



KIEE Summer Conference 2013

# 대한전기학회 제44회 하계학술대회

2013년 7월 10일 (수) ~ 12일 (금) 제주국제컨벤션센터

## KIEE Summer Conference 2013

일시 : 2013년 7월 10일 (수) ~ 12일 (금)

장소 : 제주국제컨벤션센터



01. Home



02. 목차(Contents)



03. 저자색인



04. 검색(Search)



- 주최 :  대한전기학회
- 후원 : 산업통상자원부, 미래창조과학부,  
제주특별자치도, 한국전력공사,  
한국전기공사협회, 한국과학기술단체총연합회

• 협찬 : 2013 하계 협찬업체

전시회 참가업체

● EMP017	<b>SMC 재질을 이용한 IPMSM 특성 검토</b> 김도진*, 채승희, 정영훈, 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP046	<u>수냉식의 ISG 전동기의 열등가치로 해석</u> 김규섭 (한양대), 정재우 (한양대), 박민로 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP068	<b>유한요소해석에서 적층에 따른 고정자 기계적 이방성 물성치 고려 방법</b> 김두영 (한양대), 박현진 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP077	<b>유한요소 해석법과 등가회로 해석법의 결합에 의한 유도전동기의 특성해석</b> 이수진 (한양대), 김지민 (한양대), 심재한 (한양대), 김동민 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP078	<b>이방성 Nd-Fe-B 본드자석을 이용한 브러쉬리스 영구자석 동기 전동기 개발</b> 김해중 (한양대), 김규섭 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● REP033	<b>육상 해상 풍력타워 리프트 개발에 관한 연구</b> 김영수 (한국승강기대), 김창일 (한국승강기대), 이상훈 (한국승강기대), 홍정표 (동의과학대학), 이건복 (해성산전), 박종열 (해성산전), 권순재 (부경대)	[논문보기]

## 수냉식의 ISG 전동기의 열등가회로 해석

김규섭, 정재우, 박민로, 홍정표  
한양대

### Thermal analysis of water cooled ISG motor

Kyu-Seob Kim, Jae-Woo Jung, Min-Ro Park, Jung-Pyo Hong  
Hanyang University

**Abstract** - 자동차용과 가정용 전동기에서 소형화에 대한 요구가 증가하고 있다. 또한 전동기의 용량이 커지면서 그 전동기에서 발생하는 손실의 양은 수 kW가 되며 따라서 이러한 열을 어떻게 방출시키는 것인가에 대한 설계가 중요한 요구조건이 되고 있다. 내부에서 발생하는 열을 방출시키기 위해 다양한 방법이 사용되고 있는데 그 중에서 전동기 외부에 냉각채널을 사용한 방법이 주목을 이루고 있다. 이때의 냉각 채널에서 흐르는 냉각수의 종류와 냉각수의 속도 등에 따라서 방열량이 결정되며 전동기 설계의 중요한 부분이다. 본 논문에서 이 냉각채널을 구성하는 파라미터에 대해서 열 등가회로를 구성하여 자동차용 ISG 전동기의 온도 시험과 비교하였다.

#### 1. 서 론

전동기의 용량이 커짐에 따라 열 방열에 대한 문제가 새롭게 대두되고 있다. 전동기의 냉각방식에는 여러 가지가 있다. 크게 3가지로 나누어 볼 수 있는데 공냉, 수냉, 유냉이다. 이는 전동기의 크기 결정에 절대적인 영향을 미친다. 즉, 냉각으로 인한 열방열이 좋을 경우 높은 전류 밀도로 많은 전류를 사용할 수 있으므로 같은 사이즈에서 높은 출력을 얻을 수 있다.

전동기 그중 수냉식의 경우도 몇 가지로 나누어 볼 수 있는데 하우징과 고정자 코어 사이에 워터자켓을 씌우는 방법, 전동기에서 가장 온도가 높은 엔드와인딩에 스프레이 형식의 물을 튀겨주는 방법, 공극 사이에 물이나 오일을 넣어 냉각시키는 방법이 있다. 그 중 가장 범용적이고 구성하기 쉬운 방법이 하우징과 고정자 코어 사이에 워터자켓을 씌우는 방법이다.

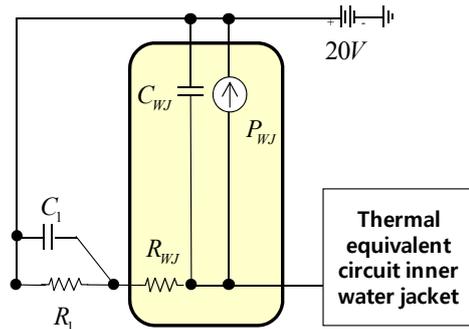
본 논문에서는 전동기의 열 등가회로를 사용하여 온도를 예측해보고 실험을 통해 검증해 보았다. 열등가회로는 전동기의 단시간 내에 산정된 열 소스, 열 저항, 열 캐패시턴스를 이용하여 전동기의 온도 특성을 미리 확인해 볼 수 있다. 또한 전동기 온도 특성을 확인하여 설계 단계에서 사이즈 결정을 할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 공냉식의 열등가회로는 많은 연구가 진행되어 왔지만 수냉식 열 등가회로에 대한 내용은 냉각유로의 복잡성과 유체로 인한 방출열 계산의 어려움으로 인해 방법이 확실하게 정립되지 않았다. 즉, 공냉식 열 등가회로에서 주의해서 산정해야 할 부분은 대류 열전달 계수 부분이지만 수냉식 열 등가회로에서는 공극에서의 대류 열전달 계수 산정과 냉각유로의 열전달의 해석이 가장 중요한 부분이다. 냉각유로의 형태에 따라 열 저항과 방출열의 계산, 냉각수의 열 캐패시턴스를 계산하여 열 등가회로를 구성한다. 이때의 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 해석 방법의 신뢰성을 검증하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 수냉식 열전달의 구성

열 등가회로와 전동기의 온도 상승은 등가화 될 수 있는데, 전동기의 온도 상승은 회로의 전압의 변화로, 전동기의 손실은 회로의 전류원이다. 또한 대류나 전도 열전달은 회로의 저항으로, 전동기의 온도변화를 지연시키는 열용량은 회로의 캐패시턴스로 등가화 할 수 있다. 본 논문에서 사용되는 전동기의 냉각유로는 전체 표면을 따라 흐른다. 이 유로의 열등가회로 모델링을 수식을 통해 산정하였다.

공냉식 열등가회로는 고정자와 회전자 코어, 권선, 영구자석, 하우징 등의 대류와 전도 열저항, 열 캐패시턴스, 손실로 인한 열소스로 구성된다. 여기에 기본적으로 수냉식 열등가회로는 공냉식 열 등가회로에 냉각에 관련된 파라미터를 추가로 구성한다. 이 파라미터에는 냉각수로 인한 방출열과 냉각유로의 열저항, 냉각수의 열 캐패시턴스로 구성된다. 이를 열의 흐름을 고려하여 파라미터를 나타내면 그림 1과 같다.  $P_{WJ}$ 는 냉각수로 인한 방열량,  $R_{WJ}$ 는 냉각수의 열 저항,  $C_{WJ}$ 는 냉각수의 열 캐패시턴,  $R_f$ 는 하우징의 열저항,  $C_f$ 는 하우징의 열 캐패시턴이다. 이 냉각유



<그림 1> 워터자켓 모델링

로와 하우징은 워터자켓 내부의 열 등가회로와 연결된다.

$$P_{WJ} = \dot{q} \cdot dT \cdot \rho \cdot C_p \quad (1)$$

$$R_{WJ} = \frac{1}{hA} \quad (2)$$

$$C_{WJ} = \rho C_p V \quad (3)$$

$\dot{q}$ 는 냉각수의 유량,  $dT$ 는 냉각수 입구와 출구의 온도차이,  $\rho$ 는 냉각수의 밀도,  $C_p$ 는 냉각수의 비열,  $h$ 는 냉각수의 대류 열전달 계수,  $A$ 는 냉각수와 유로가 만나는 면적,  $V$ 는 냉각수의 부피이다.

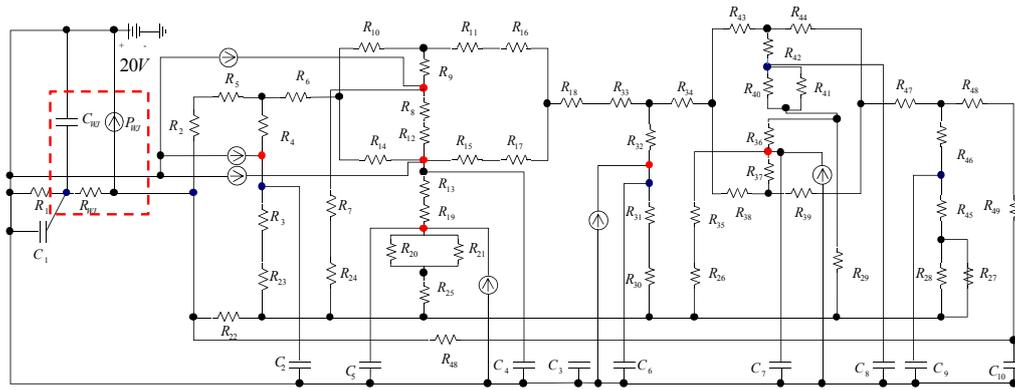
##### 2.2 열 등가회로 구성

공냉식 열등가회로와 수냉식 열등가회로는 유사한 부분이 많다. 다른 점은 공냉식 열등가회로는 구조적으로 고정자 외곽에 하우징이 바로 연결되고 대류 열저항이 연결되는 것이고 수냉식 열등가회로는 고정자 외곽 다음에 워터자켓이 그리고 하우징이 연결되는 점이다. 그림 2는 수냉식 열등가회로의 구조를 나타낸다. 붉은 색 점선으로 표시된 부분이 워터자켓의 열등가회로 부분이다. 2.1에서 말했듯이 방출열과 강제대류 열저항, 열캐패시턴스를 포함하고 있으며 좌측에는 하우징의 회로, 우측에는 고정자와 회전자를 포함하는 회로가 구성되어 있다 [1].

##### 2.3 해석 모델 및 열 파라미터 산정

그림 3은 해석 모델을 나타낸다. 6극의 36슬롯으로 설계 되었고 분포 권을 사용하였다. 주운전 구간은 3250RPM의 23.5Nm에서 운전되며 8kW의 출력을 가지고 있다. 전동기의 사이즈는 고정자의 사이즈로서이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 본 전동기의 외곽은 매우 복잡하여 하우징과 대기의 대류 열전달 계수 산정이 어렵다. 하지만 이 전동기는 수냉식이므로 하우징과 대기의 상태는 크게 영향을 받지 않는다. 즉, 전동기의 주된 열원인 동손과 철손은 냉각채널 안에서 발생하기 때문에 발생한 열은 냉각수로 인해 밖으로 전달되지 않는다. 또한 하우징의 온도는 냉각수로 인해 냉각수의 온도와 유사한 온도가 되므로 하우징 외형의 복잡함은 열등가회로를 적용하는데 문제가 되지 않는다.

그림 4는 해석 모델의 형상을 나타내었다. 좌측은 실제 전동기 형상을 나타내고 오른쪽은 열 등가회로에 적용하기 위한 등가화 모델이다. 열등가회로는 전동기의 원통형 형상에 맞게 모델링 되어 있으므로 우측과 같이 고정자의 슬롯 형상과 회전자의 영구자석, flux barrier의 형상은 면적을 동일하게 하여 등가화 하였다. 등가화 모델에서 전동기의 열 저항과 열 캐패시턴스를 산정할 수 있다[2][3].



〈그림 2〉 수냉식 열등가회로

〈표 1〉 전동기 손실 값

Loss	Unit	copper loss	Core loss		
			Yoke	Teeth	Rotor
669.6	W	669.6	27.3	29.4	6.3

표 1은 전동기의 열 소스의 값을 나타낸다. 열 소스로 작용하는 손실 조건은 동손이 주요하며, 철손은 동손에 비해 10프로 내외이다. 따라서 온도변화는 주로 동손의 크기에 따라 결정된다는 것을 예측할 수 있다.

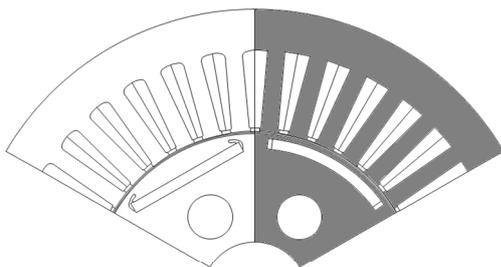
### 2.4 해석과 실험 결과 비교

해석 모델에 대하여 온도해석과 열실험을 진행하였다. 해석을 위해 앞에서 구성한 열 등가회로에 대상 모델을 등가화하여 적용하였다. 운전 속도는 3250rpm 이고 부하는 23.5Nm이다. 실제 운전 상황과 동일한 상황을 위해 챔버 안에서 해석을 수행하였으며 그때 챔버의 온도는 105도이다. 또한 내부에 냉각수가 흐르고 있으며 냉각수의 인렛 온도는 70도이며 아웃렛은 2~3도 가량 높다. 해석 결과에서 코일의 온도는 초기온도 70도에서 가파르게 상승하며 최고온도 139도 올라간다. 총 온도 상승은 60도 가량 상승하는 것을 알 수 있었다.

해석결과를 검증하기 위해 온도 시험을 진행하였다. 전동기 내부의 온도를 체크하기 위하여 전동기 내부의 엔드코일에 thermal couple을 부착하였다. 전동기가 부하를 주기위해 다이노모와 연결되어 있고 그 사이에는 부하의 크기를 확인할 수 있도록 토크 미터를 연결하였다.



〈그림 3〉 대상 모델



〈그림 4〉 전동기 등가화

해석 조건과 동일하게 부하 시험을 진행하였다. 대상 전동기의 온도 시험 결과 온도변화는 최초 70도에서 시작하여 급격히 온도가 상승하며 최고 온도는 134도였다. 그림 5와 같이 해석 결과와 온도 시험 결과와 비교해 볼 때 오차는 10퍼센트 내외이다. 열 등가회로 해석에서 보정계수를 사용하는 것은 했지만 이는 매우 유사한 결과이다. 또한 더욱 중요한 결과는 온도 상승 추이가 유사하다는 것에 있다. 해석 결과와 온도 시험 결과를 비교해 보았을 때 초기 온도 변화의 상승 속도는 매우 유사함을 볼 수 있다.

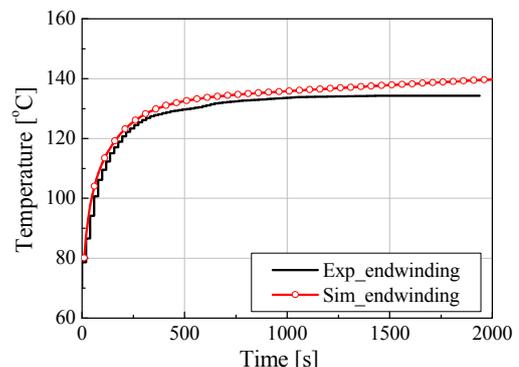
### 3. 결 론

본 논문에서는 냉각방식이 수냉인 경우의 열 등가회로에 대하여 구성해보고 실험으로 검증해 보았다. 워터자켓이 있는 경우의 열 등가회로는 냉각유로의 열 해석 모델의 적용이 어렵고 강제 대류 현상으로 인해 대류 열전달 계수 산정이 어렵다. 따라서 냉각수로 사용된 유체의 열적 특성을 확인하여 열 등가회로를 구성하였다. 실험에 사용된 HSG 전동기는 하우징 형상이 복잡한 단점이 있으나 냉각 채널이 하나로 간결하게 구성되어 실험에 적합한 모델로서 실험을 검증하는데 사용되었다. 논문에서 제안한 열 등가회로를 사용하여 수냉식 열등가회로의 온도해석을 할 수 있으며 전동기 초기설계 단계에서 열적 특성을 검증할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

“본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음”  
(NIPA-2013-H0401-13-1008)

### [참 고 문 헌]

- [1] P. H. Mellor, D. R. Roberts, D. Turner, “Lumped Parameter Thermal Model For Electrical Machines of TEFC Design,” *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 138, no. 5, pt. B, pp. 205-218, Sep. 1991.
- [2] Byeong-Hwa Lee, Kyu-Seob Kim, Jae-Woo Jung, Jung-Pyo Hong, and Young-Kyoun Kim, “Temperature estimation of IPMSM using thermal equivalent circuit,” *IEEE Trans. on Magn.*, to be published.
- [3] Yunus A. Cengel, *Heat transfer: A practical approach*, 2nd ed., McGraw-Hill.



〈그림 5〉 실험 및 해석 결과