

정태 등가회로해석에 의한 유도전동기 부하모델의 개발

(Development of Load Modeling for Induction Motor Using Steady-state Equivalent Circuit)

심건보* · 오기봉

(Keon-Bo Shim · Kie-Bong Oh)

요 약

전력시스템의 정밀 해석을 위해서는 부하모델이 정확하게 표현되어야 하는데, 이러한 부하 중에서 유도전동기는 가정용, 상업용 및 산업용의 전 분야에서 가장 큰 비중을 차지하는 부하이다. 본 논문은 부하로서의 유도전동기에 대하여 복잡하고 어려운 시뮬레이션의 해법을 해결하고자 하는 노력으로서, 일반적으로 알려져 있는 유도전동기의 정태 등가회로를 이용하여 정태특성을 시뮬레이션하는 새로운 부하 모델을 제안하고, 파라미터를 알고 있는 유도전동기의 특성실험을 수행하였으며, 이 실험으로부터 얻어진 데이터를 제안된 정태 등가회로 해석에 의한 유도전동기의 부하모델 알고리즘에 적용하는 사례연구를 통하여 제안한 정태회로 해석에 의한 유도전동기 부하 모델의 효용성을 평가하였다.

Abstract

A substantial portion of power system load is made of large induction motors. Accordingly, static and dynamic simulation of induction motors are very important in the power flow and transient stability analysis.

The purpose of this paper is to report the development of load modeling for induction motor using the steady-state equivalent circuit. A proposed simulation model of induction motor lets simulation under wide range varying voltages and frequencies be very easy and exact. This paper is presented through a case study, and its feasibility is demonstrated via simulation and experiments.

Key Words : induction motor, load modeling, power system analysis, simulation

1. 서 론

현대의 문명사회에서 인간이 활용하고 있는 에너지 중에 전기에너지는 사용이 매우 간편하고 제어하기 쉬운 에너지일 뿐만 아니라, 인간의 생활을 윤택하게 하고 능력을 확대시키는 데에 필수적이다. 이러한 전격에너지를 공급하는 전력시스템의 구성요소는

* 주저자 : 홍익대학교 과학기술연구소
Tel : 338-1621, Fax : 320-1110
E-mail : kbshim@hitel.net
접수일자 : 2001년 10월 17일
1차심사 : 2001년 10월 30일
2차심사 : 2001년 11월 7일
심사완료 : 2002년 1월 4일

크게 전원(source), 송전선로(transmission line) 그리고 부하(load)로 구분될 수 있다.

전력시스템의 정밀한 해석을 위해서는 시스템의 모든 구성요소들을 수학적 표현에 의하여 적절하게 모델화 하는 것이 중요한 문제이다. 현재까지 전력시스템의 설비 중, 발전기, 변압기 및 송전선로 등에 대한 모델링은 상당히 정밀화되어 있으나, 부하의 특성(전압과 주파수의 변화에 대한 유효 및 무효전력의 특성)에 대한 모델화는 상대적으로 매우 미흡한 상태에 있다. 특히, 전력시스템의 해석이나 안정도 해석을 하는 경우에 부하(유효전력 및 무효전력)는 그 크기가 일정한 것으로 표현되어 왔으나, 실제의 부하는 전압과 주파수의 함수로 표현되어 크기가 일정하지 않다는 점이 일찍부터 인식되어 왔다[1]~[3].

전력시스템에 연결되는 많은 부하 중에서 유도전동기는 가정용, 상업용 및 산업용의 전 분야에서 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 특히 대용량의 유도전동기는 부하의 주요한 특성을 나타내고 있다. 따라서 전력시스템에서 유도전동기의 시뮬레이션은 매우 중요한 문제로서 아직까지 유도전동기의 시뮬레이션은 고정자와 회전자의 관계로부터 고차 미분방정식을 사용하여 시뮬레이션 함으로써 달성될 수 있었다. 그러나, 이 방법은 해를 얻기 위한 계산의 과정이 복잡하고 어려우며 효율적이지 못하다는 문제점을 가지고 있다[4]~[7].

본 논문은 전력부하로서의 유도전동기에 대하여 복잡하고 어려운 시뮬레이션의 해법을 해결하고자 하는 노력으로서, 일반적으로 알려져 있는 유도전동기의 정태 등가회로[7],[8]을 이용하여 정태특성을 시뮬레이션하는 새로운 부하 모델을 제안하고, 파라미터를 알고 있는 유도전동기의 특성실험을 수행하였으며, 이 실험으로부터 얻어진 데이터를 제안된 정태 등가회로 해석에 의한 유도전동기의 부하모델 알고리즘에 적용하는 사례연구를 통하여 제안한 정태회로 해석에 의한 유도전동기 부하 모델의 효용성을 평가하였다.

2. 유도전동기의 등가회로 모델

전력시스템에 연결되는 여러 가지의 부하 중에서 유도전동기의 시뮬레이션 모델을 위하여 정태특성의 T 등가회로를 우선 선정하였다[7],[8].

3상 교류시스템에서는 모델의 간략화 및 회로해석의 편리를 위하여 여러 가지의 좌표축 변환이 이용되고 있으며, 특히 유도전동기 및 동기기 등의 전기 기기에서는 d-q-0 변환이 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이러한 d-q-0 변환에 의한 유도전동기의 해석은 미분방정식의 형태로 표현이 되고, 또한 식이 복잡할 뿐만 아니라 계산에 많은 노력이 필요하므로 효율적이지 못하다. 따라서 본 논문에서는 3상 대칭 유도전동기의 정상상태에 대한 등가회로를 도입하였으며, 유도전동기 등가회로에서 2차 회로에 부하가 연결된 상태를 표현한 것이 그림 1의 T 등가회로이다.

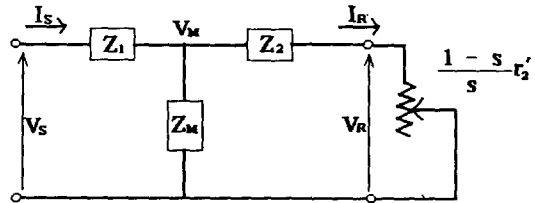


그림 1. 유도전동기의 T-등가회로
Fig. 1. T-Equivalent Circuit of Induction Motor

그림 1의 유도전동기 정태 등가회로에서 각 파라미터는 다음과 같다.

$$z_1 = r_1 + jx_1 \tag{1}$$

$$z_2 = r_2'/s + jx_2' \tag{2}$$

$$z_M = jx_M \tag{3}$$

여기서, r_1 = 고정자 저항

x_1 = 고정자 리액턴스

r_2' = 고정자측으로 환산한 2차측 저항

x_2' = 고정자측으로 환산한 2차측 리액턴스

x_M = 자화 리액턴스

s = 슬립

본 논문에서는 그림 1의 유도전동기 등가회로를 모선이 3개인 소규모의 전력시스템으로 가정하였다. 이것은 유도전동기의 정상상태 시뮬레이션이 전력조류계산방법에 의하여 그 상태가 결정될 수 있음을 의미한다. 따라서 유도전동기의 3개 모선을 차례로 S 모선, M모선 그리고 R모선으로 생각할 수 있다.

전력시스템의 모든 상태가 모선전력방정식의 형태

정태 등가회로해석에 의한 유도전동기 부하모델의 개발

로 표현될 수 있는 것과 마찬가지로 각 모선의 전력 방정식이 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$P_S = V_S^2 G_{SS} + V_S V_M (G_{SM} \cos \delta_{SM} + B_{SM} \sin \delta_{SM}) \quad (4)$$

$$Q_S = -V_S^2 B_{SS} + V_S V_M (G_{SM} \sin \delta_{SM} - B_{SM} \cos \delta_{SM}) \quad (5)$$

$$P_M = V_M V_S (G_{MS} \cos \delta_{MS} + B_{MS} \sin \delta_{MS}) + V_M^2 G_{MM} + V_M V_R (G_{MR} \cos \delta_{MR} + B_{MR} \sin \delta_{MR}) \quad (6)$$

$$= 0$$

$$Q_M = V_M V_S (G_{MS} \sin \delta_{MS} - B_{MS} \cos \delta_{MS}) - V_M^2 B_{MM} + V_M V_R (G_{MR} \sin \delta_{MR} - B_{MR} \cos \delta_{MR}) \quad (7)$$

$$= 0$$

$$P_R = V_R^2 G_{RR} + V_R V_M (G_{MR} \cos \delta_{MR} + B_{MR} \sin \delta_{MR}) \quad (8)$$

$$Q_R = -V_R^2 B_{RR} + V_R V_M (G_{MR} \sin \delta_{MR} - B_{MR} \cos \delta_{MR}) \quad (9)$$

$$= 0$$

여기서, P_S, P_M, P_R : S, M, R 모선의 유효전력
 Q_S, Q_M, Q_R : S, M, R 모선의 무효전력
 V_S, V_M, V_R : S, M, R 모선의 전압 크기
 δ_{ij} : i-j 모선의 전압 위상각차
 G_{ij}, B_{ij} : i-j 모선의 모선어드미턴스(실수부와 허수부)

M모선은 부하가 달려있지 않으므로 유효전력과 무효전력이 0 이고, R모선의 무효전력이 0인 것은 실제의 유도전동기 부하가 유효전력 에너지만 소비한다.

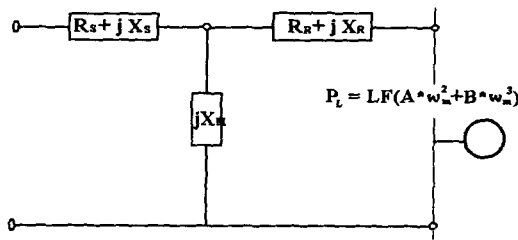


그림 2. 회전부하가 연결된 상태의 유도전동기 등가회로
 Fig. 2. Equivalent Circuit with Load

그림 2는 회전부하가 연결된 유도전동기 등가회로를 표시한 것으로서, 그 각주파수를 ω_m 이라 하면, 부하의 크기는

$$P_L = -P_R \quad (10)$$

$$= LF (A \omega_m^2 + B \omega_m^3)$$

여기서, P_L : 기계적인 부하(Mechanical Load)

LF : 부하계수 (Loading Factor) [p.u]

A : 기계 상수(Linear Mechanical Coefficient)

B : 기계 상수(Quadratic Mechanical Coefficient)

와 같다. 그런데 유도전동기에서 부하는 다음과 같이 2차 등가 저항으로 주어지므로

$$-P_R = \frac{V_R^2}{\frac{1-s}{s} r_2} \quad (11)$$

이고, 식 (10)과 (11)로부터

$$V_R^2 = \frac{\omega_m}{\omega_0 - \omega_m} r_2 LF (A \omega_m^2 + B \omega_m^3) \quad (12)$$

여기서, ω_0 : 입력 각주파수

ω_m : 부하 각주파수

의 관계를 얻을 수 있다. 다시 식 (12)를 부하주파수 ω_m 에 대하여 정리하면

$$\omega_m = \frac{1}{V_R^2} [\omega_0 V_R^2 - r_2 LF (A \omega_m^3 + B \omega_m^4)] \quad (13)$$

의 관계가 얻어진다.

여기서 식 (10)은 유도전동기의 전기적인 부하와 기계적인 부하의 관계를 맺어주는 식으로서, 유도전동기를 전력부하의 관점에서 표현하고자 하는 경우에 P_S 와 Q_S 의 결과만이 필요한 값이 된다.

모선 S를 기준 모선으로 하면 전력조류계산을 수행하는 경우에 전기회로에서 실제로 계산되는 전력 값은 R모선의 전력 P_R 과 Q_R 뿐이므로 유도전동기의 계산이 매우 용이하게 처리될 수 있음을 알 수 있다. 그런데 V_S 가 인가된 상태에서 부하 측의 ω_m 이 결정되지 않으면 $P_L (= -P_R)$ 을 알 수 없고, 또한 P_R 을 모르면 회로방정식을 풀 수가 없다. 결국 가정된 P_R 로부터 V_R 이 결정되고 V_R 로부터 ω_m 이 결정되어 P_L 이 개선되고, 다시 V_R 을 결정해야 하는 반복계산이 요청되는 점을 알 수 있다. 이러한 등가 유도전동기에 대한 전력조류계산의 조건을 표시한 것이 <표 1>이다.

표 1. 유도전동기 시뮬레이션의 조건
table 1. Conditions of simulation for induction motor

LOAD FLOW CONDITION	NODE	NODE TYPE	P	Q	V	δ
S	SLACK	-	-	GIVEN	0	
M	LOAD	0	0	V_M	δ_M	
R	LOAD	$-P_R$	0	V_R	δ_R	

3. 유도전동기의 정태 특성 시뮬레이션

일반적으로 유도전동기의 특성을 나타내기 위한 시뮬레이션은 회전자의 전압, 전류 및 자속을 d-q 성분으로 나누어 처리하며, 평형부하를 전제할 때 고정자와 회전자에 대한 d-q 성분 각 2개의 미분방정식과 부하에 대한 미분방정식을 합하여 5차 미분방정식으로 정리된다[8]. 여기서, 고정자 회로의 상태 변화가 급속히 감소된다는 성질을 이용하여 3차 미분방정식을 사용함으로써 계산의 정밀성을 크게 희생시키지 않고서도 계산의 효율성을 높일 수 있다. 더 나아가서 실제의 전력시스템 응용 면에서는 고정자와 회전자 상태변화의 급속한 감소변화가 전제될 수 있으며, 1차 미분방정식만을 사용하여도 충분하다는 것이 최근의 견해이다. 그러나 이 방법은 미분방정식을 풀어야 한다는 어려움을 가지고 있어서 효율적이지 못하다. 따라서 본 논문에서는 앞에서 제안된 유도전동기의 정태 등가회로에 의한 특성 시뮬레이션 방법을 제안하였다.

유도전동기의 운전상태는 입력 측에 인가되는 전압 V_s 와 주파수 f 에 의하여 결정된다. 이미 앞에서 언급된 바와 같이 유도전동기의 정태특성은 일반 전력시스템에서 상태해석을 위하여 사용하고 있는 전력조류계산법을 이용하여 시뮬레이션할 수 있으며, 식 (4)~(9)의 관계식은 다음과 같은 반복계산과정을 거쳐 수행된다. 그림 3에 계산의 흐름도를 보였다.

과정 1) 입력단의 전압 V_s 및 입력 각주파수 ω_0 를 지정한다.

과정 2) 기계적인 출력 P_L 을 가정한다.

과정 3) T 등가회로에 대하여 전력조류계산을 수행한다.

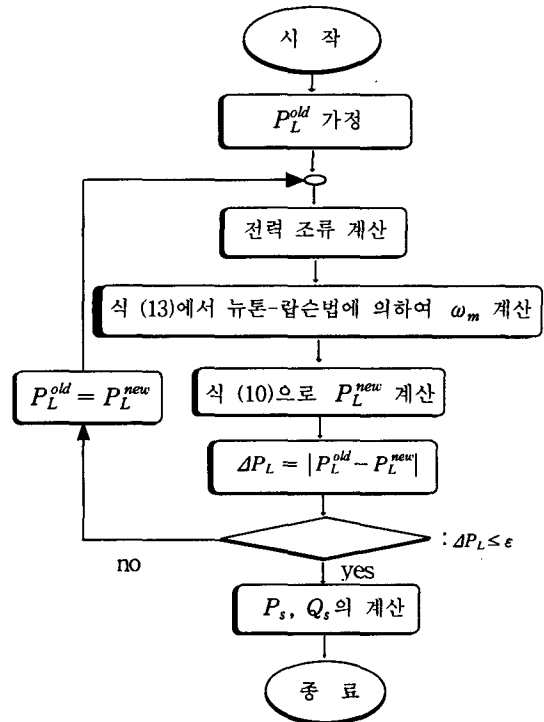


그림 3. 계산의 흐름도
Fig. 3. flowchart simulation

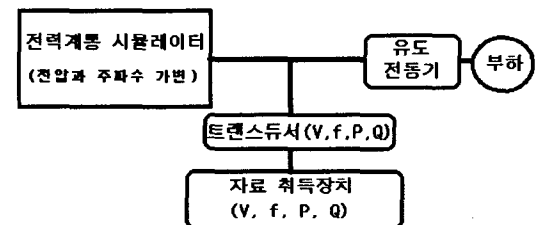


그림 4. 유도전동기의 운전 특성 시험 블록선도
Fig. 4. Block-diagram for test of Induction motor

과정 4) 기계적인 회전력을 계산한다.

과정 5) 기계적인 출력 P_L 을 수정한다.

과정 6) 기계적인 출력의 변화분 ΔP_L 이 허용오차보다 작으면 계산을 중지하고, 그렇지 않으면 과정 2로 가서 반복 수행한다.

4. 유도전동기의 특성실험

본 논문에서는 유도전동기의 정태 운전 특성을 시

정태 등가회로해석에 의한 유도전동기 부하모델의 개발

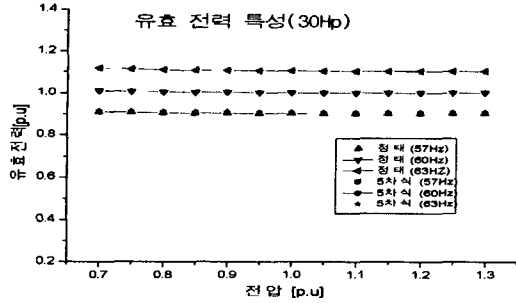


그림 5. 유효전력 특성 (30Hp) 유도전동기
Fig. 5. Characteristics of Real power (30 Hp)

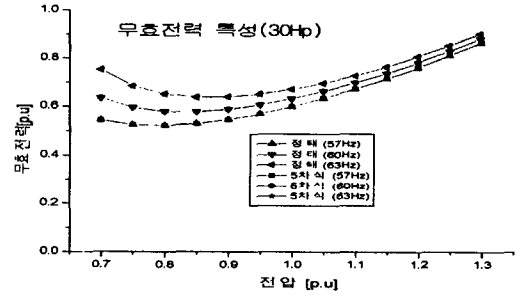


그림 6. 무효전력 특성 (30 Hp) 유도전동기
Fig. 6. Characteristics of Reactive power (30 Hp)

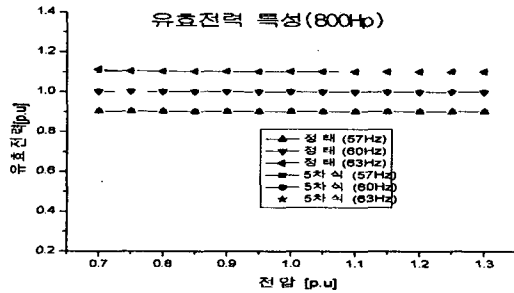


그림 7. 유효전력 특성 (800 Hp) 유도전동기
Fig. 7. Characteristics of Real power (800 Hp)

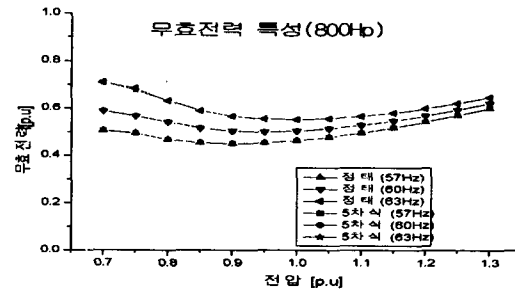


그림 8. 무효전력 특성 (800 Hp) 유도전동기
Fig. 8. Characteristics of Reactive power (800 Hp)

협하기 위하여 그림 4와 같은 회로를 구성하였다.

그림 4에서 전력계통 시뮬레이터는 유도전동기에 전원을 공급하기 위한 장치로서, 전압과 주파수를 변환할 수 있는 기능을 가지고 있다. 따라서, 전력계통 시뮬레이터에서 주파수를 57, 60 및 63[Hz]로 각각 고정시키고, 운전 전압을 1.0~0.9~1.0~1.1~1.0[p.u]의 순서로 변화시키면서 실험 대상 유도전동기의 입력 측에서 나타나는 전압, 주파수, 유효전력 및 무효전력의 변화 데이터를 1초에 100개씩 자료 취득장치에 기록한다.

5. 사례 연구

본 논문에서 제안한 유도전동기의 정태 등가회로 해석에 의한 부하모델에 대한 효용성을 검증하기 위하여 두 단계의 사례연구를 수행하였다.

5.1 정태 특성 시뮬레이션

본 논문에서 제시된 등가회로해석에 의한 유도전동기의 부하모델을 이용하여 시뮬레이션의 결과가 잘 알려져 있는 용량별 주요 유도전동기[3]에 대한 정태 특성 시뮬레이션을 수행하였다. 30 및 800 [Hp]의 유도전동기에 대하여 전압은 0.7~1.3[p.u], 주파수를 0.95, 1.0 및 1.05[p.u]의 범위에서 변화시키면서 정태특성 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 전압과 주파수의 변화에 대한 유효전력과 무효전력의 변화로 나타냈다. 또한, 고정자와 회전자에 대한 d-q 성분의 각 2개의 미분방정식과 부하에 대한 미분방정식을 포함하는 5차 미분방정식의 정밀해석 결과[9]와 비교하였다. 그림 5는 30[Hp]의 유도 전동기에 대한 유효전력의 시뮬레이션 결과를 보인 것으로서, 전압의 변화에 대하여 매우 작은 크기의 변화를 나타내고 있으며, 주파수에 대하여는 유효전력의 크기가 크게 변화하고 있음을 보이고 있어서 이미 잘 알려져 있는 내용과 일치함을 알 수 있다.

그림 6은 30 [Hp]의 유도전동기에 대한 무효전력

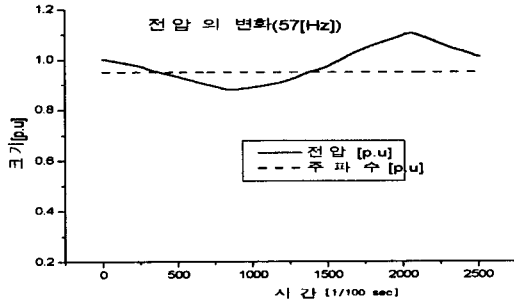


그림 9. 실측된 전압 및 주파수 변화 (57 (Hz))
Fig. 9. Measured voltages and frequencies (57 (Hz))

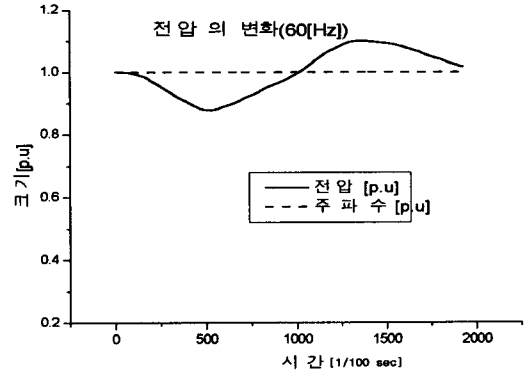


그림 10. 실측된 전압 및 주파수 변화 (60 (Hz))
Fig. 10. Measured voltages and frequencies (60 (Hz))

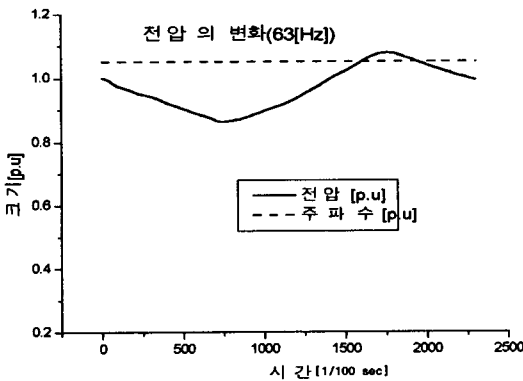


그림 11. 실측된 전압 및 주파수 변화 (63 (Hz))
Fig. 11. Measured voltages and frequencies (63 (Hz))

의 결과를 보인 것으로서, 잘 알려져 있는 바와 같이 무효전력이 전압의 변화에 대하여 2차식의 변화 특성을 나타내고 있으며, 정밀 해석법의 결과와 정태회로 해석법에 의한 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 7과 8은 800 [Hp]의 유도전동기에 대한 유효전력과 무효전력의 결과를 보인 것으로서, 30 [Hp]의 유도전동기 결과와 비슷한 결과를 보이고 있다. 따라서, 유도전동기의 정밀 해석법에 의한 시뮬레이션은 5차의 미분 방정식을 풀어야 하는 어려움이 있으나, 본 논문에서 제안하는 정태회로 해석법에 의하여 쉽게 시뮬레이션이 가능하며 결과 또한, 전압과 주파수의 변화에 대한 유효전력과 무효전력의 변화 특성이 두 해석 방법에 의한 결과가 거의 일치한다는 것을 알 수 있다.

5.2 실험 결과에 대한 정태 특성 시뮬레이션

본 논문에서 제안하고자 하는 유도전동기의 정태 등가회로해석법에 의한 결과를 검증하기 위한 두 번째 방법으로 파라미터를 알고 있는 소형 1/2 [Hp] 유도전동기에 대하여 실험실에서 특성실험을 수행하여 얻어진 결과와 정태 회로해석법에 의한 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

먼저 그림 4와 같은 회로를 구성하여 유도전동기가 실제 전력부하로서 동작되는 상황을 고려하기 위한 방법으로 전력계통 시뮬레이터에 연결된 상태의 유도전동기에 대하여 주파수를 57, 60 및 63 [Hz]로 각각 고정하고, 전압을 약 0.9~1.1 [p.u] 범위에서 변화시키며, 유도전동기 입력 측의 전압, 주파수, 유효전력 및 무효전력의 데이터를 초당 100개씩 기록하였다. 그림 9, 10 및 11은 각각 57, 60 및 63 [Hz]에서의 측정된 전압의 변화 특성을 보여준 것이다. 그림 12, 13 및 14는 각각 그림 9, 10 및 11의 주파수에서 전압의 변화에 대한 유효 및 무효전력의 측정값과 본 논문에서 제안하는 정태회로 해석법에 의한 결과 및 5차 미분방정식에 의한 결과를 비교한 것으로서, 그림에서 보는 바와 같이 각각의 주파수에서 전압변화에 대한 유효 및 무효전력의 변화가 두 가지의 시뮬레이션 결과와 측정된 결과가 약간씩의 오차는 있으나, 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 측정된 결과는 일반적으로 알려져 있는 바와 같이 전압의 변화에 대한 유도전동기의 유효전력 변화는 거

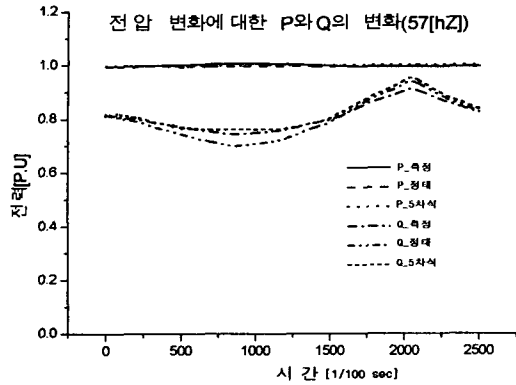


그림 12. 전압변화에 대한 전력의 변화 (57 (Hz))
Fig. 12. Variation of power versus voltage (57 (Hz))

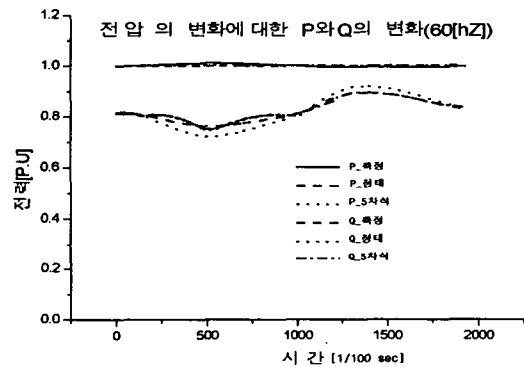


그림 13. 전압변화에 대한 전력의 변화 (60 (Hz))
Fig. 13. Variation of power versus voltage (60 (Hz))

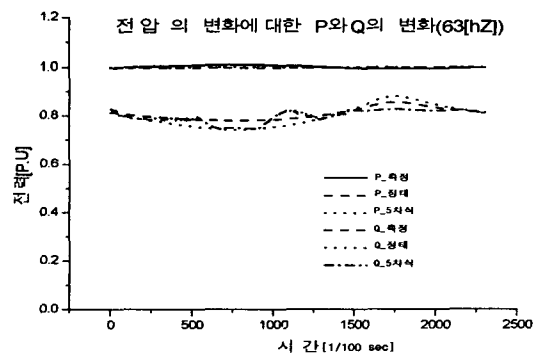


그림 14. 전압변화에 대한 전력의 변화 (63 (Hz))
Fig. 14. Variation of power versus voltage (63 (Hz))

의 없으며, 무효전력의 변화는 크게 나타나는 것을

확인할 수 있었다. 따라서, 이러한 실측 결과와의 비교를 통해서도 본 논문에서 제안하는 정태 등가회로에 의한 유도전동기 시뮬레이션 방법의 효용성이 충분히 입증되었다고 할 수 있다.

6. 결론

전력시스템의 정밀 해석을 위해서는 부하모델이 정확하게 표현되어야 하는데, 이러한 부하 중에서 유도전동기는 가정용, 상업용 및 산업용의 전 분야에서 가장 큰 비중을 차지하는 부하이다. 본 논문에서는 유도전동기의 운전 특성을 시뮬레이션하기 위한 정태 등가회로 해석법을 이용하여 전력부하로서의 유도전동기 시뮬레이션 모델을 제안하였으며, 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 전력부하로서의 유도전동기 시뮬레이션을 위한 정태 등가회로 해석법의 새로운 모델을 제안하였다.

2) 전압과 주파수에 대한 넓은 범위의 변화에 대해서도 제안된 유도전동기 시뮬레이션 모델은 정태 특성을 적합하게 표현할 수 있음을 보였다.

3) 정태 특성 시뮬레이션 모델의 결과를 정밀해석법인 5차 미분방정식의 결과와 비교 분석하였으며, 두 해석법의 결과에서 전압과 주파수의 변화에 대한 유효 및 무효전력의 변화 특성이 상당히 일치하는 결과를 보였다.

4) 제안된 모델의 효용성을 입증하기 위하여 실험실에서 실제의 유도전동기에 대한 전압과 주파수 변화에 대한 유효 및 무효전력의 특성 실험을 실시하였으며, 실측된 결과와 시뮬레이션 결과를 비교 분석한 결과도 유효 및 무효전력의 변화 특성이 상당히 일치하는 결과를 나타내고 있다.

5) 실험 결과에서도 보는 바와 같이 유도전동기의 운전특성이 전압의 변화에 대한 유효전력은 거의 변화하지 않으며, 무효전력은 2차식의 형태로 변화한다는 점을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 전력부하로서의 유도전동기 시뮬레이션 모델은 앞으로 전력시스템의 안정도 해석을 위한 목적으로 동태특성을 고려할 수 있는 모델로 좀 더 개선되어야 할 것으로 사료된다.

References

- [1] C. Concordia, S. Ihara, "Load Representation in Power System Stability Studies", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, pp. 967~977, 1982.
- [2] R.T. Byerly, F.T. Kimbark, "Stability of Large Electric Power Systems", IEEE Press, 1974.
- [3] University of Texas at Arlington, Determining Load Characteristics for Transient Performance, Vol. 1~3, EPRI Report EL-849, 1979.
- [4] P.C. Krause, C.H. Thomas, "Simulation of Symmetrical Induction Machinery", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-84, pp. 1038~1053, 1965.
- [5] G. Richards, P.R.R. Sarma, "Reduced Order Models for Induction Motors with Two Rotor Circuits", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, pp. 673~678, 1994.
- [6] Y. Kaiaoka, "State Variable Description of Dynamic Load Models in Electrical Power System Analysis", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 10, pp. 149~157, 1995.
- [7] B. C. Lesieutre, P. W. Sauer, M. A. Pai, "Development and Comparative Study of Induction Machines Based Dynamic P, Q Load Models", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 10, pp. 182~191, 1995.
- [8] P.C. Krause, Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hill Book Co., New York, 1987.
- [9] 한국전력 기술연구원, 전력계통 안정도 해석을 위한 적정 부하모델에 대한 연구, 1990.

◇ 저자소개 ◇

심 건 보 (沈建輔)

1957년 2월 1일생. 1980년 2월 홍익대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 2월 홍익대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 2월 홍익대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 관심분야 : 전력계통해석 및 운용, 접지시스템.

오 기 봉 (吳基鳳)

1937년 12월 26일. 1962년 1월 연세대학교 이공대학 전기공학과 졸업. 1974년 2월 연세대학교 산업대학원 전기공학과 졸업. 1992년 2월 홍익대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1972년~현재 서울산업대학교 전기공학과 교수. 현재 당학회 회장.