Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 13, No.4, pp. 27~31 November 1999 [논문 : 13-4-5]

새로운 권선법에 의한 권선형 유도전동기의 기동특성

(Starting Characteristic of Wound Rotor Induction Motor by New Winding Method)

강만원*
(Man-Woun Kang)

요 약

본 연구는 산업분야의 수많은 전기설비 시스템에 널리 사용되고 있으며 또 이중여자기로도 사용될 수 있는 권선형 유도전동기의 기동특성과 설계를 다루었다. 고정자는 재래식 3상 권선형 유도 전동기의 고정자 와 동일하고 회전자 권선은 새로운 방법으로 재권선한 결과 기동토크는 크고 기동전류는 작으며 운전효율은 좋아졌다. 뿐만 아니라 슬립링과 브러쉬 및 외부저항의 필요성이 없어 구조가 간단하고 시스템 비용을 절약할 수 있을 뿐 아니라 유지보수비도 절약할 수 있었다.

Abstract

This paper covers starting characteristics and design of wound rotor induction motor can used to double excited induction motor. They are employing in many electrical equipment system of industrial field. The stator is same as that of conventional induction motor. But rotor was rewind with new style, as result both of starting torque and operating efficiency could be high, But starting current could be small. Could obtain the same result as that of conventional induction motor with external resistance on the rotor. The structure could be simple, system cost could be low and the maintanence free, Because of no slip rings, no brushes and no external resistance.

1. 서 론

산업분야의 수많은 전기설비 시스템에 널리 사용되고 있을 뿐 아니라 이중여자기로 사용될 수 있는 권선형 유도전동기는 구조적으로 튼튼하여 일반적인 가변속 시스템에 널리 이용되고 있다. 특히 마이크로프로세서의 발전으로 유도전동기의 비선형성이 극복되고 최근 벡터제어에 이르기까지 매우 다양해지고 있으며 더구나 전원이나 부하의 변화에 대해서도 원활하게 대처할 수 있는 고급 제어시스템들이 많이 연구개발되고 있다.

권선형 유도전동기의 속도제어에는 많은 방법들이 있으나 자주 또는 단시간 제어에는 아직까지 많은 분야에서 저항제어를 사용하고 있으며 기동방법으로는 전적으로 외부저항을 삽입하는 저항기동방법이 많이 사용되고 있다. 보통 회전자 저항 증가와 함께 회전자 인덕턴스가 증가하기 때문에 단순히 회전자 저항 증가 만으로 기동 토크가 커진다고는 할 수 없다.

권선형 유도전동기의 회전자에 외부저항을 삽입하므로써 기동 토크를 크게하고 기동 전류는 감소시켜

* 정회원 : 대전산업대 제어계측과 교수
접수일자 : 1999년 2월 19일

기동을 원활하게 수행할 수는 있으나 기동저항은 기동시만 필요하므로 기동횟수가 적은 분야에서는 그 이용율이 낮아 합리적이지 못하다. 만약 외부저항 없이 권선형 유도전동기의 기동토크를 크게하고 기동전류를 적게하며 운전효율을 높일수 있다면 가장 이상적이라 할 수 있겠다.

권선형 유도전동기의 회전자 권선을 재권선하므로써 위의 조건을 만족 시킬 수 있다. 즉 회전자 권선의 접속을 바꾸어 기동시 기동전류는 줄이고 회전자 저항은 크게하여 기동토크를 크게하며 운전시는 회전자 저항을 적게하여 운전효율을 높인다.

2. 원 리

전기기계 에너지 변환의 기본법칙은 정상운전에서 회전자의 회전자장과 고정자의 회전자장은 같은 속도로 회전한다.

$$f_1 = N_1 \cdot f_m + f_r \tag{2.1}$$

여기서 f_1은 공급 주파수고 f_m은 1초간의 기계각으로 나타낸 각속도며 N_1(P1/2)은 고정자의 극쌍수고 f_r은 고정자에 의해 유기되는 회전자 전류 주파수며 전동기의 속도는 다음과 같다.

$$RPM = 60 \cdot f_m \tag{2.2}$$

고정자와 회전자의 상호작용으로 다음과 같이 정의되는 슬립이 만들어지는대 슬립은 어떤속도에 대한 회전자 속도의 이탈의 정도를 나타내며 유도기의 슬립은 동기속도에 대한 회전자 속도의 이탈의 정도를 나타낸다.

$$S_1 = \frac{f_r}{f_1} = \frac{f_1 - N_1 \cdot f_m}{f_1} \tag{2.3}$$

식(2-2)와 식(2-3)에 의해 전동기의 속도는 슬립 S의 항으로 나타낼 수있다.

$$RPM = 60 \cdot \frac{f_1 \cdot (1 - S_1)}{N_1} \tag{2.4}$$

3. 구 조

권선형 유도전동기의 고정자 권선 접속은 일반 재래식 권선형 유도전동기의 권선배열과 같으며 전절권으로 하면 매극 매상의 코일수가 일정하고 기전력이 커지지만 기전력의 파형을 좋게 하고 누설 리액턴스를 감소시키며 동손에 의한 열을 골고루 분산시켜 과열을 방지하도록 매극 매상의 슬롯수를 3으로한 분포권으로 하였으며 고조파를 제거해서 기전력의 파형을 좋게하고 코일 단부가 단축되어 기계 전체의 길이가 축소되며 동량이 적게드는 8/9 단절권 구조의 2층권으로 하므로서 분포계수는 0.96이 되며 단절계수는 0.985가 되어 그 곱인 권선계수는 0.9456이 되므로 기전력은 약 5.4[%] 감소됨을 알 수 있다.

권회수는 만족한 공극자속을 얻을 수 있는 범위내에서 최대가 되어야 하며 권회수가 많으면 표피효과가 적어지고 자화 전류가 적어지기 때문에 기계손실면에서 볼때 권회수가 많은 것이 바람직하다. 전기기계의 자화전류는 일반적으로 $V_1 / (f_1 \cdot W_1^2)$에 비례하며 공극 자속은 $V_1 / (f_1 \cdot W_1)$에 비례하기 때문에 권회수가 많으면 공극 자속을 감소시킬 수 있지만 충분한 공극자속이 기동 토크를 위해 필요하다. V_1는 공급 전압이고 W_1는 권회수다.

회전자 권선은 매극 매상의 슬롯수를 2로한 분포권으로 하였으며 5/6 단절권 구조의 2층권으로 하므로서 분포계수 와 단절계수가 다같이 0.966이 되며 그 곱인 권선계수는 0.933이 되므로 기전력은 약 6.7[%] 감소됨을 알 수 있다. 회전자 권선은 두개의 서로 다른 권횟수를 갖고 회전자의 같은 슬롯에 들어있으므로 유기된 기전력의 위상은 같으나 크기는 서로 다르다. 회전자 권선의 총 권횟수 W_2는 W_2^1 과 W_{22}로 구성되며 W_{21}의 저항을 r_{21}이라 하고 리액턴스를 x_{21}이라 하며 W_{22}의 저항을 r_{22}라 한다.

$$(W_1/W_{21})^2 \cdot r_{22} = (r_1^2 + (x_1 + (W_1/W_{21}^2)^2 x_{21})^2)^{1/2} - (W_1/W_{21})^2 r_{21}$$

이 성립되도록 W_{21}을 조정하면 기동시 최대토크를 얻을 수 있다. 즉 $(W_1 / W_{21})^2 r_{22}$는 저항 r_{22}의 고정자에 환산된 값으로 무 유도저항이고, $(r_1^2 + (x_1 + (W_1/W_{21})^2 \cdot x_{21})^2)^{1/2} - (W_1/W_{21})^2 r_{21}$은 기동시 최대 토크를

얻을 수 있는 외부저항과 같은 값이다. $(W_1 / W_{21})^2 r_{21}$ 은 저항 r_{21}의 고정자에 환산된 값이고, W_1은 고정자 권선의 권횟수며, r_1은 고정자의 권선저항이고, x_1은 고정자의 누설리액턴스다.

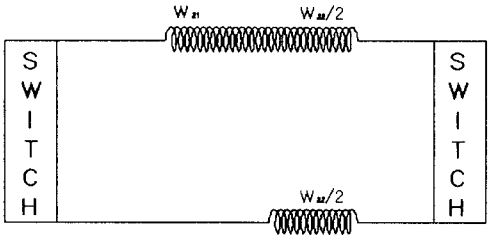

그림 1. 회전자 권선
Fig. 1. Rotor Winding

회전자의 무 유도저항으로 인해 리액턴스가 감소되므로 높은 기동토크를 얻을 수 있다. 회전자 스롯 누설리액턴스가 회전자 전체 누설리액턴스의 대부분을 차지하며 슬롯 하층부의 리액턴스는 슬롯 상층부의 리액턴스 보다 크기 때문에 회전자 누설리액턴스를 줄이기 위해선 슬롯에 넣는 코일변의 위치에 주의를 기울여야 한다. 뿐만 아니라 W_{21} 과 W_{22}의 비를 적당히 하므로서 회전자의 저항과 리액턴스의 크기를 조정 할 수 있다. 기동시 회전자 코일 W_{22}에 흐르는 전류의 방향을 서로 반대가 되도록 결선하면 W_{22}코일에 유기되는 유기기전력은 서로 반대가 되어 상쇄된다. 그래서 W_{22}코일은 무유도 저항이 되며 W_{21}코일만 기전력을 유기하게 된다. 따라서 W_{21}코일에 무유도저항이 직렬로 접속되어 기동시에는 회전자 저항이 커지게 되어 기동토크가 크게되며 유기기전력은 작아지기 때문에 기동전류는 작아진다.

회전자의 저항을 변환하는 데는 변환 스위치를 사용하는 방법과 극수변환등 여러가지가 있으나 여기서는 변환 스위치를 사용하는 방법만 논하기로 한다. 원심력 스위치를 이용하여 기동시는 코일을 직렬로 결선되게 하여 유기기전력을 작게하여 기동전류는 줄이고 회전자 저항은 크게하여 기동토크를 크게하면서 운전시는 병렬로 결선하여 회전자 저항을 줄여서 효율을 좋게한다.

회전자의 두 코일에 유기되는 유기기전력은 동상이나 크기는 서로 다르다. 운전시 회전자 주파수는 아주 작기 때문에 저항에 비해 리액턴스는 작아 회로에 흐르는 전류는 저항의 크기에 좌우되며 코일이 서로 병렬접속되어 저항이 작아지므로 효율이 좋아지게 된다.

4. 등가회로

권선형 유도전동기의 정수들은 평형이 되었다고 가정하고 각 권선은 고정자 주위에 정현적으로 분포 되었다고 가정하며 철손은 무시한다.

권선형 유도전동기의 전압전류 관계식은 전동기를 제어하는데 도움이 될뿐 아니라 전동기의 운전조건을 결정하는 여러 중요한 변수들 간에 상호관계를 찾고 전동기의 실행을 이해하는 데 필요하다.

그림 2는 권선형 유도전동기의 등가회로를 나타내며 모든 량은 한 상에 대한 값을 나타내고 전압은 상전압이며 전류는 상전류다. 회로의 왼편 단자는 고정자를 나타내고 오른편 단자는 회전자를 나타내며 모든 변수는 고정자에 환산되었기 때문에 회전자 저항은 슬립 S1로 나누어 진다.

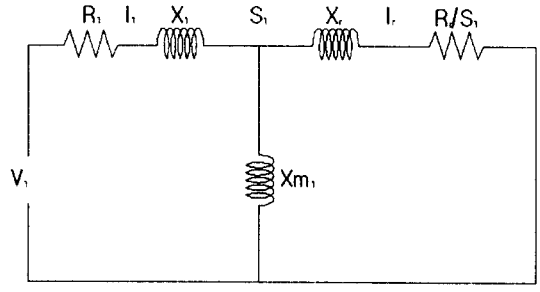

그림2. 유도전동기의 등가회로
Fig. 2. Equivalent Circuit of Induction Motor

5. 입, 출력

그림 2의 등가회로에서 전압전류에 대한 심볼들은 실효치로 나타냈고 회로정수는 실제의 값을 나타냈다. $jXm_1.I_r$은 회전자 전류에 의해 고정자에 유기된 전압이고 $jXm_1.I_1$은 고정자 전류에 의해 회전자 도체에 유기된 전압이다. 그림 2에서 2개의 회로망에 Kirchhoff의 전압법칙을 적용시키면 고정자와 회전자 회로에 대한 전압전류 관계식이 다음과 같이 얻어진다.

$$V_1 = R_1 \cdot I_1 + j(X_1 + Xm_1) \cdot I_1 + jXm_1 . I_r \quad (5.1)$$

$$0 = jXm_1 \cdot I_1 + \frac{R_r}{S_1} I_r + j(X_r + Xm_1) \cdot I_r \tag{5.2}$$

유도전동기의 전력관계는 위에서 주어진 전압전류의 관계식으로 부터 얻어질 수 있으며 위의 두 식은 단상등가를 나타내기 때문에 3상에 대해선 식(5-1)에 $3I_1^*$ 및 식(5-2)에 $3Ir^*$를 (I_1^*는 I_1의 공액, Ir^*는 Ir의 공액) 각각 곱하고 실수부 만을 끌어내면 고정자 및 회전자에 대한 전력 관계가 얻어진다.

$$Pe_1 = Pag_1 + Pc_1 \tag{5.3}$$

$$Pem_1 = Pag_1 - Pcr \tag{5.4}$$

$$Pe_1 = 3Real(V_1 . I_1^*)$$

$$Pc_1 = 3I_1^2 \cdot R_1$$

$$Pag_1 = 3Real(jXm_1 \cdot I_r . I_1^*)$$

$$Pem_1 = 3I_r^2 \cdot R_r((1 - S_1)/S_1)$$

$$P_{cr} = 3I_r^2 R_r$$

Pc_1은 고정자에서 소비되는 전력이고 Pcr은 회전자에서 소비되는 전력이다. 공극전력과 기계력은 고정자에 의해 만들어지는 토크 Tem_1과 다음의 관계가 있다.

$$Pag_1 = Tem_1 2\pi \frac{f_1}{N_1} \tag{5.5}$$

$$Pem_1 = Tem_1 2\pi fm \tag{5.6}$$

식(2-3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_m = \frac{(1 - S_1) \cdot f_1}{N_1} \tag{5.7}$$

이 식을 식(5-6)에 대입하고 식(5-5)와 식(5-6)으로 부터 Pem_1에 대해 풀면 다음식이 얻어진다.

$$Pem_1 = (1 - S_1) \cdot Pag_1 \tag{5.8}$$

6. 실험 및 시뮬레이션

실험용 3상 권선형 유도전동기는 4극, 60[Hz], 25[HP], 220[V], $W_1 / W_2 = 2$, $r_1 = 0.1[\Omega]$, $x_1 = 0.2[\Omega]$, $rr = 0.04[\Omega]$, $xr = 0.05[\Omega]$, $xm_1 = 9.61[\Omega]$ 이며 고정자 와 회전자 모두 Y결선이다. 고정자 슬롯수는 36이고, 매극 매상의 슬롯수를 3으로 한 분포권이며 8/9 단절권 구조의 2층권으로 권횟수 40의 0.85[mm] 에나멜 동선을 사용하였다. 회전자는 스큐슬롯으로 슬롯수가 24이고 매극 매상의 슬롯수를 2로한 분포권이며 5/6 단절권 구조의 2층권으로 1.3[mm]의 에나멜 동선을 사용하였다. 회전자 권선에서 코일 W_{21}의 권횟수는 12고, 코일 W_{22}의 권횟수는 8이며 전체 권횟수는 20이다. 무부하시의 속도-토크 곡선과 속도-전류 곡선은 그림 3, 그림 4와 같다.

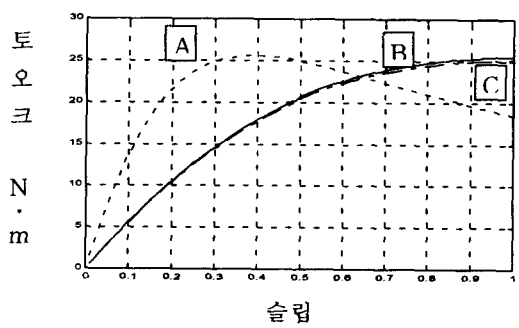

그림 3. 속도-토크 곡선
Fig. 3. Torque-Speed Curve

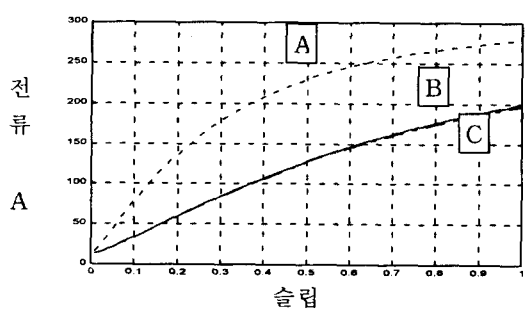

그림 4. 속도-전류 곡선
Fig. 4. Current-Speed Curve

그림에서 (A)는 재래식 권선형 유도전동기 만의 특성이고 (B)는 재래식 권선형 유도전동기의 회전자에 외부저항을 접속한 경우며 (C)는 회전자 권선을 재권선한 새로운 형태의 권선형 유도전동기로 W_{21} 및 W_{22} 코일을 직렬접속한 경우의 특성이다. 실험결과

외부저항을 접속하지 않은 새로운 방법도 재래식 권선형 유도전동기의 회전자에 외부저항을 접속한 경우와 동일한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있으며 효율은 74[%]에서 90[%]로 약 16[%]이상 증가했음을 알 수 있다.

7. 결 론

고정자는 재래식 권선형 유도전동기와 동일하고 회전자는 새로운 권선방법으로 재 권선하였다. 회전자 스롯 누설리액턴스가 회전자 전체 누설리액턴스의 대부분을 차지하며 같은 슬롯이라 할지라도 위치에 따라 리액턴스가 다르기 때문에 기동전류를 작게하고 기동토크는 크게하면서 효율은 좋아지도록 누설리액턴스를 최소화 하였으며 회전자 두 코일의 비를 최적화 하였다. 이렇게 하므로서 슬립링과 브러쉬 및 외부저항의 필요성이 없어 구조가 간단하고 시스템 비용을 절약할 수 있을 뿐 아니라 유지보수비도 절약할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] F. Creedy, "Some developments in multi - speed cascade induction motors", proc. IEE,Vol.59,pp.511-532, 1921.

[2] P. G. Homes, "Cycloconverter-excited divided- winding doubly-fed machine as a wind-power converter",proc. IEE, vol. 131, no.2,pp. 1321-1379,Mar. 1984.

[3] Xu Shizhang, "3Yconnection without circulating current used for pole changing winding of AC motor",Chinese patent 35108632, jun. 1982.

[4] W.Shepherd,A.Q.Khalil,"Capacitive compensation of thyristor-controlled slip power - recovery system",Proc. IEE,Vol.117, No.5, pp.948-962, 1970.

[5] J. L. Hunt, "A new type of induction motor",Proc. IEE, Vol.39, pp.648-667,1907.

[6] Paul. C. Krause, Olegwasynczuk, Electromechanical motion devices, McGraw Hill, 1990.

[7] A. E. Fitzgerald, Stephen D. Umans, Electric machinery, McGraw Hill 1990.

[8] Syed A. Nasar, Electric Machine and transformer, Macmillan

◇ 저자소개 ◇

1942년 1월 18일생. 1969년 한양대 공대 전기공학과 졸. 1983년 건국대 대학원 전기공학과 졸 (석사). 1994년 건국대 대학원 전기공학과 졸 (박사). 1989. 4~1990. 4 미국 Oregon 주립대 교환교수. 1990.4~19914 미국 South Carolina 주립대 교환교수. 1998.2~1999.2 미국 Wisconsin 주립대학 교환교수. 현재 대전산업대 교수.