

포물선 근사법에 의한 전력계통 과도 안정도 시모의 해석 알고리즘 개선에 관한 연구

이종기* 황지환 류현수 문영현
연세대학교 전기공학과

Time Simulation Algorithm by Parabolic Approximation Method for Powre System Tra

J.G. Lee* J.H. Hwang H.S. Ryu Y.H. Moon
Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.

Abstract - 지금까지 전력계통에 대한 안정도 해석이 활발하게 논의되고 있다. 과도 안정도 해석의 시모의법에서 보편적으로 사용되고 있는 알고리즘들에서 기존에 사용되어졌던 SI법 중 Trapezoidal법이 알려져 있으나 그 데이터 오차가 많아 신뢰할 수 없기 때문에 거의 사용되지 않고 있는 현실이다. 본 논문에서는 이러한 시영역 모의 방법 중 SI법의 Trapezoidal법이 오차가 많은 단점을 없애기 위해서 전력계통 상태변수의 업데이트를 위한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 명확한 수학적 이론으로 증명하였으며, 제안된 방법을 전력계통에 적용하여 과도 안정도 해석을 한다.

본 논문에서는 시영역 모의법을 이용한 과도안정도 해석의 간접법에서 SI법중 Trapezoidal법에서의 오차를 줄일 수 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. SI법에 의한 과도 안정도 해석

1. 서 론

일반적으로 비선형 다이내믹 시스템인 전력계통은

전력계통은 한 세기 이상 안정적으로 운용되어 왔지만 오늘날 산업기술의 발달과 기계문명의 혜택으로 인류의 생활 수준이 향상 되 가면서 전력수요가 급증하게 되었다. 또한 생활환경, 환경보존 등의 여러 가지 사회적 제약으로 발전 설비가 부하 중심지로부터 먼 곳에 집중적으로 건설되고 있으며 송전시스템은 대용량, 장거리화 하는 추세이다. 그러나 송전망은 미비하여 급격히 증가 하는 부하를 감당하기 힘들 정도로 송전 용량은 포화상태로 운전되면서 새로운 형태의 사고로 이어지고 있다. 특히 계통이 과부하 상태에 놓일 때 발생하는 계통의 불안정 중에 하나가 바로 전압 붕괴현상이다. 전압붕괴 현상은 최근 구미 각국의 대규모 정전 사고 시에 발견된 현상으로 계통안정도 유지를 위해서는 적절한 전압안정도 대책이 필수적으로 요구되고 있다.

$\dot{x} = F(x(t), t)$ 과 같은 비선형 상태방정식의 집합으로 나타낼 수 있다. 여기서 F 는 $n \times 1$ 차원의 상태변수 벡터이다. 상태변수의 개수인 n 은 시스템의 차수(order)라고 한다. $x(t)$ 는 시간 t 가 0에서 무한대까지 변함에 따라 그리게 되는 상태공간에서의 궤적에 해당된다. 현실적으로 비선형 미분방정식의 해인 $x(t)$ 를 정확히 구하는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 수치적으로 근사적인 해를 구해왔다. 일반적으로 전력계통에 적용하는 방법은 접근방법에 따라 SI법과 PE법 두 가지를 사용해 왔으며 SI법인 Trapezoidal법은 PE법의 Runge-Kutta법 또는 Euler법에 비해 시간간격을 크게 해서 계산시간을 줄일 수 있다는 장점이 있지만 정확도 면에서 신뢰할 수 없기 때문에 기존에 사용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 장에서는 SI법에서 Trapezoidal 법의 단점을 극복하는 새로운 알고리즘을 제시하고 명확한 수학적 증명을 통해 타당성을 증명한다.

최근에는 많은 사람들이 여러 가지 우발적인 사고에 대한 대응책을 확립하기 위해서 과도 안정도 해석을 얼마나 빨리 할 수 있는가에 대해서 초점을 맞추고 있다. 전력계통의 안정도 해석법은 그 접근 방법에 따라서 크게 에너지 함수를 이용한 직접 해석법과 시영역 모의를 이용한 간접법이 있다.

2.1 SI법의 수학적 해석

시영역 모의를 이용한 간접 해석법은 현재 많은 전력 회사에서 개발되어 쓰이는 보편적인 방법으로써 계통의 상세모델을 직접 반영할 수 있으며 모든 상태변수에 대한 정보를 얻을수 있다는 장점이 있다. 반면 반복적인 수치 해석에 장시간이 소요되기 때문에 최근 추세를 감안할 때 큰 문제점으로 지적되고 있고 또한 안정 여유도를 산출할 수 없을 뿐만 아니라 계통의 불안정이 예기될 때 이에 대한 적절한 제어방법에 대한 정보를 갖지 못하는 단점(9)을 가지고 있다.

전력계통은 미분방정식으로 이루어진 거대한 시스템으로 과도 안정도해석에서 상태방정식의 해를 구하는 것은 필수적이다. 본 절에서는 전력계통의 상태방정식의 해를 구하는 방법에서 일반적으로 사용되어 지는 Trapezoidal법에서 오차를 줄일 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하고 제안된 방법의 알고리즘을 수학적으로 해석하고 명확한 알고리즘임을 증명한다.

2.1.1 제안된 방법의 수학적 해석

전력계통은 비선형 미분방정식이며 상태변수의 업데이트에 대한 관점에서 본다면, 현재 다양한 알고리즘이 쓰이고 있는데, 크게 PE(Partitioned Explicit)법과 SI(Simultaneous Implicit)법이다. 현재 전력계통의 시영역 모의에서 사용하고 있는 SI법은 Trapezoidal법을 사용하여 왔다. 그러나 Trapezoidal법은 그 오차가 심하므로 신뢰도 면에서 과도 안정도 해석의 요구에 충족되지 못하기 때문에 현재 시영역 모의에 거의 사용되지 않고 있는 실정이다.

식(2.1)은 비선형 다이내믹 시스템인 전력계통을 표현하고 있으며 F 는 $n \times 1$ 차원의 상태변수 벡터이고, 상태변수의 개수인 n 은 시스템의 차수(order)라고 한다. $x(t)$ 는 시간 t 가 0에서 무한대까지 변함에 따라 그리게 되는 상태공간에서의 궤적에 해당된다. 그림 2.1은 $x(t)$ 의 궤적을 그래프로 나타낸 것이다.

$$\dot{x} = F(x(t), t), \quad x(0) = x_0 : \text{초기값} \quad (2.1)$$

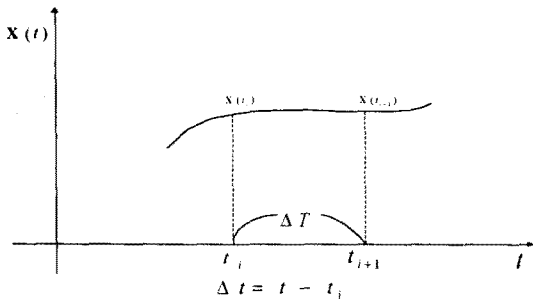


그림 2.1 $x(t)$ 의 그래프

$$x(t_i + \Delta T) - x(t_i) = \int_{t_i}^{t_i + \Delta T} F(x(t), t) dt = \int_{t_i}^{t_i + \Delta T} G(t) dt \quad (2.2)$$

단, $G(t) = F(x(t), t)$

식(2.2)의 우변을 테일러 전개하면 식(2.3)과 같다.

$$G(t) = G(t_i) + A \Delta t + B \Delta t^2 \quad (2.3)$$

A 와 B 를 계산하면 식(2.4), 식(2.5)과 같다

$$A = \frac{dG(t)}{dt} = \frac{d}{dt} F(x(t), t) \Big|_{t=t_i} = \frac{\partial F(x(t), t)}{\partial x(t)} \Big|_{t=t_i} \cdot F(x(t), t) + \frac{\partial F(x(t), t)}{\partial t} \Big|_{t=t_i} \quad (2.4)$$

$$B = \frac{1}{\Delta T^2} [(G(t_{i+1}) - G(t_i) - A \Delta T)] \quad (2.5)$$

식(2.2)은 식(2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{t_i}^{t_i + \Delta T} G(t) dt = \int_0^{\Delta T} [G(t_i) + A \Delta t + \frac{1}{\Delta T^2} (G(t_{i+1}) - G(t_i) - A \Delta T) \Delta t^2] d\Delta t = \frac{1}{3} \Delta T [G(t_{i+1}) + 2G(t_i)] + \frac{1}{6} A \Delta T^2 \quad (2.6)$$

식(2.6)를 식(2.1)에 대입하면 식(2.7)과 같다.

$$x(t_{i+1}) - x(t_i) = \frac{1}{3} [G(t_{i+1}) + 2G(t_i)] \Delta T + \frac{1}{6} A(t_i) \Delta T^2 \quad (2.7)$$

상태변수 $x(t_{i+1})$ 에 대해서 풀면 식(2.8)과 같다.

$$x(t_{i+1}) - \frac{1}{3} \Delta T F(x(t_{i+1}), t_{i+1}) = x(t_i) + \frac{2}{3} \Delta T F(x(t_i), t_i) + \frac{1}{6} A(t_i) \Delta T^2 \quad (2.8)$$

단, $A(t_i) =$

$$\frac{\partial F(x(t), t)}{\partial x(t)} \Big|_{t=t_i} \cdot F(x(t), t) + \frac{\partial F(x(t), t)}{\partial t} \Big|_{t=t_i} \quad (2.9)$$

2.2 SI법에 의한 과도안정도 해석

본 논문에서는 명확한 시물레이션을 위해 SI법을 1기 무한대 모선계통에 적용하였으며 발전기 모델은 Classical Model로 하였다. 제안하는 방법을 전력계통에 적용하기 위한 식을 유도 해보았다.

2.2.2 제안된 방법에 의한 안정도 해석

먼저 발전기 댐핑이 고려되지 않은 동요방정식에 대해 제안된 방법에 대해 식을 유도 해보기로 한다. 댐핑이 고려되지 않은 동요방정식을 식(2.8)에 적용하면 식(2.10), 식(2.11)과 같다.

$$\delta_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T (\omega_{i+1} - \omega_0) = \delta_i + \frac{2}{3} \Delta T (\omega_i - \omega_0) + \frac{1}{6} \Delta T^2 A_1(t) \quad (2.10)$$

$$\omega_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T \frac{\pi f_0}{H} [P_m - \frac{EV_{i+1}}{X} \sin(\delta_{i+1} - \theta_{i+1})] = \omega_i + \frac{2}{3} \Delta T \frac{\pi f_0}{H} [P_m - \frac{EV_i}{X} \sin(\delta_i - \theta_i)] + \frac{1}{6} \Delta T^2 A_2(t) \quad (2.11)$$

위 식에서 $A_1(t)$, $A_2(t)$ 는 식(2.9)에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A(t) = \begin{bmatrix} A_1(t) \\ A_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\pi f_0}{H} \frac{EV_i}{X} \cos(\delta_i - \theta_i) \quad 0 \\ \frac{\pi f_0}{H} [P_m - \frac{EV_i}{X} \sin(\delta_i - \theta_i)] \\ -\frac{\pi f_0}{H} \frac{EV_i}{X} \cos(\delta_i - \theta_i) (\omega_i - \omega_0) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

제안된 방법에 대해 댐핑이 고려된 동요방정식은 다음과 같다.

$$\delta_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T (\omega_{i+1} - \omega_0) = \delta_i + \frac{2}{3} \Delta T (\omega_i - \omega_0) + \frac{1}{6} \Delta T^2 A_1(t) \quad (2.13)$$

$$\omega_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T \frac{\pi f_0}{H} [P_m - \frac{EV_{i+1}}{X} \sin(\delta_{i+1} - \theta_{i+1}) - D(\omega_{i+1} - \omega_0)] = \omega_i + \frac{2}{3} \Delta T \frac{\pi f_0}{H} [P_m - \frac{EV_i}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) - D(\omega_i - \omega_0)] + \frac{1}{6} \Delta T^2 A_2(t) \quad (2.14)$$

위 식에서 $A_1(t)$, $A_2(t)$ 는 식(2.9)에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A(t) = \begin{bmatrix} A_1(t) \\ A_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\pi f_0}{H} \frac{EV_i}{X} \cos(\delta_i - \theta_i) \quad -\frac{\pi f_0}{H} D \\ \frac{\pi f_0}{H} [P_m - \frac{EV_i}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) - D(\omega_i - \omega_0)] \\ -\frac{\pi f_0}{H} \frac{EV_i}{X} \cos(\delta_i - \theta_i) (\omega_i - \omega_0) \end{bmatrix} A(t_1) = \frac{\pi f_0}{H} [P_m - \frac{EV_i}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) - D(\omega_i - \omega_0)] \quad (2.15)$$

$$A(t_2) = -\frac{\pi f_0}{H} \frac{EV_i}{X} \cos(\delta_i - \theta_i) (\omega_i - \omega_0) - (\frac{\pi f_0}{H})^2 D [P_m - \frac{EV_i}{X} \sin(\delta_i - \theta_i) - D(\omega_i - \omega_0)] \quad (2.16)$$

여기서, $A(t) = \begin{bmatrix} A_1(t) \\ A_2(t) \end{bmatrix}$

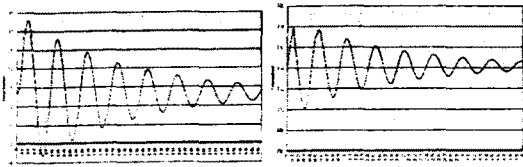
식(2.13)과 식(2.14)의 우변을 상수 C_1 , C_2 로 각각 정의하여 새로운 함수 $H(x(t))$ 로 정의하고 식(2.17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(x(t)) = \begin{bmatrix} \delta_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T (\omega_{i+1} - \omega_0) - C_1 \\ \omega_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta T \frac{\pi f_0}{H} [P_m - \frac{EV_{i+1}}{X} \sin(\delta_{i+1} - \theta_{i+1})] - C_2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

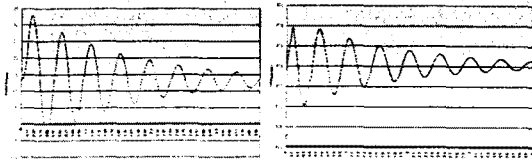
식(2.17)을 Newton법을 이용하여 상태변수를 구할 수 있다

3. 시뮬레이션 및 결과 고찰

앞장에서 제안된 방법에 의한 과도 안정도 해석기법을 1기 무한대 모선 계통에 적용하여 시뮬레이션 하였다.



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



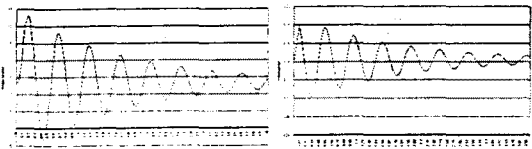
(a) 발전기의 위상각 δ (b) 발전기의 각속도 ω
그림 3.2 제안된 방법에 의한 상태변수
(시간간격 0.001)

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. 시도의 시간을 비교해 보면 표 3.1과 같다.

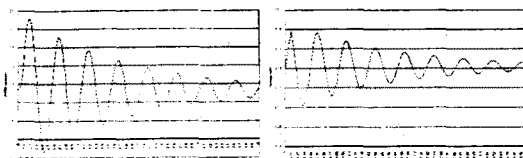
표 3.1 시영역 모의 수행 시간(시간간격 0.001초)

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

표를 보면, 제안된 방법의 시도의 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)

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

그림을 보면, Runge-Kutta법과 제안된 방법의 시간간격 0.01초에 의한 시영역 모의의 결과가 거의 같음을 알 수 있다. 표 3.2에 나타난 결과를 보면 제안된 방법이 Runge-Kutta법 시도의 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 태일러 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 Engineering 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.