

신경회로망에 의한 부하모델링과 계통해석

*지평식, **이종필, **임재윤, *김기동, *박시우, *김정훈

*충주대학교 전기공학과, **대덕대학 전기과, *전력연구원 *홍익대학교 전기제어공학과

A Study on the Load Modeling Using Artificial Neural Network and Power System Analysis

*Pyeong-Shik Ji, **Jong-Pil Lee, **Jae-Yoon Lim

*Ki-Dong Kim, *Si-Woo Park, *Jung-Hoon Kim

* Dept. of Electrical Eng. Chung-Ju National University

** Dept. of Electrical Eng. Taedok College

* Korea Electric Power Research Institute

* Dept. of Electrical Eng. Hong-Ik University

Abstract - In this research, ANN load model was built on results of field test using residential load, and then proposed ANN load model was applied to transient analysis. The results of this research are as follows. The first, component load modeling using ANN was implemented. The second, group load model was proposed by aggregation of component load. The third, proposed load model was applied to power system analysis.

Therefore, importance of load modeling and precise load modeling method was suggested in this paper.

1. 서론

최근 눈부신 산업발전과 국민생활 수준의 향상으로 인하여 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[1-2]. 이와 같이 전력계통의 해석을 위해서는 계통을 구성하는 요소 즉, 전원, 선로, 부하 등의 모델화가 전제되어야 한다. 그러나, 전원이나 선로에 대한 모델화는 오랜 기간 연구되어 상당한 진전을 보이고 있지만, 부하에 대한 특성 연구는 다소 미진하다[3-5]. 부하들을 모델링하기 위해서는 비선형 특성 및 특성정수가 불필요하고 일반화 능력이 우수한 신경회로망을 이용하면 가능할 것이다[4-5].

따라서, 본 연구에서는 부하모델의 문제점인 부하들의 비선형 특성을 정확하게 처리할 수 있는 신경회로망[6]을 이용하여, 특성실험에서 얻어진 자료를 근거로 개별부하 식별에 의한 개별부하를 모델링하고, 개별부하 구성비를 이용하여 개별부하를 축약하는 집단부하 모델링 기법을 제안하였다. 또, 제안된 부하모델을 계통해석에 적용시키는 방법을 제시하고, 아울러 사례연구를 통하여 본 연구의 효용성을 입증하였다.

2. 부하특성 실험

2.1 부하 선정

본 연구에서는 UTA 및 GE 등의 연구에서 대표적인 부하로 선정되었던 다양한 주거용 부하 중에서 문헌 및 실태조사를 통하여 높은 보급율로 전력을 소비하는 일반적인 부하와 산업사회의 원동력이 되는 유도전동기 부하로 하였다. 그러나, 실험실에서의 실험 과정을 고려하여 표1과 같이 선정하였다.

2.2 측정장치

개별부하 요소로 선정된 대표 부하의 실험을 수행하여 부하의 정태특성과 동태특성을 ANN으로 표현하기 위한 측정자료를 얻고자하는 것으로, 측정장치는 Fig. 1과 같이 구성한다.

데이터는 샘플링 주파수 7.68[kHz]로 샘플링이 가능하고, 자체 내장된 듀얼 프로세서에서 실효값으로 계산된 후, 20[ms]의 저장간격으로 최대 500 Mbytes 까지 데이터를 저장할 수

있는 Teamware사의 Equa장비를 이용하여 전압, 전류, 유효 전력, 무효전력을 측정하였다.

Table 1 A selected load

개별부하	정격전압[V]	소비전력[W]	대 수	비고
전열기 (A)	220	863	1	
백열등 (B)	220	100	6	
T. V. (C)	220	43	1	
전기밥솥 (D)	220	815	1	
헤어드라이기(E)	220	1,127	1	
에어컨 (F)	220	520	1	
냉장고 (G)	220	78	1	
선풍기 (H)	220	57	1	
진공청소기(I)	220	1,045	1	
형광등 (J)	220	76	1	
유도전동기(K)	220	455	1	

실험장치는 원동기, 동기발전기, 개별부하, 측정계기로 구성하였다. 원동기는 10[Hp]의 디젤엔진으로 트로틀 밸브에 의해 엔진의 속도를 변화시킬 수 있으며, 원동기의 축에 연결된 동기발전기는 최대출력이 70[kW], 주파수는 57~62[Hz]까지의 변화가 가능하고, 여자기의 조정에 의하여 전압은 170~240[V]까지 변화가 가능하다.

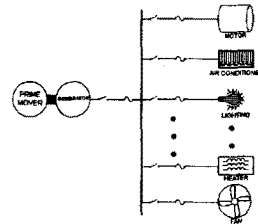


Fig. 1 Structure of experimentation

2.3 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 응답 특성이 동태특성이다. 본 연구에서는 개별부하 및 집단부하의 식별이 목적이기 때문에 정태특성 실험 결과는 충분히 식별할 수 있을 것으로 사료되어 선정된 부하에 대하여 동태특성 실험만 실시하였다.

동태특성 실험은 크게 4가지로 나누어 실시하였다. 각 개별부하, 정태부하, 동태부하, 정태부하 및 동태부하를 혼합한 혼

합부하로 구분하여 각각의 응답특성을 측정하였다. 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.

3. ANN에 의한 부하 모델링

개별부하 모델링에 사용된 신경회로망의 입·출력 벡터는 식 (1), (2)와 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.

각 입력층 뉴런으로부터 들어온 중간층의 입력은 모두 합산되어, 식 (4)와 같이 비선형함수에 의하여 출력하게 되며, 비선형함수는 연속 미분 가능한 비선형 함수로 시그모이드 함수를 사용하였다. 또한 중간층 출력은 다시 출력층의 입력이 되어 중간층과 동일한 과정으로 식 (5)와 같이 출력층 뉴런의 계산된 출력을 내게된다. 식 (5)의 신경회로망의 계산된 출력과 식 (3)의 출력벡터의 값을 비교하여, 식 (6)과 같은 신경회로망의 오차를 계산하게 된다.

그리고 입력과 출력벡터의 관계를 나타내는 신경회로망의 가중치를 델타 규칙에 의해 조정하여 오차를 최소화하는 역전파 학습 알고리즘을 이용하였다.

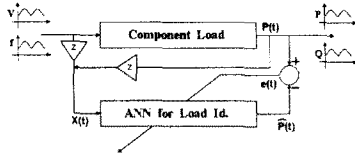


Fig. 2 The proposed ANN for load modeling

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

$$P(t) = [p(t)] \quad (2)$$

$$\hat{P}(t) = F[X(t)] \quad (3)$$

단, F : 비선형함수

$X(t)$: 입력 벡터

$P(t)$: 출력 벡터

v : 전압, f : 주파수, t : 계산하려는 시점

$$O_k(t) = F[W_k X(t)] \quad (4)$$

$$\hat{P}(t) = F[W_o O_k(t)] \quad (5)$$

$$e(t) = \frac{1}{2} [P(t) - \hat{P}(t)]^T [P(t) - \hat{P}(t)] \quad (6)$$

단, W_k : 중간층 가중치 행렬

W_o : 출력층 가중치 행렬

O_k : 중간층 출력

한편, 모선에 병렬로 연결된 집단부하의 소비전력은 Tellegen이론[1-2]에 의하여 집단부하를 구성하는 개별부하 소비전력의 합과 같다. 몇 개의 개별부하가 조합된 모선의 집단부하는 그림 3과 같이 개별부하 식별을 위한 신경회로망과 개별부하의 구성비를 근거로 선형조합에 의해 추약할 수 있다.

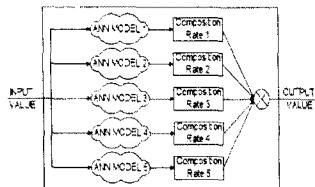


Fig. 3 Aggregation method for load model

부하모델로 과도안정도에 적용방법은 계통의 고장으로 인한 조류계산에서 계산된 부하모선의 전압 값에 따라 부하모선의 부하를 개별부하 추약에 의한 집단 부하모델을 나타내는 신경회로망(ANN)에 입력되어, 부하모선 전압 변화에 따른 부하의

새로운 응답 $P_L + jQ_L$ 을 구하게 되고, 이 갱신된 부하의 값은 다음 조류계산에 일정전력 부하와 대체되며, 과도안정도 해석에서 반복된 조류계산에 의해 Fig. 4와 같은 과정이 반복된다.

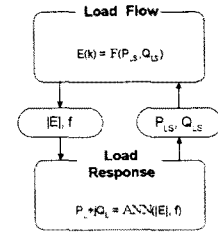


Fig. 4 Load flow calculation with the proposed load model

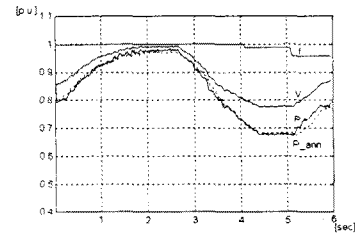
4. 사례연구

4.1 신경회로망에 의한 개별부하 식별 결과

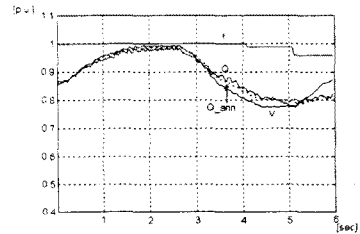
전압과 주파수 변화에 대한 응답특성을 효과적으로 모델링하기 위하여 3장에서 설명된 신경회로망을 이용하여 개별부하를 식별하고자 하였다. 2.3절에서 설명된 개별부하 특성실험으로부터 얻어진 각 부하의 응답특성으로 신경회로망을 학습하였다. 학습시 오차 한계는 0.001(%), 학습모멘텀은 0.5, 초기학습율은 0.5로 하였으며 각 개별부하별 5,000(회) 학습이 완료된 후, 신경회로망의 부하특성 식별력을 검증하기 위하여 개별부하에 대한 실험을 수행하고 실험의 입력인 전압과 주파수로 학습된 신경회로망에 2차 실험자료를 식 (1)과 같이 입력자료를 구성하여 입력하고 개별부하를 식별하였다.

개별부하의 동특성인 전압과 주파수가 동시에 변화할 때 유효/무효전력의 응답특성을 신경회로망에 의해 식별한 결과를 Fig. 6, 7에 나타내고 있다. Fig. 5는 유도전동기 부하의 유효/무효전력의 응답특성을 식별한 결과로 식별오차는 0.81/0.66(%)로 양호한 식별력이 떨어지고 있다.

이와같은 방법으로 개별부하에 대한 응답특성을 실험을 통하여 취득한 자료를 근거로 신경회로망을 학습하고, 식별한 결과의 식별오차를 표 2에 나타내었다.



(a) active power



(b) reactive power

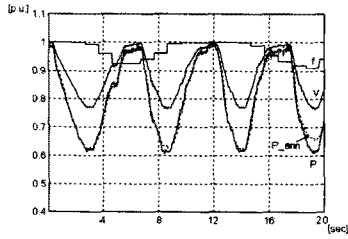
Fig. 5 The identification results of TV load by ANN at voltage and frequency variation

Table 2 The component load identification error (%)

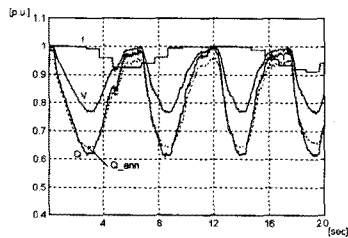
부하	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
유효전력	1.69	1.05	4.15	1.09	1.10	1.50	0.78	1.31	1.81	0.63	0.81
무효전력	3.18	2.40	4.39	4.52	0.61	1.33	1.09	2.87	3.25	0.88	0.66

4.2 개별부하 축약에 의한 집단부하 모델링 결과

정태부하 및 동태부하로 구성된 주파수 부하 11개에 대한 전압 및 주파수 변동을 학습된 개별부하의 신경회로망에 입력하여 출력을 얻고, 여기에 표 3과 같이 각각의 부하 구성비를 가지고 실제의 측정된 집단부하의 실측치와 비교 검토하였으며, 축약 결과 신경회로망에 의한 오차는 유효전력 0.9(%), 무효전력 2.2(%로 나타났다.



(a) active power



(b) reactive power

Fig. 6 The aggregation results of static and dynamic load by ANN

Table 3 The static and dynamic load composition rate(%)

부하	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
유효전력	15.18	10.5	0.75	14.35	19.95	9.16	1.37	1.00	18.48	1.33	8.01
무효전력	0.01	0.20	0.30	0.04	0.10	23.98	6.03	0.15	18.17	15.47	35.59

4.3 제안된 부하모델에 의한 안정도 해석 결과

제안된 부하모델을 계통의 과도 안정도 해석에 적용하기 위하여 Fig. 8과 같은 샘플계통을 선정하였다. 1번 발전기는 수력발전기로 그 정격출력은 247.5(MVA)이고, 정격전압은 16.5(kV)이며 역률은 1.0이고 회전속도는 1,800(rpm)이다.

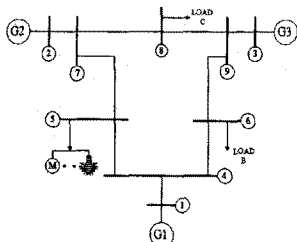


Fig. 7 A sample system

2번 발전기와 3번 발전기는 터빈 발전기로 정격출력은 192.0(MVA)와 128.0(MVA)이며, 정격전압은 18.0(kV)와 13.8(kV)이다. 2번 발전기와 3번 발전기의 역률은 0.85이고 회전속도는 3,600(rpm)이다. 각 발전기의 관성정수는 1번 발전기 50[s], 2번 발전기 9[s], 3번 발전기 6[s]이다. 부하 모선은 5번, 6번, 8번 모선으로 각각 125/50, 90/30, 100/35(MW/MVar)의 전력을 소비한다.

부하모선 중 부하모선 5를 선정하여 제안된 부하모델을 적용하였다. 또한 제안된 부하모델 적용시 Case별로 정태부하,

동태부하, 정태부하와 동태부하가 혼합된 혼합부하로 구성하였다. 모선 9에서 3상단락 사고를 상정하고 0.2초후에 고장을 제거하였다. 부하모선 5에 제안된 부하모델을 적용하고, 부하 모선 6, 8번에는 일정전력으로 하여 동일한 고장 조건하에서 계통의 안정도를 해석하였다. 이와 같은 조건에서 발전기의 위상각, 각속도는 Fig. 8, 9와 같다. 고장중 부하 모선의 전압과 주파수에 의한 부하 모선의 부하가 0.5(p.u.)를 유지하는 관계로 발전기의 출력이 작아지고 발전기의 입력이 일정하므로 발전기의 각속도는 일정전력 보다 크게 나타났으며, 발전기의 위상각 변화는 일정전력 경우 보다 적게 나타났다.

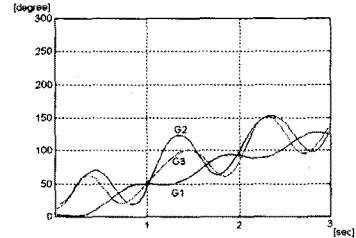


Fig. 8 The generator angle

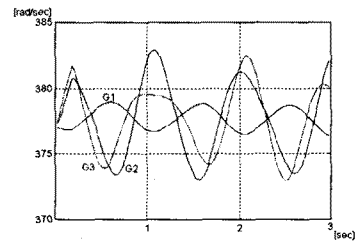


Fig. 9 The generator angular velocity

따라서 계통에 신경회로망을 적용하여 해석 할 경우가 계통의 특성을 정확하게 반영하므로 송전전력을 증대시킬 수 있으며 또 송전전력 증대에 따른 송전 설비의 확충 연기 등으로 투자비등을 절감할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 전력계통 운용 계획을 수립하는데 필수적으로 요구되는 계통의 해석의 결과에 영향을 미칠 수 있는 부분을 차지하고 있는 부하모델링에 관한 연구이다.

따라서 본 연구는 부하모델의 중요성과 신경회로망의 의한 정교한 부하모델 구축방법을 제시하였으며, 개별부하 축약에 의한 집단부하 모델링 기법을 제시하였다. 이러한 정교한 부하 모델링을 기반으로 최대송전전력 증대 및 송전전력 증대에 따른 송전설비 확충의 연기 등으로 투자비를 절감할 수 있고, 양질의 전력공급에 따른 공급신뢰도를 향상시킬 수 있다.

참고 문헌

- [1] B.Y. Ku, R.J. Thomas, C.Y. Chiou, C.J. Lin: "Power system dynamic load modeling using artificial neural networks" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No.4, November 1994, pp.1868-1875.
- [2] 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
- [3] 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.
- [4] J.P.Lee et al. "Load Characteristic Identification Using Artificial Neural Network", ICEE'97, Mastue Japan, August 1997
- [5] J.Y.Lim et al. "Load Characteristic Identification Using Artificial Neural Network and Transient Stability Analysis", 1998 International Conference on EMPD, Singapore, March 1998
- [6] Jack M. Zurada, "Artificial Neural System", West, 1992, pp.163-235.