

전동기 제어를 위한 고성능 릴럭턴스 레졸버 설계

이태연, 남광희
포항공과대학교

High Performance Reluctance Resolver Design for Motor Control

Taeyeon Lee, Kwanghee Nam

Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

ABSTRACT

현대 산업기기의 큰 비중을 차지하는 전동기는 벡터 제어를 위해 각도 정보를 필수적으로 요구한다. 따라서, 엔코더와 권선형 레졸버 그리고 릴럭턴스 레졸버와 같은 많은 각도 센서가 활발히 사용되고 있다. 센서리스와 같이 센서를 이용하지 않고 각도를 추정하는 연구도 많이 진행되고 있지만, 높은 안정성을 요구하는 시스템에서는 여전히 각도 센서가 주를 이루고 있다. 각도 센서 중에서 높은 정확도와 안정성 그리고 내구성을 가지는 레졸버가 각광받고 있으며, 특히 릴럭턴스 레졸버(Variable Reluctance Resolver)가 많이 사용된다. 본 논문은 전동기의 제어 성능과 안정성을 높이기 위한 고성능 레졸버 설계의 내용을 담고 있으며, 기존의 릴럭턴스 레졸버와 달리 레졸버 고정자의 치폭을 변조하여 각도 오차를 줄이는 내용을 다루고 있다.

레졸버 해석

일반적으로 레졸버의 여기(Exciting) 코일은 교번하며 전체 슬롯에 감기게 된다. 따라서, 기자력(MMF)은 그림 1. (a)와 같이 생성된다. 기자력에 의한 영향을 분석하기 위해 논문에서는 푸리에 전개가 진행된다. 푸리에 전개 시 기자력의 절대값을 해석하는데 실제로 여기 코일과 출력 코일에 교번이 동일하게 들어감으로, 해석할 때에는 무시할 수 있다. 슬롯의 개방 성분을 고려할 때, 기자력의 푸리에 전개는 아래와 같다.

$$F(x) = f_0 + \sum_{\nu=1}^{\infty} f_{\nu} \cos\left(\nu \frac{2\pi}{\tau_s} x\right) = N_c I_c \left(1 - \frac{W_s}{\tau_s}\right) + \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{2N_c I_c}{\nu\pi} \sin\left(\nu\pi\left(1 - \frac{W_s}{\tau_s}\right)\right) \cos\left(\nu \frac{2\pi}{\tau_s} x\right) \quad (1)$$

이때, W_s 는 슬롯의 개방 길이, τ_s 는 슬롯 피치, N_c 는 여기 코일의 턴 수 그리고 $I_c = \bar{I}_c \sin(\omega_e t)$ 이다. 이러한 자기력은 길을 통해 자속(Flux)를 발생시키는데, 이러한 길을 퍼미언스(Permeance)라고 한다. 레졸버의 회전자를 정밀하게 만들게 되면 아래와 같은 식으로 전개된다.

$$A_r(x, \theta_r) = A_{r0} + A_{r1} \cos\left(\frac{P}{Z} \frac{2\pi}{\tau_s} x - \theta_r\right) \quad (2)$$

이때, P 는 회전자 극수, Z 는 슬롯 수, θ_r 는 회전 각도 그리

고 $\theta_i = \left(\frac{P}{Z} \frac{2\pi}{\tau_s} x\right)$ 는 각 슬롯에서의 각도이다. 구해진 기자력과 퍼미언스를 이용하여 공극 자속을 구하면 다음과 같다. 또한, 발생하는 공극 자속밀도는 그림 1. (b)와 같다.

$$B(\theta_i, \theta_r) = f_0 A_{r0} + f_0 A_{r1} + A_{r0} \sum_{\nu} f_{\nu} \cos\left(\nu \frac{Z}{P} \theta_i\right) + \frac{A_{r1}}{2} \sum_{\nu} f_{\nu} \left(\cos\left(\left(\nu \frac{Z}{P} + 1\right)\theta_i - \theta_r\right) + \cos\left(\left(\nu \frac{Z}{P} - 1\right)\theta_i + \theta_r\right)\right) \quad (3)$$

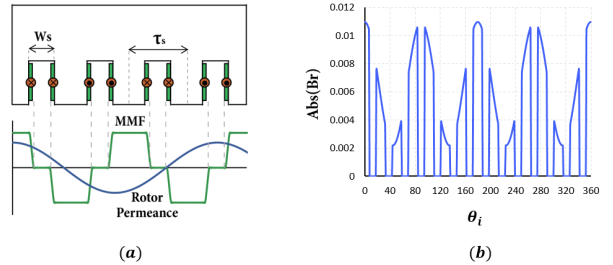


그림 1 (a) 레졸버의 기자력과 퍼미언스 (b) 공극 자속밀도
Fig. 1 (a) MMF and Permeance of Resolver (b) Air-gap Flux density

자기력에서부터 시작된 공극 자속은 cos과 sin 형태로 감겨 있는 출력 코일에 다시 링크된다. 실제 출력 코일은 슬롯 수만큼 양자화 되어 감기기 때문에 각도 오차를 발생시키는 고조파의 원인이 된다. cos을 예로 들어 양자화된 출력 코일의 푸리에 전개를 하면 다음과 같다.

$$N_{oc}(\theta_i) = N_{o1} \cos(\theta_i + \alpha) + \sum_{\nu=1}^{\infty} \left[N_{\left(\nu \frac{Z}{P} + 1\right)} \cos\left(\left(\nu \frac{Z}{P} + 1\right)(\theta_i + \alpha)\right) + N_{\left(\nu \frac{Z}{P} - 1\right)} \cos\left(\left(\nu \frac{Z}{P} - 1\right)(\theta_i + \alpha)\right) \right] \quad (4)$$

여기서 α 는 초기 오프셋 각도이며, 조건에 따라 임의의 설정이 가능하다 [1]. 양자화된 출력 코일의 파형과 기본파 성분은 그림 2와 같다. 또한 출력 코일에 전압을 유지시키는 쇄교 자속의 수식은 아래와 같다.

$$\lambda_{\cos}^t(\theta_r) = \sum_{i=1}^Z \lambda_{\cos}(\theta_i, \theta_r) \quad (5)$$

$$\lambda_{\sin}^t(\theta_r) = \sum_{i=1}^Z \lambda_{\sin}(\theta_i, \theta_r) \quad (6)$$

A가 자속의 쇄 단면적일 때, $\lambda_{\cos} = N_{oc}(\theta_i)B(\theta_i, \theta_r)A$ 이고 $\lambda_{\sin} = N_{os}(\theta_i)B(\theta_i, \theta_r)A$ 이다.

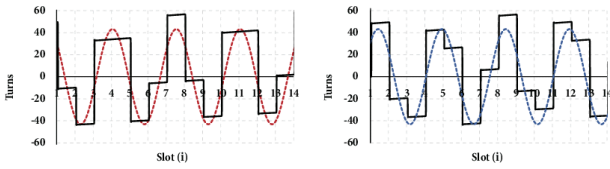


그림 2 양자화된 cos과 sin의 출력 코일
Fig. 2 Quantized output coil turns of cos and sin

최종적으로 출력 코일에 전압을 유기하는 쇄 자속의 수식은 아래와 같고, 각도의 오차를 만드는 성분을 확인할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{\cos}^t \\ \lambda_{\sin}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 + \sum_{\nu} (\lambda_{(\nu \frac{Z}{P} + 1)} + \lambda_{(\nu \frac{Z}{P} - 1)}) \cos(\nu \frac{Z}{P} \alpha) \\ \lambda_1 + \sum_{\nu} (\lambda_{(\nu \frac{Z}{P} + 1)} - \lambda_{(\nu \frac{Z}{P} - 1)}) \sin(\nu \frac{Z}{P} \alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r + \alpha) \\ \sin(\theta_r + \alpha) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\lambda_1 = \frac{AA_{r1}Z}{2} f_0 N_{01}, \quad \lambda_{(\nu \frac{Z}{P} + 1)} = \frac{AA_{r1}Z}{4} f_{\nu} N_{(\nu \frac{Z}{P} + 1)} \quad \text{그리고}$$

$\lambda_{(\nu \frac{Z}{P} - 1)} = \frac{AA_{r1}Z}{4} f_{\nu} N_{(\nu \frac{Z}{P} - 1)}$ 이다. 따라서 작은 각도 오차를 갖는 고성능의 레졸버 설계를 위해서는 (7) 수식에 따라 f_{ν} 를 줄이면 고조파 성분이 저감된다. 따라서 자기력의 특정 차수 고조파를 줄이기 위한 설계 방식을 제안한다.

제안하는 레졸버 설계 방식

1.1 비대칭의 고정자 치폭 설정

ΔW 의 변조폭을 설계 변수로 설정하고 그림 3.(a)의 자기력을 중첩의 원리를 사용하여 푸리에 전개하면 아래와 같은 식으로 정리된다.

$$F_t(x) = F_1(x) + F_2(x) = N_c I_c \left[1 - \frac{W_s}{\tau_s} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2N_c I_c}{n\pi} \cos\left(n \frac{\pi}{\tau_s} x\right)$$

$$\cdot \left[\sin\left(\frac{n\pi}{2} \left(1 + \frac{2\Delta W}{\tau_s} - \frac{W_s}{\tau_s}\right)\right) + (-1)^n \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2} \left(1 - \frac{2\Delta W}{\tau_s} - \frac{W_s}{\tau_s}\right)\right) \right] \quad (8)$$

실제로 레졸버 고정자의 치폭을 비대칭적으로 가져가는 것은 고조파를 더욱 많이 발생시키지만, $\nu = n \frac{Z}{P}$ 의 고조파를 줄임으로 출력 전압에서 각도 오차를 발생시키는 성분을 저감시킬 수 있다. 그림 3.(b)는 변조폭의 비율에 따른 왜곡량을 보여준다. 왜곡량이 최저가 되는 지점의 변조폭을 설정하여 설계한다.

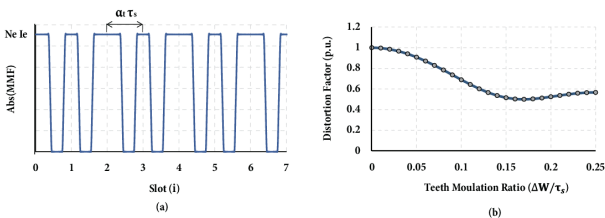


그림 3 (a) 비대칭 치폭의 자기력 (b) 변조폭에 따른 왜곡량
Fig. 3 (a) MMF for the asymmetrical slot width (b) Teeth modulation ratio versus distortion factor

FEM 시뮬레이션 결과

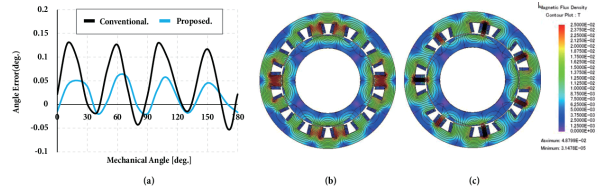


그림 4 (a) 각도오차 (b) 기존의 레졸버 (c) 제안하는 레졸버
Fig. 4 (a) Angle error (b) Conventional resolver (c) Proposed resolver

슬롯 수, 회전자 극수 그리고 레졸버 회전자의 설계가 최적화 되어있는 기존의 레졸버와 비교했을 때, 오차가 50% 감소하는 것을 확인할 수 있다. 제안한 방식의 레졸버의 경우 각도 오차가 최대 0.06도를 보인다.

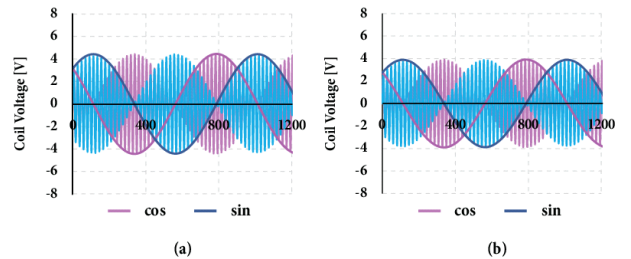


그림 4 (a) 기존 레졸버 출력 (b) 제안된 레졸버 출력
Fig. 4 (a) Conventional resolver output voltage (b) Proposed resolver output voltage

(7)번 수식과 같이 각도 오차 성분에 기여하는 사이드밴드 고조파를 저감시킴에 따라 각도 오차는 감소하지만 사이드 밴드 고조파가 실제 각도 정보의 크기에도 기여하기 때문에 그림 4와 같이 제안된 레졸버의 출력 전압이 약간 감소하는 것을 보인다. Signal to Noise Ratio에는 큰 영향이 없는 것을 확인할 수 있다.

결론

본 논문에서는 각도 오차를 줄이기 위한 레졸버의 최적 설계에 대한 내용을 다루고 있다. 고정자의 슬롯에 의한 영향과 출력 코일의 양자화에 따른 영향으로 고조파가 발생하고 레졸버의 각도오차를 발생시킨다. 이를 해결하기 위해 레졸버의 수학적 해석을 진행하여 각도 오차를 발생시키는 성분을 유도하고 이를 저감시키기 위해 레졸버 고정자의 치폭을 변조하여 슬롯 수와 회전자 극수에 의해 결정되는 고조파와 사이드밴드 고조파의 저감을 달성하고 FEM 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증한다.

이 논문은 한국산업기술평가관리원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

[1] N.G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities : Role of Power Electronics in Future Power System", Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 481-482, 1988, April.