

## 교내 부하 실측 데이터를 이용한 정적 부하모델링

한상욱\*, 이병준\*, 송화창\*\*, 김홍래\*\*\*  
고려대\*, 서울과학기술대학교\*\*, 순천향대\*\*\*

### Static Load Modeling using PMU data of University Load

Sangwook Han\*, Byongjun Lee\*, Hwachang Song\*\*, Hongrae Kim\*\*\*  
Korea University\*, Seoul National University of Science and Technology\*\*, Soonchunhyang University\*\*\*

**Abstract** - 최근 실측 데이터를 이용한 측정기반의 부하모델링이 활발히 연구되고 있다. 본 논문에서는 교내에 설치된 PMU를 이용하여 취득된 데이터를 이용하여 정적 부하모델링을 수행한 결과를 보인다. 정적 부하모델링에는 ZIP모델링이 사용되었으며, 고려대학교 주배전실의 22.9kV 부하단 취득 데이터를 사용하였다. 파라미터 추정기법은 최소제곱법(Least Square Method)을 적용하였다.

#### 1. 서 론

계통의 안정도 평가나 조류계산에 있어서 부하특성을 반영하는 수학적 모델로 나타내는 것을 부하 모델링이라고 한다.[1]

실제 부하는 주거, 상업, 공업 등의 다양한 부하요소로 구성되어 있다. 변전소로부터 송전된 전력은 이러한 부하에 의해 소비된다. 부하의 정확한 구성 비율이나 양을 파악하기는 매우 어렵고, 시간에 따라 양과 구성이 계속 변화한다. 따라서 개별 부하요소 각각의 특성을 정확하게 반영하기는 어려운 실정이다. 그러므로 전력계통에서 부하는 간략화 작업을 통해 표현된다. 부하모델은 소비하는 전력과 해당 모선에서의 전압, 주파수의 관계를 나타내는 것이다. 다시 말하면, 계통 해석을 할 때 필요한 실제 계통 부하를 등가 수리모델로 표현한 것이다.

부하 모델링 작업은 일반적으로 두 단계로 나누어진다. 첫 번째는 부하모델의 구조를 결정하는 일이고, 두 번째는 결정된 부하모델 구조에 알맞은 파라미터를 산정하는 작업이다. 파라미터를 산정하는 과정은 사용하는 기법에 따라 요소기반 부하 모델링과 측정기반 부하모델링으로 나눌 수 있다.

측정기반 부하모델링을 위해 지정된 변전소 또는 급전소로부터 측정장비를 통해 부하의 응답을 기록한다. 측정된 유효전력, 무효전력, 전압 등이 다항식 형태로 함수화 되고, 이 정보를 이용해 해당 부하모델의 파라미터들을 산정한다. 추정기법의 정확도를 향상시키기 위해 수집한 데이터의 노이즈 제거 등 선처리 과정이 포함될 수 있다.

측정기반 기법을 이용한 부하 모델링에서는 실측 데이터를 이용해 계산된 값과 실제 계통에서 측정된 값의 차이가 최소가 되도록 부하 모델의 파라미터를 산정한다. 최적화 과정에서 파라미터를 반복적으로 업데이트하면서 최적의 파라미터를 찾아간다. 이와 같은 방법을 통해 전력계통에 사용되는 부하 모델들의 파라미터를 결정할 수 있다. 오차를 최소화시키는 최적화 과정에는 최소 자승법과 유전 알고리즘을 비롯한 다양한 기법이 사용될 수 있다.

최근 컴퓨터의 전산처리 능력이 향상되고 PMU 등의 측정 장비와 통신망의 성능이 향상됨에 따라 실측 데이터 취득이 용이해져, 이와 같은 측정기반 부하모델링이 많이 연구되고 있다. 측정기반 부하 모델링은 요소기반의 부하 모델링의 한계점인 정확한 부하 구성성분 비율 취득이 어려운 점이나 계절적, 지역적 특성을 나타내기 어려운 점을 극복할 수 있는 대안으로 꼽히고 있다. 또한, 실제 부하의 응답 변화를 이용해 정해진 형태의 모델을 산출하기 때문에, 기존의 전력 해석 및 제어 프로그램에 필요한 형태로 정확한 부하모델을 직접 산출할 수 있는 장점이 있다. 현재 EPRI를 비롯한 해외 연구기관에서도 측정기반 기법을 이용한 부하 모델링이 활발히 진행되고 있다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 측정기반 부하모델링 알고리즘

측정기반 기법의 부하 모델링에서는 실측 데이터를 직접 이용해 계산된 값과 실제 계통에서 측정된 값의 차이가 최소가 되도록 부하 모델의 파라미터를 산정한다. 측정된 값과 계산된 값의 오차를 최소화시키는 최적화 과정에서 본 논문에서는 최소 제곱법이 사용되었다.[2] 부하 모델링의 파라미터를 실시간으로 산정하기 위해 슬라이딩 윈도우 기법을 도입하였다. 한 시점에서, 일정 길이의 시간 창(time window) 내의 데이터들을 이용해 파라미터 산정을 실시한다. 다음 시점에서, 시간

창을 이동해 같은 방법으로 파라미터를 결정한다. 이런 방식으로 슬라이딩 윈도우를 계속 전진시켜가며 실시간으로 변화하는 부하를 반영하는 부하모델의 파라미터를 추정 할 수 있다.[3]

##### 2.2 ZIP 모델 구성요소

ZIP 모델은 전력을 전압의 2차 Polynomial 형태로 표현한 정적 부하 모델이다. 일반적인 구조는 다음과 같다.

$$P = P_0 \left[ p_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^1 + p_3 \right] \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left[ q_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^1 + q_3 \right] \quad (2)$$

일반적으로 정적 부하모델은 정 전력, 정 전류, 정 임피던스 모델로 나타낼 수 있다. 정 부하 모델은 전압의 제곱에 비례하고, 정 전류 모델은 전압에 선형적이며, 정 전력 모델은 전압에 관계없이 일정하다. ZIP 모델은 위와 같은 세 가지 모델의 합으로 표현된다.[4]

##### 2.3 최소 제곱법을 이용한 파라미터 추정기법

파라미터 추정에 있어서 아래와 같은 에러 함수를 최소화시키는 방법을 최소 자승법이라 한다.

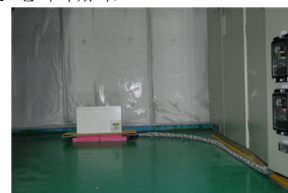
$$\min_{p \in Z} \varepsilon(p) = \min_{p \in Z} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2 \quad (3)$$

여기서, 는 추정되어야 하는 파라미터 벡터, 은 추정을 위해 사용된 샘플의 총 수, 는 파라미터 공간, 는 측정된 값, 는 모델 출력을 나타낸다. 파라미터 추정을 위한 제약조건들은 상하 경계(upper and lower boundary)로서 다음과 같이 표현된다.[5]

$$lb_j \leq p_j \leq ub_j \quad (1 \leq j \leq m) \quad (4)$$

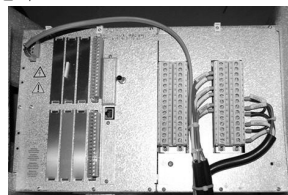
##### 2.4 교내 부하 데이터 취득

고려대학교 안암캠퍼스 주배전실의 22.9kV 부하단에 ABB사의 PMU (모델명: RES521)를 설치하였다.



<그림 1> PMU 설치 모습

PMU는 PT와 CT를 통해 배전반에 연결되어 전압과 전류 정보를 측정했다. PT를 사용하기 위해, 3상을 나타내는 선들과 각 상의 중성선을 포함하는 총 6개의 전선을 이용했다. 그리고 각 상마다 2개의 선과 CT를 직렬로 연결해 총 6개의 전선을 사용해 전류를 측정했다. 이 연결 사항은 아래 사진과 같다.



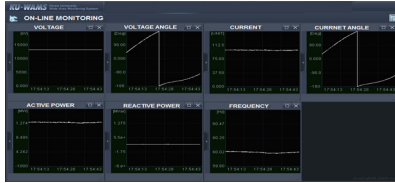
<그림 2> PMU의 삼상 결선

이 PMU를 통해 부하단의 유효전력, 무효전력, 전압, 전류, 주파수 등

의 정보들을 측정을 시작하였다. 이 정보들은 TCP/IP 형태로 서버 시스템에 전송되어, 실시간으로 출력 및 저장이 된다. 이 서버 시스템은 KU-WAMS(Korea University Wide Area Monitoring System)으로 한전 KDN을 통해 개발되었다. KU-WAMS가 감시하는 네트워크의 구성과 데이터 취득 모습은 아래 사진과 같다.

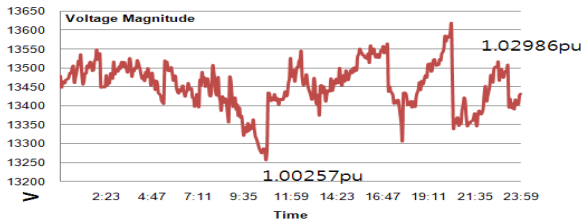


<그림 3> PMU 서버 시스템

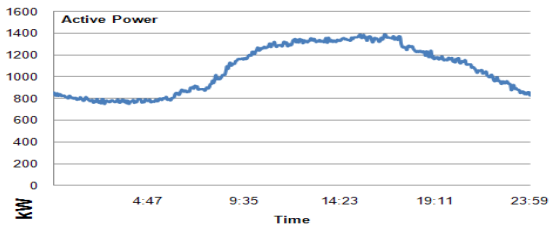


<그림 4> KU-WAMS의 실시간 계통 데이터 취득

PMU와 서버를 이용하여 고려대학교 자연계 캠퍼스의 일별 부하데이터가 매일매일 축적되고 있다. 하루 데이터의 용량은 약 800MB 정도가 된다. 다음은 2011년 5월 20일 하루간 취득된 전압과 유효전력의 그래프이다.



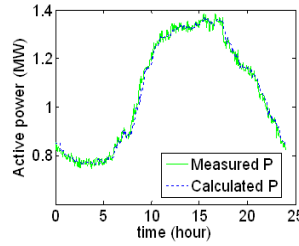
<그림 5> 2011년 5월 20일 전압 그래프



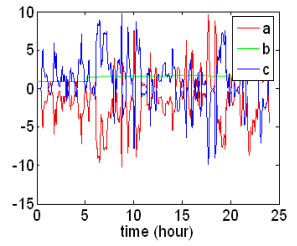
<그림 6> 2011년 5월 20일 유효전력 그래프

### 2.5 취득 데이터를 이용한 부하모델링 결과

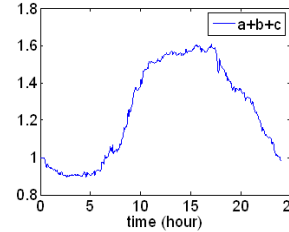
추정된 데이터를 이용하여 ZIP 모델 추정을 해보았다. 교내에서 측정된 데이터는 사고 데이터가 아닌 정상상태 데이터 이므로, 유효전력 변동량에 비해 전압의 변동량은 상대적으로 적다. 정확한 추정을 위하여 슬라이딩 윈도우를 사용하였으며, 이번 추정에서는 윈도우 사이즈는 10으로 하였으며, 이 경우 약 30분 정도의 시간이 된다. 추정된 결과는 다음과 같다. a, b, c는 각각 정부하, 정전류, 정전력 부분의 파라미터이다. 그림7에서 볼 수 있듯이, 유효전력 추정은 매우 잘 되고 있다고 할 수 있다. 하지만 그림8을 보면 추정 파라미터 a, b, c가 큰 폭으로 흔들리는 것을 확인 할 수 있다. 또한 추정 파라미터 합인 a+b+c가 0.9에서 1.6 정도로 변동되고 있다. 잘 알려져 있는대로, ZIP모델은 정부하, 정전류, 정전력 파라미터의 합이 1이 되어야 한다. 그림9에 의하면 ZIP모델이 완벽하게 반영되었다고 볼 수는 없다. 하지만 그 범위가 아주 많이 벗어 나지는 않는 것은 고무적이라 할 수 있다.



<그림 7> 측정 유효전력 및 추정 유효전력 결과



<그림 8> 추정된 파라미터 값



<그림 9> 추정된 파라미터 값의 합

### 3. 결 론

고려대학교 교내 부하에 설치된 PMU를 이용하여 데이터를 취득하고 이를 통해 정적 부하모델링을 수행하였다. 추정데이터를 이용하여 유효전력 추정은 어느정도 정확하게 이루어 지고 있지만, 추정된 파라미터를 확인하면 아직 신뢰성이 높다고 하기에는 어려움이 있다. 이는 취득데이터가 정상상태 데이터이기 때문이라 할 수 있는데, 해외 저명 연구기관에서 낸 결과를 보면 모두 사고 데이터 상황에서 정상적인 부하모델링이 이루어지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 시뮬레이션 레벨에서는 사고 데이터를 이용하면 매우 정확하게 ZIP 구성비를 찾아내므로 알고리즘의 문제라고는 볼 수 없다. 앞으로 계속적으로 데이터를 축적하여 사고데이터가 측정된다면 이로부터 정확한 파라미터 추정이 가능할 것으로 기대 해 본다.

### [감사의 글]

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 기초전력연구원 주관 및 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Ma Jin, Han Dong and He RenMu, "Measurement-based Load Modeling: Theory and Application", Science in China Series E: Technological Sciences, vol. 50, no. 5, pp. 606-617, Oct. 2007.
- [2] Meng Shen, "New Framework for Automatic Parameter Estimation of Power System Models", Doctor of philosophy, 2000 December, Washington State University
- [3] Christian Rehtanz, "Wide Area Protection and On-line Stability Assessment based on Phasor Measurements", Bulk Power System Dynamics and Control V, August 26-31, 2001, Onomichi, Japan.
- [4] Sanghyun Park, "On-line Static Load Modeling using Measurement Data," M.D. dissertation, Dept. of Electrical Engineering, Korea University, 2006.
- [5] Kyeho Jon, "PMU based Static Load Modeling using Sliding Window," MD. dissertation, Dept. of Electrical Engineering, Korea University, 2009.
- [6] He Renmu, Ma Jin, David J., "Composite Load Modeling via Measurement Approach" IEEE Trans. Power Systems, vol. 21, no. 2, May 2006.