

## DFR 측정 기반 산업단지 부하모델링 구현 연구

손서은\*, 이수형\*, 박정욱\*, 송경빈\*\*, 이성무\*\*\*, 조종만\*\*\*  
연세대학교\*, 송실대학교\*\*, 한국전력거래소\*\*\*

### A Study on Load Modeling of Industrial Area Based on DFR measurements

SeoEun Son\*, Soo-Hyung LEE\*, Jung-Wook Park\*, Kyung-Bin Song\*\*, Sung-Moo Lee\*\*\*, Jong-Man Jo\*\*\*  
Yonsei University\*, Soongsil University\*\*, Korea Power Exchange\*\*\*

**Abstract** - 본 논문은 DFR 측정기반 산업단지 부하모델링에 관한 연구이다. 기존 국내에서 사용되고 있는 개별 부하모델의 단점을 보완하고 국내 산업단지 부하의 특성을 정확하게 파악하기 위하여 측정기반 접근법에 의한 부하모델을 선정하였다. 선정된 부하모델은 정적 부하모델과 동적 부하모델을 결합한 복합 부하모델로, 이러한 부하모델을 구축하기 위하여 국내 산업단지 A 변전소에 고장기록계(DFR)를 설치하였다. DFR 측정 데이터 기반 부하모델 구축에 앞서, 계통 해석 프로그램인 PSS/E로 DFR이 설치된 A 변전소를 모델링하여 취득된 데이터로 선정된 부하모델을 검증하였다.

#### 1. 서 론

세계적으로 분산전원 및 스마트 그리드에 대한 관심이 늘어남에 따라 국내에서도 최근 양방향 통신, 스마트 계측, 수요 응답 시스템 기술들을 기반으로 소비지역의 수요정보 수집을 통해 수요자의 능동적인 시장참여를 유도하는 스마트 그리드에 대한 신성장 동력 산업 차원의 정책적, 경제적 지원이 늘어나고 있다. 이에 따라, 스마트 그리드 구축을 위해서는 전체 계통의 효과적인 분석이 필수적인 과제이다.

실제 계통에서 안정도 해석을 하는데 가장 큰 변수는 시변성의 특성을 가지는 부하이다. 단순히 고정된 소비 전력을 기반으로 부하를 표현하여 해석하게 되면, 사고로 인한 전압 강하 같은 조건 변화 시에 계통 전체의 전력 흐름을 정확히 분석하기 어렵게 된다. 현재 국내에서 계통 해석에 사용되는 부하모델은 10년 전에 개발한 모델로써, 시간이 지나 부하가 변함에 따라 계통 해석 측면에서 정확도가 낮아지는 문제점이 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 필요할 시점의 측정된 자료를 바탕으로 파라미터 최적화를 통해 부하 모델을 정하는 방법을 제안한다.

측정 기반 모델링 기법은 정태 부하모델링과 동태 부하 모델링으로 분류할 수 있는데, 정태 부하 모델링은 간단하지만, 저전압 상태에서의 부하 특성이 제대로 반영되는 못하는 단점이 존재한다. 또한 상대적으로 전동기가 부하 중의 많은 비율을 차지하는 산업단지의 경우, 정태 부하 모델로는 산업단지 부하의 동적 특성을 파악 할 수 없다. 그리하여 본 연구에서는 정태 부하모델과 동태 부하모델을 결합한 복합 부하모델이 산업단지 부하 모델링에 적합하다고 판단하였다. 특히, 현재 활발히 연구되고 있는 복합 부하모델 중 정태 부하모델인 ZIP 모델과 동태 부하모델인 유도전동기 모델을 병렬 결합한 형태[1]를 선정하였다.

본 연구에서는 측정 기반 부하모델 구현을 위해 산업단지 A 변전소에 고장기록계(DFR)를 설치하였다. DFR로부터 취득된 전압, 전류를 바탕으로 산업단지 A 변전소의 부하모델을 구현할 것이다. 실제 측정데이터 기반 부하모델링에 앞서 결정된 부하모델을 검증하기 위해서 계통해석 프로그램인 PSS/E를 통해 산업단지 A 변전소를 모의하여 동적 시뮬레이션을 수행하여 데이터를 취득하였다. PSS/E 시뮬레이션 데이터를 바탕으로 파라미터 최적화를 통해 산업단지 A 변전소의 복합 부하모델을 구축하였다.

#### 2. 측정기반 산업단지 부하모델 구현

##### 2.1 고장기록계(DFR) 설치

고장기록계는 전력계통에서 발생하는 각종 고장 정보를 자동적으로 취득하여 분석하는 장비로써 측정 기반 부하모델링에서 필요한 데이터 취득에 적합한 기록 장치이다. 산업단지 A 변전소에 설치된 DFR은 프로컴의 PSDM-Ts 모델로, 16개의 아날로그 입력채널을 가진 장비이고, 설치된 모습은 그림 1과 같다. 설치된 고장기록계는 16채널을 저장할 수 있으며, 감시 샘플링 주파수는 한 주기 당 128샘플이고, 저장 공간 등을 고려하여 한주기당 64샘플을 저장한다. 고장을 DFR이 감지하면, 고장 전 10주기와 고장 후 100주기를 저장하게 된다. 16개의 아날로그 채널에 기록되는 데이터는 <표 1>과 같다.



<그림 1> 고장기록계 설치

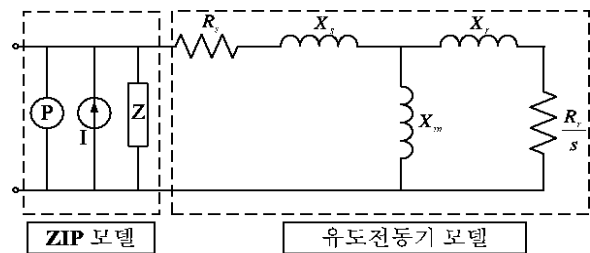
<표 1> 고장기록계 채널 사용

채널 번호	데이터	트리거 조건	
		Under [%]	Over [%]
1,2,3	154kV 송전선로 전압(3상)	99	101
4	22.9kV 배전선로 a상 전압	99	101
5,6,7	송전선로 1 전류(3상)	해당 없음	110
8,9,10	송전선로 2 전류(3상)		
11,12,13	배전선로 1 전류(3상)		
14,15,16	배전선로 2 전류(3상)		

배전선로의 부하의 전류를 측정할 때는 변압기의 영향을 최소화 하고 수용가에 근접하게 측정하기 위하여 변압기 2차 측에서 측정하게 된다. 설정된 트리거 조건에 의하여 전압 변동이 감지되면 전압과 전류의 순시치를 설정된 저장 주기만큼 연결된 컴퓨터에 데이터를 저장한다. 고장 기록계 데이터에 기반 한 부하모델을 구축하는데 앞서, 본 논문에서는 고장 기록계가 설치된 부하 중 산업용 부하의 비율이 높은 154kV 송전선로와 연결된 부하를 모델링하여 선정된 부하모델을 검증할 것이다.

##### 2.2 측정기반 부하모델 구현

앞에서도 언급했듯이, 복합 부하 모델은 정태 부하모델인 ZIP 모델과 동태 부하 모델인 유도전동기 모델로 구성된다. 선정된 복합 부하 모델의 구조는 <그림 2>와 같다.

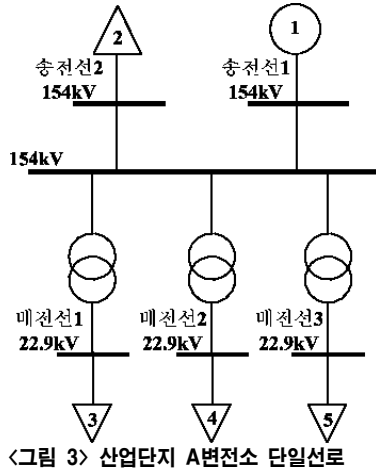


<그림 2> 복합 부하모델 구조

<그림 2>에서 ZIP 모델 정전력, 정전류, 정임피던스 모델로 구성되고 전압의 변동에 따른 유효전력과 무효전력의 변동을 반영한다. 유도전동기 모델은 전압의 크기 및 위상 변화에 따른 유효전력과 무효전력의 변동을 반영한다.  $R_s$ 와  $X_s$ 는 각각 고정자의 저항과 누설 리액턴스를 의미하고,  $R_r$ 과  $X_r$ 는 각각 회전자 저항과 누설 리액턴스를 의미한다.  $X_m$ 은 자화 리액턴스이고,  $s$ 는 전동기의 속도가 동기속도보다 느린 정도를 나타내는 슬립이다. ZIP 모델과 유도전동기 모델의 수학적 표현은 [2]에서 확인할 수 있다. 그리하여 복합 부하모델에서 추정되는 파라미터는  $[R_s X_s R_r c X_m H a_p \beta_p a_Q \beta_Q P_Z P_I P_P Q_Z Q_I Q_Q]$ 이다.

### 2.2.1 PSS/E 시뮬레이션을 통한 검증

선정된 복합 부하모델을 검증하기 위해 <그림 3>과 같이 산업단지 A 변전소를 모의하여 PSS/E 시뮬레이션을 수행하였다.



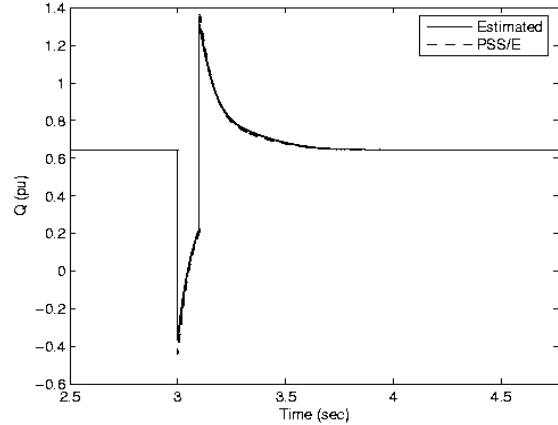
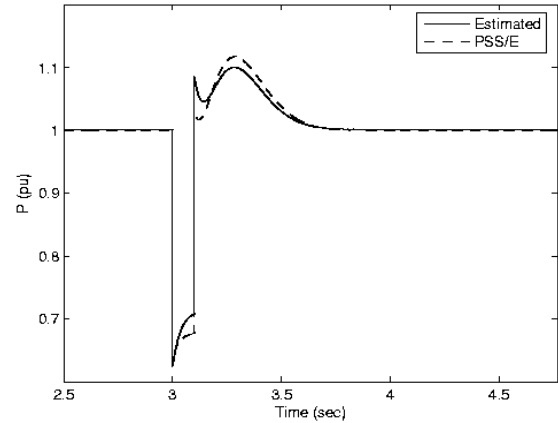
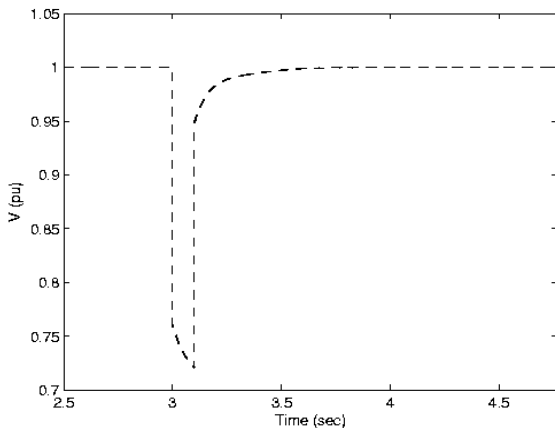
<그림 3> 산업단지 A 변전소 단일선로

<그림 3>에서 각 변압기 2차 측의 부하들은 하나의 부하로 종합하여 모델링하였고, 본 논문에서는 2번 버스의 부하모델링을 수행 하였다. 이를 위해 PSS/E 동적 시뮬레이션을 수행할 때 2번 모선에 유도전동기 부하를 추가하고, 3번 버스에서 0.1초 동안 3상 단락사고를 모의하여 2번 버스의 전압, 유효전력, 무효전력 변동 데이터를 취득하였다. 이 데이터를 바탕으로 Levenberg-Marquadt 알고리즘[3]을 이용하여 부하모델의 파라미터를 추정하였는데, 그 결과는 <표 2>와 같다.

<표 2> 부하모델 파라미터 추정 결과

$R_s$	$R_r$	$X_s$	$X_r$	$X_m$	$H$	$a_p$	$\beta_p$
0.032	0.001	0.214	0.023	2.241	7.106	0.684	0.316
$a_Q$	$\beta_Q$	$P_Z$	$P_I$	$P_P$	$Q_Z$	$Q_I$	$Q_Q$
0.937	0.063	0.324	0.324	0.352	0.432	0.368	0.200

<그림 4>는 추정된 부하모델의 결과를 PSS/E 데이터로 비교한 그래프이다. 실선이 추정된 복합 부하모델이고 점선 그래프가 PSS/E 데이터이다. <그림 4>에서 보듯이, 선정된 복합 부하모델이 유효전력과 무효전력 모두 PSS/E 시뮬레이션 결과를 잘 반영해 주는 것을 확인할 수 있다. 파라미터 추정 결과와 PSS/E 시뮬레이션 결과 값의 기하평균차이는 유효전력이 0.8%, 무효전력이 1%로 아주 작은 값을 가진다.



<그림 4> 부하모델링 결과와 PSS/E 결과 비교

위의 결과로 부터, ZIP모델과 유도전동기 모델을 결합한 복합 부하모델이 모의된 산업단지 A 변전소의 부하의 특성을 잘 반영하는 것을 확인하여 복합 부하모델의 효용성을 검증하였다.

### 3. 결 론

본 논문은 DFR 측정 데이터 기반 산업단지 부하모델 구현에 관한 연구이다. 측정기반 부하모델을 구축하기 위하여 국내 산업단지 A 변전소에 DFR을 설치하여 전압변동 시 전압과 전류 데이터를 저장한다. 산업단지 부하모델은 정태 부하모델과 동태 부하모델을 결합한 복합 부하모델로 선정하였다. DFR 데이터로 부하모델을 구축하는데 앞서, 선정된 부하모델의 효용성을 검증하기 위해, PSS/E로 A 변전소를 모의하여 시뮬레이션 데이터를 취득해 복합 부하모델 구현하였다. 그 결과 선정된 모델이 모의된 A 변전소의 산업용 부하의 특성을 잘 반영하였고, 차후 취득된 DFR 데이터로 실제 산업단지 A 변전소의 부하를 정확히 모델링 할 수 있을 것으로 판단된다.

### [감사의 글]

본 연구는 한국전력거래소 과제 전력계통 안정도 해석을 위한 부하모델 재구축의 지원으로 수행되었습니다.

### [참고 문헌]

[1] Byoung-Kon Choi, Hsiao-Dong, Yinhong Li, Hua Li, Yung-Tien Chen, Der-Hua Huang, and Mark G.Lauby, "Measurement-Based-Dynamic Load Models: Derivation, Comparison, and Validation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.21, No.3, pp 1276-1283, August 2006  
 [2] He Renmu, Ma Jin, David J.Hill, "Composite Load Modeling via Measurement Approach," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.21, No.2, pp 663-671, May 2006.  
 [3] Jorge Nocedal, Stephen J. Wright. Numerical Optimization, Springer, pp. 258-261, 2006