

Finite Jerk를 이용한 로봇 구동용 BLDC 모터의 저진동화

이동엽, 황예, 김규탁, 정원지

창원대학교 전기공학과, 창원대학교 기계설계공학과

The Vibration Minimization of BLDC Motor driving a robot by using the Finite-Jerk Continuity Acceleration curve

Dong-Yeup Lee, Rui Huang, Gyu-Tak Kim, Won-Ji Jung

Dept. of Electrical Engineering and Mechanical design & Manufacturing Engineering C.N.U

Abstract - This paper presents the optimal design reducing the rotor inertia in order to improve the driving characteristic of BLDCM for robots. The parallel Genetic Algorithm is performed to rotor inertia minimization in optimal design. Also, velocity profile with finite jerk method is introduced to reduce vibration of BLDCM.

As a result, a torque characteristic is same although rotor inertia is reduced 2/3 compared with prototype model. And, maximum vibration value is reduced by 63.4[%] according to apply finite jerk.

1. 서 론

최근 기계·전기·전자·제어 등이 융합된 메카트로닉스 기술의 총아인 로봇 산업(Robot Technology)은 IT, BT에 이어 거대시장을 형성하는 차세대 핵심 산업으로 급부상함에 따라, 공작기계 및 로봇을 구동하는 AC 서보모터를 비롯한 구동용 전동기의 저진동, 저소음, 고효율 및 고응답성이 해결되어야 하며, 이를 위해서는 관련 기술의 종합적 접근이 요구된다.

BLDC 모터에 대한 연구는 많이 이루어져 폐슬롯을 이용하여 코킹 토크를 근본적으로 제거시키는 단계까지 큰 발전을 이루게 되었다. 그러나, 토크 리플이 최소화 된 BLDC 모터라 할지라도 로봇 등과 같이 가, 감속 운전을 자주 행하여 하는 시스템에서는 기동 및 정지 시는 물론 속도가 변하는 시점 즉, 가속구간에서 동속구간으로, 동속구간에서 감소구간으로 가속도가 급변하는 시점, 즉 변곡점에서 큰 진동이 발생한다[1]. 이것은 가속도가 불연속이 됨에 따라 가속도의 미분치인 Jerk가 무한한 값을 갖게 되어 일어나는 것이다. 따라서, 고속 유연한 운동을 필요로 하는 로봇 등과 같은 시스템에서는 코킹 토크에 의한 토크 리플 최소화는 물론, 가감속 운전 시 진동저감을 위한 최적의 속도 Profile을 도출하여야 한다.

이와 같이 Finite Jerk을 이용한 가, 감속 운전을 시행하여도 급격한 가감속 운전이 필요로 하는 로봇 등에 BLDC 모터를 적용할 경우에는 기동시 및 정지시는 물론 가속도가 급변하는 시점, 즉 변곡점에서 관성에 의한 임펄스 충격이 크게 나타나 진동이 매우 커 제어 성능이 떨어지는 문제점이 발생한다.

따라서, 본 논문에서는 기존 BLDC 전동기의 고속·유연한 로봇 운동 구현을 위하여 가속도의 미분치인 Jerk가 유한한 값을 갖는 finite jerk 방식으로 가·감속 운전을 시행하였으며 속응성의 향상 및 진동 최소화를 위하여 최근 최적화 기법으로 공학분야에 광범위하게 사용되고 있는 유전알고리즘을 이용하여 구동원인 BLDC 모터의 저관성화 설계를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 BLDC 전동기

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 서보모터용 BLDC 전동기를 기본모델로 하였다.

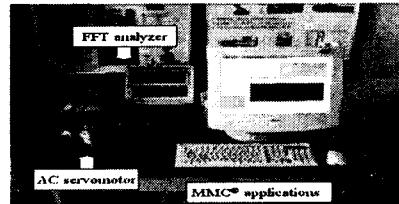


그림 1. 시험장치

그림 1은 본 연구에서 적용한 실험 장치이며, AC servomotor인 BLDC 모터는 내전형(Interior rotor type), 8극 12슬롯의 구조이다. 기본 모델의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 기본 모델의 사양

상전류[A]	1.74
정격전수[rpm]	3000
정격토크[kg.cm]	6.5
효율[%]	87.1
공극[mm]	0.6
영구자석 두께[mm]	0.3
영구자석의 전류자속밀도[T]	1.2
회전자직경[cm]	3
계자축방향 길이[cm]	1.76
회전자관성[kg.cm ²]	0.904

2.2 BLDC 전동기의 동적 특성

2.2.1 사다리꼴 방식의 속도곡선

일반적인 사다리꼴 속도곡선은 서보모터에 비교적 널리 이용되는 방법으로 통상적으로 계산을 쉽게 하기 위해 가속시간과 감속시간을 같도록 하며 이를 그림 2에 나타내었다. 하지만, 그림 2에서 알 수 있듯이 속도가 급변하게 변화하는 부분에서 가속도가 갑자기 변함에 따라 BLDC 모터 뿐만 아니라 로봇에 진동 및 충격이 발생한다.

그림 3은 기본 모델에 사다리꼴 속도곡선을 적용하여 가, 감속 운전시의 진동 특성을 나타낸 것이다. 이 때의 동특성 해석은 상용 프로그램인 visual Nastran 4D를 이용하였으며 진동은 FFT(Fast Fourier Transform) Analyzer로 측정하였다. 실험 및 계산시 BLDC 모터의 회전속도는 3000[rpm]이며, 가, 감속 및 동속 시간은 1[sec]로 설정하였다. 이때의 P, D gain은 각각 10 및 2로 설정하였다.

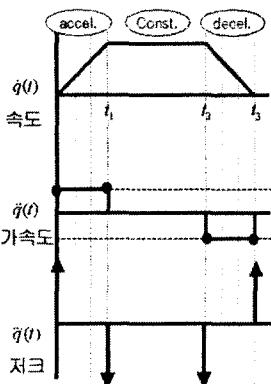
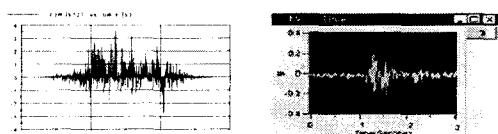


그림 2. 사다리꼴 속도곡선



(a) 진동 이론치 (b) 진동 실험치
그림 3. 사다리꼴을 적용한 진동 시험 결과

그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 최대 진동 가속도는 0.383[G]으로 계산되었으며 이때의 실험치는 0.38[G]로 매우 잘 일치하였다. 그러나 가속도가 급변하는 지점에서 진동이 크게 발생하였다. 이와 같이 기존의 사다리꼴 속도 구동 방식으로 속도 입력을 주었을 경우, 최초 정지 마찰을 이기고 구동하기 위한 관성 때문에 구동 초기 단계에 진동 가속도가 현격하게 크게 됨을 알 수 있다. 그러므로 가속도를 급격하게 변화시키지 않는 새로운 속도 곡선이 필요하다.

2.2.2 Finite Jerk 방식의 속도곡선

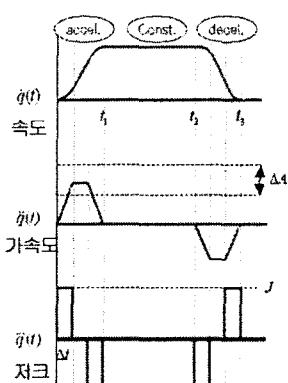


그림 4. Finite Jerk 속도 곡선

일반적으로 사다리꼴 속도곡선에서는 가속도의 미분치인 Jerk는 불연속이면서 크기가 무한대가 된다. Jerk는 가속도 값의 변화율로써 순간 작용하는 시동 토크를 대변하며 이 토크가 클수록 시스템에 가해지는 부담이 커지게 되며, 이 시동 토크로 인하여 시스템에 진동이 크게 발생하게 된다. 이를 보완하기 위한 방법으로 Finite Jerk 방식이 제안되었으며 본 논문에서도 이를 적용하였다[1]. Finite Jerk 방식의 속도 특성 곡선은 그림 4와 같은 패턴을 가진다.

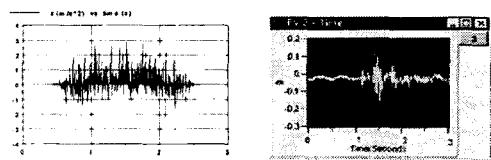
그림 4에서 Jerk 성분이 Δt 구간에 J크기 만큼의 유

한한 값을 갖도록 했을 경우, 가속도는 일정하지 않고 사다리꼴 형태를 가지게 되며 이로 인하여 속도는 S커브 곡선으로 된다. 이를 통해 최대 허용 가속도의 범위 내에서 가장 유연한 속도를 구현할 수 있게 된다.

그림 4의 가, 감속 및 정지시간은 사다리꼴 구동 방식의 입력값과 동일하게 하였다. 단 가, 감속 시 finite jerk 시간은 0.3[s]로 설정하였다. 즉, 가, 감속 시, 속도 곡선이 절환되는 시간은 0.3[s]동안은 2차 함수로, 0.4[s]동안은 1차 직선 함수로, 나머지 0.3초 동안은 다시 2차함수로 연속적인 구간 절환이 되도록 하였다.

그림 5는 본 논문에서 적용한 Finite Jerk방식에 의한 진동값에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과이다. Finite Jerk 방식을 적용한 경우, 최대 진동 가속도는 0.295[G]로 사다리꼴 속도 곡선을 적용시와 비교할 때 진동은 22.98 [%] 감소하였으며, 이때의 실험치는 0.29[G]로 매우 만족스러운 결과를 얻었다.

즉, 두 가지 경우의 속도 패턴에 의한 시뮬레이션 결과와 실제 실험치가 거의 오차가 없는 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 가속도의 미분치인 Jerk가 유한한 값을 갖는 finite jerk 방식의 적용만으로는 고속·유연한 로봇 운동의 구현은 다소 미흡하였다.



(a) 진동 이론치 (b) 진동 실험치
그림 5. Finite Jerk에 의한 진동 특성

2.3 유전알고리즘을 이용한 회전자 관성의 최소화

2.3.1 회전자 관성

BLDC 전동기는 제어성능이 우수하여 고속, 유연한 움직임을 필요로 하는 분야에 많이 쓰인다. 이런 유연한 움직임을 위해서는 기동시, 정지시, 가감속시의 제어 및 운전특성이 좋아야 한다. 또한 이런 제어 운전특성은 BLDC 전동기의 회전자 관성에 많은 영향을 받는다. 회전자 관성에 관한 식은 다음과 같다.

$$\text{회전자 관성(Rotor Inertia)} = \frac{1}{4} GD^2 [kg \cdot m^2]$$

(G: 회전자 질량, D: 회전자 직경=계자직경)

이때, 회전자 질량 계산시 회전자 각 부의 밀도와 부피를 고려하여 계산하였다.(Nd 자석의 밀도 : 7.5 g/cm³ 규소강판의 밀도(Fe) : 7.9 g/cm³) 회전자 질량은 다음 식을 이용하였으며 질량계산시 Shaft 질량과 홀센서의 질량은 일정하게 두었다.

$$\begin{aligned} \text{회전자 전체질량} &= \text{영구자석 질량} + \text{요크 질량} \\ &+ (\text{Shaft 질량} + \text{홀센서의 질량}) \end{aligned}$$

2.3.2 유전알고리즘을 회전자 관성의 최소화

표 2. 설계변수의 탐색범위

설계변수	탐색범위
회전자 직경(X1)	3.5 ≤ X1 ≤ 4.5
자석 두께(X2)	0.25 ≤ X2 ≤ 0.35
계자축방향 길이(X3)	1.55 ≤ X3 ≤ 1.95
전기자 권선수(X4)	300 ≤ X4 ≤ 360

BLDC 모터의 회전자 관성의 최소화를 목표로 하였으므로, 목적함수로써 BLDC 모터의 회전자 관성으로 설정

하였다. 그러나 회전자 관성만을 목적함수로 선정할 경우 전동기의 효율이 감소할 수 있으므로 본 최적화에서의 제약조건을 기본 모델의 회전자 관성 0.917 [kg.cm²] 이하로, 효율에 대하여 87.1[%] 이상으로 제약조건을 설정하였으며, 설계 변수로는 회전자 관성과 효율에 크게 영향을 미치는 회전자 직경, 자석두께, 계자축방향 길이 및 전기자 권선수를 선정하였다[2].

2.3.3 최적화 결과 및 특성해석

회전자 관성과 효율에 대해서 앞서 제시한 제약조건을 두고, 설계변수의 탐색범위를 표 2와 같이 반영하여 유전알고리즘에 적용하였다. 그럼 6에 적용한 유전알고리즘의 최적화 수렴과정을 나타내었으며 최적설계시의 파라메터는 표 3과 같다. 유전알고리즘에 의한 최적 설계시, 회전자 관성이 기본 모델에 비해 34.3 [%] 감소를 하였으며, 이때 효율은 표3과 같이 0.1[%] 증가 하였다. 유전알고리즘에 의한 최적화 수행 후, 추출된 설계변수들은 검증을 위해 유한요소법으로 특성해석을 수행하였다.

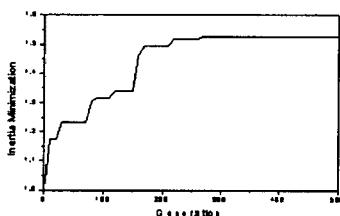


그림 6. 유전알고리즘의 수렴특성

표 3. 유전알고리즘에 의한 최적화 수행결과

설계변수 및 목적함수	초기 모델	회전자 관성
회전자 직경(X1)[cm]	3.93	3.54
자석 두께(X2)[cm]	0.3	0.33
계자축방향 길이(X3)[cm]	1.76	1.58
전기자 권선수(X4)[Turns]	328	360
회전자 관성[kg.cm ²]	0.917	0.602
효율[%]	87.1	87.2

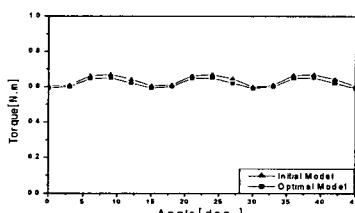


그림 7. 토크 특성

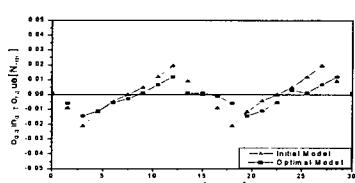


그림 8. 코킹 토크

그림 7은 초기 모델과 최적 모델의 토크특성을 비교한 것이다. 최적 모델의 발생 토크가 기본 모델의 토크와 다소 다르게 나타난 것은 최적 모델의 권선수 변화에 따른 상전류의 위상이 다르기 때문이다. 이 점을 감안하면 최

적화 결과가 타당함을 알 수 있다.

코킹 토크를 계산한 결과를 그림 8에 나타내었다. 코킹 토크도 최적 모델이 감소하였으며 토크 리플도 줄었다. 그러나, 코킹토크는 토크 리플로 작용하여 BLDC 모터의 진동에 치명적인 영향을 미치게 되므로 코킹 토크를 더욱 더 줄이기 위하여 모터의 회전자 영구자석을 1/2 슬롯피치 만큼 스큐를 시행하였다. 그림 9은 1/2 스큐를 시행한 후의 토크특성이다.

스큐를 시행하기 전과 비교하여 토크의 크기에서는 약간의 감소를 보였지만, 반면에 코킹 토크는 현저히 감소하여 토크 리플이 크게 감소하였다.

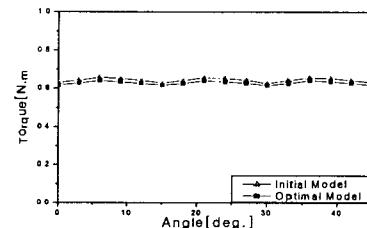


그림 9. 1/2 스큐를 적용한 토크특성

2.4 저관성 최적모델의 Finite Jerk방식 적용

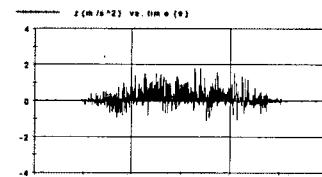


그림 10. 최적 설계 모델의 진동특성

최적 설계 된 모터의 진동 저감 여부를 파악하기 위하여 최적 설계 모델인 저관성 모터에 Finite Jerk방식을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 이를 그림 10에 나타내었으며, 진동 가속도의 최대치는 0.187[G]로 Finite Jerk 방식을 적용한 기본 모델의 최대 진동치와 비교시 63.4[%]로 대폭 감소하였다. 한편, 기본 모델에 기존의 사다리꼴 속도 구동방식에 의한 진동치와 비교하면 48.8[%]로 대폭 감소하여 만족스러운 결과를 얻었다.

3. 결 론

본 논문에서는 로봇 구동용으로 많이 사용되는 BLDC 전동기에 대하여 속응성의 향상 및 전동 최소화를 위하여 유전알고리즘을 이용한 관성 최소화 설계를 수행하였으며, 실제 구동 시 인가된 속도 프로파일에 의한 전동의 최소화를 위하여 Finite Jerk방식의 속도 패턴을 제시하였다.

그 결과 관성 최소화 최적 설계시 기준의 서보 모터에 비해 관성이 2/3으로 감소하면서도 동일한 토크 특성을 얻을 수 있었으며, 관성의 감소로 인하여 속응성이 향상되었다. 또한, 최적 모델의 경우, Finite Jerk 방식의 속도 구동으로 기본 모델에 비해 전동 최대치가 63.4[%]로 대폭 감소하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Gyu-tak Kim, et'al 4, "Vibration minimization of PM LSM by using the Jerk continuity acceleration curve", IC EMS '2004, PF-3,pp. 163, 2004. 11.
- [2] 진강규, "유전알고리즘과 그 응용", 교우사, 2002.