

전력계통 동특성해석을 위한 비선형 전이행렬법

박 영 문	서울대학교 공과대학
김 정 훈*	홍익대학교 공과대학
신 중 민	한국전력 기술연구원

1. 서 론

전력계통의 동특성해석은 전력계통의 성질을 해석하고 성능의 개선 및 예측을 위하여 필수적인 본 자료로서, 특히 정태적 계산에서 보는 바와 같이 하나의 결과만을 얻는 것이 아니라, 관심되는 양의 시시각각 변화하는 모양을 추적한다는 점에서 최근에 활발한 연구가 수행되고 있다.

전력계통이 점차 대규모화하고 복잡해지는 반면 보다 신뢰성있는 전력의 공급이 요청되고 있으므로 전력계통의 동특성해석은 오직 그 중요성이 더 커지고 있으며 계속 진중적인 연구가 필요한 분야이다.

전력계통 구성요소의 동특성을 수리모형으로 표시하면 비선형 연립미분방정식이 나타난다. 이 동특성의 해석방법은 크게 직접법과 간접법으로 구분되며, 그중 직접법은 비선형 미분방정식을 수치해석적인 방법을 이용하여 상태변화를 직접적으로 구하는 방법으로 Euler 법, trapezoidal 법 및 Runge-Kutta법등이 널리 쓰이고 있고, 이 중에서 정도가 높은 해를 구하기 위하여 Runge-Kutta법이 많이 사용된다.^{1,2,3,4} 간접법은 미분방정식을 풀지 않고 다른 안정도 판별기준을 도입하는 방법으로도 고유치법^{5,6}과 Liapunov 함수를 도입하는 방법^{7,8}이 알려져 있으나 직접법과는 달리 각 상태변화 추이를 볼 수 없다는 문제점을 내포하고 있다.

본 논문에서는 총 6개의 방법과 달리 전력계통 동특성방정식이 선형 부분을 많이 포함하고 있는 특성에 착안하여 미분방정식을 선형

부분과 비선형 부분으로 나누어 선형 부분은 기존의 상태 전이행렬로 처리하고 비선형에 대해서는 새로이 비선형 전이행렬을 정의하여 Runge-Kutta법보다 정도면에서 우수한 새로운 해법을 제시하였으며 이외 합성을 이론적으로 입증하였다.

제시된 방법이 의한 동특성 해석 알고리즘을 일반적으로 사용되는 전력계통 동특성해석 모형에 보임커 모형, 보임커외 선형연소 제어, 자동발전제어와 연계선 전력제어 및 시변동 부하모형 등을 추가하여 10 대의 발전기, 14 모선, 21 선로로 구성되어 있는 리비아

MISURATA Power and Desalination Plant⁹ 의 실험규모 계통에 적용한 결과, 기존의 Runge-Kutta 법을 사용한 동특성해석 알고리즘보다 계산 정도 및 계산시간 면에서의 효율성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1. 전력계통 동특성문제의 기본형태
 전력계통에서의 동특성문제는 발전기, 여차기, 터빈-조속기, 보임커 및 각종 제어장치 등이 고려되어야 하며 이들의 동특성방정식은 일반적으로 미분방정식의 형태로 표시된다. 이 미분방정식에 적절한 상태변수를 도입함으로써 다음과 같이 1개 미분방정식의 연립된 형태의 표준형방정식으로 변환할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (2-1)$$

단, $x(t)$: 상태 벡터, $u(t)$: 입력 벡터
 식 (2-1)을 선형 부분과 비선형 부분으로 나누게 되면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + g(x(t), u(t)) \quad (2-2)$$

단, $x(t)$: 선형부분 상태개수 행렬

$g(x(t), u(t))$: 비선형 부분을 표시하는 함수 벡터

식 (2-2)와 같이 표현된 전력계통 동특성 문제는 선형 부분이 많고 상태상호간의 결합도가 적으므로 행렬은 매우 소 (sparse) 하고 비선형 부분을 표시하는 함수 벡터 $g(x, u)$ 도 몇 개 성분만 존재한다. 또한 입력 벡터 u 는 주어진 시구간내에서는 변하지 않는 조속기, 전압조정기 및 보일러 등의 기본 입력들과 시간에 따라 변화하는 모선전압으로 구성되며 이 모선전압은 계산시간 구간내에서는 크게 변하지 않는다고 가정을 한다. 그러므로 식 (2-2)는 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + g(x(t), u) \quad (2-3)$$

즉 전력계통 동특성문제는 식 (2-3)과 같은 비선형 연립 1계미분방정식의 해를 구하는 문제로 귀환된다.

2.2. 비선형 전이행렬법

식 (2-3)으로 표시되는 동특성방정식의 해를 구하기 위하여는 상태변수 $x(t)$ 에 대한 Taylor 급수 전개하면

$$x(t+\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \frac{d^k x}{dt^k} \tau^k \quad (2-4)$$

로 된다. 한편, 식 (2-3)을 시간에 대하여 미분을 계속하면 $\frac{d^k x}{dt^k}$ 을 구할 수 있고 이 도함수들을 식 (2-4)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$x(t+\tau) = \Phi_0 x(t) + \int_0^{\tau} g(x, u) dt + \Phi_1 \frac{d^2 g}{dt^2} + \dots + \Phi_2 \frac{d^3 g}{dt^3} + \dots \quad (2-5)$$

$$\text{단, } \Phi_0 = I + A\tau + \frac{1}{2!} A^2 \tau^2 + \dots = e^{A\tau} \quad (2-6)$$

$$\Phi_1 = I\tau + \frac{1}{2!} A^2 \tau^2 + \dots = \frac{1}{(k+1)!} A^{k+1} \tau^{k+1} + \dots \quad (2-7)$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{3!} A^3 \tau^3 + \dots = \frac{1}{(k+2)!} A^{k+2} \tau^{k+2} + \dots \quad (2-8)$$

$$\Phi_3 = \frac{1}{4!} A^4 \tau^4 + \dots = \frac{1}{(k+3)!} A^{k+3} \tau^{k+3} + \dots \quad (2-9)$$

식 (2-5)에서 Φ_0 는 선형시스템에서의 상태 전이행렬이 되고 나머지 Φ_k ($k = 1, 2, \dots, n$)은 다음과 같이 정의한다.

정의

$$\Phi_k = \frac{1}{k!} I \tau^k + \frac{1}{(k+1)!} A \tau^{k+1} + \dots + \frac{1}{2k!} A^k \tau^{2k} + \dots$$

의 관계를 갖는 Φ_k ($k=1, 2, \dots, n$)를 k 계 비선형 전이행렬이라고 정의한다.

이와 같이 정의된 비선형 전이행렬을 이용하여 일반적인 비선형 연립 미분방정식의 해를 구하는 방법은 다음 정리와 같다.

정리

비선형 미분방정식

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + g(x(t), u(t))$$

에서 만일 $g(x(t), u(t))$ 가 해석적 함수이면 이 방정식의 해는 다음과 같이 구해진다.

$$x(t+\tau) = \Phi_0 x(t) + \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_k \frac{d^k g}{dt^k}$$

단, A : 시불변 시스템행렬
 $x(t)$: 상태 벡터
 Φ_k : k 계 비선형 전이행렬
 $u(t)$: 입력 벡터
 g : 선형 상태전이행렬

위의 정리의 증명은 앞에서 보인 바와 같고 식 (2-6) ~ 식 (2-9)를 관찰하여 보면 다음과 같은 보조정리를 얻는다.

보조정리

1. $\frac{d^k \Phi_k}{dt^k} = \Phi_{k+1}$ $k=1, 2, \dots$ (2-10)

2. $\Phi_{k+1} = \frac{1}{(k+1)!} I \tau^{k+1} + A \Phi_k$ $k=1, 2, \dots$ (2-11a)

또는 A^k 가 존재하면

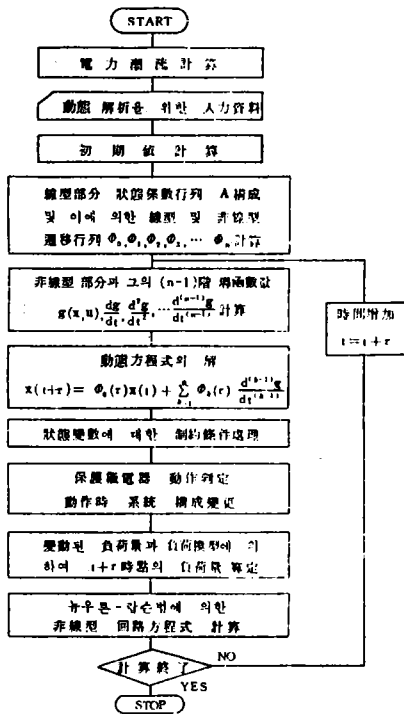
$$\Phi_k = A^{-k} \left(\Phi_{k+1} - \frac{1}{(k+1)!} I \tau^{k+1} \right)$$
 $k=1, 2, \dots$ (2-11b)

식 (2-11a)는 무한항차식으로, Φ_k 를 구하면 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k, \Phi_{k+1}$ 를 구할 수 있어 비선형 전이행렬의 정의에 의한 식 (2-6) ~ 식 (2-9)를 사용하는 경우보다 행렬들의 급과 항을 상당히 줄일 수 있다.

2.3. 비선형 전이행렬을 도입한 전력계통 동특성 해석 알고리즘

앞에서 새로이 제시된 비선형 전이행렬법은 Runge-Kutta 법에 의하여 계산점도면에서 우수하고 선형 부분이 많은 시스템에 적용시 계산 시간면에서 단축효과가 있다. 그러므로 선형 부분이 많은 비선형 연립 미분방정식으로 표현되는 전력계통 동특성방정식의 해를 구함에 있어 비선형 전이행렬의 도입은 계산정도 및 시간에서 이점을 갖게 될 것이다.

본 논문에서 제시한 동특성해석 알고리즘의 기본 흐름도는 (그림 2-1)에서 보는 바와 같이



(그림 2 - 1) 동특성 해석 프로그램의 흐름도

1) 전격계통의 정상상태해석이 전격조류계산을 통하여 동특성해석에 필요한 계통 상태의 초기치를 구한다.

2) 주어진 동특성 미분방정식으로부터 선형부분 계통상태계수행렬 A를 구성하고 이 A 행렬로부터 시간 증가에 따라 변화하지 않는 선형부분 전이행렬 및 비선형부분 전이행렬을 앞에서 제시한 후향추적식을 이용하여 구한다.

3) 그 다음 시간증가에 따라 변화하지 않는 비선형부분의 값 및 도함수의 값을 계산하여 이미 구해 놓은 전이행렬들과 상태변수벡터, 비선형부분의 벡터들과의 곱과 이 곱의 합으로 새로운 상태 x 값을 얻는다.

4) 상태변수 x 값이 상태제약조건을 만족하였는지를 판단하여 경계치를 넘어서는 경우는 경계치를 상태변수 x 값으로 선택하며

5) 상태변수 값으로부터 보호 개전기의 동작여부를 판정하여 개전기 동작시는 이에 따라 계통의 회로구성을 변경한다.

6) 시간이 경과함에 따라 새로운 부하값과 개전기 동작에 의한 회로망 변화값 고려하여 각 순간에 대한 전격계통 회로망 대수방정식의 해를 구한다. 이로부터 모선전압과 발전기출력의 전기적 정보량이 얻어진다.

새롭게 계산된 상태변수의 값과 계통전압으로부터 다음 구간에 대한 비선형부분을 계산하게 되며 앞에서 설명한 과정을 반복하여 동특성해석을 하게 된다.

이와 같은 비선형전이행렬법의 효용성을 입증하기 위하여 미비아 MISURATA 지역의 실규모전격계통을 샘플시스템으로 택하였고, 부하도 시변동 부하를 사용하여 Runge-Kutta 법과 비교하였다. 이것에 대한 주요 결과는 그림 (2-2) (2-3)과 같다.

3. 결론

전격계통의 현상해석, 성능예측 및 계산에 필수적인 동특성해석을 위하여 종래의 방법보다 우수한 비선형전이행렬법과 이에 따른 동특성해석 맵고리즘을 새로이 제시하였으며 그 효용성을 충분히 입증하였다.

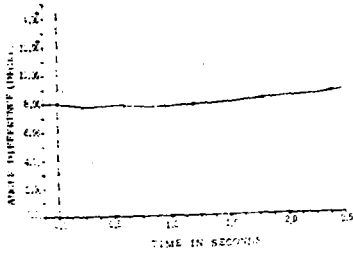
본 논문의 성과를 정리하면 다음과 같다.

1) 비선형 전이행렬법은 어떠한 전제조건도 포함하지 않았고 같은 계수의 Runge-Kutta 법에 비하여 오차를 줄일 수 있다는 것을 이론적으로 입증하였고, 사기연구를 통하여 4계 Runge-Kutta 법과 계수가 3계인 본 방법의 결과를 비교하여 보면 정도가 되떨어지지 않음을 볼 수 있다.

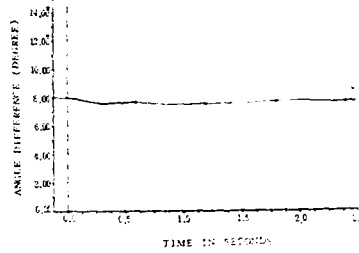
2) 새로이 제시한 방법은 선형방정식만을 풀 수 있는 기존방법에 비선형부분의 전이행렬을 추가함으로써 상태전이행렬을 이용하는 상태방정식의 적용범위를 확장시켰다.

3) 본 논문에서는 보통 단기 동특성해석시 무시하는 보임터 모형을 추가하였고, 변동하는 부하에 대비한 보임터 선형인소를 채용하는 등의 보임터 특성을 포함시켰으므로 중기 및 장기 동특성해석에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

4) 자동발전제어와 연계선 전격제어를 도입함으로써 주파수와 연계선 전격을 감지하여 발전기출력을 변화시켜 계통상태를 직접하게 유지할 수 있도록 하였으며, 부하도 시시각각 변화하는 부하를 채택하였고 부하의 주파수 특성도 고려하였다. 이상의 모델을 추가하였으므로 종래의 다른 모델

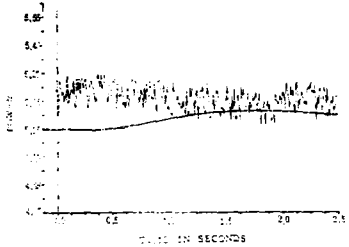


(a) 비선형천이행렬법

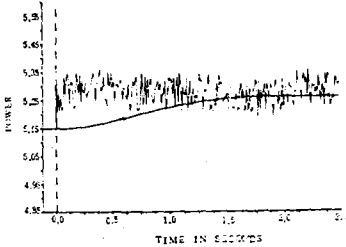


(b) Runge-Kutta 법

(그림 2-2) 발전기 위상각



(a) 비선형천이행렬법



(b) Runge-Kutta 법

(그림 2-3) 기동시 전전력(100 MVA 기준)

△: 전기적 출력 ○: 기계적 출력

를 모니 시킬수있기 위한 시
뮬레이션할 수 있다.

지시된 비선형 천이행렬법은
전력계동 동특성해석뿐만 아니
카 선형부분을 많이 포함하는
기타 시스템에도 활용이 기대
되는 바이다. 금후 연구되어
야 할 문제는 비영요소법을 최
용하여 시간단축효과를 증대하
여야 하고, 또한 장기 동특성
해석을 위하여는 시정수로 판
단하여 시스템을 바꾼 응답특
성과 높은 응답특성으로 나누어
시간간격을 증가하여 짧은 계
산시간의 요소로 오차가 적은
해결 얻을 수 있는 연구가 기
속되어야 할 것이다.

4. 참고문헌

- 1) Anderson and Fouad, " Power System Control and Stability ", The Iowa State University Press , 1977 .
- 2) K. Prabhaskar and W. Ja-nischewski , " Digital Simulation of Multimachine Power System for Stability Studies " , IEEE Trans., Vol . 100 , No.1 , Jan. 1968, pp. 73-79.
- 3) Hiroshi Kaminoso and Kiyotaka Neda, " Power System Stability Analysis", The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 100, No.1, Jan. 1980, pp.9-15
- 4) Y.M.Park, "A New Algorithm for Power System Stability Calculations", The Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 29, No.3, 1980.3, pp.59-66
- 5) Y.M.Park, J.H.Kim, "A Study of Power System Dynamic Transient Stability Analysis By Eigen-value Method", 1981.2, Seoul University

- 6) Guindi and Mansour, "Transient Stability of A Power System by The Liapunov Method Considering The Transfer Conductances", IEEE PES Summer Meeting, Paper 81 SM 4266, 1981.7
- 7) Y.M.Park, J.H.Kim, etc., "Final Report(Draft) of Special Studies on Misurata Power and Desalination Plant", Hyundai, Dec., 1994
- 8) Schulz, Turner and Ewart, "Long Term Power System Dynamics", General Electric, Technical Report for EPRI Research Project 90-7, April 1974
- 9) Schulz, Turner, "Long Term Power System Dynamics Phase II", General Electric, Technical Report for EPRI Research Project 764-1, February 1977