주파수 변화에 따른 5상 농형 유도전동기의 정수 추정

Parameters Estimation of Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor in Changing Variable Frequency

김 민 회*

(Min-Huei Kim)

Abstract - This paper propose a variable parameter estimations of five-phase squirrel-cage induction motor(IM) for speed 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, 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 of variable input power frequency. There are results of stator winding test, no-load test, locked-rotor test, variable actual 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, Variable input power frequency, Equivalent circuit, No-load test, Locked rotor test, Parameter estimations

1. 서 론

최근 전력전자기술의 발전에 따라 교류 전동기 구동시스템에서 보다 높은 신뢰성 증대와 정밀제어가 요구되는 전기자동차, 우주항공, 철도분야, 선박 추진, 군용장비, 핵발전소 등에 대한 관심이 고조되면서 다상 전동기에 제어시스템에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있다[1-5]. 다중 레벨(multi-level)과 다상 전력변환 시스템(multiphase power converter system) 적용에 의한 전동기 제어시스템은 현재 많이 사용되고 있는 3상 전동기 사용에 대한 대안으로 제시되고 있다. 일반적으로 5상 전동기를 적용하는 제어시스템은 같은 출력에서 3상 전동기에 비해 상당 전압 변화 없이 전류의 크기를 감소 할 수 있으며, 상당 큰 토크 밀도를 가지며, 높은 효율, 토크 맥동의 감소, 운전시 권선의 단락 고장에 대한 신뢰성 향상, 제어시스템에서 운전 자유도 증가, 진동 및 노이즈 특성 개선 효과 등의 장점을 가진다[1, 2, 7].

교류 전동기 정밀 제어에서는 벡터제어(FOC, field oriented control)와 직접토크제어(DTC, direct torque control)가 다양한 분야에서 적용되고 있다. 벡터제어의 경우는 정밀하고 보다 나은 고성능 동특성을 유지하기 위해서는 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 파라

미터에 대한 의존성이 적지만, 최적제어나 정밀한 속도제어 및 정확한 위치 추정을 위해서는 전동기의 정수가 필수적으로 요구된다. 이와 같이 서보 시스템이나 정밀한 제어가 요구되는 산업현장에서는 전동기의 정확한 정수에 대한 정보가 반드시 요구 된다[6-13].

본 논문에서는 연구용으로 집중권선 구조로 개발된 5상 1.5[kW] 농형 유도전동기의 정밀제어 구동시스템 구현을 위해 실험 장치를 구성하여, 전원에서 공급되는 주파수 변화에 의해 전동기의 운전 특성과 파라메타의 변화 상태 추이 및 분석한 결과를 제시 하였다[14-16].

고정자 권선의 저항과 인덕턴스를 측정하여, 공급 전원의 주파수 변화에 따라 무부하시험, 구속시험, 실 부하시험에서 IEEE Standard 112-2004 방법으로 얻어진 시험 결과와 다상 유도전동기의 정밀 등가회로를 적용하여, 5상 농형 유도전동기의 파라메타를 추정하여 결정하는 방법과 측정된 결과를 검토하였다.

일반적으로 전동기의 정확한 정수들을 얻기 위한 특성시험에서는 전력용 반도체소자의 스위칭 작용으로 전력변환하는 5상 인버터 전원장치 보다 고조파 성분이 적고 정밀제어가 가능한 5상 교류 전원장치가 필요하게 된다. 이를 위해서 정밀하게 제어할 수 있는 5상 교류전동기 시험용 전원장치로 사용하기 위하여 개발한 표면부착형 영구자석 동기발전기(SPMSG)를 사용하였다[17-20].

2. 5상 농형 유도전동기 모델

5상 2극 교류기의 고정자 권선의 각 상은 공간적으로 72도의 위상차를 가진 N턴의 집중 권으로 구성되는 경우, 고정자의 권선분포도는 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 권선의 역기전력과 전류파형은 그림 2에서 보는 바와 같

* 교신저자 : 영남이공대학교 전기자동차과 교수

E-mail : mhkim@ync.ac.kr

접수일자 : 2014년 10월 18일

수정일자 : 2014년 11월 18일

최종완료 : 2014년 11월 20일

이 역기전력은 사다리꼴 형태로, 전류는 제 3고조파 성분이 포함되고 있음을 알 수 있다[7].

5상 농형 유도전동기는 수학적 모델과 등가회로 해석을 위한 기본파 성분과 $d_{e1}-q_{e1}$ 좌표축 벡터도와 제 3고조파 성분의 $d_{e3}-q_{e3}$ 좌표축의 벡터도로 표현 된다[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 회전자 전압과 쇄교자속 방정식 및 토크는 두개의 공간벡터로 표시 된다[7, 12].

그림 1 집중 권으로 구성된 5상 2극 농형 유도전동기의 권선 분포도

Fig. 1 Five-phase concentrated winding of squirrel-cage IM

그림 2 5상 유도전동기의 역기전압과 전류파형

Fig. 2 Back-EMF and current waveform of five-phase induction motor

3. 5상 농형 유도전동기의 등가회로

3.1 농형 유도전동기의 등가회로

유도전동기의 운전특성 결정은 실 부하시험에 의하여 정

확한 방법으로 특성을 산정 할 수 있다. 그러나 일반적으로 특성해석을 위해서 그림 3과 같은 T형 등가회로를 사용하여 운전특성을 계산한다. 이와 같은 정밀 등가회로를 적용하여 해석하는 경우는 계산에 있어 복잡하기 때문에 특성 산정의 수치 계산을 단순화하기 위하여 정밀 등가회로를 변형하여 그림 4와 같은 L형 간이 등가회로를 적용하며, 무부하 시험과 구속시험을 통하여 등가회로 파라메타를 결정한다. 유도전동기에서는 주 자속 통로에 있는 공극으로 인하여 여자전류가 크기 때문에 여자 임피던스(또는 어드미턴스)를 입력단자 측으로 이동한 L형의 간이 등가회로에서는 운전특성 산정에서는 큰 오차를 가져 오지 않지만, 전동기 정수를 결정하는데 있어서는 오차가 보다 크게 된다. 따라서 전동기 제어에서 필요로 하는 정밀한 전동기 정수 결정은 T형 등가회로를 적용하는 것이 바람직하다[14-16].

그림 3 T형 정밀등가회로

Fig. 3 T-type precision equivalent circuit

그림 4 L형 간이등가회로

그림 4 L-type approximate equivalent circuit

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 되므로 식(1)이 얻어진다. 또한 구속 시에는 슬립이 $S=1$ 이므로 식(2)와 (3)으로 표시된다. 일반적으로 소형인 1.5[kW] 용량의 전동기에서도 $R_m > R_r$ 와 $X_m \gg X_{lr}$ 의 조건이 되므로, 식(2)는 식(4)으로 보다 간략화 하여 적용할 수 있다[14, 15].

$$\widehat{V}_{01} = (R_s + R_m) \widehat{I}_1 + j(X_{ls} + X_m) \widehat{I}_0 \quad (1)$$

$$\widehat{V}_{s1} = (R_s + jX_{ls}) \widehat{I}_{s1} + ((R_r/s) + jX_{lr}) \widehat{I}_{s2} \quad (2)$$

$$(R_m + jX_m) \widehat{I}_{s0} = (R_r/s + jX_{lr}) \widehat{I}_{s2} \quad (3)$$

$$\widehat{V}_{s1} \cong (R_s + R_r) \widehat{I}_{s1} + j(X_{ls} + X_{lr}) \widehat{I}_{s1} \quad (4)$$

3.2 T형 등가회로에 의한 정수 산정

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 $I_{sn}[A]$, 한 상당 구속 전류 $I_{s1}(=I_{sn}/5)$, 구속전압 $V_s[V]$, 구속전력 $P_s[W]$ 가 얻어지므로, 이 시험결과를 사용하여 정수를 산정하는 방법은 다음과 같이 식(5)~(19)로 정리 된다[14].

$$\text{무부하 피상전력: } P_{0VA} = V_{01} \times I_0 \quad (5)$$

$$\text{무부하 무효전력: } Q_{0Var} = \sqrt{P_{0VA}^2 - P_0^2} \quad (6)$$

$$\text{무부하 입력: } P_0 = P_{oi} + P_{oc} = 5 \times (R_s + R_m) \times I_{01}^2 \quad (7)$$

$$\text{동손 성분 전력: } P_{oc} = 5 \times (R_s) \times I_{01}^2 \quad (8)$$

$$\text{철손 성분 전력: } P_{oi} = P_0 - P_{oc} \quad (9)$$

$$\text{철심 저항: } R_m = P_{oi} / (5 \times I_{01}^2) \quad (10)$$

$$\text{고정자리액턴스성분: } (X_{ls} + X_m) = Q_{0Var} / (5 \times I_{01}^2) \quad (11)$$

$$\text{자화 리액턴스: } X_m = (Q_{0Var} / 5 \times I_{01}^2) - X_{ls} \quad (12)$$

$$\text{자화 인덕턴스: } L_m = X_m / (2 \times \pi \times f) \quad (13)$$

$$\text{구속시 피상전력: } P_{sVA} = V_s \times 5 \times I_{s1} \quad (14)$$

$$\text{구속시 무효전력: } Q_{sVar} = \sqrt{P_{sVA}^2 - P_s^2} \quad (15)$$

$$\text{합성 누설 리액턴스: } (X_{ls} + X_{lr}) = 5 \times V_s^2 / Q_{sVar} \quad (16)$$

$$\text{회전자 누설 리액턴스: } X_{lr} = 5 \times V_s^2 / Q_{sVar} - X_{ls} \quad (17)$$

$$\text{회전자 누설 인덕턴스: } L_{lr} = X_{lr} / (2 \times \pi \times f) \quad (18)$$

$$\text{2차 저항: } R_r = P_s / (5 \times I_{s1}^2) - R_s \quad (19)$$

4. 실험장치 구성

전동기에 공급되는 전원 주파수의 변화에 따라 5상 농형 유도전동기의 파라메타 변화를 관측하기 위하여 그림 5와 같은 시험 장치를 구성한다. 안정된 가변전압 및 가변주파수의 5상 전원을 얻기 위하여 실험용으로 220[V], 60[Hz], 5.0[Kw] 표면부착형 동기발전기(SPMSG)를 개발하여 사용하였다[20]. 그림 6은 연구용으로 시험에 사용하기 위해 셋업된 장치의 사진이다. 이 실험 장치에서 전동기의 실부하 가변은 파워더 브레이크와 제어장치를 사용하며, 무부하 시험과 구속시험 및 실부하 시험을 수행하며, 한 상당의 상전압, 선전류, 유효전력, 무효전력, 피상전력, 역률 등을 측정하기 위하여 전력분석기인 PM3000을 사용하여 구성한다.

그림 5 실험장치 블록도

Fig. 5 Block Diagram of experimental apparatus

그림 6 실험장치 셋업

Fig. 6 Experimental setup

5. 5상 농형 유도전동기의 특성시험

5.1 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 1.5[kW] 농형 유도전동기의 권선 특성 측정

Table 1 Measured stator winding characteristics of 5-phase 1.5[kW] IM

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

5.2 무부하 시험

그림 5와 같은 실험 장치를 사용하여 입력 전원의 주파수 변화인 5, 10, 30, 60, 65[Hz]에서 무부하 시험한 결과는 표 2와 같다. 여기에서 기준전압은 이론적으로 계산된 전압이며, 설정 상전압은 무부하 전압을 나타내며, 측정 선 전류는 전체 무부하 전류를 나타낸 값이다.

표 2 전원 주파수 가변에 의한 무부하 시험 결과

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

주파수 [Hz]	기준 전압 [V]	무부하 전압 [V]	무부하 전류 [A]	한 상당 무부하 전류 [A]	역률 [%]	피상 전력 계산 [VA]	무부하 전력 [W]	회전수 [rpm]
65	231.0	231.27	5.0098	1.0020	0.067	1,193.7	83.18	1,949.6
60	220.0	220.04	5.0011	1.0002	0.073	1,098.4	79.27	1,792.0
30	110.0	110.13	4.9159	0.9832	0.071	529.96	48.15	898.0
10	36.0	36.24	4.5178	0.9036	0.190	154.87	32.64	299.5
5	18.0	17.58	3.9648	0.7930	0.157	69.70	22.39	148.9

5.3. 구속시험

마찬가지로 그림 5와 같은 실험 장치로 구속 시험을 실시하여 얻어진 결과는 표 3과 같다[14].

표 3 전원 주파수 변화에 따른 구속 시험 결과

Table 3 Results of locked rotor test by variable input power

주파수 [Hz]	구속 전압 [V]	정격 전류 [A]	상당 정격 전류 [A]	역율 [%]	피상 전력 계산 [VA]	구속 전력 [Watt]
65	51.83	10.089	2.0278	0.522	522.91	271.18
60	48.09	9.871	1.9742	0.579	474.67	271.35
30	34.76	10.304	2.0608	0.789	358.17	284.24
10	28.72	10.325	2.0650	0.950	296.53	279.89
5	26.13	10.454	2.0908	0.987	273.16	271.62

6. 전동기 정수 계산 및 추정

6.1 무부하 시험

저항측정에서 얻어진 고정자 권선 저항과 무부하 시험에서 얻어진 결과를 이용하면 정격 입력 전원 주파수인 60 [Hz]에서 전동기의 파라메타가 계산 된다[15, 16].

- 무부하 피상전력: $P_{0VA-60} = V_{01} \times I_{01}$
 $= 220.04 \times 1.0002 \times 5 = 1,100.4 [VA]$
- 무부하 무효전력: $Q_{0Var-60} = \sqrt{P_{0VA-60}^2 - P_o^2}$
 $= \sqrt{1,100.4^2 - 78^2} = 1,097.5 [Var]$
- 동손 성분: $P_{0c-60} = 5 \times R_s \times I_{01}^2$
 $= 5 \times 7.752 \times 1.0002^2 = 58.9 [W]$
- 철손 성분: $P_{0i-60} = P_0 - P_{0c-60} = 79.27 - 58.90 = 20.4 [W]$
- 철심 저항: $R_{m-60} = (1/2)((P_0/5 I_{01}^2) - R_s) = 0.5$
 $\times ((79.27/5 \times 1.0002^2) - 7.7525) = 4.0253 [\Omega]$
- 합성 리액턴스 성분: $(X_{ls} + X_{m})_{-60} = Q_{0Var-60} / (5 \times I_{01}^2)$
 $= 1,097.5 / (5 \times 1.0002^2) = 219.41 [\Omega]$

6.2 구속시험

구속시험에서 얻어진 결과를 사용하면 다음과 같이 정격인 60[Hz]에서 전동기의 정수가 계산된다.

- 구속시 피상전력: $P_{sVA-60} = V_s \times 5 \times I_{s1}$
 $= 48.1 \times 5 \times 1.9742 = 474.8 [VA]$
- 구속시 무효전력: $Q_{sVar-60} = \sqrt{(P_{sVA-60}^2 - P_{sa}^2)}$
 $= \sqrt{474.8^2 - 271.4^2} = 389.6 [Var]$
- 합성 누설 리액턴스: $(X_{ls} + X_{lr})_{-60} = (5 \times V_s^2) / Q_{sVar-60}$
 $= 5 \times 48.1^2 / 389.6 = 29.69 [\Omega]$
- 고정자(회전자) 누설 리액턴스:
 $X_{ls-60} = X_{lr-60} = (X_{ls} + X_{lr})_{-60} / 2 = 29.69 / 2 = 14.85 [\Omega]$
- 고정자(회전자) 누설 인덕턴스:
 $L_{ls-60} = L_{lr-60} = X_{ls-60} / (2 \times \pi \times f)$
 $= 14.85 / (2 \times \pi \times 60) = 39.39 [mH]$
- 회전자 저항: $R_{r-60} = P_{sa-60} / (5 \times I_{s1}^2) - R_s$
 $= 271.4 / (5 \times 1.9742^2) - 7.752 = 6.175 [\Omega]$

- 자화 리액턴스: $X_{m-60} = (Q_{0Var-60} / 5 \times I_{01}^2) - X_{l1-60}$
 $= 219.42 - 14.85 = 204.57 [\Omega]$
- 자화 인덕턴스: $L_{m-60} = X_{m-60} / (2 \times \pi \times f)$
 $= 204.57 / (2 \times \pi \times 60) = 542.64 [mH]$

6.3 전원 주파수 변화에 따른 정수 추정

표 4는 입력 전원 주파수 변화에 따라 무부하 시험과 구속시험에서 얻어진 특성 결과를 정리한 것이며, 표 5는 시험에서 얻어진 결과를 사용하여 각 주파수에 해당되는 파라메타 값을 계산하여 정리한 결과이다.

6.4 전원 주파수 변화에 따른 특성 분석

표 5에서 전원 주파수 변화에 따른 운전특성 및 파라메타의 변화 상태를 그래프로 표시하여 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

그림 7은 공급 전원 주파수 변화에 의한 무부하 전류 및 구속 전류의 변화 특성을 보여주는 것이며, 그림 8은 무부하 시험에서 정격전압과 구속시험에서 구속전압 특성이다. 그림 9는 무부하 시험에서 얻어진 철손 성분과 동손 성분의 전력 손실 변화 특성이며, 그림 10은 구속시험에서 얻어진 전력 특성으로 구속전력, 피상전력 및 무효전력의 변화 상태를 보여준다. 그림 11은 전원 주파수 변화에 따른 저항 특성으로, 고정자 저항 R_s 와 철심 자화 저항 R_m 및 회전자 저항 R_r 의 변화를 관측한 것이다. 그림 12는 전원 주파수 변화에 따른 리액턴스 특성으로, 자화 리액턴스 X_m 과 고정자 및 회전자의 누설 리액턴스 $X_{lr}(=X_{ls})$ 의 특성 변화이며, 그림 13은 공급 전원 주파수 변화에 따른 인덕턴스 특성으로, 자화 인덕턴스 L_m 과 회전자 및 고정자의 누설 인덕턴스 $L_{lr}(=L_{ls})$ 변화 특성을 보여준 것이다.

표 4 입력 전원 주파수 변화에 따른 측정된 특성 값

Table 4 Measured characteristics value by variable input power frequency

구분	f	65	60	30	10	5
설정	V_{in}	231	220	110	36	18
권선 측정	R_s	6.65	6.65	6.65	6.65	6.65
	L_s	580.70	580.70	580.70	580.70	580.70
무부하 시험	I_{01}	1.0020	1.0002	0.9832	0.9036	0.7930
	I_o	5.0098	5.0011	4.9159	4.5178	3.9648
	V_{01}	231.27	220.04	110.13	36.24	17.58
	P_0	83.18	79.27	48.15	32.64	22.39
	$\cos \phi_n$	0.067	0.073	0.071	0.190	0.157
	P_{oVA}	1,183.5	1,098.4	529.96	154.87	71.50
	N_{0rpm}	1,949.6	1,792.0	898.0	299.5	148.9
	V_s	51.83	48.09	34.76	28.72	26.13
구속 시험	I_{s1}	2.0178	1.9742	2.0608	2.0646	2.0908
	I_s	10.089	9.8710	10.3040	10.3250	10.4540
	P_s	271.18	271.35	284.24	279.89	271.62
	$\cos \phi_s$	0.522	0.579	0.789	0.950	0.987
	P_{sVA}	522.91	474.67	358.17	296.53	273.16

표 5 전원 주파수 변화에 따른 정수 계산 값

Table 5 Calculated parameters value by variable input power frequency

f	65	60	30	10	5
V_{1n}	231	220	110	36	18
P_{0VA}	1,158.6	1,100.4	541.4	163.7	69.7
Q_{0Var}	1,155.6	1,097.5	539.5	160.4	66.0
P_{0c}	58.28	58.90	39.74	28.89	18.80
P_{0i}	24.90	20.37	8.41	3.75	3.5885
R_m	4.9598	4.025	1.5723	1.3452	0.2355
$(X_{ls} + X_m)$	230.2	219.41	116.62	39.29	20.99
X_m	227.2	216.53	113.85	35.05	9.22
L_m	0.5563	0.5744	0.6040	0.5581	0.2935
P_{sVA}	522.9	474.7	358.16	296.33	273.16
Q_{sVar}	447.1	389.5	217.9	97.30	28.99
$(X_{ls} + X_{lr})$	6.008	5.937	5.544	8.477	23.552
X_{lr}	3.004	2.9687	2.772	4.2385	11.776
L_{lr}	0.0074	0.0079	0.0147	0.0675	0.3748
R_r	6.6708	7.2744	6.7332	6.4824	5.7770

그림 7 주파수 변화에 따른 무부하 및 구속 전류 특성

Fig. 7 Currents characteristics of no-load and rotor lock test changing the variable frequency

그림 8 주파수 변화에 따른 무부하 및 구속 전압 특성

Fig. 8 Voltage characteristics of no-load and rotor lock test changing the variable frequency

그림 9 무부하 시험에서 전력 손실 특성

Fig. 9 Power losses characteristics of no-load test changing the variable frequency

그림 10 구속 시험에서 전력 특성

Fig. 10 Power characteristics of rotor-lock test on changing the variable frequency

그림 11 전원 주파수 변화에 따른 저항 특성

Fig. 11 Resistance characteristics on changing the variable frequency

그림 12 전원 주파수 변화에 따른 리액턴스 특성

Fig. 12 Reactance characteristics on changing the variable frequency

그림 13 전원 주파수 변화에 따른 인덕턴스 특성

Fig. 13 Inductance characteristics on changing the variable frequency

7. 추정된 파라메타 특성 검토

본 연구에서는 얻어진 결과로 공급 전원 주파수 변화에 따른 5상 농형 유도전동기의 파라메타 변화 특성을 고찰한 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 무부하 시험과 구속시험에서 측정된 특성 값은 표 5에서 나타낸다.
- 전원 주파수 변화에 따른 계산 및 추정된 전동기의 파라메타 값은 표 6에서 나타낸다.
- 정격 구속전류를 주파수 변화에 관계없이 일정하게 유지한 상태에서, 무부하 전류는 그림 7에서 보는바와 같이 일정하게 유지됨을 알 수 있다.
- 주파수 변화에 따른 무부하 및 구속 전압은 그림 8과 같이 선형적으로 변화한 상태에서 시험이 이루어지고 있음을 알 수 있다.
- 무부하 시험 및 구속시험에서 전원 주파수 변화에 따른 무부하 전력손실 변화 특성과 정격부하 전력 변화 특성

은 그림 9와 10에서 알 수 있다.

- 주파수 변화에 따른 철심 저항 성분(R_m)과 회전자 저항(R_r)의 변화는 그림 10에서 보여 주고 있으며, 철심 저항 성분은 선형적으로 변화하고 있음을 알 수 있다.
- 자화 리액턴스(X_m) 및 회전자(고정자) 누설 리액턴스($X_{lr} = X_{ls}$)의 파라메타 변화는 그림 12에서 알 수 있다.
- 자화 인덕턴스(L_m) 및 회전자(고정자) 누설 인덕턴스($L_{lr} = L_{ls}$)의 파라메타 변화는 그림 13에서 보여준다. 이는 전원 주파수 감소에 따라 철심의 포화현상으로 자화 인덕턴스는 감소하고, 누설 인덕턴스는 증가되고 있음을 알 수 있다.
- 본 연구에서 제시된 공급 전원 주파수 변화에 따른 5상 농형 유도전동기의 정수(파라미터)가 변화하는 상태 추이 결과를 5상 교류전동기 제어시스템 연구 개발에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

8. 결 론

최근 교류 전동기 개발과 정밀 구동시스템에서 신뢰성 문제에 대한 관심이 고조되어 다상 전동기에 대해 많은 연구가 많이 진행되어 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 직접토크제어가 다양한 분야에서 적용되고 있다. 이들 제어기법에서 교류전동기를 정밀 제어하기 위해서는 반드시 정확한 전동기의 정수가 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 연구용으로 개발된 5상 1.5[kW] 농형 유도전동기의 보다 정확한 정수를 추정하기 위하여 공급 전원의 주파수와 부하를 가변할 수 있는 실험 장치를 제작하여, 전원 주파수 변화에 따른 고정자의 권선 특성을 측정하여 얻어진 결과와 무부하시험, 구속시험, 실부하 시험에서 얻어진 시험결과를 적용하여 5상 농형 유도전동기의 파라메타 변화 상태를 고찰하여 검토하였다. 앞으로 공급되는 전원의 전압 크기와 주파수 변화 및 과부하 변화에 따른 파라메타 특성 추정에 관한 연구가 계속적으로 진행될 것이며, 제시되는 연구 결과는 다상 교류 전동기 개발 및 정밀 제어시스템의 연구개발에 이용될 것으로 사료된다.

References

- [1] Aldo Boglietti, Humberto Henao, and Franck Betin, "Electrical Machine Topologies, Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines, Trends in Electrical Machine Control", IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 8, No. 2, pp. 18-55, 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, M.R. Arahal, "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] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Motors and Generators, 112-2004
- [15] 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.
- [16] Min-Huei Kim, "Parameters Estimations of Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor", Trans. of KIEE, Vol. 61P, No. 4, pp. 199-205, Dec. 2012.
- [17] Min-Huei Kim, Hyung-Woo Jung, Hyun-Jik Song, "Development of Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor of 1.5kW", Trans. of KIEE, 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 KIEE, Vol. 28, No. 5, pp. 52-59, May 2014.
- [19] D. W. Novotny and T. A. Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives." Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 1996.
- [20] Hyung-Woo Jung, Min-Huei Kim, Dong-Hee Kim, "A Development of Surface Permanent Mount Synchronous Generator for 5 Phase 5kW", Trans. of KIEE, Vol. 26, No. 11, pp. 87-96, Nov. 2012.

감사의 글

이 연구는 2014학년도 영남이공대학교 연구조성비 지원에 의한 것임.

저 자 소 개

김민회 (金 玟 會)

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