

# 인가전압의 특성을 고려한 주거용 부하의 전류성분 추정기법 개발

논문

60P-4-4

## Development of Current Harmonics Estimation Method by Considering the Characteristics of Input Voltage

지 평 식<sup>†</sup>  
(Pyeong-Shik. Ji)

**Abstract** - Due to the increasing of nonlinear loads such as converters and inverters connected to the electric power distribution system, and extensive application of harmonic generation sources with power electronic devices, disturbance of the electric power system and its influences on industries have been continuously increasing. Thus, it is difficult to construct accurate load model for active and reactive power in environments with harmonics. In this research, we develop current harmonics estimation method based on Extreme Learning Machine (ELM) with fast learning procedure for residential loads. Using data sets acquired from various residential loads, the proposed method has been intensively tested. As the experimental results, we confirm that the proposed method makes it possible to effectively estimate current harmonics for various input voltage.

**Key Words** : Current Harmonics Estimation, ELM, Load Modeling

### 1. 서 론

전력계통에는 기본파 외에 다양한 부하에서 발생하는 고조파 전류가 혼재되어 있다. 고조파의 발생원인은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 그 하나는 최근 사용이 늘어난 첨단 제어장치, 전력전자기기 등 다양한 반도체 전력변환 설비에 의한 것이며, 다른 하나는 변압기, 회전기 등의 기존 전력기기의 비선형 특성 영역에서의 운전에 의한 것 등으로 구분할 수 있다. 이러한 비선형 부하의 유형이나 양이 증대하면 전원 측에 많은 고조파 전류가 흐르게 되고 따라서 전압의 왜형이 발생하여 계통내의 다른 설비에까지 악영향을 미친다. 또한, 고조파에 의해 전압과 주파수의 변동은 초래하며 그로 인하여 전력계통 해석에 중요한 성능 지표로 고려되는 부하의 특성을 모델링하는데 어려움을 겪고 있다 [1-3]. 그러나 기존의 고조파에 관한 연구는 고조파 장해에 관한 연구가 주류를 이루고 있고 전원에 고조파 성분이 있을 경우 부하의 응답특성에 관한 연구는 극히 드문 실정이다.

부하모델에 관한 연구를 살펴보면, 개별부하 및 집단부하에 대하여 정태특성 실험을 실시하고 주거용 및 상업용, 산업용 부하에 대한 시간별 부하구성비를 추정하여 부하모델의 효용성을 입증한 방법이 제안되었다[4]. 또한, 신경회로망 등을 이용한 부하모델링 기법 및 계통 적용 방법에 관한 방법론을 제시한 연구도 수행되었다[5]. 이외에도, 전력계통 안정도 정밀해석을 위한 적정부하모델의 개발방법과 적용 기법[6], 부하 역률모델 개발 기초연구[7], 다층 신경회로망을

이용하여 동태부하를 모델링하고 하는 방법[8], 재귀 신경회로망을 이용하여 부하를 표현하고 전압안정도에 적용한 바 있으며[9], 부하의 정태 및 동태모델의 파라미터를 확률론적 방법으로 표현한 연구도 시도되었다[10].

Keyhani 등은 신경회로망을 이용하여 선형 및 비선형으로 구성된 집단모델에 대한 부하모델을 개발하였으나, 인버터 구동 유도전동기의 부하모델을 개발하는데 한정되어 있다[11]. 또한 전력계통의 불확실성에 따른 동적 부하모델의 오차 범위를 정량적으로 제시한 방법[12]과 신경회로망과 다중곡선 식별기법을 각각 이용하여 과도상태의 동적모델에 제안하고 실증 데이터를 이용하여 타당성을 검증한 연구도 진행되고 있다[13-14]. 그러나 기존의 기법들은 고조파를 고려하지 않고 부하를 모델링함으로써 고조파가 존재하는 환경 하에서는 신뢰성 높은 모델을 제공하지 못하고 부하 모델의 궁극적인 목표인 변전소에서의 모델을 구축할 때 무효전력을 축약할 수 없다는 단점이 있다.

정확도가 높은 무효전력 축약 모델을 구축하기 위해서는 전압 및 전류의 고조파 성분이 고려되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 다양한 입력전압의 크기 및 입력전압의 고조파 전압원에 따른 전류의 고조파 성분의 추정알고리즘을 개발한다. 개발된 추정알고리즘은 입력전압에 따른 전류의 1,3,5,7,9차 고조파 성분을 추정한다. 따라서 개발된 추정모델은 다입력-다출력(MIMO : Multi-input Multi-output) 모델로 입력과 출력의 수가 많아 기존의 신경회로망으로는 학습시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 학습처리속도가 매우 우수한 ELM(Extreme Learning Machine)을 이용하여 주거용 부하의 전류 고조파 성분 추정기법을 개발한다. 개발된 모델은 다양한 주거용 부하에 대해 취득된 데이터를 이용하여 검증하였다.

<sup>†</sup> 교신저자, 시니어회원 : 중주대학교 전기공학과 교수 · 공박  
E-mail: psji@cju.ac.kr

접수일자 : 2011년 8월 10일

최종완료 : 2011년 9월 7일

## 2. 제안된 전류 성분 추정 알고리즘

그림 1에서는 본 논문에서 개발된 주거용 부하의 전류 고조파 성분 추정알고리즘의 구성도를 나타냈다. 그림 1에서 보는 바와 같이 개발된 전류 고조파 성분 추정알고리즘은 입력전압의 1,3,5,7,9차 고조파 성분과 전압에 대한 종합 고조파 함유율인 THD(Total Harmonics Distortion)을 이용하여 전류의 1,3,5,7,9차 고조파 성분을 추정하게 된다. 따라서 개발된 추정 알고리즘은 6개의 입력수와 5개의 출력수, 그리고 실험에 의해 결정되는 은닉층의 수(본 연구에서는 500으로 설정)로 구성되어 있음으로 기존의 신경회로망을 적용할 경우 학습시간이 오래 걸리는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 처리속도가 가장 우수한 ELM을 이용하여 알고리즘을 개발하였다.

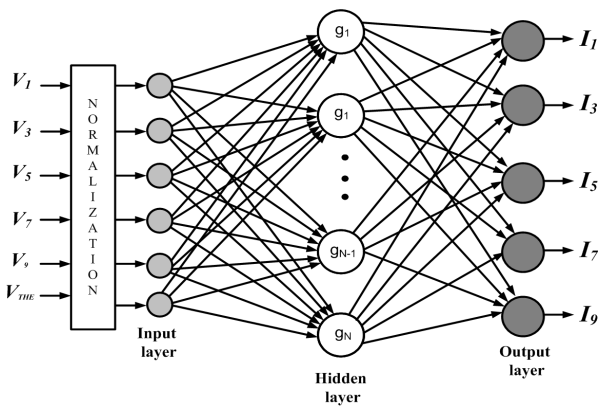


그림 1 ELM을 이용한 전류 고조파 성분 추정 알고리즘  
Fig. 1 The proposed current harmonics estimation method by ELM

그림 1에서 보는 바와 같이 ELM은 단일 은닉층을 가지는 전방향 신경망으로 최근 Huang등에 의하여 제안되었다 [15][16]. 최급경사법(gradient descent method)에 기반한 신경 회로망의 학습은 일반적으로 좋은 성능을 얻기 위해 많은 반복학습을 필요로 하며, 적절하지 못한 학습에 의하여 낮은 적응성을 보이거나 종종 국부 최소해(local minimum)에 수렴하는 단점을 가지고 있다. 그러나 ELM에서 출력 가중치들은 반복적인 학습 구조 대신에 모어-페로스의 일반화된 역행렬(Moore-Penrose generalized inverse)에 의해 분석적으로 계산되어짐으로 반복학습이 이루어지지 않는다.

ELM의 주된 특징은 다른 신경회로망의 학습방법과 달리 반복학습을 하지 않기 때문에 전형적인 반복학습 방법들에 비하여 매우 빠른 학습이 가능하다는 점과 ELM은 작은 학습 오차값을 가질 뿐만 아니라 가중치들의 가장 작은해를 얻는 경향이 있다는 점이다. 특히, 경사 기반 학습방법들이 국부최소(local minimum), 과잉적합(over-fitting)과 같은 문제점이 있는 반면에 ELM은 한 번의 학습으로 최적의 해에 직접적으로 도달한다.

그림 2에서는 ELM의 학습과정을 나타냈다. ELM의 학습과정을 설명하기 위해  $m$ 개의 데이터  $\{(\mathbf{x}_i, y_i), i = 1, 2, \dots, m\}$ 와 한개의 출력노드를 가지고  $N$ 개의 은닉노드들을 가지는

전방향 신경 회로망의 학습을 고려해보자. 여기서, 입력  $\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}]^T \in R^N$  이고,  $y_i \in R$ 이며,  $N$ 개의 은닉노드들의 활성화 함수  $g(x)$ 에 의한 전방향 신경 회로망의 출력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{g}(\mathbf{w}_j \cdot \mathbf{x}_i) \cdot \mathbf{a} = y_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{w}_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jN}]^T, j = 1, 2, \dots, N$  은  $j$ 번째 은닉노드와 입력노드들을 연결하는 가중치 벡터로 임의의 값으로 초기화 되며,  $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$  는 은닉노드들과 출력노드를 연결하는 가중치 벡터이다.  $\mathbf{w}_j \cdot \mathbf{x}_i$  는  $\mathbf{w}_j$ 와  $\mathbf{x}_i$ 의 내적을 의미한다.

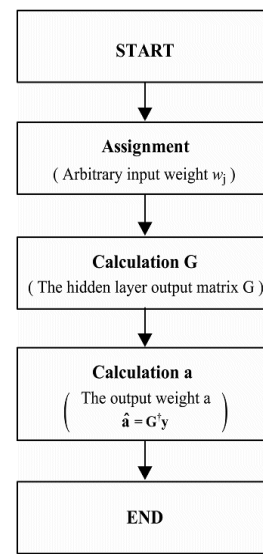


그림 2 ELM의 학습과정  
Fig. 2 The learning process of ELM

식 (1)은 식 (2)와 같이 간결하게 표현될 수 있다.

$$\mathbf{G}\mathbf{a} = \mathbf{y} \quad (2)$$

여기서

$$\mathbf{G}(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_N, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m) = \begin{bmatrix} \mathbf{g}(\mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{x}_1) & \dots & \mathbf{g}(\mathbf{w}_N \cdot \mathbf{x}_1) \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{g}(\mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{x}_m) & \dots & \mathbf{g}(\mathbf{w}_N \cdot \mathbf{x}_m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (4)$$

$\mathbf{G}$ 는 전방향 신경 회로망에서 은닉층의 출력으로  $\mathbf{G}$ 의  $i$ 번째 열은 입력  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m$ 과 관련된  $i$ 번째 은닉노드들의 출력 벡터이다. 최종적으로, 식 (5)와 같이 최소자승법에 의하여 출력 가중치  $\hat{\mathbf{a}}$ 을 구한다.

$$\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{G}^{\dagger} \mathbf{y} \tag{5}$$

여기서  $\mathbf{G}^{\dagger}$ 는 은닉층의 출력  $\mathbf{G}$ 의 모어-페로스의 일반화된 역행렬이다. 만일  $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ 가 비정칙인 경우,  $\mathbf{G}$ 의 모어-페로스의 일반화된 역행렬은 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$\mathbf{G}^{\dagger} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \tag{6}$$

최종 예측은 식 (7)과 같이 얻어진다.

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G} \hat{\mathbf{a}} \tag{7}$$

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 실험장치 구성

본 논문에서는 개별부하의 인가전압에 따른 전류의 고조파 성분의 특성을 분석하기 위해 고조파를 많이 발생하는 백열등(조광기부착형), 형광등, 인버터스탠드, 선풍기, 유도전동기, 개인용 컴퓨터, 무정전전원장치 등 대표적인 주거용 및 산업용 전기제품들 중 실험실에서 실험 과정을 고려하여 최종적으로 표 1과 같이 선정하였다.

표 1 선정된 부하기기

Table 1 Various electrical loads used in experiment

항 목	정격전압 [V]	정격 [W]	대수	비고
형광등	220	80	1	
3과장램프	220	36	1	
선풍기 a	220	75	1	
선풍기 b	220	85	1	
백열등	220	18	1	조광기부착
유도전동기	220	160	1	권선형
인버터스탠드 a	220	20	1	
인버터스탠드 b	220	24	1	
텔레비전	220	100	1	
VTR	220	40	1	

표 2 전류의 고조파 성분 추정 결과 (검증데이터)

Table 2 Estimation result of current harmonics component for testing data

인가전압 부하	기본파	기본파+3고조파	기본파+(3,5)	기본파+(3,5,7)	기본파+(3,5,7,9)
형광등	$0.48 \times 10^{-6}$	$0.28 \times 10^{-6}$	$0.15 \times 10^{-6}$	$0.16 \times 10^{-6}$	$0.12 \times 10^{-6}$
삼과장램프	$0.11 \times 10^{-6}$	$0.12 \times 10^{-6}$	$0.15 \times 10^{-6}$	$5.38 \times 10^{-6}$	$3.40 \times 10^{-6}$
선풍기	$0.27 \times 10^{-6}$	$5.55 \times 10^{-6}$	$4.15 \times 10^{-6}$	$6.14 \times 10^{-6}$	$4.25 \times 10^{-6}$
인버터스탠드	$6.09 \times 10^{-6}$	$4.95 \times 10^{-6}$	$4.20 \times 10^{-6}$	$4.48 \times 10^{-6}$	$4.57 \times 10^{-6}$
백열등	$0.18 \times 10^{-6}$	$0.13 \times 10^{-6}$	$3.31 \times 10^{-6}$	$5.46 \times 10^{-6}$	$3.73 \times 10^{-6}$
유도전동기	$0.88 \times 10^{-6}$	$0.58 \times 10^{-6}$	$0.60 \times 10^{-6}$	$0.61 \times 10^{-6}$	$0.61 \times 10^{-6}$
텔레비전	$0.39 \times 10^{-6}$	$0.41 \times 10^{-6}$	$0.29 \times 10^{-6}$	$0.74 \times 10^{-6}$	$0.22 \times 10^{-6}$
VTR	$0.98 \times 10^{-6}$	$0.59 \times 10^{-6}$	$0.46 \times 10^{-6}$	$0.41 \times 10^{-6}$	$0.52 \times 10^{-6}$

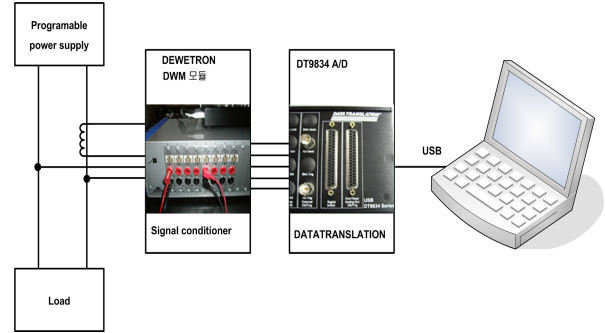


그림 3 개별부하 특성실험 장치 구성

Fig. 3 Configuration of Individual electrical load experiment

그림 3에서는 개별부하특성실험을 위한 구성도를 나타냈다. 실험과정을 간단히 살펴보면, 그림 3에서 보는 바와 같이 전압의 크기와 주파수 및 전압의 파형까지 변환이 가능한 고조파 전원인가장치에 의해 표 1에 나타난 개별부하에 전원을 인가한 후, 시그널 컨디셔너와 DT9834 A/D변환모듈에 의해 데이터를 취득한 후 최종적으로 DEWE Soft 6.5 프로그램을 이용하여 인가전압에 따른 전류의 고조파 성분을 취득하게 된다.

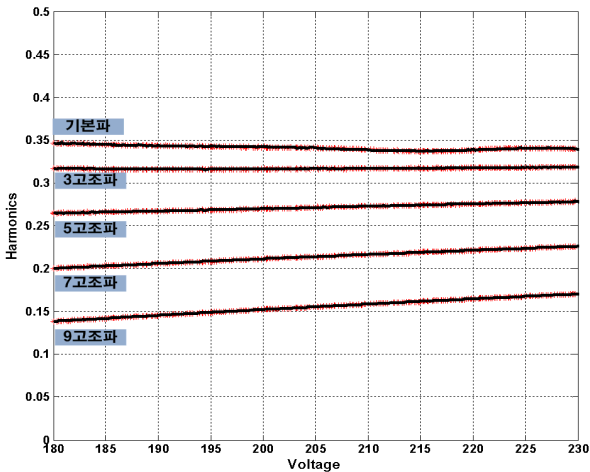
#### 3.2 실험결과

개별부하에 대한 전류의 고조파 특성을 분석하기 위하여 표 1에 나타난 “형광등”, “삼과장램프”, “형광등”, “선풍기”, “인버터 스탠드”, “조광기부착형 백열등”, “권선형 유도전동기”, “텔레비전”, “VTR” 등 8개의 주거용 부하에 대하여 개발 알고리즘의 성능을 평가하였다. 주거용 부하에 대한 고조파 전류 특성을 분석하기 위하여 주파수가 60Hz로 고정하고 전압 전압은 정현파, 3고조파, 5고조파, 7고조파 및 9 고조파를 혼합하여 인가하였으며, 전압의 크기는 180[V]에서부터 230[V]까지 초당 1[V]씩 증가시키며 실험하였다. 취득된 데이터 중에서 50[%]는 ELM 모델 학습을 위해 사용하였고, 나머지 50[%] 데이터를 이용하여 개발모델을 검증하였으며, 은닉층의 수는 500으로 설정하였다.

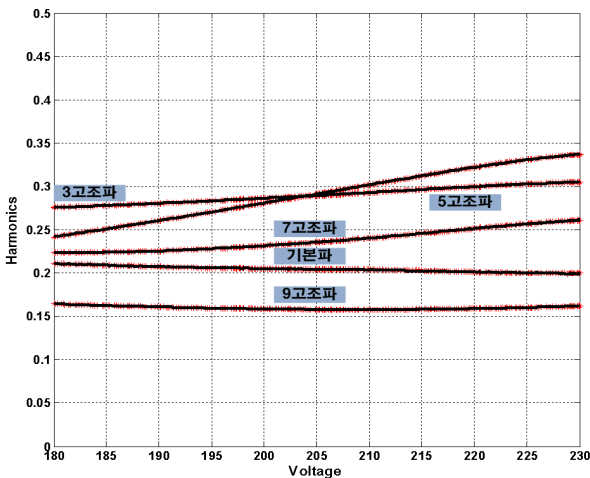
표 2에서는 검증데이터에 대하여 본 논문에서 제안된 고조파 성분의 모델링 오차를 나타냈다. 여기서, 성능지표는 평균자승오차근인 RMSE (Root mean square error)을 기준

으로 하였다. 표 2에 나타낸 바와 같이 “선풍기”인 경우에는 정현파에 대한 오차는 매우 적었으나, 정현파를 제외한 나머지 고조파 성분에 대한 추정은 정현파의 성분의 추정 결과와 비교해 볼 때 상대적으로 큰 값을 나타냈다. 주거용 부하 중에서 “인버터 스탠드”의 경우에는 다른 주거용 부하에 비하여 기본파에 대한 추정 오차가 상대적으로 높은 오차결과를 나타냈으나 오차의 범위가  $10^{-6}$ 을 고려하면 추정 오차가 매우 정확함을 알 수 있다.

그림 4에서는 인가전압을 정현파인 전원을 인가하였을 때와 정현파 외에 3고조파+5고조파+7고조파+9고조파 성분이 포함된 전원을 인가하였을 때 “인버터 스탠드”에 대한 전압별 전류성분 추정결과를 나타냈다. 표 2 및 그림 4로부터 알 수 있는 바와 같이 제안된 알고리즘은 전류의 고조파 성분을 효과적으로 추정함을 확인할 수 있다. 즉, 그림들로부터 알 수 있는 바와 같이 인가전압의 특성에 따라서 부하 전류의 성분비는 크게 변경하지만, 제안된 알고리즘은 이러한 변화특성에 상관없이 일관되게 전류 고조파 성분을 효과적으로 추정함을 확인할 수 있었다.



(a) 정현파 전원 인가



(b) 정현파 + 고조파(3,5,7,9) 전원 인가

그림 4 인버터 스탠드의 전류 성분 추정

Fig. 4 Current harmonics estimation of inverter stand

#### 4. 결 론

전력계통에 연결되어 있는 컨버터와 인버터와 같은 비선형 부하의 증가와 전력전자 소자로 구성된 고조파 발생원의 광범위한 적용으로 인하여 계통의 외란과 그에 따른 산업체에서의 영향은 지속적으로 증대되고 있다. 따라서 다양한 고조파가 존재하는 환경하에서 유효전력과 무효전력 모델을 정확하게 구축하는데 어려움이 있다. 이러한 무효전력 모델을 효과적으로 구축하기 위해서는 고조파에 따른 인가전압의 특성뿐만 아니라 부하에 흐르는 전류의 특성을 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 입력전압의 크기 및 입력전압의 고조파 전압원에 따른 전류의 고조파 성분의 추정알고리즘을 개발하였다. 개발된 추정알고리즘은 학습처리속도가 매우 우수한 ELM을 이용하여 주거용 부하의 전류 고조파 성분 추정기법을 개발하였다. 실험결과 고려 대상의 모든 주거용 부하에 대해 효과적으로 전류의 고조파 성분을 추정함을 확인할 수 있었다. 향후 추정된 전류의 고조파 성분을 이용한 무효전력의 추정기법에 대한 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011학년도 충북대학교 교내학술연구비의 지원 및 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(2009T100100637) 주관으로 수행된 과제임.

#### 참 고 문 헌

- [1] Mau Teng Au and J. V. Milanovic, "Development of Stochastic Aggregate Harmonic Load Model Based on Field Measurements," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, pp. 323-330, 2007.
- [2] Hsiung Cheng Lin, "Intelligent Neural Network-Based Fast Power System Harmonic Detection," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, pp. 43-52, 2007.
- [3] Huaiwei Liao, "Power System Harmonic State Estimation and Observability Analysis via Sparsity Maximization," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 22, pp. 15-23, 2007.
- [4] 한국전력공사 기술연구원, "전력계통 안정도 해석을 위한 적정부하 모델에 관한 연구" KRC-88S-J02, 1989.
- [5] 지평식, "신경회로망에 의한 부하모델링과 계통해석에 관한 연구", 충북대학교 대학원 박사학위 논문, 1998.
- [6] 김정훈 외, "전력계통 안정도 정밀해석을 위한 적정부하모델에 대한 연구" 한국전력공사 전력연구원 연구보고서, 2000.
- [7] 이병하, 김정훈, "전력산업구조개편하에서 전력계통 운용과 계획을 위한 부하역률모델 개발에 관한 연구", 기초전력연구원 연구보고서, 2004.
- [8] D.M. Vilathgamuwa, Wijekoon, H.M, "Representation of Power System Load Dynamics with ANN for Real-time application," Power Engineering Society General Meeting, Vol. 3, pp. 13-17, 2003.

- [9] Dingguo Chen, Ronald R. Mohler, "Neural-Network-Based Load Modeling and Its Use in Voltage Stability Analysis," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 11, No. 11, pp. 460-470, 2003.
- [10] V. Knyazkin, C. A. Canizares, L. H. Soder, "On the Parameter Estimation and Modeling of Aggregate Power System Load," *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 19, No. 2, pp. 0123-1031, 2004.
- [11] A. Keyhani, W. Wu, G. T. Heydt, "Composite Neural Network Load Models for Power System Stability Analysis," *IEEE PES 2004*, Vol. 2, pp. 1159 - 1163, 2004.
- [12] I. A. Hiskens, J. Alseddiqui, "Sensitivity, Approximation, and Uncertainty in Power System Dynamic Simulation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 21, pp. 1808-1820, 2006.
- [13] Qian Ai, Danzhen Gu, Chen Chen, "New Load Modeling Approach Based on Field Tests for Fast Transient Stability Calculation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 21, pp. 1864-1873, 2006.
- [14] He Renmu, Ma Jin, David J. Hill, "Composite Load Modeling via Measurement Approach," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 21, pp. 663-672, 2006.
- [15] G. B. Huang, Q. Y. Zhu, and C. K. Siew, "Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks," in *Proc. 2004 IEEE Int. Conf. Neural Networks*, Vol. 2, pp. 985-990, 2004.
- [16] G. B. Huang, Q. Y. Zhu, and C. K. Siew, "Extreme learning machine: theory and applications," *Neurocomputing*, Vol. 70, No. 1-3, pp. 489-501, 2006.

---

저 자 소 개



**지 평 식 (池平植)**

1964년 3월 5일생. 1989년 한밭대 전기공학과 졸, 1994년 충북대 대학원 전기공학과 석사과정 졸업(석사), 1998년 동대학원 박사과정 졸업(박사), 현재 충주대학교 전기공학과 교수  
 Tel. 043-841-5152  
 E-mail : psji@cjnu.ac.kr