

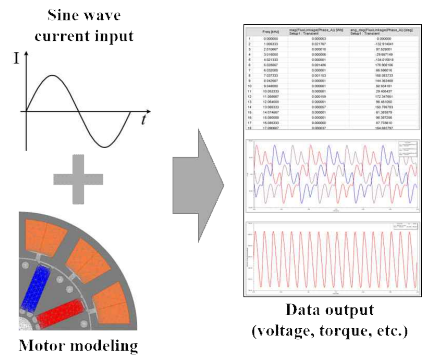
가전제품용 Spoke Type 전동기의 정적해석 기반 토크 제어 알고리즘 연구

오승택*, 원준희*, 임종석*, 엄현종*, 김솔**, 조수연***, 이주*
 한양대학교 전기공학과*, 유한대학교 전기공학과**, 자동차부품연구원***

Study on Static Analysis Based Torque Control Algorithm for Spoke Type Motors for Home Appliances

Seung-Taek Oh*, Jun Hui Won*, Jongsuk Lim*, Eom hyun jong*, Sol Kim**, Su-Yeon Cho***, Ju Lee*
 Hyaung University*, Yuhan University**, Korea Automotive Technology Institute***

Abstract - 가전제품용 전동기의 경우 높은 효율특성 및 어플리케이션에 따른 고속운전등을 요구한다. 이를 위해 전동기의 최적설계 및 제어시스템의 높은 신뢰성이 고려되어야 한다. 기존에는 유한요소법(FEM : Finite Element Method)을 이용하여 설계를 하였지만 공간고조파 및 전동기의 비선형성 요소를 고려한 제어 시스템 해석을 할 수 없다. 이를 위해 유한요소해석과 제어 시스템의 해석을 동시에 진행하는 연동해석법이 있지만 해석에 많은 시간이 소요된다. 본 논문에서는 정적해석을 기반으로 생성한 테이블을 통해 제어 시스템과의 연동해석 및 토크제어를 위한 자속 테이블 방법을 제안한다. 제안된 방법은 빠른 해석시간과 제어알고리즘의 최적화를 진행할 수 있다.



〈그림 1〉 유한요소해석법

1. 서 론

세계적으로 고효율 정책을 시행함으로써 가전제품의 시스템 효율 중 높은 비중을 차지하는 전동기의 고효율 및 고신뢰성을 요구하고 있다. Spoke Type 전동기의 경우 자속을 집중시킬 수 있는 회전자 형상을 통해 토크 및 출력밀도를 향상시킬 수 있으며 이는 가격 변동이 심하고 값비싼 희토류 영구자석의 비중을 줄일 수 있다.[1]

가전제품용 전동기의 경우 반복적인 해석과 설계가 필요하고, 유한요소법을 이용한 수치 해석을 주로 이용한다. 유한요소 해석은 정현파 전류를 통해 부하해석을 할 수 있지만 캐리어주파수 및 인버터와 같은 전력반도체의 특성과 제어알고리즘을 반영하지 못하는 단점이 있다.

인버터 및 제어알고리즘을 반영한 해석을 위해 제어기 및 전력반도체 회로를 결합하여 전동기의 유한요소해석과 온라인방식으로 진행되는 연동해석이 연구되고 있다. 하지만 한번 해석을 진행하는데 많게는 수일 이상 걸린다는 단점을 가지고 있다. 때문에 제어 알고리즘 및 파라미터의 최적화를 위한 반복 해석에 많은 자원을 소모한다.

본 논문에서는 가전용 Spoke Type 전동기의 정적해석을 이용한 연동해석 방법에 대한 연구를 수행하였다. 또한 정적해석으로 추출한 테이블을 활용하여 토크 제어 알고리즘에 이용하였다. 제안된 방법은 공간고조파 및 캐리어주파수를 해석에 반영할 수 있고, 기존 연동해석 대비 해석시간을 단축시킬 수 있다.

2. 본 론

2.1 기존 해석의 한계

전동기의 설계 및 해석을 위해서는 비선형성을 고려할 수 있는 유한요소해석법이 주로 사용되고, 그림 1과 같이 진행된다. 전동기를 모델링하고 정현파 전류를 최소 1주기 이상 인가하여 해석을 진행한다. 출력되는 데이터는 전압, 토크, 효율, 출력 등이며 해석 방법에 따라 다양한 데이터를 출력할 수 있다.

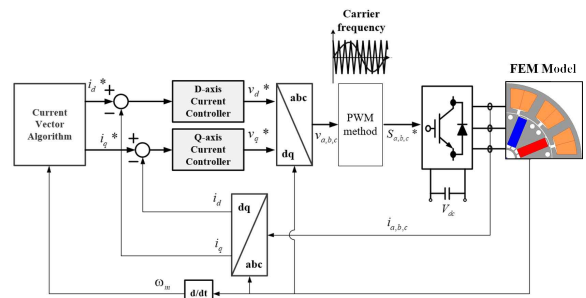
우선 전동기의 모델링을 위해서는 식(1)과 같은 전압방정식을 주로 사용한다. v_d, v_q 는 d, q 축 전압, R_a 는 전기자 저항, L_d, L_q 는 d, q 축 인덕턴스, i_d, i_q 는 d, q 축 전류, ω 는 각속도, λ_a 는 쇠교 자속을 나타낸다.[2]

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

하지만 인가되는 전류가 이상적인 파형이므로 실제 인버터 및 캐리어주파수 등으로 인해 생기는 노이즈 및 과도상태를 고려할 수 없다.

또한 dq 전압방정식의 경우 좌표변환 과정에서 기본파 성분만 고려가 되기 때문에 전동기의 공간고조파 같은 기구적 특성에 대한 성분을 고려할 수 없다.

이를 보완하기 위해 나온 방법이 그림 2와 같은 유한요소해석을 진행한 전동기 데이터와 제어기 및 인버터의 온라인 해석을 진행하는 연동해석(Co-Simulation) 방법이다.



〈그림 2〉 기존 연동해석 모델

이 방법은 제어알고리즘 및 캐리어 주파수 및 노이즈로 인해 이상적이지 않은 정현파 전류를 인가하고, 구동 환경 및 제어기의 특성을 고려하는 해석이 가능해진다. 하지만 동시에 두가지 해석을 진행하는 방식이므로 한번 해석에 많은 시간이 소요된다.

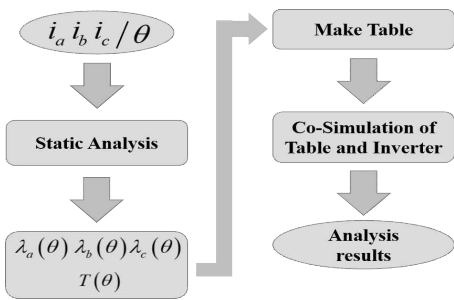
2.2 정적해석을 이용한 연동 해석법

내용을 입력하세요. 정적해석 방식은 dq 전압방정식이 아닌

식(2)와 같은 abc 전압방정식을 사용한다. v_a, v_b, v_c 는 a, b, c 3상 전압, i_a, i_b, i_c 는 a, b, c 3상 전류, $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 는 a, b, c 3상 쇄교 자속, R_s 는 전기자 저항, p 는 d/dt 이다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p\lambda_a(\theta, i) \\ p\lambda_b(\theta, i) \\ p\lambda_c(\theta, i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

그림 3은 정적해석을 이용한 연동해석의 방법을 보여준다. 우선 회전자 위치를 전기각 0° 부터 60° 까지 일정 간격만큼 회전을 시키며 직류전류를 과도상태 전류까지 인가하여 해석을 진행한다. 이를 통해 자속과 토크 데이터를 추출할 수 있고, 60° 이후의 데이터와 전류 및 회전자 각격 사이의 데이터는 보간법을 활용하여 계산을 진행한다. 이를 테이블화하여 인버터 및 제어기 모델과 연동해석하는데 활용한다. 또한 추출한 자속 데이터를 활용하여 토크 제어 시 최소 전류를 찾아 효율 개선 제어를 진행하였다.[3]



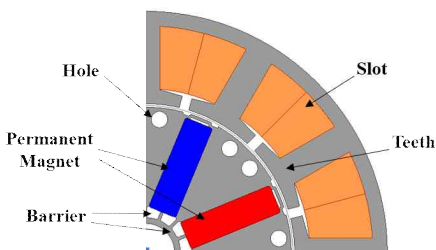
<그림 3> 정적해석을 이용한 해석 방법

2.3 시뮬레이션 및 실험

내용을 입력하세요. 그림 4와 표 1은 가전제품용 Spoke 전동기 모델과 사양을 나타낸다. 제작한 Spoke 전동기는 8극 12슬롯이며, 정격속도에서 토크는 1.12Nm, 최고속도에서 토크는 0.258Nm이다.

<표 1> Spoke 전동기 사양

Parameters	Specification	Unit
Number of poles/Slot	6 / 12	-
voltage	310	V _{DC}
Current limit	2.6	A _{perk}
Rated torque	1.12 / 0.258	Nm
Power	408	W
Base speed/Max speed	3480 / 15080	RPM



<그림 4> Spoke-Type 전동기 모델

시뮬레이션은 유한요소해석과 정적해석으로 진행했다. 정격속도(3480 rpm)에서 진행을 하였고 전류는 0에서 2.6A까지 순차적으로 진행하였다. 전류위상각은 최대 토크를 나타낸 11° 로 설정하였다. 추가적으로 해석 기법의 검증에 위해 실험 설비를 도입하여 실험을 진행하였다. 실험 사진은 그림 5와 같다.



<그림 5> Spoke 전동기 부하 시험

실험은 정적해석으로 추출한 자속 테이블을 활용하여 진행하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과를 표 2로 나타내었다.

<표 1> Spoke 전동기 사양

Item	Experiment	Co-Simulation	Static Analysis
Analysis Time	-	53(houes)	18(hours) + 34(sec)
Torque[Nm]@ (2.6A)	1.142	1.179	1.183
Error@ (Experiment)	-	3.2%	3.7%

3. 결 론

가전용 전동기의 경우 고효율, 저진동, 저소음 및 가격경쟁력 등을 고려해야 한다. 이를 위해 반복적인 실험 및 구동환경을 고려한 시뮬레이션을 통해 최적 설계 및 제어를 진행해야 한다. 본 논문에서 제안한 해석 기법은 기존 연동해석보다 해석 시간을 단축했으며, 데이터의 오차가 또한 3% 이내로 타당성을 검증하였다. 또한 추출한 자속 테이블을 이용한 토크 제어는 전동기의 최대 효율 제어를 가능하게 해줬다. 이를 이용하여 전동기 제작 전 설계 및 제어 시뮬레이션의 정확도를 높일 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201750) 이 성과는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2016R1A2A1A05005392)

[참고 문헌]

[1] 김영현, 이진경, 서준, 이준호, "Spoke Type 전동기 및 착자기 설계", *전기학회논문지*, 65, 2, pp. 286-297, 2016
 [2] S.Y. Cho, H. Ahn., H.C. Liu, H.-S. Hong, J. Lee, S.-C. Go, "Analysis of Inductance According to the Applied Current in Spoke-Type PMSM and Suggestion of Driving Mode", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, 2017
 [3] 오예준, 주경진, 이주, 이형우, "독립구동방식 무가선 트랩의 FEA를 통한 자속기반 토크제어 전략", *한국철도학회논문집*, 21, 1, pp. 41-46, 2018