

유도성 기동 영구자석 전동기의 기동특성 해석 및 시험

황상연, 차중환, 한상열, 조동혁
주식회사 효성 중공업연구소

The Analysis and Test of Dynamic Characteristics for Line Starting Permanent Magnet Motor

Sang Yeon Hwang, Jong Hwan Cha, Sang Yul Han, and Dong Hyeok Cho
HYOSUNG Corporation Power&Industrial Systems R&D Center

Abstract - 유도성 기동 영구자석 전동기의 경우 고효율성 및 자기동성으로 인해 현재 산업계에서 많이 사용되고 있는 유도기를 대체할 가능성이 크다. 정상 상태에서는 영구자석 동기 전동기로 작동하며 기동시에는 유도바의 역할로 유도기로써 동기화에 이르게 된다. 이때, 적절한 설계가 이루어지지 않으면 기동 또는 동기화에 실패할 수 있으므로 기동시의 과도특성 해석은 매우 중요하다. 본 논문에서는 기계 방정식과 결합된 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 전동기의 기동 및 동기화 특성을 해석하고자 한다. 해석의 타당성을 검증하기 위하여 시험용 전동기를 제작하고 과도 상태 시험을 수행하여 해석결과와 비교한다.

1. 서론

최근 세계적으로 에너지와 환경에 대한 관심이 증대하고 있다. 산업용 전력의 기반을 차지하는 전동기의 고효율화가 급속도로 추진되고 있다. 특히, 미국에서 EP법이 시행된 이후 전동기 시장의 에너지 절약에 관한 요구가 급속히 증가하고 있다. 당사를 비롯한 국내외 주요 전동기 생산업체에서는 기존의 유도전동기를 고효율화하기 위하여 여러 가지 연구를 수행하였고, 제품화하여 판매하고 있다. 본 논문에서 소개하는 유도성 기동 영구자석형 전동기는 유도전동기와 영구자석 동기전동기의 혼합구조로 되어 있다. 회전자 내부에 영구자석이 매입되어 있고, 회전자 외주면을 따라 알루미늄 다이캐스팅된 슬롯이 배치되어 있어 상용 전원에서의 자기 시동이 가능하다. 또한 정상 운전에서는 영구자석 동기 전동기로서 운전하기 때문에 종래의 고효율 전동기를 초월하는 초고효율 운전을 할 수 있다. 이때, 적절한 설계가 이루어지지 않으면 기동 또는 동기화에 실패할 수 있다. 따라서 기동특성 해석은 매우 중요하다(1).

기존의 유도전동기나 영구자석 모터의 경우에는 d, q 변환에 의해 과도 특성을 해석하였으나, 유도성 기동 동기 전동기의 경우 회전자에 바와 영구자석을 동시에 배치하고 있으며 바의 경우에도 불균일하게 배치되어 있으므로 자기 등가회로법을 이용하여 과도 특성을 해석하는 것은 매우 어려운 일이다(2).

따라서, 본 연구에서는 상용 프로그램인 FLUX2D를 이용하여 기계계와 전기계를 결합한 시간차분해석을 수행함으로써 유도성 기동 영구자석 전동기의 과도 특성을 해석하였다. 또한 시제품을 제작하고 과도특성 시험 장치를 구성하여 시험을 시행하였다. 과도특성 해석과 시험을 비교 분석하였다.

2. 유한요소법을 이용한 과도 특성 해석

유도성 기동 동기 전동기의 경우 회전자에 바와 영구자석을 배치하고 있으므로 회전자와 고정자의 위치에 따라서 d, q축 인덕턴스가 바뀌므로, 자기등가회로법을 이

용하여 기동 특성을 해석하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 전자장 해석프로그램으로 잘 알려진 상용프로그램 FLUX2D(Ver.7.3)를 이용하였다. 과도 상태 해석을 위해서는 시간차분 해석, 전압원 해석과 기계 방정식과의 연계 해석이 필요하다. 그림 1은 본 프로그램에서 사용한 회로를 나타낸다.

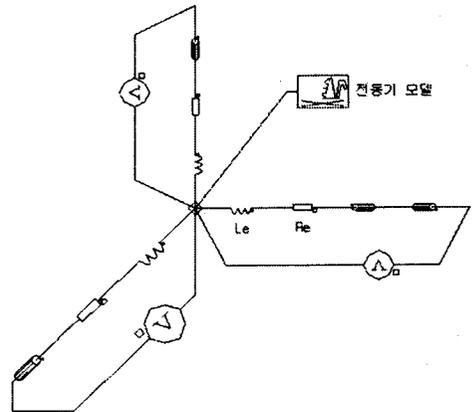


그림 1. 해석 프로그램에서 이용한 회로도

해석의 정확성을 위해서는 그림 1의 회로도에서 상당 엔드 누설 인덕턴스와 상당 엔드턴에 해당하는 저항을 구하여야 한다. 또한 기계 방정식과 연계를 위해서는 회전자 관성에 대한 정확한 계산이 필요하다.

3. 샘플 전동기 해석

본 논문에서 사용한 샘플 전동기는 그림 2와 같이 4극 전동기이며 3상 60Hz이다. 전동기의 개략적 제원과 주요 치수는 표 1과 같다. 고정자 슬롯수는 36개, 회전자 바의 개수는 24개이다. 회전자 바는 폐슬롯으로 알루미늄 다이캐스팅 구조이다. 고정자 외경은 190.5 mm, 내경은 110 mm, 공극은 0.35 mm이다.

표 1. 전동기 사양

전기적 사양		기계적 사양	
정격 출력	3.7 [kW]	고정자 외경	190.5 [mm]
정격 전류	11.7 [Arms]	고정자 내경	110 [mm]
선간 전압	220 [Vrms]	공극길이	0.35 [mm]
선간 저항	0.6 [Ω]	적층길이	90 [mm]
정격 속도	1800 [rpm]	고정자 슬롯수	36 [개]
		회전자 슬롯수	24 [개]

그림 2에서 알 수 있듯이 샘플 전동기는 고정자와 회전자 모두 4극형 대칭 구조이므로 반주기 조건을 사용하여 1/4 해석을 하였다. 엔드 누설 인덕턴스와 엔드 저항, 회전자 관성은 당사에서 기개발한 유도기 통합 설계 프로그램의 결과를 이용하였다.

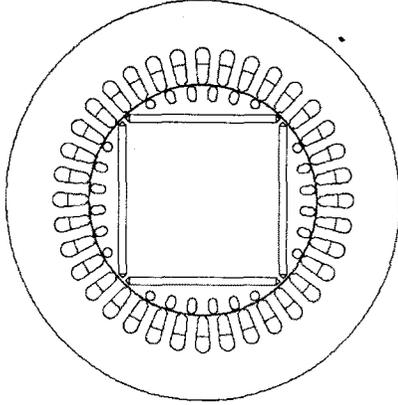


그림 2. 샘플 전동기의 단면도

그림 3은 기동시의 자속 흐름을 나타낸 것이다. 해석 시 예상한 바와 같이 기동시에는 회전자 바가 자속의 변화를 대부분 막고 있는 모습을 볼 수 있다.

그림 4는 정상시의 자속 흐름을 나타낸 것이다.

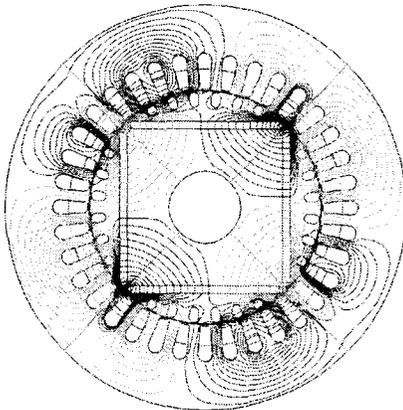


그림 3. 기동시의 flux 형태

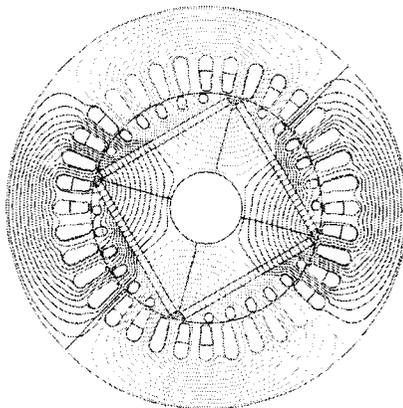


그림 4. 정상시의 flux 형태

그림 4에서 알 수 있듯이 정상시에는 동기 전동기로 동작하므로 자속의 흐름에 유도 바가 공기와 같은 비자성 물체와 같은 역할을 하며 유도 전류가 생기지 않음을 알 수 있다.

4. 샘플전동기의 과도 특성 시험

유도성 기동 영구자석 전동기를 기동했을 때 정상 속도까지는 부하에 따라 차이가 있으나 1초 이내의 비교적 짧은 시간 내에 동기화가 된다. 그러나 기존의 토크 및 속도측정을 위한 장비로 사용되는 다이내모미터는 대부분 토크나 속도에 대한 시간 분해능이 과도 상태를 측정하기에는 부족하다.

따라서 본 성능시험에서는 10,000펄스 고분해능 엔코더 및 Data Acquisition System을 이용하여 과도 특성 속도 및 토크 특성을 측정하였다.

샘플 전동기는 엔코더, 토크 트랜스듀서 및 부하장치와 커플링 되어 있으며 전체 시스템은 그림 5와 같다.

엔코더와 토크 트랜스듀서의 신호는 DAQ 보드를 통하여 Computer로 입력된다. 즉, 기동시의 토크 트랜스듀서의 출력 전압과 엔코더의 출력 펄스를 얻게 된다.

엔코더 출력펄스를 일정 시간동안 계수하여 속도를 측정하였고 이의 미분값을 이용하여 과도 토크값을 구하였다. 또한 토크 트랜스듀서의 출력전압을 이용하여 토크값을 환산하여 구했다. 부하시험에서는 DC모터와 컨트롤러를 이용하여 부하값을 조절하였다.

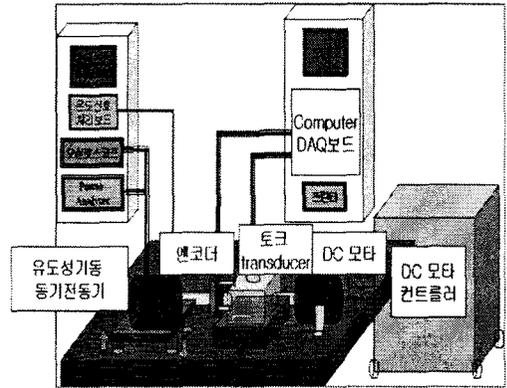


그림 5. 샘플 전동기 시험장치 시스템 구성도

전동기의 성능시험은 정상상태 특성시험과 과도상태 특성시험의 두 가지로 구분하여 시행하였으나 본 논문에서는 과도특성 시험에 관해서만 논하기로 한다. 전동기의 과도상태 특성을 해석 결과와 비교하기 위하여 무부하 시험을 하였으며 부하 상태에서는 다이내모미터의 보호를 위하여 인버터를 조작하여 Slow starting을 하였으므로 과도 특성의 결과는 의미가 없다. 과도상태 측정 시험은 전동기를 일반 3상 220V 전원과 연결하여 적입 기동을 하였으며 반복시험을 함으로써 데이터의 신뢰도를 높였다. 테스트는 10회 이상 반복하였는데, 거의 일치되는 파형이 관측되었다.

5. 샘플전동기의 해석과 시험 결과 비교

전동기의 과도상태 해석의 정확성을 알아보기 위하여 무부하 해석과 무부하 시험 결과를 비교하였다. 본 개발품의 정상속도는 1,800rpm이며 속도와 토크 파형은 전동기가 기동한 후 0.3 초까지의 결과를 비교하였다.

그림 6은 과도시의 속도 파형을 나타낸 것이다. 전체적으로 속도의 증가나 파형의 모습이 유사하나 0.02초 근

방에서의 속도가 해석과 시험에서 차이가 나고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 로터의 초기위치에 가장 큰 관계가 있을 것으로 사료된다. 그림 7은 과도시의 토크 파형을 나타낸 것이다. 그림 6과 같이 0.02초 근방에서의 토크의 평균 크기가 시험값이 해석값에 비해서 크게 나타남을 볼 수 있으며 전체적인 추세는 비슷함을 확인할 수 있다.

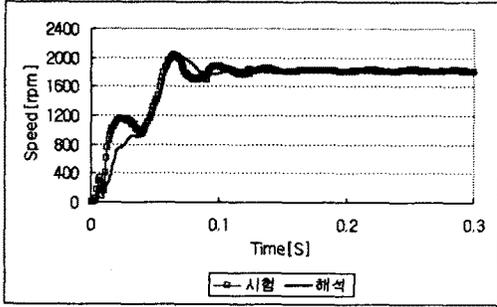


그림 6. 기동시의 속도파형

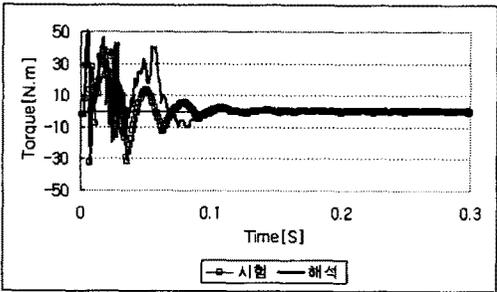


그림 7. 기동시의 토크파형

그림 8은 기동시 전류값을 오실로스코프로 측정 한 결과이다. 오실로스코프의 시간 간격은 0.2초이며 1[V]가 10[A]를 나타낸다. 기동전류는 100 Arms, 정상전류는 7 Arms였다. 그림 9는 기동시 전류값의 해석을 나타내었다. 전류파형의 경우에는 기동시의 최대 전류값은 실험값(140[Apeak])이 해석값(160[Apeak])에 비해서 작은값이 나왔으며 정상상태의 전류는 7[Arms]로 해석과 실험 결과가 거의 일치하였다. 기동시 최대 전류값은 전동기 입력단까지와의 거리에 의한 임피던스 때문에 실험값이 해석값에 비해서 작은 값으로 나온 것으로 추정하고 있으나 이에 대한 추가 연구가 요망된다.

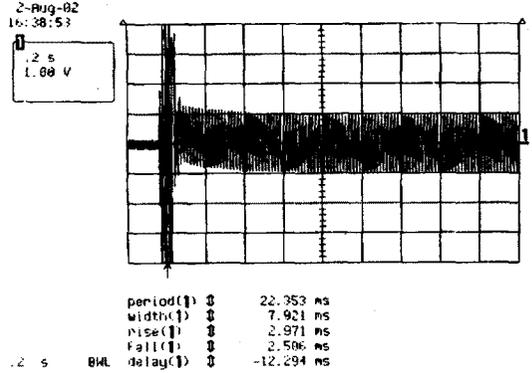


그림 8. 기동시의 전류파형(시험값)

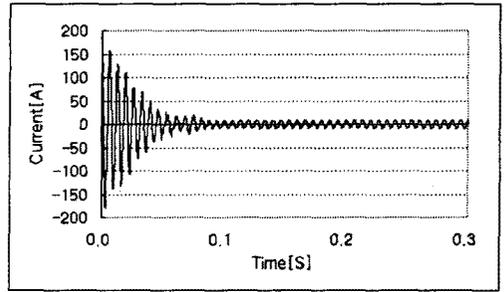


그림 9. 기동시의 전류파형(해석값)

6. 결 론

유도성기동 영구자석 전동기는 설계시에 정상 상태에서의 효율뿐만 아니라 기동 및 동기 인입 여부가 중요하다. 본 논문에서는 5마력급 전동기를 기계 방정식과 결합된 유한요소 해석을 통하여 기동시의 과도상태 해석을 시행하였으며, 해석의 신뢰성을 검증하기 위하여 시제품을 제작하고 과도특성 시험 장치를 구성하였다. 과도특성 시험을 통하여 전동기의 속도 특성, 토크 특성, 전류 특성을 실측하였으며, 이를 해석값과 비교함으로써 해석의 타당성을 확인할 수 있었다.

[논문 후기]

본 논문은 에너지 관리공단에서 지원하는 "3.7 kW급 유도성 기동 영구자석 매입형 동기전동기 개발" 과제의 일부로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- (1) 조동혁, 김도완, 한문규, 오시덕, "유도기동성 영구자석 전동기의 기동 특성 해석", 대한전기학회 추계, 2001
- (2) 김도완, 조동혁, 황상연, "Design of High Efficient Line-Start Permanent Magnet Motor with Magnet Width Increased and Rotor Slots Asymmetrical", IEEE Conference, 2002.6