

# 이중여자 유도전동기의 해석

강만원\* 김한성\*\*

대전산업대학교 제어계측공학과 부교수\* 전국대학교 전기공학과 교수\*\*

## Analysis of Doubly-Excited Induction Motor

Man-Won Kang\* Han-Sung Kim\*\*

Taejon National University of Technology\* Professor, Kun-Kuk University\*\*

### ABSTRACT

The double 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 controllable frequency and/or magnitude of voltage. 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 that at induction mode or 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. 서론

유도전동기는 값싸고 튼튼하여 가변속시스템에 널리 이용되고 있으며 특히 마이크로프로세서의 발전으로 유도전동기의 비선형성이 극복되었고 벡터제어에 이르기까지 매우 다양해지고 있으며, 전원이나 부하의 변화에 대해 원활하게 대처할 수 있는 고급 제어시스템들이 많아 연구개발되고 있다. 유도전동기와 동기전동기는 정속운전특성을 갖고 있으며 인버터로 입력주파수를 가변시켜 속도를 제어하고 있으나 인버터의 용량이 보통 전동기 용량의 150% 이상을 설정하게 되어 전동기 용량이 커질수록 인버터 용량은 더욱 증대되어 전체 제어부의 설치비가 상승된다. 따라서 능형유도전동기를 재설계하여 동기전동기와 같이 운전할 수 있다면 전체 속도제어 시스템을 아주 저렴하게 구성할 수 있을 것이다.

원래 이중여자구조는 1907년 Hunt에 의해 제시되었고 하나의 전동기구조에 2대의 권선형 유도전동기를 설치하여 3가지의 속도를 변경가능하도록 하였으나 구조적으로 복잡하고 효율이 저하되는 단점이 있었다. 1970년 Broadway는 이를 해결하기 위해 이중여자 이론을 정립하고자 하였으나 동기화 방법이나 동기모드에서의 속도제어 및 동기조건이나 인버터의 정격과 효율 및 전력의 평형성 등에 관해서는 다루지 못하였다.

제시된 이중여자 유도전동기의 고정자는 하나의 권선으로 두개의 3상시스템을 구성하였으며 각각 서로다른 주파수의 전원에서부터 전력이 공급되는데 고정자의 한 부분에는 60Hz의 상용전원을 연결하고 다른 부분은 인버터를 연결하여 속도를 제어한다. 회전자는 양쪽 모두 단락환으로 되어있는 것을 한

쪽만 단락시킨 구조로 재설계하였다. 이로써 전류파형이 개선되어 전동기의 토크가 증대되면서 소음도 저감되는 특성을 갖게 된다. 인버터 용량은 전동기용량의 15%이하로 충분하며 넓은 범위에 걸쳐 속도제어를 할 수 있고 유도전동기의 동기운전까지 가능토록 하여 기존의 동기전동기에 대치될 수 있게하였다. 효율은 약 89%이상으로 유지되어 기존의 약 73%정도에 비해 크게 개선되었다.

### 2. 이중여자 유도전동기의 동작원리

유도전동기의 고정자는 하나의 입력단자를 가지므로 본래의 동작모드인 유도모드의 동작만 하게 되지만 고정자 권선을 재설계하여 또 하나의 입력단자를 갖도록 그 구조를 변경시키면 유도전동기는 두개의 입력단자 즉 U-V-W와 X-Y-Z를 갖게 된다. 이러한 유도전동기는 두개의 단자에 서로다른 주파수의 전원을 공급할수 있으며 본 연구에서는 이러한 구조를 이중여자라 하고 X-Y-Z속의 전압 및 주파수를 적절히 조절하면 유도모드와 동기모드 둘다 가능하며 동기모드에서 속도제어도 가능하다.

A시스템에 전압  $V_1$  및 주파수  $f_1$ 의 교류를 공급하고 동시에 B시스템에 전압  $V_2$  및 주파수  $f_2$ 를 공급하면 회전자에는 A시스템에 의한  $f_{r1}$ 과 B시스템에 의한  $f_{r2}$ 의 두개 주파수의 전류가 흐르게 되고 초당 회전수를  $f_m$ 이라 하면 극상수  $N_1, N_2$ 에 대해서는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_1 = N_1 \cdot f_m + f_{r1} \quad (1)$$

$$f_2 = f_{r2} - N_2 \cdot f_m \quad (2)$$

$$\text{RPM} = 60 \cdot f_m = 60 \cdot \frac{f_1 - f_2 - f_{r1} + f_{r2}}{N_1 + N_2} \quad (3)$$

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

$$\text{RPM} = 60 \cdot f_m = 60 \cdot \frac{f_1 - f_2}{N_1 + N_2} \quad (4)$$

### 3. 이중여자 유도전동기 설계

그림 1에서와 같이 공통권선이 두 3상시스템에 사용되었으며 고정자 권선에 두 3상전원으로부터 주파수가 서로다른 두 개성분의 전류가 동시에 흐른다. 권선은 두성분의 전류에 의해 만들어지는 자장이 서로다른 극수를 갖도록 배치되어 있다. 두 시스템 간의 극수조합은 표 1에 나타내었고 A, B 두 시스템의 극수조합중 가능한 것은 O표 불가능한 것은 X표로 표

시하였고  $P_1=6$  및  $P_2=2$ 인 극수조합이 효율, 출력중대 등의 면에서 유리하므로 이를선택한다

분포 단절 2중권으로 함으로서 기전력은 약 6.7% 감소되었으며 하나의 공동권선으로 6극과 2극을 만들수 있었다. 회전자 권선은 기존의 경우 도계양단을 단락한 형태인데 그림 2와 같이 회전자 권선을 재권선함으로써 전류파형을 개선하고 토크의 맥동을 줄이면서 전동기의 소음 및 잡음도 감소시킬 수 있게 되었다. 이렇게 함으로써 회전자는 4극이 되어 6극인 고정자와 함께 마치 킬러턴스 전동기의 구조처럼 된다. 회전자가 기존의 농형회전자와 킬러턴스전동기의 회전자 역할을 겸하게 되면 토르가 커지고 효율이 증가하며 고조파가 제거되어 회전자의 전류파형이 정현파로 되어 진동이나 소음을 줄일수 있다.

표 1 A, B 두 시스템의 극수조합

$P_1 \setminus P_2$	2	4	6	8	10	12	14	16
2	X	X	X	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X	X	X	X
6	0	X	0	X	X	X	X	X
8	X	X	X	X	X	X	X	X
10	X	X	X	X	X	X	X	X

(0:가능 X:불가능)

#### 4. 이중여자 유도전동기의 동기화 및 속도제어

식(3)에서 A시스템의 공극주파수를  $f_1$ 으로 고정시키고 임의의 주파수  $f_2$ 에서 B 시스템의 전류크기를 조정하면  $f_{r1} = f_{r2}$ 의 상태로 되는데 이를 이중여자 유도전동기가 동기화되었다고 하며 그때의 속도는 식(4)로 표현되고 실제 속도를 측정하였을때 식(4)를 만족하거나  $f_2$ 에 따라 속도가 제어되던 동기회전기이다.

이처럼 이중여자 유도전동기의 속도는 B시스템의 주파수  $f_2$ 의 제어만으로 정지상태에서 동기속도에 이르기까지 연속적으로 가변할 수 있으며, 동기속도이상의 속도나 역방향 운전도 가능하다. B시스템의 주파수는 인버터에 의해 제어되고 일반적인 유도전동기제어용 인버터에 비해 그 용량이 15%이하로 줄일 수 있는 장점이 있다.

#### 5. 이중여자 유도전동기의 해석

##### (1) 등가 회로

이중여자 유도전동기는 공동 회전자도체와 공동고정자권선을 갖도록 설계되어 있지만 서로다른 극수를 갖으며 권선은 고정자주위에 정현적으로 분포되고 철손은 무시하며 각정수는 평형이 되었다고 가정한다. 그림 3은 이중여자 유도전동기의 등가회로며 유도모드와 동기모드의 슬립은 다음과 같다.

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

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

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

$$S_1 = \frac{f_r}{f_1} = \frac{f_1}{f_1 - N_1 \cdot f_m} \quad (8)$$

$$S_2 = \frac{f_2}{f_r} = \frac{f_2}{f_2 + N_2 \cdot f_m} \quad (9)$$

$$S = S_1 \cdot S_2 = \frac{f_1}{f_1 - (N_1 + N_2) \cdot f_m} \quad (10)$$

그림 3에 대한 전압 전류 관계식이 다음과 같이 된다.

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

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

$$\frac{V_0}{S} = -jX_{m1} \cdot I_1 + jX_{m2} \cdot I_2 - \frac{R_{r1} + R_{r2}}{S} \cdot I_r - j(X_1 + X_{m1} + X_2 + X_{m2}) \cdot I_r \quad (13)$$

##### (2) 입력과 출력의 관계

식(11)~(13)에  $3I_1^*$ ,  $3I_2^*$ ,  $3I_r^*$ 를 각각 곱하고 실수부만을 끌어내면 각시스템에 대한 전력 관계가 얻어진다.

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

$$P_{e2} = P_{c2} - SP_{ag2} \quad (15)$$

$$P_{em} = S_1 P_{ag1} - S_1 P_{ag2} - P_{cr} \quad (16)$$

여기서

$$P_{e1} = 3 \cdot \text{Real}(V_1 \cdot I_1^*) \quad (17)$$

$$P_{c1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (18)$$

$$P_{ag1} = 3 \cdot \text{Real}(jX_{m1} \cdot I_r \cdot I_1^*) \quad (19)$$

$$P_{e2} = 3 \cdot \text{Real}(V_2 \cdot I_2^*) \quad (20)$$

$$P_{c2} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (21)$$

$$P_{ag2} = 3 \cdot \text{Real}(jX_{m2} \cdot I_r \cdot I_2^*) \quad (22)$$

$$P_{em} = 3 \cdot \text{Real}(V_0 \cdot I_r^*) \quad (23)$$

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

공극전력과 기계력은 토크  $Tem_1$ 과 다음의 관계가 있다.

$$P_{ag1} = Tem_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{N_1} \quad (25)$$

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

$$f_m = \frac{(1 - S_1) \cdot f_1}{N_1} \quad (27)$$

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

B시스템에 대해서도 비슷한 관계식이 얻어진다.

$$SP_{ag2} = Tem_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_2}{N_2} \quad (29)$$

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

$$f_m = \frac{(1 - S_2) \cdot f_r}{N_2} \quad (31)$$

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

$$P_{e2} = SP_{ag2} = SP_{ag1} = S \cdot P_{e1} \quad (33)$$

$$P_{e2} = S \cdot P_{e1} = S \cdot \frac{P_{em}}{1-S} \quad (34)$$

##### (3) 시뮬레이션 및 결과고찰

실험에 사용된 기계의 정격은 3상교류 100[V] 1[HP]이며 극수조합은 6극과 2극이고 회로정수는 다음과 같다.

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

3상교류 100[V] 6극 1[HP] 기존의 유도전동기( $R_1=8.59[\Omega]$ ,  $X_{l1}=6.33[\Omega]$ ,  $X_{m1}=209.0[\Omega]$ ,  $R_r=6.72[\Omega]$ )에 대한 시뮬레이션 결과와 동시에 비교 검토하였다. 실선은 이중여자 유도전동기의 B시스템 주파수를 제어했을때의 특성곡선이고 점선은 기존 유도전동기의 공급주파수를 제어했을때의 특성곡선이다.

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 여자축의 극수가 최소가 되어야 한다. 이러한 특성을 볼때 이중여자 유도전동기는 고속기보다는 저속기에 적합함을 알 수 있다.

## 6. 결론

이중여자 유도전동기는 하나의 공통 고정자권선에 두개의 3상전원으로부터 서로 다른 주파수의 전압을 인가하고, 그 크기를 적절하게 조정하면 유도모드 및 동기모드를 갖게 된다. 그리고 최대효율을 얻기 위해 고정자 권선의 극수를 제한된 구조의 최소단위인 6극과 2극이 되도록 설계하였다. 또한 회전자구조를 재설계하여 기존의 농형회전자와 릴럭턴스전동의 회전자 역할을 겸하도록 함으로서 발생토크 및 효율개선을 도모하였으며 회전자권선에 고조파가 제거되어 전류파형이 정현파가 되어 진동이나 소음을 저감시킬 수 있었다.

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

그리고 제한된 이중여자 유도전동기는 두 3상전원의 전압 및 주파수의 값에 따라 기존의 유도전동기 및 동기전동기의 특성을 모두 지니게 된다. 유도전동기로서의 특징인 본분한 구조, 고장 및 보수비 최소화, 가격저렴화 등을 유지하면서 값비싼 동기전동기 대체용으로 사용될 수 있다. 또한 B시스템에 공급되는 여자전력이 전동기용량의 15[%]이하이므로 인버터와 같은 가변속 장치를 사용할 경우 전체 시스템의 가격 및 신뢰도가 개선되는 특징이 있다.

## 7. 참고 문헌

- [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, 1970. 7
- [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", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol 14, No. 2, pp. 97-105, 1978.

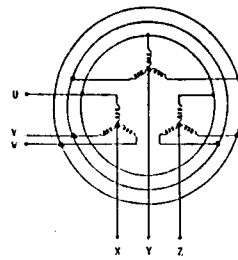


Fig.1 Circuit diagram of Stator

그림 1 고정자 회로도

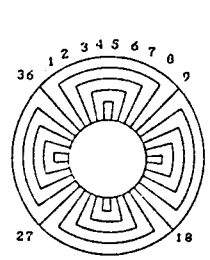


Fig.2 Circuit diagram of Rotor

그림 2 고정자 회로도

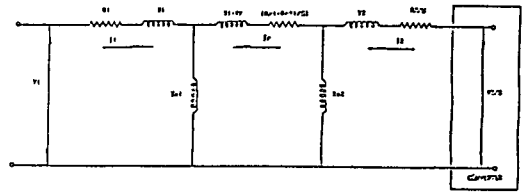


Fig.3 Equivalent circuit

그림 3 등가 회로

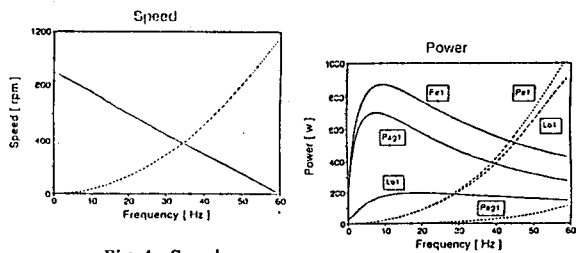


Fig.4 Speed

그림 4 속도

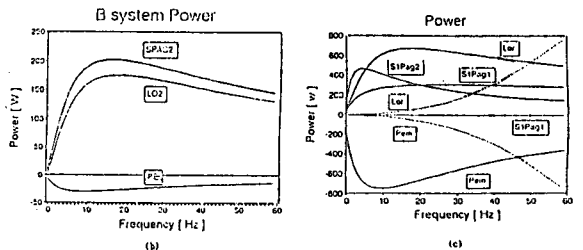


Fig.5 System Power

그림 5 시스템 전력