

철도차량용 매입형 영구자석 동기전동기의 정적해석 기반 연동 해석 방법 연구

Static Analysis-Based Co-Simulation Method of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Vehicle

오승택 · 오예준 · 조수영 · 배재남 · 이 주*

Seung-Taek Oh · Ye Jun Oh · Sooyoung Cho · Jae-Nam Bae · Ju Lee

Abstract As efficiency and high performance are required of traction motors for railway trains, interest in interior permanent magnet synchronous motors is increasing. In addition, for stability and accuracy of the system, simulation identical to the actual driving environment is required. Basically, electric devices are designed using the finite element method, but these devices do not consider the system in which the motor is driven, such as the spatial harmonics and control algorithms. In order to compensate for this problem, co-simulation, which involves finite element analysis and, simultaneously, control simulation have been studied; the analysis, however, takes a long time. In this paper, we proposed an offline analysis method based on static analysis. The proposed method can consider the spatial harmonics, confirm transient response characteristics with fast analysis time, and proceed with controller optimization. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified by fabricating a traction motor for railway vehicles.

Keywords : Co-simulation, Interior permanent magnet synchronous motor, Railways, Static analysis, Transient response

초 록 철도용 견인전동기의 고효율, 고성능이 요구되면서 매입형 영구자석 동기전동기에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한 시스템의 안정성과 정확성을 위해 실제 구동 환경과 동일한 시뮬레이션이 필수로 요구되고 있다. 기본적으로 전기기기는 유한요소법을 이용하여 설계되지만, 공간고조파 및 제어 알고리즘 등 전동기가 구동되는 시스템을 고려하지 못한다. 이를 보완하기 위해 유한요소해석과 제어 시뮬레이션을 동시에 수행하는 연동 해석에 대한 연구가 이루어졌지만 해석에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다. 본 논문에서는 정적해석기반 오프라인 방식의 연동 해석 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 공간고조파를 고려할 수 있으며 빠른 해석시간으로 과도응답 특성을 확인하고 제어기 최적화를 진행할 수 있다. 마지막으로 철도차량용 견인전동기를 제작하여 제안된 방법의 유효성을 검증하였다.

주요어 : 연동 해석, 매입형 영구자석 동기전동기, 철도차량, 정적해석, 과도응답

1. 서 론

철도용 견인전동기는 고효율, 고성능을 요구하게 되었고 안정성, 정속성, 승차감 향상, 에너지 절감 등 다양한 요구 사항이 생겨나고 있다. 이를 위해서 견인전동기의 종류도 유도전동기에서 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)로 개발이 이루어지고 있다. IPMSM의 경우 릴럭턴스 토크와 영구자석에서 발생하는 마그네틱 토크를 활용함으로써 높은 토크와 고효율의 특성을 가지며, 약자속 영역을 활용함으로써 인해 넓은 속도 특성을 가질 수 있다. 또한 영구자석을 회전자 내부에 배치하여 고속 회전에 의한 비산에 강한 특성을 가진다[1,2].

무가선 트램의 경우 가선이 아닌 배터리를 통해 전력을 공급받기 때문에 장거리 주행을 위해서는 전동기의 출력밀도 향상 및 효율 개선이 필수적으로 요구된다. Fig. 1(a)은 기존 환 권선을 활용한 전동기의 모델을 보여준다. 환 권선은 각 권선에 비하여 권선의 점적률이 낮아 출력밀도가 떨어지는 문제가 있다. 현재 철도차량용 견인전동기는 출력 밀도를 향상하기 위해 Fig. 1(b)과 같이 각 권선을 활용하여 권선의 점적률을 높이는 방식이 적용되고 있다. 하지만 각 권선을 사용할 경우 제작을 위해서 슬롯의 구조를 오픈 형태로 설계하여야 한다. 오픈 슬롯 구조는 반폐형 슬롯 구조보다 릴럭턴스 차이가 증가함으로써 공간고조파의

*Corresponding author. E-mail: julee@hanyang.ac.kr.

© 2018 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<https://doi.org/10.7782/JKSR.2018.21.10.976>

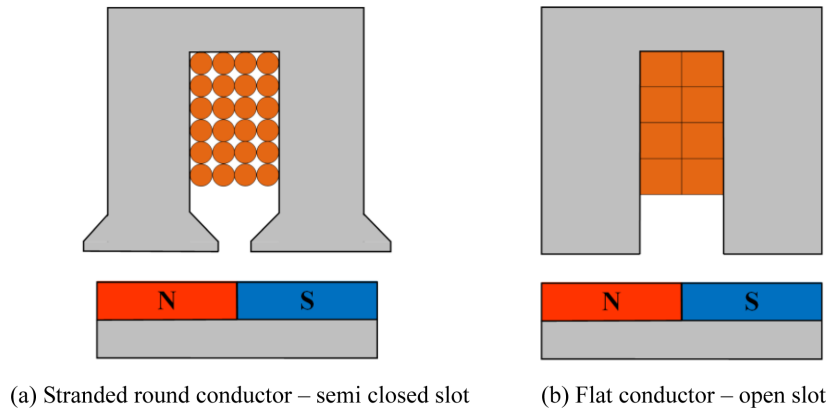


Fig. 1. Structure of semi closed slot and open slot.

영향이 증가한다. 이로 인하여 역기전력의 왜곡이 발생하게 된다. 이를 개선하기 위해 전동기를 다슬롯 구조로 설계하여 공간 고조파를 감소시키는 연구가 진행되었다[3,4].

철도용 견인전동기의 최적 설계 및 성능, 효율 향상에 관한 연구가 이루어지면서 해석을 위해 유한요소법을 이용한 수치 해석법을 주로 사용한다[5]. 유한요소 해석법은 정현파 전류를 이용하여 부하 해석이 가능하고, 상대적으로 짧은 해석시간과 높은 정확도를 가진다. 하지만 인버터 및 전동기의 제어 환경(캐리어 주파수 및 전력반도체의 특성) 등을 반영하지 못하는 단점이 있다.

시스템의 효율 개선에는 제어 기법과 제어기 모델링의 최적화를 통해 개선될 수 있다. 제어기 설계는 전동기 파라미터에 영향을 받는다. 제어기 성능은 과도응답 특성에 따라 달라지기 때문에 강한 제어 성능을 확보하기 위해서는 반복적인 해석을 통한 제어기의 최적화가 필요하다. 이를 위해 전동기의 구조, 인버터 그리고 제어기를 고려하는 연동 해석을 진행해야 한다.

기존 연동 해석은 전동기의 유한요소 해석과 제어 시뮬레이션을 동시에 온라인 방식으로 해석하는 방법이다. 이는 캐리어 주파수에 의한 영향을 고려할 수 있고 제어 알고리즘 적용을 통해 전동기의 실제 구동 환경을 고려한 해석을 가능하게 해준다[6]. 하지만 한번 해석을 진행하는데 많게는 수일이 소요되므로 반복을 통한 제어 알고리즘의 최적화 및 다양한 조건을 해석하기에는 많은 시간이 걸린다. 해석시간의 증가는 인적자원 및 개발비용과도 연결이 되기 때문에 시뮬레이션의 정확도는 유지하며 시간을 단축할 수 있는 효과적인 해석 방법이 요구된다.

본 논문에서는 정적해석 방식을 이용한 새로운 방식의 연동 해석 방법에 대한 연구를 수행하였다. 제안된 방법은 공간고조파 및 캐리어 주파수로 인한 고조파를 반영할 수 있었다. 또한 기존 연동해석 대비 빠른 해석시간을 가진다. 이로 인하여 제어기 최적화 등에 유리하다. 제안된 방법의 타당성 검증을 위해 시뮬레이션의 해석 시간과 결과를 비교하고 실험을 진행하였다.

2. 본 론

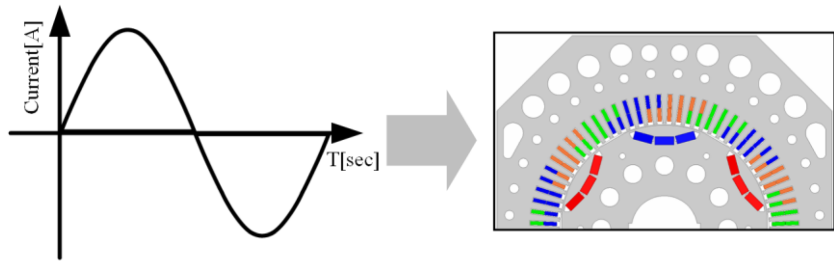
2.1 기존 해석의 한계

전동기를 해석하는 데에는 주로 Fig. 2(a)와 같은 유한요소 해석 방법이 사용된다. 일반적인 유한요소 해석은 전동기에 정현파 전류를 인가하여 전기각으로 최소 1주기 동안 해석을 한다. 때문에 전력변환 소자 및 제어 알고리즘으로 발생하는 과도 상태 특성을 알 수 없다. 전동기의 모델링을 하기 위해서는 식 (1)과 같은 dq 전압방정식을 주로 사용한다[7].

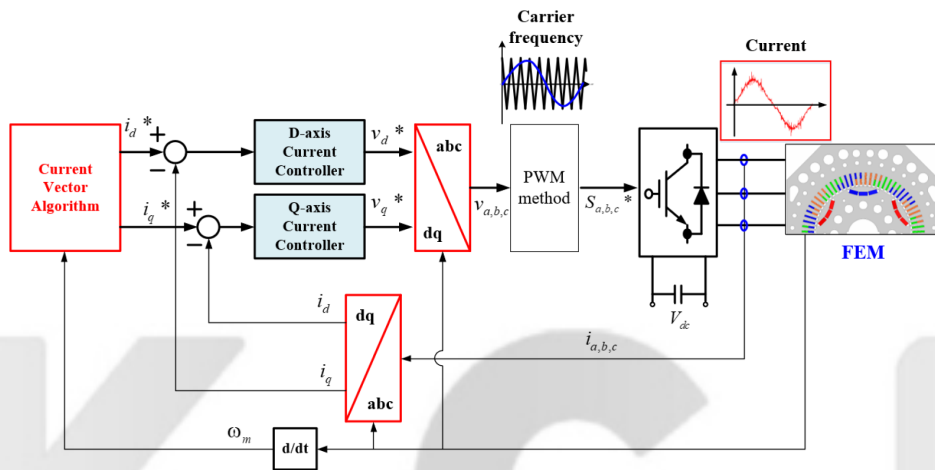
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

v_d , v_q 는 d 축, q 축 전압, R_a 는 전기자 저항, L_d , L_q 는 d 축, q 축 인덕턴스, i_d , i_q 는 d 축, q 축 전류, ω 는 각속도, λ_f 는 쇄교 자속을 나타낸다.

하지만 dq 전압방정식은 기본파만 고려 가능하기에 전동기의 기구적 구조에 의해 발생하는 공간고조파 등을 나타낼 수 없다. 앞 절에서 언급한 것처럼 철도용 견인전동기는 출력밀도 향상을 위해 각 권선을 사용하고 이로 인하여 오픈 슬롯 형태를 가진다.



(a) FEM



(b) Co-Simulation

Fig. 2. Method of FEM and co-simulation.

dq 전압방정식을 이용한 모델링은 공간고조파의 영향이 큰 오픈 슬롯형 전동기에 적합하지 않기에 abc 전압방정식 기반의 모델링이 필요하다.

Fig. 2(b)는 전동기 모델링 데이터와 제어를 온라인으로 연동하여 해석을 진행하는 연동 해석 방법이다[8]. Fig. 2(b)에서 $S_{a,b,c}$ 는 a, b, c 상 스위칭 상태를 나타낸다. 연동해석 방법은 해석을 진행할 때 FEM 해석 후 전력변환 회로 및 알고리즘을 적용하여 온라인 시뮬레이션을 수행한다. 이 방법은 제어기 특성과 캐리어 주파수가 고려된 결과를 나타낼 수 있다. 하지만 유한 요소 해석과 제어기 시뮬레이션을 동시에 수행해야 하므로 과도한 시간을 요구한다[9].

2.2 정적해석 기반 연동 해석법

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

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

abc 전압방정식의 자속 $\lambda(\theta, i)$ 은 회전자 위치인 θ 와 i 의 함수로 표현되기 때문에, 전동기의 기구적인 요소로 발생하는 현상 (공간고조파 등)을 고려할 수 있다.

정적해석 기반 연동해석 방법은 Fig. 3(a)처럼 전기각 60° 만큼의 해석만으로 Fig. 3(b)와 같은 결과를 얻을 수 있다. (b)의 노란색 부분은 (a)의 60° 구간을 보여준다. 이처럼 전기각 60° 의 해석 데이터를 활용하여 주기성을 이용해 나머지 부분의 계산을 진행한다.

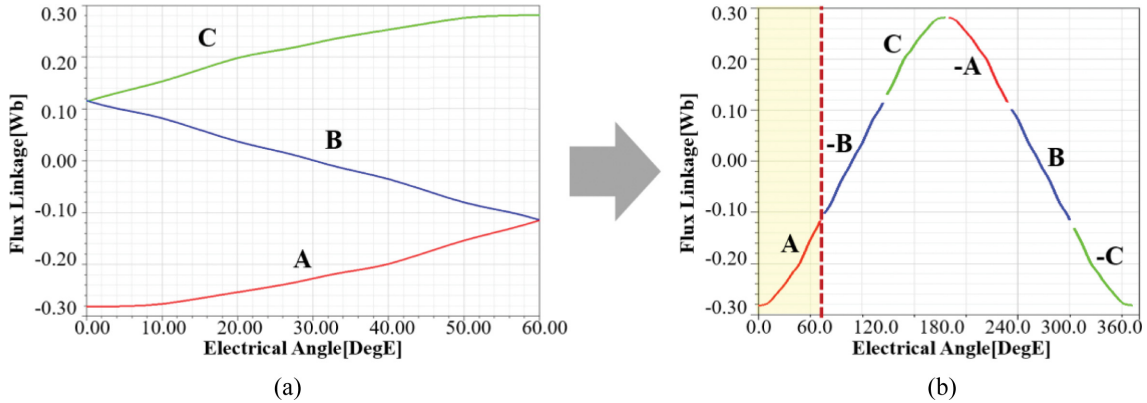


Fig. 3. Phase A data composed of 60 degree data.

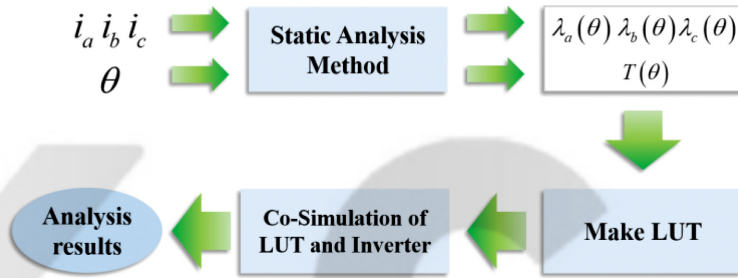


Fig. 4. Analysis method using static analysis.

Table 1. Total number of samples.

Parameters	i_a	i_b	i_c	θ
Sweeps value	-240 A	-240 A	-240 A	0°
	-220 A	-220 A	-220 A	1.67°
	3.33
	0	0	0	...
	56.66°
	220 A	220 A	220 A	58.33°
	240 A	240 A	240 A	60°
Number of sampling	25	25	25	37

Fig. 4는 정적해석의 상세 과정을 보여준다. 우선 회전자 위치 θ 를 10° 간격으로 0°~60°까지 회전시키며 직류 전류(i_a, i_b, i_c)를 -240A부터 240A까지 20A 간격으로 인가하여 abc 전압방정식을 기반으로 정적해석을 진행한다. 이를 통해 $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 그리고 T 를 계산하여 룩업테이블(LUT)로 저장한다. 3상 직류전류와 회전자 위치를 정리하면 Table 1과 같다. 전류는 피크 값이며 Table 1 하단은 각 파라미터의 샘플링 개수이다. 따라서 LUT의 총 샘플링 수는 $25^3 \times 37 = 578,125$ 회이다.

이때, 간격 사이의 데이터는 보간법을 이용하여 계산한다. 저장된 LUT을 통하여 정적해석 전동기 모델의 전반적인 특성을 알 수 있다. 저장된 LUT을 이용하여 인버터와 제어기 간의 오프라인 연동 해석을 진행하면 정적 전동기 특성이 반영된 토크, 속도, 역기전력이 나오게 된다. 이로 인하여 기존 연동 해석 대비 빠른 해석 시간과 공간고조파를 고려한 결과를 얻을 수 있게 된다. Fig. 5는 정적해석의 모델을 보여준다. 제어기와 인버터 부분은 기존 연동해석과 동일한 구성을 가진다. 하지만 전동기 모델 대신 앞에서 구한 LUT을 사용한다. 이로 인하여 오프라인 방식의 연동해석을 진행할 수 있다.

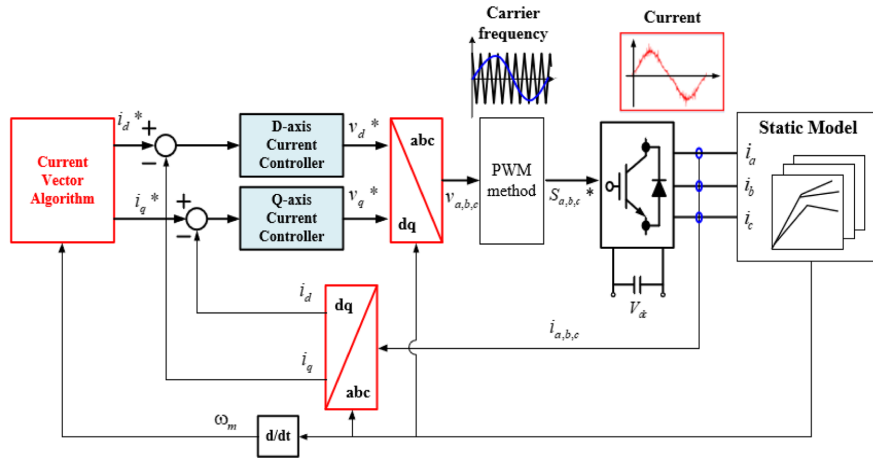


Fig. 5. Analysis method using static analysis.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 시뮬레이션

Fig. 6와 Table 2은 철도차량용 73kW급 IPMSM 모델과 해당 전동기의 사양을 보여준다. 제작한 IPMSM은 6극 72슬롯을 나타내고 있으며 정격 토크는 500Nm이고 한 량에 4개의 활을 각각의 전동기로 구동 한다.

시뮬레이션은 유한요소해석, 기존 연동 해석, 정적해석으로 진행했다. 시뮬레이션 조건은 전류는 240A_{perk}, 전류위상각은 40°, 속도는 정격인 1400rpm으로 설정하였다. Ansys사의 Maxwell 및 Simplorer를 활용하여 유한요소해석과 제어기의 연동 해석을 하였고 정적해석 방식을 활용하여 생성한 LUT과의 연동 해석 결과를 비교 분석하였다.

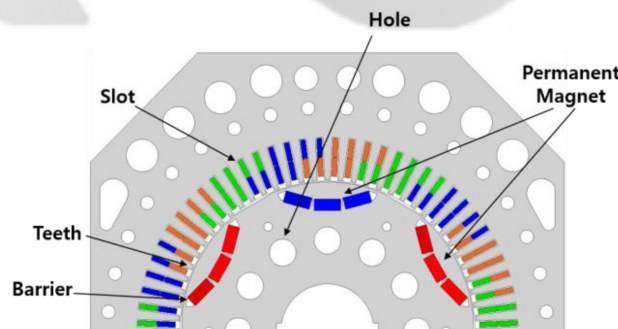


Fig. 6. 73kW motor model.

Table 2. Specifications of IPMSM.

Parameters	Specification	Unit
Number of poles/Slot	6/72	-
Battery nominal voltage	750	V _{DC}
Current limit	240	A _{perk}
Rated torque	500	Nm
Power	73	kW
Base speed/Max speed	1,400/4,449	RPM
Cooling method	Air-Cooling	-

Table 3는 유한요소해석, 기존 연동 해석, 정적해석의 데이터를 비교한 것이다. 해석을 진행한 장비의 사양은 CPU: Intel Xeon Es-2620 v4 @ 2.10GHz, RAM: 128GB이다. 시뮬레이션 해석 시 전기적으로 1주기 해석을 진행하는데 유한요소 해석법은 19분, 기존 연동 해석 방식은 72시간 이상 걸리는 것을 볼 수 있었다. 그러나 정적해석의 경우 2.2절의 Fig. 4와 같이 정적 해석 전동기 모델의 LUT를 생성하는데 24시간이 소요된다. 그 이후 주어진 조건에서 연동해석을 진행하는데 40~50초 사이의 결과가 나온 것을 볼 수 있다. 이를 통해 기존 연동해석 대비 시간이 크게 단축되는 것을 볼 수 있다. 토크의 경우 유한요소해석결과보다 기존 연동 해석과 정적해석 결과가 각각 2%, 1.4% 높게 나온 것을 볼 수 있다. 무부하에서 Back-EMF는 기본과 값을 나타냈다. 값의 오차는 2% 내외로 각 해석 결과가 근사하게 나옴을 볼 수 있었다.

Fig. 7은 전동기의 무부하 시 상 역기전력의 FFT 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과 기본과 이외에 고조파가 유한요소 해석과 연동해석, 정적해석에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 정적해석은 공간고조파를 고려하는 시뮬레이션을 알 수 있다. Fig. 8은 기존 연동 해석과 정적해석의 토크 결과를 보여주고 있다. 정상상태의 평균 토크는 1% 이내의 차이가 발생하였다. 이를 통해 기존 연동 해석과 정적해석의 결과가 유사함을 보여준다. Fig. 9은 반복적인 정적해석을 통해 제어를 최적화 하는 결과를 보여준다. 제어 이득 값의 차이에 따라 3가지 경우로 나누어 이득 값이 낮은 경우와 큰 경우 그리고 최적화된 경우를 보여준다.

Table 3. Simulation model comparison.

Item	FEM	Co-Simulation	Static analysis
Analysis time	19 (min)	72 (hours)	24(hours)+43 (sec)
B-EMF@(1,400rpm, No-load)	130.03	128.65	127.07
Torque [Nm]@(240A, 1,400rpm)	430.47	437.98	435.26

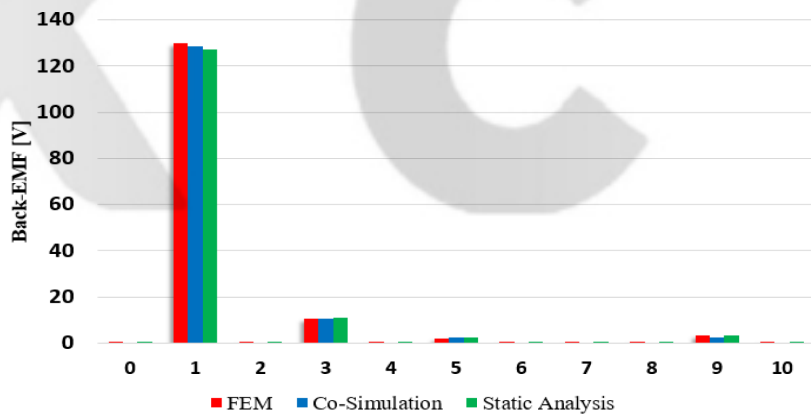


Fig. 7. Back-EMF(1400rpm, No-load).

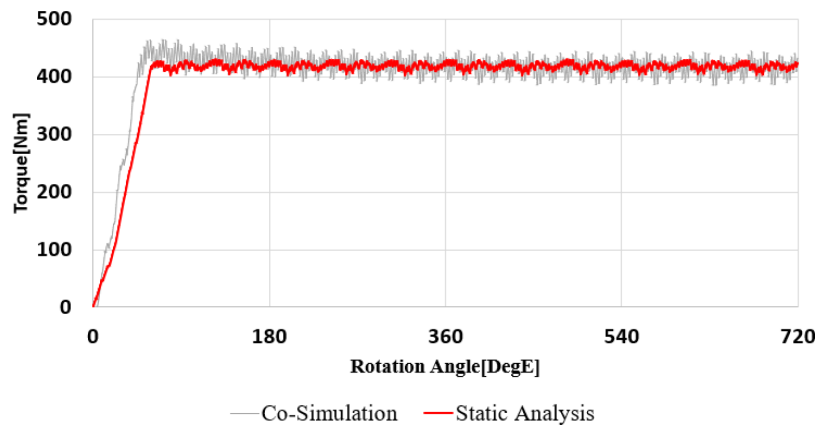


Fig. 8. Torque.

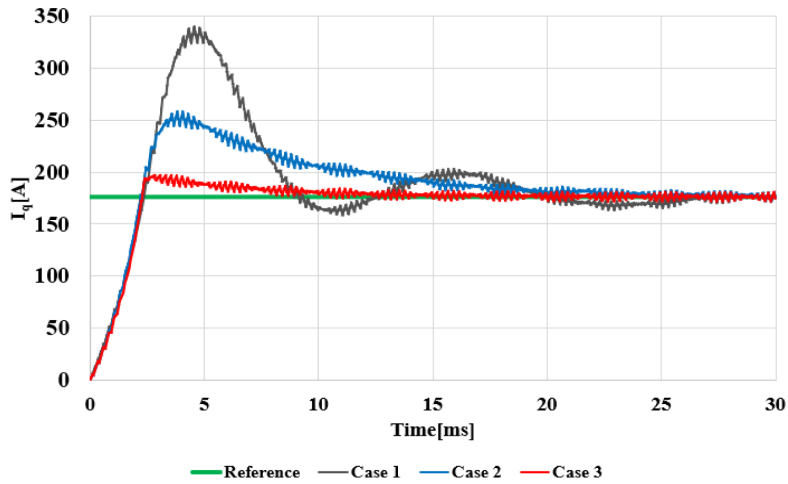


Fig. 9. I_q to control gain.

3.3 실험 결과

본 논문에서 제안하는 해석 기법에 대한 검증을 위해 실험 설비를 Fig. 10과 같이 구성하였다. 73kW급 IPMSM 철도용 견인 전동기 1대와 인버터로 구성을 하였다. 부하는 280kW급 유도전동기를 사용하였다.

실험은 전류위상각 β 을 $0^\circ \sim 90^\circ$ 로 바꾸고, 전류를 20A 단위로 0~240A까지 바꿔가며 진행하였다. Fig. 11은 실험 결과를 바탕으로 만든 토크 파형이다. 정적해석을 활용한 시뮬레이션은 최대 토크를 나타낸 전류위상각인 40° 를 포함하여 전류위상각을

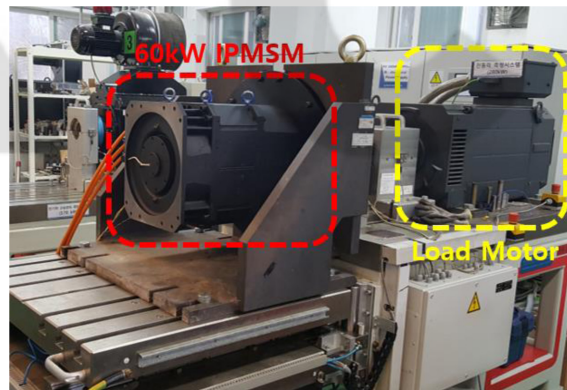


Fig. 10. Motor and Inverter setup.

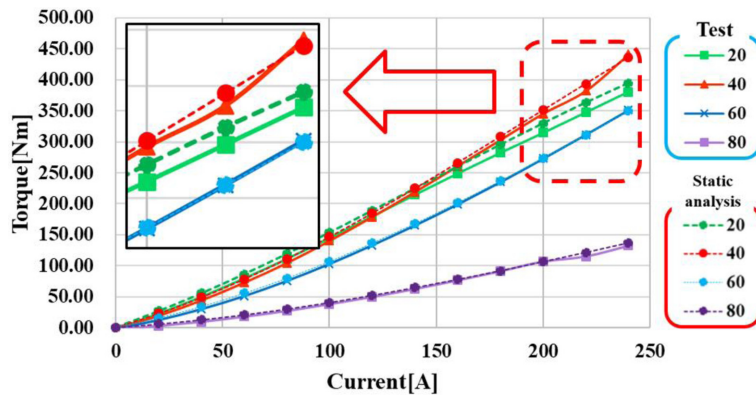


Fig. 11. Torque result(test & static analysis).

20°~80°, 전류는 20A 단위로 0~240A까지, 속도 1400rpm으로 진행을 하였다. 실험과 제안한 시뮬레이션의 토크 데이터를 통해 비교한 결과 2% 정도의 오차범위 내의 차이가 발생함을 볼 수 있었다.

3. 결 론

철도용 견인전동기의 경우 고전압 구동으로 인한 안전성, 신뢰성 그리고 승차감 등 다양한 조건을 고려해야 한다. 제일 정확한 방법은 실제 모델을 제작하여 테스트하는 것이지만 테스트를 위한 환경을 만들기 위해 큰 비용과 시간을 투자해야 한다. 따라서 주행 환경을 고려하며, 정확하고 시간을 단축할 수 있는 시뮬레이션을 이용해 전동기의 최적 설계부터 인버터 및 제어기의 검증을 수행할 필요가 있다.

본 논문에서 제안한 정적해석 기반의 연동 해석은 abc 전압방정식을 기반으로 모델링하였다. 또한 직류 전류를 인가하고, 결과의 주기성을 고려해 60° 해석을 진행하므로 기존 연동 해석보다 시간을 크게 단축할 수 있었다. 전류와 토크의 정확성은 기존 연동 해석 방법과 비교했을 때 2% 이내의 오차를 가졌다. 또한 실제 실험에서 나온 토크 결과와 비교했을 때 그 차이가 2% 이내로 나오는 것으로 타당성을 확인하였다. 이로 인해 전동기 구동 시 다양한 변수의 테스트 및 제어기 최적화를 진행할 수 있다. 정적해석은 LUT을 활용하여 해석을 진행하기 때문에 기존 2D 연동해석뿐만 아니라 3D 해석과 같은 분야에도 활용할 수 있다.

후 기

이 성과는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1A2A1A05005392). 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2017R1D1A1B03027962).

References

- [1] S.-G. Lee, J.-N. Bae, W.-H. Kim (2018) Study on Calculation Process of Current and Current Phase Angles Considering Control for Traction IPMSMs, *Journal of The Korean Society for Railway*, 21(2), pp.159-165.
- [2] K.H. Jin, S.J. Kim, D.H. Yi, S.H. Kwon, et al. (2010) Maximum torque operation of IPMSM drives for the next generation high speed railway system, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(5), pp. 493-499.
- [3] H.-C. Liu, H.-J. Lee, H.-S. Seol, S.Y. Cho, J. Lee, Y.J. Oh. (2018) Optimal Slot Design of IPMSM in Railway With Independently Rotating Wheelsets, *IEEE Transactions on Magnetics*.
- [4] Y.J. Oh, H.-C. Liu, S.Y. Cho, J.H. Won, H.W. Lee, J. Lee (2018) Design, Modeling, and Analysis of a Railway Traction Motor With Independently Rotating Wheelsets, *IEEE Transactions on Magnetics*.
- [5] T.M. Jahns, G.B. Kliman, T.W. Neumann (1986) Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA-22(4), pp. 738-747.
- [6] G. Scelba, G. De Donato, F. Giulii Capponi, A. Consoli, O. Honorati. (2010) A Co-Simulation Platform for Evaluation of Sensorless Control Techniques for IPMSMs, *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on, The XIX International Conference on Electrical Machines*, pp. 1-7.
- [7] S.Y. Cho, H. Ahn., H.C. Liu, H.-S. Hong, J. Lee, S.-C. Go (2017) Analysis of Inductance According to the Applied Current in Spoke-Type PMSM and Suggestion of Driving Mode, *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(6), pp. 1-4.
- [8] T.-C. Jeong, W.-H. Kim, M.-J. Kim, K.-D. Lee, J.-J. Lee, J.-H. Han, T.-H. Sung, H.-J. Kim, J. Lee. (2013) Current Harmonics Loss Analysis of 150-kW Traction Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Through Co-Analysis of d - q Axis Current Control and Finite Element Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(5), pp. 2343-2346.
- [9] M. Fitouri, Y. BenSalem, M.N. Abdelkrim. (2016) Analysis and co-simulation of permanent magnet synchronous motor with short-circuit fault by finite element method, *2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pp. 472-477.

Seung-Taek Oh: ost9107@naver.co.kr

PhD, Department of Electrical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-Gu, Seoul, 04763, Korea

Ye Jun Oh: oyejuni@naver.com

PhD, Department of Electrical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-Gu, Seoul, 04763, Korea

Sooyoung Cho: jsy0593@naver.com

PhD, Department of Electrical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-Gu, Seoul, 04763, Korea

Jae-Nam Bae: jaenam@dongyang.ac.kr

Professor, Department of Electrical Engineering, Dongyang Mirae University, Seoul, 08221, Korea

Ju Lee: julee@hanyang.ac.kr

Professor, Department of Electrical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-Gu, Seoul, 04763, Korea

K C I