

열회로 방식에 의한 Disc type motor의

온도상승 계산

박 창순* · 장 기찬

한국 전기연구소

Temperature rise calculation of a disc type motor with heat source method

Chang-Soon Park* · Ki-Chan Chang

Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract: Nd-Fe-B Permanent Magnet, which is recently more used, has some advantages in comparison with other permanent magnet. However, for the Nd-Fe-B has higher RTC(reversible temperature coefficient), property of the Nd-Fe-B magnet is changed by temperture rise. In this paper temperture rise of a disc type motor is calculated using a heat source network method.

1. 서론

최근 사용이 증가하고 있는 Nd-Fe-B 영구자석은 타 영구자석에 비하여 에너지적이 크고 감자곡선이 직선이며 JH_c 가 크며 SmCo₅에 비하여 가격이 싼 장점이 있으나 온도의 변화에 따라 특성이 변하는 단점이 있다. 따라서 전동기를 설계할 때에는 전동기의 온도상승을 계산하여 전기자 반작용에 의한 감자현상의 방지와 전동기특성의 변화를 예측할 필요가 있다.

본 논문에서는 heat source network method를 이용하여 소형 disc-type motor의 온도상승을 계산하였다.

2. 영구자석의 특성비교

| | Br | H _c | BH _{max} | RTC(Br) | RTC(JHc) | max operation Temperature |
|-------------------|------|----------------|-------------------|---------|----------|---------------------------|
| 단 위 | T | kA/m | kJ/m ³ | %/K | %/K | |
| Alnico | 1.28 | 51 | 44 | -0.02 | 0.03 | 500° C |
| SmCo ₅ | 0.87 | 637 | 146 | -0.03 | -0.25 | 250° |
| NdFeB | 1.3 | 881 | 250 | -0.1 | -0.65 | 150° C |

표 1 영구자석의 특성 비교표

표 1에서 보는바와 같이 Nd-Fe-B 영구자석은 타 영구자석에 비하여 RTC(reversible temperture coefficient)가 크기 때문에 온도의 변화에 따라 그림 1과 같이 감자 곡선이 변화한다.

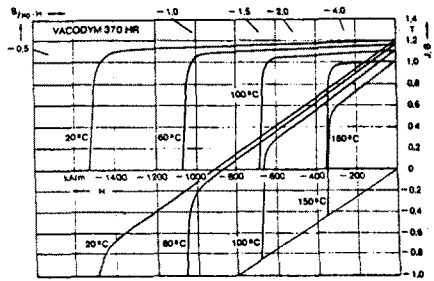


그림 1; 온도 변화에 따른 Nd-Fe-B Magnet의 특성변화

3. source heat network method

온도상승의 계산을 위하여 사용되는 방법으로는 heat source network method가 이미 많은 문헌에 소개되고 있으며 가장 근사하게 계산 할 수 있는 방법이다. /1/, /2/, /3/, /4/

이 방법에서 열의 전달, 축적등은 전기적 저항의 계산법과 같이 생각하여 계산한다.

3.1 steady-state problem 해결을 위한 heat source

Network method

먼저 하나의 net에 n개의 열원 $P_{v\mu}(\mu=1,2,\dots,n)$ 이 열의 전달저항 $R_{\mu,\mu+1}$ 과 연결되어 있다고 하면 온도의 차이에 따라 heat current $q_{\mu,\mu+1}$ 은 열원 $P_{v\mu}$ 에서 저항 $R_{\mu,\mu+1}$ 을 통하여 $P_{v,\mu+1}$ 로 가며 $q_{\mu,0}$ 은 열원 $P_{v,\mu}$ 에서 저항 $R_{\mu,0}$ 을 통하여 주위로 발산하게 된다.(그림 2 참조)

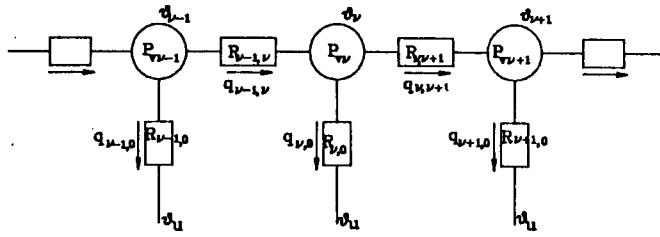


그림 2: model of a heat source network

이때의 열전류(heat current)는 두점간 온도의 차이와 두점간의 열저항에 의하여 다음과 같이 표시될 수 있다

$$q_{\nu, \nu+1} = \frac{\theta_{\nu+1} - \theta_{\nu}}{R_{\nu, \nu+1}} \quad (1)$$

$$q_{\nu, 0} = \frac{\theta_{\nu} - \theta_u}{R_{\nu, 0}} \quad (2)$$

이때의 손실 $P_{\nu\nu}$ 는

$$\sum q_{\nu, \nu+1} + q_{\nu, 0} = P_{\nu\nu} \quad (3)$$

이때 이 열손실은 온도에 따라 변화하고 다음과 같이 표현된다

$$P_{\nu\nu} = P_{\nu\nu 0} (1 + \alpha_{\nu} \theta_{\nu}) \quad (4)$$

α_{ν} : Temperature coefficient

$P_{\nu\nu 0}$: 초기온도에서의 손실

θ_{ν} : 계산점의 온도

3.2 transient problem 해결을 위한 heat source network method

transient problem을 해결하기 위해서는 다음과 같은 몇가지 가정이 필요하다.

- a) 전동기 한 부분의 온도분포는 일정하다.
- b) 전동기의 모든 손실은 최종적으로 전동기표면에서 발산 된다.
- c) 열의 전달능력과 열전달과정은 이상적이다
- d) 열저항은 온도의 상승에 무관하게 일정하다.

각 열원의 최종 상승온도 θ_{ν} 는 하나의 열로 표시되는 matrix와 열저항의 inverse matrix λ 와 각 손실 matrix P 로 표시되며 이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\lambda \theta = P \quad (5)$$

열원의 온도상승변화를 계산하기 위하여 열원으로부터 나온 열 $\lambda\theta$ 와 시간적으로 변화하는 손실 $P_{\nu\nu}(t)$ 와 heat capacity C_{ν} 를 고려하여야 한다.

어떤 열원에서 온도상승을 위하여 필요한 손실 $P_{\nu\nu}(t)$ 는 열원(x,y,z)에서의 온도상승 $T_{\nu}(x,y,z;t)$ 를 점(x,y,z)에서 시간 t를 계산하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} dq_{\nu}(t) &= \rho c \iiint_{V_{\nu}} \left[\frac{\partial}{\partial t} T_{\nu}(x,y,z;t) dt \right] dx dy dz \\ &= \rho c \left[\frac{\partial}{\partial t} T_{\nu}(x,y,z;t) \right] dt dv \quad (6) \end{aligned}$$

ρ : 밀도 kg/m^3

c : specific heat $\frac{KJ}{KgK}$

한 부분의 시간에 따른 평균 온도상승 $\nu(t)$ 는 전체 volume V_{ν} 에 대한 적분으로 다음과 같다.

$$\theta_{\nu}(t) = \frac{1}{V_{\nu}} \int \frac{\partial}{\partial t} T_{\nu}(x,y,z;t) dv dt \quad (7)$$

공식 7은 적분과 미분은 순서를 바꿀 수가 있으므로

$$\begin{aligned} dq_{\nu}(t) &= \rho c \frac{d}{dt} \left[\int_{V_{\nu}} T_{\nu}(x,y,z;t) dv \right] dt \\ &= \rho c V_{\nu} \frac{dV_{\nu}(t)}{dt} dt \\ &= C \frac{dV_{\nu}(t)}{dt} dt \quad (8) \end{aligned}$$

$C = \rho c V_{\nu}$
같이 쓸 수 있다.

$$C \frac{d\theta_{\nu}(t)}{dt} + \lambda\theta_{\nu}(t) = P \quad (9)$$

C : heat capacity matrix

P : power loss matrix

λ : 열 전도율

$\theta_{\nu}(t)$: 시간 t, 계산점에서의 온도상승

4. 온도상승계산의 적용

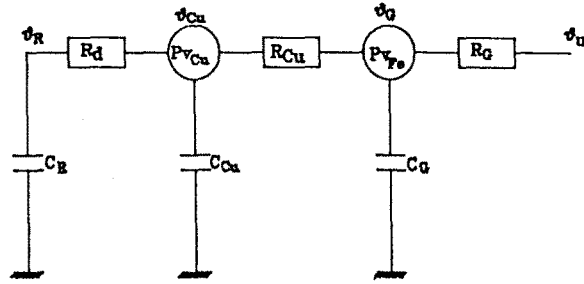


그림 3: Thermal equivalent network of a disc type motor

3점에서 설명한 방법으로 disc type motor에서는 그림 3과 같은 열 network를 구성 할 수가 있다. disc type motor에서는 권선에서 손실(P_{Vcu})에 의하여 열이 발생되고 core에서는 철손(P_{VFe})에 의한 열이 발생된다. 권선에서 발생된 열은 한편으로는 공극의 열저항 R_d를 통하여 회전자에 전달되고 다른 한편으로는 R_{Cu}를 통하여 housing으로 전달된다. 또한 각 부분은 heat capacitor (C_R, C_{Cu}, C_G)에 의하여 열이 축적된다.

그림 3에서 각 점 Rotor, Winding, Housing에서의 온도(θ_R, θ_{Cu}, θ_G)를 구하기 위하여서는 각 점에서 Kirchhoff의 법칙에 따라 다음과 같은 미분방정식을 유도할 수가 있다.

$$\frac{d\theta_{Cu}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{Cu}} \left[-(\theta_{Cu} + \lambda_d)\theta_{Cu}(t) + \theta_C(t) + \theta_R(t) + P_{VCu} \right] \quad (10)$$

$$\frac{d\theta_C(t)}{dt} = \frac{1}{C_{Fe}} \left[-(\lambda_G + \lambda_{Cu})\theta_C(t) + \lambda_{Cu}\theta_{Cu}(t) + P_{VFe} \right] \quad (11)$$

$$\frac{d\theta_R(t)}{dt} = \frac{1}{C_R} \left[-\lambda_d\theta_R(t) + \lambda_d\theta_{Cu}(t) \right] \quad (12)$$

C_{Cu} : Heat capacity of the winding Ws/K

C_{Fe} : Heat capacity of the yoke and of the housing Ws/K

C_R : Heat capacity of the rotor Ws/K

λ_{Cu} : heat conductance of the winding W/K

λ_d : Heat conductance of the airgap W/K

λ_G : Heat conductance of the housing W/K

P_{Vcu}: winding loss W

P_{VFe}: ironloss W

θ_{Cu} : over temperature in the winding

θ_C : over temperature in the housing

θ_R : over temperature in the rotor

| heat conductance | heat capacity |
|-----------------------------|----------------------------|
| λ _{Cu} = 0.132 W/K | C _{Cu} = 3.67Ws/K |
| λ _G = 0.123 W/K | C _G = 24.76Ws/K |
| λ _d = 0.017 W/K | C _R = 7.86Ws/K |

표 2: motor의 열전도율 및 heat capacity

model로 사용된 disc type motor는 정격운전시 windingloss 4.0W, ironloss 0.3W 이며 표 2에 heat conductance, heat capacity와 방정식 10,11,12로 부터 계산한 각 점의 온도상승을 그림 4에 표시 하였다.

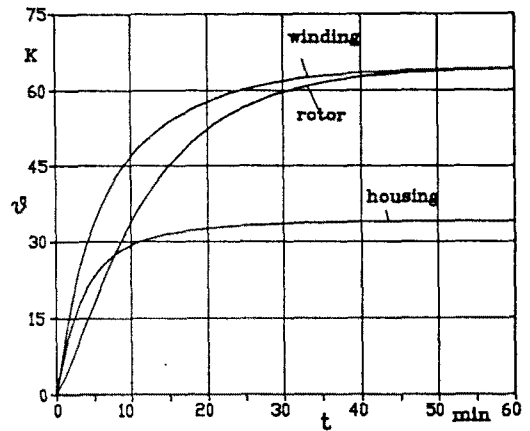


그림 4: 계산에 의한 disc type motor의 온도상승

그림 5에는 model motor의 온도상승을 예측치와 계산치를 비교하였다.

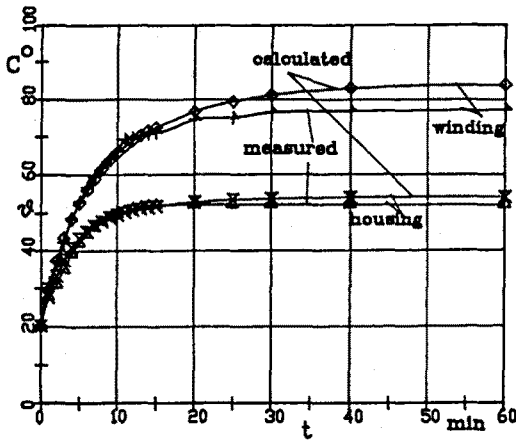


그림 5; 각 점에서의 온도상승 계산값과 측정값의 비교

Housing의 온도상승은 직접 thermometer로 측정 하였으며 권선의 온도상승은 전류의 변화로 저항을 계산하고 저항의 변화에서 온도상승을 계산 하였다.

측정값과 계산값의 차이는

- a) 실내온도가 일정하게 유지되지 못하였으며
- b) motor의 지지대로 전달된 열을 고려하지 않은 이유이다. motor는 계산과 측정값에서 알 수 있듯이 50분이 경과하면서 발생한 열과 방출된 열이 평형을 이루기 시작 하였다.

5. 결론

본 논문에서는 heat source network method를 이용하여 disc type motor의 열등가회로를 만들어 각 점에서의 온도상승을 계산하고 계측값과 비교하였다.

이 방법은 간단하면서도 실제값과 상당히 근접되며 시간에 따른 온도상승을 예측할 수가 있어 온도변화에 민감한 연구자석을 이용하는 motor를 설계할 때 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

6. 참고문헌

[1] A.Kessler, Bratislava; Versuch einer genaueren Vorausberechnung des zeitlichen Erwärmungsverlaufes elektrischer Maschinen mittels Wärmquellenetzen. Archiv für Elektrotechnik Bd.49 H.2 1964 P.59-76

[2] A.Kessler; Zur Theorie des Wärmquellenetzes Archiv für Elektrotechnik Bd.49 H2 1964 P.109-123

[3] J.Hak, Brunn; Wärmquellenetze elektrischer Maschinen E und M Jg. 76 H1 P.236-243

[4] J.Hak; Lösung eines Wärmquellen-Netzes mit Berücksichtigung der Kühlströme. Archiv für Elektrotechnik Bd.42 1956 H.3 P.137-154

[5] VDI-Wärmeatlas; Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 5.Auflage VDI Verlag Düsseldorf 1988

[6] V. Preinigerova; Einige Erfahrungen mit den Berechnungen der nichtstationären Wärmevergänge in den rotierenden Elektrischemaschinen kleiner Leistung nach den Verfahren der Wärmquellenetze. 22. Intern Wiss.Koll. TH Ilmenau 1977 P.37-40

[7] R.Hanitsch; Electromagnetic Machines with Nd-Fe-B Magnets Journal of Magnetism and Magnetic Materials (80) 1989 P.119-130