

돌극형 동기발전기의 열전달 해석

^o오석규*, 성기대**, 하현성**, 공관식*, 고요***, 황영문*
*부산대학교, **효성중공업, ***에너지자원 기술개발 지원센터

Analysis of temperature rise in a salient-pole synchronous generator

^oS.G. Oh*, G.D. Sung**, H.S. Ha**, G.S. Kong*, Y. Ko***, Y.M. Hwang*
*Pusan University, **Hyosung Industries Co., Ltd, ***R.A.C.E.R

ABSTRACT

The calculations of the temperature rise in the armature have long been considered among some of the most important problems in the design of the rotating machine. Despite the many methods of calculation propose, very few have been used in the actual design. In most cases, These methods are inadequate for measuring a wide range of temperature distribution because of the complicated structure of the machine.

In this paper, the armature is divided into seven portions, and the thermal equivalent circuit is introduced as a simulation of the armature. The test machine is 1000Kw salient-pole synchronous generator.

1. 서론

회전기의 설계, 제작에 있어서 고려할 사항 중에 가장 중요한 문제는 회전기 내부의 온도상승의 계산이다. 회전기 내의 여러 부분에서의 손실은 열로 변환되는데, 이 열은 그 주위의 온도를 상승시키며 그 최종온도는 사용된 각종 절연재료의 열용량과 절연재료를 통하여 냉각매질에 전달하는 열전도도에 따라 다르다. 회전기의 열전달 해석방법에 있어서 이러한 각종 절연재료의 열용량과 열전도도를 계산하여 각 부위의 온도상승을 예측 하리하나 복잡한 구조, 절연재료의 상태, 냉각공기의 흐름 등의 문제로 어려움을 겪고 있다.

또 하나의 열전달 해석방법은 온도센서를 회전기 각 부위에 삽입하고 온도상승은 온도등가회로를 시뮬레이션하여 분석하는 방법이다. 이 때 등가회로의 각 정수는 실험을 통하여 구할 수 있다.

본 논문에서는 1000KW 4극 돌극형 동기발전기를 대상으로 전기자에 7개의 온도센서를 삽입하여 실험하였으며, 실험결과를 기초로 하여 전기자의 각 부위에 온도상승을 열등가회로를

도입하여 시뮬레이션하였다.

2. 전기자에서의 열전달 해석

2.1 열등가방정식

전기자의 열흐름은 집중된 상수로 구성된 열등가회로에 의해 시뮬레이션할 수 있다. 이 때 열전달상수와 전기상수간에 Analogy시켜 열전달상수를 전기상수화하여 전기회로로서 등가화시킬 수 있다. 열량(Q)은 전류(I)로, 온도상승(θ)은 전압(V)으로, 열전도도(U)는 컨덕턴스(G)로, 그리고 열용량(C)은 캐패시턴스(C)로 각각 등가화시킬 수 있다.

그림 1은 피실험 동기발전기에 온도센서를 매입한 부위를 나타내고 있으며, 그림 2는 이 때의 열전달 등가회로이며 각 첨자는 그림 1에서 온도센서를 매입한 전기자의 각 부위를 나타내고 있다.

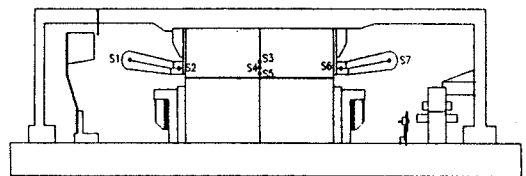


그림 1 전기자에서의 온도센서의 위치
Fig. 1 Point of the thermistor at armature

그림 1에서 전기자에 매입한 온도센서의 위치는 다음과 같다.

- S1, S7 : coil-end부의 coil 안쪽
- S2, S6 : coil이 철심밖으로 나오는 부위의 상·하층권 사이
- S3 : 슬롯내부의 하층권 아래
- S4 : 슬롯내부의 상·하층권 사이
- S5 : 슬롯내부의 상층권 위쪽

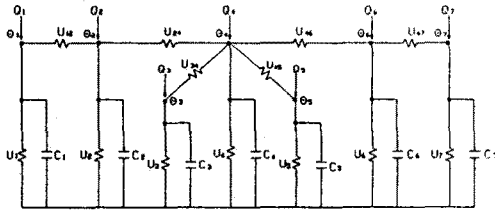


그림 2 전기자의 온도등가회로
Fig. 2 Thermal equivalent circuit of the armature

그림 2에 사용된 열전달상수는 다음과 같다.

- $\theta_1 \sim \theta_7$: 온도센서가 부착된 각 부위의 온도상승
(그 기준은 냉각공기의 입구온도이다.)
- $Q_1 \sim Q_7$: 각 부위의 열원
- $U_1 \sim U_7$: 각 부위의 표면으로부터 외부공기로 전도되는 열
- $U_{12}, U_{24}, U_{46}, U_{67}$: 코일을 통하여 전도되는 열
- U_{34} : 슬롯하부에서 상·하층권사이로 전도되는 열
- U_{45} : 슬롯의 상·하층권사이에서 상부로 전도되는 열
- $C_1 \sim C_7$: 각 부위에서의 열용량

그림 2의 온도등가회로의 등가방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_1 = U_1 \theta_1 + C_1 p \theta_1 + (\theta_1 - \theta_2)U_{12} \quad (1)$$

$$Q_2 = U_2 \theta_2 + C_2 p \theta_2 + (\theta_2 - \theta_1)U_{12} + (\theta_2 - \theta_4)U_{24} \quad (2)$$

$$Q_3 = U_3 \theta_3 + C_3 p \theta_3 + (\theta_3 - \theta_4)U_{34} \quad (3)$$

$$Q_4 = U_4 \theta_4 + C_4 p \theta_4 + (\theta_4 - \theta_2)U_{24} + (\theta_4 - \theta_3)U_{34} + (\theta_4 - \theta_5)U_{45} + (\theta_4 - \theta_6)U_{46} \quad (4)$$

$$Q_5 = U_5 \theta_5 + C_5 p \theta_5 + (\theta_5 - \theta_4)U_{45} \quad (5)$$

$$Q_6 = U_6 \theta_6 + C_6 p \theta_6 + (\theta_6 - \theta_4)U_{46} + (\theta_6 - \theta_7)U_{67} \quad (6)$$

$$Q_7 = U_7 \theta_7 + C_7 p \theta_7 + (\theta_7 - \theta_6)U_{67} \quad (7)$$

여기서 p 는 미분연산자이다.

3. 열전달상수의 산정 및 실험

3.1 열전달상수의 산정

(a) 열량(Q)의 산정

전기자에서의 각 부분의 손실은 다음과 같이 구성된다.

- Q_1, Q_2, Q_6, Q_7 : 온도수정을 한 동손
- Q_3, Q_5 : 철손
- Q_4 : 온도수정을 한 동손 + 표류부하손

(b) 열전도도(U)의 산정

전기자의 각 부분의 표면에서 열전도도는 열전도도의 일반적인 이론과 실험결과에 따라 결정하는 것이 바람직하다. 따라서 온도는 전기자의 각 부위에서 측정되어야 하며, 실험은 열전달상수를 구하기 위해 여러 조건하에서 이루어져야 한다.

(c) 열용량(C)의 산정

열용량, C는 산정된 열전도도, U와 온도상승의 실험데이터를 이용하여 산정된 열용량과 온도상승데이터를 반복 비교함으로써 산정한다.

3.2 열전달상수를 구하기 위한 실험

그림 3은 100%부하(역률 1)조건에서 시간에 따른 온도상승을 나타내고 있다.

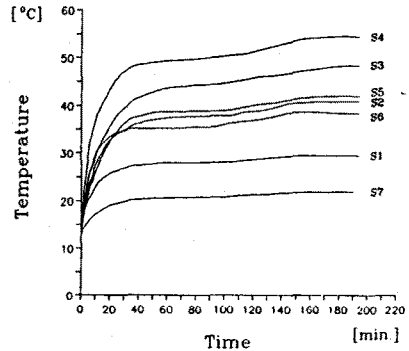


그림 3 100%부하에서의 온도
Fig. 3 Temperature under 100% load

그림 4는 각 부하조건에 따른 온도센서 각 부위의 온도상승을 나타내고 있다. 이 그림에서 부하가 증가할수록 슬롯 내부에서 온도변화가 크며 이 중 S4부위가 가장 큰 온도상승을 보이고 있으며 권선의 양 끝인 S1과 S7부위는 가장 작은 온도상승을 보인다. 여기서의 온도상승은 각 부위에서 포화상태에 측정된 온도에서 주위온도를 뺀 값을 나타내고 있다.

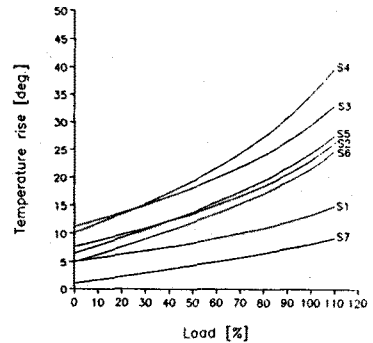


그림 4 부하에 따른 온도상승
Fig. 4 Temperature rise according to load

4. 시뮬레이션 결과

열전달상수를 산정하고 열등가회로방정식을 이용하여 시뮬레이션하여 온도상승을 계산한다.

그림 5는 100%부하조건에서 측정된 실측온도와 시뮬레이션하여 계산한 값을 나타내고 있다. 이 때 구한 열전달상수로써 다른 부하조건에서의 온도상승을 계산할 수 있다.

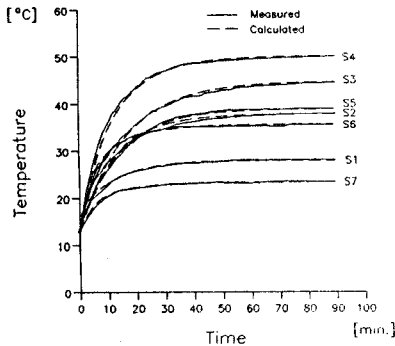


그림 5 측정온도와 계산된 온도
Fig. 5 Measured and calculated temperature

그림 6과 7은 각각 75%, 125%의 부하조건에서 계산된 온도를 보여 주고 있다.

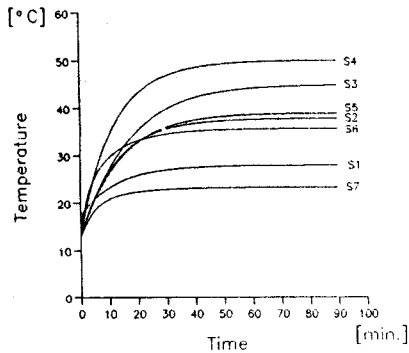


그림 6 75% 부하에서의 계산된 온도
Fig. 6 Calculated temperature under 75% load

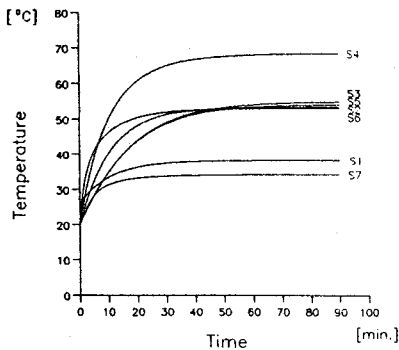


그림 7 125%부하에서의 계산된 온도
Fig. 7 Calculated temperature under 125% load

5. 결론

전기자에서의 온도상승에 관한 계산은 회전기의 설계에 있어서 가장 중요한 문제로 인식되어 왔다. 따라서 오래전부터 열전달 해석방법이 많이 제시되었지만 복잡한 구조로 인해 실제 설계에 사용된 예는 많지 않다.

본 논문에서는 1000Kw 4극 돌극형 동기발전기를 대상으로 전기자의 7곳에 온도센서를 매입하여 열전달 등가회로를 구성하였다. 열전달상수는 실험을 통하여 산정함으로써 복잡한 구조와 각종 절연물질에 관계없이 전기자에서의 비교적 정확한 열전달 해석을 할 수 있어서 동일한 구조의 설계에 반영될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Yamamura and S.Yamazaki, "Analysis of temperature rise in a traction motor."
2. Rockwood, "Calculation of stray load losses." Trans. AIEE, Vol 46, pp.1139, May 1927
3. Pollard, "Load losses in salient-pole synchronous machine." Trans. AIEE, pp1332, Dec. 1935
4. S.A.Swann and J.W.Salman, "Effective resistance and reactance of a solid cylindrical conductor placed in a semi-closed slot", Proc. IEE, Vol.109C, pp.611, 1962