



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년05월04일  
(11) 등록번호 10-2248547  
(24) 등록일자 2021년04월29일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H02P 21/05 (2006.01)

(52) CPC특허분류  
H02P 21/05 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2018-0043914

(22) 출원일자 2018년04월16일

심사청구일자 2019년01월24일

(65) 공개번호 10-2019-0120568

(43) 공개일자 2019년10월24일

(56) 선행기술조사문헌

JP2013118817 A\*

JP2014053988 A\*

KR1020050073964 A\*

\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

단국대학교 산학협력단

경기도 용인시 수지구 죽전로 152(죽전동, 단국대학교내)

(72) 발명자

고종선

경기도 성남시 분당구 판교원로 7, 403동 1703호  
(운중동, LIG건영아파트)

정성철

경기도 성남시 중원구 광명로347번길 16, 301호

이익선

경기도 성남시 분당구 정자일로 80, 404동 1204호  
(정자동, 임광보성아파트)

(74) 대리인

특허법인이상

전체 청구항 수 : 총 8 항

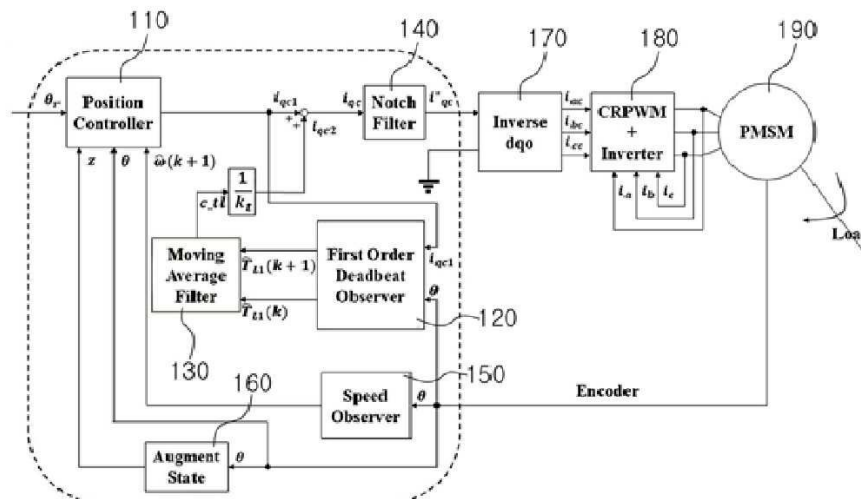
심사관 : 이준건

(54) 발명의 명칭 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 시스템 및 제어방법

(57) 요약

PMSM 동작시 발생하는 진동을 제거하기 위한 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 시스템 및 제어방법이 개시된다. 이는 PMSM에 부하를 인가하거나 또는 기구부가 가지고 있는 고유 진동 주파수에 의해 발생하는 진동을 제거하기 위해 추가 상태 레환 제어를 위한 위치제어기 및 종래의 0차 데드비트 관측기에서 1차 데드비트 관측기로 차수를 증가시켜 시스템에 적용함으로써 높은 주파수의 진동요소에 강인하고 정밀한 위치 및 속도 제어가 가능하다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	10062242
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국산업기술평가관리원
연구사업명	산업기술혁신사업
연구과제명	이동 및 산업용 로봇에서 10% 이상의 에너지 회수와 정격 부하 내 부하 변동 시 계
인	재투닝이 없으며 오버슈트 0.2 radian 이내인 하이브리드 제어기 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	단국대학교 산학협력단
연구기간	2017.01.01 ~ 2017.12.31

---

**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

외란의 보상 입력을 생성하기 위해 동기전동기의 위치, 속도 및 추가 상태 궤환 신호를 피드백 받고, 외란의 영향을 증가 전류로 보상하는 위치제어기;

상기 동기전동기의 위치 신호와 상기 위치제어기의 출력 신호를 입력받아 외부 외란을 제어하는 1차 데드비트 관측기;

상기 1차 데드비트 관측기의 출력 신호를 입력받고, 상기 1차 데드비트 관측기의 잡음을 제거하기 위한 MA 필터;

상기 위치제어기와 상기 MA 필터의 출력 신호가 가산된 신호를 입력받고, 진동 유발의 원인이 되는 특정 주파수의 성분을 제거하는 노치필터;

상기 동기전동기의 출력 신호를 엔코더를 통해 피드백 받고, 상기 동기전동기의 속도 정보 신호를 상기 위치제어기로 출력하는 속도 관측기; 및

상기 동기전동기의 출력신호를 엔코더를 통해 피드백 받고, 상기 동기전동기의 추가된 상태 궤환 신호를 상기 위치제어기로 출력하는 추가상태 제어기를 포함하고,

상기 속도 관측기는 상기 동기전동기의 위치 정보 신호를 상기 엔코더를 통해 피드백 받고, 상기 위치 정보 신호를 이용하여 관측한 속도 정보 신호를 상기 위치제어기로 출력하는 것이며,

상기 위치제어기는 상기 동기전동기의 위치 정보 신호, 상기 속도 관측기에서 관측한 속도 정보 신호 및 상기 추가상태 제어기에서 출력된 상기 동기전동기의 추가된 상태 궤환 신호를 입력받는 것인 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 시스템.

**청구항 2**

삭제

**청구항 3**

제1항에 있어서,

상기 위치제어기와 상기 속도 관측기의 출력신호를 입력받고, 입력된 신호를 이용하여 파라미터 이득을 계산함으로써 이득을 조절하는 파라미터 추정기를 더 포함하는 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 시스템.

**청구항 4**

제1항에 있어서,

상기 노치필터의 출력신호를 입력받고, 3상 전류를 생성하는 역 dq0 변환부; 및

상기 역 dq0 변환부의 출력신호를 입력받고, 상기 동기전동기로 최종명령 신호를 출력하는 드라이버를 더 포함하는 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 시스템.

**청구항 5**

제1항에 있어서,

상기 1차 데드비트 관측기는 이득으로 4×1의 행렬을 갖는 것인 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 시스템.

**청구항 6**

기준 위치 정보 신호와 동기전동기의 위치, 속도 및 추가상태 궤환 정보 신호를 위치제어기로 전달하는 단계;

상기 위치제어기의 출력신호와 상기 동기전동기의 출력신호를 1차 데드비트 관측기로 전달하는 단계;

상기 1차 데드비트 관측기의 출력신호를 MA 필터로 전달하는 단계; 및

상기 MA 필터에서 출력된 신호를 상기 위치제어기의 출력신호와 가산한 후 노치필터로 전달하는 단계를 포함하고,

상기 동기전동기의 출력 신호를 엔코더를 통해 피드백 받고, 상기 동기전동기의 속도 정보 신호를 상기 위치제어기로 출력하는 속도 관측기; 및

상기 동기전동기의 출력 신호를 엔코더를 통해 피드백 받고, 상기 동기전동기의 추가된 상태 궤환 신호를 상기 위치제어기로 출력하는 추가상태 제어기를 포함하며,

상기 속도 관측기는 상기 동기전동기의 위치 정보 신호를 상기 엔코더를 통해 피드백 받고, 상기 위치 정보 신호를 이용하여 관측한 속도 정보 신호를 상기 위치제어기로 출력하는 것이며,

상기 위치제어기는 상기 동기전동기의 위치 정보 신호, 상기 속도 관측기에서 관측한 속도 정보 신호 및 상기 추가상태 제어기에서 출력된 상기 동기전동기의 추가된 상태 궤환 신호를 입력받는 것인 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 방법.

### 청구항 7

제6항에 있어서,

상기 MA 필터의 출력신호를 상기 노치필터로 출력하는 단계 전에,

상기 MA 필터의 출력신호를 토크상수로 나누는 단계를 더 포함하는 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 방법.

### 청구항 8

제6항에 있어서,

상기 노치필터에서 출력된 신호를 역 dq0 변환부를 통해 3상 전류 신호로 변환한 후 드라이버를 통해 동기전동기로 전달하는 단계를 더 포함하는 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 방법.

### 청구항 9

삭제

### 청구항 10

제6항에 있어서,

상기 위치제어기와 상기 속도 관측기의 출력신호를 입력받고, 입력된 신호를 이용하여 파라미터 이득을 계산함으로써 이득을 조절하는 파라미터 추정기를 더 포함하는 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 방법.

## 발명의 설명

### 기술 분야

[0001] 본 발명은 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 시스템 및 제어방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 PMSM 동작시 발생하는 진동을 제거하기 위한 위치 제어 시스템 및 제어방법에 관한 것이다.

### 배경 기술

[0002] PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)은 높은 토크와 가감속 특성 및 고정밀 제어 특성으로 인하여 현재 반도체 산업, 철강 산업, 군수 산업 등에서 많이 사용하고 있으며, 특히 볼 스크류, 다관절 로봇, 웨이퍼 제조 공정 등에서 널리 사용되고 있다. 이러한 PMSM의 정밀 제어 기술은 반도체 소자와 전력전자 기술의 발전으로 동작제어 응용에 매우 중요한 부분을 차지한다.

[0003] 하지만 PMSM의 예측할 수 없는 파라미터의 변화와 외부 외란, 선형모델에 고려되지 않은 비선형 동특성은 종래의 제어기로는 해결하지 못하고 있는 실정이다. 또한, 고정밀 제어를 위한 구동 방식에 있어서 관성이 큰 부하가 인가되거나 부하와 커플링 또는 텐션이 있는 연결부 등에 의해 기구부가 가지고 있는 고유 진동 주파수 성분 에 공진이 발생된다. 이러한 공진에 의해 발생하는 진동을 억제하기 위한 문제는 아직까지 존재하고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 최적제어, 적응제어, 강인제어, 퍼지제어, 인공신경망을 적용한 제어 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.

**선행기술문헌**

**특허문헌**

[0004] (특허문헌 0001) 한국등록특허 10-1250175

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

[0005] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 PMSM 동작시 발생하는 진동을 억제 및 제거하기 위해 종래의 0차 데드비트 관측기에서 1차 데드비트 관측기로 차수를 증가하여 높은 주파수의 진동요소에 강인하고 정밀한 위치 및 속도를 제어할 수 있는 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 시스템 및 제어방법을 제공한다.

**과제의 해결 수단**

[0006] 상기 과제를 해결하기 위한 본 발명의 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 시스템은 외란의 보상 입력을 생성하기 위해 동기전동기의 위치, 속도 및 추가 상태 궤환 신호를 피드백 받고, 외란의 영향을 등가 전류로 보상하는 위치제어기, 상기 동기전동기의 위치 신호와 상기 위치제어기의 출력 신호를 입력받아 외부 외란을 제어하는 1차 데드비트 관측기, 상기 1차 데드비트 관측기의 출력 신호를 입력받고, 상기 1차 데드비트 관측기의 잡음을 제거하기 위한 MA 필터 및 상기 위치제어기와 상기 MA 필터의 출력 신호가 가산된 신호를 입력받고, 진동 유발의 원인이 되는 특정 주파수의 성분을 제거하는 노치필터를 포함한다.

[0007] 상기 동기전동기의 출력 신호를 엔코더를 통해 피드백 받고, 상기 동기전동기의 속도 정보 신호를 상기 위치제어기로 출력하는 속도 관측기 및 상기 동기전동기의 출력신호를 엔코더를 통해 피드백 받고, 상기 동기전동기의 추가된 상태 궤환 신호를 상기 위치제어기로 출력하는 추가상태 제어기를 더 포함할 수 있다.

[0008] 상기 위치제어기와 상기 속도 관측기의 출력신호를 입력받고, 입력된 신호를 이용하여 파라미터 이득을 계산함으로써 이득을 조절하는 파라미터 추정기를 더 포함할 수 있다.

[0009] 상기 노치필터의 출력신호를 입력받고, 3상 전류를 생성하는 역 dq0 변환부 및 상기 역 dq0 변환부의 출력신호를 입력받고, 상기 동기전동기로 최종명령 신호를 출력하는 드라이버를 더 포함할 수 있다.

[0010] 상기 1차 데드비트 관측기는 이득으로 4×1의 행렬을 갖을 수 있다.

[0011] 상기 과제를 해결하기 위한 본 발명의 1차 데드비트 관측기를 이용한 위치 제어 방법은 기준 위치 정보 신호와 동기전동기의 위치, 속도 및 추가상태 궤환 정보 신호를 위치제어기로 전달하는 단계, 상기 위치제어기의 출력 신호와 상기 동기전동기의 출력신호를 1차 데드비트 관측기로 전달하는 단계, 상기 1차 데드비트 관측기의 출력 신호를 MA 필터로 전달하는 단계 및 상기 MA 필터에서 출력된 신호를 상기 위치제어기의 출력신호와 가산한 후 노치필터로 전달하는 단계를 포함한다.

[0012] 상기 MA 필터의 출력신호를 상기 노치필터로 출력하는 단계 전에, 상기 MA 필터의 출력신호를 토크상수로 나누는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0013] 상기 노치필터에서 출력된 신호를 역 dq0 변환부를 통해 3상 전류 신호로 변환한 후 드라이버를 통해 동기전동기로 전달하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0014] 상기 동기전동기의 출력 신호를 엔코더를 통해 피드백 받고, 상기 동기전동기의 속도 정보 신호를 상기 위치제어기로 출력하는 속도 관측기 및 상기 동기전동기의 출력신호를 엔코더를 통해 피드백 받고, 상기 동기전동기의

추가된 상태 궤환 신호를 상기 위치제어기로 출력하는 추가상태 제어기를 더 포함할 수 있다.

[0015] 상기 위치제어기와 상기 속도 관측기의 출력신호를 입력받고, 입력된 신호를 이용하여 파라미터 이득을 계산함으로써 이득을 조절하는 파라미터 추정기를 더 포함할 수 있다.

**발명의 효과**

[0016] 본 발명에 따르면, PMSM에 부하를 인가하거나 또는 기구부가 가지고 있는 고유 진동 주파수에 의해 발생하는 진동을 제거하기 위해 추가 상태 궤환 제어를 위한 위치제어기 및 종래의 0차 데드비트 관측기에서 1차 데드비트 관측기로 차수를 증가시켜 시스템에 적용함으로써 높은 주파수의 진동요소에 강인하고 정밀한 위치 및 속도 제어가 가능하다.

[0017] 본 발명의 기술적 효과들은 이상에서 언급한 것들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 기술적 효과들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

**도면의 간단한 설명**

[0018] 도 1은 본 발명의 제1 실시예에 따른 위치 제어 시스템을 나타낸 도면이다.  
 도 2는 본 발명의 제2 실시예에 따른 위치 제어 시스템을 나타낸 도면이다.  
 도 3 및 도 4는 비교예1에 따른 실험결과를 나타내는 그래프이다.  
 도 5 및 도 6은 비교예2에 따른 실험결과를 나타내는 그래프이다.  
 도 7 및 도 8은 실시예에 따른 실험결과를 나타내는 그래프이다.  
 도 9 및 도 10은 본 발명의 1차 데드비트 관측기와 종래의 0차 데드비트 관측기를 비교하기 위한 실험예를 나타내는 그래프이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

[0019] 본 발명은 다양한 변환을 가할 수 있고 여러 가지 실시 예를 가질 수 있는바, 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 상세한 설명에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변환, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.

[0020] 이하, 본 발명에 따른 실시 예들을 첨부도면을 참조하여 상세히 설명하기로 하며, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 동일하거나 대응하는 구성 요소는 동일한 도면번호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다.

[0022] 실시예

[0023] 도 1은 본 발명의 제1 실시예에 따른 위치 제어 시스템을 나타낸 도면이다.

[0024] 도 1을 참조하면, 본 발명의 제1 실시예에 따른 위치 제어 시스템은 위치제어기(110), 1차 데드비트 관측기(120), MA 필터(Moving Average Filter)(130) 및 노치필터(140)를 포함한다.

[0025] 위치제어기(110)는 외부 외란의 보상 입력을 생성하기 위한 추가 상태 궤환 제어기(Augmented State Feedback Control)으로써, 외부 외란의 영향을 등가 전류로 정궤환하여 보상하기 위해 기준 위치 신호( $\Theta_r: \Theta_{reference}$ )를 입력받고, 동기전동기(190)의 위치( $\theta$ ), 속도( $\dot{\theta}(k+1)$ ) 및 추가 상태 궤환 신호 정보(z)를 속도 관측기(150)와 추가상태 제어기(160)를 통해 피드백 받은 후 전류신호  $i_{qcl}$ 을 출력한다.

[0026] 위치제어기(110)의 제어 알고리즘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

[0027] 즉, 단일 입력 단일 출력 시스템의 상태 방정식은 수학적 식 1 및 수학적 식 2로 표현된다.

수학식 1

[0028] 
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

수학식 2

[0029] 
$$y(t) = Cx(t)$$

[0030] 여기서, A, B, C는 각각  $n \times n$ ,  $n \times 1$ ,  $1 \times n$  행렬이다. 일반적으로 선형 2차 최적제어(Linear Quadratic Control)는 상태 변수를 궤환하여 레귤레이터 문제를 해결하는 용도로 사용된다. 또한, 추적 문제를 해결하기 위한 제어 명령은 수학식 3으로 표현된다.

수학식 3

[0031] 
$$u(t) = -Kx(t) + \tilde{u}_c(t)$$

[0032] 여기서, K는 궤환 이득 행렬(Feedback gain Matrix)이고,  $\tilde{u}_c(t)$ 는 보상 입력이다. 레귤레이터는 출력 값을 0으로 보내야 함으로  $\tilde{u}_c(t) = 0$  이기 때문에  $\tilde{u}_c(t)$ 를 구하기 위해 새로운 오차를 적용하면 수학식 4와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 4

[0033] 
$$\dot{z} = y - y_r$$

[0034] 또한, 수학식 1에 수학식 4를 적용한 개루프 추적 시스템은 수학식 5 및 수학식 6으로 표현된다.

수학식 5

[0035] 
$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{A}\hat{x}(t) + \hat{B}u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r$$

수학식 6

[0036] 
$$y(t) = [c \ 0]\hat{x}(t) = \hat{C}\hat{x}(t)$$

[0037] 따라서, 위치 제어를 위한 동기전동기(190)의 추가 상태 궤환 시스템의 방정식은 수학식 7 및 수학식 8과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 7

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{\theta}} \\ \dot{\hat{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\theta} \\ \hat{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_t \frac{p}{2} \frac{1}{J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{qs} - \begin{bmatrix} \frac{p}{2} \frac{1}{J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T_L - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \theta_r$$

[0038]

수학식 8

$$y = [0 \ 1 \ 0] \hat{x}$$

[0039]

[0040] 여기서,  $\hat{\omega}, \hat{\theta}$  는 동기전동기(190)의 속도와 위치를 추정된 값이고,  $\hat{z}$  는 서보 문제를 해결하기 위한 추가된 상태를 나타낸다. 또한, 동기전동기(190)의 실제 파라미터로써 B는 마찰계수, J는 회전관성,  $k_t$ 는 토크 상수 및 p는 모터의 극수를 나타낸다.

[0041] 일반적으로, 가제어성 행렬이 최대 계수를 가지면 해당 시스템은 제어가 가능하기 때문에 추가 상태 궤환 시스템의 가제어성 행렬의 계수가 3을 가지므로 제어가 가능하다.

[0042] 1차 데드비트 관측기(120)는 동기전동기(190)의 위치 신호( $\theta$ )와 상기 위치제어기(110)의 출력 신호( $i_{qc1}$ )를 입력받고,  $\hat{T}_L(k+1)$  및  $\hat{T}_L(k)$  신호를 MA 필터(130)로 출력함으로써 외부 외란을 제어한다.

[0043] 이러한 외부 외란을 제어하기 위해 종래에는 데드비트 관측기로서 0차 데드비트 관측기가 적용됐다.

[0044] 0차 데드비트 관측기의 제어 알고리즘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

[0045]  $T_L$  이 상수라 가정하면,  $\dot{\hat{T}}_L = 0$  이다. 따라서, 수학식 7의  $\dot{\hat{\omega}}$  과  $\dot{\hat{\theta}}$  상태 방정식에  $\dot{\hat{T}}_L = 0$ 를 적용하면 0차 데드비트 관측기의 방정식을 수학식 9와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 9

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}}(t) \\ \dot{\hat{\theta}}(t) \\ \dot{\hat{T}}_L(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 & -\frac{p}{2} \frac{1}{J} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}(t) \\ \hat{\theta}(t) \\ \hat{T}_L(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_t \frac{p}{2} \frac{1}{J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{qs}(t) + L \left[ \theta - [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega}(t) \\ \hat{\theta}(t) \\ \hat{T}_L(t) \end{bmatrix} \right]$$

[0046]

[0047] 여기서,  $\hat{T}_L$  는 관측하고 싶은 부하 토크이고, L은 0차 데드비트 관측기의 이득으로써 이는  $L_1, L_2, L_3$ 를 가지는  $3 \times 1$  행렬임을 나타낸다. 즉, 궤환 이득을 극 배치로 구할 때 사용 가능한 Ackermann's Formular를 이용하여 L 행렬을 구할 수 있다. 일반적으로 가관측성 행렬은 최대 계수를 가지면 시스템은 관측이 가능하므로 상기 0차 데드비트 관측기의 가관측성 행렬은 역행렬이 존재하고, 계수가 3이므로 관측이 가능하다.

[0048] 상술한 종래의 0차 데드비트 관측기는 부하가 있을 때, 샘플링 시간 마다 그 부하의 값을 예측하여 보상한다. 이는 현재 샘플링 시간에서 예측한 부하의 값을 다음 샘플링 시간까지 그대로 유지하기 때문에 샘플링 시간 사이에 변화되는 부하의 오차율이 큰 단점이 있다. 허나, 본 발명의 1차 데드비트 관측기(120)는 현재 샘플링 시간의 예측한 부하의 값에서 다음 샘플링 시간의 예측한 부하의 값까지 직선으로 연결하여 예측하기 때문에 진동



하는 부하에 대해 강인하게 제어가 가능하다.

[0049] 본 발명의 1차 데드비트 관측기(120)의 제어 알고리즘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

[0050]  $T_L$  이 시간에 대한 1차 함수라고 가정하면,  $\dot{\hat{T}}_L = 1, \hat{T}_L = t$  로 나타낼 수 있다. 상기 식을  $\hat{T}_L = \hat{T}_{L1}, \dot{\hat{T}}_L = \hat{T}_{L2}$  로 치환하여 상태방정식으로 표현하면 수학적 10과 같이 나타낼 수 있다.

**수학적 10**

[0051] 
$$\begin{aligned} \dot{\hat{T}}_{L1} &= \hat{T}_{L2} \\ \dot{\hat{T}}_{L2} &= 0 \end{aligned}$$

[0052] 여기서, 수학적 7의  $\hat{\omega}$  과  $\hat{\theta}$  상태 방정식에 수학적 10의 수식을 적용하면 1차 데드비트 관측기(120)의 방정식을 수학적 11과 같이 나타낼 수 있다.

**수학적 11**

[0053] 
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}}(t) \\ \dot{\hat{\theta}}(t) \\ \dot{\hat{T}}_{L1}(t) \\ \dot{\hat{T}}_{L2}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 & -\frac{p}{2J} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}(t) \\ \hat{\theta}(t) \\ \hat{T}_{L1}(t) \\ \hat{T}_{L2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_t \frac{p}{2J} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{as}(t) \\ &+ L \left( \theta - [0 \ 1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega}(t) \\ \hat{\theta}(t) \\ \hat{T}_{L1}(t) \\ \hat{T}_{L2}(t) \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

[0054] 여기서, L은 1차 데드비트 관측기(120)의 이득으로  $L_1, L_2, L_3, L_4$ 를 가지는  $4 \times 1$  행렬임을 나타낸다. 이러한 1차 데드비트 관측기(120)의 행렬은 0차 데드비트 관측기에서와 같이 Ackermann's Formular를 이용하여 L 행렬을 구할 수 있다. 또한, 1차 데드비트 관측기(120)의 디지털 구현을 위한 이산방정식은 Matlab의 함수를 이용하여 수학적 12와 같이 나타낼 수 있다.

**수학적 12**

[0055] 
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{\omega}(k+1) \\ \hat{\theta}(k+1) \\ \hat{T}_{L1}(k+1) \\ \hat{T}_{L2}(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & a_5 \\ a_3 & 1 & a_4 & a_6 \\ 0 & 0 & 1 & a_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}(k) \\ \hat{\theta}(k) \\ \hat{T}_{L1}(k) \\ \hat{T}_{L2}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{as}(k) \\ &+ L \left( \theta - [0 \ 1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega}(k) \\ \hat{\theta}(k) \\ \hat{T}_{L1}(k) \\ \hat{T}_{L2}(k) \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

[0056] 따라서, 본 발명에 따른 1차 데드비트 관측기(120)도 종래의 0차 데드비트 관측기에서와 같이 가관측성 행렬의

계수가 4이므로 역행렬이 존재하기 때문에 관측이 가능하고 제어가 가능하다.

- [0057] MA 필터(130)(Moving Average Filter)는 1차 데드비트 관측기(120)의 출력 신호( $\hat{T}_{\Delta}(k+1)$  및  $\hat{T}_{\Delta}(k)$ )를 입력 받고, 입력받은 신호를 필터링한다.
- [0058] 일반적으로 데드비트 관측기는 디지털 시스템의 제어기중 하나로 구조가 간단하고 외란 제거에 뛰어난 성능을 보인다. 즉, 관측된 외란의 피드백에 의해서 외란을 효율적으로 보상해주는 특징을 가지지만 잡음에 약하다는 단점을 가진다. 따라서, MA 필터(130)는 이러한 1차 데드비트 관측기(120)의 출력 신호를 입력받고, 입력된 신호의 잡음을 제거하는 기능을 수행한다.
- [0059] MA 필터(130)에 의해 필터링 된 신호(c\_t1)는 토크상수( $k_t$ )로 나눈 후 전류신호  $i_{qc2}$ 로 출력되며, 출력된 전류신호( $i_{qc2}$ )는 위치제어기(110) 출력신호( $i_{qc1}$ )와 가산되어 전류신호  $i_{qc}$ 를 노치필터로 출력한다.
- [0060] 노치필터(140)는 상기 가산된 전류신호( $i_{qc}$ )를 입력받고, 입력된 신호( $i_{qc}$ )를 필터링한다. 즉, 노치필터(140)에 입력된 신호는 노치필터(140)에 의해 진동 유발의 원인이 되는 특정 주파수 성분이 제거될 수 있다.
- [0061] 노치필터(140)에 의해 필터링 된 출력 전류신호( $i_{qc}^*$ )는 모터를 제어하기 위한 a,b,c 3상 전류를 생성하기 위해 역 dq0 변환부(Inverse Direct-quadrature-zero Transformation)(170)로 출력되고, 역 dq0 변환부(170)에서 출력된 3상 전류 신호( $i_{ac}, i_{bc}, i_{cc}$ )는 드라이버(180)를 통해 동기전동기(190)로 전달된다.
- [0062] 본 발명의 제1 실시예에 따른 위치 제어 시스템의 제어 방법을 아래에 상세히 설명한다.
- [0063] 본 발명의 제1 실시예에 따른 위치 제어 시스템의 제어 방법은 기준 위치 정보 신호와 동기전동기(190)의 위치, 속도 및 추가상태 궤환 정보 신호를 위치제어기(110)로 전달하는 단계, 위치제어기(110)의 출력신호와 동기전동기(190)의 출력신호를 1차 데드비트 관측기(120)로 전달하는 단계, 1차 데드비트 관측기(120)의 출력신호를 MA 필터(130)로 전달하는 단계, MA 필터(130)에서 출력된 신호를 위치제어기(110)의 출력신호와 가산한 후 노치필터(140)로 전달하는 단계를 포함한다.
- [0064] 여기서, MA 필터의 출력신호를 상기 노치필터로 출력하는 단계 전에, 상기 MA 필터의 출력신호를 토크상수로 나누는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0065] 우선, 위치제어기(110)는 기준 위치 정보 신호( $\theta_r$ )와 동기전동기(190)의 위치( $\theta$ ), 속도( $\hat{\omega}(k+1)$ ) 및 추가된 상태 신호 정보(z)를 피드백 받는다. 여기서, 동기전동기(190)의 속도 신호( $\hat{\omega}(k+1)$ )는 동기전동기(190)의 위치 정보를 입력받은 속도 관측기(150)를 통해 전달받고, 동기전동기(190)의 추가된 상태 신호(z)는 동기전동기(190)의 위치 정보를 입력받은 추가상태 제어기(160)를 통해 전달받는다. 위치제어기(110)는 기준 위치 정보 신호( $\theta_r$ ), 동기전동기(190)의 위치( $\theta$ ), 속도( $\hat{\omega}(k+1)$ ) 및 추가된 상태 신호 정보(z)를 전달받고 전류신호  $i_{qc1}$ 을 출력한다.
- [0066] 위치제어기(110)를 통해 출력된 출력 전류신호( $i_{qc1}$ )와 동기전동기(190)의 위치 정보 신호( $\theta$ )는 외부 외란을 제어하기 위해 1차 데드비트 관측기(120)로 입력되고, 입력된 신호를 통해 1차 데드비트 관측기(120)는 ( $\hat{T}_{\Delta}(k+1)$  및  $\hat{T}_{\Delta}(k)$ )신호를 MA 필터(130)로 출력한다. MA 필터(130)는 1차 데드비트 관측기(120)의 출력신호( $\hat{T}_{\Delta}(k+1)$  및  $\hat{T}_{\Delta}(k)$ )를 입력받아 입력된 신호의 잡음을 제거하고, 잡음이 제거된 신호(c\_t1)를 출력한 후 토크상수( $k_t$ )로 나누어 전류신호  $i_{qc2}$ 를 출력한다.
- [0067] 출력된 전류신호( $i_{qc2}$ )는 위치제어기(110) 출력 전류신호( $i_{qc1}$ )와 가산되어, 전류신호  $i_{qc}$ 를 생성한 후 노치필터(140)로 입력되고, 입력된 전류신호  $i_{qc}$ 는 진동 유발의 원인이 되는 특정 주파수의 성분을 제거하기 위해 노치필터(140)에 의해 필터링 된다.
- [0068] 노치필터(140)에 의해 필터링 된 전류신호  $i_{qc}^*$ 는 모터를 제어하기 위한 a,b,c 3상 전류를 생성하기 위해 역 dq0 변환부(170)(Inverse Direct-quadrature-zero Transformation)로 출력되고, 역 dq0 변환부(170)에서 출력된 3

상 전류 신호( $i_{ac}, i_{bc}, i_{cc}$ )는 드라이버(180)를 통해 동기전동기(190)로 전달된다. 부하와 연결된 동기전동기(190)의 출력신호는 다시 엔코더를 통해 위치제어기(110) 및 1차 데드비트 관측기(120)로 피드백되고, 이러한 과정이 반복적으로 수행됨으로써 동기전동기(190) 동작시 발생하는 진동을 억제 및 제거할 수 있다. 또한, 데드비트 관측기를 종래의 0차에서 1차로 차수를 증가시켜 높은 주파수의 진동요소에 강인하고 정밀한 위치 및 속도를 제어할 수 있다.

[0069] 도 2는 본 발명의 제2 실시예에 따른 위치 제어 시스템을 나타낸 도면이다.

[0070] 도 2를 참조하면, 제2 실시예에 따른 위치 제어 시스템은 제1 실시예의 구성에서 파라미터 추정기(210)를 포함할 수 있다. 즉, 파라미터 추정기(210)를 제외하고는 제1 실시예의 구성과 동일하다.

[0071] 일반적으로 실제시스템의 파라미터 변화 혹은 정확하지 않은 파라미터를 이용한 고정이득 설정은 시스템의 성능 변화를 가져오게 된다. 따라서, 파라미터 추정기(210)를 적용하여 이득을 조절함으로써 외란이 없는 등가 지표 시스템의 응답 특성을 추정하여 실제시스템이 정격(nominal)값에서 동작하도록 할 수 있다.

[0072] 이러한 제2 실시예에 따른 파라미터 추정기(210)의 동작을 살펴보면, 파라미터 추정기(210)는 위치제어기(110)의 출력 전류신호( $i_{qc1}$ )와 속도 관측기(150)에서 출력되는 속도 정보 신호( $\hat{\omega}(k+1)$ )를 입력받고, 입력된 신호를 이용하여 파라미터 이득  $G_1, G_2, G_3$ 를 계산한다. 즉, 파라미터 추정기(210)에서 계산된 파라미터 이득  $G_1, G_2, G_3$ 를 이용하여 동기전동기(190)의 속도( $\hat{\omega}(k+1)$ )와 위치( $\theta$ )에 각각  $G_1$ 과  $G_2$  적용하여 계산하고, 위치제어기(110)의 출력 전류신호( $i_{qc1}$ )와 1차 데드비트 관측기(120)와 MA 필터(130)를 통해 출력된 출력 전류신호( $i_{qc2}$ )를 가산한 전류신호( $i_{qc3}$ )에  $G_3$ 를 적용하여 계산한 후 계산된 이득을 모두 가산하여 노치필터(140)로 출력 전류신호  $i_{qc}$ 를 출력한다.

[0074] 실험예

[0075] 실험은 본 발명에 따른 1차 데드비트 관측기를 적용한 실시예를 두 개의 비교예와 비교하며 실험을 실시하였다. [표 1]에서와 같이 비교예1은 데드비트 관측기를 적용하지 않고 위치제어기만을 적용했을 때를 나타내고, 비교예2는 위치제어기와 0차 데드비트 관측기를 적용했을 때를 나타내며, 실시예는 위치제어기와 1차 데드비트 관측기를 적용했을 때를 나타낸다.

표 1

	위치제어기	0차 데드비트 관측기	1차 데드비트 관측기
비교예1	o	-	-
비교예2	o	o	-
실시예	o	-	o

[0077] 실험조건으로는 C언어를 이용하여 구현하였고, 샘플링 주기는 0.2[ms]로 하였다. 시스템의 구성은 Runge-Kutta 4차 방법이 1[μ]로 동작하도록 구성하였다.

[0078] [표 2]은 시뮬레이터에서 사용된 파라미터 값으로 실제 사용하고 있는 2.5kW PMSM의 파라미터를 나타낸다.

표 2

Parameter	Value	Unit
Rated Output	2.5	kW
Rated Torque	8.1	Nm
Rated Speed	3000	r/min
Rated Current	8.8	A
J (Inertia)	$10.6 \times 10^{-4}$	$\text{kgm}^2$
Torque Constant	0.920455	Nm/A
Mechanical Time Constant	1.0	ms
Stator Resistance	0.91	$\Omega/\text{phase}$
Phase Inductance	1.76	mH

B (Viscous Friction)	1.06	kgm <sup>2</sup> /s
Poles	8	-

- [0080] 상술한 실험조건을 이용하여 비교예1, 비교예2 및 실시예에 대해 각각 실험을 실시하여 비교하였다.
- [0081] 도 3 및 도 4는 비교예1에 따른 실험결과를 나타내는 그래프이다.
- [0082] 도 3 및 도 4를 참조하면, 도 3(a)은 위치제어기만을 적용했을 때 주파수가 10이고 크기가 2인 사인파 부하를 인가한 상태의 회전자 위치를 나타내고, 도 3(b)는 q상 전류명령에 대한 실험 결과를 나타낸다. 또한, 도 4는 도 3의 그래프에서 회전자 위치가 정상상태에 도달했을 때의 값을 확인하기 위해 x축의 1.4[sec] ~ 2.6[sec] 범위를 확대한 파형을 나타낸다.
- [0083] 도 3 및 도 4의 그래프에서와 같이, 비교예1에서는 데드비트 관측기를 적용하지 않고 위치제어기만을 적용했기 때문에 부하에 대해 민감하여 ε<sub>pp</sub>(Peak to Peak θ Error)가 0.041130[rad]로 측정됨을 확인할 수 있다.
- [0084] 도 5 및 도 6은 비교예2에 따른 실험결과를 나타내는 그래프이다.
- [0085] 도 5 및 도 6을 참조하면, 도 5는 비교예1과 동일한 시험 조건에서 실험하였으며, 도 5(a)는 비교예2에 대한 회전자의 위치를 나타내고, 도 5(b)는 q상 전류명령에 대한 실험 결과를 나타낸다. 또한, 도 6은 도 5의 그래프에서 회전자 위치가 정상상태에 도달했을 때의 값을 확인하기 위해 x축의 1.4[sec] ~ 2.6[sec] 범위를 확대한 파형을 나타낸다.
- [0086] 도 5 및 도 6의 그래프에서와 같이, 위치제어기에 0차 데드비트 관측기를 적용한 경우 0차 데드비트 관측기에 의해 부하에 대해 보상이 수행되었기 때문에 비교예1에 비해 ε<sub>pp</sub>값이 약 22배 감소한 0.001870[rad]로 측정됨을 확인할 수 있다.
- [0087] 도 7 및 도 8은 실시예에 따른 실험결과를 나타내는 그래프이다.
- [0088] 도 7 및 도 8을 참조하면, 도 7은 비교예1,2와 동일한 시험 조건에서 실험하였으며, 도 7(a)는 실시예에 대한 회전자의 위치를 나타내고, 도 7(b)는 q상 전류명령에 대한 실험 결과를 나타낸다. 또한, 도 8은 도 7의 그래프에서 회전자 위치가 정상상태에 도달했을 때의 값을 확인하기 위해 x축의 1.4[sec] ~ 2.6[sec] 범위를 확대한 파형을 나타낸다.
- [0089] 도 7 및 도 8의 그래프에서와 같이, 위치제어기에 1차 데드비트 관측기를 적용한 경우 1차 데드비트 관측기에 의해 부하에 대해 보상이 수행되었기 때문에 비교예1에 비해 ε<sub>pp</sub>값이 약 78배 감소하고, 0차 데드비트 관측기를 적용한 비교예2에 비해 ε<sub>pp</sub>값이 약 3.5배 감소한 0.000527[rad]로 측정됨을 확인할 수 있다. 즉, 본 발명에 따른 위치 제어 시스템은 위치제어기 및 1차 데드비트 관측기를 적용함으로써 동기전동기에 부하를 인가하거나 또는 기구부가 가지고 있는 고유 진동 주파수에 의해 발생하는 진동요소를 강인하고 정밀한 위치 및 속도 제어를 통해 효과적으로 제거가 가능함을 확인할 수 있다.
- [0090] 아래의 [표 3]은 사인파 부하에 대한 모의시험 결과를 2[mm]의 볼 피치를 갖는 스크류에 연결하였을 때 비교예 1,2 및 실시예에 대한 실험 결과를 나타낸다. 볼 스크류의 피치는 기계적으로 0에 가깝게 만들 수 없고, 현재 1[mm]~2[mm]의 볼 피치를 갖는 볼 스크류가 사용되고 있으므로 2[mm]로 계산하였다. 또한, 볼 스크류의 위치오차는  $\frac{\epsilon_{pp}[\text{rad}]}{2\pi[\text{rad}]} \times 2[\text{mm}]$  로 계산하였다.

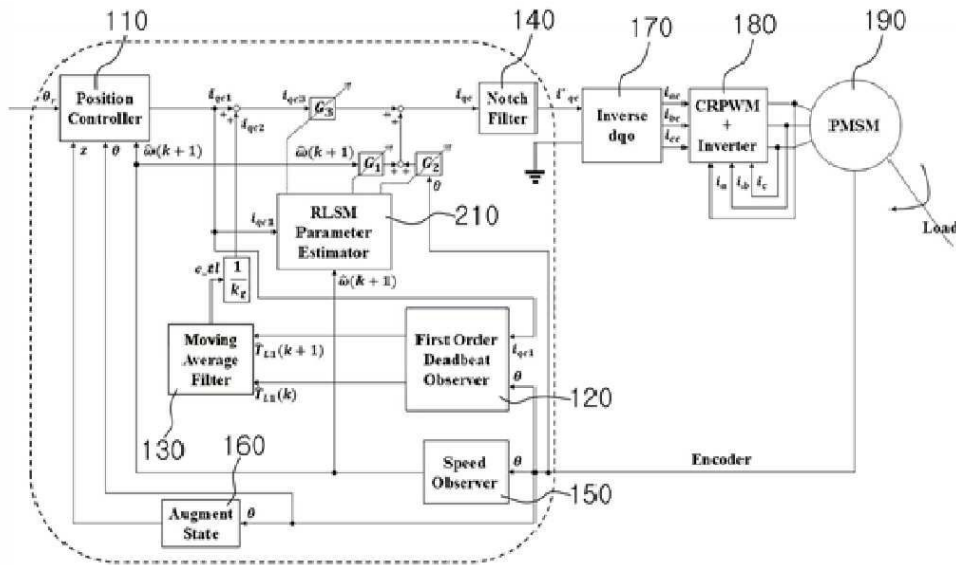
표 3

	ε <sub>pp</sub>	Error with Ball screw	Overshoot	Undershoot
비교예1	0.041330[rad]	13.092[μm]	1.590978[rad]	1.549848[rad]
비교예2	0.001870[rad]	595.239[nm]	1.571420[rad]	1.569550[rad]
실시예	0.000527[rad]	167.749[nm]	1.570988[rad]	1.570461[rad]

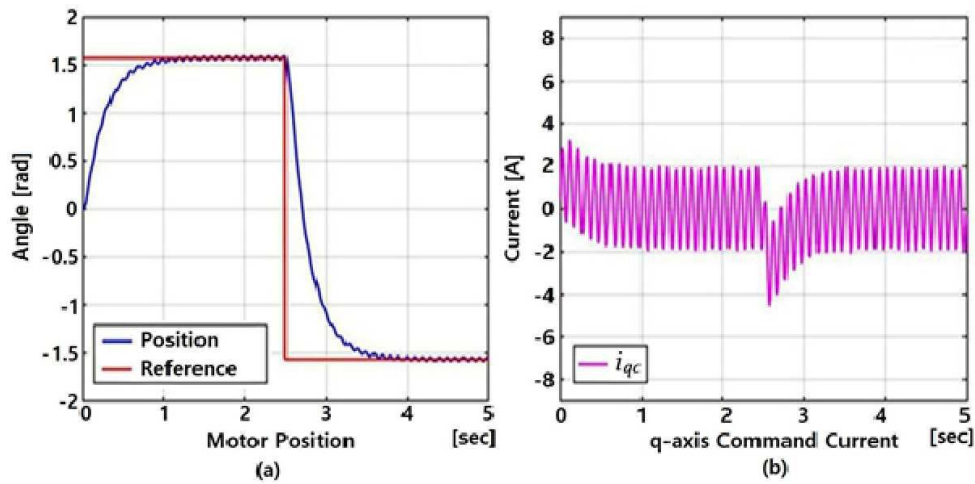
- [0092] [표 3]의 실험결과에서와 같이 위치제어기와 1차 데드비트 관측기를 적용한 실시예가 비교예1,2에 비해 위치 오



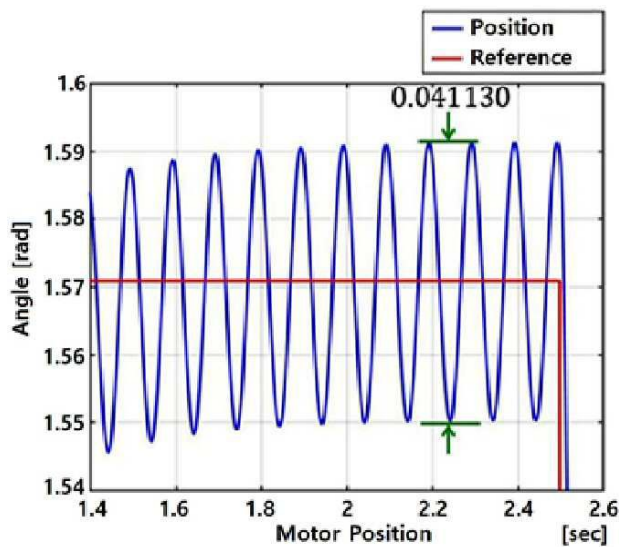
도면2



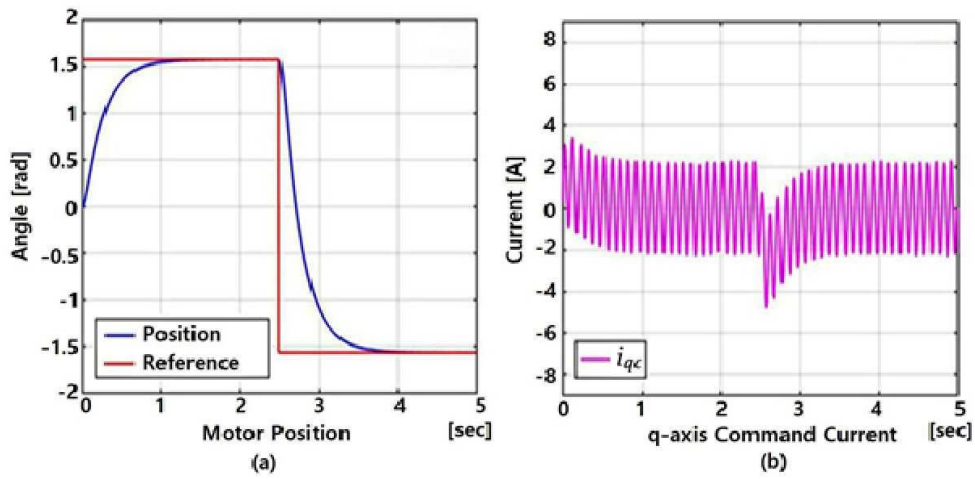
도면3



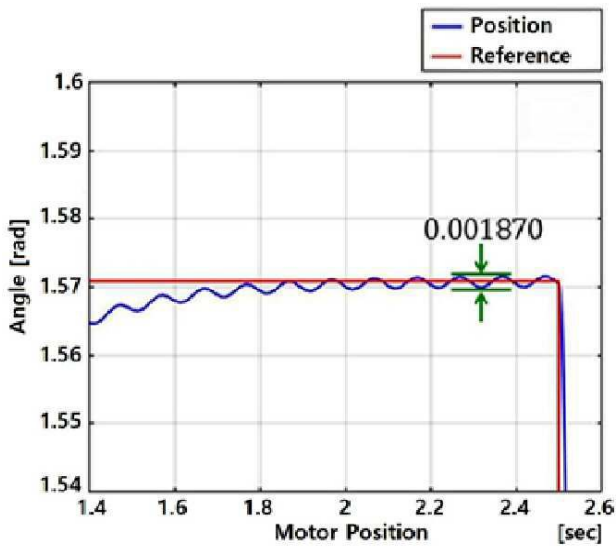
도면4



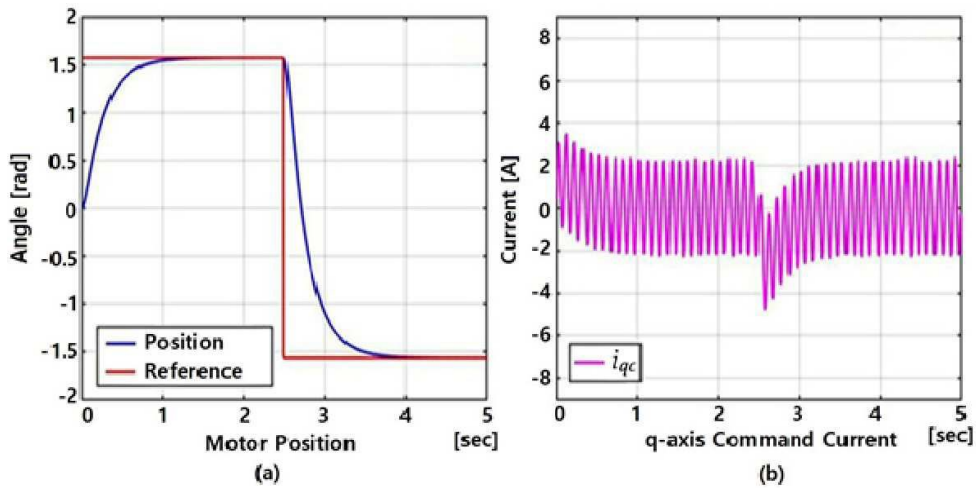
도면5



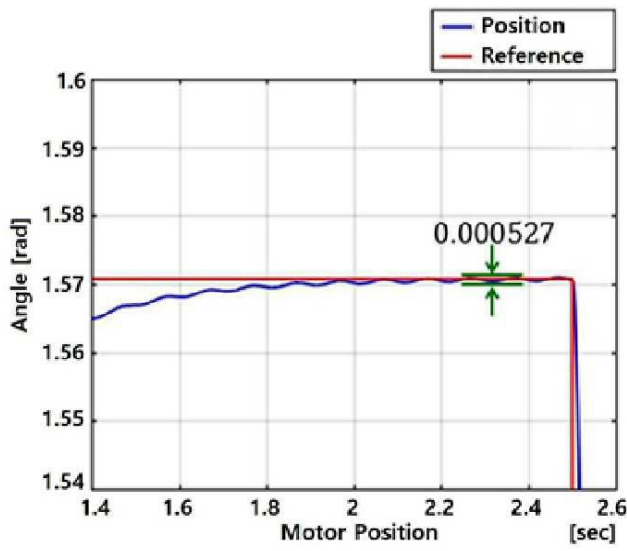
도면6



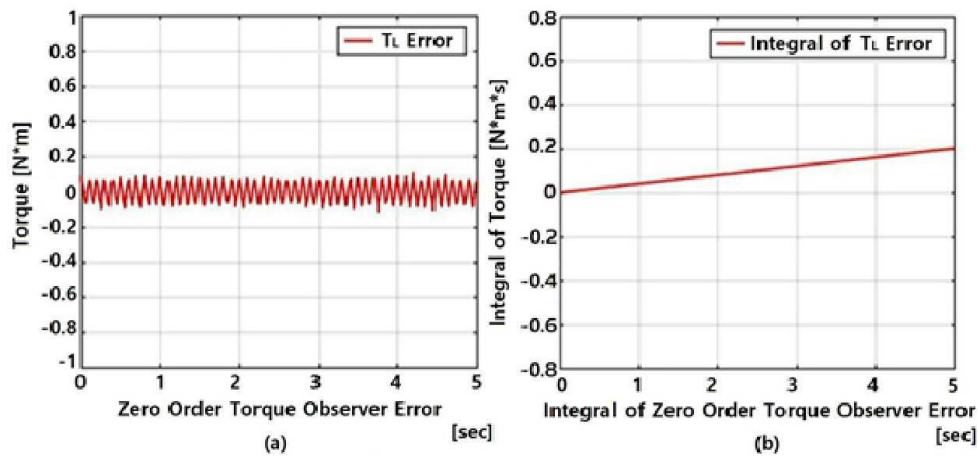
도면7



도면8



도면9



도면10

