

정현파 구동 시스템과 위치 센서를 이용한 BLDC모터에 대한 연구

문성주*, 김영현*, 이대동**, 이중호*
한밭대학교*, 한양대학교**

A Study on the Brushless DC Motor Using a Sine Wave Driving System and a Position Sensor

Sung-Ju Mun*, Young-Hyun Kim*, Dae-Dong Lee**, Jung-Ho Lee*
Hanbat University*, Hanyang University**

Abstract - 이 연구는 이동 매쉬기법이 고려된 유한요소 해석법을 이용한 영구자석 Brushless 직류모터(BLDCM)의 동적 특성해석을 다루었다. 이 논문의 초점은 BLDCM의 적합한 속도 제어를 위한 정현파 구동 시스템의 적합성을 보여주고 있다. 각각의 구형파 시스템과 BLDC 구동 시스템의 제안된 속도리플과 전류응답을 비교하였다. 실험결과들에 의해 속도제어 시스템은 해석되어졌고, 정현파 구동시스템의 유효성은 검증되었다.

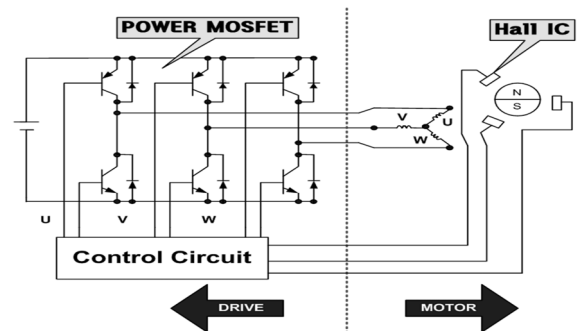
1. 서 론

BLDC 모터들은 고효율, 고회전 밀도, 저 진동 소음, 그리고 기계적인 정류자와 브러시들의 제거에 따른 저가의 장점으로 산업현장에서 많이 쓰여지고 있다. 일반적으로 영구자석 Brushless 직류 모터(BLDCM)는 구형파 위치신호에 의해 만들어진 위치센서(Hall IC)에 의해 결정되어진 구형파 전류에 의해 동작되어진다. 위치센서는 회전자의 각 위치를 위해 적당한 위치 신호들을 만들고, 이 신호들은 모터로 흘러 들어가는 전류를 결정하기 위해서 직접적으로 사용된다. 일반적인 BLDCM 종류들의 작동 원리는 매우 단순하고 그것들은 직류모터의 원리에 기초한다. 그래서, BLDCM은 산업현장의 컨베이어 시스템 같은 속도제어 적용을 위한 이점을 가지고 있다. 그러나, 일반적인 BLDCM은 갑작스러운 전류변화와 소음, 진동에 의해서 만들어진 토크리플의 나쁜 특성을 가지고 있고, 이것은 매우 조용한 환경이 요구되는 컨베이어 시스템에 역효과를 만든다. 그래서 몇몇의 논문들은 BLDCM의 동작성능의 증진을 위해 새로운 구동시스템을 제안하였다. 이것은 정현파 위치신호 발생을 위한 홀효과 센서(선형 홀센서)를 사용하는 것이다. BLDCM은 정현파 위치신호를 사용함으로써 가상의 정현파 전류들에 의해 동작된다. 만약 구동조건들이 부하, PWM 등등에 의한 고조파의 영향을 받는다면, 내부 BLDCM의 물리적인 특성은 등가회로 모델 해석에 의해서 정확히 예측이 될 수 없을 것이다. 다행히, 전압 등가모델링과 다른 유한요소 해석법(FEM)은 첫째로 복잡한 내부구조 모형을 만들 수 있는 능력과 정밀하고 높은 단계로 자기포화 모델을 가능하게 하는 이점이 있다[1]-[3]. 이 논문은 BLDCM을 위한 결합된 동적 유한요소법과 제어 알고리즘의 해석법을 나타냈고, 속도리플 제어를 수행시켰다. 동적특성을 고려한 이동 매쉬기술이 사용되어졌고, 벡터제어 알고리즘은 해석 토크 결과 결합되어졌다. 각각의 구형파 시스템과 BLDC 구동시스템의 제안되어진 속도리플과 전류응답을 비교하였다. 속도 제어시스템은 해석되어졌고, 시스템을 정현파 구동시스템의 유효성은 실험결과들에 의해 검증되었다.

2. 제한된 정현파 구동 BLDCM 시스템

2.1 제한된 구동시스템의 원리와 정현파 구동시스템의 필요성

BLDCM가 이상적으로 동작될 때 직사각형 모양의 상전류는 역기전력 파형의 균일한 부분에 주입된다. 그러나 실제적으로 상전류는 고정자 권선들의 인덕턴스 구성요소 때문에 즉각적인 평가된 전류레벨 평가가 이루어지지 않는다. 저속도에는 인덕턴스 효과가 무시될 때는 어떠한 심각한 문제도 야기되지 않을 것이다. 그러나 고속도에 모터의 성능은 악화될 것이다[4]. 그러므로 구동시스템의 최적화를 위해 상전류 성능의 개선이 요구된다. 이것은 출력 회전력을 개선하는 가장 중요한 인수이기에 상전류의 성능을 개선하도록 요구되고, BLDCM의 속도 응답특성은 전기매체 산업 애플리케이션에 사용되고 있다. BLDC 모터들 성능개선의 다른 제어방법들은 많은 연구자에 의해서 개발되어졌다. 그것들은 자계 감소제어, 오버래핑, PWM 초핑방법과 같다[5]-[7]. 그러므로 이러한 구형파 구동은 정속도 특성이 필요한 현장에서 광범위하게 사용된다. 그러나 이 구형파 구동은 항상 3상의 모터 코일들 사이에 2선으로 전류 흐름을 만들기 때문에 지속되지 않는 전류와 회전자계에 따라서 소음과 진동을 야기시킨다. 또한, 토크제어는 어려운 전류 컨트롤 때문에 잘 구동되지 못하는 단점을 가지고 있다.



<그림 1> BLDCM의 구동전류

그러므로 정현파 구동이 요구되고, BLDCM은 정현파 구동기법을 적용함으로써 능률적으로 작동된다. 개발된 정현파 제어방법은 최적토크와 정확한 속도응답을 만든다. 정확한 정현파 전류를 만들기 위하여 위치센서의 피드백 신호를 받은 후에 BLDCM의 전기 각을 검출하는 것은 매우 중요하다. 제안된 제어기법의 타당성은 전통적인 제어방법과 비교하여 볼 때 시뮬레이터 된 결과들을 통하여 검증된다. 그림 1은 BLDCM의 구동회로 원리를 보여주고 있다. 만약 홀효과 센서가 사용된다면 영구자석에 의한 공극 자속에 조화된 위치 신호를 받는 것이 가능하다. 제어 신호를 위해서 사용된 정현파 신호가 실제적으로 가장 중요한 부분이다.

3. 결합된 유한요소해석과 제어 알고리즘

3.1 BLDC의 지배방정식

운동좌표 시스템이 사용되어질 때의 2D 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} v_0 \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} v_0 \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z - J_m \quad (1)$$

$$J_m = v_0 \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (2)$$

여기서, A_z : 자기벡터 포텐셜의 z방향성분

J_z : 전류밀도, v_0 : 자기 저항률

J_m : 영구자석의 동등한 자화전류

3.2 시스템 매트릭스

회로 방정식은 다음과 같다.

$$\{V\} = [R]\{I\} + [L_0] \frac{d}{dt} \{I\} + \{E\} \quad (3)$$

여기서, $\{E\}$: 권선의 E.M.F. 벡터

$\{V\}$: 공급전압 벡터, $\{I\}$: 상전류 벡터

$[L_0]$: 누설 인덕턴스

(1)을 풀기위해 우리는 Galerkin 유한요소 해석법을 사용하였다. (3)에 시간 미분을 위한, 시간 스테핑 해석은 역방향 다른 수식으로 사용되어진다. (1)과 (3)의 결합의 시스템 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc} V_0[S] - [M] & [0] \\ [0] & [R] \end{array} \right] + \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{cc} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{A\} \\ \{I\} \end{array} \right\}_t \\ & = \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{cc} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{A\} \\ \{I\} \end{array} \right\}_{t-\Delta t} + \left\{ \begin{array}{c} \{M\} \\ \{V\} \end{array} \right\}_t \end{aligned} \quad (4)$$

[LG]는 기전력과 관계된 개수행렬이고, [M]은 영구자석의 자화량이다.

4. 연산 알고리즘

PWM fed 인버터를 가진 제어 알고리즘이 그림 2에 나타난 것처럼 PWM입력에 따른 동특성과 히스테리시스특성 해석을 위해 제안된 해석 모델에 적용된다. 제안된 해석방법은 벡터제어 논리부분에 스텝속도 명령(500rpm)이 적용되고, 샘플링 타임은 100(μsec)이다.

$$T = \int_l \frac{w}{2\mu_0} \{ (B_x^2 - B_y^2)n_x + 2n_y B_x B_y \} dl \quad (5)$$

각각의 시간에 따른 BLDCM의 토크 활동은 맥스웰 응력법의 선적분 에 의해 계산된다. 여기서 n_x 와 n_y 는 단위 법선 벡터이다. w 는 주로 적층폭이다. 동특성 해석에서 BLDCM의 속도는 다음과 같이 계산된다.

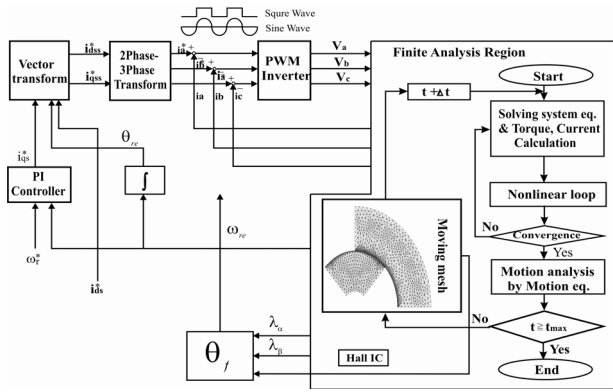
$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} - T_b w_{re} = \int T - T_b / J dt, \theta_{re} = \int w_{re} \cdot dt \quad (6)$$

FE 영역에서, 각 상의 쇄교자속은 다음과 같다.

$$\lambda = N \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = N(A_1 - A_2)w \quad (7)$$

여기서 w 는 적층폭이다. N은 코일 턴 수이고, A1, A2는 슬롯에서의 자기벡터 포텐셜의 평균값이다. FE 영역에서 계산되는 자속 각은 다음과 같고 그것은 Hall IC 실험으로부터 얻어졌다.

$$f = \tan^{-1}(\lambda_\beta / \lambda_\alpha) \quad (8)$$

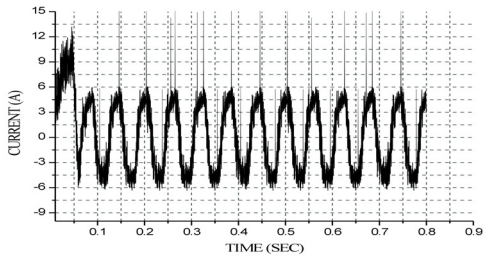


<그림 2> 해석시스템의 블록도

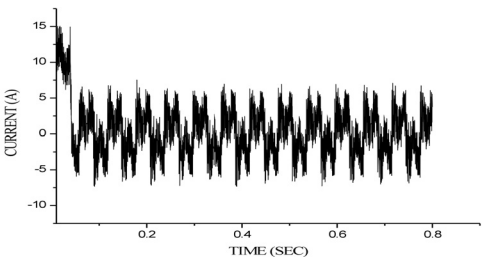
5. 결과 및 토론

5.1 시뮬레이션 결과 및 토론

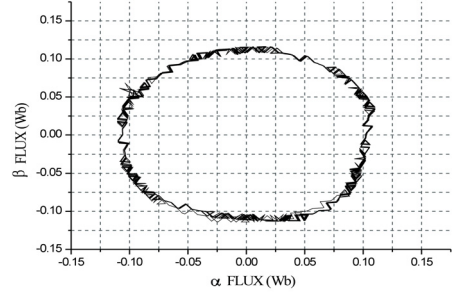
그림 3은 제안된 정현파와 방법의 상전류 특성을 각각 나타낸다. 그림 4는 정상상태의 구형파 해석의 상전류 특성을 나타낸다. 그림 3, 4의 전류응답들은 히스테리시스 PWM에 의해 왜곡 되어진 것으로 관측되어진다. 그림 5는 제안된 해석모델에서 FE영역의 α, β 자속결합 응답특성을 나타내었다. 그리고 그림 6은 속도제어 시뮬레이션에서의 $\alpha - \beta$ 자속결합에 따라 인코더 각 θ_{re} 와 자속각 θ_f 로 표현되어진다.



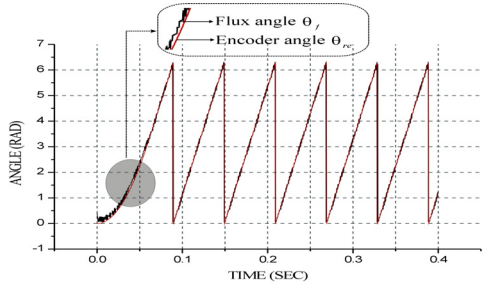
<그림 3> 정현파 운전에 대한 전류응답



<그림 4> 구형파 운전에 대한 전류응답



<그림 5> FE 부분의 $\alpha - \beta$ 자속 쇄교수 응답들.



<그림 6> 인코더 각도 θ_{re} 와 플럭스 각도 θ_f

6. 결론

벡터제어 인버터의 PWM 입력전압과 자기 비선형성에 따른 기계들의 비선형 해석에 적합한 과도특성 해석방법이 제안되어졌다. BLDCM의 제어 특성들은 새로운 정현파 구동시스템과 정상상태 구형파 시스템의 기초에 의해 연구되어졌다. 제안된 방법과 구형파 방법의 시뮬레이션 비교들은 발전된 정현파 제어방법이 최적의 토크와 정확한 속도응답을 만든 것을 보여준다. 동시에, BLDCM의 속도제어에 따른 제어 파라미터 추정(Hall IC의 위치검출)은 컨트롤 파라미터 θ_f 가 연구되었고, 정현파 구동시스템에 의해 적절하게 선택되어지는 것이 확인되었다. 이 해석법은 인버터와 시험모터의 제조비용을 절감하는 효과를 가져올 수 있다.

진동과 와전류 기계손실의 문제를 가지고 결합된 해석방법의 개발은 전자기의 효율과 역률의 해석을 확실히 가능하게 할 것이고, 제어 알고리즘의 모터구조, 재료와 개발의 변화에 유용해 질 것이다.

[참고 문헌]

- [1] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Saturation and Iron Loss by FEM", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 34, No.5, pp.2629-2632, Sep.1998.
- [2] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Characteristics Computation on PWM Fed Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM & Preisach Modeling", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.36, No.7, pp1209-1213, July 2000.
- [3] J. H. Lee, J. C. Kim, I. S. Jung, D. S. Hyun, "Vector Control Scheme of Synchronous Reluctance Motor Considering Iron Core Loss", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.34, No.5, pp3522-3525, September, 1998.
- [4] Z.Q. Zhu, S. Bentouati and D. Howe, "Control of single-phase permanent magnet brushless DC drives for high-speed applications," IEEConference on Power Electronics and Variable Speed Drives, no.475, pp.327-332, 2000.
- [5] H. Zeroug, D. Holiday, D. Grant and N. Dahnoun, "Performance prediction and field weakening simulation of a brushless DC motor," Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, no.475, pp.321-326, 2000.
- [6] J. B. Chalmers, L. Musaba and D.F. Gosden, "Performance characteristics of synchronous motor drives with surface magnets and field weakening," IEEE Conference on Industry Applications, vol.1, pp.511-517, 1996.
- [7] Y. Murai, Y. Kawase, K. Ohashi, K. Nagatake and K. Okuyama, "Torque ripple improvement for brushless DC miniature motors," IEEE Transaction on Industry Applications, vol.25, issue3, pp.441-450, May-June 1989.