

실측 데이터를 이용한 일반용부하와 가정용부하의 부하모델 추정방안

박래준*, 권오성*, 송경빈*, 김규호**, 박정욱*, 조종만**, 이성무**
 숭실대학교*, 한양대학교**, 연세대학교†, 전력거래소**

load model estimation method for residential load and nomal load using measured data

Rae-Jun Park*, Oh-Sung Kwon*, K. Song*, Kyu-Ho Kim**, Jung-Wook Park†, Jong-Man Jo**, Sung-Moo Lee**
 Soongsil University*, Hankyong national University**, Yonsei university†, Korea Power Exchange**

Abstract - 전력계통의 부하를 모델링하기 위해서는 부하 모델 구조의 선정과 부하모델 구조의 파라미터를 추정하는 방법이 필요하다. 부하 모델의 구조는 ZIP모델을 사용하고, 부하 모델의 파라미터를 추정하는 방법으로는 Levenberg-Marquardt방법을 사용하여 한국전력공사 변전소 이차 측에서 측정된 실측 데이터를 이용하여 부하를 모델링하였다. 또한 모델링된 부하의 대표파라미터를 선정하고 대표파라미터를 실제 계통에 적용하였을 때의 오차를 분석하였다.

모델 구조를 만들어 낼 수 있기 때문에 실제로 사용할 수 있는 모델 구조는 굉장히 많아진다. 하지만, 모델구조는 일반적인 적용 가능성과 관련이 있기 때문에 모든 조합을 모델구조에 적용 할 수 있는 것은 아니다. 따라서 모델링에 가장 적합한 형태의 모델 구조를 선택하는 것은 부하 모델 구조의 복잡성과 일반적인 적용 가능성을 분석하여 구조를 결정하는 방법이 제시된다.[3]

1. 서 론

전력계통의 안정적인 계획, 운영 및 제어를 위한 전력 조류계산, 과도 안정도해석, 전압안정도 해석 등의 정확성을 향상시키기 위해서는 계통의 구성요소인 부하에 대한 정확한 모델링이 필요하다[1]. 그러나 부하는 다양성, 복잡성, 시변성을 갖고 있기 때문에 부하의 특징을 하나의 형태로 표현하는 부하모델링은 매우 어렵다[2].

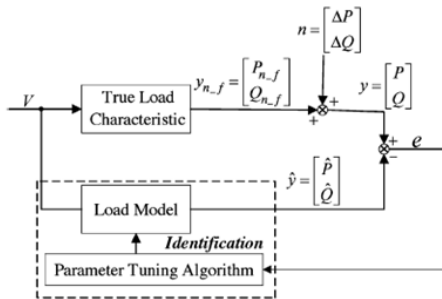
부하모델링 기법으로는 부하 성분기반의 모델링방법과 측정기반의 모델링 방법 및 신경회로망기반의 모델링 방법, 그리고 위의 방법을 2개 이상 이용하여 모델링하는 하이브리드 기반의 모델링방법이 있다. 과거 우리나라에서 연구된 부하모델링의 경우 대부분 부하성분기반의 모델링을 중심으로 연구되어 왔으며, 실제 전력계통에서 취득된 데이터를 이용한 실측기반의 부하모델링에 관련된 연구는 이루어지지 않은 실정이다.

본 논문에서는 한국전력공사 변전소 이차 측에 설치한 DFR에서 취득된 실측 데이터를 기반으로 하여 측정기반의 부하모델링을 수행하고 그 결과를 바탕으로 하여 해당 위치에서의 대표파라미터를 선정하여 최종 부하모델을 예측하였다.

2. 본 론

2.1 실측데이터를 이용한 부하모델 알고리즘

측정기반의 부하모델링 기법은 수식적으로 정의된 부하모델 구조의 파라미터들을 측정된 데이터의 특성을 이용하여 추정함으로써 표현되는 모델이다. 즉, 해당 모선의 집합부하를 대표할 수 있는 모델을 가정한 후, 측정된 전압 변동에 대한 전력 특성을 만족시키는 파라미터를 추정한다. 그 후, 결정된 파라미터가 해당 모선의 부하를 대표하는 부하모델로써 활용된다. 전체적인 실측데이터를 이용하여 부하모델을 수행하는 과정은 다음 <그림 1>과 같다.



<그림1> 측정기반의 부하모델링 과정

2.2 부하모델 구조

부하모델은 부하의 정상상태를 표현하는 정적 부하모델 구조와 부하의 과도상태를 표현하는 동적 부하모델 구조, 정적 부하모델과 동적 부하모델을 함께 사용하는 복합 부하모델 구조로 구분 할 수 있다. 사용자가 원하는 만큼 정적 부하모델과 동적 부하모델을 조합하여 복합 부하

<그림 1>에서 $P_{n,f}$, $Q_{n,f}$ 는 측정노이즈가 포함되지 않은 유효전력, 무효전력이고 여기서 측정오차 ΔP , ΔQ 를 포함하는 P , Q 를 추정한다. 측정기반의 부하모델링은 식 (1)과 같이 측정된 P , Q 와 예측된 \hat{P} , \hat{Q} 사이에 오차가 최소가 되도록 파라미터를 결정한다. 측정된 P , Q 와 예측된 \hat{P} , \hat{Q} 사이의 오차 E 는 측정상의 발생하는 노이즈 오차와 모델 구조에 따라 발생하는 모델 오차로 구분된다. 모델 구조에 따라 발생하는 모델 오차는 식 (1)처럼 모델의 복잡성과 관계가 있는 Bias error와 예측된 모델의 동적응답 특성과 관계되는 Model variance error로 구분할 수 있다.

$$E[(y_{n,f} - \hat{y})^2] = (\text{Bias Error})^2 + (\text{Model Variance Error}) \quad (1)$$

모델의 구조가 복잡할수록 Bias error는 줄어들고, Model variance error는 증가하는 특성을 갖는다. 두 가지 에러를 동시에 감소시키기 위한 방법은 다양한 외란 데이터를 확보하는 것이지만 현실적으로 동일한 부하에 대한 다양한 측정데이터를 확보하는 것은 매우 어렵다. 따라서 적절한 복잡성을 가지는 부하 모델 구조를 선택하는 것은 매우 중요하다[3]. 본 논문에서는 전압의 변동에 따른 유효전력과 무효전력을 표현하는 가장 일반적인 모델 구조인 ZIP 모델 구조를 선택하였다.

2.2.1 ZIP 모델

ZIP 모델은 정전력, 정전류, 정임피던스의 조합에 의해서 표현된 모델로써, 전압의 변동에 따른 유효전력과 무효전력의 응답을 반영한다. ZIP 모델은 전압에 제곱에 비례하는 관계를 가지는 임피던스 모델, 전압에 비례하는 관계를 가지는 전류 모델, 전압에 관계하지 않는 전력 모델의 조합을 통하여 구현되며, Exponential 모델과 같은 다른 정적 부하모델 구조에 비하여 물리적으로 명확한 의미를 가지는 모델이라고 할 수 있다. 따라서 정태 부하모델 구조 중 전력계통의 안정도 해석에 가장 일반적으로 사용되는 모델 구조이며, 수식적 표현은 식 (2)와 같다. 여기서 추정해야 하는 파라미터는 정임피던스 파라미터 p_1 , q_1 , 정전류 파라미터 p_2 , q_2 , 정전력 파라미터 p_3 , q_3 이고 p_3 , q_3 는 독립적으로 추정하지 않아도 식(3)과 같이 서로간의 관계식에 의해 구할 수 있는 종속적인 변수이다.

$$P_{ZIP} = p_1 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0}\right) + p_3 \quad (2)$$

$$Q_{ZIP} = q_1 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0}\right) + q_3$$

$$p_3 = 1 - p_1 - p_2$$

$$q_3 = 1 - q_1 - q_2 \quad (3)$$

2.2.2 파라미터 추정 알고리즘

측정 기반의 부하모델은 앞에서 언급했듯이 측정된 데이터와 모델링된 부하모델의 응답 특성사이의 오차를 최소화하는 모델 구조의 파라미터를 예측하는 과정을 필요로 한다. 따라서 수치 해석적인 최적화 기법을 사용하게 되는데 본 논문에서는 Gauss-Newton 알고리즘과 Gradient

Descent 알고리즘의 중간단계로서 최적화 문제에 주로 사용되는 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용하였다. 알고리즘에 필요한 목적함수의 구성을 위해 먼저 오차는 측정된 유효전력, 무효전력과 추정된 파라미터에 의해 계산된 유효전력, 무효전력과의 차를 이용하여 절대 퍼센트 평균 오차(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)로 식(4)와 같이 표현하였으며, 목적함수는 이 두 개의 값의 실효값(Root Mean Square, RMS)을 최소로 하도록 식(5)처럼 나타내었다.

$$P_{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_{meas} - P_{esti}}{P_{meas}} \right| \quad (4)$$

$$Q_{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{meas} - Q_{esti}}{Q_{meas}} \right|$$

$$RMS = \text{Min} \sqrt{\frac{P_{MAPE}^2 + Q_{MAPE}^2}{2}} \quad (5)$$

여기서, P_{meas} , Q_{meas} 는 측정된 유효, 무효전력이며, P_{esti} , Q_{esti} 는 계산된 유효, 무효전력이다.

또한 파라미터가 터무니없는 값으로 추정되는 것을 막고, 전력계통 안정도 해석에 용이하게 사용할 수 있도록 추정되는 파라미터 값이 0~1사이의 값을 갖도록 제약 조건을 주었다.

2.3 사례연구

본 사례연구에서는 국내 A변전소의 154/22.9kV 이차 측에 동적 고장 기록 장비인 DFR을 설치하여 전압, 전류의 순시치가 특정 조건으로 설정된 Trigger Setting값을 만족할 때의 전, 후 10초간의 데이터를 64[Sample/Cycle]로 취득하여 부하모델링에 사용하였다. 본 사례연구에서는 154/22.9kV 이차 측 c상 전압이 101% Over Trigger했을 때의 데이터를 사용하였으며, 데이터 취득 기간 중 c상 전압의 변동성이 가장 큰 데이터 5개를 선정하여 부하모델 구조의 파라미터를 제안한 알고리즘에 의하여 추정하였다.

제안한 알고리즘을 사용하여 각각의 사례에서 154/22.9kV 이차 측에 연결되어 있는 A D/L의 부하특성을 표현하는 부하모델 파라미터를 구하여 <표 1>에 정리 하였다. 또한, 부하모델에 의하여 계산된 출력값과 실제 측정값 사이의 MAPE 오차는 <표 2>와 같다. 구해진 각 사례별 A D/L의 부하모델 파라미터의 평균값을 이용하여 A D/L의 부하특성을 표현하는 대표파라미터는 다음 <표 3>과 같다.

<표 1> 각각의 Case에 대한 A D/L의 부하모델 파라미터

사례 1	p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
	0.0797	0.8397	0.0805	0.6419	0.2942	0.0640
사례 2	p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
	0.0797	0.8403	0.0800	0.7174	0.0000	0.2826
사례 3	p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
	0.0825	0.8432	0.0743	0.5090	0.0258	0.4652
사례 4	p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
	0.0801	0.8403	0.0796	0.6517	0.3094	0.0389
사례 5	p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
	0.0797	0.8398	0.0805	0.5090	0.0258	0.4652

<표 2> 5개의 Case에 대한 파라미터 추정 결과

초기값	MAPE_P	MAPE_Q	RMS
사례 1	0.0002%	0.5762%	0.4074%
사례 2	0.0001%	0.5478%	0.3873%
사례 3	0.0031%	2.4500%	1.7324%
사례 4	0.0002%	0.4828%	0.3414%
사례 5	0.0004%	2.5968%	1.8362%
평균오차	0.0008%	1.3307%	0.9410%

<표 3> 5개의 Case에 대한 대표 파라미터

대표	p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
	0.0804	0.8407	0.0790	0.6058	0.1310	0.2632

<표 3>에서 구해진 대표파라미터가 A D/L의 부하특성을 대표

한다면 대표파라미터를 추정하기 위하여 사용된 5개의 측정 Case이외의 다른 Case에서의 부하응답도 잘 표현하여야 한다. 따라서 앞서 사용한 측정 데이터 이외의 b상 전압의 변동에 의해 측정된 데이터 등 다른 위치에서 전압, 전류의 변동에 의해 측정된 10개의 데이터를 이용하여 A D/L의 부하특성을 잘 표현하는지 확인해 보았다. 각 Case의 전압을 입력으로 하여 식(2)에 적용하였을 때의 계산된 출력값과 실제 측정된 출력값을 비교하여 확인해 보았다. 각 사례별 오차는 다음 <표 4>와 같다.

<표 4> 대표 파라미터를 사용한 결과에 대한 오차 비교

초기값	MAPE_P	MAPE_Q	RMS
사례 1	0.1220%	14.0655%	9.9462%
사례 2	0.0102%	0.5776%	0.4085%
사례 3	0.0104%	0.5497%	0.3888%
사례 4	0.0117%	2.3501%	1.6618%
사례 5	0.0096%	0.5606%	0.3965%
사례 6	0.0104%	6.2259%	4.4024%
사례 7	0.0105%	2.5563%	1.8076%
사례 8	0.0113%	0.7606%	0.5379%
사례 9	3.3310%	40.6332%	28.8284%
사례 10	0.0103%	0.5940%	0.4201%
평균 오차	0.3537%	6.8874%	4.8798%

대표파라미터를 적용하여 추정된 부하모델로부터 계산된 유효전력값과 실제 측정된 유효전력값 사이의 유효전력의 평균 오차는 0.3537%로 나타나 유효전력의 경우 부하의 특성을 잘 표현하는 부하모델을 선정할 수 있었다. 무효 전력의 경우 평균오차가 6.8874%로 상대적으로 크게 나타났다. 결론적으로 사례연구에서 도출된 대표파라미터는 다른 사고에 대하여 총 RMS오차가 4.8798%로 154/22.9kV 이차 측의 A D/L의 부하특성을 비교적 잘 표현하고 있다고 생각된다.

3. 결 론

제안된 부하모델링 방법을 이용하여 한국전력공사 변전소 이차 측에서 측정된 5개의 측정 데이터를 이용하여 부하모델링을 수행하고, 154/22.9kV 이차 측의 A D/L에 대한 부하의 대표파라미터를 선정하였다. 또한, 구해진 대표파라미터를 이용하여 실제 취득 데이터에 적용하여 추정된 부하모델 구조에 실제 전압데이터를 입력으로 하였을 때의 계산된 출력값과 실제 측정된 출력값 사이의 오차를 분석하였다.

부하는 시간에 따라 변하는 값이기 때문에 특정 시간에서 부하의 특성을 표현하는 파라미터는 계속 변하게 된다. 따라서 보다 정확한 부하모델을 수립하기 위해서는 향후 더 많은 데이터를 취득하여 부하모델링에 사용해야 한다면 향후 전력계통의 안정도 해석과 계통의 운용 및 계획에 필요한 부하모델 수립 시 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력거래소 과제 전력계통 안정도 해석 정확도 향상을 위한 부하모델 재구축 연구의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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, pp.1302-1313, Aug. 1995.
- [2] P. KUNDUR, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Professional Publishing, 1994
- [3] He Renmu, Ma Jin, and Davod J. Hill, "Composite Load Modeling via Measurement Approach," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, No. 2, pp. 663-671, MAY. 2006.