

고정밀 체결토크 성능 너트런너 시스템 개발

김윤현¹, 김솔^{2*}

¹한밭대학교 전기공학과, ²유한대학교 전기공학과

Development of High Precision Fastening torque performance Nut-runner System

Youn-Hyun Kim¹, Sol Kim^{2*}

¹Department of Electrical Engineering, Hanbat University

²Department of Electrical Engineering, Yuhan University

요약 현재 자동차 산업과 함께 발전하고 있는 전자제품을 포함하는 전반적인 제조업 분야에서 초정밀 제어를 요하는 너트 체결기가 요구되고 있고 너트 체결시의 중요한 성능 요소는 체결력 부족에 의한 풀림과 과도한 체결에 의한 파손 및 강한 진동이나 외부 충격에 강건한 체결력 유지 등 조립 품질의 유지와 향상 및 제품 수명 보장을 위해 정확한 조임 토크, 각도 등이 요구된다. 현재 너트런너라는 제품명으로 판매되는 너트 체결기는 고토크 및 정밀토크제어, 정밀 각도제어 그리고 생산량 증대를 위한 고속운전 등의 특성들이 필요하며 고효율이 가능한 BLDC모터 및 너트체결기 전용의 정교한 토크제어에 필요한 고정밀 토크제어드라이버와 고속, 저속, 고응답의 정밀 속도 제어시스템의 개발이 요청되고 있으나 현재 고객이 요구하는 고정밀, 고토크 및 고속 작업특성을 만족시키지 못하고 있다. 따라서 본 논문에서는 정확한 체결 토크 및 고속 회전에서도 저진동 및 저소음을 구현할 수 있는 d 축, q 축의 좌표변환에 의한 벡터제어와 토크제어기반의 BLDC모터 가변속 제어와 너트런너의 제어 기술을 제안하고 여러 실험을 통해 성능 결과를 분석하여 제안한 제어가 너트런너 성능을 만족하는지를 확인 하였다. 또한 일단 운전 체결 방식(One Stage 운전 체결 방식)으로 패턴을 프로그래밍하여 10,000[rpm] 고속 운전 후 목표 토크로 정확히 체결됨을 확인하였으며 토크 리플에 의한 가체결 토크 검출의 문제점도 외관관측기를 사용하여 해결하였고 실험을 통해 검증하였다.

Abstract Nut fasteners that require ultra-precise control are required in the overall manufacturing industry including electronic products that are currently developing with the automobile industry. Important performance factors when tightening nuts include loosening due to insufficient fastening force, breakage due to excessive fastening, Tightening torque and angle are required to maintain and improve the assembling quality and ensure the life of the product. Nut fasteners, which are now marketed under the name Nut Runner, require high torque and precision torque control, precision angle control, and high speed operation for increased production, and are required for sophisticated torque control dedicated to high output BLDC motors and nut fasteners. It is demanded to develop a high-precision torque control driver and a high-speed, low-speed, high-response precision speed control system, but it does not satisfy the high precision, high torque and high speed operation characteristics required by customers. Therefore, in this paper, we propose a control technique of BLDC motor variable speed control and nut runner based on vector control and torque control based on coordinate transformation of d axis and q axis that can realize low vibration and low noise even at accurate tightening torque and high speed rotation. The performance results were analyzed to confirm that the proposed control satisfies the nut runner performance. In addition, it is confirmed that the pattern is programmed by One-Stage operation clamping method and it is tightened to the target torque exactly after 10,000 [rpm] high speed operation. The problem of tightening torque detection by torque ripple is also solved by using disturbance observer Respectively.

Keywords : BLDC Motor, Fastened Torque, Nut-runner, One Stage Bolt Fastened Method, Vector Controller

*Corresponding Author : Sol Kim(Yuhan Univ.)

Tel: +82-2-2610-0733 email: slamsol@yuhan.ac.kr

Received December 10, 2018

Revised January 22, 2019

Accepted April 5, 2019

Published April 30, 2019

1. 서론

자동차 산업의 발전 및 글로벌 자동차 회사들의 부품 구매증대에 따른 국내 자동차 부품 산업의 발전과 생산량 증대 그리고 세계 일등 제품을 생산하고 있는 가전 및 전자제품 수요증대 등으로 각 업종별, 제품별 작업 효율 및 생산성 향상이 요구되는 있으며 현재 제품생산의 많은 부분을 볼트 체결작업이 차지하고 있다. 따라서 너트 체결작업의 효율 증대를 위해서 너트 체결기의 중요성이 대두되고 있으며 특히 저가 노동력을 앞세운 중국을 포함한 동남아시아에서 생산되는 제품대비 가격 경쟁력 확보 및 품질향상을 위해서도 본 너트 체결기의 성능 향상이 요구되고 있고 자동차 산업과 함께 발전하고 있는 전자제품을 포함하는 전반적인 제조업 분야에서 초정밀 제어를 요하는 너트 체결기가 요구되고 있어 이에 따른 시장 또한 비약적인 성장세를 이루고 있다. 너트 체결시의 중요한 성능 요소는 체결력 부족에 의한 풀림과 과도한 체결에 의한 파손 및 강한 진동이나 외부 충격에 강건한 체결력 유지 등 조립 품질의 유지와 향상 및 제품 수명 보장을 위해 정확한 조임 토크, 각도 등이 요구된다.

따라서 현재 너트런너라는 제품명으로 판매되는 너트 체결기는 고토크 및 정밀토크제어, 정밀 각도제어 그리고 생산량 증대를 위한 고속운전 등의 특성들이 필요하며 고출력이 가능한 BLDC모터 및 너트체결기 전용의 정교한 토크제어에 필요한 고정밀 토크제어드라이버와 고속, 저속, 고응답의 정밀 속도 제어시스템의 개발이 요청되고 있으나 현재 고객이 요구하는 고정밀, 고토크 및 고속작업특성을 만족시키지 못하여 정밀 제어가 가능한 체결기와 드라이버의 수요도 함께 비약적으로 증대됨에도 불구하고 대부분 고가의 일본 또는 독일의 제품들을 사용하고 있어 수입 대체 효과와 수출증대의 기대를 위해서도 국산화 개발이 절실하다. 현재 나사체결기의 기존연구는 전무한 상태이며 주로 볼트의 조임력과 체결 풀림에 대한 역학적 연구가 대부분이고 너트런너의 사용자 경험에 의한 체결 성능의 분석 정도가 제시되고 있다 [1-5]. 또한 너트런너의 구동에 대한 연구는 DC모터나 2상유도기의 고전적 사용 모터의 적용에 대한 연구로 너트런너에 필요한 서보급 성능이 요구되는 BLDC 등 교류모터의 구동제어에 관한 연구는 아직까지 수행되지 않았다[6,7]. 따라서 본 논문에서는 정확한 체결 토크 및

고속 회전에서도 저진동 및 저소음을 구현할 수 있는 d 축, q 축의 좌표변환에 의한 벡터제어와 토크제어기반의 BLDC모터 가변속 제어와 너트런너의 제어 기술을 제안하고 여러 실험을 통해 성능 결과를 분석하여 제안한 제어가 너트런너 성능을 만족하는지를 확인 하고자 한다.

2. BLDC 속도와 토크 제어

2.1 너트런너 운전제어

Fig. 1에 너트런너의 운전체결 방식을 나타내었다. 너트런너는 크게 First Stage, Second Stage 운전 체결 방식, Quick Stage 운전 체결 방식, One Stage 운전 체결 방식의 3가지 운전 체결 방식을 가진다. First Stage, Second Stage 운전 체결 방식은 F-START 접점을 ON 하면 First Stage 고속운전 설정 회전수까지 고속 운전한 뒤 중속으로 운전하고 중속운전 중 First Stage 목표토크에 도달하면 정지한 뒤 COMP 접점을 출력한 후 COMP 출력신호를 TRIGGER하여 S-START 접점을 ON하면 Second Stage 저속 운전하며 저속운전 중 Second Stage 목표토크에 도달하면 운전을 종료하고 COMP 접점을 출력한다. Quick Stage 운전 체결 방식은 별도의 second stage 시작 신호가 없이 자동으로 second stage로 운전되는 것만 다르고 전 과정은 First Stage, Second Stage 운전 체결 방식과 같다.

One Stage 운전 체결 방식은 F-START 접점을 ON하면 First Stage 고속으로 운전하고 First 목표토크에 도달하면 중속으로 운전하며 중속운전 중 목표토크에 도달하면 운전을 종료하고 COMP 접점을 출력한다.

본 논문에서는 One stage 운전 체결 방식을 적용하여 고속 회전 중 First Stage 목표 토크에 도달하여 가체결 되면 중속대신 저속으로 변경 운전하여 목표 토크에 도달하는 방식으로 성능을 검증하고자 한다.

2.2 구동 제어기 구성

Table 1은 본 논문에서 시험하는 너트런너의 구동 드라이브 사양을 나타내었다. 고속에서 10,000[rpm] 이상의 속도로 운전되고 체결시에는 20[N.m] 이상의 토크를 발생하며 속도의 변동이 적도록 위치/속도 센서를 1,024 펄스급 엔코더를 사용하여 벡터제어형 토크제어로 체결 토크의 정밀도를 향상시켰다. 구동 드라이브는 MOSFET를

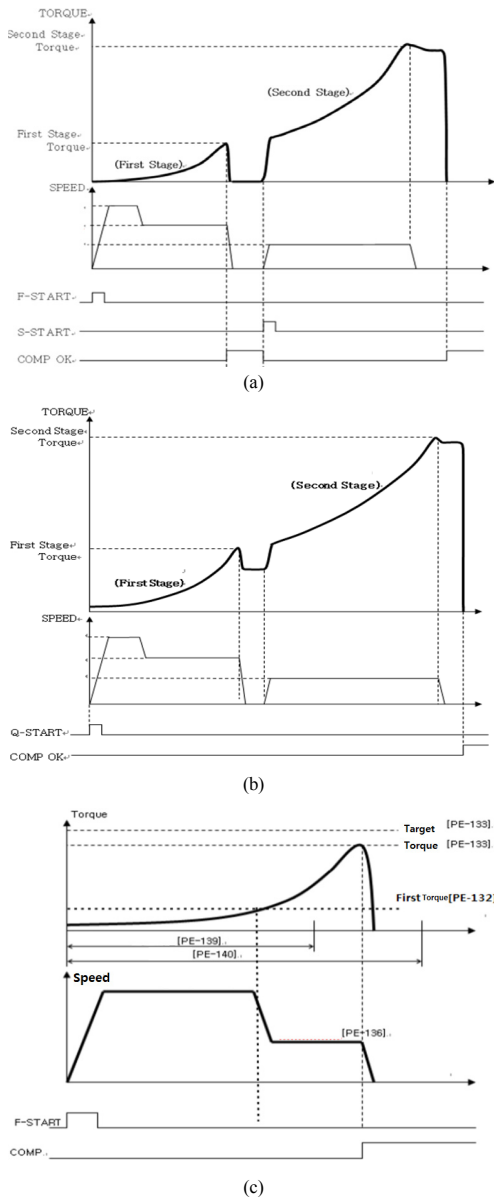


Fig. 1. Bolt fastened method
 (a) First Stage, Second Stage bolt fastened method, (b) Quick Stage bolt fastened method, (c) One Stage bolt fastened method

사용한 PWM 인버터로 구성하여 3상 BLDC모터를 구동하고 전류검출 방식은 셉트저항을 이용한 Low Side 전류 검출 방식을 적용하여 전류제어를 구현하였다. 또한 속도 제어 정밀도는 $\pm 5\%$ rpm 이내로 하여 속도제어기를 구현하였다.

Table 1. Specification

Spec.	Value	Unit
Input Voltage	48	V _{dc}
Target Torque	20	N.m
Maximum Speed	10,000	rpm
Mortor Power	500	W

운전 제어 방식은 One stage 운전 체결 방식으로, 고속운전에서 급제동하여 거의 0[rpm] 속도에 해당하는 저속으로 목표토크에 도달하는 방식의 알고리즘을 적용하였으며 토크센서를 이용하여 급제동 구간을 정하려 하였으나, 토크의 변화량이 너무 작아 오버토크 현상이 발생하여, 별도의 외란 움직임 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 따라서 본 제어기는 빠른 속도 응답과 정밀한 토크 제어가 요하므로 TI사의 TMS320F28335의 고성능 DSP를 사용하여 제어 알고리즘을 구현하였다.

Fig. 2는 BLDC 전동기의 속도와 토크 제어기 및 구동 드라이브의 블록 다이어그램이다. 모터의 속도를 증가시키려면 모터의 인가 전압을 높여야하는데 10,000[rpm]까지 고속운전에는 인버터 출력전압이 부족하여 인버터 출력전압을 13%까지 증가시킬 수 있는 인버터 스위칭 방식인 공간벡터 PWM 방식을 적용하여 모터의 인가전압을 높여 회전속도를 증가시켰다. 제어부는 속도 제어기, 전류제어기, 전류 벡터 제어 알고리즘을 적용하였다. Fig. 3은 벡터제어형 전류제어기의 블록도이다.

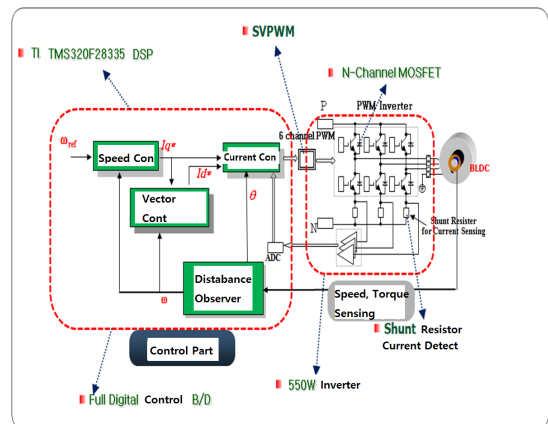


Fig. 2. Block Diagram of BLDC Controller

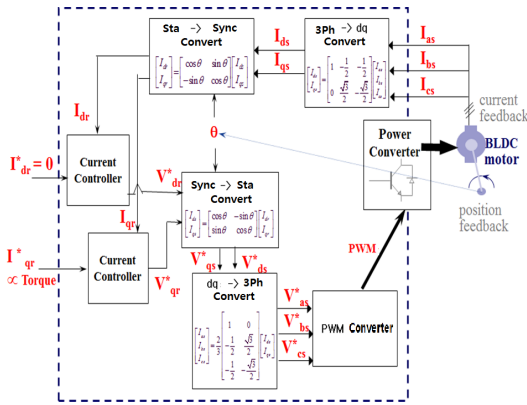


Fig. 3. Block Diagram of Current Controller

BLDC모터의 로터에 부착된 영구자석의 자속 위치 θ 를 검출하여 토크가 최대가 발생하고 자속의 변동이 없도록 속도제어기의 토크분 전류 I_q 와 자속분 전류 I_d 는 0으로 하여 전류제어를 수행한다. 이때 3상 모터를 2상의 d_q 좌표계로 변환하여야하고 d_q 좌표도 정지좌표계와 모터의 로터와 동기속도로 회전하는 회전좌표계로 변환하여야한다. 3상과 2상의 정지좌표계와 회전좌표계의 변환식은 다음과 같다.

식 (1)은 3상과 2상의 정지좌표계의 변환식이고 식 (2)는 정지좌표계와 회전좌표계의 변환식이다.

$$\begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

$$I_{dr} = I_{ds}\cos\theta + I_{qs}\sin\theta$$

$$I_{qr} = -I_{ds}\sin\theta + I_{qs}\cos\theta$$

$$I_{ds} = I_{dr}\cos\theta - I_{qr}\sin\theta$$

$$I_{qs} = I_{dr}\sin\theta + I_{qr}\cos\theta$$

(2)

2.3 관측기를 이용한 속도 리플 보상

One stage 운전 체계를 위해서는 가체결 토크 시점을 빨리 검출하여야한다. 그렇지 않으면 고속에서 속도를 감속하지 못하여 과도한 체결이 되어 목표 토크로 체결이 불가능하게 된다. 그러나 토크 센서의 출력이 노이즈 성분이 많이 포함되고 토크 리플과 진동 등으로 정확한 가체결 시점을 검출하는데 어려운 점이 있다. 따라서 본 제어기에는 외란 관측에 의해 가체결 토크를 추정하였으며 외란 관측기를 구성하기 위한 상태방정식은 아래 식 (3), (4)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{w} \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_{o1} & (-\frac{1}{J}) \\ -k_{o2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{w} \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{o1} \\ k_{o2} \end{bmatrix} (w - \hat{w}) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (3)$$

$$y = [1 \ 0]x = w \quad (4)$$

여기서 w 는 속도, T_d 는 외란추력, J 는 회전체의 관성 모멘트, T_e 는 구동토크이고, \hat{w} 는 추정속도, \hat{T}_d 는 추정 외란이다. 위 식을 기반으로 외란 옵저버 속도제어기의 블록도는 Fig. 4와 같이 구성하였다. 일반적인 속도 제어기에 외란 관측기를 사용하여 추정 속도의 리플을 최소화 시켰으며 외란 관측기를 사용한 속도제어기를 적용하여 속도제어의 안정성을 높였다.

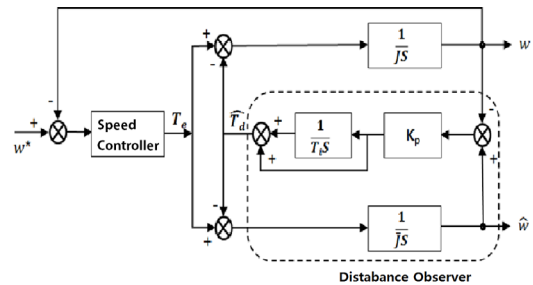


Fig. 4. Block Diagram of Disturbance Observer Speed Controller

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 너트런너 실험장치로 ① 외부 토크 센서용 표시 장치, ② 너트런너 제어 및 표시 장치, ③ 너트런너 틀(모터, 기어, 토크센서, 엔코더,홀센서 내장), ④ 외부 토크 센서로, 본 시험으로 핸드헬드 너트런너로 볼트를

체결 하였을 시 얼마나 정밀하게 목표 토크로 체결 되는 지를 시험 하였다. 외란 관측 제어를 적용, 단일(One stage) 운전 체결 방식으로 볼트를 체결하여 목표 토크 대비 정밀도를 확인 하고자 외부 토크센서에 가해지는 토크를 ①번 외부 토크센서용 표시장치로 확인 하고, 무선너트런너의 내부에 조립된 내부 토크센서의 토크와 목표토크를 ②번 무선너트런너용 제어 및 표시 장치를 통하여 비교 확인하였다. 여기서 목표 토크는 17.0[N.m]로 하였으며 Fig. 6은 Fig. 5의 ②의 너트런너 제어 표시장치의 목표토크 지령치와 Fig. 5의 ①의 실제 체결된 토크의 표시를 보여주고 있다.

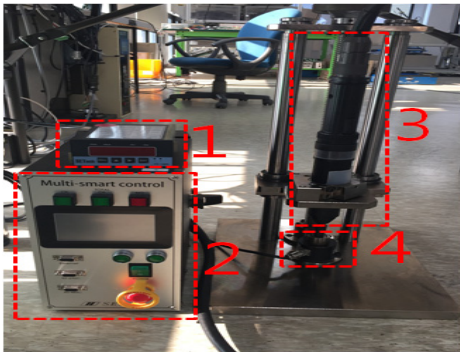
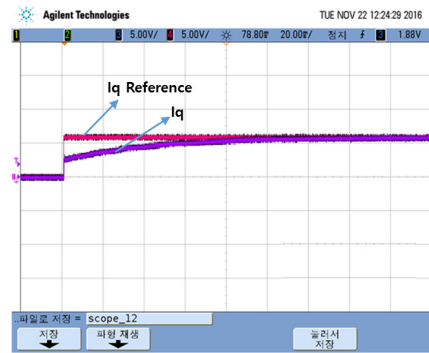


Fig. 5. Test Jig

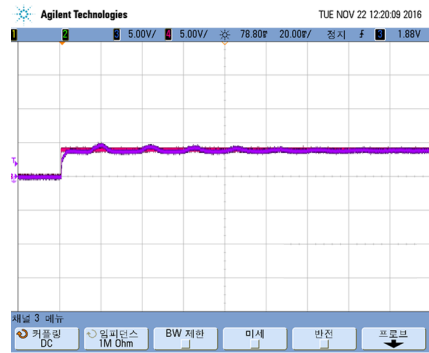


Fig. 6. Display of Target and measuring Torque

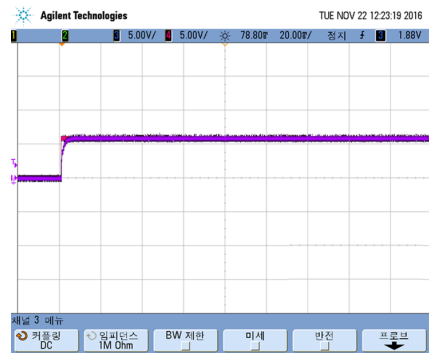
Fig. 7은 본 시스템의 전류제어기의 실험파형으로 P와 I 게인에 따른 토크 전류 I_q 전류지령과 실제전류를 나타내었다. 그림에서 I_q 전류 5[A]에 대해 a)는 게인이 작은 경우로 I_q 지령치에 수렴하는데 80[ms]가 걸려 전류 제어 응답성이 너무 느리게 동작하고, b)의 게인이 큰 경우는 1[ms] 이내로 응답성은 빠르지만 오버슈트가 발생하고 급가감속 및 토크 변동율이 클 경우 전류 제어가 헛터하여 전류 제어가 발산 할 우려가 있다. c)는 최적의 게인으로 튜닝한 파형으로 약 2.5[ms] 이내 응답성과 오버슈트가 없어 가장 안정된 최적 값으로 판단됨을 시험



(a)



(b)

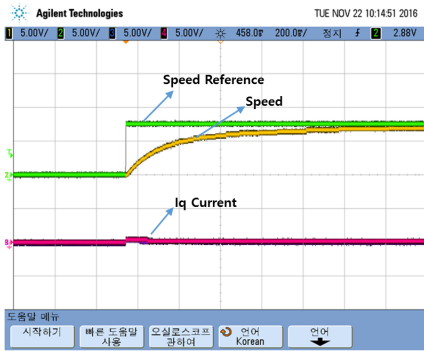


(c)

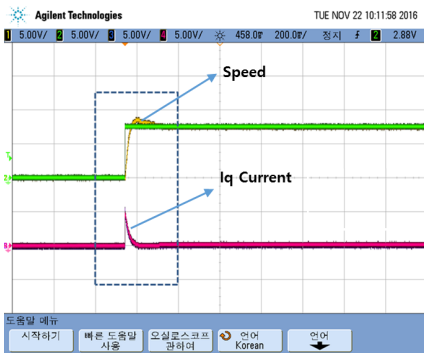
Fig. 7. Current Waveform according to Gain (a) Low PI Gain of Current Controller, (b) High PI Gain of Current Controller, (c) Optimum PI Gain of Current Controller

을 통해 확인 할 수 있으며 이 게인으로 체결운전을 수행하고자 한다.

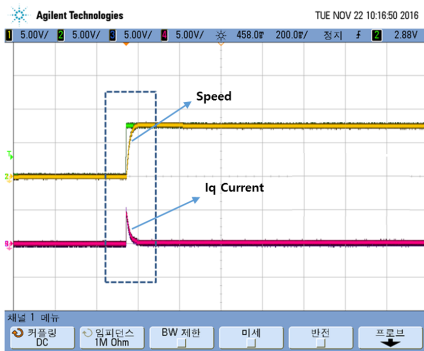
Fig. 8은 목표속도 10,000[rpm]에 대한 각 게인에 따른 속도제어기의 실험파형이다. 속도 제어기는 운전속도가 빠른 시간 내에 목표속도에 오버슈트 또는 언더슈트 없이 안정적으로 도달하게 하는데 목적이 있으며 그러기 위해서는 모터에 맞는 최적의 PI 게인을 찾아야 한다. 그



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Speed Waveform according to Gain
(a) Low PI Gain of Speed Controller, (b) Low PI Gain of Speed Controller, (c) Optimum PI Gain of Speed Controller

림에서 속도 지령치 10,000[rpm]에 대하여 a)는 게인이 작은 경우로 10,000[rpm]에 도달하는데 시간이 약 1,400[ms]로 응답성이 너무 느리게 동작하고 전류 또한 크게 변화하지 않는다는 것을 확인 할 수 있다. b)는 게인이 큰 경우로 응답성은 빠르지만 오버 슈트가 발생하고 기동 시 I_q 전류도 커지는 것을 확인 할 수 있다. c)는

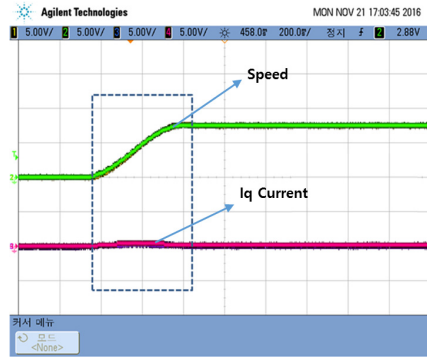


Fig. 9. Speed Waveform for Smooth Start operation

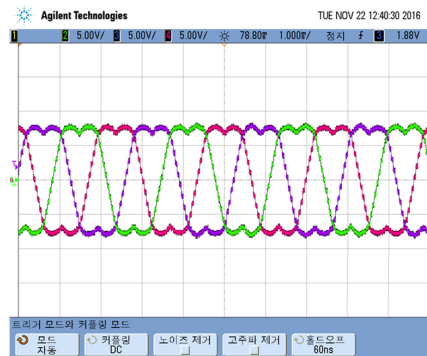


Fig. 10. 3 Phase SVPWM Voltage Waveform

최적의 게인으로 튜닝한 파형으로 속도지령치에 대해서 오버슈트 없이 약 100[ms]이내로 추종하고 기동시 I_q 전류도 줄어 든 것을 확인 할 수 있으며 가장 안정된 최적 값으로 판단되어 이 게인으로 체결운전을 수행하고자 한다. 또한 모터 초기 기동시 목표 속도를 높게 설정 하면 높은 기동 토크를 요구하며 기동 순간 높은 전류가 흐르게 되어 진동 등의 원인으로 작용하여 실제 속도지령은 진동 없이 부드럽게 기동하기 위해 속도 패턴 운전을 하여 토크 및 전류가 순간 증가하는 현상을 피 할 수 있다. Fig. 9 파형은 Sine 속도 패턴을 적용한 것으로서 목표 속도에 도달하는 시간이 다소 지연이 되기는 하지만, 모터 기동 시 높은 전류 없이 잘 수행됨을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 공간벡터PWM(SVPWM)의 전압지령 파형이다. 공간벡터 PWM을 적용 하면 최대 13%까지 출력 전압을 증가시킬 수 있고 따라서 모터의 최대 속도를 향상시킬 수 있다. Fig. 10에서 출력전압 파형이 3고조파 성분을 포함한 공간벡터PWM 파형으로 잘 발생됨을 확인하였다.

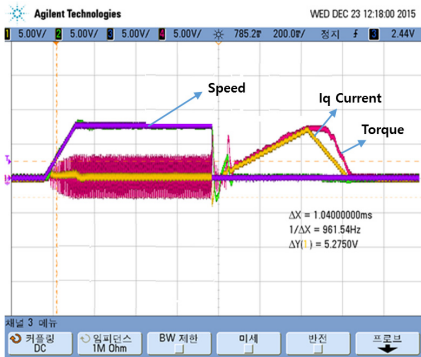


Fig. 11. One Stage bolt fastened Operation

Fig. 11은 실제로 일단 운전 체결 방식(One Stage 운전 체결 방식)으로 패턴을 프로그래밍하여 운전한 파형으로 10,000[rpm] 고속 운전 후 First 토크에 도달하면 속도를 0[rpm]으로 감속 하였다. First 토크에 도달 한 것은 나사가 다 조여져 모터가 회전 하지 못하는 Stall 영역이라는 뜻이며, 이때 고속 운전에서 갑자기 0[rpm] 제어 후 목표토크 추종을 위한 전류 상승을 하면 회전 관성에 의하여 충격파가 사용자에게 가해지게 된다.

이 급정지 충격파를 완화하기 위하여 약 100[ms]정도의 지연 시간 후 목표 토크 추종을 위한 전류 상승을 하여 목표토크 까지 토크 제어를 하였으며 목표 토크 도달 후 바로 I_q 전류를 0으로 하면, 토크가 약간 떨어지는 현상이 있어 I_q 전류를 200[ms] 동안 서서히 감소했다. 그림에서 목표 토크로 정확히 체결되고 토크가 감소됨을 확인하였다. 그러나 고속 운전 시 토크 리플이 많이 발생하여 정확한 First 토크 감지 시점을 찾기가 어려운 점이 있고 First 토크 감지 시점이 조금이라도 늦으면 가체결 First 토크 감지 후 0[rpm]으로 감속할 때 진동이 발생하는 현상이 그림과 같이 나타나게 됨을 확인하였다. 따라서 토크 리플에 의한 가체결 토크 검출의 문제점을 해결하기 위하여 외관관측기에 의한 토크 리플 저감운전을 하였다. Fig. 12는 운전 실험 파형으로 토크 리플을 최소화 하여 정확하고 빠른 가체결 시점을 일정하게 검출할 수 있어서 fig. 12와 같이 진동과 리플이 현저히 감소한 결과를 도출하고 제품의 안전성에 개선이 됨을 확인 할 수 있었다.

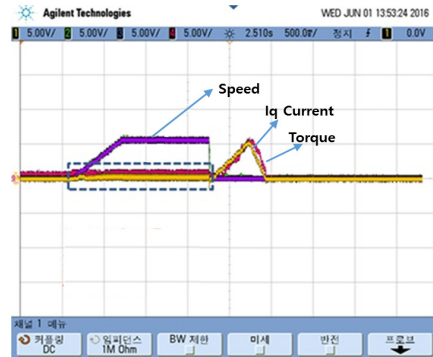


Fig. 12. One Stage bolt fastened Operation with low torque ripple

4. 결론

값이 위치오차 값을 찾아가며 추정위치가 실제 벡터 위치로 잘 수렴해감을 알 수 있어 정지좌표계상 상태관측기 센서리스 제어의 단점을 보완한 안정된 센서리스 제어를 구현할 수 있었다. 본 논문에서는 상태 관측기를 사용하여, d 축, q 축의 역기전력을 추정하여 추정한 역기전력을 기반으로 회전자의 위치 및 속도 정보를 추종하였다. 또한 추종한 회전자의 정보를 활용하여 PMSM 센서리스 속도 제어가 실제 산업 현장에서 활용이 가능한 결과를 낼 수 있는지에 대한 성능을 평가를 위해 최근 친환경 산업 개발로 영향력이 확대되고 있는 무급유식 공기압축기에 PMSM을 결합하여 최고 속도 3400[rpm]까지의 동작 패턴에 맞추어 PMSM을 구동 하여, 회전자 정보 추종과 속도 제어의 결과를 분석하였다. 본 논문에서 수행한 방법에 의해 추종된 회전자의 정보로 센서리스 구동 시 속도지령에 맞추어 속도제어가 원활히 운전되어 센서리스 제어의 가능성을 확인하였으며 실험으로부터 만족스러운 구동 결과를 도출하였다. 그러나 추종한 회전자 위치정보와 실제 모터의 회전자 정보에는 사용한 저역 통과 필터(Low Pass Filter)의 차단주파수와 모터의 파라미터의 부정확성에서 오는 오차가 발생하였다. 이 오차를 줄이기 위해서 속도 별 위상 보상을 사용하는 등의 추가적인 연구를 진행하여 향후 추정 오차를 보상 하고자 한다.

References

- [1] B.I. Kang, S.H. Kil, Y.D. Joe, "Research of Double Nut fastening method to prevent bolt from loosening", Korean Society of Mechanical Engineers, Proceeding of Spring Conference, pp. 300-301, 2018.
- [2] Gi-Young Choi, Jea-Il Choi, Jong-Chan Park, Heoung-Jae Chun, "The Study about the Effect of clamping Torque due to Bolted Joint on the Characteristic Length of Composite", Korean Society of Mechanical Engineers, Proceeding of Spring Conference, pp. 368-369, 2017.
- [3] Hyung-Jun Lee, Jong-Sik Kim, "A Study on the Failure of the Final Reduction Gear Pad Bolt in the Tactical Vehicle" Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 18, No.2, pp. 281-287, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.17958/ksmt.18.2.201604.281>
- [4] Seoungyeon A. Oh, Robert G Radwin, Frank J. Fronczak, "A Dynamic Mechanical Model for Hand Force in Right Angle Nutrunner Operation", Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol.39 No.3, pp.497-506, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1518/001872097778827133>
- [5] Jia-Hua Lin, Raymond W McGorry, Chien-Chi Chang, Patrick G Dempsey, "Effects of user experience, working posture and joint hardness on powered nutrunner torque reactions", Ergonomics, Vol.50 No.6, pp.859-876, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1177/154193120404801201>
- [6] Jung Youn Lee, Jung Woo Lee, Jun Ho Lee, "Indirect Measurement of Auto Screw Drive's Torque Using Current Signals of DC Motor" Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.13, No.2, 88-93, 2004.
- [7] Gi-Yeop Kim, Il-Hwan Kim, Chan-Woong Park, "A Two-phase Servo Motor Control Circuit for the Nut-Runners employing the Tightening Torque Control Method", Institute of Control, Robotics and System Proceeding of Korean Automatic Control Conference, Vol.1, No.1, 312-316, 1987.

김 솔(Sol Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2002년 12월 ~ 2005년 8월 : 전기기기인력양성센터 수석연구원
- 2005년 9월 ~ 현재 : 유한대학교 전기공학과 교수

<관심분야>
전기기기, 자동화설계

김 윤 현(Youn-Hyun Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1989년 3월 ~ 1999년 2월 : LG산전연구소 책임연구원
- 2003년 4월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 교수

<관심분야>
전기기기, 전력전자