

시스템 식별법에 의한 복합 부하 모델링

(The Combined Load Modeling based on the System Identification)

심건보* · 김주락** · 오임걸***

*충익대학교 · **한국철도기술연구원 · ***한서대학교

(Keon-Bo Shim · Joorak Kim · Im-Geol Oh)

Abstract

Many load modeling concepts have been proposed in the past. Efforts of load modeling may be summarized into three approaches ; the first one is to find an aggregation of various different load components scattered and distributed in an area. The second one is to find parameters to represent load from field tests, if any. And the third one is how to present the load of motor components could be represented.

This paper proposes a system identification of combined load modeling to cover the second approach. In this paper, an improved method of system identification is suggested for the combined load model (dynamic and static load model) in which parameters of the equivalent induction motor, polynomial type load and their compositions.

1. 서론

전력에너지를 공급하는 전력시스템의 구성요소는 크게 전원(source), 송전선로(transmission line) 그리고 부하(load)로 크게 구분할 수 있으며, 전원이나 송전선로, 특히 전원에 대한 모델링은 오랜 기간 동안에 많은 연구가 되어 와서 상당히 정밀한 모델링의 수준에 이르렀다고 할 수 있다. 그러나 부하모델링에 대한 특성연구는 상대적으로 미진한 상태에 있었으며, 그 필요성이 인정되더라도 매우 간략화한 형태로서 다루어져 왔다.

전력시스템에서 전력에너지를 소비하는 장치나 모든 설비를 일괄하여 부하라고 부른다. 따라서 부하는 전등이나 형광등과 같은 조명기구, 냉장고나 세탁기 등과 같은 모든 가전제품, 빌딩이나 공장 등의 모든 동력설비들을 총망라하므로 그 종류가 너무나 많고 다양하다. 또한 부하의 전기적인 특성은, 예를 들어 전동기에 연결되어 있는 양수펌프나 송풍기 등에 의해서 지배적인 영향을 받는 등의 일괄하여 특성을 표현하기가 매우 곤란하지만, 전력시스템의 상태해석이나 시뮬레이션을 위해서는 단일화된 특성표현의 모델링이 요구된다. 그러나 아직까지 부하의 특성에 대한 연구는 소홀히 다루어져 왔는데, 이렇게 부하의 특성에 대한 연구가 늦어진 이유도 실은 다양한 부하의 단일표현이 곤란하였기 때문이다. 또한 같은 이유에서 지금까지는 연구의 목적 및 특성에 따라서 여러 가지 특수한 형태로 부하가 표현되었으며, 실제통에의 적용역시 어려웠다[1][3].

본 연구에서는 이러한 요구에 부응하기 위하여 전력시스템의 상태해석이나 시뮬레이션을 위하여 범용으로 사용할 수 있고, 부하의 정확한 특성을 나타내는 복합 부하모델을 개발하는 것이다.

2. 복합 부하 모델링

전력시스템의 상태해석이나 시뮬레이션을 위하여 필요로 하는 부하모델을 위하여 본 연구에서는 그림 1에 보인 바와 같이 부하모선에 연결된 부하를 다항식 모델의 정태특성 부하와 등가 유도전동기의 동태특성 부하의 복합 형태의 부하로 표현하였다.

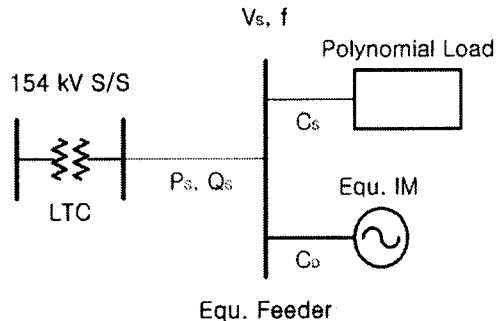


그림 1. 변전소에 연결된 복합 부하모델
Fig. 1 Combined Load Model in the S/S

2.1. 정태특성 부하 모델

변전소의 부하모선에 연결된 부하 중에서 정태 특성을 갖는 부하의 표현은 식 (1)과 같이 다항식으로 수식화하였다.

$$P_S^S(V, f) = a_{p0} + a_{p1}\Delta V + a_{p2}\Delta V^2 + a_{p3}\Delta V^3 + a_{p4}\Delta V^4 + a_{p5}\Delta V^5 + a_{p6}\Delta V\Delta f + a_{p7}\Delta V^2\Delta f + a_{p8}\Delta f^2 \quad (1)$$

$$Q_S^S(V, f) = a_{q0} + a_{q1}\Delta V + a_{q2}\Delta V^2 + a_{q3}\Delta V^3 + a_{q4}\Delta V^4 + a_{q5}\Delta V^5 + a_{q6}\Delta V\Delta f + a_{q7}\Delta V^2\Delta f + a_{q8}\Delta f^2$$

여기서, P_S^S : 정태특성 유효전력[p.u]

Q_S^S : 정태특성 무효전력[p.u]

ΔV : 전압의 변분[p.u]

Δf : 주파수 변분[p.u]

a_{p0}, \dots, a_{p8} : 유효전력 파라미터

a_{q0}, \dots, a_{q8} : 무효전력 파라미터

2.2. 동태특성 부하 모델

부하모선에 연결된 부하 중에서 동태특성을 갖는 부하를 그림 2와 같이 표현되는 등가 유도전동기 모델로 표현하였다[4].

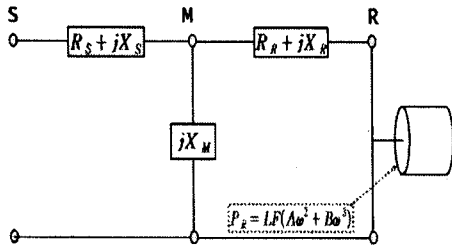


그림 2. 등가 유도전동기 모델

Fig. 2. Equivalent Induction Motor

3상 유도전동기의 해석은 일반적으로 d-q-0 변환에 의한 해석 방법이 사용되고 있으나, 이 방법의 해석은 미분방정식의 형태로 표현이 되고, 식 또한 복잡할 뿐만 아니라 계산이 어려워 효율적이지 못하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 2의 유도전동기 등가회로를 3개의 모선을 갖는 전력시스템으로 가정하여 정상상태 시뮬레이션 방법인 전력조류계산 방식을 제안하였다[5].

이러한 가정으로부터 동태특성을 갖는 부하모델은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_S^D &= f(V_S, f, Z) \\ Q_S^D &= f(V_S, f, Z) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, P_S^D : 동태특성 유효전력[p.u]

Q_S^D : 동태특성 무효전력[p.u]

V_S : 입력 전압[p.u]

f : 입력(시스템) 주파수[p.u]

Z : 유도전동기 파라미터[p.u]

회전부하가 연결된 유도전동기 등가회로인 그림 2에서 각주파수를 ω_m 이라고 하면 부하의 크기는

$$P_L = -P_R = LF(A\omega_m^2 + B\omega_m^3) \quad (3)$$

여기서, P_L : 기계적 부하[p.u]

LF: 부하계수[p.u]

A, B: 선형 및 2차항 기계 상수

그런데 유도전동기에 연결된 부하는 식 (4)와 같이 2차 등가 저항으로 표현할 수 있으므로

$$-P_R = \frac{V_R^2}{\frac{1-s}{s}r_2'} \quad (4)$$

여기서, s : 슬립

r_2' : 1차 측으로 환산한 2차 측 저항

식 (3)과 (4)로부터 부하 각주파수 ω_m 에 대하여 정리하면

$$\omega_m = \left(\frac{\omega_0}{V_R^2} \right) \left[1 - LF(A\omega_m^2 + B\omega_m^3) \right] \quad (5)$$

의 관계가 얻어진다.

유도전동기의 운전상태가 입력 측에 인가되는 전압과 주파수에 의하여 결정되므로 그림 2의 유도전동기 등가회로에 대한 정태특성을 회로 해석 방법인 전력조류계산 방법에 의하여 결정할 수 있다. 이러한 흐름을 보인 것이 그림 3이다.

2.3. 복합 부하 모델

본 연구에서 제안하는 복합 부하모델은 정태특성 부하와 동태특성 부하모델을 혼합한 형태로서, 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_S^{model}(V_S, f, X) &= C_D P_S^D + C_S P_S^S \\ Q_S^{model}(V_S, f, X) &= C_D Q_S^D + C_S Q_S^S \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, P_S^D, Q_S^D : 동태특성 유효 및 무효전력

P_S^S, Q_S^S : 정태특성 유효 및 무효전력

- V_S : 시스템 전압[p.u]
- X : 복합 부하모델의 파라미터
- C_D : 동태특성 부하의 구성비
- C_S : 정태특성 부하의 구성비

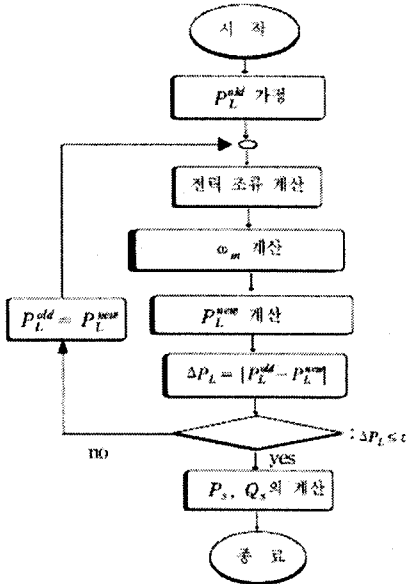


그림 3. 동태특성 부하 시뮬레이션
Fig. 3. Simulation of Dynamic Load

3. 시스템 식별법

일반적으로 수학적 모델을 구성하고 그 모델을 구성하는 최적의 파라미터 값을 실측치에 근거하여 구하는 거시적 방법을 시스템 식별이라고 한다. 이때 수학적 모델은 파라미터의 함수로 표현이 가능하여야 한다. 식별과정이 완료되었다는 것은 다음 4가지 과정이 수행되었음을 의미한다[5].

- (1) 식별자료
- (2) 식별모델의 선정
- (3) 식별 알고리즘의 개발과 수행
- (4) 결과의 확인

위의 4가지 과정이 정확하게 수행되어야 하므로 본 연구도 이 4과정에 맞추어 내용을 진행하였다.

전력시스템의 부하모선에 연결된 많은 종류의 부하를 하나의 단일화된 부하모델로 표현하기 위하여 본 연구에서 제안하는 복합 부하모델은 식 (6)과 같이 표현되는 동태특성 부하와 정태특성 부하이다. 따라서 복합 부하모델을 위한 시스템 식별법은 다항식으로 표현되는 정태특성 부하의 파라미

터와 등가 유도전동기로 표현되는 동태특성 부하의 파라미터를 현장에서 측정된 입력(시스템 전압과 주파수)를 이용하여 측정된 출력(유효 및 무효 전력)으로 표현하는 파라미터를 찾아내는 것이다. 본 연구에서는 시스템 식별법을 위하여 패턴서치 (Pattern Search)법과 순환형 최소자승(Recursive Least Square)법을 사용하였으며, 정태특성 부하의 파라미터와 동태특성 부하의 파라미터를 분리하여 식별하고, 두 부하의 구성비를 최종적으로 식별하는 방법을 제안하였다.

3.1. 패턴 서치법

파라미터의 식별방법 중에서 가장 단순한 방법으로 미지의 파라미터를 찾아내는 방법으로서, 측정된 값과 모델링 결과 값의 차가 최소가 되도록 하는 방법이다. 식 (7)은 패턴 서치법의 목적함수를 표현한 것으로서 파라미터 X 를 변화시키면서 목적함수를 최소화시키는 방법이다.

$$J = \sum_{j=1}^n [(P_{S,j}^{model}(X) - P_{S,j}^{mes})^2 + (Q_{S,j}^{model}(X) - Q_{S,j}^{mes})^2] \quad (7)$$

여기서, $P_{S,j}^{model}$: 유효전력 계산 값

$Q_{S,j}^{model}$: 무효전력 계산 값

X : 파라미터

$P_{S,j}^{mes}$: 유효전력 측정 값

$Q_{S,j}^{mes}$: 무효전력 측정 값

n : 측정값의 수

3.1. 순환형 최소자승법

파라미터의 식별방법 중에서 순환형 최소자승법은 이미 잘 알려져 있는 방법으로서 최소자승법의 확장된 형태이다. 현장에서 측정된 일정량의 데이터를 순환적으로 추가하면서 파라미터를 식별하는 방법이다.

$$Y_N = A_N X_N + E_N \quad (8)$$

여기서, Y_N : 측정 데이터 벡터

X_N : 파라미터 벡터

A_N : 모델링 행렬

E_N : 오차 벡터

파라미터 식별을 위하여 최소자승법의 평가지수(Performance Index)를 오차 제곱의 합으로 표현하여 파라미터에 대한 최소화 조건으로부터 파라미터를 구하는 것이다. 식 (9)는 순환형 최소자승법으로 표현된 파라미터 결정식이다.

$$P_N = (A_N^T A_N)^{-1} \quad (9a)$$

$$K_{N+1} = P_N A_{N+1}^T (I + A_{N+1}^T P_N A_{N+1})^{-1} \quad (9b)$$

$$X_{N+1} = X_N + K_{N+1} (Y_{N+1} - A_{N+1} X_N) \quad (9c)$$

여기서, K : 이득 행렬

N : 식별 단계

4. 사례 연구

본 연구에서 제안한 복합 부하모델링에 대한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 현장에서 측정된 데이터를 이용하여 두 가지의 사례연구를 수행하였다. 먼저 전력계통의 배전용 변전소에서 배전용 변압기의 탭을 단계적으로 변화시키면서 전압, 주파수, 부하 측의 유효전력과 무효전력을 측정할 경우와 두 번째는 전원 측의 갑작스런 출력변화에 의하여 부하의 특성을 측정할 경우이다.

4.1. 변압기 탭의 변화에 의한 부하 측정

전력계통의 배전용 변전소에서 부하용 변압기의 탭을 단계적으로 조정하여 부하에 인가되는 전압을 변화시키는 실험으로부터 얻어진 결과에 대한 사례연구를 수행하였다.

그림 4는 현장에서 측정된 전압과 주파수의 변화를 보인 것으로서 전압은 단계적으로 변화하고 있으나, 주파수는 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다.

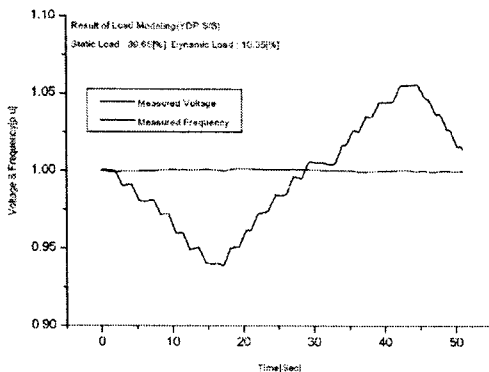


그림 4. 측정된 전압 및 주파수

Fig. 4. Measured Voltage & Frequency

그림 5와 6은 파라미터 식별법으로 구한 복합 부하모델링의 결과와 측정된 유효전력과 무효전력을 비교한 것으로서, 그림에서 보는 바와 같이 잘 맞고 있음을 확인할 수 있으며, 이 변전소에 연결된 부하는 정태특성 부하의 성질이 강한 것을 알 수 있다.

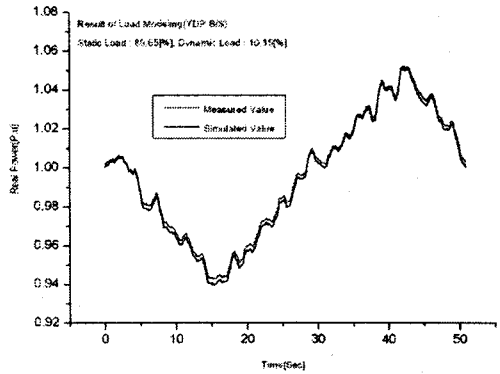


그림 5. 유효전력의 실측값과 식별값

Fig. 5. Measured and Simulated Value

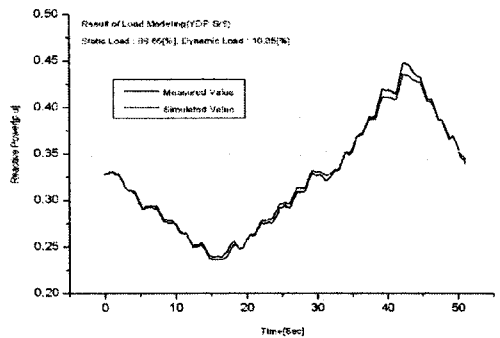


그림 6. 무효전력의 실측값과 식별값

Fig. 6. Measured and Simulated Value

4.2. 전원 측 변화에 의한 부하 측정

전원 측의 갑작스런 출력 변화에 의하여 부하 측의 입력 전압과 주파수가 동시에 변화한 경우에 대한 현장에서 측정된 결과로부터 본 연구에서 제안한 복합 부하모델의 결과를 비교하였다.

그림 7은 현장에서 측정된 전압과 주파수의 변화를 보인 것으로서 전압과 주파수가 동시에 변화하고 있음을 확인할 수 있으며, 그림 8과 9는 측정된 결과로부터 본 연구에서 제안한 복합 부하모델의 식별결과를 보인 것이다.

복합 부하모델의 식별결과가 측정결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 제안하는 복합 부하모델의 유용성을 입증되었다.

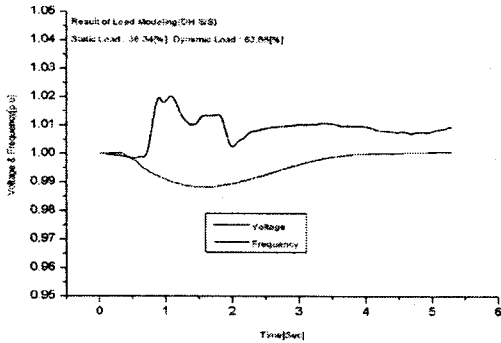


그림 7. 측정된 전압 및 주파수

Fig. 7. Measured Voltage & Frequency

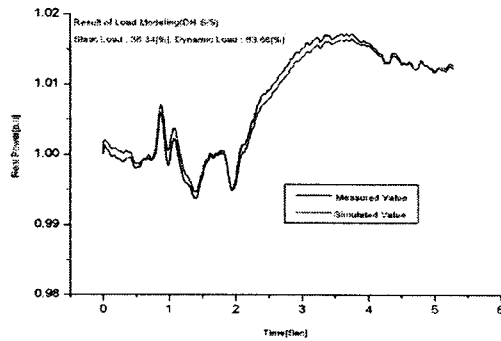


그림 8. 유효전력의 실측값과 식별값

Fig. 8. Measured and Simulated Value

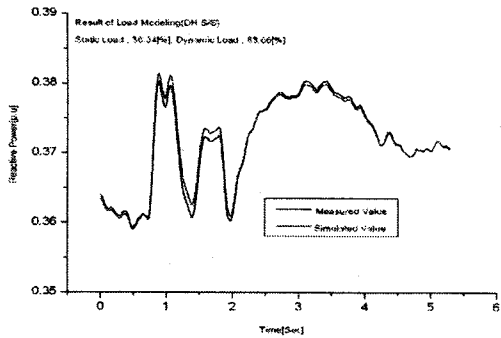


그림 9. 무효전력의 실측값과 식별값

Fig. 9. Measured and Simulated Value

5. 결론

본 연구에서는 전력시스템의 상태해석 및 시뮬레이션을 위하여 필요로 하는 부하특성을 모델링하는 알고리즘을 제안하였으며, 현장에서 측정된 데이터를 이용하여 정태특성 부하와 동태특성 부하를 혼합한 복합 부하 모델에 대하여 연구하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 전력시스템의 부하 모션 등에 연결되는 여러 종류의 부하에 대하여 정태특성 부하와 동태특성 부하로 분류하여 정태특성 부하는 다항식 모델을 동태특성 부하는 등가의 유도전동기 모델로 제안하였다.

나. 정태특성 부하와 동태특성 부하의 파라미터를 식별하는 알고리즘을 패턴서치법과 순환형 최소자승법을 단계적으로 사용하는 알고리즘을 제안하였다.

다. 현장에서 실측된 데이터를 이용하여 제안한 복합 부하모델을 적용하여 파라미터를 식별하였으며, 결과는 매우 만족할 정도로 일치하는 것을 확인하였다.

금후 전력시스템의 부하모델에 대한 좀 더 많은 검증을 위하여 현장의 데이터를 취득하고 분석하여 전력시스템의 해석 등에 적용할 수 있는 연구가 지속되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] EPRI, Determining Load Characteristics for Transient Performances, EPRI Report EL 849 prepared by U.T.A, G.E. and IREQ, 1979.
- [2] Ma Da-Qing, Ju Ping, A Novel Approach to Dynamic Load Modeling, IEEE PES Summer Meeting 1988, Paper 88SM647-4, 1988.
- [3] R. Hooke, T. A. Jeeves, Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems, Journal Assoc. Comp. Mach., Vol. 8, pp 212~229, 1954.
- [4] 심건보, 오기봉, "정태 증가회로해석에 의한 유도전동기 부하모델의 개발", 조명·전기설비학회 논문지 제16권 제1호, pp. 50~57, 2002
- [5] L. Ljung, T. Soderstrom, Theory and Practice of Recursive Identification, MIT Press, 1987.
- [6] Amuliu Bogdan Proca & Ali Keyhani, Identification of Variable-Frequency Induction Motor Models from Operating Data, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 17, No.1, 2002, 24-31.
- [7] T Lehtla, J Joller & J Laugis, Parameter Identification and Comparison of an Induction Motor Models, Power Electronics and Variable Speed Drives Conference, 2000, 201-205.