

PWM 전류제어를 고려한 영구자석형 기기의 손실계산 프로세스

강경호, 조상준, 유석진
현대로템 기술연구소

A Process for Calculating Iron Loss in a Permanent Magnet Machine Considering the Effect of PWM(Pulse Width Modulation) Switching Current

Kyong-ho Kang, Sang-joon Cho, Suk-jin Yu
Hyundai Rotem R&D Center

Abstract - 본 논문에서는 영구자석형 기기의 RT(Real Time) 모델을 이용하여 실 제어상태의 PWM 스위칭 전류를 계산하고 철손과 회전자 영구자석의 손실을 현실적으로 해석하는 프로세스가 제시된다. 이러한 계산 프로세스는 전동기 구동 시스템의 실제 제어 환경과 전동기의 모델링을 고려하였다. 전동기 구동시스템의 모델링은 상용 소프트웨어인 MATLAB/Simulink 와 JMAG-RT 모델을 결합하여 구현되었으며, 전류 제어기의 PWM 스위칭 전류를 이용하여 영구자석 전동기의 철손이 계산되었다. 제안된 프로세스는 기 제작된 설계 모델을 대상으로 적용 타당성이 검증되었다.

1. 서 론

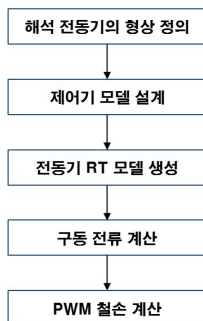
전동기 구동 시스템의 고효율화 및 고품질도 증가요구에 따라 인버터 구동 영구자석 전동기 구동시스템의 산업 적용이 증가하고 있다. 인버터 구동시스템은 PWM 전류제어를 통해 영구자석 전동기의 출력토크를 제어한다. PWM 전류제어는 인버터 입력전압의 고속 스위칭을 통해 구현되므로 전동기에 입력되는 전류에는 스위칭 주파수 성분 이상의 고주파 성분이 포함된다[1]. 이러한 PWM 스위칭 전류에 의해 전동기의 고정자 및 회전자 철손과 영구자석의 와전류 손실이 증가하게 된다[2].

실제 전동기 구동시스템의 스위칭 전류 특성을 설계된 전동기에 고려하기 위해서는 실시간 제어기 모델과 전동기의 RT 모델이 필요하다. 본 논문에서는 상용 소프트웨어인 J-SOL사의 JMAG-RT 모델을 이용하여 설계된 전동기의 운전점별 PWM 스위칭 전류를 계산하여 영구자석 전동기의 철손을 계산하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 MATLAB/Simulink 기반의 전류 제어기 모델과 JMAG에서 계산된 전동기 RT 모델을 결합하였다. 최종적으로 제안된 방법의 유용성을 검증하기 위해 기 설계된 해석 모델을 대상으로 적용 사례를 제시한다.

2. 본 론

2.1 모델 기반 영구자석 전동기 손실계산 프로세스

PWM 스위칭과 벡터제어를 고려한 영구자석 전동기의 손실을 구하기 위해서는 제어기의 제어 모델과 전동기의 모델을 결합하여 실시간 상전류를 계산하여야 한다. 계산된 상전류 데이터는 PWM 스위칭 노이즈 성분을 포함하고 있어 정밀한 철손의 계산이 가능하다. 또한 상용 소프트웨어인 JMAG의 RT 모델을 이용할 경우, 전류에 의한 포화 특성이나 쇄교자석의 고조파 성분을 고려할 수 있으므로 실제 구동전류 특성을 정밀하게 모사할 수 있다. 모델에서 모사된 구동 전류를 이용하여 전자계 해석을 수행하면 PWM 스위칭 전류 및 쇄교자석의 고조파를 동시에 고려한 철손의 계산이 가능해진다. 이러한 해석 순서를 그림 1과 같이 프로세스의 형태로 정리하였다.

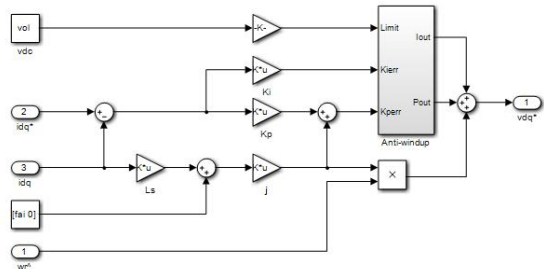


〈그림 1〉 PWM 전류제어를 고려한 철손계산 순서

2.1.1 전류 제어기 구성

철손 계산을 위해 영구자석 전동기의 d-q축 전류인 i_{d^*} , i_{q^*} 를 전류지령으로 하는 전류제어기를 설계하였다. 식 (1)과 같이 주파수 영역에서 정의한 영구자석 동기전동기의 회전자 좌표계 기준 전압방정식으로부터 인버터의 DC 입력전압 과 쇄교자속 및 속도에 의한 전향보상을 고려하여 PI 전류제어기를 설계한 결과가 그림 2와 같다.

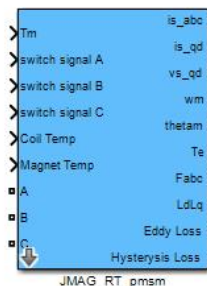
$$v_{dq}^r = (L_s s + R_s) i_{dq}^r + \omega_r \cdot \mathcal{L}_{dq}^r \quad (1)$$



〈그림 2〉 설계된 전류제어기

2.1.2 영구자석형 전동기 모델

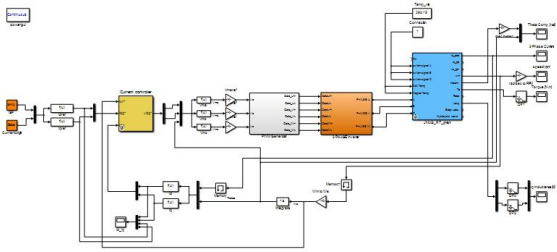
영구자석형 전동기의 등가 모델은 토크 및 전압방정식을 이용한 방정식 모델과 룩업 테이블을 고려한 파라미터 모델, 그리고 실제 공간조파등을 고려할 수 있는 RT 모델등으로 구분할 수 있다. 각각의 모델은 사용 목적에 따라 장단점이 존재하는데, 본 논문에서는 실시간 제어 알고리즘 개발용으로 산업계에서 적용이 증가하고 있는 JMAG의 RT 모델을 이용하여 전동기 모델을 구성하였다. 생성된 RT 모델은 MATLAB/Simulink 환경에서 직접 활용이 가능하므로 상위 제어기나 제어 알고리즘과의 결합이 간단하다. 생성된 RT모델의 예시는 그림 3과 같다.



〈그림 3〉 영구자석 전동기의 MATLAB/Simulink RT 모델

2.1.3 PWM 스위칭을 고려한 모터/인버터 모델링 통합

MATLAB/Simulink 기반에서 실제 제어를 통합하여 PWM 스위칭을 고려한 제어전류 파형을 계산하기 위해 인버터 모델과 전동기 RT 모델, 전류제어기 모델등을 하나로 통합하였다. 통합된 모델은 그림 4와 같이 구성되었으며, 전동기 구동 시스템의 주요 파라미터인 DC 링크 전압, 전류제어기 차단주파수, PWM 스위칭 주파수 및 전동기 d,q축 인덕턴스, 상저항등의 입력변수는 외부에서 수정이 가능한 M파일로 입력된다.



〈그림 4〉 MATLAB/Simulink 기반 모터/인버터 통합 모델

2.2 실제 적용 사례

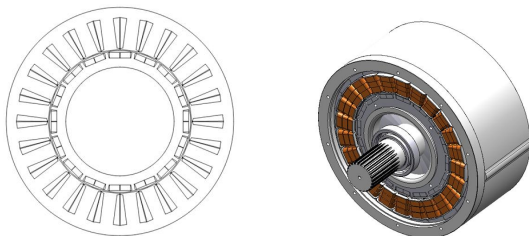
본 논문에서 제시한 철손 계산 프로세스의 타당성을 검토하기 위해 실제 제작된 전동기 모델을 사례로 하여 실제 상전류의 파형과 철손 계산 결과를 분석하였다.

2.2.1 해석 모델 주요 제한 및 형상

해석 대상 전동기는 20kW급 구동용 전동기로 주요 제한은 표 1과 같이 정리되며, 실제 제작된 형상은 그림 5와 같다.

〈표 1〉 해석 전동기 주요 제한

항 목	단 위	제 원	비 고
출력	kW	20	집중권방식
운전속도 범위	RPM	0 ~ 5,000	
극수/슬롯수	-	16극/24슬롯	
영구자석 재질	-	N39UH	
강판 재질	-	35PN230	



〈그림 5〉 해석 대상 전동기의 형상

2.2.2 해석 운전점 정의

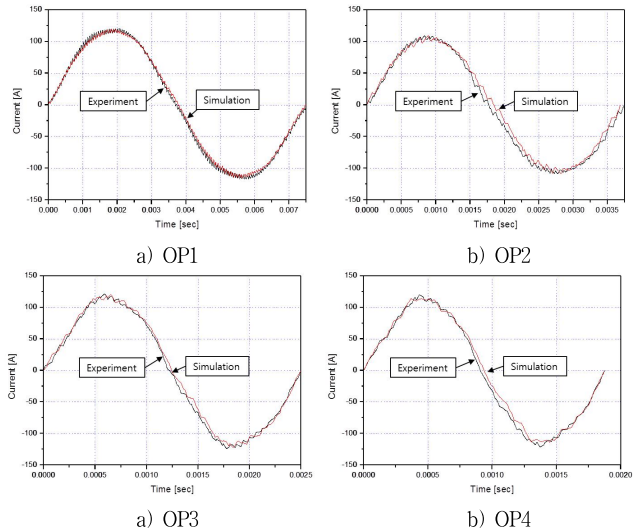
제작된 전동기는 운전 속도 범위가 넓고 기저속도 1,500RPM 이상에서는 약계자 영역으로 제어되는 특성을 가진다. 본 논문에서는 MTPA(Max. Torque Per Ampere)영역과 약계자 영역의 운전점을 구분 하였으며, 총 4개의 운전점에 대하여 표 2와 같이 정의하였다.

〈표 2〉 해석 전동기 운전점 정의

운전점 구분	전류[A]	전류위상각[°]	비 고
OP1	114.5	17.5	MTPA 영역
OP2	104.5	29.7	약계자 영역
OP3	116.6	59.4	
OP4	111.8	73.8	

2.2.3 PWM 스위칭 전류 계산 및 비교

해석 전동기의 생성된 RT모델과 전류제어기로부터 계산된 운전점 별 상전류 파형을 실제 다이노모 시험을 통해 얻은 파형과 비교하여 그림 6에 비교하였다. 비교된 결과를 통해 RT 모델에서 계산된 전류 파형은 실제 전류와 잘 일치하나, 데드 타임 및 IGBT 스위칭 소자의 비선형적 특성 차이등으로 인하여 스위칭 부분의 전류 형상이나 시간 지연 등의 일부 차이가 존재함을 알 수 있다.



〈그림 6〉 운전점별 PWM 상전류 파형 비교

2.2.4 철손 계산 결과 비교

제어기에서 인가된 실제 전류를 고려한 전동기의 철손은 고조파 왜곡 성분과 PWM 스위칭에 의한 고주파 손실이 추가되어 정현파 전류를 인가한 경우에 비해 철손이 증가하는 경향이 있다[1][2]. 그림 5에서 제시된 해석 전동기 형상을 대상으로 상전류 파형을 정현파 인가의 경우와 RT모델에서 계산된 전류, 실제 실험결과 측정된 전류의 경우로 구분하여 총 3가지 경우에서 철손을 계산하였다. 표 2의 운전점 별로 계산된 철손을 표 3과 같이 요약하였다. 계산된 철손은 고정자 철손과 회전자 철손을 합한 값으로 영구자석의 와전류 손실은 제외하였다. 실제 PWM 스위칭 전류를 고려할 경우, 정현파 인가의 경우에 비해 1.5에서 2배까지 증가하고 있다.

〈표 3〉 운전점 별 철손 계산 결과(영구자석 와류손 제외)

운전점 구분	정현파 전류기준	RT 모델 전류 기준	실측 전류 기준
OP1	67.3	155.2	174.2
OP2	145.2	235.2	241.6
OP3	152.2	259.3	288.3
OP4	164.3	258.6	273.6

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석형 전동기의 전류 제어 시 발생하는 고조파 및 PWM 스위칭에 의한 전류 리플의 철손 기여분을 설계단계에서 계산 가능한 방법을 제시하였다. 이를 구현하기 위해 전류제어기 및 전동기의 가상 모델을 적용하여 계산된 상전류 파형과 실험결과를 비교하였고, 이상적인 정현파 전류의 경우와 비교하여 운전점별 철손 계산 결과를 분석하였다. 이를 통해 PWM 스위칭 전류에 의한 철손 증가를 설계단계에서 고려하는 것이 중요하며, 가상모델에 의한 계산 프로세스가 설계 및 해석에 있어 유용한 도구임을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] Katsumi Yamazaki, "Loss Analysis of Permanent Magnet Motor Considering Carrier Harmonics of PWM Inverter Using Combination of 2-D and 3-D Finite Element Method", IEEE Trans. on Magnetics, vol.41, no.5, page 1980-1983, 2005
 [2] 안지현외, "시간 및 공간 고조파 특성을 고려한 매입형 영구자석 동기전동기의 전자기 특성해석", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 135-137, 2012