_{i+1} - \frac{1}{3} (\omega_{i+1} - \omega_0) \\ = \delta_i + \frac{2}{3} \Delta T (\omega_i - \omega_0) + \frac{1}{6} \Delta T^2 A(t) \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \omega_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T \frac{\pi f_0}{H} \left[P_m - \frac{EV}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) - D(\omega_i - \omega_0) \right] \\ = \omega_i + \frac{2}{3} \Delta T \frac{\pi f_0}{H} \left[P_m - \frac{EV}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) - D(\omega_i - \omega_0) \right] + \frac{1}{6} \Delta T^2 A(t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$A(t)$ 를 구하면 식(2.15)과 같다.

$$\begin{aligned} A(t) \\ = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{H} D \\ -\frac{\pi f_0}{H} \frac{EV}{X} \cos(\delta_i - \theta_i) & -\frac{\pi f_0}{H} D \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \omega_i - \omega_0 \\ \frac{\pi f_0}{H} \left(P_m - \frac{EV}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) - D(\omega_i - \omega_0) \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$A(t_1) = \frac{\pi f_0}{H} \left(P_m - \frac{EV}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) - D(\omega_i - \omega_0) \right) \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} A(t_2) = -\frac{\pi f_0}{H} \frac{EV}{X} \cos(\delta_i - \theta_i) (\omega_i - \omega_0) \\ - \left(\frac{\pi f_0}{H} \right)^2 D \left(P_m - \frac{EV}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) - D(\omega_i - \omega_0) \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

여기서, $A(t) = \begin{bmatrix} A(t_1) \\ A(t_2) \end{bmatrix}$

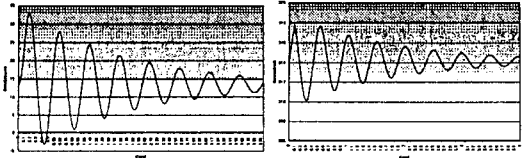
식 (2.13)와 식 (2.14)의 우변을 상수 C_1, C_2 로 각각 정의하여 새로운 함수 $H(X(t))$ 로 정의하고 식 (2.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H(X(t)) = \\ \begin{bmatrix} \delta_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T (\omega_{i+1} - \omega_0) - C_1 \\ \omega_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T \frac{\pi f_0}{H} \left[P_m - \frac{EV_{i+1}}{X} \sin(\delta_{i+1} - \theta_{i+1}) \right] - C_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.18)$$

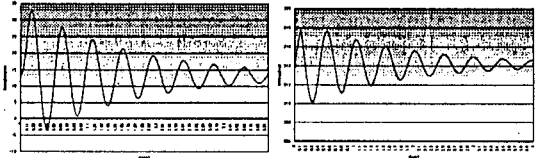
식 (2.18)를 Newton법을 이용하여 상태변수를 구할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 결과 고찰

앞장에서 제안된 방법에 의한 과도 안정도 해석기법을 1기 무한대 모션 계통에 적용하여 시뮬레이션을 하였다.



(a) 발전기의 위상각 δ (b) 발전기의 각속도 ω
그림 3.1 Runge-Kutta 법에 의한 상태변수 (시간간격 0.001초)



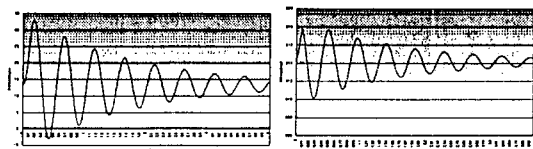
(a) 발전기의 위상각 δ (b) 발전기의 각속도 ω
그림 3.2 제안된 방법에 의한 상태변수 (시간간격 0.001)

Runge-Kutta법과 제안된 방법의 시간간격 0.001초에 의한 시영역 시뮬레이션 결과가 그림 3.1과 3.2에 각각 나와있다. 그림을 보면 두 방법에 의한 시영역 시뮬레이션 결과가 오차없이 거의 같음을 알 수 있다. 시모의 시간을 비교해 보면 표 3.1과 같다.

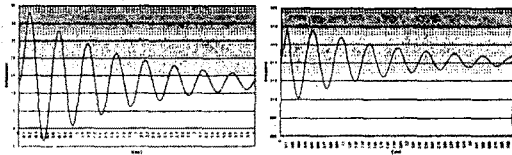
표 3.1 시영역 모의 수행 시간(시간간격 0.001초)

	Runge-Kutta 법	제안된 방법
시간(sec)	3.19	2.49

표를 보면, 제안된 방법의 시모의 수행시간이 Runge-Kutta법의 78%가 소요됨을 알 수 있다. 시간간격을 0.01초로 하여 시영역 시뮬레이션을 한 결과가 그림 3.3과 3.4에 각각 나타내었다.



(a) 발전기의 위상각 δ (b) 발전기의 각속도 ω
그림 3.3 Runge-Kutta 법에 의한 상태변수 (시간간격 0.01초)



(a) 발전기의 위상각 δ (b) 발전기의 각속도 ω
 그림 3.4 제안된 방법에 의한 상태변수
 (시간간격 0.01초)

표 3.2 시영역 모의 수행 시간(시간간격 0.01초)

	Ruge-Kutta 법	제안된 방법
시간(sec)	0.49	0.29

그림을 보면, Ruge-Kutta법과 제안된 방법의 시간간격 0.01초에 의한 시영역 모의의 결과가 거의 같음을 알 수 있다. 표3.2에 나타난 결과를 보면 제안된 방법이 Ruge-Kutta법 시모의 수행시간의 59%가 소요됨을 알 수 있다.

4. 결 론

과도 안정도 해석의 시영역 모의에서 기존에 사용되었던 SI법중 Trapezoidal 법을 사용하였으나 신뢰할 수 없는 결과 때문에 Runge-Kutta법을 사용하였다. 본 논문에서는 SI법에서 상태변수의 오차를 줄이고 Runge-Kutta법에서 소요되는 시간을 단축하는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 비선형 미분방정식을 테일러 급수를 적용 2차 근사하여 명확한 수학적 이론을 바탕으로 증명하였고 전력계통에 적용하였으며 제안된 방법에 의한 알고리즘을 1기 무한대 모선계통을 대상으로 시뮬레이션 하였다. 시영역 모의 시험결과 시간간격이 0.001초일 때 Runge-Kutta법, Trapezoidal 법과 제안된 방법이 거의 똑같은 결과가 나왔으나 수행시간이 SI법에 더 작게 소요되었음을 보였으며 시간간격을 0.01초로 했을 때 Trapezoidal 법은 오차가 나기 시작한 반면 제안된 방법은 Runge-Kutta법에서 시간간격을 0.001초로 했을 때와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

이 제안된 방법은 전력계통의 안정도를 판단함에 있어서 반복적인 수치적분으로 인해 장시간이 소요되었던 간접법의 단점을 극복할 수 있는 방법으로 사료되며 많은 연구가 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] P. L. Dandeno, P. Kundur, A Non-Iterative Transient Stability Program Including the Effects of Variable Load-Voltage Characteristics, IEEE/PES 73WM.T73, 1973.(1)
- [2] Y. H. Moon et al. Analysis of Polarized Linear Electric Network with Two-Reactance Components, IEEE/CDC 98WM, session code: TA15-2, paper NO. CDC-980194, to be presented.
- [3] Y. H. Moon, B. H. Cho, and B. K. Choi, Saliency-Reflected Noniterative Approach to Transient Stability Simulation of Power

- Systems, Proceedings Paper 619, accepted for IEEE PES 1999 Winter Meeting, Feb. 1999.
- [4] M. A. Pai, *Computer Techniques in Power System Analysis*, Indian Institute of Technology, Kanpur.
- [5] K. R. Padiyar, *Power System Dynamics: Stability & Control*, John Wiley & Sons(Asia) Pte Ltd and Interline Publishing Pvt Ltd, 1995.
- [6] C. L. Gupta, A. H. El-Abiad, "Determination of the Closest Unstable Equilibrium State for Lyapunov Methods in Transient Stability Studies.", IEEE Trans. on Power App. Syst., Vol. PAS-95, No.5, pp.1669-1712, Sep./Oct. 1976.
- [7] H.-D. Chiang and J. S. Thorp, "The closest unstable equilibrium point method for power system dynamic security assessment", IEEE Trans. Circuit Syst. Vol. 36, pp. 1187-1199, Dec. 1989.
- [8] Y. Tamura, K. Iba, and S. Iwamoto, "A method for finding multiple load-flow solutions for general power systems", Proc. of IEEE PES Winter Meeting, 1980, New York, A80043-0, Feb. 1980.
- [9] F. M. A. Salam et. al., "Parallel Processing for the Load Flow of Power Systems: the Approach and Applications", Proc. 28th Conf. Decision and Control, Tampa, FL, Dec. 1989.