

신경회로망 부하모델을 이용한 과도안정도 해석기법

이종필, 임재운, 김성수, 지평식
 충북대학교, 대덕대학, 충북대학교, 충주대학교

A Method of Transient Stability Analysis Using ANN

J. P. Lee, J. Y. Lim, S. S. Kim, P. S. Ji
 Chungbuk Nat'l Univ., DaeDuk College, Chungbuk Nat'l Univ., Chungju Nat'l Univ.

Abstract - Load models are important for improving the accuracy of stability analysis. Load characteristics are changed for voltage and frequency condition. In this research, ANN with LMBP learning rule is used to construct the load model. Characteristics of some residential loads are tested under various voltage and frequency conditions. Acquired data are used to construct load models by ANN. Constructed ANN load model are applied to transient stability analysis.

1. 서 론

최근 눈부신 산업발전과 함께 전력계통은 초고압, 대용량화되고 있으며, 이러한 전력계통은 우리의 생활에 절대적인 영향을 미치고 있기 때문에 전력의 공급은 충분한 품질을 전제로 하지 않으면 안된다. 또한, 공급의 신뢰도를 높이기 위해서는 계통의 계획, 설계, 운용 및 제어 등이 최상의 상태를 유지하여야 하며, 이를 위해서는 계통의 상태해석이 필수적이다[1-3]. 전력계통의 해석을 위해서는 계통을 구성하는 요소 즉, 전원, 선로, 부하 등의 모델화가 전제되어야 한다. 그러나 전원이나 선로에 대한 모델화는 오랜 기간 많은 연구자들에 의해 연구되어 상당한 진전을 보이고 있지만, 부하에 대한 특성 연구는 전원이나 선로 등의 다른 부분에 비해 다소 미진하다[4]. 일반적으로 부하모션에는 서로 다른 특성을 가지는 다양한 부하들이 연결되어 있다. 각각의 부하들은 계통의 전압이나 주파수에 따라 서로 다른 형태의 전력 소비 패턴을 보이고 또한 전력전자 소자를 이용하는 부하의 증가로 부하의 비선형 특성이 증가하였다. 따라서 부하의 종류나 전압/주파수의 변화에 의한 영향은 부하 모델링에 반드시 고려되어야만 한다.

부하모델링은 일반적으로 거시적 방법과 미시적 방법으로 구분할 수 있다[5-6]. 거시적 방법은 부하모션 전체의 부하에 대해 전압이나 주파수에 대한 특성을 직접 측정하는 방법이다. 그러나 실제계통에는 매우 많은 수의 부하모션이 존재하므로 모든 모션의 부하특성을 직접 측정하고 모델링 한다는 것은 매우 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 또한 소비자들에게 충분한 공급신뢰도를 유지하면서 다양한 전압/주파수 변동에 대한 자료를 수집한다는 것은 불가능하다. 미시적 방법은 각 개별부하를 모델링 한 후에 부하들의 구성비를 고려하여 축약하는 방법이다. 부하의 구성비는 각 시간대별로 변화하기 때문에 정확한 구성비를 파악하는 것 역시 매우 어려운 일이다. 참고문헌 [7]에서는 계절이나 요일, 시간의 변화에 대한 부하 곡선을 이용한 시간대별 부하구성비 추정 알고리즘이 개발되어 전문가의 경험과 지식을 근거로 한 전문가 시스템 기법을 이용하여 실용적이고 합리적인 부하구성비를 추정하였다.

한편 기존의 수학적 방법을 이용한 모델링 기법에서는 모델식의 차수와 파라미터들을 추정해야 한다. 그러나

수학적 모델의 차수와 파라미터 추정 역시 많은 어려움이 있고 부하의 비선형 특성으로 인해 간단한 함수로 표현하는 것 역시 매우 어려운 일이다.

본 연구에서는 부하모델의 문제점인 부하들의 비선형 특성을 정확하게 처리할 수 있는 신경회로망을 이용하여, 특성실험에서 얻어진 자료를 근거로 개별부하 식별에 의한 개별부하를 모델링하고, 제안된 부하모델을 계통의 과도안정도해석에 적용시키는 방법을 제시하고, 아울러 사례연구를 통하여 본 연구의 효용성을 입증하였다.

2. 신경회로망을 이용한 부하모델링

신경회로망은 병렬처리, 높은 연산율, 고장에 대한 내력, 다양한 적용성 등의 장점으로 많은 연구자들이 여러 연구분야의 문제들에서 해법을 찾기 위한 수단으로 이용되어 왔다. 그림 1은 신경회로망의 개념을 나타낸다. 신경회로망의 출력은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} O^o &= f^o(W^o O^h + b^o) \\ O^h &= f^h(W^h x + b^h) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, O^o 는 신경회로망의 출력이고 O^h 는 은닉층의 출력, x 는 입력, f 는 활성화함수, W 는 연결가중치이고 b 는 바이어스이다.

개별부하 모델링에 사용된 신경회로망의 입·출력 벡터는 식 (2), (3)과 같이 구성하였다. 입력벡터는 전압, 주파수, 유효전력 또는 무효전력으로 구성되며, 전압, 주파수의 변화 추세에 대한 부하특성의 응답을 고려하여 식별정도를 향상시키고자 과거 시점의 실적 자료 정보도 이용하였다.

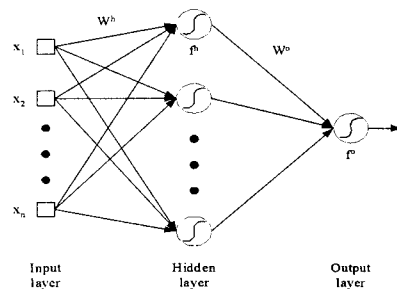


Fig. 1 Concept of artificial neural network

$$x(t) = [v(t), v(t-1), v(t-2), f(t), f(t-1), f(t-2), p(t-1)] \quad (2)$$

$$P(t) = [p(t)] \quad (3)$$

본 연구에서는 Levenberg-Marquardt 학습방법 (LMBP)을 이용하여 신경회로망을 학습 시켰다. LMBP

알고리즘은 다층형 신경회로망의 학습방법 중 가장 빠른 방법으로 알려져 있다. LMBP 학습은 많은 저장 공간을 필요로 하는 알고리즘이므로 파라미터의 수가 매우 많아지면 비실용적일 수 있으나 본 연구에서는 적은 수의 파라미터만을 사용한다.

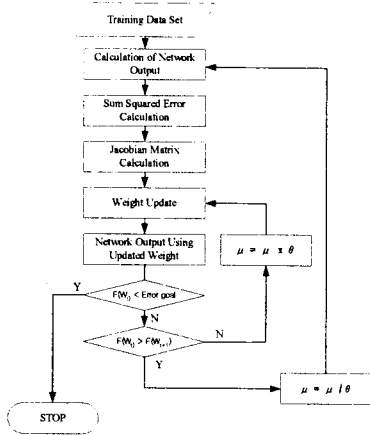


Fig. 2 LMBP Iteration

LMBP 알고리즘을 그림 2에 나타내었다. LMBP 학습의 첫 단계는 식 (4)를 이용하여 모든 입력들의 오차제곱합을 구하는 것이다.

$$F(W) = \sum_{q=1}^Q (t_q - O_q)^2 (t_q - O_q) \quad (4)$$

$$= \sum_{q=1}^Q e_q^T e_q = \sum_{j=1}^N (e_j)^2$$

여기서, $e_{j,q}$ 는 q 번째 입출력쌍에 대한 오차의 j 번째 요소이다.

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{1,R}} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial b_1^1} & \dots \\ \frac{\partial e_{2,1}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial w_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial w_{1,R}} & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial b_1^1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \frac{\partial e_{S^M,1}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{S^M,1}}{\partial w_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_{S^M,1}}{\partial w_{1,R}} & \frac{\partial e_{S^M,1}}{\partial b_1^1} & \dots \\ \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{1,R}} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial b_1^1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (5)$$

오차 제곱합이 구해지면 식 (5)의 자코비안 행렬을 계산하고 식 (6)에 의해 연결가중치가 갱신된다.

$$W_{k+1} = W_k - [J^T(W_k)J(W_k) + \mu_k I]^{-1} J^T(W_k)v(W_k) \quad (6)$$

여기서, J 는 자코비안 행렬이다.

배전 계통에서 하나의 모선에 다수의 부하들이 연결되는 것이 일반적이다. 모선에 병렬로 연결된 집단부하의 소비전력은 Tellegen이론에 의하여 집단부하를 구성하는 개별부하 소비전력의 합과 같다. 몇 개의 개별부하가 조합된 모선의 집단부하는 개별부하 식별을 위한 신경회로망과 개별부하의 구성비를 근거로 선형조합에 의해 추약할 수 있다.

3. 과도안정도 해석

전력계통의 과도 안정도 해석은 부하의 급변이나 계통에서의 사고 등으로 인한 외란이 가해졌을 때 발전기 회전자의 위상각이 동요하는 1~2초 동안의 1차 동요에 대

한 해석이다. 발전기의 운전 특성을 나타내는 운동 방정식은 식 (7)과 같으며, 1차 동요에 대한 해석의 경우 계통 효과는 무시하고 발전기의 입력은 일정한 것으로 가정할 수 있다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}(t)) \quad (7)$$

계통에 외란이 발생하기 이전에는 발전기의 기계적 입력과 전기적 출력이 평형을 이루므로 발전기 회전자의 속도는 변하지 않으나, 외란이 발생하면 계통의 상태가 변화되면서 발전기의 전기적 출력이 $P_{ei}(t)$ 가 변화하게 되어 평형상태가 깨져 발전기의 회전자는 가속이나 감속하게 된다.

전력계통의 과도 안정도 해석을 위해 본 연구에서는 Runge-Kutta 법을 사용하였다.

과도 안정도 해석의 각 시점 t 에서 계산된 전압과 주파수가 학습된 신경회로망에 입력되면 신경회로망의 t 시점에서의 유효/무효전력 출력을 계산해내고 신경회로망에 의해 계산되어진 유효/무효전력이 어드미턴스 값으로 변환되어 $t+1$ 시점에서의 안정도 해석 과정에서 사용된다. 그림 3에 본 연구에서 사용한 과도안정도 해석 알고리즘을 나타내었다.

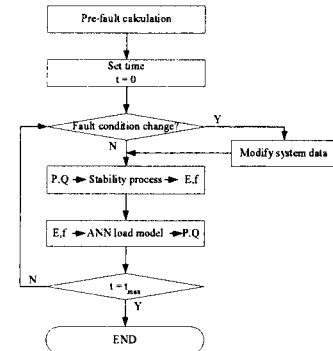


Fig. 3 The proposed stability analysis algorithm

4. 사례연구

4.1 부하특성 실험

부하의 특성실험은 계통에서 일어날 수 있는 상황을 묘사하기 위해 각각 개별부하 및 집단부하에 대하여 가해지는 전압 및 주파수를 변화시키면서 유효/무효전력, 즉 부하의 응답특성을 전력분석기로 측정하여 컴퓨터에 저장한다.

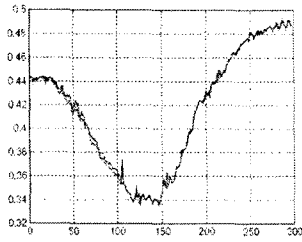
또한, 동태특성은 부하에 인가되는 전압 및 주파수를 일정하게 유지하며 공급하다가, 계통의 고장시를 가정하여 전압 및 주파수를 급격히 변화시켰을 때 부하의 응답특성이 동태특성이다. 본 연구에서는 전압은 0.75[p.u.]~1.0[p.u.], 주파수는 0.9[p.u.]~1.0[p.u.]의 범위로 변화시키며 50[개/sec]의 데이터를 발전기의 과도현상 등을 고려하여 약 5분 정도 정격전압으로 충분히 운전 후 전압 및 주파수를 변동시키며 부하의 응답특성을 측정하였다.

4.2 개별부하 모델링 결과

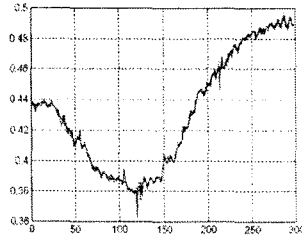
전압과 주파수 변화에 대한 응답특성을 효과적으로 모델링하기 위하여 3장에서 설명된 신경회로망을 이용하여 개별부하를 모델링하였다. 신경회로망의 구조는 7개의 입력층 뉴런과 6개의 은닉층 뉴런, 그리고 한 개의 출력층 뉴런으로 구성하였다. 그림 4는 유도전동기 부하의 동태 특성 모델링 결과를 보여준다. 유도전동기 부하의 유효/무효전력 응답특성의 모델링 오차는 0.5966/0.5413[%]로 양호하게 모델링되었음을 알 수 있다.

이와 같은 방법으로 개별부하에 대한 응답특성을 실험

을 통하여 취득한 자료를 근거로 신경회로망을 학습하고, 모델링 한 결과의 오차를 표 1에 나타내었다.



(a) active power



(b) reactive power

Fig. 4 The identification results of motor load by ANN at voltage and frequency variation

Table 1 The component load modeling error [%]

Item	Error	Remark
Heater	0.5352	Active power
Incandescent light	0.5879	Active power
Electric fan	0.5089	Active power
Vacuum cleaner	0.5550	Active power
	1.1646	Reactive power
Fluorescent lamp	0.2031	Active power
	0.2428	Reactive power
Induction motor	0.5966	Active power
	0.5413	Reactive power

4.3 과도안정도 해석 결과

제안된 부하모델을 계통의 과도 안정도 해석에 적용하기 위하여 그림 5와 같은 샘플계통을 선정하였다.

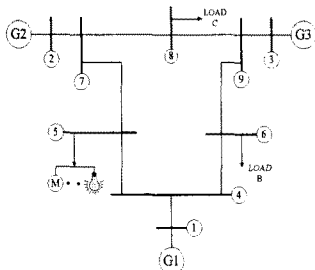


Fig. 5 A sample system

부하모선 중 부하모선 5를 선정하여 제안된 부하모델을 적용하였다. 모선 9에서 3상 단락 사고를 상정하고 10주기 후에 고장을 제거하였다. 부하모선 5에 제안된 부하모델을 적용하고, 부하모선 6, 8번에는 일정전력으로 하여 동일한 고장 조건하에서 계통의 안정도를 해석하였다. 이와 같은 조건에서 발전기의 위상각, 각속도는 그림 6, 7과 같다. 고장 중 부하 모선의 전압과 주파수에 의한 부하 모선의 부하가 작아지며 발전기의 출력이 작아지고 발전기의 입력이 일정하므로 발전기의 각속도는 일정한

력 보다 크게 나타났으며, 발전기의 위상각 변화는 일정 전력 경우 보다 적게 나타났다.

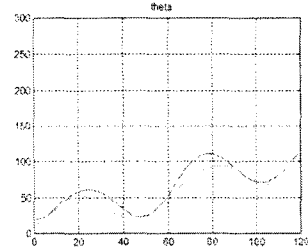


Fig. 6 The generator angle

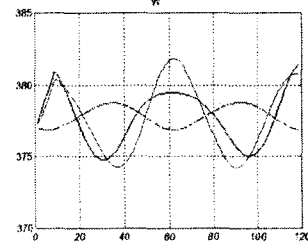


Fig. 7 The generator angular velocity

5. 결 론

본 연구에서는 부하모델의 문제점인 부하들의 비선형 특성을 정확하게 처리할 수 있는 신경회로망을 이용하여, 특성실험에서 얻어진 자료를 근거로 개별부하 식별에 의한 개별부하를 모델링하고, 제안된 부하모델을 계통의 과도안정도해석에 적용시키는 방법을 제시하고, 아울러 사례연구를 통하여 본 연구의 효용성을 입증하였다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-061)주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] B.Y. Ku, R.J. Thomas, C.Y. Chiou, C.J. Lin: "Power system dynamic load modeling using artificial neural network" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No.4, November 1994, pp.1868-1875.
- [2] Jack M. Zurada, "Artificial Neural System", West, 1992, pp.163-235.
- [3] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance: "Standard load models for power flow and dynamic performance simulation" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No.3, August 1995, pp.1302-1313.
- [4] Yoshihiko KATAOKA: "State variable description of dynamic load models in electrical power system analysis" IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.1, Feb. 1995. pp.149-157.
- [5] 이종필 외, "LMBP를 이용한 주거용 부하의 동특성 모델링", 대한전기학회 하계학술대회논문집, 2006년 7월
- [6] J.Y.Lim et al, "Load Characteristic Identification Using Artificial Neural Network and Transient Stability Analysis", 1998 International Conference on EMPD, Singapore, March 1998
- [7] J.Y. Lim, J. H. Kim, J.O. Kim, C. Singh "Application of Expert System to Load Composition Rate Estimation Algorithm", IEEE Trans. on Power System, Vol 14, No. 3, August 1999, pp. 1137-1143