

Impact of Dynamic Load Model on Short-Term Voltage Stability of Korea Power System and Estimation of Dynamic Load Model Parameters

국내 계통의 단기 전압 안정도에 대한 부하 모델의 영향성 검토 및 부하 모델 파라미터 선정

Jaemin Moon¹, Jae-Kyeong Kim¹, Kyeon Hur¹, Suchul Nam^{2†}, YongHak Kim^{2††}
문재민¹, 김재경¹, 허견¹, 남수철^{2†}, 김용학^{2††}

Abstract

In this paper, we analyzed the effect of power system load model on the short-term voltage stability analysis results. First, we introduced common load models. We also confirmed that some load models can not represent actual system phenomena even if the model parameters are optimized. Also, we studied about the influences of load parameters and regional characteristics of load model on the short-term voltage stability of KEPCO power system considering the contingency. The results showed that the importance of selecting a load model was confirmed again. And we recognized about it can be understood that it should reflect the load characteristics of the area near the assumed contingency more accurately.

본 논문은 전력계통의 부하 모델이 단기 전압 안정도 해석 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 우선, 본 논문에서는 일반적으로 많이 사용되는 부하 모델을 소개하였고, 일부 부하 모델은 모델 파라미터를 최적화하더라도 실제 측정된 계통 현상을 재현할 수 없다는 것을 확인하였다. 또한, 본 논문에서는 상정사고 상황을 고려하여 국내 전력계통의 단기 전압 안정도 해석 시 부하 모델의 영향과 지역별 부하 모델의 영향성을 검토하였다. 해당 결과를 통해 부하 모델 선정의 중요성을 재차 확인할 수 있었으며, 상정사고 인근 지역의 부하 특성을 보다 더 정확하게 반영해야 함을 알 수 있다.

Keywords: Load Model, Dynamic Load Model, Voltage Stability, Load Parameter Estimation, Measurement based Load Modeling

I. 서론

최근 환경에 대한 사회적 관심이 증대됨에 따라 전력계통에 인버터 기반의 재생에너지원이 지속적으로 확대되고 있는 추세이다. 이러한 변화는 전력계통의 관성정수 감소로 이어지며 [1], 이로 인해 계통의 주파수 및 전압 응답 특성이 빨라지고 있다. 따라서 미래 전력계통의 안정적인 운영을 위해서는 계통의 단기 특성에 대한 정확한 이해가 필요

하다. 전력계통의 특성은 수학적 모델을 기반으로 분석되며, 분석 결과의 신뢰성을 위해서는 정확한 모델 구축이 선행되어야 한다. 여러 전력계통 모델 중 부하 모델은 계통 해석 특성상 정확한 모델 선정이 어려운 실정이다 [2]. 하지만 부하 모델은 전력계통의 단기 전압안정도 해석의 신뢰성에 많은 영향을 주기 때문에 지속적으로 많은 연구가 진행되고 있다 [1]-[4].

현재 국내에서는 전력시장운영규칙에 따라 전 계통에

Manuscript received August 27, 2018, Accepted March 27, 2019

¹ Yonsei University

² KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

† suchul.nam@kepco.co.kr

†† yonghak.kim@kepco.co.kr

This paper is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. This paper and/or Supplementary information is available at <http://journal.kepco.co.kr>.

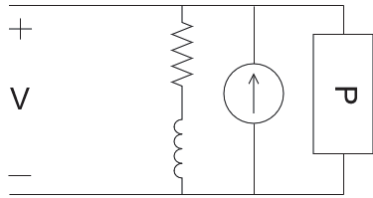


Fig. 1. ZIP 모델의 구조.

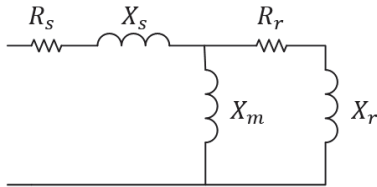


Fig. 2. 유도 전동기 모델의 정상 상태 구조.

하나의 부하 모델을 사용하여 계통 특성을 분석하고 있으며, 해당 모델은 ZIP 모델이다 [5]. ZIP 모델은 부하를 Fig. 1과 같이 정임피던스, 정전류, 정전하로 분류하여 그 비율로 부하 특성을 표현한다. ZIP 모델은 부하를 간단하게 모델링할 뿐만 아니라 모델의 물리적 의미를 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있으나, 전압을 통해서만 부하를 모델링하기 때문에 동적 특성을 반영하지 못하는 한계가 있다 [6]. 또한, 전체 계통의 부하 모델에 대해 단일 모델을 사용할 경우, 규모가 큰 계통 해석에 적용이 용이하지만, 상세한 부하 특성(예: 부하의 지역 특성 및 상업, 공업, 주거용 부하 특성)을 반영할 수 없는 한계가 있다. 따라서 본 논문은 ZIP 모델의 한계를 보완하기 위해 부하의 동적 특성을 반영할 수 있는 모델을 소개하였으며, 실제 측정된 데이터가 있을 경우, 해당 데이터를 활용한 모델 파라미터 추정 방법을 소개하였다. 또한, 국내계통의 단기 전압 안정도 해석 시 동적 부하 모델의 영향성과 지역별 부하 모델의 영향을 검토하였다. 해당 분석 결과를 통해 단기 전압 안정도 분석 시 정확한 부하 모델 사용의 중요성과 필요성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 일반적으로 많이 사용되는 부하 모델을 간략하게 소개하였다. III장과 IV장에서는 측정 데이터를 활용한 동적 부하 모델 파라미터 추정 알고리즘과 추정 결과에 대해 서술하였다. V장은 국내 계통의 단기 전압 안정도 해석 시 동적 부하 모델의 영향성과 지역별 부하 모델의 영향성을 검토하였다. 마지막으로 VI장의 결론을 통해 본 논문을 마무리하였다.

II. 부하 모델 특성

본 논문은 전력계통의 단기 전압 안정도 해석 시 많이 활용되는 ZIP 모델, 복합 부하 모델, Complex Load Model (CLOD) 모델을 사용하였으며, 이번 장에서는 각 모델의 특성을 간략하게 설명하였다.

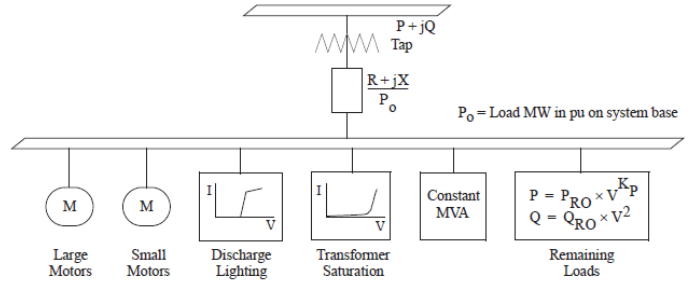


Fig. 3. CLOD의 모델 구조 [7].

A. ZIP 모델

ZIP 모델의 유효·무효 전력은 전압에 대한 수식으로 표현되며, 아래와 같다.

$$P_L = P_0 \left(a_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + c_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^0 \right) \quad (1)$$

$$Q_L = Q_0 \left(a_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + c_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^0 \right) \quad (2)$$

Eq. (1)과 (2)에서 P_0, Q_0, V_0 는 각각 정상 상태(steady-state)에서의 유효·무효 전력과 전압이다. V 는 모선 전압이며, a, b, c 는 각각 임피던스, 정전류, 정전력 부하의 비율로 그 합은 1이다. 이 모델은 부하의 유효·무효 전력이 전압에 대한 대수적인 관계로 표현되기 때문에 부하의 동적 특성을 반영할 수 없는 한계가 있다.

B. 복합 부하 모델

복합 부하 모델은 ZIP 모델의 한계를 보완하기 위해 유도 전동기 모델을 ZIP 모델과 병렬적으로 결합한 모델이다. 유도 전동기 모델의 정상 상태 구조는 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

유도 전동기 모델에는 ZIP 모델과는 다르게 미분방정식이 포함되기 때문에 부하의 동적 특성을 반영할 수 있다 [6]. 복합 부하 모델의 파라미터는 ZIP 모델 파라미터인 $a_p, b_p, c_p, a_q, b_q, c_q$ 와 유도 전동기 비율(K_p)과 유도 전동기 역률(pf_m) 그리고 유도 전동기 파라미터인 $R_s, X_s, X_m, R_r, X_r, H$ 로 구성되어 있다. 각 파라미터에 대한 설명은 선행 연구에 서술되어 있다 [2].

C. CLOD

CLOD 모델은 전력계통 동적 분석 시 부하의 동적 특성을 반영하고 싶으나, 구체적인 정보가 없는 경우에 사용할 수 있도록 개발된 모델이다 [8]. 해당 모델은 대형·소형 유도 전동기, 방전등, 변압기 전류, 정전력, 지수 모델로 구성되어 있으며, 그 구조는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 이 모델

에서 부하의 특성은 각 모델의 비율을 통해 표현된다.

본 연구에서는 CLOD 모델의 각 모델 중 대형·소형 유도 전동기 모델과 지수 모델을 사용하였다. 대형·소형 유도 전동기 모델 파라미터는 고정되어 있으며, 해당 파라미터에 대한 설명은 PSS/E 매뉴얼에 서술되어 있다 [8]. 지수 모델의 파라미터 선정을 위해 전력시장운영규칙에서 명시된 ZIP 모델 파라미터를 활용하였으며, 아래 수식의 근사 방법을 사용하였다 [9].

$$P_L = P_0 \times \left(\frac{V}{V_0}\right)^{K_p} \cong P_0 \times \left(a_p \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + b_p \left(\frac{V}{V_0}\right)^1 + c_p \left(\frac{V}{V_0}\right)^0 \right) \quad (3)$$

$$K = \frac{2 \times a + 1 \times b + 0 \times c}{a + b + c} \quad (4)$$

지수 모델의 무효 전력 파라미터의 경우 CLOD 모델에서는 2로 고정되어 있으며, 이는 정임피던스 모델과 동일한 모델로 간주될 수 있다.

III. 부하 모델 파라미터 추정 알고리즘

본 논문에서는 부하 모델의 파라미터를 추정하기 위해 비선형 최소 자승법을 사용하였으며, 본 장에서는 많이 활용되는 비선형 최소 자승법에 대해 설명하였다.

A. 경사 하강법

경사 하강법(Steepest descent method)는 비선형 최소 자승법의 계산 방법 중 가장 기본적인 방법이며, 반복적인 연산을 통해 점진적으로 최적값을 도출한다. 해당 과정은 아래 수식을 통해 확인할 수 있다.

$$\beta_{k+1} = \beta_k - \lambda_k \nabla g(\beta_k) \quad (5)$$

$$\frac{d}{d\lambda_k} g(x_{k+1}) = \nabla g(x_{k+1})^T \cdot \frac{d}{d\lambda_k} x_{k+1} \quad (6)$$

Eq. (5)에서 β_k 는 k 번째 연산 과정에서의 모델 파라미터 벡터이며, 목적함수 $g(\beta_k)$ 의 gradient 이용하여 파라미터를 갱신한다. 이 때 λ 는 Eq. (6)에서처럼 목적함수를 최소로 만드는 방향으로 결정된다. 경사 하강법은 수렴이 보장되는 장점이 있으나, 수렴 속도가 느린 단점이 있다 [10].

B. 뉴턴 방법

뉴턴 방법(Newton method)는 목적함수의 2차 도함수를 활용하는 최적화 기법으로 해당 수식은 다음과 같다.

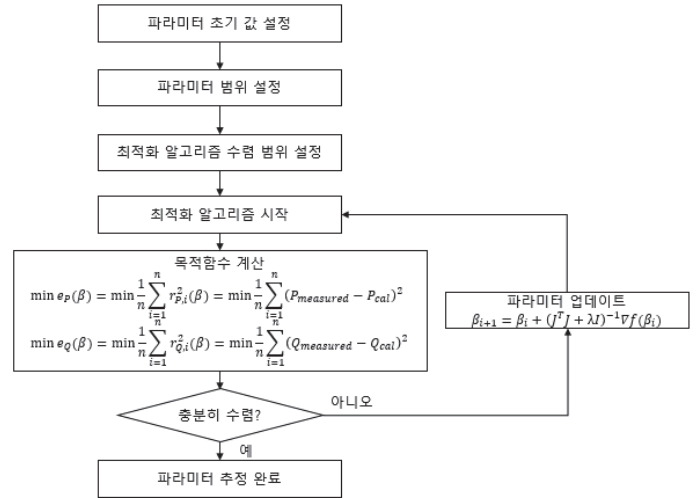


Fig. 4. 동적 부하 모델 추정 알고리즘.

$$r_i(\beta) = y_i - f_i(\beta) \quad (7)$$

$$e(\beta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m r_i^2(\beta) \quad (8)$$

$$\beta_{k+1} = \beta_k + (J^T J)^{-1} J^T [y - f(\beta_k)] \quad (9)$$

β 는 앞서 경사 하강법과 마찬가지로 모델 파라미터 벡터이다. 또한, 오차 r 은 Eq. (7)과 같이 측정데이터 y 와 모델의 결과값인 f 의 차이로 표현된다. J 는 모델 파라미터에 대한 모델 결과값 f 의 1차 도함수로 구성된 자코비안 행렬이다. Eq. (8)과 같이 목적함수 $e(\beta)$ 를 선정한 비선형 최소 자승법의 경우, 2차 도함수 행렬을 자코비안 곱의 형태인 $J^T J$ 로 근사할 수 있다 [11]. 뉴턴 방법은 Eq. (9)에서 2차 도함수를 활용하기 때문에 수렴속도가 빠르다는 장점이 있으나, $(J^T J)$ 가 희소행렬이 되는 경우 수렴성이 보장되지 않는다.

C. Levenberg-Marquardt 방법

Levenberg-Marquardt(LM) 방법은 수렴성이 보장되지 않는 뉴턴 방법의 단점을 보완하기 위해 개발된 방법이다. LM method의 파라미터 업데이트 수식은 아래와 같다.

$$\beta_{k+1} = \beta_k + (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T [y - f(\beta)] \quad (10)$$

LM 방법은 Eq. (10)에서 확인할 수 있듯 감쇠율(damping factor) λ 를 추가하여 $J^T J$ 가 희소행렬인 경우에도 수렴하는 계산 방법이다. 또한, LM 방법은 2차 도함수를 사용하므로 수렴속도가 빠르며 수렴성 또한 보장된다. 이러한 이유로 본 논문에서는 파라미터 추정 알고리즘으로 LM 방법을 선택하였다.

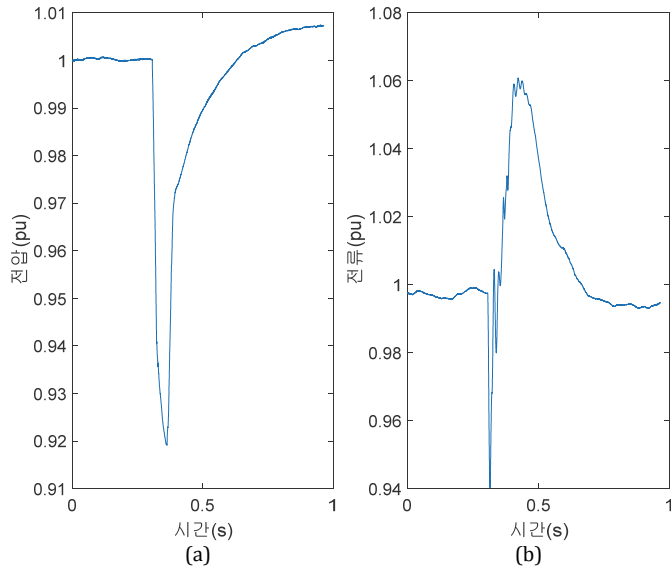


Fig. 5. 측정 데이터에서 추출한 전압 및 전류 데이터의 정상 성분. (a) 전압, (b) 전류.

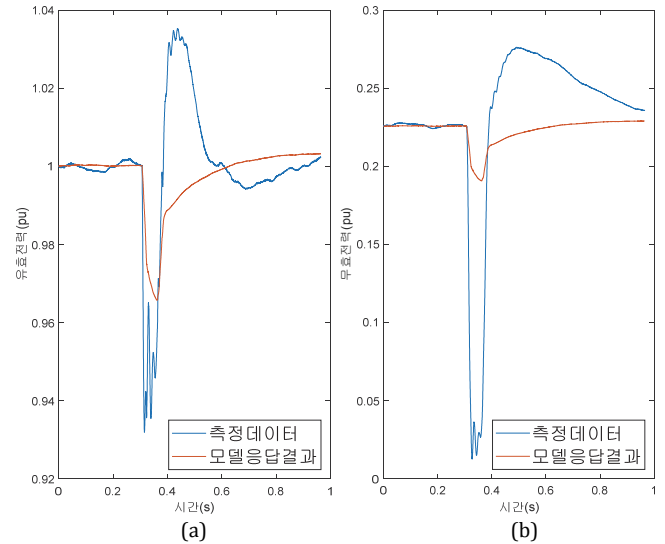


Fig. 7. 최적화된 ZIP 모델 파라미터를 사용한 응답 결과. (a) 유효 전력, (b) 무효 전력.

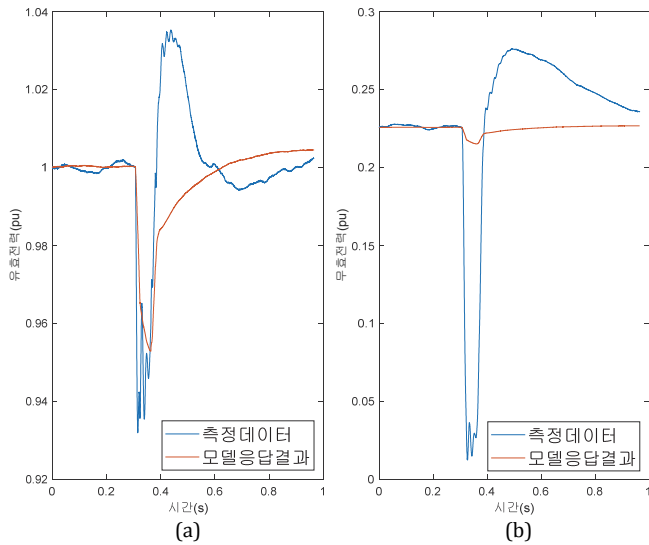


Fig. 6. ZIP 모델 파라미터의 초기값을 사용한 응답 결과. (a) 유효 전력, (b) 무효 전력.

IV. 부하 모델 파라미터 추정 결과

본 장에서는 측정 데이터를 활용하여 ZIP 모델과 복합 부하 모델의 파라미터를 추정하였고, 그 결과를 비교하였다. 부하 모델 파라미터 추정의 전체적인 과정은 Fig. 4에서 볼 수 있다. Fig. 4에서 초기값과 수렴범위설정은 다음과 같은 이유로 필요하다. 앞 장에서 설명한 파라미터 추정 알고리즘은 수학적으로 목적함수의 국지적 극소값(Local minimum)을 찾아가는 과정이다. 그렇기 때문에 일부 초기값에서는 파라미터가 물리적으로 불가능한 값으로 수렴할 가능성이 존재한다. 또한, 초기값을 적절하게 설정할 경우 최적화 결

과가 국지적 극소값에 수렴하는 것이 아닌 전역적 극소값(Global minimum)으로 수렴하도록 유도할 수 있다. 따라서 적절한 초기값 설정과 파라미터의 수렴 범위를 설정함으로써 위 문제들을 개선할 수 있으며, 본 논문에서는 EPRI에서 제안하는 파라미터 초기값과 수렴 범위를 사용하였다 [3].

파라미터 최적화는 Eq. (10)의 방법을 통해 반복적으로 연산을 진행하며, 선정된 알고리즘의 수렴 범위에 수렴할 경우 연산을 마친다.

본 논문에서는 부하 모델 구조별 파라미터 추정 결과를 비교하기 위해 동수원 변전소에서 실측된 데이터를 사용하였으며, 해당 데이터의 전압 및 전류의 정상(Positive-sequence)은 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 해당 데이터는 계통에 일시적인 외란으로 인해 전압 강하가 순간적으로 발생하였으며, 이때 전압이 회복되는 동안 전류가 순간적으로 증가한 것을 확인할 수 있다.

A. ZIP 모델 추정 결과

ZIP 모델 파라미터의 초기 값에 대한 응답 결과는 Fig. 6에서 확인할 수 있으며, 추정 전 파라미터는 Table 1에서 확인할 수 있다. Fig. 6의 추정 전 유효 전력 응답 결과는 전압 강하가 발생하는 부분에서 유사하게 재현되나, 유효 전력의 순간적인 상승(Overshoot) 구간을 반영하지 못하는 것을 볼 수 있다. 또한, 추정 전 무효 전력 응답 결과는 전압 강하 구간과 순간적인 상승 구간을 모두 반영하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4의 과정을 통해 최적화된 ZIP 모델 파라미터를 활용한 응답 결과는 Fig. 7에서 확인할 수 있으며, 해당 파라미터는 Table 1에서 확인할 수 있다. Fig. 7의 유효 전력 응답 결과는 추정 전에 비해 전압 강하 구간에서의 오차가 증가

Table 1. ZIP 모델 추정 시 파라미터 변화

모델 파라미터	추정 전 초기값	추정 후 최적화 결과
a_p	0.2	0
b_p	0.2	0.4252
c_p	0.6	0.5748
a_q	0.2	1
b_q	0.2	0
c_q	0.6	0

Table 2. 복합 부하 모델 추정 시 파라미터 변화

모델 파라미터	추정 전 초기값	추정 후 최적화 결과
a_p	0.3	0
b_p	0.3	0
c_p	0.4	1
a_q	0.3	0.2796
b_q	0.5	0.6221
c_q	0.2	0.0983
X_r	0.16	0.2
X_s	0.12	0.0924
X_m	3.2	3.0087
R_r	0.005	0.0084
R_s	0.031	0.0318
H	1	1.5
K_p	0.3	0.6246
pf_m	0.87	0.8148

했으나, 순간적인 상승 구간의 오차가 줄어 전체적인 오차는 줄어들었다. Fig. 7의 무효 전력의 경우 추정 전 전압 강하 구간의 오차가 크기 때문에, 해당 구간의 오차를 줄이기 위해 전압에 따라 가장 부하가 크게 감소하는 정임피던스 모델로 파라미터가 추정된 것을 확인할 수 있다.

ZIP 모델은 Eq. (1)과 (2)에서 볼 수 있듯 부하 특성을 전압에 대한 대수적인 관계로 정의한다. 그렇기 때문에 Fig. 6과 Fig. 7에서 확인하듯이 ZIP 모델의 유효·무효 전력이 Fig. 5의 전압과 유사한 개형을 보이게 된다.

ZIP 모델의 경우 이러한 모델 특성상 전압 응답과는 무관하게 순간적으로 유효·무효 전력의 상승이 생기는 실제 부하 특성을 반영할 수 없는 한계가 존재한다.

B. 복합 부하 모델 추정 결과

복합 부하 모델 파라미터의 초기값에 대한 응답 결과는 Fig. 8에서 확인할 수 있으며, 추정 전 파라미터는 Table 2에서 확인할 수 있다. 추정 전 유효 전력의 응답 결과는 전압 강하 구간과 순간적인 상승 구간을 유사하게 표현하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이후 유효 전력 응답이 진동하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 무효 전력의 응답 결과를 보면 측정 데이터와 큰 차이를 보인다. 특히 사고 이전 정상 상태에서 수렴하지 않은 것을 확인할 수 있다. 이러한 초기값 발산 문제는 추정 전 파라미터로는 해당 정상 상태를 표현하지 못하는 경우에 발생한다.

복합 부하 모델 추정 후 응답 결과는 Fig. 9에서 확인할

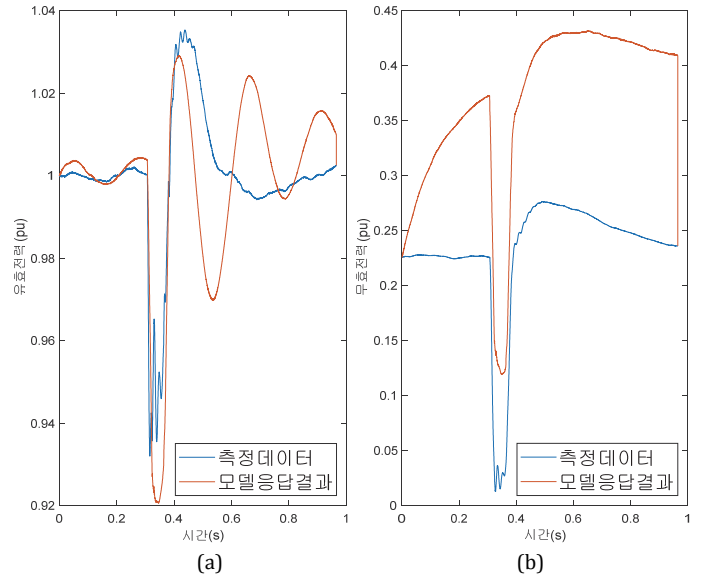


Fig. 8. 복합 부하 모델 파라미터의 초기값을 사용한 응답 결과. (a) 유효 전력, (b) 무효 전력.

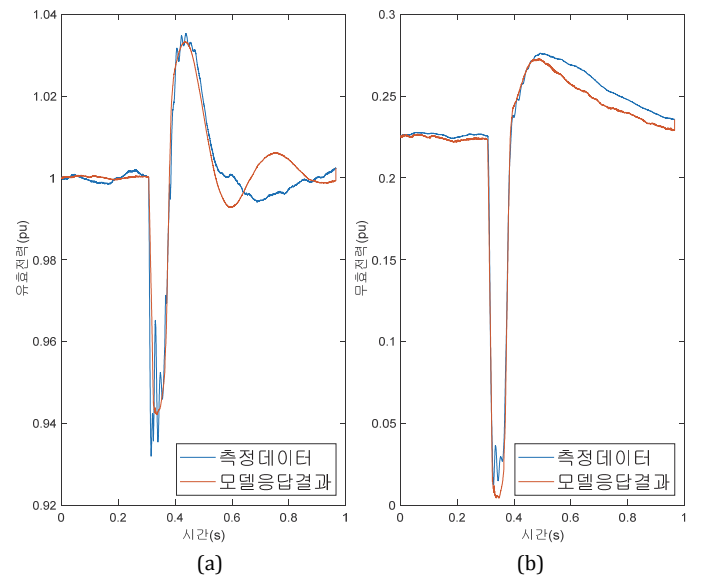


Fig. 9. 최적화된 복합 부하 모델 파라미터를 사용한 응답 결과. (a) 유효 전력, (b) 무효 전력.

수 있으며, 추정 후 파라미터는 Table 2에서 확인할 수 있다. 추정 후 유효 전력 응답 결과는 추정 전 Fig. 8(a)과 비교하여 순간적인 상승을 더 정확하게 재현하고 있으며, 이후에도 측정 데이터와 유사한 것을 확인할 수 있다. 또한, 무효 전력 응답 결과를 확인하면, 전압 강하 구간과 순간적인 상승 구간 모두 잘 재현하는 것을 확인할 수 있다.

복합 부하 모델의 응답결과에서 추정 후에도 오차가 발생하는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 본 연구에서 분석하는 부하 모델은 계통 해석 특성상 수많은 부하들을 하나의 부하 모델로 통합하여 모델링한다. 따라서 실제로

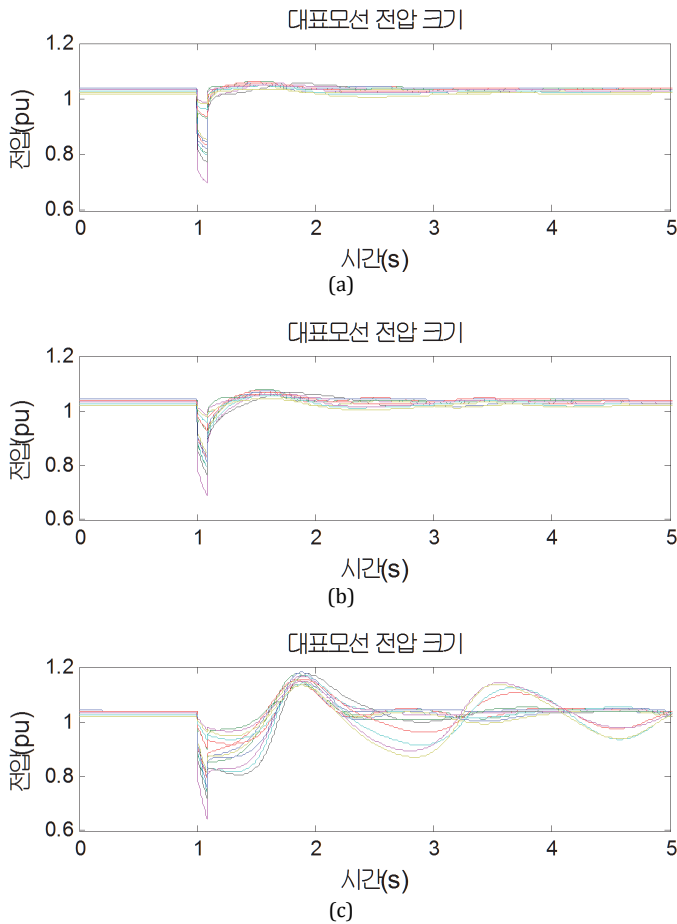


Fig. 10. Case 1 모의실험 결과. (a) 1번 결과, (b) 2번 결과, (c) 3번 결과.

수많은 부하가 해당 모델로 구성된 것이 아니며, 이로 인해 오차가 발생한다. 이를 편향 오차(Bias error) 또는 모델 오차(Model Error)라고 한다. 편향 오차는 적용한 모델 구조가 복잡해질수록 줄어드는 경향을 보인다 [12]. 하지만 모델 구조가 복잡해질수록 선정하고 관리해야 할 파라미터가 많다는 단점과 안정도 해석 시 더 많은 계산 비용이 발생하는 단점이 존재한다. 이러한 이유로 적절한 모델 선정에 대해서는 앞으로도 많은 연구가 필요할 것으로 예상된다.

V. 동적 부하 모델의 영향성 분석

본 장에서는 국내 계통의 단기 전압 안정도 해석 시 동적 부하 모델의 영향과 지역별 부하 모델의 영향을 분석하였고, 해당 분석을 위해 모의실험 프로그램 PSS/E를 사용하였다. 국내 계통의 부하 모델을 전력시장운영규칙에서 명시한 ZIP 모델과 CLOD 모델을 적용하여 모의실험을 진행하였고, 해당 모의실험은 765 kV 모선인 당진 TP7 6020 모선에 3상 지락사고를 상정하였다. 또한, 결과의 가독성을 위해 표 3과 같이 각 지역에서 가장 낮은 번호의 모선을 대표 모선으로 선정하여 결과를 분석하였다.

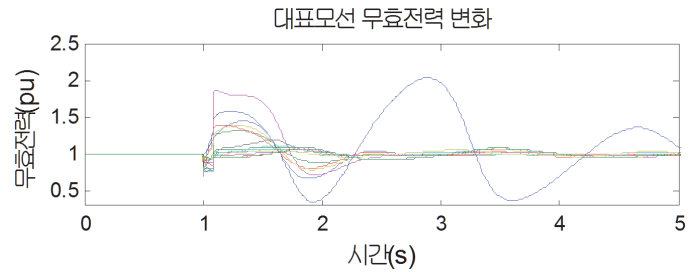


Fig. 11. 모의실험 3번의 무효 전력 부하 변화.

Table 3. 지역별 대표모선 번호

지역	모선번호	지역	모선번호
서울	1435(운니)	충북	4790(감곡)
남서울	2410(신광명)	충남도	5510(신영주)
경기	2485(기흥)	강원	1585(철원)
경기북부	1310(신파주)	전북	6420(정공)
인천	3310(신김포)	전남	7215(일곡)
대구경북	5510(신영주)	부산	8260(울주1)
경남	10165(고성)		

Table 4. 모의실험 3번의 무효 전력 부하 변화.

모의실험 번호	대형 유도 전동기 비율(%)	소형 유도 전동기 비율(%)
1번(ZIP)	0	0
2번	10	40
3번	20	80

Table 5. Case 2 모의실험 지역 분류

모의실험 번호	CLOD 적용 지역
1번	수도권 지역 (서울, 남서울, 인천, 경기, 경기북부)
2번	충청·전라·강원도 지역(충북, 충남, 전북, 전남, 강원)
3번	경상도 지역(대구경북, 부산, 경남)

A. Case 1 - 동적 부하 모델의 영향성 분석

우선 동적 부하 모델의 영향을 분석하기 국내 계통의 부하 모델을 총 3가지 모델을 사용하여 단기 전압 안정도를 분석하였다. 각 모델은 Table 4에서 확인할 수 있으며, 현재 전력시장운영규칙에서 명시한 ZIP 모델이 1번, CLOD 모델을 사용하여 대형·소형 유도 전동기 비율을 다르게 한 모델이 2번과 3번이다.

상정사고 발생 시 Fig. 10에서 ZIP 모델만을 적용한 경우(1번 결과)에 CLOD 모델을 활용한 2번과 3번 결과보다 전압이 빠르게 회복하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 10(c)에서 유도 전동기 비율이 높은 경우, 전압이 일정 수준까지 회복되다 다시 전압 강하가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이 현상은 상정사고로 인해 전압이 일정 수준 이하로 떨어진 이후 회복되는 과정에서 유도 전동기 모델이 무효 전력을 급격하게 소모하기 때문에 발생한다 [6]. 해당 현상

은 Fig. 11에서 확인할 수 있다.

실제 전력계통의 측정 데이터에서 전압 회복 지연 현상이 확인되었다 [1][3][4][13]. Fig. 10(a)에서 확인하듯이 ZIP 모델 기반의 모의실험은 계통에서 확인되는 해당 현상을 재현하기 어렵다. 그렇기 때문에 전압 회복 지연 현상이 발생하는 계통에서는 유도 전동기 모델과 같이 동적 특성을 반영할 수 있는 모델을 적용하여 계통 해석의 신뢰성을 높여야 한다.

B. Case 2 - 지역별 부하 모델의 영향성

Case 2에서는 Table 5와 같이 국내 계통을 3개의 지역으로 구분하여 CLOD를 각각 적용한 경우를 분석하였다. 부하 모델의 영향성이 총 부하량과 관계가 있기 때문에 부하가 큰 수도권, 경상도 지역과 부하가 작은 나머지 지역을 하나의 지역으로 선정하였으며, 사고지역과의 거리는 수도권, 충청·전라·강원도 지역, 경상도 지역 순으로 인접하다. CLOD 적용 지역은 대형 유도 전동기 20%와 소형 유도 전동기 80%를 적용하였으며, 그 외 지역에 대해서 ZIP 모델을 적용하였다. Fig. 12에서 확인할 수 있듯이 사고 지역에 인접한 수도권 지역에 CLOD를 적용할 시 영향성이 큰 반면 사고 지역과 거리가 있는 충청·전라·강원도 지역과 경상도 지역의 경우 전압 회복 속도에서 큰 차이를 보이지 않는다.

기존의 국내계통 안정도 해석에서는 전체 계통에 동일한 파라미터의 동일한 부하 모델을 적용하였다. 해당 부하 모델은 전국의 부하 특성을 대표하기 때문에 국내 모든 지역의 평균적인 부하 특성을 반영하게 된다. 따라서 상정사고를 통한 안정도 해석 시 영향성이 큰 인근 지역의 부하 특성을 정확히 반영할 수 없는 한계가 발생한다. 이러한 한계는 지역적 부하 모델 개발을 통해 개선할 수 있으며, 이를 위해 인근 지역의 범위 선정 및 선정된 지역의 부하 모델 개발과 관련된 후속 연구가 필요할 것으로 예상된다.

V. 결론

본 논문은 전력계통의 동적 특성 분석 시 활용되는 부하 모델 구조에 대해 검토하였고, 측정된 계통 데이터를 통해 ZIP 모델과 복합 부하 모델의 최적 파라미터를 추정하였다. 해당 결과를 통해 특정 상황에서는 현재 국내 계통 해석 시 활용하는 ZIP 모델의 한계를 확인하였고, 이를 보완하기 위해서는 유도 전동기와 같은 동적 모델이 필요하다는 것을 확인하였다. 또한, 측정 데이터를 활용하여 동적 모델의 파라미터를 추정할 경우, 측정된 부하 특성을 유사하게 재현할 수 있었고, 이를 활용하면 계통 해석 시 실제 부하 특성을 보다 정확하게 반영할 수 있을 것으로 기대된다.

부하 모델이 실제 전력계통 안정도 해석에 미치는 영향을 분석하기 위해 본 논문에서는 국내 계통의 단기 전압 안

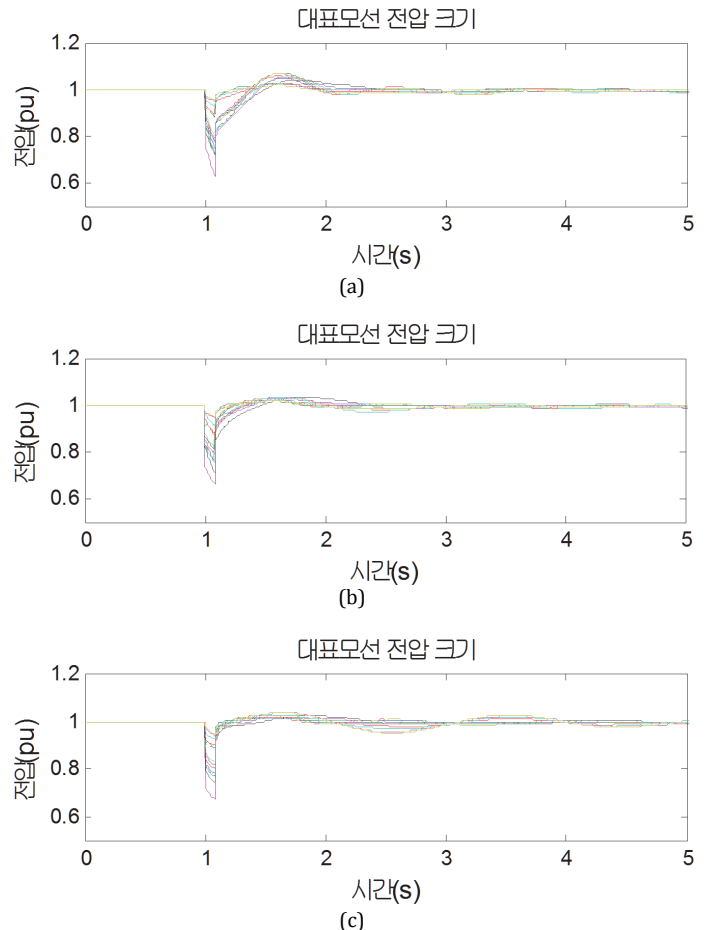


Fig. 12. Case 2 모의실험 결과. (a) 1번 결과, (b) 2번 결과, (c) 3번 결과.

정도 분석 시 여러 부하 모델의 영향성과 지역별 부하 모델의 영향성을 검토하였다. 사례 연구 결과 Case 1에서는 동적 부하 모델에 따라 단기 전압 안정도 해석 결과가 상이할 수 있음을 확인하였고, Case 2에서는 상정사고 발생 지역과 인접한 부하 모델의 영향이 큰 것을 확인하였다. 본 연구 결과를 통해 부하 모델이 전력계통의 동특성 분석의 신뢰성에 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있으며, 특히 사례 연구 결과는 상정사고가 발생한 인근 지역의 부하 모델 신뢰성이 더욱 중요하다는 것을 시사한다.

미국은 전기 협의회인 Western Electricity Coordinating Council(WECC)에서 동적 부하 모델에 대해 선구적인 연구를 많이 진행하고 있으며, 최근 미국의 신뢰도 기구인 North American Electric Reliability Corporation (NERC)에서는 신뢰도 높은 전력계통 해석을 위해 계통 해석 시 최대 부하 조건에서 부하의 동적 특성을 반영할 수 있는 부하 모델 적용을 요구한다 [13][14]. 이처럼 국내에서도 동적 부하 모델에 대한 연구와 더불어 단일 부하 모델이 아닌 지역별 또는 중요 부하 모델 선정에 대한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국전력공사 “시각동기위상측정정보를 활용하는 전력계통 상황인지 응용기술 개발” 연구의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] NERC, “Dynamic Load Modeling Technical Reference Document”, Dec., 2016.
- [2] J.-K Kim, et al, “Fast and reliable estimation of composite load model parameters using analytical similarity of parameter sensitivity”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.31, No.1, Jan., 2016, pp. 663-671.
- [3] EPRI, “Measurement-Based Load Modeling”, Sep., 2006.
- [4] NASPI, “Model Validation Using Synchrophasors”, NASPI Technical Workshop, Oct., 2013.
- [5] 한국전력거래소, “전력시장운영규칙”, Jun., 2018.
- [6] P. Kundur, “Power system stability and control”, New York: McGraw-hill, 1994.
- [7] SIEMENS, “PSSE 33.3 Model Library”, Sep., 2012.
- [8] SIEMENS, “PSSE 33.3 Program Application Guide Volume 2”, Sep., 2012.
- [9] J. V. Milanovic, et al, “International industry practice on power system load modeling”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No.3, Aug., 2013, pp. 3038-3046.
- [10] S. J. Wirghtm and J. Nocedal, “Numerical optimization”, Springer Science, 2006.
- [11] B. M. Wilamowski and H. Yu, “Improved computation for Levenberg-Marquardt training”, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.21, No.6, Jun., 2010, pp. 930-937.
- [12] H. Renmu, M. Jin, D. J. Hill, “Composite load modeling via measurement approach”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.21, No.2, May, 2006, pp. 663-672.
- [13] WECC Modeling and Validation Work Group, “WECC MVWG Load Model Report Ver.1.0”, Jun., 2012.
- [14] NERC, “Reliability Standards for the Bulk Electric Systems of North America”, Sep., 2014.