



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	<b>수냉식의 ISG 전동기의 열등가화로 해석</b> 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	<del><b>유한요소 해석법과 등가회로 해석법의 결합에 의한 유도전동기의 특성해석</b></del> <del>이수진 (한양대), 김지민 (한양대), 심재한 (한양대), 김동민 (한양대), 홍정표 (한양대)</del>	[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]

# 유한요소 해석법과 등가회로 해석법의 결합에 의한 유도전동기의 특성해석

이수진, 김지민, 심재한, 김동민, 홍정표  
한양대학교

## Characteristic Analysis of induction motor by Equivalent Circuit Coupled with Finite Element Method

Su-Jin Lee, Ji-Min Kim, Jae-Han Sim, Dong-Min Kim, Jung-Pyo Hong  
Hanyang University

**Abstract** - 본 논문은 유한요소 해석법과 등가회로 해석법의 결합에 의한 유도전동기의 특성해석에 관하여 나타내었다. MDPS용 전동기와 같이 포화도가 높은 자동차용 유도전동기는 여자전류에 따른 여자리액턴스 변화를 고려하지 않는 경우 신뢰성 높은 성능 예측을 하기 어렵다. 그래서 유한요소해석법과 집중정수법의 한계점을 인식하고, 이 두 방법의 결합을 통하여 유도전동기의 특성해석법을 제안하고자 하였다. 따라서 본 논문에서는 여자전류에 따른 여자리액턴스 변화를 고려한 등가회로 해석을 진행하고, 제안된 방법의 신뢰성을 확인하기 위하여 실험결과와 비교분석 하였다.

### 1. 서 론

전 세계적으로 환경오염에 대한 관심이 높아지고 규제가 심화됨에 따라 각국의 자동차 회사에서는 친환경 차량 개발에 초점을 맞추고 있다. 이러한 추세를 반영하여 구동장치뿐만 아니라 조향장치 및 제동장치의 전자화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다 [1].

제한된 사이즈 내에서 성능을 만족해야하는 자동차용 전동기의 경우 출력밀도가 높은 매입형 영구자석 동기전동기가 많이 사용되었다[2]. 그러나 최근 회로류 영구자석의 가격이 급격하게 상승함에 따라 탈 회로류를 위한 다른 종류의 전동기에 대한 연구가 진행되면서 유지보수의 측면에서 큰 장점을 가지고, 현재 산업 현장에서 많이 사용되고 있는 유도전동기에 대한 연구가 특히 많이 진행되고 있다 [3]. 이러한 차량용 유도전동기의 경우 철심의 포화가 산업용 전동기에 비해 높은 편으로 집중정수법을 이용한 전동기 해석으로는 고려하지 못하는 부분들이 많다. 유도전동기를 해석하는 방법에 있어서 집중정수를 이용하는 경우 전동기의 전반적인 특성해석이 용이하고, 계산 시간이 짧은 장점을 가지고 있으나 2차측 도체에 유기되는 와전류 및 철심의 비선형성 등을 고려하기 어려운 단점이 있다. 반면 유한요소 해석법의 경우 철심의 비선형성 및 표피효과 등을 고려할 수 있으나 해석 시간이 오래 걸리고, 철손 및 기계손을 고려할 수 없으므로 정확한 역률 및 효율 예측이 어려운 단점이 있다. 따라서 유한요소해석법과 등가회로 해석법의 한계점을 인식하고, 두 해석법의 결합을 통하여 유도전동기의 설계 시 정확한 성능 예측을 하고자 하였다. 본 논문에서는 제안하는 집중정수와 유한요소해석을 결합한 해석 방법에 있어서의 타당성을 검증하기 위하여 집중정수만을 이용한 방법과 두 해석법을 결합한 결과, 그리고 실험 결과에 대해 비교 분석 하였다.

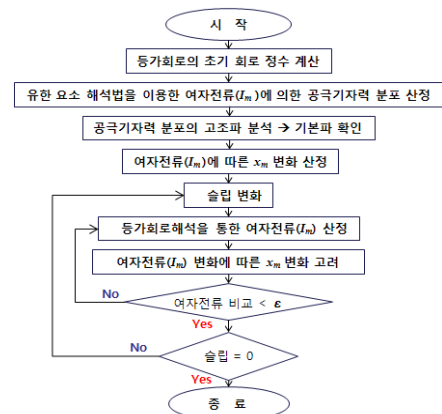
### 2. 본 론

#### 2.1 유한요소해석법과 집중정수법의 결합

유한요소 해석법과 등가회로 해석법이 결합된 유도전동기 특성해석 과정은 그림 1과 같다. 먼저 등가회로의 초기 회로정수를 집중정수법을 이용하여 산정하고, 여자전류 크기에 따른 여자리액턴스 변화를 고려하기 위하여 유한요소 해석법을 이용하여 여자전류에 의한 공극 기저력 분포를 산정한다. 일반적인 유도전동기의 한상에 대한 등가회로는 전압, 전류가 모두 정현파로 가정하여 꾸며진 등가회로이므로, 유한요소해석을 통해 얻어진 공극 기저력 분포를 고조파 분석을 진행하여 기본파를 산정한다. 여자전류에 따른 여자리액턴스 변화를 고려한 등가회로 해석을 통하여 이전 여자전류의 크기와 비교하고 수렴 여부를 판단한다. 정확한 여자전류에 의한 여자리액턴스를 얻기 위하여 유한요소해석결과를 이용하여 등가회로 해석을 수렴할 때 까지 반복 수행한다. 수렴 시 슬립 변화를 고려하고 식 (1) - (4)의 전압방정식을 이용하여 유도전동기의 특성 해석을 진행한다 [4].

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + \vec{I}_1 Z_r \quad (1)$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_o + \vec{I}_1' \quad (2)$$



〈그림 1〉 유도전동기 특성 해석 process

$$P = m_1 I_1'^2 \left( \frac{(1-s)r_2'}{s} \right) \quad (3)$$

$$T = \frac{60}{2\pi} P \frac{1}{(1-s)N_s} \quad (4)$$

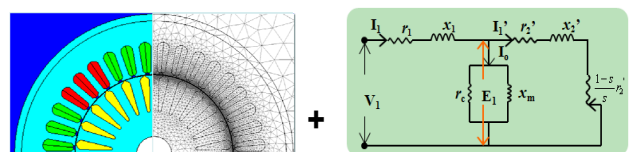
여기서,  $r_2'$ 은 2차측 저항,  $s$ 는 slip,  $m_1$ 은 1차측 상수  $Z_1$ 는 유도전동기 한상의 전체 임피던스를 나타낸다.

#### 2.2 대상 전동기

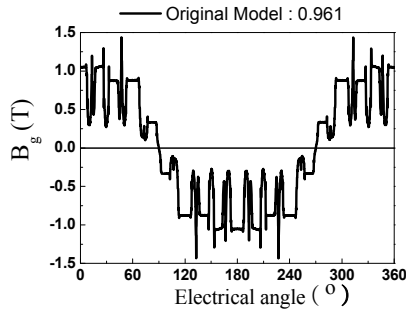
본 논문에서 해석한 대상 모델은 MDPS용 유도전동기이며 고정자 및 회전자 슬롯이 각각 36, 24개이고, 4극 전동기이다. 회전자는 농형으로 폐슬롯을 가진다. 표 1에 기본적인 전동기 사양을 나타내었고, 전동기 상세 형상 및 한상 등가회로는 그림 2에 나타내었다. 그림 4는 대상전동기의 여자전류 변화에 따른 여자리액턴스의 변화 양상을 나타낸 것으로, 여자전류에 따라 최대 약 65% 차이가 남을 확인할 수 있다. 유한요소해석 시 유도전동기의 경우 회전자의 엔드링을 고려해야하므로 본 논문에서는 간단하게 엔드링 부분을 2차측 도체의 도전율에 반영하여 해석을 수행하였다 [5].

〈표 1〉 대상 모델에 대한 제원

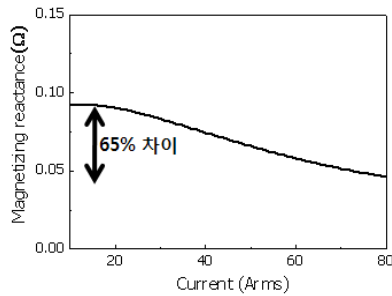
세부 항목	단위	값
전동기 type	-	유도전동기
인가전압	V <sub>DC</sub>	12
극수/슬롯수/도체바수	-	4 / 36 / 26
속도	[rpm]	1200
공극 길이	[mm]	0.2
skew	° [ ]	0



(a) 유한요소해석법을 이용한 대상 전동기 (b) 유도전동기의 한상 등가회로  
〈그림 2〉 유한요소 해석법과 등가회로 해석법의 결합



〈그림 3〉 공극자속밀도 @ 여자전류 = 60 [A]



〈그림 4〉 여자전류에 따른 여자리액턴스 변화 양상

### 2.3 여자전류에 따른 여자리액턴스 변화

slip의 변화에 따라 유도전동기의 자계분포가 달라짐으로써 회전자 도체에서 유가되는 전류의 크기가 변하게 된다. 이로 인하여 철심의 포화도가 변하게 되고, 2차측 와전류에 의한 회전자 자계의 양도 달라지므로 정확한 특성 해석을 위해서는 slip 변화에 따른 회로정수 변화를 고려해야 한다. 그림 3은 여자전류 60 [A] 일 때의 공극자속밀도를 나타내었다. 고정자와 회전자가 치 슬롯 구조를 가지고 전류에 따라 철심의 포화도가 달라지므로 고정자와 크게 실리게 되고, 입력 전류의 양에 따라 파형도 변하게 된다. 기본과 성분을 고려하기 위하여 공극자속밀도에 대한 고조파 분석을 수행하여 기본과 크기를 산정한다. 고조파 분석을 통해서 구한 각 고조파에 따른 자속밀도의 크기는 식 (5)와 같다.

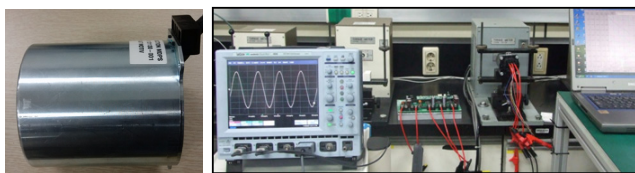
$$B_{pk} = \sum_{n=0}^N B_p(n) e^{j\frac{2\pi k}{N}} \quad (5)$$

여기서,  $B_{pk}$ 는  $k$ 번째 고조파에 대한 자속밀도의 최대값,  $k$ 는 고조파 차수,  $B_p$ 는 요소에서의 자속밀도 값을 각각 나타낸다.

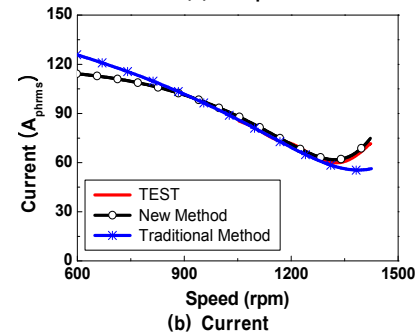
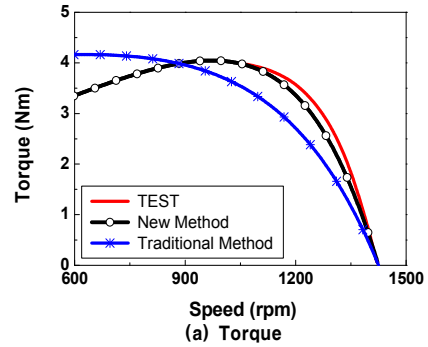
그림 4에 나타낸 것과 같이 여자 전류에 따른 여자리액턴스 변화는 매우 크므로 유도전동기에서 가장 중요한 회로정수인 여자리액턴스의 변화를 고려하는 것은 필수적이다.

### 2.4 특성해석 및 결과분석

그림 5는 대상전동기의 실제 제작된 모습을 나타내고 부하 실험 당시 실험 장비를 나타낸 것이다. 본 논문에서 제시하는 방법의 신뢰성을 확인하기 위하여 실험결과와 비교하였다. 그림 6은 실험결과와 해석 결과를 비교한 것으로 토크와 입력 전류값을 나타내었고 표 2는 정격 속도에서의 전동기 특성결과를 비교하였다. 기존 방법으로 산정한 해석치의 경우 토크 오차가 24.17%, 전류 오차가 4.43%로 실험치와의 오차가 크나 새로운 방법을 이용한 경우 실험치와의 오차가 토크는 6.11%, 전류는 2.17%로 감소함을 확인하였다. 기존 방법의 경우 여자리액턴스 변화를 고려하지 못하기 때문에 MDPS용 전동기와 같이 자속밀도가 높은 전동기의 경우 기존 방법으로 성능 예측은 어렵다고 판단된다. 따라서, 각 슬롯별로 유도전동기에 큰 영향을 미치는 여자리액턴스를 재 산정하는 경우 그 순간순간의 철심의 포화 및 전류에 따른 여자리액턴스 변화를 고려할 수 있기 때문에 더 정확한 전동기의 성능을 확인 할 수 있다.



〈그림 5〉 대상전동기 및 실험 장비



〈그림 6〉 실험 결과 및 해석결과 비교

〈표 2〉 정격 속도에서의 전동기 특성 비교

세부 항목	단위	값		
		기존 방법	새로운 방법	실험 결과
속도	[rpm]	1200		
입력 전압	[V <sub>DC</sub> ]	12		
토크	[Nm]	2.73	3.38	3.60
입력 전류	[Arms]	69.55	71.19	72.77

## 3. 결 론

본 논문에서는 유한요소 해석법과 집중정수법의 결합을 통하여 유도전동기의 회로정수를 산정하였고, 신뢰성 높은 유도전동기의 특성 해석을 진행하였다. 실험 결과 및 해석 결과를 비교하면서 MDPS용 전동기와 같이 포화가 심한 자동차용 전동기의 경우 여자전류에 따른 여자리액턴스 변화를 고려하지 않는 경우 오차가 크게 발생함을 확인 할 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 제안한 방법이 실험치 대비 기존 방법 보다 오차가 많이 줄어들음을 확인함으로써 제안된 방법의 신뢰성을 검증하였다. 향후 고조파에 대한 연구를 더 진행한다면 신뢰성 높은 등가회로 해석이 가능할 것으로 판단된다.

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

## 〈참 고 문 헌〉

- [1] M. Naidu, R. Henry, and N. Boules, “A 3.4kW, 42V, High Efficiency Automotive Power Generation System”, in Proc. SAE-FTT 2000 Conf., Aug. 20, 2000
- [2] 정재우, 권순오, 홍정표 “극 수와 슬롯 수 조합에 따른 HEV용 IPMSM의 특성 비교 및 분석,” 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1017-1018, 2007
- [3] S. S. Williamson, A. Emadi, K. Rajashekara, “Comprehensive Efficiency Modeling of Electric Traction Motor Drives for Hybrid Electric Vehicle Propulsion Applications”, *IEEE Trans. Magn.* vol. 56, no 4, pp. 1561-1572, July 2007
- [4] 박민호, “유도기기,” 동명사, 1996
- [5] 하경호, 김영관, 홍정표 “3상 능형 유도전동기의 엔드링을 고려한 전동기 특성해석,” 대한전기학회 하계학술대회, pp. 155-158, 1998