

고정밀 권선형 레졸버의 변압부 및 레졸버 연동해석 연구

신영철¹, 김기찬^{*}
¹한밭대학교 전기공학과

A Study on Multi-Physics Analysis of High-Resolution Winding Type Resolver and Rotary Transformer

Young-Chul Shin¹, Ki-Chan Kim^{*}

¹Dept of Electrical Engineering, Hanbat National University

요약 본 논문에서는 고정밀 각도 센싱을 요구하는 응용분야에 이용되는 권선형 레졸버의 변압부와 레졸버 파트의 유한요소법 (Finite Element Method, FEM)을 이용한 연동해석을 통해 권선형 레졸버 시스템의 성능을 도출하는 과정을 연구하였다. 외부 인가 전원을 증폭시키는 회전형 변압기부와 증폭된 변압기 출력을 이용하는 레졸버의 회전자 입력부의 연동해석을 통하여 전자기적인 정밀도를 향상시킬 수 있는 권선형 레졸버의 연동해석 모델을 제시하고 출력 신호의 특성을 분석하였다. 회전형 변압기에서 승압된 전압이 레졸버 회전자 권선에 인가될 때 회전자 권선의 임피던스를 고려하여 레졸버 입력 전류를 계산하여야 한다. 따라서 레졸버 회전자 권선부 인터페이스 부분은 회로 모델로 구성하여 변압기의 유한요소 모델, 인터페이스 회로 모델, 레졸버 유한요소 모델을 한 번에 연성해석을 수행하였다. 고정밀 각도 도출을 위해 레졸버 고정자 권선은 32x 와 1x의 혼합 권선이 설치되어 있으며 서로간의 자기적인 간섭은 없다. 본 논문에서는 슬롯에 적절한 분포적인 권선법이 제시되어 정현적인 SIN, COS 파형과 이들간의 위상각 90°를 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

Abstract This paper describes a multi-physics analysis of a high resolution winding type resolver and rotary transformer using FEM (Finite Element Method). The rotary transformer boosts the input voltage to a high voltage which can be input into the rotor windings of the resolver. Through multi-physics models of the transformer and resolver, the characteristics of the output signals for the resolver system with high resolution can be derived. Moreover, the circuit model of the interface part between the transformer and resolver should be considered, because of the calculation of the input current to the resolver. The winding type resolver is composed of 32x and 1x stator windings for high resolution. Then, the output signals of the stator windings, which make sinusoidal SIN and COS waves with a 90° phase difference, are verified.

Keywords : Finite-Element Method, Multi-Physics, Transformer, Winding Type Resolver.

1. 서론

산업용 뿐만 아니라 자동차, 항공, 선박 및 국방 분야에 구동시스템이 급격히 발전함에 따라, 구동 시스템에 대한 정밀제어의 중요성이 점점 커지고 있다. 광학식 엡솔루트 엔코더가 점점 고정밀화 되고 있지만, 엔코더의 특성상 충격이나 온도에 취약하므로 구동시스템의 정밀

제어를 위한 각도 센서로서 고정밀 레졸버의 영역이 확대되고 있다 [1]. 권선형 레졸버는 릴럭턴스 방식의 VR(Variable reluctance) 레졸버에 비해 고정밀의 각도 산출, 즉 고분해성 및 정확도가 가능하며 엔코더에 비해 고온동작 및 고내구성으로 이용 가능하다 [2], [3].

본 논문에서 적용된 권선형 레졸버는 국방의 자주포용 포 각도 센서로 이용되는 센서로 고정밀의 각도 측정이

^{*}Corresponding Author : Ki-Chan Kim(Hanbat National Univ.)

Tel: +82-42-821-1090 email: kckim@hanbat.ac.kr

Received February 24, 2016

Revised (1st April 15, 2016, 2nd May 9, 2016)

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

요구되고 특히 충격과 진동에 대한 내구성을 가져야 한다.

일반적인 권선형 레졸버의 구조는 레졸버 내부에 회전형 변압기부를 가지고 외부 인가 고조파 전압신호를 증폭시키고 이 전압신호가 레졸버부의 회전자에 인가된다. 레졸버 고정자의 권선은 회전자에서 발생된 자속에 의해 유기전압의 형태로 각도를 측정하기 위한 신호 전압을 발생시킨다 [4]-[7]. 고정밀 권선형 레졸버는 레졸버의 회전자 및 고정자에 1x 및 32x의 2중 권선구조로 이들 출력신호 전압을 체배하여 고정밀을 유도한다. 본 논문에서는 고정밀 권선형 레졸버의 특성해석과 설계를 위해 변압기부와 레졸버부의 전자장 파드와 변압기와 레졸버의 임피던스 부분을 고려한 회로부의 연성해석을 수행하는 방법을 제안한다.

2. 권선형 레졸버 연동해석 프로세스

그림 1은 레졸버와 회전형 변압기가 일체화된 권선형 레졸버 시스템의 절단 모델이다. 또한 2차원 유한요소 해석시 필요한 회전형 변압기와 레졸버의 해석모델들을

나타내었다.

회전형 변압은 1kHz, 7Vrms의 정현적 입력전압을 승압하는 시스템으로 권선비가 1차측 192턴, 2차측 371턴으로 구성되어 있으며, 일반 변압기와 달리 공극 갭을 가지고 있다.

레졸버는 회전자 슬롯에 1X와 32X의 극성을 가지는 2개의 멀티 레이어 권선으로 감겨있으며, 고정자의 경우 1X, 32X 극성의 SIN, COS 출력 파형을 얻을 수 있는 4개의 멀티레이어 권선으로 감겨져 있다.

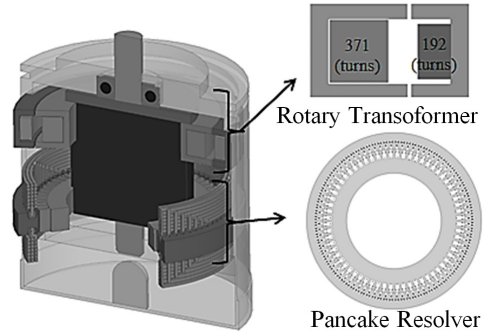


Fig. 1. 2D and 3D FEM design of winding type resolver and rotary transformer

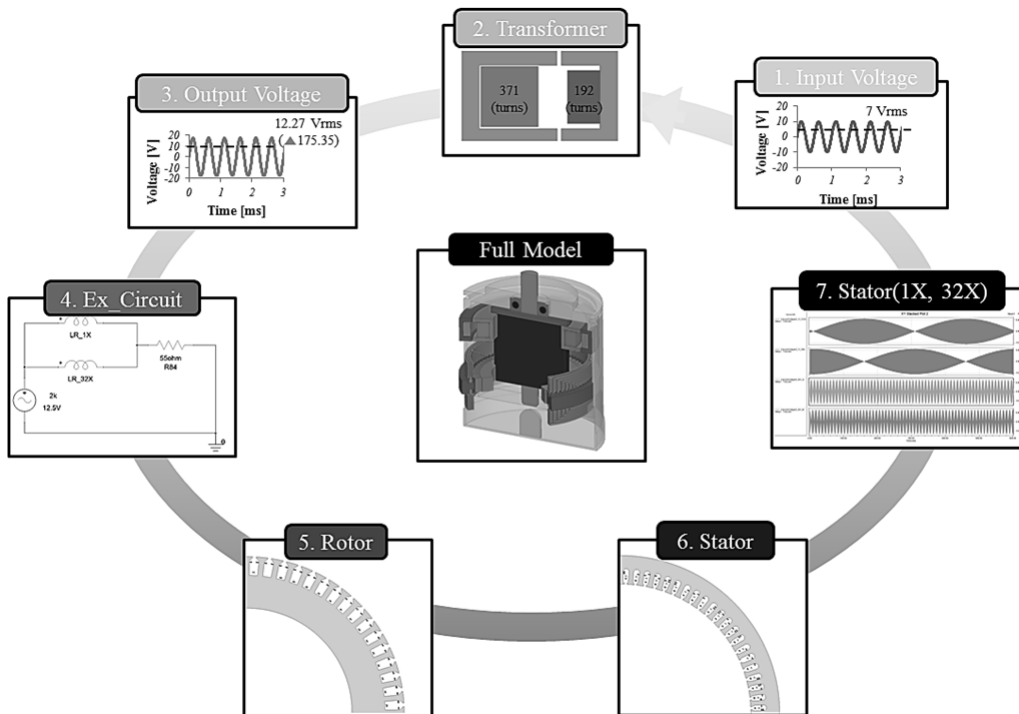


Fig. 2. The driving system of winding type resolver

그림 2는 권선형 레졸버 시스템의 연동해석 과정을 구체적으로 나타낸 것이다. 먼저 7Vrms 외부인가전압이 회전형 변압기의 1차측 권선에 입력되면 변압기의 권선비에 의해 승압되어 12.27Vrms의 승압 전압이 해석된다 (과정 1-3). 이 전압이 레졸버의 1X와 32X 회전자 권선에 입력되어야 하는데 회전자 권선에는 각각 임피던스가 존재하므로 전압강하가 발생하고 이를 고려하기 위해 과정 4와 같이 회로해석을 통해 레졸버 회전자 입력 전압을 결정한다. 과정 5와 과정 6은 각각 유한요소해석 모델로 내부에 1X와 32X 권선 패턴이 입력되어 있으며 회전자 권선에 입력된 전압을 통해 고정자의 SIN, COS 권선단의 출력 센서 전압을 얻을 수 있다 (과정 7). 이 때 레졸버의 운전 속도는 1rpm의 저속운전이다.

3. 권선형 레졸버 연동해석

그림 3은 권선형 레졸버의 슬롯내 권선을 확대한 것이다. 회전자와 고정자 슬롯에 각각 1X(2극)권선패턴과 32X(64극) 권선패턴으로 감긴다.

그림3의 전기회로는 레졸버 회전자의 권선 회로에 해당되며 저항은 1X와 32X의 병렬저항이며 인덕턴스는 각각의 인덕턴스를 병렬 연결한 것으로 변압기의 승압된 전압으로 레졸버 회전자의 입력전류를 계산한다.

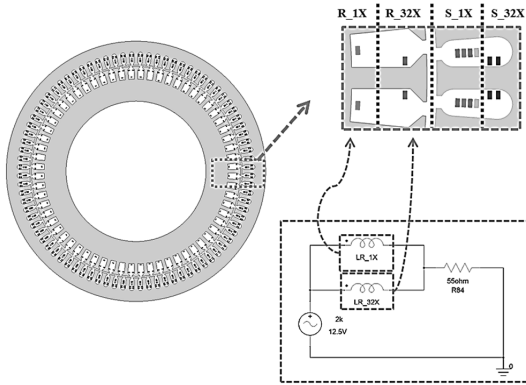


Fig. 3. The analysis of winding type resolver with rotary transformer by multi-physics.

그림 4(a)와 (b)는 회전자에 감긴 excitation 권선 1X와 32X에서 출력되는 공극에서의 각각의 기자력 파형이다. 그림 4(c)는 1X권선부와 32X권선의 공극에서의 기

자력 합을 나타내었다. 권선형 레졸버의 원리는 회전자 측 excitation 권선인 1X와 32X에서 자속이 나오면 고정자 1X와 32X 권선에 유도되는 기전력을 통해 위치검출을 한다. 회전자 1X의 기자력 파형은 시간에 따른 기자력의 변화율이 생기도록 고정자 1X권선패턴을 만들어 위치검출을 한다. 이러한 원리로, 회전자 32X의 기자력 파형은 고정자 1X의 유도기전력 변화에 영향을 주지 못한다. 그러므로 각각의 고정자 1X와 32X는 독립적으로 위치 검출을 할 수 있다.

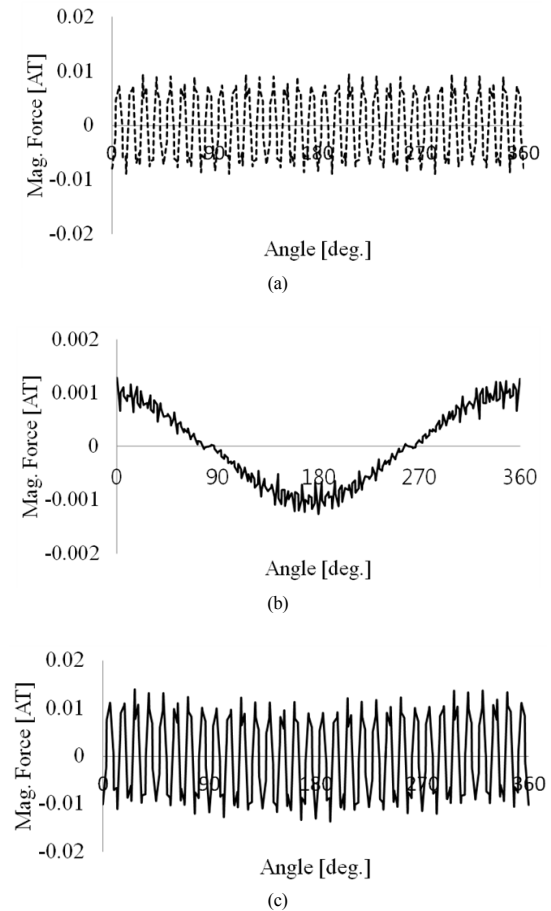


Fig. 4. Magneto-motive force of windings at 1rpm (a) Rotor winding of 32X (b) Rotor winding of 1X (c) Superposition of winding 1X and 32X

그림 5는 1rpm의 정격속도로 회전할 때 이러한 입력 전류에 의한 레졸버의 자속 선속과 자속 밀도 분포를 보여준다.

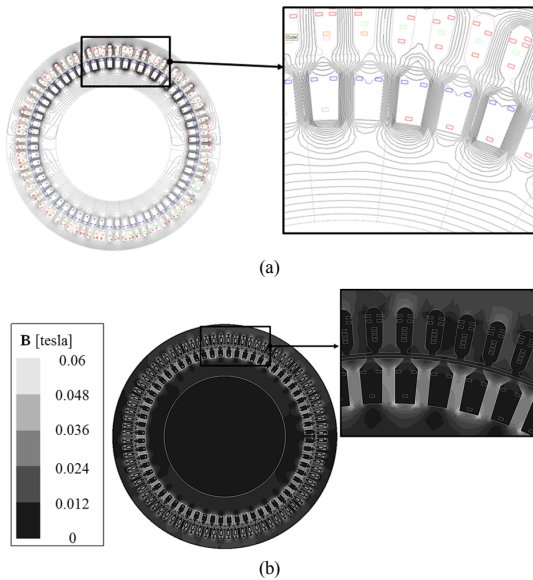


Fig. 5. Magnetic Characteristics of winding resolver at 1rpm
 (a) Magnetic flux distribution
 (b) Magnetic flux density distribution

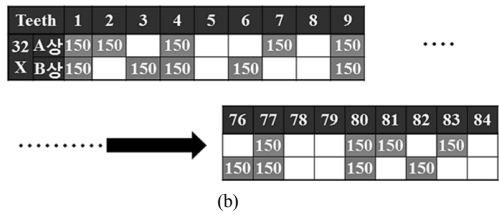
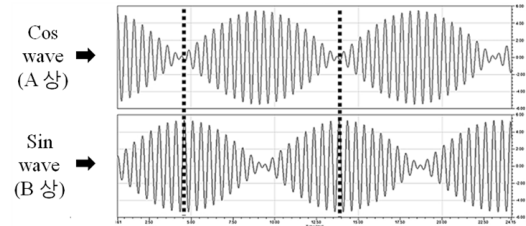
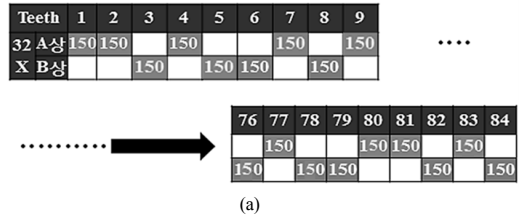
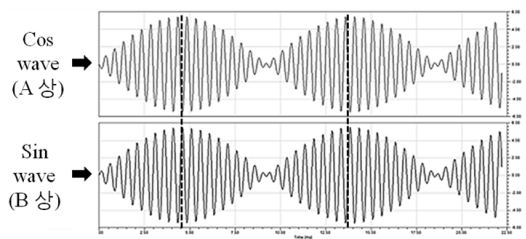


Fig. 6. Winding arrangement of 32X stator winding in slots (a) original model (b) proposed model

4. 권선형 레졸버의 권선법에 따른 특성

그림 6은 이러한 레졸버 회전자 입력전류에 의해 레졸버 고정자의 SIN, COS 권선에 유도되는 파형을 나타낸다. 고정자의 권선패턴은 예를 들어 그림 6(a)와 같은 패턴으로 84개의 슬롯에 32X 신호 검출을 위한 권선 턴수가 감기는 경우 유도되는 SIN, COS 전압은 그림과 같이 동일한 파형으로 발생되어 각도 정보를 확인할 수 없다. 그림 6(b)와 같은 제안된 권선패턴으로 감기는 경우는 SIN, COS 전압이 서로 90도 위상차를 가지고 전압의 크기도 동일하므로 이들 파형으로 정확한 각도 정보를 확인할 수 있다.

그림 7은 SIN과 COS 권선부의 정확한 위치를 파악하기 위해 arctangent로 환산하여 정확한 각도를 도출할 수 있다. 고정자 측 1X와 32X에 유도되는 기전력파형의 위치검출에 arctangent를 사용하여 권선패턴에 따른 SIN과 COS 전압이 서로 90도 위상차를 확인하였다.

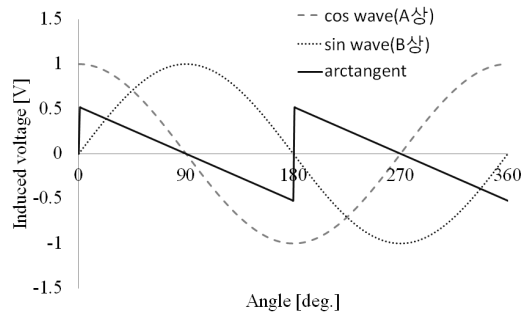
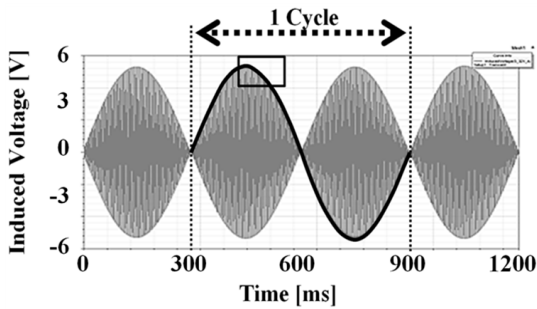


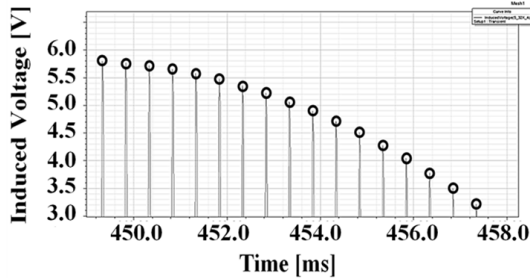
Fig. 7. The method of angle estimation by using arc-tangent

5. 레졸버 신호의 고조파 분석

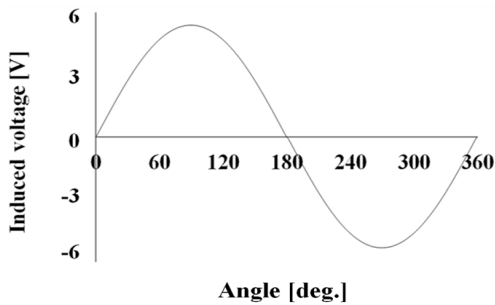
그림 8은 고정밀 권선형 레졸버가 필요로 하는 고정자 파형의 정현성을 확인하기 위해 그림 8(a)의 유한요소해석에 의한 1X권선의 SIN 전압 파형을 8(b)와 같이 1kHz의 샘플링 시간으로 최대-최소값을 샘플링하게 되면 그림 8(c)와 같이 정현파를 얻게 된다. 고정밀도를 확인하기 위해 이 정현파 파형을 고조파 분석을 하게 되면 8(d)와 같이 기본파 성분(6.5V)에 비해 매우 낮은 고조파 성분을 확인할 수 있다.



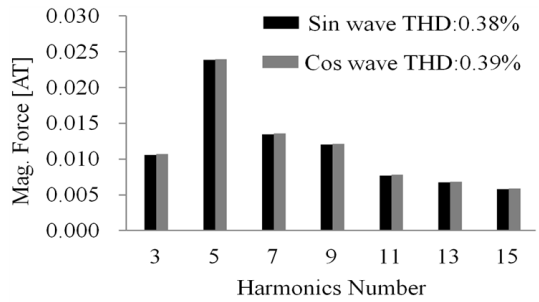
(a)



(b)



(c)

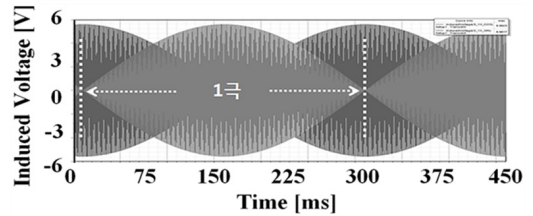


(d)

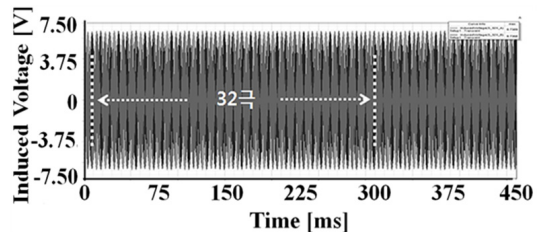
Fig. 8. Harmonic analysis method for demodulated waveforms of resolver (stator 1X sin wave)
 (a) 1 step : Derive demodulated waveform (b) 2 step : Extract the max. value out of demodulated waveform (c) 3 step : Sin waveform by using step 2 (d) 4 step : FFT transform

6. 고정밀 레졸버 연동해석 결과

그림 9은 최종적으로 1X와 32X의 권선형 레졸버와 회전형 변압기의 전자장 연동해석을 수행한 SIN, COS 전압 파형을 나타낸다. 1X와 32X의 SIN 파형과 COS 파형이 각각 서로 90도 위상차가 발생하고, 고정자 1X와 32X의 FFT와 THD 분석결과 SIN COS의 비슷한 결과 값으로 정현파에 가까운 값을 나타낸다. 1X와 32X의 FEM 전자장 해석 전압레벨은 5.56 Vrms 와 6.73 Vrms 도출된다. 그림 10에서실측파형 데이터에 비해 1X는 20.5%정도 전압레벨이 감소하고 32X는 3.8% 감소한 전압 오차가 난다.



(a)



(b)

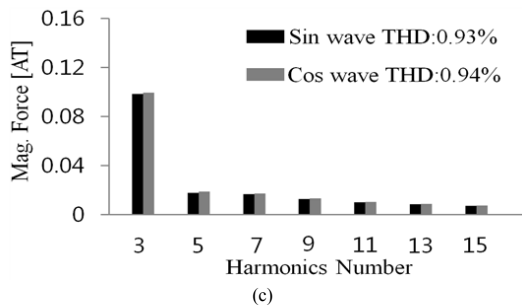


Fig. 9. The analysis results of winding type resolver with rotary transformer by multi-physics. (a) SIN, COS waveforms of 1X (b) SIN, COS waveforms of 32X (c) FFT analysis

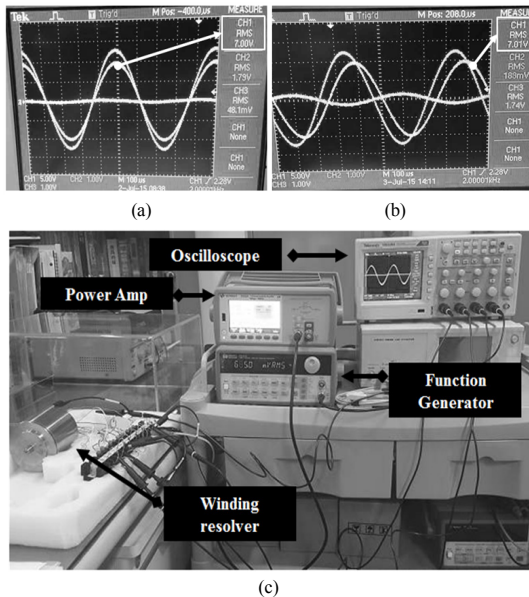


Fig. 10. Experiment of winding resolver (a) 1X waveforms (b) 32X waveforms (c) experimental set

7. 결론

외부인가전원을 증폭시키는 회전형 변압기부와 증폭된 변압기 출력을 이용하는 레졸버의 회전자 입력부를 연동해석을 통하여 전자기적인 정밀도를 향상시킬 수 있는 권선형 레졸버의 연동해석 모델을 제시하고 이들 특성을 분석하였다. 고정밀 각도 도출을 위해 레졸버 고정자 권선은 32x와 1x의 혼합 권선이 설치되어 있으며 슬롯에 적절한 권선법이 제시되어 정현적인 SIN, COS 파

형과 이들간의 위상각 90°를 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] Figueiredo, J, "Resolver Models for Manufacturing", IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 58, no. 8, pp 3693-3700, 2011
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2010.2081950>
- [2] Lizhi, Sun, "Analysis and Improvement on the Structure of Variable Reluctance Resolvers", IEEE Transaction on Magnetics, vol. 44, no. 8, pp 2002-2008, 2008
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2008.923315>
- [3] Tanaka, K, Sasada, I, "A Method of Producing Z-Pulse Output From Thin Axial Resolver", IEEE Transaction on Magnetics, vol. 49, no. 7, pp 3937-3940, JULY 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2013.2244068>
- [4] K. C. Kim, C. S. Jim, J. Lee, "Magnetic shield design between interior permanent magnet synchronous motor and sensor for hybrid electric vehicle", Transaction on Magnetics, vol. 45, no. 7, pp 2835-2838, Jun. 2009
- [5] M. Benammar, L. B. Brhchim, M. A. Alhamadi, "A high precision resolver-to-dc converter", IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 54, no. 6, pp 2289-2296, Dec. 2005
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/tim.2005.858135>
- [6] B. Akin, S. B. Ozturk, H. A. Toliyat, M. Rayner, "DSP-based sensorless electric motor fault diagnosis tools for electric and hybrid electric vehicle power train applications", IEEE Transaction on vehicular tech, vol. 58, no. 5, pp 2150-2159, 2009
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2008.2007587>
- [7] J. Wan, X. Li, G. Hong, "The analysis and design of high speed brushless resolver plus R/D converter shaft angle measurement system", PROC. ICEMS 2001, PP 289-292

신 영 철(Young-Chul Shin)

[준회원]



- 2015년 2월 : 한밭대학교 전기공학과 (학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 일반대학원 석사과정

<관심분야>
전기기기, 전기제어

김 기 찬(Ki-Chan Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한양대학교 대학원
전기공학과 (전기공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2005년 1월 : 현대
중공업 기계전기연구소 선임연구원
- 2008년 2월 : 한양대학교 대학원
전기공학과 (전기공학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한밭대학교
전기공학과 교수

<관심분야>

전기기기, 전기제어