

# 유도 전동기의 열적 과도상태의 해석

°전장성 김형섭 이철균\* 한송엽 원종수  
 서울 대학교 공과대학 전기공학과 \*현대중전기 기술연구소

## A Study on the Thermal Transient Analysis of Induction Motors

°Chun Jang-Sung Kim Hyung-Sup Lee Cheol-Gyun\* Han Song-Yop and Won Jong-Soo

Dept. of Elec. Eng., Seoul Nat'l. Univ. \*Hyundai Electrical Engineering R&D center

### ABSTRACT

The evaluation of the temperature of the motor in operation is necessary for smaller and lighter design of motors and for the determination of insulation class. And the evaluation of the temperature in thermal transient state is necessary for the determination of the intermittent rating and the protection from the thermal overload.

The temperature can be calculated exactly by considering the loss distribution, the thermal resistances and the thermal capacities dependent on temperature. Using the detailed thermal equivalent circuit, the temperature of any local part of the motor can be evaluated. The comparison between the calculated results and the experiments is performed to verify the validity of the analysis.

### 1. 서론

어떤 운전조건하에서 전동기 각부의 온도상승치 추정은 절연물의 수명이나 전동기의 소경량화요구, 온도상승으로 인한 전동기의 기계적 변형 계산등에 필요하다. 그리고 설계사양에 순시정격이 제시되는 경우, 이 순시정격을 결정하는 데에도 열적 과도상태의 해석이 필수적이다. 또한 열적 과부하 방지나 어떤 특정 듀티비로 운전될 때의 온도상승, 열타피 보호장치(thermal protection)의 올바른 동작을 위해서는 열적 과도 상태의 온도상승 추정이 필요하다. 이를 위해 전동기 각부의 치수 재원과 열전달 상수들로 열저항과 열용량 및 손실원으로 이루어지는 상세한 열등가회로망을 만들어 열적 정상상태와 과도상태시의 전동기 각부의 온도상승을 추정한다.

본 논문에서 사용하는 방법은 먼저 전동기 치수로부터 전동기 각 부에서의 열저항과 열용량을 계산한다. 그리고, 전동기 정수로부터 임의의 운전조건하에서의 손실 분포를 계산한다. 손실 값과 열저항, 열용량으로 열등가회로망을 구성하여 회로방정식을 풀어서 전동기 각 부의 온도상승치를 추정한다. 이렇게 구한 온도로 전동기의 손실과 열상수들을 보정하여 반복 계산한다.

그리고 위 해석결과와 측정결과를 비교하여 그 타당성을 입증한다.

## 2. 열등가회로망의 열저항, 열용량의 계산

### 2.1 밀폐외선형 유도전동기의 열등가회로망 구성

해석에 사용된 전동기는 11kW, 4극, 3상의 밀폐외선형 유도전동기이다. 통풍방식은 냉각을 위해 설치된 팬(fan)이 일방적인 밀폐외선형 유도전동기의 방식과는 다르게 독립된 전원에 의해 팬이 구동되어 팬의 회전속도가 전동기의 회전속도와 상관없이 일정한 밀폐 타력 통풍방식이다. 전동기에서의 순시적인 온도상

승은 전동기 내부손실에 의한 발열량과 전동기 내부에서부터 외기까지의 열저항 및 열용량으로부터 결정되어진다. 그림 1은 본 논문의 해석에 사용된 전동기의 정면도와 측면도이다.

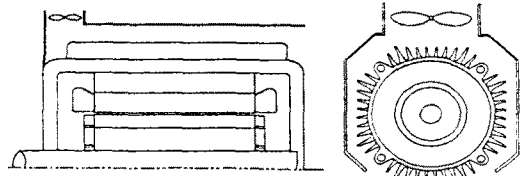


그림 1. 밀폐외선형 유도전동기의 정면도와 측면도

### 2.1.1 열저항 계산

#### (1) 전도(Conduction) 열저항

주로 1차 권선이나 회전자 봉에서의 열전달이나 고정자 철심에서의 열전달, 프레임(frame)이나 브라켓(braket)에서의 열전달을 나타내는 방식으로 다음 식(1)과 같이 나타낸다.

$$Q = \frac{k_m A}{X} \Delta\theta \quad (1)$$

여기서  $Q$  : 발열량 [W]

$k_m$  : 평균 열 전도도 [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]

$A$  : 전도체체의 단면적 [ $m^2$ ]

$X$  : 전도체체의 길이 [m]

$\Delta\theta$  : 두 점사이의 온도차분 [ $^\circ C$ ]

여기에서  $k_m/X$  을 '열컨덕턴스(thermal conductance)' 라

하며, 식(1)에서  $\frac{X}{k_m A} = R$  로 두면  $\Delta\theta = R \cdot Q$  가 되어 전

기회로에서의  $\Delta E = R_e Q$  와 같은 형식이 된다. 이때  $R$  을 열저항(thermal resistance) 이라 한다.

#### (2) 대류(Convection)

여기서도 열의 전도에서와 마찬가지로  $1/Ah = R$  (열저항)으로 하여 전기회로적 해석을 할 수 있게 된다. 이러한 열의 대류는 고정자권선의 단부나 회전자 엔드링(end ring)부로부터 전도된 열과 내기(전동기내의 공기), 프레임으로 전도된 열과 외기(프레임 위의 냉각 공기)와의 사이에서 일어난다. 통풍공기와외의 직접적인 냉각이므로 아주 중요한 부분을 차지한다.

$$Q = A \cdot h \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

여기서  $Q$  : 발열량 [W]

$h$  : 열 전달율 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$A$  : 냉각 단면적 [ $m^2$ ]

$\Delta\theta$  : 두 점사이의 온도차분 [ $^\circ C$ ]

### (3) 복사(Radiation)

전자기파의 형태로 열이 전달되는 것으로 전동기에서의 주된 열흐름방식이 아니므로 실제 전동기의 열해석에서는 중요하지 않다. 실제 해석에서는 대류 열전도 계수값을 약간 크게 함으로써 복사를 고려할 수 있다.

## 2.1.2 열용량 계산

열적 과도상태의 해석에 필수적인 열등가회로망의 열용량은 프레임, 고정자 철심, 고정자 권선, 회전자 철심, 회전자 봉, 엔드링, 축등에서 고려되는 것으로, 이것은 물질의 질량, 비열 용량 (specific heat), 물질의 밀도에 의하여 다음 식으로 계산되어진다.

$$C = M c_p \quad (3)$$

여기서  $C$  : 열용량 [ $J/kg \cdot m^3 \cdot ^\circ K$ ]

$M$  : 물질의 질량 [Kg]

$c$  : 비열용량 [ $J/Kg \cdot ^\circ K$ ]

$\rho$  : 물질의 밀도 [ $Kg/m^3$ ]

## 2.1.3 손실값의 계산

### (1) 1차 동손( $W_{d1}$ )

$$W_{d1} = W_{d1}' + W_{d1}'' \quad (4)$$

여기서  $W_{d1}'$  : 슬롯 부분의 코일에서 발생하는 동손 [W]

$W_{d1}''$  : 코일단에서 발생하는 동손 [W]

### (2) 2차 동손( $W_{d2}$ )

$$W_{d2} = W_{d2}' + W_{d2}'' \quad (5)$$

여기서  $W_{d2}'$  : 회전자봉에서 발생하는 동손 [W]

$W_{d2}''$  : 엔드링에서 발생하는 동손 [W]

### (3) 철손 ( $W_i$ )

단위 중량당 철손은 게철부( $W_{yoke}$ )와 치부( $W_{tooth}$ )에서 발생하는 각 철손의 합으로 철손식은 다음 식으로 나타내어진다.

$$w_i = \left(\frac{B}{10000}\right)^2 \left[\sigma_H \frac{f}{100} + \sigma_E d^2 \left(\frac{f}{100}\right)^2\right] [W/kg] \quad (6)$$

여기서  $B$  : 평균 자속 밀도 [ $Wb/m^2$ ]

$f$  : 교번 주파수 [Hz]

$\sigma_H, \sigma_E$  : 철란 재질에 따른 상수

$d$  : 규소 강판의 두께 [m]

### (4) 베어링 마찰손

$$w_b = k \frac{P_s}{D_b} v_s \quad (7)$$

여기서  $k$  : 윤활유의 점성에 관계된 상수

$P_s$  : 베어링이 받는 하중

$D_b$  : 구의 중심을 통하는 원의 지름 [cm]

$v_s$  : 축의 주변속도 [m/sec]

(5) 그 외에 풍손 ( $W_f$ ), 표류 부하손 ( $W_s$ ) 등이 있으나 전동기 전체 손실에서 차지하는 비중이 그다지 크지 않으므로 여기서는 일단 고려하지 않는다.

위에서 구한 열발생원(손실), 열저항 및 열용량등을 집중정수로 표현하여 열등가회로망을 구성하면 그림 2와 같다.

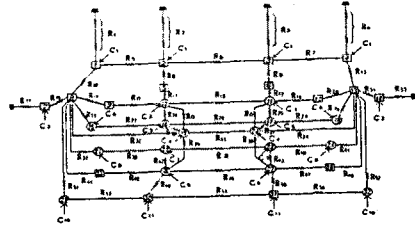


그림 2. 밀폐회전형 유도전동기의 열등가회로망

## 3. 해석 방법

위에서 제시된 동손의 계산식에서 고정자 권류나 회전자 전류는 온도의 변화에 영향을 받으므로 손실 분포값의 계산과 전동기 내부의 온도는 같이 고려되어야한다. 또한 열용량과 열저항의 계산식에서도 열전도율이나 비열 용량등은 온도의 함수로 나타난다. 따라서 전동기의 온도상승과 손실분포 및 열등가회로의 파라미터를 반복적으로 계산함으로써 좀더 정확한 열해석을 할 수 있다.

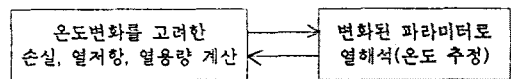


그림 3. 해석방법 (손실, 파라미터 계산과 열해석의 반복방법)

2.1.1, 2.1.2 절에서의 각 열저항과 열용량들을 실제 주어진 유도전동기의 치수와 재질에 따른 여러 열상수들로 계산하여 열등가회로망을 구성하고 위에서 구해진 손실분포로부터 전기회로적인 해석을 한다. 그림 4는 임의의 절점(node)에서 열전달방정식의 구성을 나타내기 위한 그림이다. 이 그림으로부터 열등가회로의 모든 절점에 대해 식 (8)과 같은 식들을 만들면 식 (9)의 행렬식이 만들어진다.

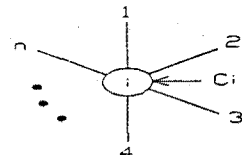


그림 3. 열등가회로망의  $i$  절점

$$C_i \frac{d\theta_i}{dt} = \frac{1}{R_{ii}} (\theta_j - \theta_i) + Q_i \quad (8)$$

$$[C] \frac{d[\theta]}{dt} = [Y][\theta] + [Q] \quad (9)$$

여기서  $[C]$  : 열용량 행렬(Thermal capacitance matrix)

$[\theta]$  : 열 행렬(Thermal matrix)

$[Y]$  : 열전도턴스 행렬(Thermal conductance matrix)

$[Q]$  : 열손실 행렬(Loss distribution matrix)

위에서 만들어진 행렬식을 Runge-Kutta 방법으로 계산하여 나온  $\theta_i$  값들이 외기에 대한 전동기 각 부의 상대적인 온도상승치가 된다.

#### 4. 해석치와 측정치의 비교 및 응용

##### 4.1 열적 정상상태시의 해석치와 측정치의 비교

위의 반복법으로부터 한 운전조건에서 열적 정상상태의 손실 분포는 표 2 와 같다.

종류	부하	50% 부하 팬 정지
전압 [V]		160
슬립 [%]		0.9167
$W_{yoke}$ [W]		154.46
$W_{lamb}$ [w]		252.27
$W_{cl}$ [W]		111.2
$W_{ca}$ [W]		47.7

\* 위 표에서 손실은 60 [Hz]상용전원으로 구동될 때의 손실이다. %부하는 정격 부하토크 59 [N-m]를 100으로 한 것이다.

50%부하 팬정지시의 전동기 각 부의 정상상태 온도해석치와 온도측정치는 표 3과 같다.

표 3. 한 운전조건에서의 온도 해석치와 온도측정치의 비교

Thermo Couple	50% 부하 팬 정지	
	해석치	측정치
구분		
⑥	18	18
①	69	68
②	79	78
③	63	63
④	80	79
⑤	67	73

\* 각 수치들의 단위는  $^{\circ}C$  이다.

각 서모커플(Thermo-couple) 이 나타내는 위치는 다음과 같다.

- ⑥ : 외기                      ① : 내기                      ② : 고정자 권선 단부
- ③ : 프레임 부하측        ④ : 프레임 중앙        ⑤ : 프레임 반부하측

위 운전조건에서의 열해석으로부터 얻어진 전동기 내부의 온도도파치를 전동기의 축방향 길이를 축으로 하여 그림 5에 나타내었다.

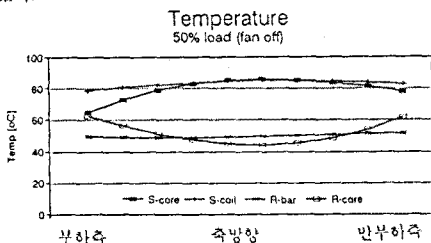


그림 5. 50%부하시 전동기 각부의 온도 (팬 정지, 계산치)

##### 4.2 열적 과도상태시의 해석치와 측정치의 비교

위에서 언급한 전동기로 부하를 일정하게 한 경우와 부하를 가변한 경우에 대해 열실험을 하였다. 열적 과도상태의 전동기

각 부의 온도를 온도 측정기(thermal recorder)로 기록하여 아래 그림에 열해석치와 함께 나타내었다. 아래 그림에서 보면 부하일정시 부하가변시보다 상수부하의 방법과 상수일정의 방법간의 차이가 많은 것으로 나타나 있다. 그 이유는 부하 일정시, 즉 100% 부하로 운전될 때의 높은 회전자 온도로 인하여 회전자의 재료인 알루미늄의 비열용량이 상당히 크게 변화하기 때문이다.

###### (가) 부하 일정시

(실험 과정 I)

- ① 100% 부하로 팬 구동하고 실험 시작
- ② 1시간 31분(5460초)후에 팬 구동
- ③ 2시간 12분(7920초)후에 부하 차단, 팬 구동 안함
- ④ 2시간 24분(8640초)후에 부하 투입, 팬 구동함
- ⑤ 2시간 29분(8940초)후에 부하 다시 차단, 팬 구동 안함
- ⑥ 2시간 34분(9240초)후에 부하 다시 투입, 팬 구동함

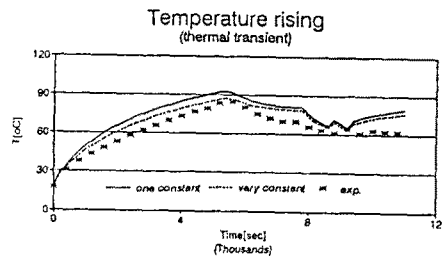


그림 6. 부하측 고정자 권선 단부에서의 해석치와 실험치의 비교

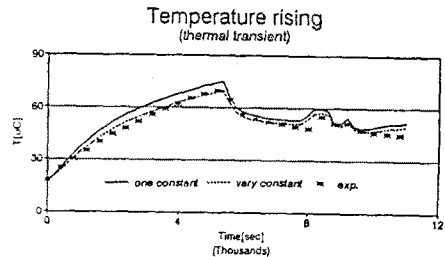


그림 7. 반부하측 프레임에서의 해석치와 실험치의 비교

###### (나) 부하 가변시

(실험 과정 II)

- ① 50% 부하로 팬 구동하고 실험 시작
- ② 3시간 55분(14100초)후에 팬 구동
- ③ 4시간 15분(15300초)후에 팬 구동 안함
- ④ 5시간 20분(19200초)후에 20% 부하로 구동

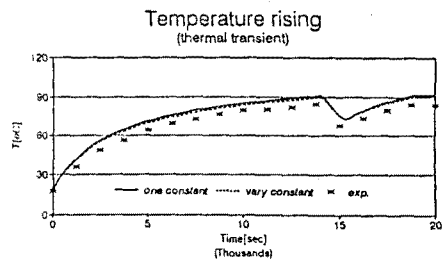


그림 8. 부하측 고정자 권선 단부에서의 해석치와 실험치의 비교

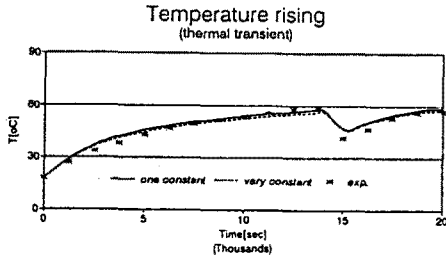


그림 9. 부하측 엔드벨에서의 해석치와 실험치의 비교

### 4.3 열해석의 응용

IEC(International Electrotechnical Commission)듀티 규정의 S3 듀티 60%(on 60 - off 40)로 계속 운전될 때의 온도상승치를 추정하여 아래 그림에 나타내었다. S3 듀티는 일정시간동안은 일정부하(여기서는 50%부하)를 걸고 또다른 일정시간동안은 전원을 차단하는 것으로 전원차단시의 모든 손실은 영이 된다. S3 듀티 60% 부하 조건으로 열해석을 할 때 팬은 구동되지 않는 것으로 한다. 아래 그림에서 고정자 권선의 온도상승 최대치는 92 °C 정도로 F중 절연을 채택한 대상전동기의 온도상승한계(150 °C)에 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 즉, 50%부하로 S3 듀티를 채택한 경우에는 팬 없이도 열적인 문제가 발생하지 않음을 알 수 있다.

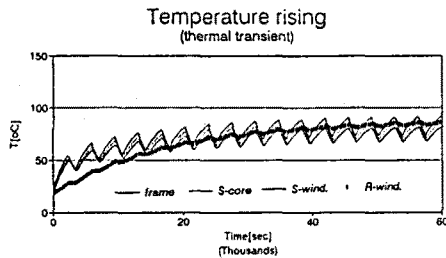


그림10. S3 듀티 60% 부하로 운전될 때의 온도상승 곡선

## 5. 결론

유도전동기의 열적 과도상태의 온도상승을 정확하게 추정하기 위해서는 열등가회로의 파라미터인 열저항, 열용량 및 손실분포가 정확히 계산되어야한다.

본 논문에서는 온도상승과 파라미터 변화를 반복, 보정계산하는 반복법을 제안함으로써 상수일정의 방법에 비해 계산된 온도해석치와 실측치가 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 또한 상세한 열등가회로를 사용함으로써 전동기의 국부적인 부분까지 상세하게 열해석을 할 수 있었다.

앞으로는 팬 구동시 난류의 영향, 접촉 열저항등을 좀더 정확히 고려해야할 것으로 본다.

## 6. 참고 문헌

- [1] 北森輝明,片岡二郎, "全閉外扇形 誘導電動機の 溫度上昇推定法", National Technical Report 17, 4, pp. 350-355 (1971-8)
- [2] 佐藤忠幸, "小中容量 全閉外扇形電動機の 溫度上昇計算", 東芝レビュー, 29, pp.364-369 (1974-4)
- [3] 島原 外, "電動機絶緣體の 熱傳導性向上による 溫度低減效果", 東芝レビュー, 35, pp. 835-837, (1971-8)

- [4] S.Sonaka, "Aanalysis of Ventilation and Cooling System for Induction Motors," *IEEE Trans. on PAS*, PAS-100, 11, pp. 4636-4643, 1981
- [5] P.H.Mellor, "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design," *IEE Proceedings -B*, Vol. 138, No. 5, pp. 205-218, SEPTEMBER 1991
- [6] A.H.Eltom, "Motor temperature estimation incorporating dynamic rotor impedance," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 6, No. 1, pp. 107-113, March 1991
- [7] 천 장성 외, "유도전동기의 열해석에 관한 연구" 전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 961-964, 1993
- [8] Frank P. Incropera, Introduction to heat transfer, John Wiley and Sons, New York, 1990, pp. 226-235