

실측에 의한 Static/Dynamic 부하모델 개발 연구

최흥관, 문영환, 윤재영, 전진홍 추진부, 윤용범
한국전기연구소 전력연구원

Study of Static/Dynamic Load Model by measurement

H.K. Choi Y.H. Moon J.Y. Yoon J.H. Jeon J.B. Choo Y.B. Yun
KERI KEPRI

Abstract - This paper presents the modeling methods to analyze the static and dynamic performances for practical power system loads using field measurement data. Also, it is included that the several modeling techniques using EMTDC program and field measuring method for real static dynamic loads. As a result of this study, through the comparisons between simulation results and measurement data, typical parameters of static and dynamic loads according to the variation of system voltage and frequency are given.

1. 서 론

본 논문의 목적은 실측에 의한 데이터를 토대로 동태 성능 분석을 위한 전력계통 부하 모델링으로 일반화하는 기법을 고찰하는 것이다.

전력계통 엔지니어는 계통의 강화나 성능을 위하여 운용 한계치를 조류해석결과나 안정도 해석을 바탕으로 판단하게 된다. 이때, 부족하거나 과다한 마진을 가진 계통을 구성하거나 신뢰성이 붕괴되는 경우에는 많은 비용의 소모는 물론 심각한 문제를 야기할 것임은 자명하다. 그러므로 전력계통을 해석하는 경우의 모델들은 모든 system 구성성분들에 대하여 적절하게 개발되어야 한다. 이러한 성분들로는 발전단, 송전설비, 배전설비, 부하장치 등이 있다. 그러나 발전을 위한 모델, 송/배전 설비 모델들은 많은 연구가 진행된 반면, 부하모델에 관한 연구는 상대적으로 경시되어 왔으며 이는 국내의 연구 결과물을 통해서도 쉽게 확인할 수 있으며, 부하 모델링에 관한 유용한 정보는 참고문헌 [4], [5], 그리고 IEEE Task Force on load representation for dynamic performance[6]를 통하여 얻을 수 있다.

부하 모델링을 수행하는 데에는 몇 가지 방법이 있으나 본 논문에서는 고장이나 사고시의 현장 실측결과를 이용하는 방안을 이용하였다. 이러한 방법은 fault recorder를 현장에 설치하여 그 실측결과를 토대로 분석하게 되는 데, 이러한 과정을 실험실에서 현장에서와 같은 고장이나 사고를 재현하고, 이를 토대로 실제 적용을 위한 기본 연구가 되도록 하였다. fault recorder를 활용하여 현장에서의 실제 사고나 고장시의 데이터를 취득하게 되므로 이러한 방법이 부하의 동태 성능을 위한 자료취득에 가장 적합한 방법이라 할 것이다.

2. 부하 모델

2.1 Static Load Model

같은 순간에 전압의 크기와 주파수의 함수로서 어떤 시 영역에서 유효전력과 무효전력을 표현하는 모델이다. 이러한 Static 부하모델은 정태 부하 성분(저항부하와

전동부하)과 동태 부하성분의 측약에 사용된다. 이러한 정태부하모델의 종류는 다음과 같다.

1. Constant Impedance Load Model
2. Constant Current Load Model
3. Constant Power Load Model
4. Polynomial Load Model

$$P = P_0 \left[a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_3 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[a_4 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + a_5 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_6 \right]$$

5. Exponential Load Model

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np}$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{mq}$$

6. Frequency-dependent Load Model

$$[1. + a_f(f - f_0)]$$

7. EPRI Loadsyn Static Load Model

$$P = P_0 \left\{ P_{a1} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{KPVI} [1 + KPFI(f - f_0)] + (1 - P_{a1}) \left(\frac{V}{V_0} \right)^{KPVI2} \right\}$$

$$Q = P_0 \left\{ Q_{a1} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{KQVI} [1 + KQFI(f - f_0)] \right.$$

$$\left. + \left(\frac{Q_0}{P_0 - Q_{a1}} \right) \left(\frac{V}{V_0} \right)^{KQVI2} [1 + KQFI(f - f_0)] \right\}$$

8. EPRI ETMSP Static Load Model

$$P = P(CI) + P(CMVA) + P(CZ) + P(V, f)$$

$$Q = Q(CI) + Q(CMVA) + Q(CZ) + Q(V, f)$$

이상과 같이 여러 종류의 모델들이 있으며, 각각 장단점을 가지고 있다. 본 논문에서의 정태 부하 모델은 현장에서 취득된 데이터를 활용하기 위하여 가장 일반적인 형태인 Constant ZIP (Constant Impedance, Constant Current, Constant Power)으로 구성한다. 향후 다음 식 (1), (2)와 같이 더욱 향상된 모델로 구성함으로써 저전압시의 방전램프류 등의 특성까지 고려함으로써 더욱 정확한 모델이 되도록 한다.

$$P = P_0 (V/V_0)^{Kpv} [1. + Kpv(f - f_0)] \tag{1}$$

$$Q = Q_0 (V/V_0)^{Kqv} [1. + Kqv(f - f_0)] \tag{2}$$

2.2 Dynamic Load Model

현재를 포함하고, 과거의 어느 한 시점에서 전압의 크기와 주파수의 함수로서 어느 한 시점을 유효전력과 무효전력으로 표현하는 모델이다. 미분 방정식이나 차분 방정식으로 이러한 모델링을 할 수 있다.

본 논문에서의 동태 부하 모델은 3상 유도전동기에 의한 표현으로 모델링하였다. 이렇게 모델링한 이유는 자속 dynamics는 제외하고 기계적인 dynamics를 포함

하는 모델이 가능하고 또한 부가적으로 rotor/stator flux dynamics도 가능하기 때문이다. 그러나 특별한 경우가 아닌 한 일반적으로 안정도 해석에서는 고정자/회전자 자속 dynamics는 무시한다.

3. 데이터 취득

합성부하 특성을 표현하기 위하여 데이터를 얻는 데에는 다음과 같은 두 가지 방법이 있다. 하나는 변전소나 급전소에서 부하 유효전력, 무효전력에 대한 전압과 주파수의 감도를 직접적으로 취득하는 방법이고, 또 하나는 변전소의 부하 class의 혼합비를 통하여 합성부하모델을 구성하는 것이다. 이는 각 부하 구성요소의 표준적인 특성과 각 부하계급의 구성을 기초로 한다. 이러한 접근법들은 장/단점을 가지고 있는데, 이를 간략히 알아보면 다음과 같다.

3.1 측정조건

실제상황을 가정하여 모든 부하는 3상 380V로 실험하였으며, 3상 전동부하 900W, 3상 전열부하 900W, 3상 유도전동기(정격 1.5kVA, 15A) 부하는 M-G set(Motor Generator set)을 이용하여 DC-Generator의 토크를 조정하여 유도전동기에 걸리는 부하를 가변하였다. 실험에 사용된 전원은 380V 3상전원이며, 자체 제작한 인버터(380V, 50A)를 이용하여 전압과 주파수를 제어하여 변동시험을 하였다. 데이터의 취득은 RMS값을 60Hz 기준으로 cycle당 4 sampling(240samples/sec)하여 데이터를 저장하는 장비를 이용하여 전압과 주파수 변동시험에 대한 데이터를 취득하였다. 또한 데이터 취득시 포함된 고주파 성분은 low-pass filtering 기능을 이용하여 제거함으로써 파라미터 추출시 부정확한 데이터의 활용을 미연에 방지하기 위하여 데이터를 가공하였다.

3.2 측정 구성도

실험 구성도는 그림과 같이 무한 모션으로부터 3상/380V의 전원을 충분한 용량을 가진 인버터를 거쳐 각각의 부하와 연결하고 그 사이에 Fault Recorder의 확장기능을 가진 Dynamic System Monitor를 연결하여 3상 전압/전류를 sensing하여 유/무효전력, 주파수를 계산/저장하여 데이터를 취득하였으며, 최대한 현장과 유사한 상황이 되도록 측정장비를 설정하여 정상상태의 데이터는 물론 동태상태의 데이터를 자동적으로 취득할 수 있도록 구성하였다.

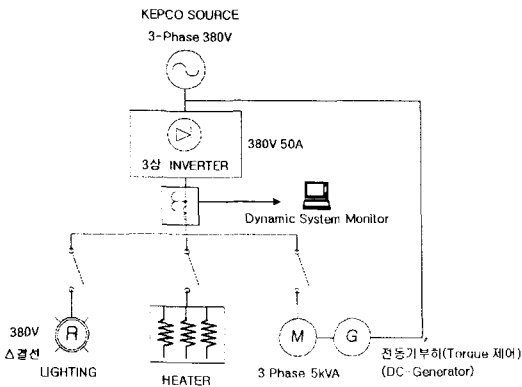
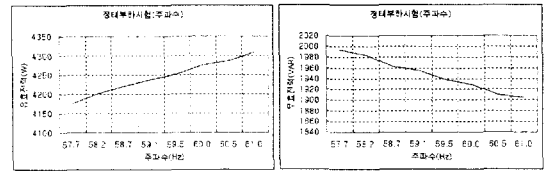


그림 1 측정 구성도

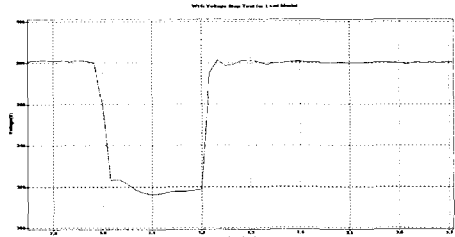
3.3 측정결과

그림 2는 전동부하, 전열부하, 유도전동기 부하의 일정 전압에 대해서 주파수의 변화에 대한 유효전력과 무효전력의 특성을 시험한 것이다.

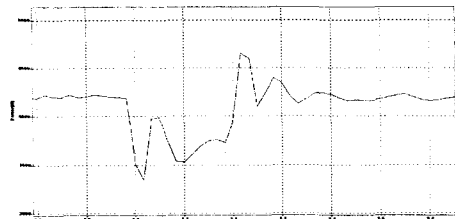


(a) 유효전력 (b) 무효전력
그림 2 정태부하시험(주파수)

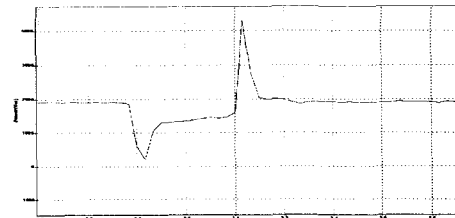
다음 그림들은 전압이 0.8pu로 0.2초간 강하후 1.0pu로 복구할 때의 부하 dynamics를 도시한 것이다. 저전압 tripping이 안정도 해석이나 저전압과 관련된 연구에서 중요한 문제이기 때문이다. 도시된 그림들의 부하구성은 전동부하 900W, 전열부하 900W, 유도전동기 부하 2.5kW로 실험된 결과이다. 순서대로 전압, 유효/무효 전력 파형이다.



(a) 측정된 전압(V)



(b) 측정된 유효전력(W)



(c) 측정된 무효전력(VAR)

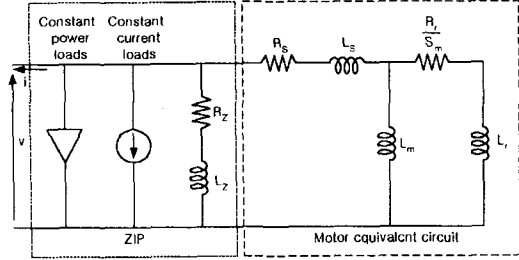
그림 3 측정된 전압, 유효/무효 전력

4. Modeling

4.1 Static/Dynamic Modeling

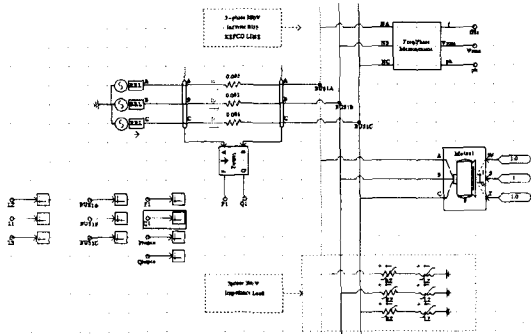
정태부하는 ZIP 모델로, 동태부하는 표준적인 유도전동기 모델을 사용하여 그 파라미터를 수정하여 모델링하였다. 이 모델에서 사용된 slip은 버스전압의 주파수에

서 모터 속도를 뺀 값이다. 또한 각각의 부하비를 반영하여 EMTDC를 이용하여 모델을 구성하였다.

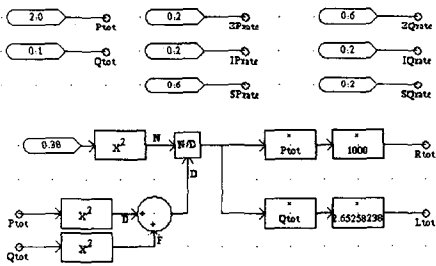


(a) 구현한 부하 모델링

여기서, s:모터 slip, R2/L2:rotor축 값
Lm:자속, R1/L2:전기자속 값



(b) EMTDC 모델 구성(PSCAD)

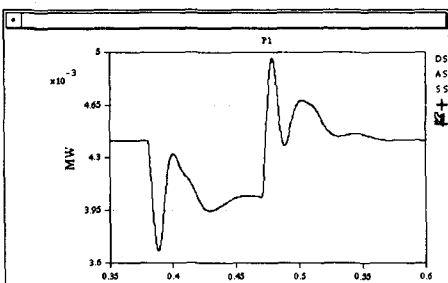


(c) 부하비 구성(EMTDC 모델 설정)

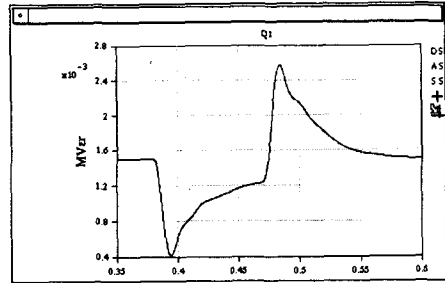
그림 4 부하 모델링과 EMTDC 모델 구성

4.2 Simulation 검증

다음 그림들은 위에서 제시한 모델을 EMTDC의 PSCAD로 Simulation한 결과를 도시한 것으로 유효전력과 무효전력을 나타내고 있다. 실제 측정된 파형과 Simulation 파형이 비교적 정확하게 일치하고 있으며 이러한 case에 사용된 유도전동기의 파라미터들을 나타내면 표1과 같다.



(a) 유효전력



(b) 무효전력

그림 5 EMTDC Simulation

표 1 유도전동기 파라미터들

R1	Stator Resistance	0.064	p.u.
R2	First Cage Resistance	0.39	p.u.
R3	Second Cage Resistance	0.09	p.u.
J	Polar Moment of Inertia	0.049	MWs/MVA
D	Mechanical Damping	0.089	p.u.
OMO	Base Angular Frequency	376.9	rad/s

이러한 기법으로 실제 현장에서 측정된 부하단의 파형을 본 논문에서 구현한 부하모델링으로 표현하고 그 파라미터를 찾아내어 Simulation함으로써 신뢰성있는 부하모델을 만들 수 있음을 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 부하모델링을 구현하는 방법으로 현장에서 취득된 데이터를 바탕으로 각각의 파라미터를 찾아내어 부하모델을 모델링하는 기법을 실제 시험을 통하여 확인하고 그 가능성을 보였다. 그러나 Static 부하모델은 현재 간단한 모델로 구성되어 저전압(0.8pu 이하) 변동시 오차가 있으므로 식(1),(2)로 대체하면 더욱 정확한 모델링이 될 것이다. 차후에 이러한 기법을 현재 제어계통에 설치되어 있는 DSM/6(Dynamic System Monitor) 장비에서 실제 취득된 데이터에 적용하여 유용성을 평가할 예정이다.

(참고 문헌)

- [1] M.S. Chen, "Determining Load Characteristics for Transient Performance," EPRI Report EL-840, Project RP849-3, 1979.
- [2] K. Srinivasan, C. Nguyen, Y. Robichaud, A. St. Jacques, G. Rodgers, "Load Response Coefficients Monitoring System: Theory and Field Experience," IEEE Trans. PAS-100, pp.3818-27, Aug. 1981.
- [3] T. Gentile, S. Ihara, A. Murdoch, N. Simons, "Determining Load Characteristics for Transient Performance," EPRI Report EL-850, Project RP849-1, 1981.
- [4] IEEE Committee Load representation for dynamic performance analysis. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2), 472-482
- [5] CJGRE Task Force 38.02.05. Load modeling and dynamics. Electra, 1990, 130, 123-141
- [6] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3), 1302-1313