

## A Study On Measurement-based Load Modeling Using PSCAD/EMTDC

이 경 상\* · 박 래 준\*\* · 송 경 빈†

(Kyung-Sang Lee · Rae-Jun Park · Kyung-Bin Song)

**Abstract** - To supply electrical power with high quality, the power system must be optimized in many ways such as planning, control and management. In order to optimize the power system, the analysis of the power system is necessary. The elements of the power system require an accurate model to analysis of the power system. The components of the power systems such as generators, transformers and transmission lines have been studied and researched a lot in their modeling and very sophisticated models have been proposed. However, in case of load in-depth studies on the exact model are required. In this paper, measurement-based load modeling method using real-time measured data is proposed in various methods to reflect the characteristics of the load. To prove the validity of the proposed method, PSCAD/EMTDC program is used to configure the power system and measurement data according to the various failures are used to study on load modeling.

**Key Words** : Measurement-based Load modeling, ZIP-model, Induction motor-model, PSCAD/EMTDC

## 1. 서 론

산업 및 경제의 발전과 더불어 국민의 생활 및 문화 향상으로 전력 수요가 증가하고 있다. 1980년 통계에 5,457MW이었던 국내의 최대전력수요가 2000년 하계에는 41,007MW 그리고 2010년 하계에는 69,886MW, 동계에는 71,308MW, 2011년 동계인 1월 17일에 73,137MW로 최대전력수요를 갱신하였다. 이와 같은 전력 수요의 증가에는 여름의 냉방부하뿐만 아니라 겨울의 난방부하가 크게 영향을 미치고 있다. 전력 수요의 증가와 함께 반도체, 전력전자 스위칭 기기, 유도전동기 등 다양한 동적특성을 가진 기기들이 늘고 있어 전력 부하특성은 더욱더 복잡해지고 있다.

전력계통의 계획, 운용 및 제어를 위해서는 발전설비, 송·변전설비, 배전설비 그리고 부하설비에 대해 분석하고 연구하여야 한다. 발전설비나 송·변전설비, 배전설비에 대한 모델은 이미 많은 연구를 통하여 기본적인 모델부터 고차 미분방정식으로 표현한 정교한 모델까지 제시되었다[1]. 정밀한 발전기, 변압기, 송전선로의 모델의 개발에도 불구하고 정확한 동적 전력계통 해석이 어려운 이유는 부하특성을 반영한 정확한 부하모델이 제시되지 못했기 때문이다[2]. 따라서 정확한 동적 전력계통 해석을 위해서는 정교한 부하모델링이 중요하다. 그러나 현재까지 충분한 연구가 진행되지 않았으며, 다양하고 복잡한 부하 특성 때문에 정확한 부하모

델의 구현에 어려움이 있다[3]. 정밀한 부하모델은 기존의 발전, 송전, 변전, 배전설비 모델들과 함께 동적인 전력계통 해석에 사용되어 계통의 계획 및 운용의 신뢰도를 개선할 것이다.

부하모델은 부하의 정상상태의 정적특성을 나타내는 정적 부하모델과 외란 발생으로 인한 과도 상태를 잘 표현하는 동적 부하모델이 있으며, 이 두 모델을 결합한 복합 부하모델로 구분할 수 있다. 정적 부하모델로는 부하를 정전력, 정전류, 정임피던스로 나타내는 ZIP 모델, 전력과 전압이 지수적인 관계에 있음을 나타내는 Exponential 모델, 상용프로그램인 PSS/E에서 조류계산에 사용되는 PSS/E 모델 등이 있다. 동적 부하모델에는 크게 비선형특성을 나타내는 비선형 모델과, 부하의 과도특성이 유도전동기의 특성으로부터 영감을 받은 점을 고려한 유도전동기 모델 등이 있다. 복합 부하모델은 정적 부하모델인 ZIP 모델이나 Exponential 모델과 유도전동기 모델을 결합한 ZIP-유도전동기 모델, Exponential-유도전동기 모델 등이 있다.

부하모델링은 위에서 언급한 부하모델을 이용한 측정기반의 모델링 방법 이외에, 부하성분비에 근거한 부하성분기반의 모델링 방법, 개별부하에 신경회로망회로를 접속한 뒤 특성을 학습시켜 모델링하는 신경회로망(artificial neural network; ANN)기반의 모델링 방법, 그리고 위의 방법을 2개 이상 이용하여 모델링하는 하이브리드(Hybrid)기반의 모델링 방법으로 나눌 수 있다. 시시각각 변화하는 부하에 대해 정밀하게 표현하기 위해서는 측정기반의 부하모델링 방법이 부하성분기반의 모델링 방법이나 신경회로망 기반의 모델링 방법에 비해 정확성 측면이나 모델의 물리적 의미를 제시해야 한다는 측면에서 더욱 적합하다.

제한한 측정 기반의 부하모델링을 위해서는 개별의 부하

\* 정 회 원 : 숭실대학교 전기공학부 석사

\*\* 정 회 원 : 숭실대학교 전기공학부 석사 과정

† 교신저자, 종신회원 : 숭실대학교 전기공학부 부교수, 공박

E-mail : kbsong@ssu.ac.kr

접수일자 : 2011년 3월 3일

최종완료 : 2011년 5월 6일

모선에 측정기기를 설치해야 하기 때문에 데이터 취득 설치 비용이 발생된다. 또한 모든 시스템 부하에 대해 동시에 계측이 되어야 하기 때문에 시간동기와 같은 문제가 발생할 수 있다. 설령 많은 비용과 동기문제를 해결하더라도 계절과 부하의 종류에 따른 경우의 수를 고려하여 부하의 변화에 따라 반복적으로 측정해야하므로 현실적 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 측정기반의 모델링 방법을 수행하기 위하여 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 측정된 데이터를 실측데이터라 가정하고 최적화 기법을 이용하여 파라미터 추정하였다. 실제 변전소의 22.9kV 모선에서부터 부하까지의 배전계통을 구현하고 다양한 사고에 따른 데이터를 측정하여 오차를 최소화 하는 개선된 부하모델의 파라미터를 추정하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 복합 부하모델

복합 부하모델은 정적 부하모델인 ZIP 모델과 동적 부하모델인 유도전동기를 결합하여 구성하였다. ZIP-유도전동기 모델은 부하의 특성 중에서 정적특성과 동적특성을 각 모델의 비율을 이용해 표현 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 ZIP-유도전동기 모델의 출력은 ZIP 모델의 출력인 식(1)~(2)과 식(3)~(7)를 이용한 3차 유도전동기 출력[4]인 식(8)~(9)을 결합한 형태로 다음과 같이 식(10)~(11)로 표시된다.

$$P_{ZIP} = P_0 [p_1 V^2 + p_2 V + p_3] \quad (1)$$

$$Q_{ZIP} = Q_0 [q_1 V^2 + q_2 V + q_3] \quad (2)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{R_s^2 + X_s'^2} [R_s (v_{ds} - v'_{ds}) + X_s' (v_{qs} - v'_{qs})] \quad (3)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{R_s^2 + X_s'^2} [R_s (v_{qs} - v'_{qs}) + X_s' (v_{ds} - v'_{ds})] \quad (4)$$

$$\frac{dv'_d}{dt} = -\frac{1}{T_0'} [v'_d - (X_{ss} - X_s')i_{qs}] + s\omega_r v'_q \quad (5)$$

$$\frac{dv'_q}{dt} = -\frac{1}{T_0'} [v'_q - (X_{ss} - X_s')i_{ds}] + s\omega_r v'_d \quad (6)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} [(v'_d i_{ds} + v'_q i_{qs}) - T_0' \omega_r^2] \quad (7)$$

$$P_{IM} = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (8)$$

$$Q_{IM} = v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds} \quad (9)$$

$$P_{ZIP-IM} = \alpha_P P_{ZIP} + \beta_P P_{IM} = \alpha_P [p_1 V^2 + p_2 V + p_3] + \beta_P (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad (10)$$

$$Q_{ZIP-IM} = \alpha_Q Q_{ZIP} + \beta_Q Q_{IM} = \alpha_Q [q_1 V^2 + q_2 V + q_3] + \beta_Q (v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds}) \quad (11)$$

여기서,  $p_1, q_1$ :정임피던스부,  $p_2, q_2$ :정전류부,  $p_3, q_3$ :정전력부,  $R_s$ :고정자 임피던스,  $R_r$ :회전자 임피던스,  $X_s$ :고정자 리액턴스,  $X_r$ :회전자 리액턴스,  $X_m$ :계자 리액턴스,  $s$ :회전자 슬립,  $v_{ds}, v_{qs}$ :DQ 변환된 고정자 전압,  $\omega_r$ :회전자 각속도,  $X_s'$ :과도리액턴스( $X_s' = X_{ss} - \frac{X_m^2}{X_m + X_r}$ ,  $X_{ss} = X_s + X_m$ ),  $T_0'$ :과도개

방회로 시정수( $T_0' = \frac{X_r + X_m}{R_r}$ ),  $H$ :관성계수,  $T_0$ :기준 토크( $T_0 = 1$ ),  $\alpha_P$ :ZIP 모델의 유효전력비율,  $\alpha_Q$ :ZIP 모델의 무효전력비율,  $\beta_P$ :유도전동기 모델의 유효전력비율,  $\beta_Q$ :유도전동기 모델의 유효전력비율

따라서 복합 부하모델은 그림 1처럼 입력전압 V에 대해 계산되는 ZIP 모델의 전력과 DQ변환 과정을 거쳐 입력되는 전압과 전류에 의해 계산되는 유도전동기의 전력의 결합으로 이루어진다.

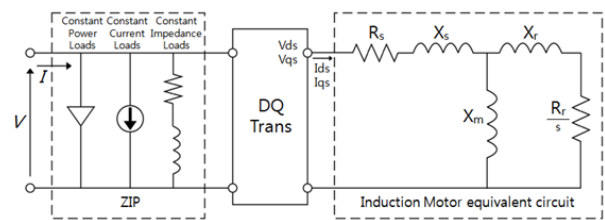


그림 1 ZIP-유도전동기 모델의 구조

Fig. 1 A schematic of ZIP-Induction motor model

복합 부하모델에서 추정해야 하는 파라미터는 ZIP 모델의  $p_1, q_1, p_2, q_2, p_3, q_3$ 이고, 유도전동기 모델의  $R_s, R_r, X_s, X_r, X_m, H$ 이며, 복합 부하모델에서  $\alpha_P, \alpha_Q, \beta_P, \beta_Q$ 이다. 이들 파라미터 간에는 독립적으로 추정하지 않아도 서로간의 관계식에 의해 구할 수 있는 종속적인 변수들이 있다.  $p_1 + p_2 + p_3 = 1, q_1 + q_2 + q_3 = 1, \alpha + \beta = 1$ 의 관계로부터  $p_3 = 1 - p_1 - p_2, q_3 = 1 - q_1 - q_2, \beta_P = 1 - \alpha_P, \beta_Q = 1 - \alpha_Q$ 로 구할 수 있다. 따라서 최종적으로 추정되는 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 ZIP-유도전동기 모델 파라미터

Table 1 Parameter of ZIP-Induction motor model

ZIP 모델	IM 모델
$\alpha_P, \alpha_Q, p_1, q_1, p_2, q_2$	$R_s, R_r, X_s, X_r, X_m, H$

### 2.2 파라미터 추정 알고리즘

비선형적으로 연결되어 있는 복합 부하모델의 파라미터를 구하기 위해서는 최적화 방법을 사용하여야 한다. 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 평균오차(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)로 식(12)~(13)과 같이 표현하였으며, 목적함수는 이 두 개의 값의 실효값(Root Mean Square, RMS)을 최소화 하도록 식(14)처럼 나타내었다.

$$P_{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_{meas} - P_{esti}}{P_{meas}} \right| \quad (12)$$

$$Q_{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{meas} - Q_{esti}}{Q_{meas}} \right| \quad (13)$$

$$RMS = Min \sqrt{\frac{P_{MAPE}^2 + Q_{MAPE}^2}{2}} \quad (14)$$

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

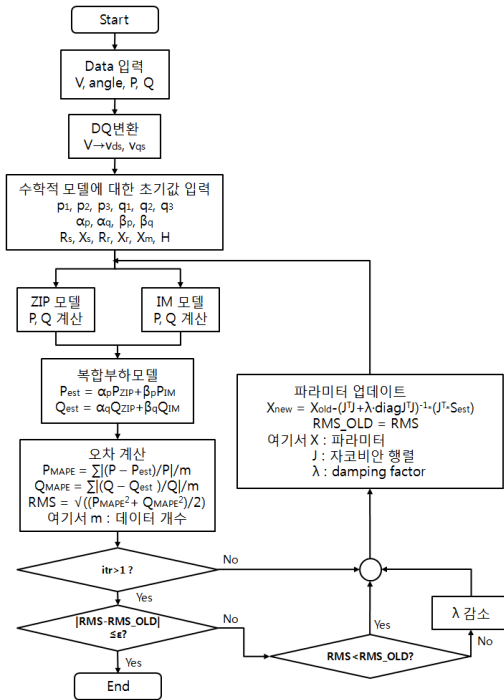


그림 2 파라미터 추정 순서도  
Fig. 2 Parameter estimation algorithm

앞서 언급한 복합 부하모델의 파라미터와 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 이용한 파라미터를 추정하는 순서는 그림 2와 같다. 추정 시 파라미터가 터무니없는 값으로 추정되는 것을 방지하기 위하여 유도전동기 파라미터에 관한 연구[5-7]를 참고하여 표 2와 같이 파라미터 값에 제약을 두었다.

표 2 파라미터 제약  
Table 2 Parameter constraint

최소	파라미터	최대	최소	파라미터	최대
0	$\alpha_p$	1	0	$R_s$	0.5
0	$\alpha_q$	1	0	$R_r$	0.5
0	$p_1$	1	0	$X_s$	0.5
0	$p_2$	1	0	$X_r$	0.5
0	$q_1$	1	0.5	$X_m$	10
0	$q_2$	1	0.1	$H$	10

### 2.3 사례 연구

PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용해 국내 154kV D변전소 #1M.Tr의 배전선로 데이터를 이용하여 배전계통을 구성하였다. 154kV 주변압기에 5개의 배전선로가 연결되어 말단에 부하가 연결되어 있다고 가정하였다. 데이터 취득은 A 배전선로에서 유효전력, 무효전력, 위상각, 전압을 측정하였으며, 사고는 E 배전선로에서 모의하였다. 한국전력에서는 배전선로의 A지점과 B지점, 즉 모선 근단 사고와 말단부하 사고로 구분하여 보호계전기의 세팅값을 정정하고 있으나, 본 논문에서는 부하 측에서 사고가 나는 것으로 가정하여 B 지점에서 사고가 발생한 것으로 모의하였다.

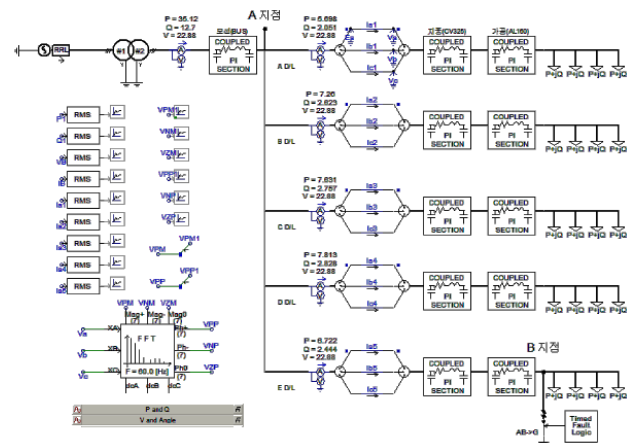


그림 3 PSCAD/EMTDC 모의 배전계통도  
Fig. 3 PSCAD/EMTDC simulation distribution network

측정데이터는 정상시점인 0.15초부터 사고 후 다시 정상상태로 복귀되는 0.45초까지 측정된 자료를 가지고 샘플링 하였다. 샘플링 시간은 3200[Hz]이며, 사고당 약 960개의 데이터를 취득하였다. 다양한 사고를 모의하기 위해 표 3과 같이 사고를 내어 측정하였다. PSCAD/EMTDC 프로그램에서의 3상 정상분 전압과 위상각, 유효전력, 무효전력은 그림 4와 같이 나타난다. 그림 4 사고종류 중 2상 지락사고가 0.05초 지속되었을 때의 그래프이다.

표 3 사고 데이터

Table 3 Fault Data

사고종류	사고시간
1상 지락	0.01[s], 0.05[s], 0.1[s]
2상 지락	0.01[s], 0.05[s], 0.1[s]
3상 지락	0.01[s], 0.05[s], 0.1[s]
2상 단락	0.01[s], 0.05[s], 0.1[s]
3상 단락	0.01[s], 0.05[s], 0.1[s]

파라미터 추정 시 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용할 경우, 수학적 모델의 초기값에 영향을 받게 되며, 16개의 파라미터를 가지기 때문에 많은 국부해가 존재하게 된다. 따라서 단일 파라미터 초기값만으로 파라미터를 추정하게 될 경우, 초기값에 근접한 국부해로 수렴할 수 있어 비스

한 결과를 가지는 파라미터들이 추정될 수 있기 때문에 다양한 조건의 초기값을 이용하여 파라미터를 추정하였다. 초기값은 표 2의 제약조건 내에서 여러 임의의 값을 이용하였다. 추정된 결과 중 사고의 최소오차를 가지는 파라미터와 그 때의 오차율은 표 4에 나타냈다.

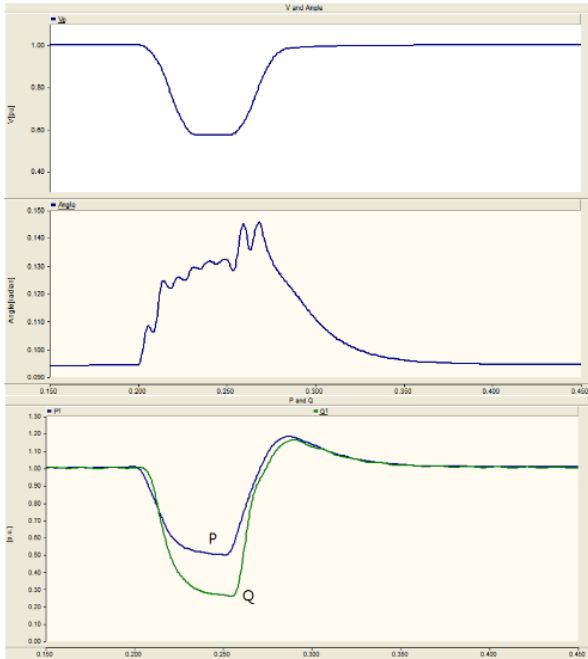


그림 4 2상 지락, 0.05초 지속시 정상분 전압과 위상각, 유효전력과 무효전력  
 Fig. 4 Positive voltage, phase angle, P and Q at 0.05s 2 phase earth fault

표 4 추정된 파라미터 및 오차율  
 Table 4 Estimated parameter and error

파라미터	1선지락			2선지락			3선지락			2선단락			3선단락		
	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1
$\alpha_p$	0.5312	0.4862	0.5243	0.5129	0.6848	0.4632	0.4417	0.6514	0.6318	0.45	0.42	0.5849	0.4301	0.3553	0.5649
$\alpha_q$	1	0.9939	0.9886	1	0.9979	0.9915	1	1	1	0.9961	1	0.4317	0.9966	1	0.4317
$p_1$	0.0838	0.0714	0.0414	0.1118	0.2724	0.195	0.0169	0.2634	0.3001	0.0785	0.2873	0.4001	0.0604	0.1154	0.4001
$p_2$	0.0439	0.053	0.0231	0.1037	0.4142	0.2886	0.0157	0.399	0.3798	0.1239	0.3367	0.6521	0.0847	0.4695	0.6521
$p_3$	0.8722	0.8756	0.9355	0.7845	0.3134	0.5164	0.9675	0.3376	0.3201	0.7976	0.376	-0.0522	0.8549	0.4151	-0.0522
$q_1$	0.4761	0.5003	0.4472	0.4418	0.5297	0.5093	0.4628	0.6651	0.7034	0.3137	0.4444	0.443	0.3106	0.7987	0.4432
$q_2$	0.4852	0.552	0.764	0.4464	0.5936	0.8885	0.8084	0.8259	0.9782	0.5311	0.4942	0.5486	0.5387	0.0206	0.5416
$q_3$	0.0388	-0.0523	-0.2112	0.1119	-0.1232	-0.3977	-0.2711	-0.491	-0.6817	0.1552	0.0613	0.0084	0.1507	0.1807	0.0152
$\beta_p$	0.4688	0.5138	0.4757	0.4871	0.3152	0.5368	0.5583	0.3486	0.3682	0.55	0.58	0.4151	0.5699	0.6447	0.4351
$\beta_q$	0	0.0061	0.0114	0	0.0021	0.0085	0	0	0	0.0039	0	0.5683	0.0034	0	0.5683
$R_s$	0.0511	0.0492	0.0521	0.0509	0.0506	0.0473	0.053	0.0513	0.0536	0.0528	0.0472	0.3821	0.053	0.0967	0.3821
$R_r$	0.0912	0.0893	0.1526	0.091	0.0907	0.1478	0.1535	0.0914	0.1541	0.1533	0.1477	0.49	0.1535	0.0967	0.4901
$X_s$	0.0219	0.0116	0	0.0148	0.0296	0.011	0.0003	0.0247	0.019	0	0.0269	0.091	0.0008	0.06	0.091
$X_r$	0.2789	0.279	0.339	0.2719	0.3326	0.4279	0.3551	0.2936	0.4618	0.3533	0.5	0.5601	0.344	0.468	0.5601
$X_m$	0.6289	0.6394	0.5209	0.6399	0.6278	0.5526	0.519	0.63	0.5	0.5206	0.5	0.5	0.5198	0.9747	0.5
$H$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1116	0.139	0.1	0.1144	0.1	0.1011	0.1017	0.1	0.1053	0.1118	0.1
$P_{MAPE}$	0.33%	0.47%	0.53%	0.59%	0.97%	4.30%	0.46%	0.46%	1.43%	0.65%	3.67%	10.82%	0.65%	3.98%	11.02%
$Q_{MAPE}$	0.80%	1.41%	1.59%	1.06%	4.09%	6.49%	0.98%	3.14%	5.68%	1.62%	7.11%	13.19%	1.76%	8.68%	14.30%
RMS	0.61%	1.05%	1.19%	0.86%	2.98%	5.50%	0.77%	2.24%	4.14%	1.23%	5.66%	12.07%	1.33%	6.75%	12.77%

표 4의 파라미터 중에서  $\alpha_p, \alpha_q, \beta_p, \beta_q$ 의 변화를 그림 5에 나타내었다. 유효전력 비율 파라미터를 나타내는 ZIP 모델  $\alpha_p$ 와 유도전동기  $\beta_p$ 는 대부분의 상황에서 ZIP 모델의 비율과 유도전동기의 비율이 적절히 나뉘진 것을 알 수 있다. 무효전력 비율 파라미터를 보면 대부분 ZIP 모델의 비율이 1에 가깝거나 1인 것을 볼 수 있다. 표 4에 나타났지만 무효전력의 오차율이 유효전력의 오차율 보다 높은 것을 알 수 있는데, 무효전력의 오차율이 큰 이유 중 하나로 ZIP 모델의 비율이 높게 추정되어 유도전동기 모델의 비율이 상대적으로 낮아 반영이 덜 되었기 때문인 것으로 추정된다.

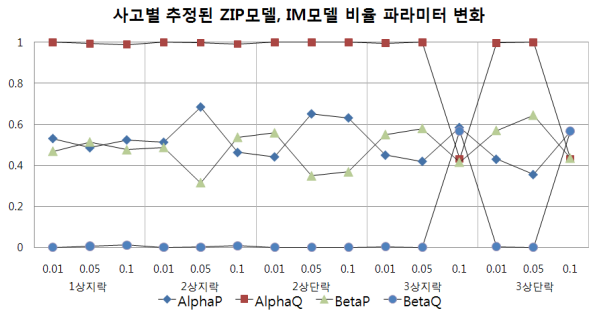


그림 5 파라미터  $\alpha_p, \alpha_q, \beta_p, \beta_q$ 의 변화  
 Fig. 5 Variation of parameter  $\alpha_p, \alpha_q, \beta_p, \beta_q$

그림 6과 7은 ZIP 모델의 파라미터 변화를 나타낸 것으로 유효전력 파라미터의 변화에서 과도상태가 적은 1상 사고나 2상, 3상 사고 0.01초 지속 시에는 정전력요소인  $p_3$ 의 비율이 높은 것을 알 수 있다. 과도상태가 큰 2상, 3상 사고일 때는 0.01초 지속된 상황을 제외하고 모두 정임피던스 요소  $p_1$ 과 정전류 요소  $p_2$ 의 비율이 높아진 것으로 보아 과도상

때 시 정임피던스, 정전류 특성이 나타남을 알 수 있다.

무효전력 파라미터의 경우, 일반적으로 무효전력의 변화가 유효전력의 변화에 비해 크기 때문에 정어드미턴스 요소  $q_1$  과 정전류 요소  $q_2$ 의 비율이 높은 것을 볼 수 있다. 또한 무효전력에서도 전력의 변화가 적은 1상, 2상, 3상 사고가 0.01 초 지속될 경우에는 정전력 요소가 다른 경우에 비해 높게 나타나는 것과 0.1초 지속 시에는 정전력요소가 다른 경우에 비해 작음을 확인할 수 있다.

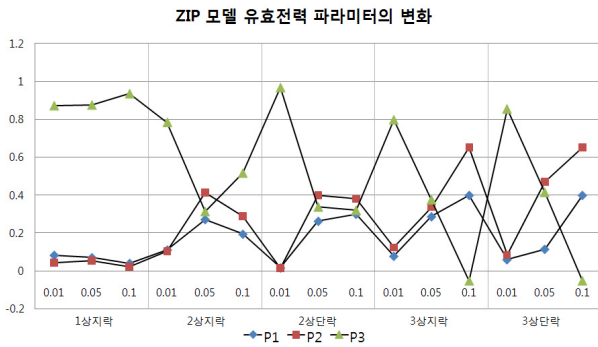


그림 6 ZIP모델 파라미터  $p_1, p_2, p_3$ 의 변화  
Fig. 6 Variation of ZIP model parameter  $p_1, p_2, p_3$

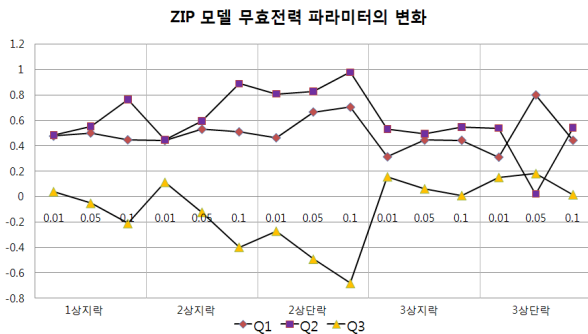


그림 7 ZIP모델 파라미터  $q_1, q_2, q_3$ 의 변화  
Fig. 7 Variation of ZIP model parameter  $q_1, q_2, q_3$

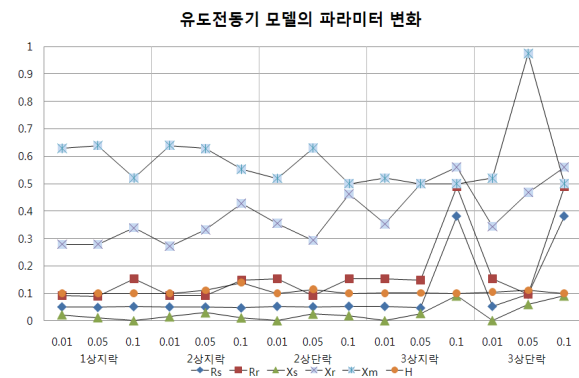


그림 8 유도전동기 모델 파라미터  $R_s, R_r, X_s, X_r, X_m, H$ 의 변화  
Fig. 8 Variation of Induction motor model parameter  $R_s, R_r, X_s, X_r, X_m, H$

그림 8은 유도전동기 모델 파라미터의 변화를 그린 그래프로  $X_m$ 과  $H$ 는 제약범위가 10이하 임에도 불구하고 1미만의 값이 나왔다. 이는 유효전력과 무효전력에서 모두 유도전동기의 특성이 적절히 반영되어야 하는데 무효전력의 경우 대부분의 경우에서 유도전동기의 비율이 0에 가깝게 추정되어 유도전동기 파라미터에 영향을 준 것으로 사료된다. 또한 과도상태가 길고 변화가 큰 경우인 지속시간이 0.1초 일 때의 회전자 성분인  $R_r$ 과  $X_r$ 의 값이 다른 때에 보다 커짐을 알 수 있다.

그림 9는 각 상황별 유효전력과 무효전력의 오차율을 나타낸 것으로, 가장 먼저 유효전력의 오차율이 무효전력의 오차율보다 작다는 것을 알 수 있다. 또한 사고지속시간이 길어질수록 오차가 커지고, 단상사고보다는 2상, 3상 사고의 오차율이 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 과도상태가 클수록 오차율이 커지는 것을 의미한다.

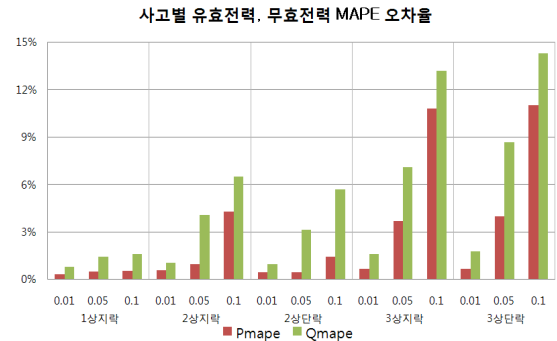


그림 9 유효전력, 무효전력 절대퍼센트평균오차  
Fig. 9 Mean absolute percentage error of P and Q

### 2.4 대표 파라미터 결정

앞서 추정된 파라미터들은 각 사고에 따라 오차가 최소화 되는 것이기 때문에 배전선로의 모든 특성을 반영할 수 있다고는 말할 수 없다. 정확한 부하모델은 배전선로의 특성에 대해 최소의 오차를 가지는 파라미터를 가지는 모델이어야 하므로 특성을 대표할 수 있는 파라미터가 필요하다. 대표파라미터를 구하기 위해, 표 4의 15개의 파라미터집합을 사고별로 대입하여 RMS오차율을 표 5와 같이 구하였다. 구해진 오차율의 평균이 최소가 되는 파라미터를 대표파라미터로 정하는 방법을 사용하였다.

표 5에서 전체적으로 최소의 RMS오차를 보이는 1상 지락 사고가 0.01초 지속 시 추정된 파라미터집합1의 경우 3상 지락사고, 단락사고가 0.1초 지속 시에는 오차가 60%를 넘어 부하의 특성을 반영하고 있지 못함을 알 수 있다. 반면 3상 지락사고가 0.1초 지속될 때 추정된 파라미터집합12의 경우 대부분의 상황에서 10% 이내의 오차율을 보여 평균오차율이 6.71%로 제일 적음을 알 수 있다. 따라서 이 배전선로의 대표 파라미터 집합은 12번째 집합이라 할 수 있다. 이와 비슷한 결과를 보이는 3상 단락사고가 0.1초 지속될 때 추정된 파라미터집합15의 평균오차도 6.74% 인 것을 알 수 있는데, 이는 과도상태를 잘 표현하는 파라미터집합 일수록 상황에 따른 배전선로의 특성을 잘 표현할 수 있음을 알 수 있다.

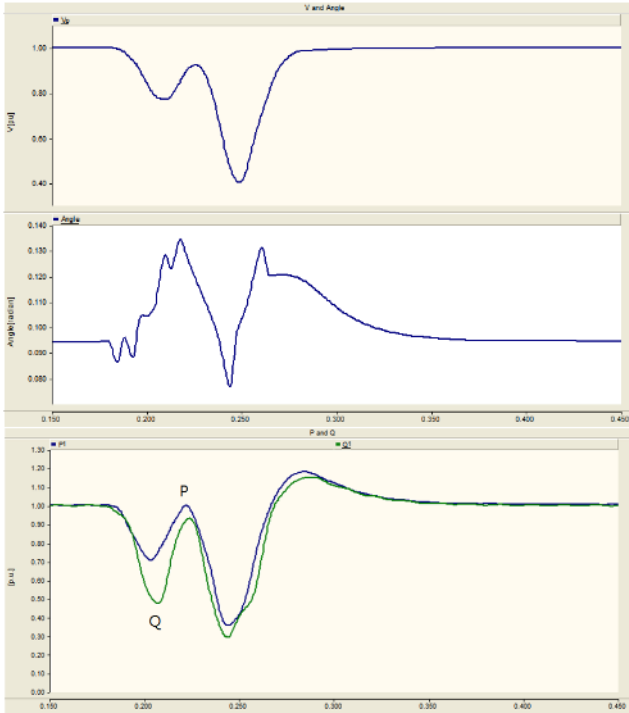


그림 10 복합고장의 정상분 전압과 위상각, 유효전력과 무효전력

Fig. 10 Positive voltage, phase angle, P and Q of composite fault

이 파라미터집합12의 대표파라미터로서의 적합성 여부를 판단하기 위해 그림 3의 PSCAD/EMTDC 계통에 2상 단락 고장 및 3상 지락고장의 복합고장을 그림 10과 같이 모의하여 파라미터집합12를 대입해 오차율을 구하여 MAPE오차율과 RMS오차율을 표 6에 정리하였다. 파라미터집합12의 RMS오차가 제일 작게 나타났다. 따라서 각 사고별 최소오차를 구하여 추정된 파라미터집합을 각각의 사고에 다시 대

표 5 각각 사고에 따른 파라미터집합의 RMS 오차율

Table 5 RMS error of Parameter sets at each case

사고 종류	시간 [s]	오차율(%)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1상 지락	0.01	0.62	0.80	1.31	0.66	0.91	2.73	0.74	1.12	1.50	1.00	2.62	1.58	0.98	1.53	1.61
	0.05	1.15	1.05	1.39	1.41	1.89	3.83	1.50	3.04	4.07	2.09	3.97	3.74	2.07	3.08	3.77
	0.1	1.89	1.46	1.19	2.52	2.61	4.82	1.89	4.90	6.92	3.78	5.55	6.07	3.76	5.01	6.09
2상 지락	0.01	0.94	1.19	1.70	0.86	1.57	3.29	1.46	2.25	2.85	1.19	3.06	2.59	1.16	2.07	2.62
	0.05	5.01	4.66	4.15	5.39	2.97	4.18	3.79	5.84	8.22	6.21	5.02	5.38	6.20	4.50	5.43
	0.1	16.25	14.38	12.04	17.77	8.91	5.50	10.33	9.83	15.40	19.98	13.97	10.36	19.98	11.95	10.46
2상 단락	0.01	1.08	1.14	1.50	1.20	1.06	2.67	0.77	1.17	1.64	1.60	2.79	1.76	1.57	1.66	1.79
	0.05	5.66	5.16	4.59	6.22	4.11	3.62	3.64	2.24	2.53	7.10	6.27	4.89	7.08	5.16	4.93
	0.1	16.58	15.10	13.33	17.97	12.57	9.06	11.62	6.33	4.14	19.97	16.62	12.59	19.94	14.39	12.65
3상 지락	0.01	1.96	2.32	2.79	1.63	2.53	4.13	2.73	3.89	4.70	1.23	3.30	3.61	1.23	2.75	3.63
	0.05	14.37	14.20	16.37	13.00	9.36	16.05	16.23	20.32	25.75	11.38	5.66	9.32	11.59	5.64	9.33
	0.1	60.71	56.19	62.94	57.03	31.71	50.26	58.89	64.77	83.37	53.81	24.81	12.07	54.40	25.41	12.13
3상 단락	0.01	2.14	2.51	3.00	1.80	2.71	4.32	2.95	4.16	5.01	1.33	3.38	3.80	1.33	2.90	3.82
	0.05	16.25	16.02	18.15	14.89	10.46	17.22	17.81	21.64	27.32	13.37	6.96	9.98	13.57	6.75	10.00
	0.1	63.55	58.79	65.80	59.82	33.36	52.13	61.47	66.88	85.82	56.57	26.43	12.69	57.17	27.02	12.77
평균오차		13.88	13.00	14.02	13.48	8.45	12.25	13.05	14.56	18.62	13.38	8.69	6.71	13.47	7.99	6.74

입하여 나온 오차들의 평균이 최소가 되는 파라미터집합을 그 선로에서의 대표파라미터 집합이라 정할 수 있다.

표 6 복합고장에 대한 파라미터집합의 오차율

Table 6 Error of Parameter sets at composite fault

집합	$P_{MAPE}$	$Q_{MAPE}$	RMS
1	14.19%	9.91%	12.24%
2	13.34%	9.46%	11.57%
3	14.21%	12.38%	13.33%
4	12.40%	11.93%	12.17%
5	8.51%	10.93%	9.79%
6	9.36%	17.33%	13.93%
7	12.53%	14.03%	13.30%
8	8.13%	21.34%	16.15%
9	8.33%	27.10%	20.05%
10	10.73%	13.99%	12.47%
11	8.20%	10.68%	9.52%
12	7.97%	9.18%	8.60%
13	10.92%	13.91%	12.51%
14	9.03%	10.82%	9.97%
15	8.05%	9.12%	8.61%

### 3. 결 론

본 논문에서는 부하모델링 방법으로 측정기반의 부하모델링 방법을 제시하였다. 부하모델로는 ZIP 모델과 유도전동기 모델을 결합한 복합 부하모델을 이용하였으며, 측정데이터를 위해 배전선로에서 나타날 수 있는 사고를 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 구현하였다. 다양한 사고에 대하여 사고 시간의 변화를 주어 데이터를 취득하였고, Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용한 MATLAB 프로그램을 이용하여 파라미터를 추정하였다.

16개의 파라미터를 가진 복합 부하모델에서 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 이용할 경우 초기값에 영향이 크기 때문에 다양한 파라미터의 초기값을 가지고 추정하였으며, 각 사고별로 최소의 RMS오차를 가지는 15개의 파라미터집합을 추정하였다.

추정된 파라미터에서 유효전력의 경우, ZIP 모델과 유도전동기 모델의 비율이 적절히 반영되었고, 무효전력에서는 대부분의 경우 유도전동기 모델의 비율이 매우 낮았다. 이에 따라 유효전력에서의 과도상태가 좀 더 잘 반영되어 유효전력의 MAPE오차가 무효전력의 MAPE오차보다 작음을 확인하였다. 또한 과도상태가 길거나 변화가 클 경우, 정전력 요소보다는 정임피던스/정어드미턴스, 정전류 요소의 비율이 커짐을 알 수 있었으며, 유도전동기 파라미터는 무효전력의 비율 파라미터의 영향으로 파라미터 값들이 제약범위내의 매우 작은 값으로 추정되었다.

마지막으로 추정된 15개의 파라미터집합 중 배전선로의 특성을 잘 반영할 수 있는 대표파라미터집합을 정하기 위해 파라미터집합을 각 사고에 대입하여 RMS오차를 구한 뒤 평균오차를 구하였다. 평균오차가 제일 적은 파라미터집합을 대표파라미터라 정하였고, 그 적합성을 검증하기 위해 동일한 PSCAD/EMTDC 계통에서 복합 사고를 구현하였다. 그 결과 평균오차가 제일 적은 파라미터집합의 RMS오차가 다른 파라미터 집합에 비해 오차가 적음을 확인할 수 있었다.

이 연구는 향후 전력계통의 안정도 해석과 계통의 운용 및 계획에 필요한 부하모델 수립 시 활용할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] IEEE Task Force, "Load Representation for Dynamic Performance Analysis", *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 472-482, 1993. 05.
- [2] 이종범, "전력계통 안정도 해석을 위한 부하모델링의 연구동향", *전기학회지* 37권 5호 pp. 43-51, 1988. 05.
- [3] Qian Ai, Danzhen Gu, Chen Chen, "New Load Modeling Approaches Based on Field Tests for Fast Transient Stability Calculations" *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 21, No. 4, pp.1864-1873, 2006.11.
- [4] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [5] Hsiao-Dong Chiang, Jin-Cheng Wang, Chiang-Tsung Huang, Yung-Tien Chen, Chang-Horng Huang, "Development of a Dynamic ZIP Motor Load Model from Online Field Measurements", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 19, No. 7, pp. 459-468, 1997. 05.
- [6] Xiaoyao Zhou, Haozhong Cheng, Ping Ju, "The third-order induction motor parameter estimation using an adaptive genetic algorithm", *Intelligent Control and Automation, Proceedings of the 4th World Congress on*, Vol. 2, pp. 1480-1484, 2002.
- [7] Les Pereira, Dmitry Kosterev, Peter Mackin, Donald Davies, John Undrill, Wenchun ZhuAn, "An Interim Dynamic Induction Motor Model for Stability Studies in the WSCC", *IEEE Trans. on Power Systems*, pp. 1108-1115, 2002. 11.

## 저 자 소 개



### 이 경 상 (李 炘 尙)

1982년 8월 30일생. 2008년 숭실대 전기공학부 졸업, 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 재직 중.  
Tel : 02-2345-5082  
E-mail : kyungsanglee@kepcoco.kr



### 박 래 준 (朴 來 駿)

1986년 2월 11일생. 2010년 숭실대 전기공학과 졸업. 2011 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.  
Tel : 02-817-5622  
E-mail : rejuni@ssu.ac.kr



### 송 경 빈 (宋 敬 彬)

1963년 9월 15일생. 1986년 연세대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 텍사스 A&M 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 부교수.  
Tel : 02-820-0648  
E-mail : kbsong@ssu.ac.kr