2006년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집(2006.11.3~4)

측정데이터를 이용한 실시간 정적 부하모델링

박상현, 정동현, 강상균, 이병준, 권세혁
고려대학교

On-line Static Load Modeling using Measurement Data

Sanghyun Park, Donghyun Chung, Sanggyun Kang, Byongjoon Lee, Sae-hyuk Kwon
Korea Univesity

Abstract - In this paper, Static load models are developed using measurement based approach which is fundamental for on-line load modeling. The measurement data can be acquired from PMU(phasor measurement units). On the assumption that we have on-line measurement data, a scheme which is for Static load model capable to apply SCADA/EMS is developed. The Least Squares criterion is used for minimizing between measured and simulated data. In this manner, On-line Static load modeling algorithm can be developed. In this paper, a scheme that simple Static load model is applied for On-line load modeling is studied.

1. 서　론

전력계통의 안정도에 대한 컴퓨터 모의를 위해서는 부하모델이 필요하다. 하지만, 부하는 냉장고, 히터, 모터 등 무수히 많은 종류로 구성되어 있으므로 그 특성을 하나하나 입력하는 것은 불가능하다. 따라서 부하모델의 특징을 하나의 집합적인 형태로 표현할 수 있는 모델링 기법이 필요하다. 부하모델은 단순한 형태로 간략화 시키면서도 그 동작 특성을 왜곡시키지 않는 모델이 필요하다.[1] 시시각각 변하는 계통의 상태를 정확하게 표현하기 위해 실시간으로 적합한 부하모델을 찾는 방안이 필요하게 되었다.

본 논문은 실제 측정된 데이터를 이용하여 정해진 부하모델의 구조에 정확한 파라미터를 계산하는 방법을 제안하고, 이를 이용하여 실제 계통에서 실시간 부하모델링을 적용하는 방안의 수립을 목적으로 하고 있다. 실시간 정적 부하모델링을 하기 위해서는 Off-line 측정기반 부하모델링 기술이 필요하다.

부하모델링을 하는 작업은 크게 부하모델의 수학적 구조를 결정하는 일과 그 구조에 알맞은 파라미터를 산정하는 일로 크게 구분된다.[2] 과거에는 발전기[3], 여자기 시스템[4], 부하모델 등 전력계통 요소의 모델에 대한 연구가 산업계로부터 큰 관심을 받았었다. 그 결과 전력계통 요소들의 표준모델들이 많이 개발되어 여러 표준 모델 구조가 제안되어 왔다. 그리고 이 모델들은 전력계통 분석이나 제어 프로그램에서 보편적으로 사용되고 있다. 따라서 결정된 모델 구조에 정확한 파라미터 산정을 하는 것이 핵심이다.

측정기반 부하모델링 기법을 이용하여 실시간으로 파라미터를 산정해서 시시각각 변하는 부하의 특성을 나타내는 On-line 부하모델링이 가능하다. 실시간 부하모델링은 Rehtanz에 의해 소개되었는데, Sliding Window 개념을 이용하여 다이나믹 부하모델링을 통해 부하모델의 파라미터 변화를 나타내었다.[5] PMU(Phasor Measurement Unit)와 같은 실시간 측정기기를 이용하여 데이터를 획득하여 실제 On-line 부하모델링을 적용할 수 있다.

본 논문에서는 디지털 시뮬레이터 하이퍼심에서 측정된 데이터를 실측 데이터라 가정하고 측정기반 부하모델링 방법을 적용해 본다. 측정기반의 부하모델링 기법을 이용하여 정적인 부하모델에 대해 파라미터를 산정해보고, 이를 이용하여 실시간 부하모델링에 적용해 본다. 정확한 부하특성을 반영하기 위해 다이나믹 부하모델을 적용해야 한다. 하지만, 일반적으로 사용되는 상용 계통해석 프로그램에서는 전압이 0.7 [pu] 이하에서는 정부하모델로 모의되므로, 기준전압 이상의 값만을 가지고 정적인 부하모델의 파라미터를 산정하는 방안을 제안하고 이를 실시간 부하모델링에 적용해 본다.

2. 본　론

2.1 측정기반의 부하모델링

측정기반 부하모델링은 측정 장치를 모선에 직접 부착하여 획득된 데이터를 이용하여 파라미터를 산정하는 방법이다. 부하모델은 부하모선에서 전력 소비량과 전압과 주파수의 관계를 적절한 수학적 관계로 표현된다. 이는 부하모선에서의 집합적 형태의 부하모델의 외부적 특성을 나타내야 한다. 데이터는 DSP 장비나 PMU 등을 이용하여 실제 기록된 데이터를 취득한다. Parameter Estimation을 하는 툴이 제대로 동작하게 하기 위해 노이즈를 제거하는 필터를 설치하면 더 좋다. 측정기반의 부하모델링은 기록된 측정데이터를 시뮬레이터에서 계산된 결과값과 비교하여 시뮬레이터의 결과값이 실제 측정데이터와 같은 결과가 나오도록 오차를 최소화하는 알고리즘을 이용하여 전력계통의 여러 모델들의 파라미터를 적절하게 산정할 수 있다. 측정기반 부하모델링의 기본 알고리즘은 다음과 같다.

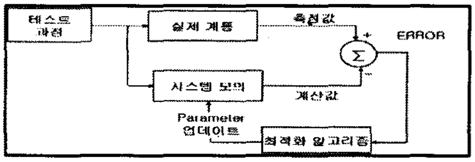


그림 1 Parameter Estimation을 위한 알고리즘

2.1.1 Parameter Estimation을 이용한 부하모델링

모선의 전압, 전류, 주파수, 유효전력, 무효전력을 측정한다. 부하모델은 유효전력, 무효전력이 전압과 주파수와의 관계로 표현된다. 따라서 파라미터를 산정할 구조를 우선 선정하고 측정된 전압과 주파수를 부하모델 식에 대입하여 계산된 유효전력과 무효전력 값이 실제값과 오차가 최소가 되도록 적절한 파라미터를 산정한다.

Estimation 작업의 목적은 모의된 결과가 측정된 결과

와 같도록 반복계산을 통해 최적의 파라미터를 산정해 내는 것이다. 목적함수는 다음과 같다.

$$Min_{p\in P}E(P)=\sum_{k=1}^{N}(z_{act}(t_k)-z_{cal}(t_k,p))^2 \qquad (1)$$

Where
E(p) : Error Function of parameter p
$z_{act}(t_k)$: t_k 에서의 실제 측정 데이터
$z_{cal}(t_k,p)$: t_k 에서 parameter p를 갖는 모의된 데이터
N : Sampling 된 수
P : Parameter space

Least Square Method를 이용하여 행렬로 만들어서 최적해를 구할 수 있다. PMU와 같은 실시간 측정기기는 부하모선에서 전압, 전류, 유효 및 무효전력 등을 실시간으로 측정하여 곧바로 데이터베이스로 저장하거나 SCADA와 연계하여 계통정보로 활용할 수 있도록 하는 역할을 수행한다. 오차 E(p)를 최소화하기 위해 좋은 최적화 기술이 필요하다. 논문에는 simple gradient-based method, BFGS method, Downhill simplex method, Genetic Algorithm 등 좋은 여러 가지 방법이 소개되어 있다.[6]

2.2 On-line 부하모델링 알고리즘

부하모델의 파라미터를 실시간으로 산정하기 위해 일정 크기의 데이터 창을 정해 시간에 따라 움직이면서 측정 기반의 부하모델링 작업을 수행한다. Sliding Window 개념을 도입해서 구간마다 파라미터 산정을 해나간다면 순간의 부하특성을 반영하는 파라미터의 변화를 볼 수 있다.

PSS/E 와 같은 상용 전력계통 해석프로그램에서 주로 사용하는 부하모델은 ZIP 모델, Exponential 모델, PSS/E Static load model이다. 이와 같은 정적부하모델은 유효전력과 무효전력의 양을 전압에 대한 함수로 표현하여 모의에 반영한다. 하지만, 대부분의 상용 계통 해석프로그램에서 모든 전압 수준에서 부하가 소비하는 전력이 전압과의 관계식을 따르지는 않는다. 대부분 전압 0.7 [pu]나 일정수준의 지정된 전압 이상의 부하수준에서는 수식을 만족하지만, 그 이하에서는 정부하 모델이나 전혀 다른 수식으로 표현된다. Digital Simulator 인 Hypersim의 dynamic load model의 경우 다음과 부하수준에 따라 다르게 표현된다.

본 논문에서는 상용 계통해석프로그램 엔진을 파라미터 산정하는 알고리즘에 포함시키기가 쉽지 않기 때문에 Decentralized formulation을 사용한다. 따라서 0.7 [pu] 이하의 전압수준에서는 우리가 의도한 부하특성 식에 의해서 특성이 결정되지 않음을 고려해야 한다. decentralized formulation을 사용하므로 0.7 [pu] 이상의 전압수준의 데이터만을 가지고 부하모델의 파라미터를 산정하는 방법을 제안한다.

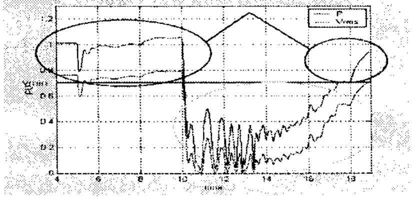


그림 2 입력데이터의 구분

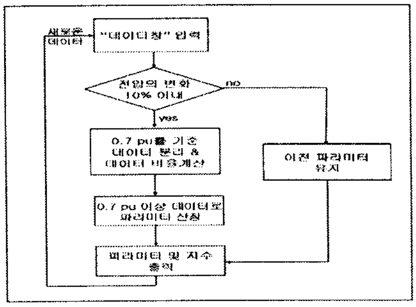


그림 3 제안된 On-line 부하모델링 알고리즘

2.3 3기 10모선 계통에 대한 사례연구

본 논문은 측정기반의 부하모델링 방법을 이용하여 3기 10모선 계통에 대하여 적용하여 보았다. 순시치 환경에서 실제와 유사한 모의환경을 제공하는 Hypersim을 이용하여 데이터를 취득하여 정적 부하모델에 대한 파라미터를 산정해 보았다. 모의환경은 아래와 같다.

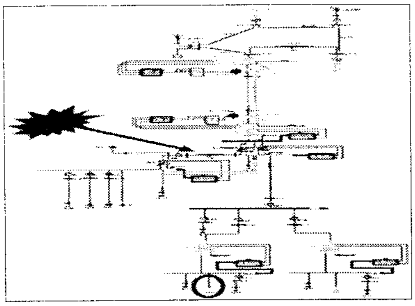


그림 4 변전소 환경이 추가된 3기 10모선 계통

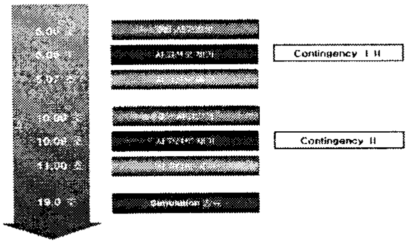


그림 5 사고 시나리오

2.3.2 정적 부하모델의 파라미터 산정

주어진 계통에 사고 시나리오를 바탕으로 사고를 주어서 계통의 변화를 만든다. 모의에 사용되는 부하모델은 Hypersim에서 제공되는 dynamic load model을 사용한다. 우선 파라미터 산정을 위한 측정기반 부하모델링 기법을 검증하기 위해 Hypersim 측정 데이터를 토대로 부하모델의 파라미터를 찾아본다.

정적 부하모델 중 Exponential model에 대해 파라미터를 검증해 보았다. Exponential model의 구조는 다음과 같다.

$$P=P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{np} \qquad (2)$$

Exponential model에 대한 파라미터 산정결과는 다음과 같다. 모의결과 기준값(0.7pu) 이상의 획득 데이터만을 가지고 산정한 경우에 참값에 더 가까운 파라미터가 산정되었다.

산정방법	참 값 (Real np value)	초기값 (np0)	산정값 (np)	오차 (Resnorm)
전체 데이터 이용	1	0.5	1.4506	2.6410
	1.5	0.5	1.6937	0.3930
	2	0.5	1.9950	0.0076
0.7[pu] 이상 데이터 이용	1	0.5	1.0000	3.4452×10^{-12}
	1.5	0.5	1.4998	1.2214×10^{-7}
	2	0.5	1.9995	1.7949×10^{-6}

표 1 전체 exponential model에 대한 파라미터 산정결과

※ 오차 (Resnorm) = $\sum_{k=1}^{N}(z_{act}(t_k)-z_{cal}(t_k;p))^2$

2.3.3 On-line 제안된 부하모델링 방법 적용

측정기반의 부하모델링 기법을 이용하여 On-line 정적 부하모델링을 구형해 보았다. 기본적인 개념은 "움직이는 데이터창"(Sliding Window)의 개념을 도입하여 창(Window) 내의 데이터만을 가지고 계속해서 파라미터를 산정해 나간다.

- 시뮬레이터에서 사용된 부하모델 : $P=P_0(\frac{V}{V_0})^{np}$ (np = 1)
- Window 크기 : 2초 (400 Sample)

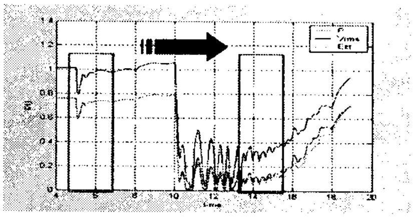
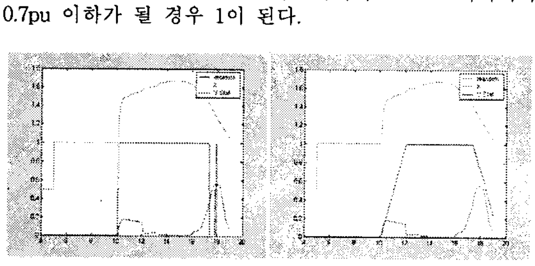


그림 6 전체데이터 고려한 Sliding Window

모의 결과 전압이 기준전압 이상까지는 정확한 np값 1이 산정되었으나, 기준전압 이하부터는 파라미터의 값이 변하고 있고 그 오차도 크게 증가됨을 확인할 수 있다. 시뮬레이터에서는 전압 0.7 pu 이상의 데이터만 의미가 있다고 판단하여 창 내의 데이터 중 전압 0.7 pu 이하의 데이터가 발견되면 이를 알려주는 (a)와 같은 방법과 0.7pu 이상과 이하의 값을 갖는 데이터의 비율을 나타내는 (b)와 같은 방법을 제안한다. 이와 같은 지수를 이용하여 산정된 파라미터의 신뢰도를 판단할 수 있다. 그래프 (a)에서는 창(Window) 내의 0.7pu 이하의 데이터가 들어오기 시작하면 1의 값을 출력하여 경고한다. (b)와 같은 경우 창(Window) 안에 있는 전압 0.7 pu 이하의 데이터의 비율이 높아질수록 커져서 모든 데이터가 0.7pu 이하가 될 경우 1이 된다.



(a) 0.7pu 이하 데이터 유·무 표시 (b) Window내 0.7pu 이하 데이터의 비율표시

그림 7 데이터 취득 신뢰도 지수를 이용한 그래(Exponential model)

0.7 pu 이상의 데이터만 획득하여 파라미터를 산정한 결과는 다음과 같다. 결과 전구간에서 파라미터가 일정하게 출력되었다. 파라미터의 신뢰도를 나타내기 위해 동일한 신뢰도 지수를 사용하였다. 결과는 다음과 같다.

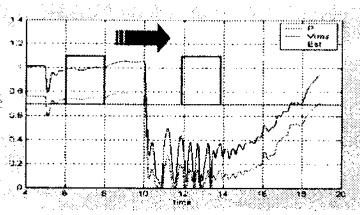
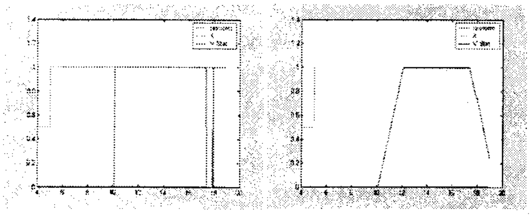


그림 8 0.7pu 이상의 Sliding window와 산정결과



(a) 0.7pu 이하 데이터 유·무 표시 (b) Window내 0.7pu 이하 데이터의 비율표시

그림 9 0.7pu 이상 데이터만을 고려한 Sliding Window

3. 결 론

실시간 부하모델링 방법에 있어서 전체의 데이터를 이용하여 산정하는 경우와 일정 전압수준 이상의 데이터만 이용하여 파라미터를 산정하는 경우에 대해 모의하였다. 전체 데이터를 사용하는 것보다 부분의 데이터만 이용하는 것이 더 깔끔한 결과가 나타났다. 하지만 이때 사용된 데이터의 비율을 나타내는 지수를 사용하여 산정된 파라미터의 신뢰도를 보여줄 수 있다.

앞으로, 본 논문에서 제시한 On-line 정적 부하모델링 알고리듬을 이용하여 실제의 측정데이터를 취득하였을 때 상용 계통해석프로그램에서 사용할 수 있는 여러 가지 정적 부하모델의 파라미터를 산정하는 데 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 On-line 부하모델링에 있어서 동적 부하모델보다 쉽게 계산될 수 있어서 빠른 계산이 필요한 에너지관리시스템에서 간략한 부하모델을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

[1] P.KUNDUR, "Power System Stability and Control", Mc Graw-Hill Professional Publishing, 1994

[2] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation", IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 1, pp.523-538,Feb.1995

[3] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Standard 421. 5 -1992

[4] IEEE Standard Definitions for Excitation Systems and Synchronous Machines, IEEE Standard 421. 1-1986.

[5] 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.

[6] MENG SHEN, "New Framework for Automatic Parameter Estimation of Power System Models", Doctor of philosophy , 2000 December, Washington State University