

# 이중여자에 의한 유도전동기의 동기운전

(Synchronous Operation of Induction Motor by Double-Excitation)

金漢星\* · 姜萬元\*\*

(Han-Sung Kim · Man-Won Kang)

## 요 약

이중여자 유도전동기의 두 3상시스템중 하나는 직접 전원에 접속되어서 에너지 변환을 담당하고 다른 3상 시스템은 전류의 크기나 주파수를 제어할 수 있는 인버터에 접속되었다. 단일여자 모드에서 운전되는 기계는 유도모드만 가능하나 이중여자 모드에서 운전되는 기계는 유도모드와 동기모드 둘다 가능하다. 동기모드에서 운전되는 이중여자 유도전동기의 효율은 유도모드나 기존의 유도전동기 보다 높으며 속도 제어용 인버터 정격은 일반적으로 기계정격 보다 크지만 이중여자 시스템에서는 기계 정격의 일부로 가능하다. 동기모드에서 속도는 인버터 출력전류의 크기나 주파수를 가변함으로써 제어될 수 있으며 이중여자 유도전동기를 가변속도 시스템에 사용하면 다른 전기기계의 사용에 비해 유지 보수비와 가격을 감소시킬 수 있다.

## Abstract

The doubly excited induction motor has two sets of three-phase system : One is connected to the AC source to take care of energy conversion, and the other is to the inverter controlable frequency and/or magnitude of voltage. The conventional induction motor is operated under single excitation mode only, that is called induction mode. But both of the induction mode and the synchronous mode are possible in double excitation motor, and the proposed double excitation motor can be driven as a synchronous motor by the extra three-phase input. At the synchronous mode the efficiency is improved so higher than at induction mode or conventional induction motor. The rating of the inverter used for speed control can be reduced upto one-fifth of that for conventional induction motor. Also the cost and maintenance fee of double excitation induction motor can be reduced compared to any other motors.

### 1. 서 론

유도전동기는 값싸고 튼튼하여 가변속시스템에 널리 이용되고 있으며 특히 마이크로프로세서의 발전으로 유도전동기의 비선형성이 극복되었

고 벡터제어에 이르기까지 매우 다양해지고 있으며 전원이나 부하의 변화에 대해 원활하게 대처할 수 있는 고급 제어시스템들이 많이 연구개발되고 있다. 유도전동기와 동기전동기는 정속운전 특성을 갖고 있으며 인버터로 입력주파수를 가변

\* 正會員 : 建國大 工大 電氣工學科 教授

\*\* 正會員 : 大田産業大 制御工學科 副教授

接受日字 : 1993年 8月 16日

시켜 속도를 제어하고 있으나 인버터 정격이 보통 전동기 정격의 150[%] 이상을 설정하게 되어 전동기 정격이 커질수록 인버터 정격은 더욱 증대되어 제어부의 설치비가 상승된다. 그리고 정속운전에는 거의 동기전동기를 사용하고 있는데 동기전동기의 가격이 권선형이나 농형유도전동기에 비해 비교될 수도 없을 만큼 엄청난 가격의 차이가 있다. 따라서 농형유도전동기를 재설계하여 동기전동기와 같이 운전할 수 있다면 전체 속도제어 시스템을 아주 저렴하게 구성할 수 있을 것이다.

이중여자구조인 Single frame cascade induction motor는 슬립링을 사용하지 않고 속도를 제어할 수 있다는 것이 1907년 Hunt에 의해 제시되었으며<sup>1)</sup> 하나의 전동기구조에 2대의 권선형 유도전동기를 설치하여 3가지 속도를 변경가능하도록 하였으나 구조적으로 복잡하고 효율이 저하되는 단점이 있었다. 1970년 Broadway는 이를 해결하기 위해 이중여자의 이론을 정립하고자 하였으나<sup>2)</sup> 동기화 방법이나 동기모드에서의 속도제어 및 동기조건이나 인버터의 정격과 효율 및 전력의 평형성 등에 관해서는 다루지 못하였다. 본 연구에서는 기존의 이중구조를 변경하여 전동기 특성을 개선함은 물론 동기운전까지 가능토록 하고자 한다.

제안된 이중여자 유도전동기의 고정자는 하나의 권선으로 두개의 3상시스템을 구성하였으며 각각 독립된 전원으로 부터 전력이 공급되는데 고정자의 한 부분에는 60[Hz]의 상용전원을 연결하고 다른 부분은 인버터를 연결하여 속도를 제어한다. 회전자는 양쪽 모두 단락환으로 되어 있는 것을 한쪽만 단락시킨 구조로 재설계함으로써 전류파형이 개선되어 전동기의 토크가 증대되면서 소음도 저감되는 특성을 갖게 된다. 인버터 정격은 전동기 정격의 20[%] 이하로 충분하며 넓은 범위에 걸쳐 속도를 제어할 수 있고 유도전동기의 동기운전까지 가능토록 하여 기존의 동기전동기에 대치될 수 있게 하였다. 효율은 약 89[%] 이상으로 유지되어 기존의 약 73[%] 정도에 비해 크게 개선되었다.

## 2. 이중여자 유도전동기의 기본원리

기존의 유도전동기는 단일여자 방식이었으며 특히 권선형 유도전동기에서는 슬립링과 브러시를 통해 외부에서 저항을 연결하여 속도를 제어하였으나<sup>1), 3)</sup> 이러한 저항제어는 비효율적이므로 슬립전력을 전원으로 반환하는 방식들이 사용되었다.<sup>4)</sup>

유도전동기는 하나의 입력단자를 가지므로 본래의 동작모드인 유도모드의 동작만 하게 되지만 고정자를 재권선하여 또 하나의 입력단자를 갖도록 하면 유도전동기는 두개의 입력단자 즉 U-V-W와 X-Y-Z를 갖게 된다. 이러한 유도전동기는 두 단자에 서로 다른 주파수의 전원을 공급할 수 있으며 본 연구에서는 이러한 구조를 이중여자라고 하고 X-Y-Z측의 전압 및 주파수를 적절히 조절하면 유도모드와 동기모드 둘다 가능하며 동기모드에서 속도제어도 가능하다.

A시스템에 전압  $V_1$ , 주파수  $f_1$ 의 교류를 공급하고 동시에 B시스템에 전압  $V_2$ , 주파수  $f_2$ 를 공급하면 회전자에는 A시스템에 의한  $f_{r1}$ 과 B시스템에 의한  $f_{r2}$ 의 두개 주파수의 전류가 흐르게 되고 1초간의 기계각으로 나타낸 각 속도를  $f_m$ 이라 하면 극쌍수  $p_1(p_1/2)$ ,  $p_2(p_2/2)$ 에 대해서는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_1 = p_1 \cdot f_m + f_{r1} \quad (1)$$

$$f_2 = f_{r2} - p_2 \cdot f_m \quad (2)$$

$$\text{RPM} = 120 \cdot \frac{f_1 - f_2 - f_{r1} + f_{r2}}{P_1 + P_2} \quad (3)$$

B시스템에 공급되는 전류의 크기를 적절하게 조정하면 이중여자 유도전동기는 동기모드에서 운전되고 회전자 도체에 흐르는 전류는 단일 주파수  $f_1$ 이 되어 속도는 다음과 같이 된다.

$$\text{RPM} = 120 \cdot \frac{f_1 - f_2}{p_1 + p_2} \quad (4)$$

이 식에서 보는 바와 같이  $f_1$ 이나  $f_2$ 를 변경하여 전동기의 속도를 제어할 수 있으며  $f_1$ 을 고정하더라도  $f_2$ 의 주파수를 변화시켜 전동기의 속도를 제어할 수 있게 된다.  $f_2$ 의 증가에 따라 전동기의 속도는 감소되며  $f_1 = f_2$ 의 임계조건에서 속도는 영으로 되었다가 다시 전동기가 역회전하게

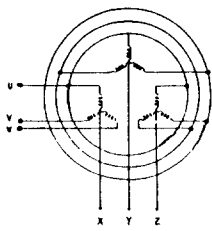
된다.

즉 유도모드는 유도전동기의 동작형태이며 동기모드는 동기전동기의 동작형태인데 이중여자 유도전동기는 유도모드와 동기모드 둘다 가능하다. 유도전동기의 속도는 부하의 속도-토크 곡선과 전동기의 속도-토크곡선 간의 교점에 의해 결정되지만 이중여자 유도전동기의 속도는 두 3상시스템의 공급주파수에 의해 결정된다.

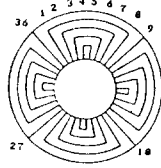
### 3. 이중여자 유도전동기 설계

그림 1(a)는 이중여자 유도전동기의 고정자 권선도로써 두 3상시스템중 하나는 U-V-W 단자에 접속되고 다른 하나는 X-Y-Z 단자에 접속되었다. 이중여자 유도전동기에서 전원은 3상시스템중 하나에 접속되고 다른 3상시스템에는 인버터가 접속되며 두 3상시스템의 주파수는 동일하지 않다. 이중여자 유도전동기의 속도는 인버터 출력전류의 크기나 주파수를 가변함으로써 제어될 수 있다.

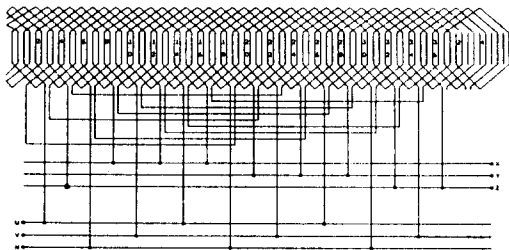
그림 1(a)는 공통권선이 두 3상시스템에 사용되었으며 고정자 권선에는 두개의 3상전원으로



(a) Circuit diagram of stator



(c) Rotor conductor



(b) Winding diagram of stator

그림 1. 고정자와 회전자 회로도

Fig. 1. Circuit diagram of stator & rotor

부터 주파수가 서로 다른 두개성분의 전류가 동시에 흐르며 두 전류에 의해 만들어지는 자장이 서로 다른 극수를 갖도록 배치되어 있고 권선도는 그림 1(b)와 같다.

두 시스템 간의 극수조합이 이중여자 유도전동기를 만드는데 중요한 요소라고 할 수 있으며 이 관계는 표에 나타내었고 A, B 두시스템의 극수조합중 가능한 것은 O표 불가능한 것은 X표로 각각 표시하였다.  $p_1=6$ 에서는  $p_2=2$ 인 조합과  $p_2=6$ 인 조합중에서  $p_1=6$  및  $p_2=2$ 인 극수조합이 효율, 출력중대 등의 면에서 유리하므로 이를 선택한다.

고정자 슬롯수가 36인 경우 극수가 6이 되면 극당 슬롯수가 6으로 되어 매극 매상 슬롯수가 2인 분포권으로 되며 5/6단절권 구조의 2층권으로 함으로서 기전력이 약 6.7[%]정도 감소된다. 권선방법은 기존의 경우 바로 이웃의 반대극이 될 권선과 접속되는데 반해 제안된 이중여자 유도전동기에서는 다음의 반대극이 될 권선과 접속된다. 또한 중성점으로부터 X-Y-Z의 3단자를 접속함으로서 X-Y-Z에서 보면 2극이 되어 하나의 공통권선으로 6극과 2극을 만들수 있다.

회전자는 총 36개의 도체로 구성되며 한쪽 끝은 단락환으로 모두 단락시키고 다른 한쪽은 4개의 그룹으로 나누면 각 그룹에는 9개씩 배치되는데 도체 1-8, 2-7, 3-6 및 4-5의 도체끼리는 단락시키고 도체 9는 각 그룹에서 연결되지 않은채 남아있으므로 이들 4개를 따로 단락시키면 그림 1(c)와 같이 되어 전체적으로 볼 때 4극의 구조가 된다.

이렇게 함으로서 회전자는 4극이 되어 6극인 고정자와 함께 마치 릴럭턴스 전동기의 구조처럼

표. A, B 두 시스템의 극수조합

$P_1 \backslash P_2$	2	4	6	8	10
2	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X
6	O	X	O	X	X
8	X	X	X	X	X
10	X	X	X	X	X

(O가능 : X:불가능)

동기의 회전자 역할을 겸하게 되면 토크가 커지고 효율이 증가하며 고조파가 제거되어 회전자의 전류파형이 정현파로 되어 진동이나 소음을 줄일 수 있다.

#### 4. 이중여자 유도전동기의 동기화 및 속도 제어

식 (3)에서 A시스템의 공급주파수를  $f_1$ 으로 고정시키고 임의의 주파수  $f_2$ 에서 B시스템의 전류 크기를 조정하면  $f_{r1}=f_{r2}$ 의 상태로 되는데 이를 이중여자 유도전동기가 동기화되었다고 하며 그때의 속도는 식 (4)로 표현되고 실제속도를 측정하였을 때 식 (4)를 만족하거나  $f_2$ 에 따라 속도가 제어되면 동기화된 것이다.

와 같이 이중여자 유도전동기는 동기전동기 같이 동작되며 동기탈조를 피하기 위해서는 B시스템의 전류를 어떤 범위내의 값으로 유지해야 한다. 만약 B시스템의 전류가 적절하지 못하면 동기탈조되어 유도모드에 놓이게 되며 속도는  $f_1$ 에 의해서만 제어된다.

이처럼 이중여자 유도전동기의 속도는 B시스템의 주파수  $f_2$ 의 제어만으로 정지상태에서 동기 속도에 이르기까지 연속적으로 가변할 수 있으며, 동기속도이상의 속도나 역방향 운전도 가능하다. B시스템의 주파수는 인버터에 의해 제어되고 유도전동기 제어용 인버터에 비해 그 용량이 20[%]이하로 줄일수 있는 장점이 있다.

#### 5. 이중여자 유도전동기의 해석

##### 5.1. 등가회로

이중여자 유도전동기는 공통 회전자도체와 공통 고정자권선을 갖도록 설계되어 있지만 서로 다른 극수를 갖기 때문에 이중여자 유도전동기는 기존의 유도전동기 2대가 공통축과 공통 회전자 권선을 공유하도록 구성된 것으로 볼 수 있다. 지금 이중여자 유도전동기의 권선은 고정자주위에 정현적으로 분포되어 있다고 가정하며 편의상 철손은 무시하고 각정수는 평형이 되었다고 가정한다.

그림 2는 이중여자 유도전동기의 등가회로로 모든 양은 한상에 대한 값을 나타내고 전압은 상 전압이며 전류는 상전류다. 회로의 왼편 단자는 A시스템을 나타내며 직접 전원에 접속되고 회로의 오른편 단자는 B시스템을 나타내며 인버터에 접속되었다. 회전자 저항과 B시스템 저항에 슬립  $S_1$ 과 슬립  $S$ 의 영향을 나타냈으며 이 등가회로는 A시스템에 환산된 변수들의 상태를 나타냈다. 이중여자 유도모드에서의 슬립은 다음과 같이 된다.

$$S_1 = \frac{f_{r1}}{f_1} \quad (5)$$

$$S_2 = \frac{f_2}{f_{r2}} \quad (6)$$

$$S = S_1 \cdot S_2 = \frac{f_{r1}}{f_1} \cdot \frac{f_2}{f_{r2}} \quad (7)$$

이중여자 동기모드일 경우 식 (5)~식 (7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_1 = \frac{f_r}{f_1} = \frac{f_1 - \rho_1 \cdot f_m}{f_1} \quad (8)$$

$$S_2 = \frac{f_2}{f_r} = \frac{f_2}{f_2 + \rho_2 \cdot f_m} \quad (9)$$

$$S = S_1 \cdot S_2 = \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_1 - (\rho_1 + \rho_2) \cdot f_m}{f_1} \quad (10)$$

##### 5.2 전압과 전류

그림 2의 등가회로에서 전압 전류에 대한 기호들은 실효치로 나타냈고 회로정수는 실제의 값을 나타냈다.  $jX_{m1}$ 은 회전자 전류에 의해 A시스템에 유기된 전압이고  $jX_{m1}I_1$ 은 A시스템의 전류에 의해 회전자도체에 유기된 전압이다.  $jX_{m2}$ 은 회전자 전류에 의해 B시스템에 유기된 전압이고  $jX_{m2}I_2$ 는 B시스템의 전류에 의해 회전자에 유기된 전압이다.

그림 2에 Kirchhoff의 전압법칙을 적용시키면 된다. 회전자가 기존의 농형회전자와 릴럭턴스전

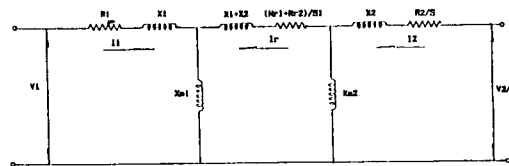


그림 2. 등가 회로

Fig. 2. Equivalent circuit

A시스템과 B시스템 및 회전자 회로에 대한 전압 전류 관계식이 다음과 같이 얻어진다.

$$V_1 = R_1 \cdot I_1 + j(X_1 + X_{m1}) \cdot I_1 + jX_{m1} \cdot I_r \quad (11)$$

$$\frac{V_2}{S} = \frac{R_2}{S} \cdot I_2 + j(X_2 + X_{m2}) \cdot I_2 - jX_{m2} \cdot I_r \quad (12)$$

$$\frac{V_3}{S_1} = -jX_{m1} \cdot I_1 + jX_{m2} \cdot I_2 - \frac{R_{r1} + R_{r2}}{S_1} \cdot I_r - j(X_1 + X_{m1} + X_2 + X_{m2}) \cdot I_r \quad (13)$$

여기서  $V_3$ 는 기계적인 출력과 등가인 전압이다.

### 5.3. 입력 및 출력의 관계

이중여자 유도전동기의 전력관계는 전압 전류의 관계식으로부터 얻어질 수 있으며 식 (11)에  $3 \cdot I_1^* (I_1^*$ 는  $I_1$ 의 공액)를 곱하고 실수부만을 끌어내면 A시스템에 대한 전력식이 얻어진다.

$$P_{e1} = P_{ag1} + P_{c1} \quad (14)$$

여기서

$$P_{e1} = 3 \cdot \text{Real}(V_1 \cdot I_1^*) \quad (15)$$

$$P_{c1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (16)$$

$$P_{ag1} = 3 \cdot \text{Real}(jX_{m1} \cdot I_r \cdot I_1^*) \quad (17)$$

식 (12)에  $3 \cdot I_2^*$ 를 곱하면 B시스템에 대한 전력관계가 얻어진다.

$$P_{e2} = P_{c2} - SPag_2 \quad (18)$$

여기서

$$P_{e2} = 3 \cdot \text{Real}(V_2 \cdot I_2^*) \quad (19)$$

$$P_{c2} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (20)$$

$$P_{ag2} = 3 \cdot \text{Real}(jX_{m2} \cdot I_r \cdot I_2^*) \quad (21)$$

식 (13)에  $3 \cdot I_r^*$ 를 곱하면 회전자에 대한 전력관계식이 얻어진다.

$$P_{em} = S_1 P_{ag1} - S_1 P_{ag2} - P_{\sigma} \quad (22)$$

여기서

$$P_{em} = 3 \cdot \text{Real}(V_3 \cdot I_r^*) \quad (23)$$

$$P_{\sigma} = 3 \cdot I_r^2 \cdot (R_{r1} + R_{r2}) \quad (24)$$

$P_{c1}$ 은 A시스템의 동손이고  $P_{c2}$ 는 B시스템의 동손이며  $P_{\sigma}$ 은 회전자의 동손이다. 공급전력과 기계력은 A시스템에 의해 만들어지는 토크  $Tem_1$ 과 다음의 관계가 있다.

$$P_{ag1} = Tem_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{\rho_1} \quad (25)$$

$$P_{em1} = Tem_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_m \quad (26)$$

식 (8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_m = \frac{(1-S_1) \cdot f_1}{\rho_1} \quad (27)$$

이들 식으로부터  $P_{em1}$ 을 구하면 다음과 같이 된다.

$$P_{em1} = (1-S_1) \cdot P_{ag1} \quad (28)$$

B시스템에 대해서도 비슷한 관계식이 얻어진다.

$$SPag_2 = Tem_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_2}{\rho_2} \quad (29)$$

$$P_{em2} = Tem_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_m \quad (30)$$

식 (9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_m = \frac{(1-S_2) \cdot f_r}{\rho_2} \quad (31)$$

B시스템의 공급전력과 기계력 간의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{em2} = (1-S_2) \cdot S_1 P_{ag2} \quad (32)$$

이중여자 유도전동기가 공급하는 총 기계력  $P_{em}$ 은 A시스템이 일부를 공급하고 B시스템이 나머지 일부를 공급한다는 것을 알 수 있다.

B시스템에 공급되는 전력은 이중여자 유도전동기를 여자하는데만 필요하며 이 전력은 속도제어용 인버터를 통해 얻어지는데 인버터의 정격은 기계정격의 일부로 가능하다. 이중여자 유도전동에 필요한 여자전력은 B시스템에 공급되는 전력  $P_{e2}$ 로  $I^2 \cdot R$ 의 손실을 무시하면 다음과 같이 쉽게 얻을 수 있다.

$$P_{e2} = -SPag_2 = -S \cdot P_{ag1} = -S \cdot P_{e1} \quad (33)$$

$$P_{em} = P_{em1} + P_{em2} = P_{ag1} - SPag_2 = P_{e1} + P_{e2} \quad (34)$$

$$P_{e2} = -S \cdot P_{e1} = -S \cdot \frac{P_{em}}{1-S} \quad (35)$$

### 6. 시뮬레이션 및 실험결과 고찰

실험에 사용된 기계의 정격은 3상교류 100[V] 1[HP]이며 극수조합은 6극과 2극이다. 고정자는 36슬롯으로 권수는 41회이고 권선굵기는 직경 0.7[mm]의 에나멜동선이다. 회전자는 농형 36슬롯으로 직경 6[mm] 동선인 4개의 도체와 4개의 단락코일을 갖고 있으며 회로정수는 다음과 같다.

$R_1 = R_2 = 1.463[\Omega]$	$R_{r1} + R_{r2} = 5.10[\Omega]$
$X_1 = 5.021[\Omega]$	$X_{m1} = 132.711[\Omega]$
$X_2 = 3.664[\Omega]$	$X_{m2} = 96.859[\Omega]$

이상의 실제 측정된 정수를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 3상교류 100[V]6극 1[HP] 기존의 유도전동기( $R_1=8.59[\Omega]$ ,  $X_1=6.33[\Omega]$ ,  $X_{m1}=209.0[\Omega]$ ,  $R_r=6.72[\Omega]$ )에 대한 시뮬레이션 결과를 구함과 동시에 비교 검토하였고 여기서 제시된 모든 그림에서 실선은 이중여자 유도전동기의 B시스템 주파수를 제어했을 때의 특성곡선이고 점선은 단일여자 유도전동기의 공급주파수를 제어했을 때의 특성곡선이며 점은 실험치다.

그림 3은 이중여자 유도전동기의 속도대 주파수 변화를 보인것으로 식 (4)와 같이 주파수의 증가에 따라 전동기의 속도가 직선적으로 감소하며 실험치와 거의 일치함을 알 수 있고 기존의 유도전동기 속도와 비교할 때 그 변화가 비례적인 특성을 가지므로 제어부 설계시 유리하다. 그

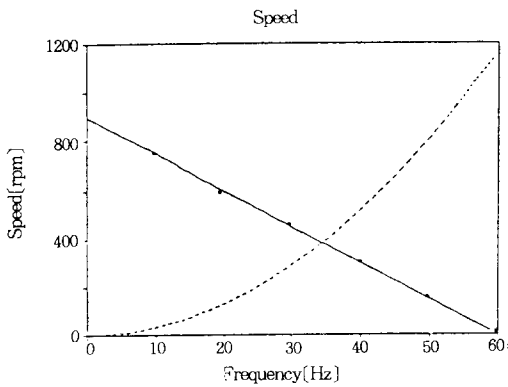


그림 3. 속도  
Fig. 3. Speed

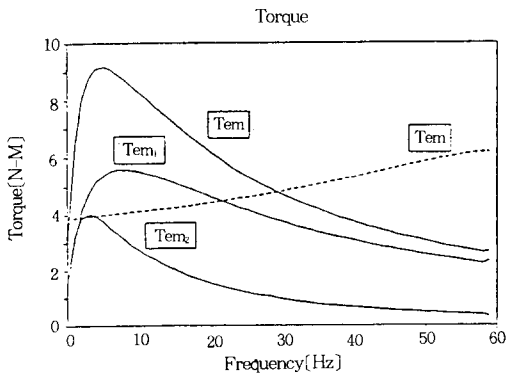
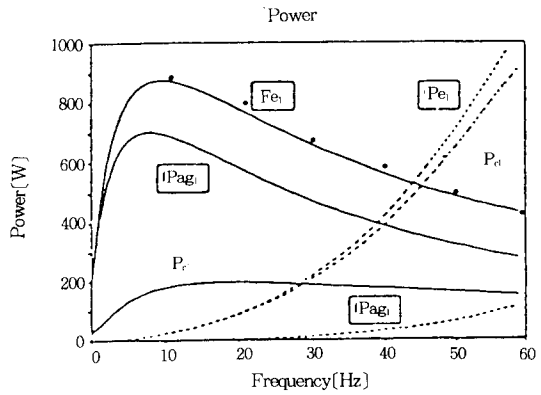
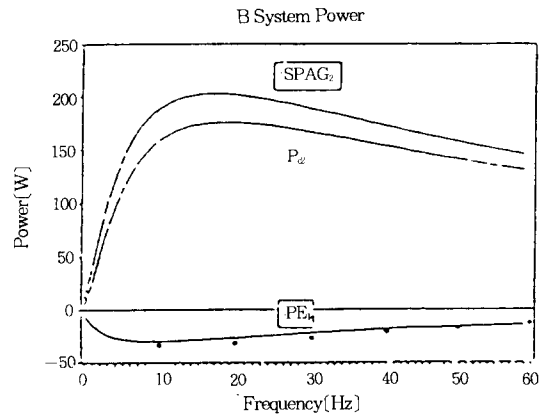


그림 4. 회전력  
Fig. 4. Torque

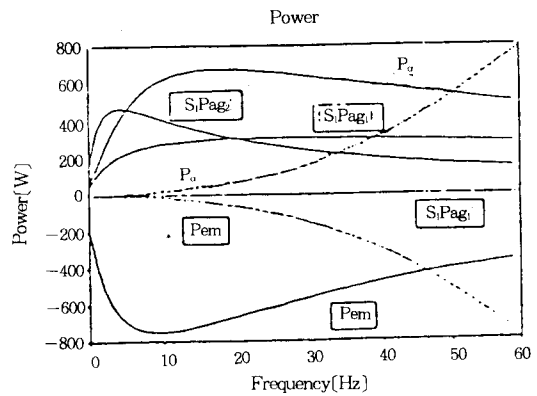
림에는 표시하지 않았으나 주파수를 계속 증가시



(a) A System power



(b) B System power



(c) Rotor power

그림 5. 시스템 전력  
Fig. 5. System power

키면 상순 등의 변경없이 전동기를 역전시킬 수 있는 이점이 있다.

이중여자 유도전동기의 토크대 주파수 특성은 그림 4에 나타내었고  $T_{em1}$ 과  $T_{em2}$ 는 각각 A, B 두 시스템에 의한 토크이고  $T_{em}$ 은 합성 토크이다.

그림 5는 이중여자 유도전동기의 전력대 주파수 관계를 나타내고 있으며 그림 5(a)는 A시스템의 전력으로 입력  $P_{e1}$ 은 공극전력인  $P_{ag1}$ 과 손실인  $P_{\sigma}$ 의 합이 되며 기존의 유도전동기에 비해 손실이 크게 줄어 들고 있음을 볼 수 있으며 시험치는 약간 커졌음을 알 수 있다. 그림 5(b)는 B시스템 전력으로서  $SP_{ag2}$ 와  $P_{e2}$ 의 합이  $P_{e2}$ 가 됨을 알 수 있고 시험치가 약간 커졌음을 알 수 있으며 기존의 유도전동기에서는 볼 수 없는 특성이므로 비교할 수 없다. 또한 그림 5(c)는 회전자의 전력관계를 나타내며  $S_1P_{ag1}$ 은  $S_1P_{ag2}$ 와  $P_{\sigma}$  및  $P_{em}$ 의 합이 됨을 알 수 있으며 기존의 유도전동기에서는  $S_1P_{ag1}$ 이  $P_{\sigma}$ 와  $P_{em}$ 의 합이 됨을 알 수 있다. 출력  $P_{em}$ 을 음으로 나타낸 것은 전동기의 입력을 기준으로 하였기 때문이며  $P_{e2}$ 는  $P_{e1}$ 이나  $P_{em}$ 의 일부로 가능하기 때문에 인버터를 사용할 경우 그 정격을 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다.

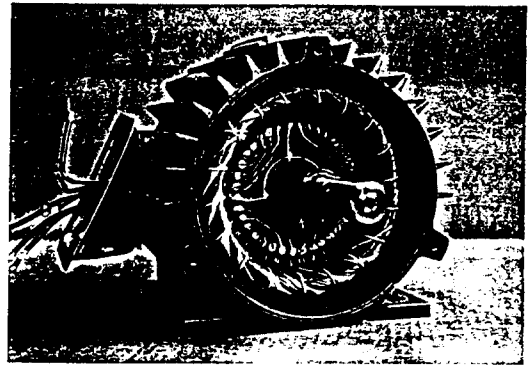
그림 6은 이중여자 유도전동기의 두 3상시스템에서 만들어지는 토크가 동기모드에서는 서로 합해지며 그림 5(a)와 같이 이중여자 유도전동기는 기존의 유도전동기에 비해 전 제어범위에 걸

쳐서 손실이 극히 작으므로 89[%] 이상의 높은 효율을 얻을 수 있으나 기존의 유도전동기에서의 효율은 73[%]이므로 16[%]이상 효율이 증가됨을 알 수 있다.

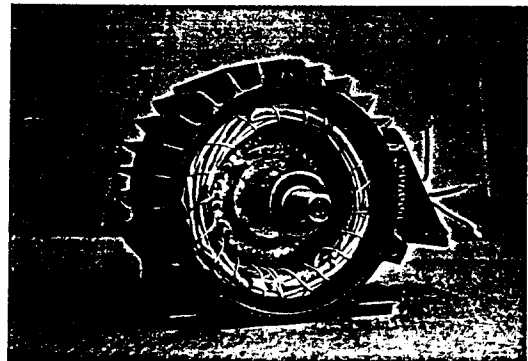
그림 7은 제작된 이중여자 유도전동기의 구조로 그림 7(a)를 보면 회전자 권선의 구조가 기존의 유도전동기와 달리 되어 있음을 볼 수 있다.

두 시스템의 극수가 동일할 때 출력이 최소가 되며 두 시스템의 극수차가 커지면 비례해서 출력이 증가하다가 어느 한계를 넘으면 포화상태가 됨을 알 수 있으며 최대출력을 얻기 위해서는 B시스템의 극수는 최소가 되어야 함을 알 수 있다.

단일여자 모드에서는 유도모드만 가능하나 이



(a) One Side of stator and rotor



(b) The other side of stator and rotor

그림 7. 고정자와 회전자의 구조

Fig. 7. Structure of stator and rotor

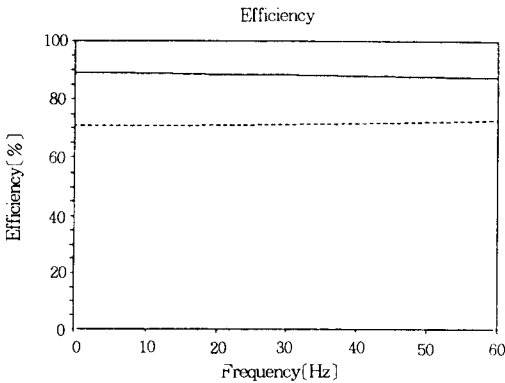


Fig. 6. Efficiency

그림 6. 효율

중여자 모드에선 유도모드와 동기모드 둘다 가능하다. 유도모드에서는 두개의 회전자 주파수가 존재하게 되며 어떤속도 영역에서 두 토크가 반대 방향이 되어 효율이 떨어지고 속도제어는 실질적인 속도를 감지할 타코메타 피드백이 필요하나 동기모드에서는 하나의 회전자 주파수만 존재하게 되고 두 토크가 같은 방향이 되어 효율이 증가하며 인버터 출력주파수를 제어함으로써 속도를 제어할 수 있다.

최적의 극수조합을 선정함으로써 최대출력을 얻을 수 있었고 여자전력은 기계정격의 일부로 가능함을 알 수 있었다. 가변속도 시스템에 이중여자 유도전동기를 사용하면 다른 전기기계의 사용에 비해 유지 보수비와 가격을 감소시킬 수 있었다.

실험치가 시뮬레이션 결과와 다소 차이가 있으나 이것은 해석을 간단하게 하기 위해 여러가지의 가정을 한 것과 계기손실 및 오차가 원인이라고 짧은 시간에 손으로 조립하는 등 제작상 완벽을 기하지 못한 점 등의 종합적인 원인이라 할 수 있겠다.

이상의 결과에서 이중여자 유도전동기는 기존의 유도전동기에 비해 효율이 좋으며 속도 특성이 직선적이고 인버터 사용시 그 정격이 적어지는 등 특성이 매우 우수함을 알 수 있다. 작은 극수를 가진 시스템이 여자전력을 담당하게 되고 많은 극수를 가진 시스템이 기계에 공급되는 전력을 변환하며 최대출력을 얻기 위해서는 여자측의 극수가 최소가 되어야 한다. 이러한 특성을 볼 때 이중여자 유도전동기는 고속기보다는 저속기에 적합함을 알 수 있다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 기존의 유도전동기와는 전혀 다른 이중여자 유도전동기의 설계 및 특성을 다루었다.

이중여자 유도전동기는 하나의 공통 고정자권선에 두개의 3상 전원으로부터 서로 다른 주파수의 전압을 인가하고 그 크기를 적절하게 조정하면 유도모드 및 동기모드를 갖게 된다. 그리고

최대효율을 얻기 위해 고정자 권선의 극수를 제안된 구조의 최소단위인 6극과 2극이 되도록 설계하였다. 또한 회전자구조를 재설계하여 기존의 농형회전자와 릴럭턴스전동기의 회전자 역할을 겸하도록 함으로서 발생토크 및 효율개선을 도모하였으며 회전자권선에 고조파가 제거되어 전류파형이 정현파가 되어 진동이나 소음을 감소시킬 수 있었다.

본 연구에서는 이중여자 유도전동기에 대한 동기화 방법과 동기모드에서의 속도제어 및 동기조건이나 여자전력의 정격과 효율 및 전력의 평형성 등을 다루었고 특히 효율의 경우 기존의 유도전동기의 효율은 73(%)인데 반해 동기모드에서는 발생토크가 서로 합해지기 때문에 효율이 16(%)이상 개선된 89(%)정도로 나타남을 알 수 있었다.

그리고 제안된 이중여자 유도전동기는 두 3상 전원의 전압 및 주파수의 값에 따라 기존의 유도전동기 및 동기전동기의 특성을 모두 지니게 된다. 유도전동기로서의 동작 즉 유도모드에서의 속도는 부하의 속도-토크 특성에 따라 달라지지만 속도를 일정한 값으로 유지하기 위해 피드백 제어가 필요하다. 반면 동기전동기로 운전되는 동기모드에서는 피드백 제어가 필요하지 않으며 이 동기모드를 이용하면 기존의 동기전동기를 이중여자 유도전동기로 대체할 수 있다. 그 결과 유도전동기로서의 특징인 튼튼한 구조와 고장 및 보수비 최소화 및 가격저렴화 등을 유지하면서 값비싼 동기전동기 대체용으로 사용될 수 있다. 또한 B시스템에 공급되는 여자전력이 전동기 용량의 20(%)이하이므로 인버터와 같은 가변속 장치를 사용할 경우 전체 제어시스템의 가격 및 신뢰도가 개선되는 특징이 있다.

이상과 같이 이중여자 유도전동기는 기존의 유도전동기를 구조적으로 변경하여 동기전동기와 같은 특성을 발휘하도록 설계·제안하였고 이전 동기는 그 특성과 구조 및 인버터 등의 가변속 장치의 용량 및 그 가격의 절감과 같은 많은 특징이 있으므로 앞으로 지속적인 연구검토가 필요하다고 본다.



참 고 문 헌

- 1) J. L. Hunt, "A New Type of Induction Motor", Proc IEE. Vol. 39, pp. 648~667, 1907.
- 2) A. R. W. Broadway and L. Burbridge, "Self-Cascaded Machine : A Low-Speed Motor or High-Frequency Brushless Alternator", Proc IEE, Vol. 117, No. 7, pp. 1277~1290, July 1970.
- 3) F. Creedy, "Some Developments in Multi-Speed Cascade Induction Motors", Proc IEE. Vol 59, pp. 511~532, 1921.
- 4) A. Kusko and C. B. Somuah, "Speed Control of a Single-Frame Cascade Induction Motor with Slip-Power Pump Back", IEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 14, No. 2, pp. 97~105, 1978.
- 5) W. Shepherd, A. Q. Khalil, "Capacitive compensation of thyristor-controlled slip-power-recovery system", Proc. IEE Vol. 117, No. 5, 1970, pp. 948.
- 6) H. K. Lauw, "Characteristics of the hydro variable-speed generation system" power administration No. 758724, 1986.
- 7) C. D. Cook, B. H. Smith, "Stability and stabilisation of doubly-fed single-frame cascade induction machines", Proc. IEE Vol. 126, No. 11, 1979, pp. 1168.
- 8) M. G. Ioannidou, J. A. Tegopoulos, "performance of a induction motor with controlled rotor voltage magnitude and phase angle" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, No. 2, June 1987.