

과전류 부하에서 5상 농형 유도전동기의 정수 특성

(Parameters Estimation Characteristics of Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor within Over Current Load)

김민회*

(Min-Huei Kim)

Abstract

This paper propose a variable parameter estimations for variable over current load of five-phase squirrel-cage induction motor(IM) to servo control system. In order to high performance control of AC motor using a field oriented control(FOC) and direct torque control(DTC) algorithm, there are required precise motor parameters for slip calculation, flux observer, controller gain, torque command of current components, rotor position, speed estimation, and so on. We are suggest a analyzed estimation results of the motor parameters that developing five-phase squirrel-cage IM have a stator of concentrated winding for experimental within variable over current load at rated input frequency. There are results of stator winding measurement, no-load test, locked-rotor test, variable over current load test, and estimated parameters of equivalent circuits using manufactured experimental apparatus by IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators 112-2004.

Key Words : Five-Phase IM, Equivalent Circuit, No-Load Test, Locked Rotor Test, Variable Over Current Load, Parameter Estimations

1. 서 론

최근 교류 전동기 구동시스템에서 보다 우수한 신뢰성 증대와 정밀제어가 요구되는 서보시스템, 전기자동차, 우주항공, 철도산업, 선박 추진, 군용장비, 핵발

전소 등에 대한 관심이 고조되면서 다상 교류전동기 제어시스템에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다 [1-7].

다중 레벨과 다상 전력변환 시스템 적용에 의한 다상 전동기 제어시스템은 현재 많이 사용되고 있는 3상 전동기 사용에 대한 대안으로 제시되고 있다.

일반적으로 같은 출력에서 3상 전동기에 비해 5상 전동기를 적용하는 제어시스템은 상당 전압 변화 없이 전류의 크기를 감소할 수 있으며, 큰 토크 밀도를 가지며, 높은 효율, 토크 맥동의 감소, 운전시 권선의

* Main author : Yeungnam College of Science & Technology, Dept. of Electrical Automatic Engineering, Professor
Tel : 053-650-9263, Fax : 053-624-4767
E-mail : mhkim@ync.ac.kr
Received : 2015. 4. 1
Accepted : 2015. 5. 1

단락 고장에 대한 신뢰성 향상, 제어시스템에서 운전 자유도 증가, 진동 및 노이즈 특성 개선 효과 등의 장점을 가진다[1-2,6-7].

교류 전동기 정밀 제어에서는 벡터제어와 직접토크 제어가 다양한 분야에서 적용되고 있다. 벡터제어의 경우는 정밀하고 보다 나은 고성능 동특성을 유지하기 위해서 슬립 계산, 자속관측기, 제어기 이득, 회전자 위치와 속도 추정 등에서 필수적으로 전동기의 정수(파라미터)가 사용되어야 한다. 직접토크제어의 경우는 기본적으로 정확한 자속을 추정하기 위해서 벡터제어의 경우보다는 전동기 파라미터에 대한 의존성이 적지만, 최적제어나 정밀한 속도제어 및 정확한 위치 추정을 위해서는 전동기의 정수가 필수적으로 요구된다.

이와 같이 전동기의 정밀 제어가 요구되는 산업현장에서는 전동기의 정확한 정수에 대한 정보가 반드시 필요하게 된다[7-13].

이에 따라 최근에는 단층권 5상 유도전동기의 파라메타 동정에 대한 연구[3], 5상 유도전동기의 동기속도와 구속시험으로부터 등가회로의 파라메타 추정에 관한 연구[14], 다상 전동기의 특성 시험으로부터 5상 농형 유도전동기의 정수 추정[15], 전원 주파수 변화에 따른 5상 농형 유도전동기의 정수 산정에 대한 연구[16]가 발표되고 있다.

본 논문에서는 연구용으로 집중권선 구조로 개발된 5상 1.5kW 농형 유도전동기의 정밀제어 구동시스템 구현을 위해 실험 장치를 구성하여, 정격 주파수에서 무부하 시험과 가변 과전류 구속시험에 의해, 과도응답특성 개선에 이용할 수 있는 서보시스템 전동기의 파라메타 변화 상태 추이와 분석한 결과를 제시하였다[17-20].

정격 주파수에서 고정자 권선의 저항측정과 가변 과전류 구속시험에서 IEEE Standard 112-2004 방법으로 구해진 시험 결과와 다상 전동기의 정밀 등가회로를 적용하여, 과부하 상태에서 구속전류 변화에 따른 5상 농형 유도전동기의 과부하시 회전자 저항과 누설 인덕턴스의 변화 추이를 고찰한 결과를 보여준다.

2. 5상 농형 유도전동기 등가회로

2.1 5상 농형 유도전동기의 모델링

5상 2극 교류기의 고정자 권선의 각 상은 공간적으로 72도의 위상차를 가진 N턴의 집중 권으로 나타낼 수 있으며, 이때 권선의 역기전력 파형은 사다리꼴 형태로, 전류파형은 제 3고조파 성분이 포함되고 있음을 알 수 있다[7].

5상 농형 유도전동기는 수학적 모델과 등가회로 해석을 위한 기본파 성분의 $d_{e1}-q_{e1}$ 좌표축 벡터도와 제 3고조파 성분의 $d_{e3}-q_{e3}$ 좌표축의 벡터도로 표현된다[4,6-7]. 3상 농형 유도전동기는 기본파 성분과 $6k \pm 1$ ($k=1,2,3 \dots$)의 고조파 성분이 기자력과 토크를 발생시키며, 5상 유도전동기의 경우는 기본파 성분과 $10k \pm 1$ ($k=1,2,3 \dots$)의 고조파 성분이 기자력과 토크를 발생하게 된다. 이는 기준 좌표계상에서 행렬 형태로 간략하게 표현되며, 고정자와 회전자의 전압과 쇄교자속 방정식 및 토크는 두개의 공간벡터로 표시된다[7-8,12].

2.2 농형 유도전동기의 등가회로

유도전동기의 운전특성 결정은 실 부하시험에 의하여 정확한 방법으로 특성을 산정할 수 있다. 그러나 일반적으로 특성해석을 위해서 그림 1과 같은 T형 등가회로를 사용하여 운전특성을 계산한다.

이와 같은 정밀 등가회로를 적용하여 해석하는 경우는 계산이 복잡하기 때문에 특성 산정의 수치 계산을 단순화하기 위하여 정밀 등가회로를 변형하여 L형 간이 등가회로를 적용하며, 무부하 시험과 구속시험을 통하여 등가회로 파라메타를 결정하는 방법이 일반적이다[15].

유도전동기에서는 주 자속 통로에 있는 공극으로 인하여 여자전류가 크기 때문에 여자 임피던스(또는 어드미턴스)를 입력단자 측으로 이동한 L형의 간이 등가회로에서 운전특성 산정은 큰 오차가 있으므로, 전동기 정수를 결정하는데 있어서는 오차가 보다 크게

된다. 따라서 전동기 제어에서 필요로 하는 정밀한 전동기 정수 결정은 T형 등가회로를 적용하는 것이 바람직하다[3,14-16,20].

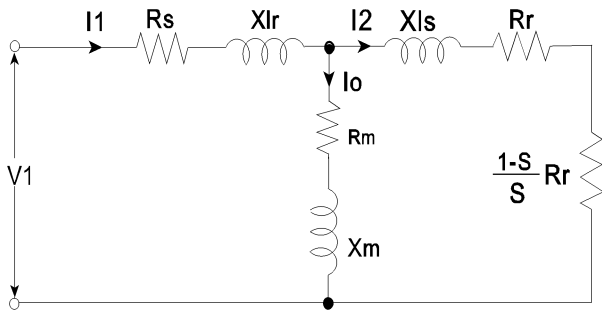


그림 1. T형 정밀등가회로
Fig. 1. T-type precision equivalent circuit

2.3 T형 등가회로에 의한 정수 산정

전동기가 무부하로 운전될 경우에는 전동기 속도가 거의 동기속도에서 운전되므로 슬립을 $S=0$ 으로 취급할 수 있다. 따라서 무부하 시에는 T형 등가회로는 R-L 직렬 형태의 회로가 되며, 구속 시에는 슬립이 $S=1$ 이 됨에 따라 등가회로가 표시된다. 일반적으로 소형인 1.5kW 용량의 전동기에서도 $R_m > R_r$ 와 $X_m \gg X_{lr}$ 의 조건식이 적용될 수 있으므로 보다 간략화하여 적용할 수 있다[15-16].

무부하 시험에서는 정격전압 $V_{01}[V]$, 무부하 입력전류 $I_0[A]$, 한 상당 무부하 전류 $I_{01}(=I_0/5)$, 무부하 입력 $P_0[W]$ 가 구해지며, 구속시험에서는 정격전류 $I_{s1}[A]$, 한 상당 구속전류 $I_{s1}(=I_s/5)$, 구속전압 $V_s[V]$, 구속전력 $P_s[W]$ 가 얻어지므로, 이 시험결과를 사용하여 정수를 산정할 수 있다[14].

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치 구성

전동기에 공급되는 5상의 전력을 사용하여 5상 농형 유도전동기의 파라메타 변화를 관측하기 위하여 시험장치를 구성하였다[16]. 안정된 가변전압 및 가변주파

수의 5상 전원을 얻기 위하여 실험용으로 220V, 60Hz, 5.0kW 표면부착형 동기발전기(SPMMSG)를 개발하여 사용하였다[19].

이 실험 장치에서 전동기의 실부하 가변은 파우더 블레이크와 제어장치를 사용하며, 무부하 시험과 구속 시험 및 실부하 시험을 수행하며, 한 상당의 상전압, 선전류, 유효전력, 무효전력, 피상전력, 역률 등을 측정하기 위하여 전력분석기인 PM3000을 사용하여 구성한다[17-18].

3.2 고정자 권선 특성 측정

HP4263A LCR meter를 사용하여 각 상 권선의 저항(R_s)과 자기 인덕턴스(L_s)를 정확하게 측정하기 위하여, 회전자의 위치를 바꾸어 가면서 각상을 3회(총 15회) 측정하여 평균한 결과는 표 1과 같다. 고정자 권선저항을 운전시 온도 $75[^\circ C]$ 로 환산하면 $R_{s75} = 7.7525[\Omega]/75^\circ C$ 이다.

표 1. 5상 1.5kW 농형 유도전동기의 권선 특성 측정
Table 1. Measured stator winding characteristics of 5-phase 1.5kW IM

구분	$R_s \Omega / 23^\circ C$	L_s mH	비고
1KHz, 1.0V	6.48	570.34	평균 값
100Hz, 500mV	6.42	591.06	평균 값
평균	6.45	580.70	주위온도: 23도

3.3 무부하 시험

제작된 실험 장치를 사용하여 입력 전원의 정격주파수인 60Hz에서 무부하 시험한 결과는 표 2와 같다[16]. 여기에서 기준전압은 이론적으로 계산된 전압이며, 설정 상전압은 무부하 전압을 나타내며, 측정 선전류는 전체 무부하 전류를 나타낸 값이다.

3.4 구속시험

마찬가지로 제작된 실험 장치로, 정격 주파수 60Hz

표 2. 전원 주파수 가변에 의한 무부하 시험 결과

Table 2. Results of no-load test by variable input power frequency

주파수 (Hz)	기준전압 (V)	무부하 전압(V)	무부하 전류(A)	상당 무부하 전류 (A)	역율 (%)	피상전력 계산 (VA)	무부하 전력 (Watt)	회전수 (rpm)
60	220.0	220.04	5.0011	1.0002	0.073	1,098.4	79.27	1,792.0

표 3. 정격 60Hz 구속시험에서 과부하 구속전류 변화에 따른 측정 특성

Table 3. Measured characteristics for variable over load of rocked rotor test on rated 60Hz

과전류 부하율 (%)	I_s/I_n	1.000	1.383	1.711	1.860	2.091	2.216	2.503
구속 전압 (V)	V_s	48.09	67.65	80.97	92.97	101.11	111.75	119.81
상당 구속전류 (A)	I_{s1}	1.9742	2.730	3.379	3.672	4.129	4.376	4.942
구속전류 (A)	I_s	9.8710	13.650	16.895	18.360	20.645	21.880	24.710
구속 전력 (W)	P_s	271.35	595.3	958.9	1170.7	1525.6	1767.5	2283.0
역율 (%)	$\cos \phi$	0.572	0.644	0.656	0.686	0.693	0.723	0.770
피상전력 (VA)	P_{sVA}	474.7	923.4	1368.0	1706.9	2087.4	2445.1	2960.5
무효전력 (Var)	Q_{sVar}	389.5	705.9	975.7	1242.8	1424.7	1689.5	1884.8

에서 과부하 상태에서 구속전류 변화에 따라 구속시험의 특성을 측정한 결과는 표 3과 같이 얻어진다. 여기서 과부하율은 정격전류 $I_n[A]$ 에 대한 시험에 사용된 구속전류 $I_s[A]$ 의 비율을 나타낸 것이다.

3.5 무부하 시험에서 정수 추정

저항측정에서 얻어진 고정자 권선 저항과 무부하 시험에서 얻어진 결과를 이용하면, 정격 입력 전원 주파수인 60Hz에서 전동기의 파라메타는 표 4와 같이 계산된다[16].

3.6 구속시험에서 정수 추정

구속시험에서 얻어진 결과를 사용하여 정격 전류의 부하에서 추정된 파라메타는 이미 발표된 연구에서 제시되었으며[16], 약 200%($I_s/I_n = 2.091$)의 과부하 상태에서 구속시험에 의해 얻어진 파라메타의 값은 다음과 같이 계산된다.

표 4. 정격 60Hz에서 무부하 시험에 의한 계산된 파라메타 특성

Table 4. Calculated parameters characteristics of no-load rotor test at rated 60Hz

정격주파수 (Hz)	f	60
기준 정격전압 (V)	V_{In}	220
무부하 피상전력 (VA)	P_{0VA}	1,100.4
무부하 무효전력 (Var)	Q_{0Var}	1,097.5
동손 성분 전력 (W)	P_{0c}	38.78
철손 성분 전력 (W)	P_{0i}	40.49
철심 자화 저항 (Ω)	R_m	4.0253
고정자 리액턴스 성분 (Ω)	$(X_{ls} + X_m)$	219.50
고정자 인덕턴스 성분 (mH)	$(L_{ls} + L_m)$	582.00

- 구속시 피상전력 :

$$P_{sVA-2t} = V_s \times 5 \times I_{s1} = 101.11 \times 5 \times 4.129 = 2,087.4 [VA]$$

- 구속시 무효전력 :

$$Q_{sVar-2t} = \sqrt{(P_{sVA-2t}^2 - P_{sa}^2)} = \sqrt{2,087.4^2 - 1,525.6^2} = 1,424.7 [Var]$$

- 합성 누설 리액턴스 :

표 5. 60Hz 가변 과전류 부하 구속시험에서 계산된 파라메타 특성

Table 5. Calculated parameters characteristics of locked rotor test by variable over current load 60Hz

과부하율 (%)	I_s/I_n	1.00	1.383	1.711	1.860	2.091	2.216	2.503
구속 전압 (V)	V_s	48.09	67.65	80.97	92.97	101.11	111.75	119.81
상당 구속전류 (A)	I_{s1}	1.974	2.730	3.379	3.672	4.129	4.376	4.942
구속전류 (A)	I_s	9.8710	13.650	16.895	18.360	20.645	21.880	24.710
구속 전력 (W)	P_s	271.4	595.3	958.9	1170.7	1525.6	1767.5	2283.0
피상전력 (VA)	P_{sVA}	474.7	923.4	1368.0	1706.9	2087.4	2445.1	2960.5
무효전력 (Var)	Q_{sVar}	389.5	705.9	975.7	1242.8	1424.7	1689.5	1884.8
합성 누설 리액턴스 (Ω)	$(X_{ls} + X_{lr})$	29.692	32.416	33.597	34.774	35.878	36.958	38.08
누설 리액턴스 (Ω)	$X_{ls} = X_{lr}$	14.846	16.208	16.799	17.387	17.939	18.479	19.039
누설 인덕턴스 (mH)	$L_{ls} = L_{lr}$	39.374	42.993	44.560	46.120	47.585	49.017	50.502
회전자 저항 (Ω)	R_r	6.175	8.223	9.0448	9.613	10.145	10.708	10.943
자화 리액턴스 (Ω)	X_m	204.57	203.30	202.70	202.11	201.56	201.02	200.46
자화 인덕턴스 (mH)	L_m	542.64	539.25	536.79	536.12	534.66	533.23	531.74

$$(X_{ls} + X_{lr})_{-2t} = (5 \times V_s^2) / Q_{sVar-2t} \\ = 5 \times 101.11^2 / 1,424.7 = 35.878 [\Omega]$$

- 고정자(회전자) 누설 리액턴스 :

$$X_{ls-2t} = X_{lr-2t} = (X_{ls} + X_{lr})_{-2t} / 2 \\ = 35.878 / 2 = 17.939 [\Omega]$$

- 고정자(회전자) 누설 인덕턴스 :

$$L_{ls-2t} = L_{lr-2t} = X_{ls-2t} / (2 \times \pi \times f) \\ = 17.939 / (2 \times \pi \times 60) = 47.585 [mH]$$

- 회전자 저항 :

$$R_{r-2t} = P_{sa-2t} / (5 \times I_{s1}^2) - R_s \\ = 1,525.6 / (5 \times 4.129^2) - 7.752 = 10.145 [\Omega]$$

- 자화 리액턴스 :

$$X_{m-2t} = (Q_{0Var} / 5 \times I_{01}^2) - X_{ls-2t} \\ = (1,197.5 / 5 \times 1.000^2) - 17.939 = 201.56 [\Omega]$$

- 자화 인덕턴스 :

$$L_{m-2t} = X_{m-2t} / (2 \times \pi \times f) \\ = 201.56 / (2 \times \pi \times 60) = 534.66 [mH]$$

3.7 과부하 변화에 따른 구속시험에서 정수 추정

표 5는 정격 주파수에서 부하전류를 변화시켜 가변 과전류 부하 구속시험에서 얻어진 결과를 적용하여 계산된 파라메타 값을 정리한 것이다.

3.8 과부하 가변 구속전류 변화에 따른 특성 분석

표 5에서 정격주파수 60Hz에서 과부하 구속시험에서 얻어진 파라메타의 변화 상태를 그래프로 표시하여 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

- 그림 2는 과부하 구속시험에서 얻어진 구속전압 (V_s)과 구속전류(I_s)의 변화 특성이며, 그림 3은 과부하 구속시험에서 유효전력(P_s)과 피상전력 (P_{sVA}) 및 무효전력(Q_{sVar})의 변화 상태를 관측한 것이다.
- 그림 4는 고정자(회전자)의 누설 인덕턴스 $L_{ls}(L_{lr})$ 특성이며, 그림 5는 누설 리액턴스 $X_{ls}(X_{lr})$ 특성을 보여준 것이다.
- 그림 6은 자화 인덕턴스 L_m 의 특성이며, 그림 7은 회전자 저항 R_r 의 변화 특성이다. 그림 8은 회전자의 누설 인덕턴스 L_{lr} 와 자화 인덕턴스 L_m 의 변화 특성을 비교한 그래프이다.
- 또한 그림 9은 구속전류 I_s 변화에 따른 회전자 누설 인덕턴스 L_{lr} 와 회전자 누설 리액턴스 X_{lr} 및 회전자 저항 R_r 의 변화 상태를 비교하여 보여준 것이다.

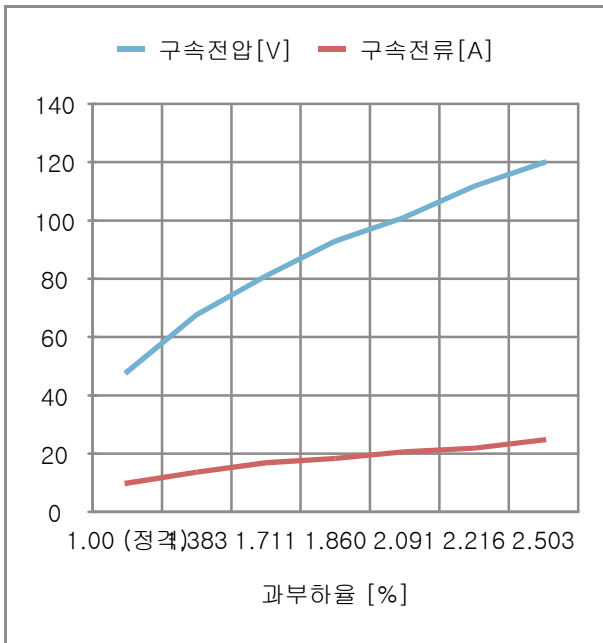


그림 2. 과부하 구속시험에서 전압 및 전류 변화 특성
Fig. 2. Voltage and current characteristics of variable over current load at locked rotor test

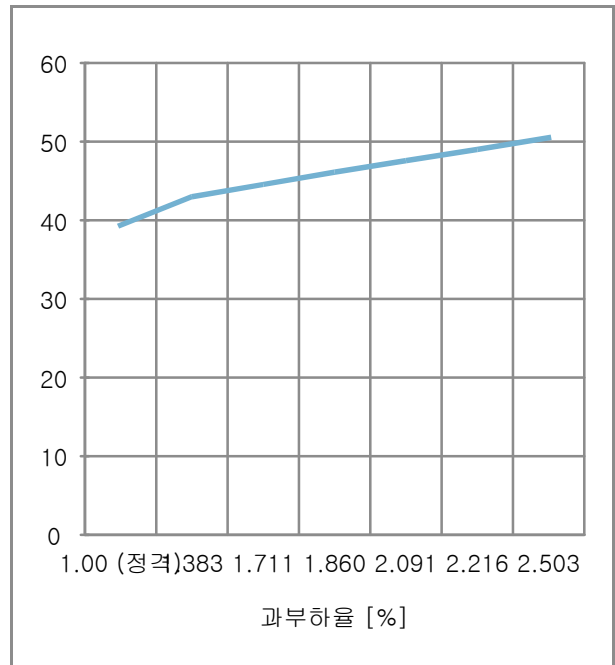


그림 4. 고정자(회전자) 누설 인덕턴스 $L_{ls}(L_{lr})$ 특성
Fig. 4. Stator(rotor) leakage inductance $L_{ls}(L_{lr})$ characteristics

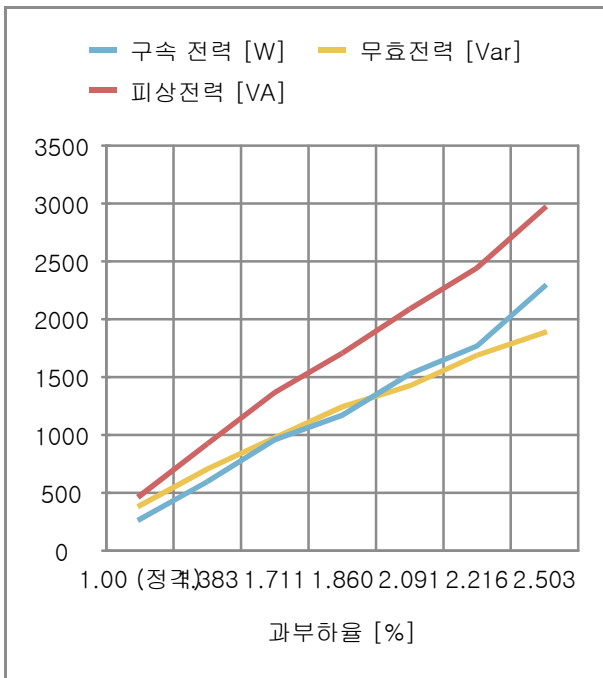


그림 3. 과부하 구속시험에서 전력 특성
Fig. 3. over characteristics of variable over load at locked rotor test

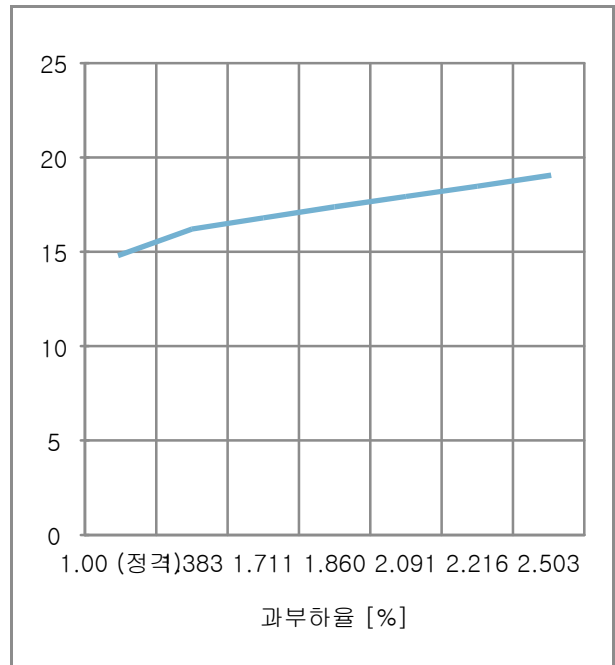


그림 5. 고정자(회전자) 누설 리액턴스 $X_{ls}(X_{lr})$ 특성
Fig. 5. Stator(rotor) leakage reactance $X_{ls}(X_{lr})$ characteristics

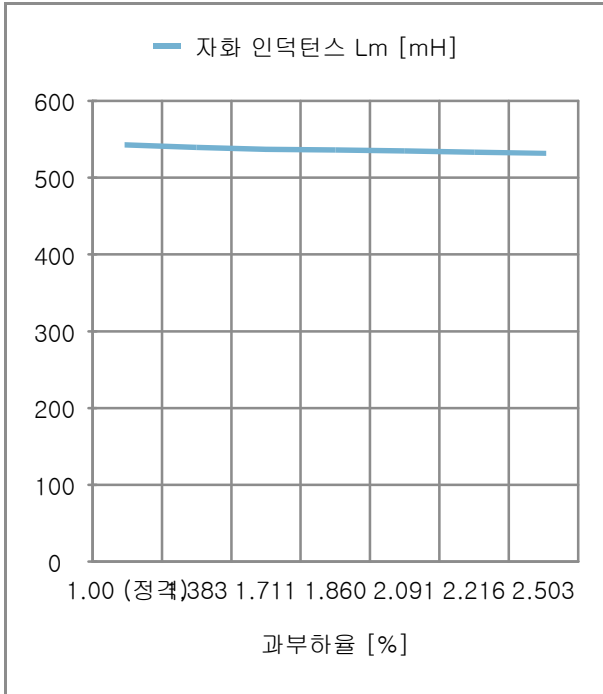


그림 6. 자화 인덕턴스 L_m 특성
Fig. 6. Magnetizing inductance L_m characteristics

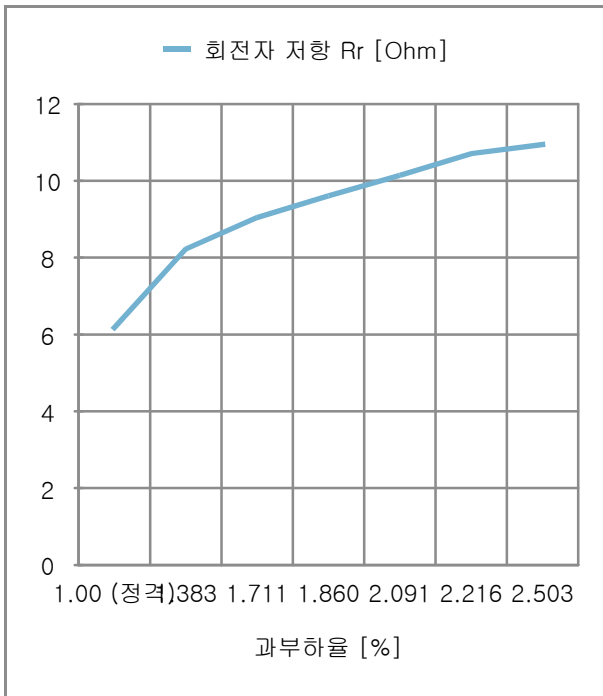


그림 7. 회전자 저항 R_r 특성
Fig. 7. Rotor resistance R_r characteristics

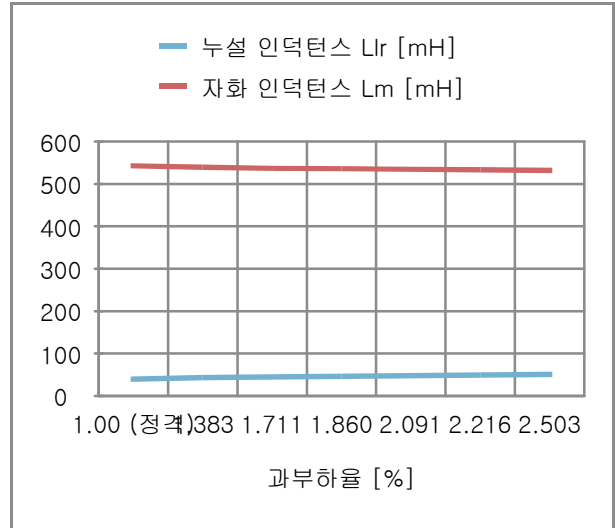


그림 8. 회전자 누설 인덕턴스 L_{lr} 및 자화 인덕턴스 L_m 의 특성
Fig. 8. Rotor leakage inductance L_{lr} and magnetizing inductance L_m characteristics

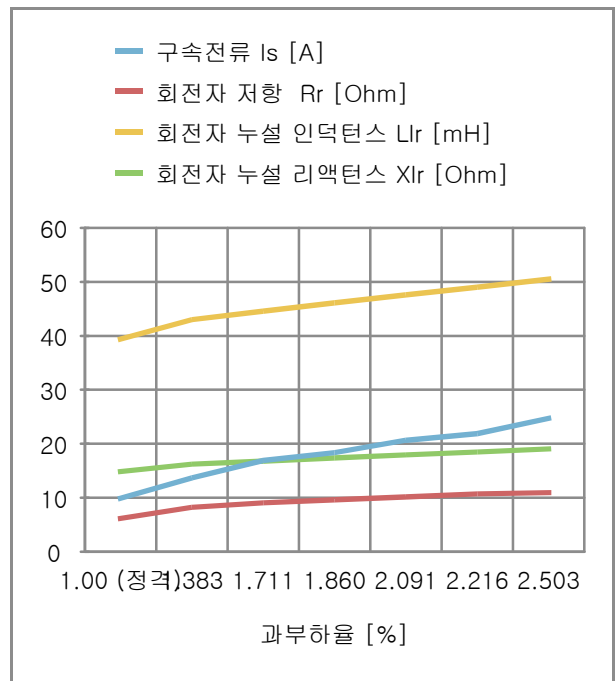


그림 9. 구속전류 I_s 변화에 따른 회전자 누설 인덕턴스 L_{lr} 와 누설 리액턴스 X_{lr} 및 회전자 저항 R_r 특성
Fig. 9. Parameters characteristics of rotor leakage inductance L_{lr} , rotor leakage reactance X_{lr} , and rotor resistance R_r by variable over current I_s

3.9 추정된 파라메타 특성 검토

본 연구에서는 얻어진 결과로 공급 전원 주파수 변화에 따른 5상 농형 유도전동기의 파라미터 변화 특성과 60Hz 구속시험에서 과부하 변화에 따른 특성은 다음과 같은 결과로 요약된다.

- 정격 주파수인 60Hz의 가변 과부하 구속시험에서 계산에 의해 추정되는 파라미터의 변화 상태는 표 5와 같이 제시되었다.
- 시험에서 측정된 구속전압 및 구속전류의 변화 특성은 그림 2와 같이 과변 과부하 변화율에 따라 선형적으로 변화한 상태에서 시험이 이루어지고 있음을 알 수 있다.
- 구속시험에서 측정으로 얻어진 전력 특성은 그림 3과 같다. 그림 4에서 보는바와 같이 과부하 전류가 커짐에 따라 누설 인덕턴스 $L_{ls}(=L_r)$ 는 증가함을 알 수 있다. 마찬가지로 누설 리액턴스 $X_{ls}(=X_r)$ 변화도 그림 5에서 비례함을 보여준다.
- 그림 6과 같이 자화 인덕턴스 L_m 은 과부하 전류가 증가하여도 일정한 값을 유지함을 보여준다.
- 그림 7에서 보는바와 같이 과부하 전류 증가에 따라 회전자의 저항 R_r 도 증가됨을 알 수 있다.
- 자화 인덕턴스(L_m)와 회전자(고정자) 누설 인덕턴스($L_r = L_{ls}$)의 파라미터 변화 상태는 그림 8에서 보여준다. 이는 과부하 전류의 증가에 따라 철심의 포화현상 및 누설자속의 증가로 인하여 자화 인덕턴스는 약간 감소하고, 누설 인덕턴스는 증가되고 있음을 알 수 있다.
- 과부하 전류 I_s 변화에 따른 회전자 누설 인덕턴스 L_r 와 누설 리액턴스 X_r 및 회전자 저항 R_r 의 상대적인 변화 추의 특성을 그림 9에서 보여준다.

본 연구에서 제시된 과전류 부하 변화에 따른 5상 농형 유도전동기의 정수(파라미터)가 변화하는 상태 추이 결과를 5상 농형 유도전동기 정밀 제어시스템 연구 개발에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

최근 교류 전동기 개발과 정밀 구동시스템에서 신뢰성 문제에 대한 관심이 고조되어 다상 전동기에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 이에 따라 현재 많이 사용되고 있는 3상 전동기 시스템에 대한 대안으로 5상 전동기 제어시스템이 제시되고 있다. 5상 전동기는 같은 정격의 3상 전동기에 비해 많은 장점을 가지고 있으므로, 전동기 정밀 제어에서는 벡터제어와 직접토크 제어가 다양한 분야에서 적용되고 있다. 이들 제어기법에서 교류전동기를 정밀 제어하기 위해서는 반드시 정확한 전동기의 정수가 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 연구용으로 개발된 5상 1.5kW 농형 유도전동기의 보다 정확한 정수를 추정하기 위하여 공급 전원의 주파수 제어와 부하를 가변할 수 있는 실험 장치를 제작하여, 정격 주파수에서 고정자의 권선 특성을 측정하여 얻어진 결과와 무부하 시험 및 가변 과전류 구속시험에서 얻어진 시험결과를 적용하여 5상 농형 유도전동기의 과전류 부하 운전에서 파라미터 변화와 회전자의 누설 인덕턴스 및 회전자 저항의 변화 상태를 추정하여 관측한 결과를 보여준다. 제시된 연구 결과는 다상 농형 유도전동기의 개발과 정밀 제어시스템의 연구에 이용될 것으로 사료된다.

References

- [1] Aldo Boglietti, Ayman M. EL-Refai, Oliver Drubel, "Electrical Machine Topologies", IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 8, No. 2, pp. 18-30, June 2014.
- [2] E. Levi, "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 5, pp. 1893-1909, May 2008.
- [3] A. S. Abdel-Khalik, M. I. Daoud, Ahmed, A. A. Elserougi, and M. Massoud, "Parameter Identification of Five-Phase Induction Machines With Single Layer Winding", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 10, pp. 5139-5154, Oct. 2014.
- [4] Ayman S, Abdel-Khalik, Mahmoud I. Masoud, and Barry W. Williams, "Improved Flux Pattern With Third Harmonic Injection for Multiphase Induction Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 27, No. 3, pp. 1563-1758, March 2012.
- [5] Leila. Parsa and Hamid. A. Toliyat, "Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives for Ship Propulsion Applications," 2005 Electric Ship Technologies Symposium, pp. 371-378,

2005.

[6] Hyung-Min Ryu, Jang-Hwan Kim and Seung-Ki Sul, "Analysis of Multiphase Space Vector Pulse-Width Modulation Based on Multiple d-q Spaces Concept", IEEE Trans. on Power Electronics Vol. 20, No.6, pp. 1364-1371, November 2005.

[7] Min-Huei Kim, Nam-Hun kim, Won-Sik Baik, "A Five-Phase IM Vector Control System Including 3rd Current Harmonics Component", 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, pp. 2519-2524, May 2011.

[8] M. J. Duran, F. Salas, MR. Arahah, "Bifurcation Analysis of Five-Phase Induction Motor Drives with Third Harmonic Injection", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, pp. 2006-2014, 2008.

[9] N. Bianchi and S. Bolognani, "Strategies for the Fault Tolerant Current Control of a Five-Phase Permanent-Magnet Motor", IEEE Transactions. on Industry Applications, Vol. 43, pp 960-970, 2007.

[10] Leila. Parsa and Hamid. A. Toliyat, "Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, pp. 30-37, Jan/Feb 2005.

[11] Nam-Hun Kim and Min-Huei Kim, "Modified Direct Torque Control System of Five Phase Induction Motor" JEET, Vol. 4, No. 2, pp. 266-271, 2009.

[12] Min-Huei Kim, Nam-Hun kim, Won-Sik Baik, "A Five-Phase Induction Motor Speed Control System Excluding Effects of 3rd Current Harmonics Component", Journal of Power Electronics, Vol. 11, NO. 3, May 2011.

[13] Shuai Lu, K. Corzine, "Direct Torque Control of Five-phase Induction Motor using Space Vector Modulation with Harmonics Elimination and Optimal Switching Sequence", APEC '06, pp. 195-201, 2006.

[14] Ayman. S. Abdel-Khalik, Shehab Ahmed, and Ahmed Massoud, "Inverter-Fed Induction Machines -Extraction of Equivalent Circuit Parameters from Synchronous Speed and Locked Rotor Tests', IEEE-ECCE, pp. 256-262, Sep. 2014.

[15] Min-Huei Kim, "Parameters Estimations of Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor", Trans. of KIEE, Vol. 61P, No. 4, pp. 199-205, Dec. 2012.

[16] Min-Huei Kim, "Parameters Estimations of Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor in Changing Variable Frequency", Trans. of KIEE, Vol. 63P, No. 4, pp. 1-14, Dec. 2014.

[17] Min-Huei Kim, Hyung-Woo Jung, Hyun-Jik Song, "Development of Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor of 1.5kW", Trans. of KIIEE, Vol. 28, No. 1, pp. 57-68, Jan. 2014.

[18] Min-Huei Kim, Hyung-Woo Jung, Hyun-Jik Song, "Operating Characteristics of Squirrel-Cage Induction Motor of 5-Phase 1.5kW", Trans. of KIIEE, Vol. 28, No. 5, pp. 52-59, May 2014.

[19] Hyung-Woo Jung, Min-Huei Kim, Dong-Hee Kim, "A Development of Surface Permanent Mount Synchronous Generator for 5 Phase 5kW", Trans. of KIIEE, Vol. 26, No.

11, pp. 87-96, Nov. 2012.

[20] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Motors and Generators, 112-2004.

◇ 저자소개 ◇



김민희(金玟熙)

1951년 8월 25일생. 1974년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979년 3월~현재 영남이공대학교 전기자동화과 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 전력전자용연구센터(PEAC) 연구교수. 1996년 8월 IECON'96 최우수논문상 수상. 현재 IEEE Senior Member. 1998~2006년 전력전자학회 이사, 부회장, 감사, 전동력응용연구회 위원장 역임. 현재 본 학회 종신회원.