

유도전동기의 최적설계

○ 장 식 명  
( 중 남 대 학 교 )

Optimum design of induction motor

Jang Seok-Myeong  
Chung Nam National University

1. 서 론

유도전동기는 전기기기중 가장 오랜 역사를 갖고 끊임없이 발전 해왔으므로 지금은 전기기기를 대표하게 될 만큼 각 분야에서 구동장치로 널리 쓰이고 있다. 따라서 인류의 오랜 시행착오적인 경험등을 통하여 계속적으로 보완, 개발되어 왔기때문에 우수한 에너지 변환장치이기는하나 최적의 조건을 갖도록 설계 되어졌다고 볼수는 없다.

전자계산기의 등장후 이를 이용하여 이른적 인 근거를 갖는 설계 파라미터를 추출하여 최적으로 설계하기위한 노력이 1950년대 Veinott, Godwin 등의하여 이루어져 오다가 1978년, 이른바 '오일쇼크' 이후 에너지문제가 심각하게 대두됨에따라 마침내 미국 Energy성에서는 전력에너지의 절약을 위한 방안으로 전동기의 효율을 개선하기 위한 보고서를 제출하게까지 되었다. 전동기의 재질, 구조등의 재검토, 즉 설계파라미터들을 직접히 정하는 경우 효율을 상당한 정도까지 올릴 수 있을 것으로 전망하였다.

그후 1983년 Hasuike 도 유도전동기의 효율 개선방안을 발표하면서, 운전특성에 결정적으로 영향을 주는 설계파라미터 25개를 제시하고 이들을 직접히 정하는 경우 효율개선에 크게 기여 할것으로 결론을 내린 바있다. 그러나 전동기를 최적으로 설계하기 위해서는 시행착오적으로 결정할 수는 없으므로 운전특성의 정밀한 해석을 배경으로 설계파라미터를 정하여 설계, 제작하여야 한다.

그러므로 이를 위한 노력이 절실히 필요한 실정이다. 그러나 국내, 외의 주된 동향은 지금까지는 전자장 해석법에 의한 정밀해석 계산의 어려운 점 등으로 이분야의 연구는 매우 미미한 정도이다. 반면에 전력반도체 소자나

회로설계기술의 발달로 전동기를 부하에 따라 공급에너지를 제어해 효율적으로 운전을 조정하여 효율을 개선하고자 하는연구는 국내, 외적으로매우 활발한 편이다. 그러나 이는 전동기의 설계상대와는 무관하게 운전조건 개선만으로 이루어지는 소프트, 웨어적인 연구이기 때문에 그 성과는 한계가 있게 된다.

따라서 전기기기가 초대형, 고밀도화 하는 추세와 대형 전자계산기의 발달로 전기기기의 정밀해석이 용이해진 점 등을 감안하면 암묵적이며 이른적인 배경을 갖는 최적설계를 위한 하드, 웨어적인 연구도 활발해질 것으로 전망된다.

즉 운전특성을 정밀해석하여 그로부터 이른적 근거가 분명하게 최적 조건의 설계파라미터를 추출해서 설계를 해야하므로 이와 관련된 연구가 절실히 요구되는 실정이다. 또한 운전특성의 해석도 지금까지는 대부분 등가회로 해석법에 의하여 실시되어 왔으나 전동기의 구조등 물리적인 조건과, 설계파라미터들을 충분히 고려한 정밀해석을 하기 위해서는 전자장해석법이 훨씬 유리하다. 그러나 이에 관한 연구는 전동기에서의 전자장 현상을 다루기가 복잡, 난해 한 등의 이유로 지금까지는 매우 드문 형편이나 최근 대형 전자계산기를 이용한 전기기기 해석기술의 발달로 그 실현이 매우 용이하게 되었다.

이러한 실정들을 감안하여 본 연구의 목적을, 효율적인 설계방안에 관하여 여러 관점에서 검토 고찰한 후 전자계산기로 유도전동기의 특성을 시뮬레이션하여 에너지 변환능력까지도 고려한 최적의 운전특성을 갖도록 설계하고자 설계파라미터를 추출하는 방법 및 그 결과를 연구 제시하는 것으로 한다. 이때 전동기의 물리적 성질들을 가능한한 실제 그

대로 고려하여 전자장치를 적용시키므로써 정밀 지배방정식을 유도하게되며, 이를 기본으로 전자계산기시뮬레이션 하기위하여 개발되는 프로그램은 다른 전동기의 설계연구에도 크게 기여 할것이다. 또한 전자계산기에 의한 자동화 설계(CAD)를 하기 위한 기본자료도 도출하여 제시하고자 한다.

2. 효율적인 설계방안

유도전동기의 제작, 운전중에서 구동회로, 또는 전동기자체의 최적설계를 통한 제작으로 전체적인 효율을 개선하기 위한 방안을 다음과 같이 분류 할 수있다.

2.1 입, 출력에너지의 조정

전력반도체에 의한 회로시스템을 적절히 설계, 구성하면 부하의 상태에 따라 전동기의 공급에너지를 제어할 수있다. 즉 정속 전동기를 가변속 전동기로 대체하고 부하에 적합한 속도로 운전을 하던가 부하에 따라 적절하게 입력에너지를 조정하여 소비전력을 절감시켜 효율을 개선하는 방법이다. 그러나 시론에서 언급한 이유로 이 방법 만으로는 그 성과에 한계가 있다.

2.2 임의 부하에서의 정격의 적정 선정

임의의 부하를 구동하기 위한 전동기의 정격을 가장 적정하게 결정한다는 것은 경제적인 견지에서 매우 중요하다. 즉 부하보다 정격이 너무 작거나 크게 선정된 경우 설비비, 수명중에 따른 부차비의 증가 등에서 문제가 된다. 이를 위해 부차비, 운전비, 유지비를 고려하는 경비함수, 손실경비함수 등을 정식화하여 이식이 가장 최소가 되는 조건을 찾아 정격을 결정하게 된다.

2.3 전동기 자체의 설계 최적화

경비방정식(cost equation)을 세워 이로부터 최적화조건을 찾아 설계하므로써 제작비, 운전비용을 줄여 전체적인 효율개선을 꾀한다.

2.3.1 제작비의 최소화

표준 견적내에서 모체, 자성체, 절연재, 팬, 베어링, 축등의 가격을 고려하는 방정식을 세워 재료비 및 제작비가 최소가 되도록 파라미터를 정하여 설계하는 방법이다. 생산자에게 특별히 유리하게 된다.

2.3.2 운전비의 최소화

전동기의 수명동안의 년간 운전경비방정식을 세워 각종 손실 및 유지보수에 필요한 경비를 포함한 소비전력의 절감으로 운전경비를 최소화시키는 조건을 갖는 파라미터를 찾아 설계한다. 계속 유지보수하며 운전해야하는 소비자입장에서 특별히 유리하다.

2.3.3 제작비와 운전비의 최소화

(A) 위의 두 경우를 합쳐 고려한 경우로 설계자가 일반적으로 추구하는 방법이다. 이때 최적화 기법에 의해 파라미터를 추출하며 흔히 선정되는 제약조건 및 목적함수로는 각각 12 개, 4개정도가 된다.

(B) Goodness factor

전동기의 에너지 변환능력을 회로의 길압도와 관련시켜 판정할 수 있는 설계자료로 Goodness factor 가 있다. L.I.M의 설계에 적용되지만 이를 유도전동기에서도 적용될 수있을 것으로 생각된다.

(C) 운전특성에 결정적 영향을 주는 설계파라미터는 25 개정도로 분류된다. 이들이 운전특성에 어떠한 영향을 주느냐 하는 것은 설계값과 제작 후의 특성과의 오차율의 존재에서 설계자에게 매우 중요하다. 최적화기법에 의해 얻은 파라미터값들의 운전특성의 영향을 검토하기 위해서는 정밀해석법의 개발이 필수적이다. 증가회로해석법이 주로 적용되어 왔으나 본 연구에서는 여러 장점을 갖는 전자장해석법을 적용하기로 한다. 이때 정밀한 해석을 하기 위해서는 특성을 지배하는 방정식의 유도가 필요하며 이를 다음 장에서 다루기로 한다. 이 지배방정식이 세워지면 파라미터의 특성어의 영향은 물론, 전자계산기에 의한 시뮬레이션에의하여 최적의 운전조건을 갖는 설계파라미터의 결정은 물론 개발되는 알고리즘은 C.A.D 에 유용할것으로 전망된다.

3. 지배방정식과 해

2장에서 언급한 바와같이 유도전동기의 운전특성을 지배하는 방정식을 전자장치를 적용하여 유도하기로 한다.

그러나 유도전동기는 고정자와 회전자애 슬롯과 치가 있는등 구조가 복잡하여 실제 그대로 해석하기는 매우 어렵다. 따라서 그 특성이 크게 영향을 받지 않는 범위 안에서 모델을 간이화하여 해석하기로 한다. (다음중 x,y,z 축은 그림 1a, 1b에서 설정된 좌표에 의한 것임)

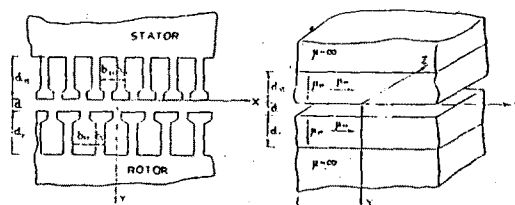


그림1 (a) 유도전동기의 실제 모델 (b) 해석모델

1. 본 해석은 농형 유도전동기를 대상으로 하기로 한다.
2. 자성체의 포화, 표피효과, 누설자속은 무시한다.
3. 변위전류는 무시한다.
4. end effect, edge effect를 무시한다.
5. 여자전류가 공간적으로는 x 방향으로 정현적이며 시간적으로도 정현적으로 본다. 즉
 
$$J_e = J_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2}x)}$$

또한 여자전류는 해석모델에서 z 방향으로만 흐른다.

### 3.1 해석모델

농형유도전동기는 원통형이지만 그림 1과같이 축방향으로 그대로 전개하여 평면구조로 취급하여도 된다.

고정자와 회전자에 슬롯과 치가 고대로 놓여지므로 x와 y 방향에 따라 자기 밀력편스값이 달라진다. 이를 고려하기 위하여 그림 1.b와 같은 해석모델로 바꾸기로 한다. 즉 슬롯과 치가 놓여진 II, IV 영역을 x 방향으로  $\mu_x$ , y 방향으로  $\mu_y$ 의 비투자율을 갖는 근접의 비등방성 (homogeneous anisotropic magnetice)의 자성체가 놓여진 것으로 취급하기로 한다.

이때는 x 방향으로 주기적이며 변수 x의 함수가 된다. 따라서 이를 고조파항을 무시한 Fourier 급수로 표시하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_x = (\mu_x^2 + \mu_y^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\mu_x = \frac{b_s + b_c}{b_s + \frac{b_c}{\mu}} \quad \mu_y = \frac{b_s + \mu b_c}{b_s + b_c + \frac{\mu b_c}{d_s}} \quad (1)$$

또한 이영역에서는 전류가 z 방향으로만 흐르므로 도전율도 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \frac{b_s \tau}{b_s + b_c} \sigma \quad (2)$$

단 d : 공극길이      d' : 유효공극길이  
 d<sub>s</sub> : 슬롯 깊이      b<sub>s</sub> : 슬롯 폭  
 b<sub>c</sub> : 치 폭          τ : 슬롯 점적율  
 ; 도체의 실제 도전율

### 3.2 지배방정식

#### 3.2.1 지배방정식의 유도

고정자와 회전자의 슬롯과 치영역

$$\nabla^2 A = \mu \sigma \left[ \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \times (\nabla \times A) \right] \quad (3)$$

공극, 고정자와 회전자의 철심영역

$$\nabla^2 A = 0 \quad (4)$$

#### 3.2.2 지배방정식의 해

$$A_{1z} = C_1 e^{\frac{\pi}{2}y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2}x)}$$

$$A_{2z} = C_2 e^{\alpha y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2}x)}$$

$$A_{3z} = (C_3 e^{\frac{\pi}{2}y} + D_3 e^{-\frac{\pi}{2}y}) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2}x)}$$

$$A_{4z} = (C_4 e^{\alpha y} + D_4 e^{-\alpha y}) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2}x)}$$

$$A_{\theta z} = D_3 e^{\frac{\pi}{2}y} \cdot e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2}x)}$$

$$J_A = -j \sigma \frac{\pi}{2} \cdot s \cdot V_s (C_4 e^{\alpha y} + D_4 e^{-\alpha y}) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2}x)}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} (1 + \mu_s \cdot d \cdot s \cdot G)^{\frac{1}{2}} = \pi (1 + \mu_s \cdot d \cdot s \cdot G)^{\frac{1}{2}}$$

#### 3.2.3 회전력 특성식

전동기의 회전력은 회전자면에서 공극자속과 와지류에 의하여 발생되므로 Poynting의 정리로 설명된다.

$$f_x = \frac{1}{2} \text{Re} (-J_z B_y^*)$$

원통좌표로 바꾸면 아래와 같다.

$$T = \int_0^{2\pi} \int_0^L f_{\theta} \cdot d\theta \cdot dW$$

단 D는 회전자직경, L은 회전자의 총풍덕트를 무시한 적승두께이다.

### 4. 결 론

유도전동기의 최적설계를 위한 방안을 여러 관점에서 조사, 검토하였다. 또한 전자장 이론을 적용하여 지배방정식을 유도하므로써 설계파라미터의 운전특성예의 영하의 해석은 물론 시뮬레이션에 의하여 설계파라미터를 찾아 유도전동기를 최적으로 설계할 수 있는 모대를 마련 하였다.

### 참 고 문 헌

- 1) "Energy Efficiency and Electric Motors.", Report of U.S. Department of Energy Contract No. , Co - 04 - 05217 - 00, 1978.
- 2) K. Hasuike, "Efficiency Improvement Studies of Low Voltage Three Phase Squirrel Cage Induction Motors for General Purpose.", IEEE Trans. Vol. PAS - 102, No. 1, 1983.