

과도 안정도 해석 프로그램을 위한 최적 시 적분 알고리즘 선정방안

김동주, 조운성, 장길수, 이병준, 권세혁
고려대학교 전기공학과

Selection of the time Integration algorithm for transient stability analysis program

D. J. KIM, Y. S. Cho, G. Jang, B. Lee, S. H. Kwon
Department of Electrical Engineering, Korea University

Abstract - Power system analysis is generally based on computer simulation and time-domain simulation is used to assess its dynamic performance. This paper deals with the selection of proper integration engine for large-scale power system dynamic simulation. Simulation results obtained from the selected algorithm are compared to those of commercial program.

1. 서 론

과도안정도는 전력계통이 어떠한 조건하에서 안정하게 운전하고 있을 때 급격한 외란에 따른 계통 동요의 과도 현상이 발생하더라도 다시 안정상태로 회복해서 발전기의 탈조 없이 동기운전이 계속될 수 있는 정도를 의미한다. 또한 전력계통내에서 급격한 외란에 의한 사고의 파급은 계통 보호면에서 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로 과도안정도 해석프로그램은 안정한 전력계통 운영에 필수적이라 볼 수 있다.

오늘날 같이 대규모 전력계통내에서 계통해석은 주관성이 아닌 객관성과 신뢰성을 전제로 수행되어야 하며 이를 뒷받침 해주기 위해서는 전력계통 해석시 정확한 데이터를 사용하는 것뿐만 아니라 동일한 전력계통해석 프로그램을 사용하는 것이 중요하다. 하지만 국내의 계통해석 프로그램이 없기 때문에 PTI사의 PSS/E 패키지에 의존하는 것이 현실이다. 따라서 국가적인 경제부담 및 외화유출에 요인으로 작용한다. 이에 따라 과도안정도 해석 프로그램 개발을 통하여, 국내의 전력계통 상태 및 전력시장 환경에 적절한 과도안정도 해석 및 평가를 위해서 기본적으로 요구되는 안정도 해석을 할 수 있다. 또한, 우리나라 전력계통의 운영 및 계획에 있어서 적절한 과도안정도 유지를 통해 계통의 광역정전 및 과도불안정 현상을 최소화 할 수 있고 안정한 전력시장을 구축 할 수 있다.

본 논문은 국내의 전력계통해석 프로그램(과도안정도) 개발에 발맞추어 국산 과도안정도 해석프로그램에 쓰여진 다양한 시 적분 알고리즘(Euler Method, Runge-Kutta Method, Trapezoidal Method, Implicit Technique)중에서 전력계통의 특성을 고려하여 최적의 시 적분 알고리즘을 선정(Runge-Kutta Method)하여 해당 알고리즘을 WSCC 3기9모선 시험계통에 적용하여 현재 상용중인 PTI사의 PSS/E와 비교검증을 하였다.

2. 본 론

2.1 수치해석 기법(Numerical Integration)

전력계통을 해석하는데 있어서 여러 가지 현상들은 시간에 따라 다양하게 변한다. 이들은 모두 비선형인데, 이를 가능한 한 전력계통해석에 알맞은 선형변수를 바꾸어 줄 필요가 있다. 전력 계통의 동적 특성을 표현하는 미분 방정식으로는 일반적으로 다음과 같은 식들이 사용된

다.[1][2]

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y, u) \tag{2.1}$$

$$g(x, y, u) = 0 \tag{2.2}$$

위에 식에서 x는 phase angle, 발전기에서 rotation의 개수나 magnetic flux, 그리고 control system의 여러 가지 성분과 같은 상태 변수들을 의미한다. 그리고 y는 상태관계를 표현하기 위해 필요한 전압, 전류, 전력과 같은 변수들을 의미한다. 그리고 벡터 u는 예로 들면, 발전기 제어 시스템의 setting 값과 같은 것들을 의미한다. 이 모든 값들은 벡터 값이고 각각의 함수들은 또한 벡터와 관계된 식으로 표현할 수 있다.

Time domain에서의 모의 과정은 식(2.1)과 식(2.2)를 연속적인 시간에서 동시에 푸는 것으로 이루어진다. 상태변수의 초기값들 결정은 모의를 시작하기 전에 결정해야 한다. 본 논문에서 제안되는 방안의 수치해석 순서도는 그림 1과 같다.[3][4]

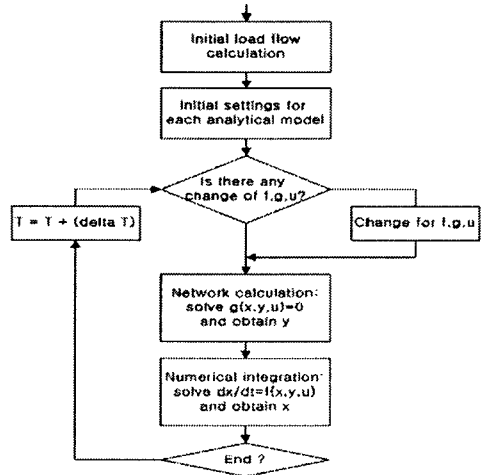


그림 1. 수치해석 순서도

2.1.1 미분방정식을 풀기위한 기법

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \tag{2.2}$$

다음과 같은 일반적인 미분 방정식을 푸는 유용한 방법으로는 크게 2가지가 있다 식(2.2)인 경우 $\Delta t=h$ 라고 하고 그 값들은 각각 x, x_0, x_1, \dots, x_n 이라고 정의하면 주어진 시간은 $t_n=t_0+hn$ 이 되고 미분연산자는 $f_0, f_1, \dots, f_n(f(x_n))$ 와 같다. 여기서 x_{n+1} 값을 구하는 방법은 2가지

가있는데 첫 번째로 Explicit Technique 방법은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$x_{n+1} = F(x_0, x_1, \dots, x_n, f_0, f_1, \dots, f_n) \quad (2.3)$$

이 방법은 위에 있는 방정식에서 얻어진 값만으로 새로운 값 x_{n+1} 을 구하는 방법이다. 여기서 Euler method 또는 Runge-kutta method의 특징은 x_{n+1} 의 초기값이 필요하기 전에 x_n 과 f_n 만으로 구할 수 있다. 두 번째로 Implicit Technique 방법은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$x_{n+1} := F(x_0, x_1, \dots, x_n, f_0, f_1, \dots, f_n, f_{n+1}) \quad (2.4)$$

이 방법은 위 방정식의 우변에 있는 미지의 연산자 $f_{n+1} = f(x_{n+1})$ 을 포함하기 때문에 바로 구할 수 없고 각 step의 비선형 방정식의 수렴계산에 따라 해를 구하는 방법이다. 따라서 각각의 method의 대략적인 기본 방정식은 다음과 같이 표현한다.

$$x_{n+1} = x_n + hf_n \quad (\text{Euler-method})$$

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h(f_n + f(x_n + hf_n))}{2} \quad (\text{2차 Runge-kutta})$$

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h(K_1 + 4K_2 + K_3)}{6}$$

$$K_1 = hf_n \quad (\text{3차 Runge-kutta})$$

$$K_2 = hf(x_n + K_1/2)$$

$$K_3 = hf(x_n - K_1 + 2K_2)$$

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)}{6}$$

$$K_1 = hf_n \quad (\text{4차 Runge-kutta})$$

$$K_2 = hf(x_n + K_1/2)$$

$$K_3 = hf(x_n + K_2/2)$$

$$K_4 = hf(x_n + K_3)$$

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h(f_n + f(x_{n+1}))}{2} \quad (\text{Trapezoidal-method})$$

이런 다양한 방법에 대한 특성 및 시뮬레이션을 위한 장단점들은 아래의 표 1, 표 2로 정리하였다. 결론적으로 우리가 개발할 프로그램에서는 4차 Runge-kutta를 쓰게 되었는데 이유는 4차 Runge-kutta법은 새로운 모델을 통합하거나 수정하기가 다른 방법에 비해 상대적으로 쉽고, 복잡한 계산과정을 거치지 않아도 높은 정확도를 가진 해를 구할 수 있다. 또한 전력시스템의 시뮬레이션에는 빈번한 고장과 시스템 변화가 포함 되므로 초기값 계산 과정이 시스템에서 수정이 쉽다.

표 1. 미분 방정식을 풀기위한 다양한 방법들의 특성

Method of Solving Differential Equation	Rank	Technique	Starting Calculation
Euler Method	1	Explicit	Not need
Runge-Kutta Method	2nd	2 Explicit	Not need
	3rd	3 Explicit	Not need
	4th	4 Explicit	Not need
Trapezoidal Method	2	Implicit	Not need
Implicit Solving Method	2~	Implicit	Need

표 2. 동적 시뮬레이션을 위한 해석 방법들의 장·단점

Analytical Techniques Consideration	Euler's Equation	Runge Kutta's Equation				Trapezoidal Method	Other Implicit Techniques
		Quadratic	Cubic	Tetradic	Above hexadic		
Addition of new models	Easy	Easy	Easy	Easy	Easy	Difficult	Difficult
Alteration of systems	Easy	Easy	Easy	Easy	Easy	Difficult	Difficult
Calculation of starting values	No	No	No	No	No	No	Yes
Accuracy	Low	Moderate	Moderate	High	Very high	Moderate	Depending on degree
Matching of ticking time to designation of system alteration	Good	Good	Good	Good	No good	Good	No good

2.2. 사례 연구

2.2.1 시험계통

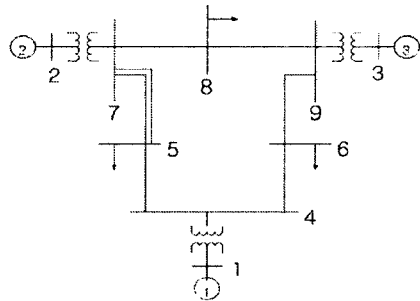


그림 2. 시험계통(5-7구간 2회선)

시험 계통은 WSCC 9모선 계통으로서 그림 2에 사용된 시험 계통의 주요부분을 나타내었다. 시험계통은 3개의 발전기와 3개의 여자기 그리고 3개의 조속기로 구성되어 있으며 상세한 자료는 표 3에 나타내었다.

표 3. 시험계통의 다이내믹 데이터

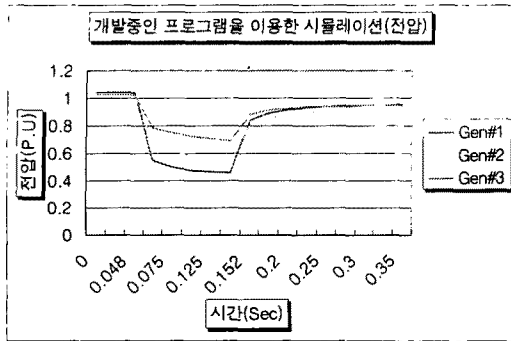
Bus No.	Generators	Exciters	Governors
1	GENSAL	IEEET1	TGOV1
2	GENSAL	IEEET1	TGOV1
3	GENSAL	IEEET1	TGOV1

표 4. 상정사고 데이터

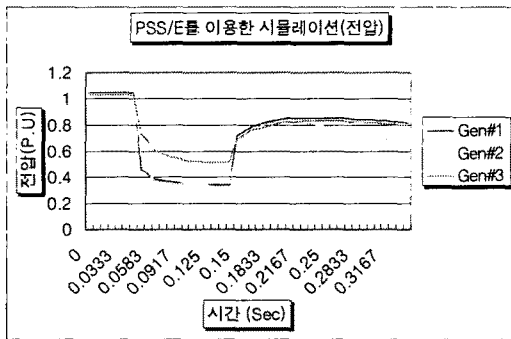
상정사고구간		5 - 7 구간		
PROCESS	정상	사고	트립	0.35
시간	SEC	0	0.05	0.15 (총시간)

표 4에서의 같이 상정사고는 5-7선로의 2회선 중 1회선을 0.05초에 사고를 주어서 0.15에 선로 트립을 하였다. 기본적인 3기9모선과 다른점은 5-7이 1회선이 아니라 2회선이라는 것이다. 이것은 시험계통에서의 상정사고를 만들기 위해 임의로 만든 것임을 밝혀둔다. 따라서 총 시뮬레이션 시간은 0.35초로 PSS/E와 동일한 조건으로 하여 가장 일반적인 위상각과 전압으로 비교하였다.

2.2.1 실험결과



(a) 개발중인프로그램



(b) PSS/E

그림 3. PSS/E와 개발중인프로그램의 전압값 비교

표 5. PSS/E와 개발중인프로그램의 전압값 데이터

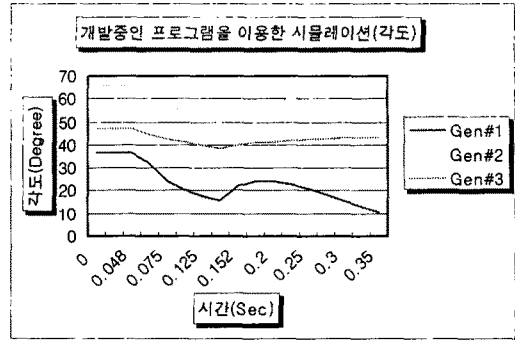
시간(SEC)	전압(v)					
	개발 중인 프로그램			PSS/E		
발전기	1	2	3	1	2	3
0.0(사고전)	1.040	1.025	1.025	1.040	1.025	1.025
0.05(사고)	0.552	0.678	0.787	0.5329	0.734	0.710
0.15사고후	0.842	0.815	0.884	0.650	0.698	0.714

그림 3과 표 5는 전압, 그림 4와 표 6은 위상각을 나타내고 있다. 값에 나타나있듯이 전압측은 어느 정도 일치한다고 볼 수 있지만, 위상각은 차이가 있음을 알 수 있다.

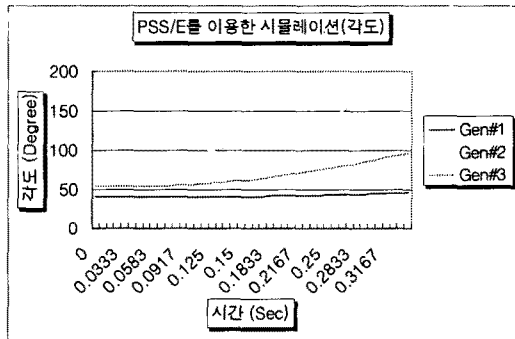
3. 결 론

본 논문에서 제시한 시 적분 알고리즘의 유용성을 검증하기 위해 WSCC 9모선 시험계통 시뮬레이션을 수행하고 동일한 조건으로 현재 상용중인 PSS/E와 비교분석을 하였다. 본 논문에는 표현되지 않았지만 다른 데이터 즉 주파수, 계사전압, 계사전류, 발전기 출력 등 PSS/E의 값과 어느 정도 차이를 나타냈다.

이러한 문제점은 개발 중인 과도안정도 프로그램의 불안정, 즉 전력계통의 특성(시험계통의 *raw*.dry데이터)을 확실히 적용하지 못한 것과 초기값(기준값)이 변화 등을 들 수 있다. 따라서 개발 중인 과도안정도 해석 프로그램은 전력계통의 특성과 전력시스템의 변경 등을 어떻게 적용 할 것인가가 시급한 과제라고 볼 수 있다. 또한, 선정된 알고리즘이 대규모 계통 적용 시 비교 우위가 있는지에 대한 검증이 필요하다.



(a) 개발중인프로그램



(b) PSS/E

그림 4. PSS/E와 개발중인프로그램의 위상각 비교

표 6. PSS/E와 개발중인프로그램의 위상각 값 데이터

시간(SEC)	위 상 각(degree)					
	개발 중인 프로그램			PSS/E		
발전기	1	2	3	1	2	3
0.0(사고전)	36.460	65.942	46.847	40.213	91.312	53.727
0.05(사고)	31.736	60.066	44.238	40.213	91.312	53.727
0.15사고후	21.928	55.498	40.126	40.898	106.59	60.279

[참 고 문 헌]

- [1] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", IEEE Press, 1994
- [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [3] Steven C. Chapra & Raymond P. Canale "Numerical Methods for Engineering with Software and Programming Application 4th Edition"
- [4] Christoph W. Ueberhuber "Numerical Computation I, II"