(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2014년05월14일
(11) 등록번호 10-1394556
(24) 등록일자 2014년05월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 31/34 (2006.01) *G01R 33/02* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2013-0020800
(22) 출원일자 2013년02월27일
심사청구일자 2013년02월27일
(56) 선행기술조사문헌
JP2002238299 A*
KR100905022 B1*
KR1020010090396 A*
KR1020030015701 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌
기술이전 희망 : **기술양도**

(73) 특허권자
창원대학교 산학협력단
경상남도 창원시 의창구 창원대학교 20 (퇴촌동)
(72) 발명자
이우택
경상남도 김해시 내외로 55, 307동 903호 (내동, 동아아파트)
최진철
경상남도 창원시 성산구 비음로14번길 9-18, 202호 (사파동)
(74) 대리인
이형석, 김종선

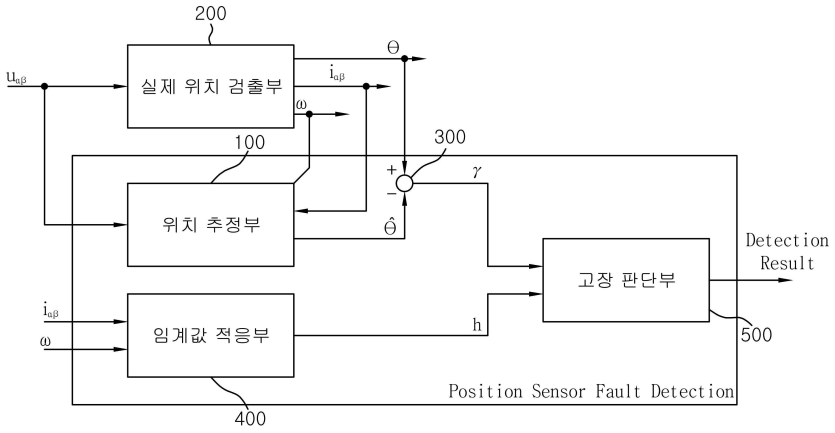
전체 청구항 수 : 총 8 항 심사관 : 박근용

(54) 발명의 명칭 **영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치 및 그 방법**

(57) 요 약

본 발명은 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치 및 방법에 관한 것으로, 전동기의 전압, 전류 및 속도 정보를 입력받아 전동기의 위치를 추정하는 위치 추정부, 위치 센서로부터 상기 전동기의 실제 위치를 검출하는 실제 위치 검출부, 상기 추정값과 실제 위치값의 차이로부터 잔차를 산출하는 잔차 산출부, 전동기의 운전조건에 따라 적응 임계값을 산출하는 적응 임계값 산출부 및 상기 잔차와 상기 적응 임계값을 비교하여 전동기의 고장 여부를 판단하는 고장 판단부를 포함하며, PMSM의 회전자 위치센서에 적응 임계값을 적용하여 잔차값의 크기에 따라 고장 여부를 판별함으로써 왜란이나 모델링 오차에 의한 오검출 및 미검출을 최소화할 수 있다.

대 표 도 - 도1



특허청구의 범위

청구항 1

전동기의 전압, 전류 및 속도 정보를 입력받아 전동기의 위치를 추정하는 위치 추정부;

위치 센서로부터 상기 전동기의 실제 위치를 검출하는 실제 위치 검출부;

상기 위치 추정부에서 추정된 전동기의 위치 추정값과 상기 실제 위치 검출부에서 검출된 실제 위치값의 차이로부터 잔차를 산출하는 잔차 산출부;

전동기의 운전조건에 따라 적응 임계값을 산출하는 적응 임계값 산출부; 및

상기 잔차와 상기 적응 임계값을 비교하여 전동기의 고장 여부를 판단하는 고장 판단부를 포함하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 위치 추정부는;

회전자의 자속 추정을 위한 루엔버거 관측기를 포함하는 것을 특징으로 하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 루엔버거 관측기는;

PMSM 전압 방정식을 사용하여 상기 전동기의 위치를 추정하는 것을 특징으로 하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치.

청구항 4

제 1항에 있어서,

상기 적응 임계값 산출부는;

다음의 수학식에 의하여 상기 적응 임계값을 산출하는 것을 특징으로 하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치.

[수학식]

$$h = \tan^{-1}\left(\frac{\left(\Delta R_{\max} I_m + \Delta u_{\max}\right)}{\lambda_m}\frac{1}{\omega}\right) + b$$

여기서, $\omega = \begin{cases} \omega & ,if\ \omega >= \omega_{\min} \\ \omega_{\min} & ,else \end{cases}$, $b = \delta_{\Delta L \max}$

상기 수학식에서, h는 임계값, $\Delta R_{\max}$는 상저항의 최대 변화값, Im은 전류, $\Delta U_{\max}$는 상전압의 최대 변화값, λ는 영구자석 쇄교자속, ω는 전동기 회전각속도, $\delta_{\Delta L \max}$는 상 인덕턴스의 최대 변화값에 의해 발생하는 회전자 위치 추정 오차를 나타낸다.

청구항 5

전동기의 전압, 전류 및 속도 정보를 입력받아 전동기의 위치를 추정하는 위치 추정 단계;

위치 센서로부터 상기 전동기의 실제 위치를 검출하는 실제 위치 검출 단계;

상기 위치 추정 단계에서 추정된 전동기의 위치 추정값과 상기 실제 위치 검출 단계에서 검출된 실제 위치값의 차이로부터 잔차를 산출하는 잔차 산출 단계;

전동기의 운전조건에 따라 적응 임계값을 산출하는 적응 임계값 산출 단계; 및

상기 잔차와 상기 적응 임계값을 비교하여 전동기의 고장 여부를 판단하는 고장 판단 단계를 포함하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 방법.

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 위치 추정 단계는;

회전자의 자속 추정을 위한 루엔버거 관측기를 포함하는 것을 특징으로 하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 방법.

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 루엔버거 관측기는;

PMSM 전압 방정식을 사용하여 상기 전동기의 위치를 추정하는 것을 특징으로 하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 방법.

청구항 8

제 5항에 있어서,

상기 적응 임계값 산출 단계는;

다음의 수학식에 의하여 상기 적응 임계값을 산출하는 것을 특징으로 하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 방법.

[수학식]

$$h = \tan^{-1}\left(\frac{(\Delta R_{\max} I_m + \Delta u_{\max})}{\lambda_m}\frac{1}{\omega}\right) + b$$

여기서, $\omega = \begin{cases} \omega & ,if\ \omega >= \omega_{\min} \\ \omega_{\min} & ,else \end{cases}$, $b = \delta_{\Delta L\max}$

상기 수학식에서, h는 임계값, $\Delta R_{\max}$는 상저항의 최대 변화값, Im은 전류, $\Delta U_{\max}$는 상전압의 최대 변화값, λ는 영구자석 쇄교자속, ω는 전동기 회전각속도, $\delta_{\Delta L\max}$는 상 인덕턴스의 최대 변화값에 의해 발생하는 회전자 위치 추정 오차를 나타낸다.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 영구자석 동기전동기에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 관측기에서 추정된 결과와 실제 측정값의 차이

를 미리 설정된 임계값(threshold)과 비교하여 고장 여부를 판별하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치 및 그 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous motor; 이하, PMSM이라 한다)는 직류모터와는 반대로 고정자가 권선이고 회전자는 자석으로 되어 있는 전동기를 말하는 것으로, 고정자에 교류를 인가하여 회전자계를 만들어주면 회전자가 이를 따라 회전하는 원리로 동작한다.

[0003] 이와 같은 PMSM의 제어를 위해 회전자의 위치 정보는 필수적이다. 위치센서의 위상 변동(phase shift) 고장은 그 크기가 작더라도 시스템 성능 저하를 초래할 뿐만 아니라, 과전류를 발생시켜 2차 고장의 원인이 된다.

[0004] 대한민국 등록특허공보 제10-0905022호(등록일자 2009년06월22일)에는 속도 센서를 갖는 영구자석 동기 전동기용 인버터에 있어서 노이즈에 의한 상기 속도 센서의 펄스 신호중 오류발생에 따라 전동기의 자속각(위치) 검출의 오류가 발생한 것을 검출할 수 있는 속도 센서를 갖는 영구자석 동기 전동기용 인버터가 개시되어 있다.

[0005] 개시된 종래기술에 따른 고장 검출 장치는, 속도센서로부터의 펄스 신호를 누적하여 얻는 영구자석 동기 전동기의 고정자와 회전자 사이의 순시 자속각과, 시간변화에 따른 순시 자속각의 증감분 연산에 의해 얻는 영구자석 동기 전동기의 속도를 다시 적분하여 얻는 평균 자속각을 이용해서 순시 자속각과 평균 자속각의 차이 값을 얻고, 이 차이 값과 미리 설정된 기준 자속각 차이 값을 비교하고, 상기 차이값이 상기 기준 자속각 차이 값을 초과하는 경우 초과한 시간을 측정하여 미리 설정한 기준 허용시간을 초과하면 고장으로 결정하고 이를 표시하는 고장신호를 발생시킨다.

[0006] 그러나 이러한 종래기술에 따른 고장 검출 장치는, 왜란의 형태나 크기를 정확히 고려하기 힘들기 때문에 그 오차에 의하여 오검출(faulse alarm) 및 미검출(missing alarm)이 발생하여 정확하게 고장을 판단하기 어려운 문제점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허공보 제10-0905022호(등록일자 2009년06월22일)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 상술한 종래기술의 문제점을 극복하기 위한 것으로서, PMSM의 회전자 위치센서의 위상 변동 고장을 검출하되, 적응 임계값(adaptive threshold)을 적용하여 잔차(residual)값의 크기에 따라 고장 여부를 판별함으로써 왜란이나 모델링 오차에 의한 오검출 및 미검출을 최소화하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치 및 그 방법을 제공하는 데에 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0009] 상기 목적을 달성하기 위해 본 발명은, 전동기의 전압, 전류 및 속도 정보를 입력받아 전동기의 위치를 추정하는 위치 추정부; 위치 센서로부터 상기 전동기의 실제 위치를 검출하는 실제 위치 검출부; 상기 추정값과 실제 위치값의 차이로부터 잔차를 산출하는 잔차 산출부; 전동기의 운전조건에 따라 적응 임계값을 산출하는 적응 임계값 산출부; 및 상기 잔차와 상기 적응 임계값을 비교하여 전동기의 고장 여부를 판단하는 고장 판단부를 포함하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치를 제공한다.

[0010] 상기 위치 추정부는 회전자의 자속 추정을 위한 루엔버거 관측기를 포함할 수 있다. 상기 루엔버거 관측기는

PMSM 전압 방정식을 사용하여 상기 전동기의 위치를 추정할 수 있다.

[0011] 상기 적응 임계값 산출부는 다음의 수학식에 의하여 상기 적응 임계값을 산출하는 것이 바람직하다.

[0012] [수학식]

$$h = \tan^{-1}\left(\frac{(\Delta R_{\max} I_m + \Delta u_{\max})}{\lambda_m}\frac{1}{\omega}\right) + b$$

[0013] 여기서, $\omega = \begin{cases} \omega & ,if\ \omega >= \omega_{\min} \\ \omega_{\min} & ,else \end{cases}$, $b = \delta_{\Delta L \max}$

[0014] 또한, 본 발명은, 전동기의 전압, 전류 및 속도 정보를 입력받아 전동기의 위치를 추정하는 위치 추정 단계; 위치 센서로부터 상기 전동기의 실제 위치를 검출하는 실제 위치 검출 단계; 상기 추정값과 실제 위치값의 차이로부터 잔차를 산출하는 잔차 산출 단계; 전동기의 운전조건에 따라 적응 임계값을 산출하는 적응 임계값 산출 단계; 및 상기 잔차와 상기 적응 임계값을 비교하여 전동기의 고장 여부를 판단하는 고장 판단 단계를 포함하는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 방법을 제공한다.

[0015] 상기 위치 추정 단계는 회전자의 자속 추정을 위한 루엔버거 관측기를 포함할 수 있다. 상기 루엔버거 관측기는 PMSM 전압 방정식을 사용하여 상기 전동기의 위치를 추정할 수 있다.

발명의 효과

[0016] 상기와 같이 구성된 본 발명에 따른 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치 및 그 방법에 의하면, PMSM의 회전자 위치센서의 위상 변동 고장을 검출하되, 적응 임계값(adaptive threshold)을 적용하여 잔차(residual)값의 크기에 따라 고장 여부를 판별함으로써 왜란이나 모델링 오차에 의한 오검출 및 미검출을 최소화하는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0017] 도 1은 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치를 나타낸 제어 블록도.

도 2는 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 방법을 나타낸 제어 흐름도.

도 3은 본 발명에 따른 루엔버거 관측기를 포함하는 위치 추정부를 나타낸 제어 블록도.

도 4는 상수 이득을 가지는 관측기의 근 궤적을 나타낸 그래프.

도 5는 이득 스케줄링을 통한 관측기의 근궤적을 나타낸 그래프.

도 6은 관측기 성능 해석을 위한 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프.

도 7은 관측기 성능 해석을 위한 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프.

도 8은 추정오차를 나타낸 그래프.

도 9는 정상시 잔차 분포 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프.

도 10은 임계값 결정에 따른 검출 가능 영역을 나타낸 그래프.

도 11 및 도 12는 적응 임계값에 따른 검출 가능 영역을 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0018] 이하, 본 발명의 바람직한 실시예를 첨부된 도면을 참조하여 상세히 설명하기로 한다.

[0019] 도 1은 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치를 나타낸 제어 블록도이다.

[0020] 도시된 바와 같이, 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치는, 위치 추정부(100), 실제 위치 검출부(200), 잔차 산출부(300), 적응 임계값 산출부(400) 및 고장 판단부(500)를 포함한다.

[0021] 위치 추정부(100)는 전동기의 전압, 전류 및 속도 정보를 입력받아 전동기의 위치를 추정한다.

[0022] 이를 위하여, 상기 위치 추정부(100)는 회전자의 자속 추정을 위한 루엔버거 관측기를 포함하며, 상기 루엔버거 관측기는 PMSM 전압 방정식을 사용하여 상기 전동기의 위치를 추정하는 것이 바람직하다.

[0023] 실제 위치 검출부(200)는 위치 센서로부터 상기 전동기의 실제 위치를 검출한다.

[0024] 잔차 산출부(300)는 상기 추정값과 실제 위치값의 차이로부터 잔차를 산출한다.

[0025] 적응 임계값 산출부(400)는 전동기의 운전조건에 따라 적응 임계값을 산출한다.

[0026] 고장 판단부(500)는 상기 잔차와 상기 적응 임계값을 비교하여 전동기의 정확한 고장 여부를 판단한다.

[0027] 또한, 도 2는 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 방법을 나타낸 제어 흐름도이다.

[0028] 도시된 바와 같이, 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 방법은, 먼저 전동기의 전압, 전류 및 속도 정보를 입력받아 전동기의 위치를 추정하는 위치 추정 단계(S10); 위치 센서로부터 상기 전동기의 실제 위치를 검출하는 실제 위치 검출 단계(S20); 상기 추정값과 실제 위치값의 차이로부터 잔차를 산출하는 잔차 산출 단계(S30); 전동기의 운전조건에 따라 적응 임계값을 산출하는 적응 임계값 산출 단계(S40) 및 상기 잔차와 상기 적응 임계값을 비교하여 전동기의 고장 여부를 판단하는 고장 판단 단계(S50)를 포함한다.

[0029] 이때, 상기 고장 판단 단계(S50)에서는 상기 잔차가 상기 적응 임계값을 초과할 경우 상기 전동기의 고장을 판단할 수 있다.

[0030] 상기 위치 추정 단계(S10)는 회전자의 자속 추정을 위한 루엔버거 관측기를 포함하며, 상기 루엔버거 관측기는 PMSM 전압 방정식을 사용하여 상기 전동기의 위치를 추정하는 것이 바람직하다.

[0031] 상기 적응 임계값 산출 단계(S40)는 후술할 수학식에 의하여 적응 임계값을 산출하는 것이 바람직하며, 이에 대한 세세한 설명은 이하에 첨부된 수학식을 참조하여 더욱 상세히 설명하기로 한다.

[0032] 상술한 바와 같이, 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치 및 방법에 있어서, 상기 적응 임계값을 산출하는 과정을 더욱 상세히 설명하면 다음과 같다.

[0033] 먼저, 도시된 바와 같이, 본 발명에 따른 회전자 자속 추정을 위한 루엔버거 관측기를 포함하는 위치 추정부(Position estimator)(100)는 전동기의 전압, 전류 및 속도 정보를 입력받아 PMSM 전압 방정식 모델을 기본으로 하여 전동기의 위치를 추정한다. 이렇게 추정된 위치와 실제 위치 센서의 출력을 서로 비교하여 그 차이로부터 잔차를 생성하게 된다. 이 잔차가 설정된 임계값 이상이면, 위치센서 고장 여부를 판단할 수 있다. 이때 적응 임계값 산출부(Threshold Adaptor)(400)는 검출 가능 영역을 넓히기 위해 운전 조건에 따라 임계값이 가변하도록 설정한다. 최종적으로 고장 판단부(Decision Making)(500)에 의해 검출 가능 영역 내에서 잔차와 적응 임계값을 비교함으로써 검출 결과를 얻을 수 있다.

[0034] 상술한 바와 같이, 상기 운전 조건에 따라 임계값이 가변하도록 설정하는 위한 과정을 설명하면 다음과 같다.

[0035] 이때, 검출 가능 영역을 넓히기 위해 운전 조건에 따라 임계값이 가변하도록 설정하기 위해서는, 먼저 관측기의 구조 및 잔차의 정의가 필요하다.

[0036] [관측기 구조 및 잔차의 정의]

[0037] 2상 고정 좌표계(stationary reference frame)에서 표현된 PMSM의 전압 방정식은 다음의 수학식 1과 같이 표현

된다. 또한, 이를 다시 상태 공간 모델로 표현하면 수학식 2와 같다.

수학식 1

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -\lambda_m \sin\theta \\ \lambda_m \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$$

[0038]

수학식 2

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \\ \dot{e}_\alpha \\ \dot{e}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{\omega}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{\omega}{L} \\ 0 & 0 & 0 & -\omega \\ 0 & 0 & \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$$

[0039]

여기서, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{\omega}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{\omega}{L} \\ 0 & 0 & 0 & -\omega \\ 0 & 0 & \omega & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$, $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$

[0040]

[0041] 상기 수학식 2를 이용하여 회전자 쇄교 자속을 추정하기 위한 루엔버거 관측기를 다음과 같이 구성할 수 있다.

수학식 3

$$\hat{\dot{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}(\mathbf{y} - \mathbf{y})$$

[0042]

[0043] 여기서, G는 관측기 이득 행렬이며, $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \\ g_{31} & g_{32} \\ g_{41} & g_{42} \end{bmatrix}$ 과 같다.

[0044] 도 3은 본 발명에 따른 루엔버거 관측기를 포함하는 위치 추정부를 나타낸 제어 블록도이다.

[0045] 추정된 $\hat{e}_\alpha$, $\hat{e}_\beta$ 로부터 회전자 위치를 다음의 수학식 4와 같이 추정할 수 있다.

수학식 4

[0046]
$$\hat{\theta} = \tan^{-1}\left(\frac{-\hat{x}_3}{\hat{x}_4}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-e_\alpha}{e_\beta}\right)$$

[0047] 추정 위치와 검출 위치와의 차이로부터 위치 센서 고장 검출을 위한 잔차는 다음의 수학식 5와 같이 정의할 수 있다.

수학식 5

[0048]
$$\gamma = \theta - \hat{\theta}$$

[0049] [극배치 기법을 통한 관측기 이득 설정]

[0050] 상기 수학식 2로 주어진 PMSM 모델에서, 개루프(open loop) 고유치(eigenvalue), λ_{open}는 다음의 수학식 6과 같다.

수학식 6

[0051]
$$\det(\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0$$
$$\lambda_{open1}, \lambda_{open2} = -R/L$$
$$\lambda_{open3}, \lambda_{open4} = \pm j\omega$$

[0052] 이득 행렬, G 에 의해 관측기의 고유치는 다음의 수학식 7과 같이 결정된다.

수학식 7

[0053]
$$\det(\lambda\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{GC})) = 0$$

[0054] 관측기의 고유치(eigenvalue), λ는 실수 부(Re) 와 허수 부(Im)로 나누어 표현하면 다음의 수학식 8과 같다.

수학식 8

[0055]
$$\lambda_1 = \mathrm{Re}_1 + j\,\mathrm{Im}_1, \lambda_2 = \lambda_1^* = \mathrm{Re}_1 - j\,\mathrm{Im}_1$$
$$\lambda_3 = \mathrm{Re}_2 + j\,\mathrm{Im}_2, \lambda_4 = \lambda_3^* = \mathrm{Re}_2 - j\,\mathrm{Im}_2$$

[0056] 도 4는 상수 이득을 가지는 관측기의 근 궤적을 나타낸 그래프로서, 도시된 바와 같이 G의 원소인 $g_{11} \sim g_{42}$가

일정한 상수(constant) 일 때의 근 궤적(root locus)를 보여 준다. System matrix A가 ω를 포함하고 있기 때문에 ω에 따른 고유치가 바뀌게 된다. 화살표의 진행 방향은 각속도, ω의 증가를 의미한다.

[0057] $\lambda_1\lambda_2$는 ω가 증가함에 따라 허수 축으로부터 멀어 지게 되고, $\lambda_3\lambda_4$는 허수 축에 가까워진다. 따라서, ω에 따른 이득 스케줄링이 필요하다.

[0058] 고유치의 실수 부의 크기 결정에는 trade-off 관계가 있다. 고유치의 실수 부를 음으로 크게 할수록 관측기 오차의 수렴 속도는 빨라진다. 하지만, 이값을 너무 크게 하면 시스템 노이즈에 의한 영향을 크게 받게 되어, 관측기 성능을 저하 또는 불안정하게 된다.

[0059] 고유치의 실수 부가 결정되었다면, 허수 부는 감쇠 특성(damping characteristic)을 결정하게 된다. 2차 시스템의 특성 방정식과 비교하여 결정할 수 있다.

수학식 9

[0060]
$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$$
$$(s + \mathrm{Re} + j\,\mathrm{Im})(s + \mathrm{Re} - j\,\mathrm{Im}) = s^2 + 2\,\mathrm{Re}\,s + (\mathrm{Re}^2 + \mathrm{Im}^2)$$

[0061] 상기 수학식 9에서 "ζ=0.75~0.8" 정도를 갖게 하는 것이 비교적 작은 오버 슈트 및 빠른 응답성을 확보할 수 있다. 이 감쇠율을 확보하기 위해서는 실수 부에 대한 허수 부의 비를 1/2로 한다면 얻을 수 있다.

[0062] 따라서 최종적으로 이득 스케줄링을 통한 관측기의 근궤적을 그려보면 도 5에 도시된 바와 같다.

[0063] 특정 위치에 고유치를 두기 위한 관측기 이득 행렬, G는 다음의 수학식 10과 같이 구할 수 있다.

수학식 10

[0064]
$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\left(\lambda_1 + \lambda_2 + \dfrac{R}{L}\right) & -\omega \\ \omega & -\left(\lambda_1 + \lambda_2 + \dfrac{R}{L}\right) \\ -\dfrac{L}{\omega}\left(\lambda_1\lambda_2 - \omega^2\right) & -L(\lambda_1 + \lambda_2) \\ L(\lambda_1 + \lambda_2) & -\dfrac{L}{\omega}\left(\lambda_1\lambda_2 - \omega^2\right) \end{bmatrix}$$

[0065] 도 6은 관측기 성능 해석을 위한 시뮬레이션 결과로서, 관측기 입력을 나타낸 그래프이다.

[0066] 도 7은 관측기 성능 해석을 위한 시뮬레이션 결과로서, (a)추정 결과, (b)상수 이득, (c) $\mathrm{Re}\{\lambda_1\} = \mathrm{Re}\{\lambda_2\} = 5\times\omega$, (d) $\mathrm{Re}\{\lambda_1\} = \mathrm{Re}\{\lambda_2\} = 10\times\omega$ 을 나타낸 그래프이다.

[0067] 또한, 도 8은 추정오차를 나타낸 그래프로서, (a)상수 이득, (b) $\mathrm{Re}\{\lambda_1, \lambda_2\} = 5\times\omega$, (c) $\mathrm{Re}\{\lambda_1, \lambda_2\} = 10\times\omega$ 를 나타낸다.

[0068] 본 발명의 일 실시예에 따라 설계된 관측기의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션을 상기 도 6 내지 도 8에 도시된 바와 같이 수행하였다. 도 6은 운전 조건 및 관측기 입력 신호를 보여준다. 부하 토크는 0.5N로 동일하게 인가하고, 전동기 속도 지령치를 500, 1500, 3000rpm으로 스텝으로 증가 시켰을 때, 전압 및 전류를 각각 (b), (c)에서 보여준다.

[0069] 도 7의 (a)는 도 6과 같은 조건에서 관측기가 추정한 $\hat{e}_\alpha$ 의 결과를 보여 준다.

[0070] 도 7의 (b), (c) 그리고 (d)는 각각 이득 행렬, G의 설정 방법에 따라 일정 이득, λ1과 λ2의 실수부를 전동기 속도의 5배, 즉 $\mathrm{Re}\{\lambda_1\}=\mathrm{Re}\{\lambda_2\}=5\times\omega$ 으로 하기 위한 이득, 그리고 전동기 속도의 10배로 할 때 추정 오차를 나타낸 것이다.

[0071] 일정 이득으로 한 경우 고속으로 갈수록 오차가 증가함을 알 수 있다. 또한, 이득을 너무 크게 하면 천이 상태 때 큰 오버슈트가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

[0072] 따라서 본 발명의 바람직한 일 실시예에서는 다음의 수학식 11의 두 관계를 유지하도록 이득 스케줄링을 수행하였다.

수학식 11

$$\mathrm{Re}\{\lambda_1\}=\mathrm{Re}\{\lambda_2\}=5\times\omega$$

$$\mathrm{Im}\{\lambda_1\}=\mathrm{Im}\{\lambda_2\}=\frac{1}{2}\mathrm{Re}\{\lambda_1\}$$

[0073]

[0074] [잔차 분포 해석]

[0075] 수학식 5와 같이 정의된 잔차의 한도 확인(Limit checking)으로 위치 센서 고장을 검출할 수 있다. 이상적으로, 정상 시에 잔차는 0이다. 하지만, 측정 오차 및 파라미터 변동에 의해 관측기는 위치 추정 오차를 야기하게 된다. 따라서 비록 위치센서 고장은 발생하지 않았지만, 0이 아닌 잔차를 갖게 된다.

[0076] [속도 추정 오차에 대한 강인성 분석]

[0077] 추정 또는 측정된 전동기 각속도, $\hat{\omega}$ 는 실제 각속도 ω 에 비해 다음의 수학식 12와 같은 오차를 가진다면, 이 속도 오차에 의해 수학식 3의 관측기는 다음의 수학식 13과 같이 표현된다.

수학식 12

[0078] $$\omega=\hat{\omega}+\Delta\omega$$

수학식 13

[0079] $$\dot{\hat{\mathbf{x}}}=(\mathbf{A}+\mathbf{A}_{\Delta\omega})\hat{\mathbf{x}}+\mathbf{B}\mathbf{u}+\mathbf{G}\mathbf{C}(\mathbf{x}-\hat{\mathbf{x}})$$

여기서

[0080] $$\mathbf{A}+\mathbf{A}_{\Delta\omega}=\begin{bmatrix}-\frac{R}{L} & 0 & -\frac{\hat{\omega}}{L} & 0\\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{\hat{\omega}}{L}\\ 0 & 0 & 0 & -\hat{\omega}\\ 0 & 0 & \hat{\omega} & 0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0 & 0 & -\frac{\Delta\omega}{L} & 0\\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\Delta\omega}{L}\\ 0 & 0 & 0 & -\Delta\omega\\ 0 & 0 & \Delta\omega & 0\end{bmatrix}$$

[0081] 이에 따른 관측기 오차를 정리하면 다음의 수학식 14와 같다.

수학식 14

[0082] $$\dot{\mathbf{e}}_{\Delta\omega} = \dot{\mathbf{x}} - \dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{GC})\mathbf{e} + \mathbf{A}_{\Delta\omega}\hat{\mathbf{x}}$$

[0083] 또한, 전동기의 이상이 없다면, 각 상태(state)의 값은 다음의 수학식 15와 같은 형태를 가지게 된다.

수학식 15

[0084] $$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_m \sin(\theta+\beta) \\ I_m \cos(\theta+\beta) \\ -\lambda_m \sin\theta \\ \lambda_m \cos\theta \end{bmatrix}$$

[0085] 상기 수학식 15에서 초기치는 0으로 두고, 라플라스 변환하면 다음의 수학식 16과 같다.

수학식 16

[0086] $$s\mathbf{E}_{\Delta\omega} = (\mathbf{A} - \mathbf{GC})\mathbf{E} + \mathbf{A}_{\Delta\omega}\mathbf{X}$$
$$\mathbf{E}_{\Delta\omega} = \left[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{GC})\right]^{-1}\mathbf{A}_{\Delta\omega}\mathbf{X}$$

수학식 17

[0087] $$\mathbf{X}(s) = \begin{bmatrix} -\dfrac{I_m(s\sin\beta + \omega\cos\beta)}{s^2+\omega^2} \\ \dfrac{I_m(s\cos\beta - \omega\sin\beta)}{s^2+\omega^2} \\ -\dfrac{\lambda_m\omega}{s^2+\omega^2} \\ \dfrac{\lambda_m s}{s^2+\omega^2} \end{bmatrix}$$

[0088] 따라서 최종적으로 정리하면 다음의 수학식 18과 같다.

수학식 18

$$\mathbf{E}_{\Delta\omega} = \left[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{GC})\right]^{-1} \mathbf{A}_{\Delta\omega}\mathbf{X}$$

$$= \frac{\lambda_m}{(s\lambda s\lambda s)(\quad - \quad_2)(\quad^2 + \omega^2)} \begin{bmatrix} \frac{s\Delta\omega}{L} \\ -\frac{s^2\Delta\omega}{L} \\ -\frac{\Delta\omega}{\hat{\omega}}(s\lambda\hat{\omega} - \quad_1 \quad_2\omega) \\ -\frac{s\Delta\omega}{\hat{\omega}}(\omega\hat{\omega} + \lambda\lambda_2) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix}$$

[0089]

[0090] 상기 수학식 18에서, 3번째 항을 다시 쓰면 다음의 수학식 19와 같다.

수학식 19

$$E_3(s) = \frac{K_1}{s-\lambda_1} + \frac{K_2}{s-\lambda_2} + \frac{K_3}{s+j\omega} + \frac{K_4}{s-j\omega}$$

[0091]

[0092] 상기 수학식 19에서, 1, 2번 항은 특정 시간 후에 0으로 수렴하고, 라플라스 역 변환하면, 정상 상태(steady-state)에서의 오차는 다음의 수학식 20과 같다.

수학식 20

$$e_3^{ss}(t) = \frac{\Delta\omega}{\hat{\omega}} \frac{\lambda\lambda\lambda(\omega\hat{\omega} + \quad_1 \quad_2)}{\sqrt{(\omega^2 + \lambda\lambda^2)(\omega^2 + \quad^2_2)}} \cos(\theta + \phi) \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega^2 - \lambda_1\lambda_2}{\omega(\lambda_1 + \lambda_2)}\right),$$

[0093]

[0094] 상기 수학식 18의 4번째 항도 3번째 항을 다시 쓴 것과 같은 방법을 적용하면 다음의 수학식 21, 22와 같다.

수학식 21

$$e_4^{st}(t) = \frac{\Delta\omega}{\hat{\omega}} \frac{\lambda\lambda\lambda(\omega\hat{\omega} + \quad_1 \quad_2)}{\sqrt{(\omega^2 + \lambda\lambda^2)(\omega^2 + \quad^2_2)}} \sin(\theta + \phi) \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega^2 - \lambda\lambda_{\quad 2}}{\omega(\lambda\lambda + \quad_2)}\right),$$

[0095]

수학식 22

$$\begin{bmatrix} e_3^{st} \\ e_4^{st} \end{bmatrix} = \frac{\Delta\omega\lambda_m}{\hat{\omega}} K \begin{bmatrix} \cos(\theta+\phi) \\ \sin(\theta+\phi) \end{bmatrix}$$

[0096]

[0097] 이를 다시 정리하면 다음의 수학식 23과 같다.

수학식 23

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} = \lambda_m M \begin{bmatrix} -\sin(\theta+\delta) \\ \cos(\theta+\delta) \end{bmatrix}$$

[0098]

$$\text{여기서, } M = \sqrt{\left(\frac{\Delta\omega}{\hat{\omega}} K\cos\varphi\right)^2 + \left(1-\frac{\Delta\omega}{\omega} K\sin\varphi\right)^2}$$

$$\delta_{\Delta\omega} = \tan^{-1}\left(\frac{\frac{\Delta\omega}{\hat{\omega}} K\cos\phi}{1-\frac{\Delta\omega}{\hat{\omega}} K\sin\phi}\right)$$

[0099]

[0100] 최종적으로 추정된 위치는 실제 위치에 비해 다음의 수학식 24와 같이 오차를 가지게 된다.

수학식 24

$$\hat{\theta} = \tan^{-1}\left(\frac{-\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}\right)$$

$$= \frac{\lambda_m M \sin(\theta+\delta)}{\lambda_m M \cos(\theta+\delta)}$$

[0101]

$$= \theta + \delta_{\Delta\omega}$$

[0102]

이때, 오차는 $\delta_{\Delta\omega}$는 ϕ에 의해 결정되고, ϕ는 $\lambda_1 \lambda_2$에 의해 결정 된다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega^2 - \lambda_1\lambda_2}{\omega(\lambda_1+\lambda_2)}\right)$$

만약 $|\lambda_1|, |\lambda_2| >> \omega$로 설정 하면, $\phi \to -\frac{\pi}{2}$가 되어, $\delta_{\Delta\omega}$를 0 으로

[0103]

[0104] 가져갈 수 있다. 이는 앞에서 설계한 속도에 따른 가변 극배치 기법의 유용성을 부각시키는 결과이다.

[0105] [저항 및 인덕턴스 오차에 대한 강인성 분석]

[0106] 속도 오차와 마찬가지 방법으로 저항 오차에 대해 관측기를 표현하면, 다음의 수학식 25 내지 28과 같다.

수학식 25

[0107] $$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} + \mathbf{A}_{\Delta R})\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}\mathbf{C}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})$$

[0108] 여기서,

$$\mathbf{A}_{\Delta R} = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta R}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\Delta R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

수학식 26

[0109] $$\dot{\mathbf{e}}_{\Delta R} = (\mathbf{A} - \mathbf{G}\mathbf{C})\mathbf{e} + \mathbf{A}_{\Delta R}\hat{\mathbf{x}}$$
$$\mathbf{E}_{\Delta R} = \left[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{G}\mathbf{C})\right]^{-1}\mathbf{A}_{\Delta R}\mathbf{X}$$
$$= -\frac{\Delta R}{\omega}\frac{1}{(s\lambda s\lambda_1 s)(\quad - \quad_2)(\quad^2 + \omega^2)}[\ldots]$$

수학식 27

[0110] $$\begin{bmatrix} e_{3\Delta R}^{st} \\ e_{4\Delta R}^{st} \end{bmatrix} = \frac{\Delta R I_m}{\omega}\begin{bmatrix} -\sin(\theta+\beta) \\ \cos(\theta+\beta) \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \hat{x}_3^{st} \\ \hat{x}_4^{st} \end{bmatrix} = M_{\Delta R}\begin{bmatrix} -\sin(\theta+\delta_{\Delta R}) \\ \cos(\theta+\delta_{\Delta R}) \end{bmatrix}$$

수학식 28

[0111] $$M_{\Delta R} = \sqrt{\left(\lambda_m + \frac{\Delta R I_m}{\omega}\cos\beta\right)^2 + \left(\frac{\Delta R I_m}{\omega}\sin\beta\right)^2}$$
$$\delta_{\Delta R} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta R}{\omega}\left(\frac{I_m \sin\beta}{\lambda_m + \frac{\Delta R I_m}{\omega}\cos\beta}\right)\right)$$

[0112] 따라서, 최종적으로 추정된 위치는 실제 위치에 비해 오차를 가지게 된다.

[0113] 또한, 인덕턴스 오차에 대해 관측기를 표현하면, 다음의 수학식 29 내지 32와 같다.

수학식 29

$$\mathbf{A}_{\Delta L}=\begin{bmatrix} \frac{R\Delta L}{L(L+\Delta L)} & 0 & \frac{\omega\Delta L}{L(L+\Delta L)} & 0 \\ 0 & \frac{R\Delta L}{L(L+\Delta L)} & 0 & \frac{\omega\Delta L}{L(L+\Delta L)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서,

$$\mathbf{B}_{\Delta L}=\begin{bmatrix} -\frac{\Delta L}{L(L+\Delta L)} \\ -\frac{\Delta L}{L(L+\Delta L)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0114]

수학식 30

$$\dot{\mathbf{e}}_{\Delta L}=(\mathbf{A}-\mathbf{GC})\mathbf{e}+\mathbf{A}_{\Delta L}\hat{\mathbf{x}}+\mathbf{B}_{\Delta L}\mathbf{u}$$

$$\mathbf{E}_{\Delta L}=\left[s\mathbf{I}-(\mathbf{A}-\mathbf{GC})\right]^{-1}\{\mathbf{A}_{\Delta L}\mathbf{X}+\mathbf{B}_{\Delta L}\mathbf{U}\}$$

$$=\left[s\mathbf{I}-(\mathbf{A}-\mathbf{GC})\right]^{-1}\frac{\Delta L}{L(L+\Delta L)}s\mathbf{X}$$

[0115]

수학식 31

$$\begin{bmatrix} e_{3\Delta L}^{ss} \\ e_{4\Delta L}^{ss} \end{bmatrix}=-\frac{\Delta L}{L+\Delta L}\begin{bmatrix} \cos(\theta+\beta) \\ \sin(\theta+\beta) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_3^{ss} \\ \hat{x}_4^{ss} \end{bmatrix}=M_{\Delta L}\begin{bmatrix} -\sin(\theta+\delta_{\Delta L}) \\ \cos(\theta+\delta_{\Delta L}) \end{bmatrix}$$

$$M_{\Delta L}=\sqrt{\left(\lambda_m+\frac{\Delta L}{L+\Delta L}\sin\beta\right)^2+\left(\frac{\Delta L}{L+\Delta L}\cos\beta\right)^2}$$

[0116]

수학식 32

$$\delta_{\Delta L}=\tan^{-1}\left(\frac{\frac{\Delta L}{L+\Delta L}I_m\cos\beta}{\lambda_m-\frac{\Delta L}{L+\Delta L}I_m\sin\beta}\right)$$

[0117]

[0118] [전압 지령치 사용에 따른 전압 오차에 대한 강인석 분석]

[0119] 입력 전압 오차를 포함하는 관측기와 그 추정 오차를 다음의 수학식 33과 같이 표현할 수 있다.

수학식 33

[0120]
$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}(\mathbf{u} + \Delta\mathbf{u}) + \mathbf{GC}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})$$
$$\dot{\mathbf{e}}_{\Delta u} = (\mathbf{A} - \mathbf{GC})\mathbf{e} + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}$$

[0121] 이를 라플라스 변환하면 다음의 수학식 34 내지 35와 같다.

수학식 34

[0122]
$$\mathbf{E}_{\Delta U} = \left[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{GC}) \right]^{-1} \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}$$
$$\begin{bmatrix} e_{3\Delta u}^{ss} \\ e_{4\Delta u}^{ss} \end{bmatrix} = -\frac{\Delta u_m}{\omega} \begin{bmatrix} -\sin(\theta + \phi) \\ \cos(\theta + \phi) \end{bmatrix}$$

수학식 35

[0123]
$$\begin{bmatrix} \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{3\Delta u}^{ss} \\ e_{4\Delta u}^{ss} \end{bmatrix}$$
$$= M_{\Delta L} \begin{bmatrix} -\sin(\theta + \delta_{\Delta u}) \\ \cos(\theta + \delta_{\Delta u}) \end{bmatrix}$$
$$\delta_{\Delta u} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta u_m \sin\phi}{\omega\left(\lambda_m - \frac{\Delta u_m}{\omega}\cos\phi \right)} \right)$$

수학식 36

[0124] 만약 $|\lambda_1|, |\lambda_2| >> \omega$ 로 설정 하면, $\phi \to -\frac{\pi}{2}$ 가 되어,

$$\delta_{\Delta u} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta u_m}{\omega\lambda_m} \right)$$

[0125] [저항 오차의 발생]

[0126] 전동기의 고정자 권선은 동선으로 이루어져 있다. 이러한 동선의 저항은 온도에 따라 변화하며, 일반적으로 0.32%/℃ 의 온도 계수 α_{R_s} 을 가진다. EMB(Electro-Mechanical Brake)의 동작 온도 범위를 -30~130℃라하면,

저항은 기본(nominal)값으로부터 최대 ±25 %의오차를 가질 수 있다.

[0127] [인덕턴스 오차의 발생]

[0128] 관측기에서 상인덕턴스는 상수로 다루었지만, 실제로 수학식 37과 같이 위치에 따라 변화는 값을 가지게 된다.

수학식 37

[0129] $$L = L_A - L_B \cos 2\theta$$

[0130] 따라서, 제안한 관측기는 $\pm L_B$의 인덕턴스 오차를 가질 수 있다.

[0131] L_A L_B와 회전 좌표축(rotational reference frame)에서 L_d L_q의 관계는 다음의 수학식 38과 같다.

수학식 38

[0132] $$L_d = \frac{3}{2}(L_A - L_B)$$
$$L_q = \frac{3}{2}(L_A + L_B)$$

[0133] 따라서, 모터 설계치가 L_d L_q의 값으로 주어진다면, L_B를 즉 인턱턴스 오차를 다음의 수학식 39와 같이 구할 수 있다.

수학식 39

[0134] $$L_B = \frac{L_d - L_q}{3}$$

[0135] 기본적으로, 제안한 관측기의 사용이 적합하려면, 이값이 비교적 작은, 즉 돌극성이 비교적 작은 모터이어야 한다.

[0136] [전압 오차의 발생]

[0137] 전압 값은 측정치가 아닌 전압 지령치를 사용하게 된다. 하지만, 인버터의 비이상적(non-ideal) 스위칭 특성에 의해 실제 인버터의 전압 출력과 제어기의 전압 지령치와는 차이가 발생하게 된다. 이러한 비이상적 스위칭 동작에 의한 전압 차이를 간단히 표현하면 다음의 수학식 40과 같다.

수학식 40

[0138] $$u_{drop} = \frac{T_{dead}}{T_{PWM}} U_{dc}\,\mathrm{sgn}(i) + 2\frac{T_{dead}}{T_{PWM}} U_{fw}\,\mathrm{sgn}(i) + R_{on} i$$

[0139] 앞서 설명한 입력 및 파라미터의 오차 조건과 다음의 표1의 파라미터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하고, 각 동

작 조건에 따른 잔차의 분포를 살펴본 결과는 도 9와 같다.

표 1

Spec. / Parameters	Value	Unit
R at 20℃	77	mΩ
λ_m at 20℃	6.34	mWb
L_d (nominal)	100	uH
L_q (nominal)	145	uH
Max Speed	4000	RPM
Max Current	20	A
Pole number	4	EA
T_{dead}	1	usec
T_{pwm}	62.5	usec
U_{dc}	12	V
U_{fw}	0.7	V
R_{on}	8	mΩ

[0140]

[0141] 도 9는 정상시 잔차 분포 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프로서, 도 9에 도시된 바와 같이, 입력 측정 오차나 파라미터 변동에 의해 관측기의 추정 오차가 발생하고 이 결과로 고장이 발생하지 않더라도 잔차가 존재함을 알 수 있다. 또한, 그 잔차는 전동기 속도나 부하의 크기, 즉 전류의 크기에 따라 바뀌며, 500rpm 이하의 저속에서 그 영향이 매우 커짐을 알 수 있다. 이는 앞의 해석결과가 타당함을 보여 준다.

[0142] [적응 입계값의 결정]

[0143] 전술한 결과와 같이 본 발명의 검출 방법은 정상 시에서도 동작 조건에 따라 0이 아닌 잔차를 가지게 된다. 이는 잔차의 한도 확인을 위한 임계값의 결정을 어렵게 만든다.

[0144] 도 10은 임계값 결정에 따른 검출 가능 영역을 나타낸 그래프로서, 만약 도 10의 (a)와 같이 임계값을 선정한다면, 작은 위치 센서 고장도 잘 검출할 수 있지만, 저속 영역에서의 검출은 포기해야 한다. 반대로, (b) 와 같은 경우에는, 비교적 저속 영역까지 검출이 가능하지만, 고장의 크기가 큰 경우만 검출 가능할 것이다.

[0145] 도 11 및 도 12는 적응 임계값에 따른 검출 가능 영역을 나타낸 그래프로서, 상기 도 10의 문제를 해결하기 위해 도 11과 같이 속도와 전류의 크기에 따라 적응 임계 값을 적용한다면, 검출 가능 영역을 크게 가져갈 수 있다.

[0146] 앞의 강인성 해석 결과에 의해 위치 추정기가 가질 수 있는 최대 오차는 다음의 수학식 41과 같은 범위를 가질 수 있다.

수학식 41

[0147]
$$\delta_{\max} \le \left|\delta_{\Delta R\max}\right| + \left|\delta_{\Delta L\max}\right| + \left|\delta_{\Delta u\max}\right|$$

[0148] 여기서, $\delta_{\Delta R\max} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta R_{\max} I_m}{\lambda_m \omega}\right)$, $\delta_{\Delta u\max} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta u_{\max}}{\lambda_m \omega}\right)$,

$$\delta_{\Delta L\max} = \tan^{-1}\left(\frac{\frac{\Delta L_{\max}}{L+\Delta L_{\max}} I_m}{\lambda_m}\right)$$

[0149] 이 최대 오차를 가지고 적응 임계값을 다음의 수학식 42와 같이 결정한다. 초기 b은 $\delta_{\Delta L\max}$로 결정할 수 있지만, 실제 실시예에서 노이즈에 의한 영향을 고려하여 조정할 수 있다.

수학식 42

$$h = \tan^{-1}\left(\frac{\left(\Delta R_{\max} I_m + \Delta u_{\max}\right)}{\lambda_m}\frac{1}{\omega}\right) + b$$

[0150] 여기서, $\omega = \begin{cases} \omega & ,if\ \omega >= \omega_{\min} \\ \omega_{\min} & ,else \end{cases}$, $b = \delta_{\Delta L\max}$

[0151] 따라서, 상기와 같이 구성된 본 발명에 따른 영구자석 동기전동기의 회전자 위치센서 고장검출 장치 및 그 방법에 의하면, PMSM의 회전자 위치센서의 위상 변동 고장을 검출하되, 적응 임계값을 적용하여 잔차값의 크기에 따라 고장 여부를 판별함으로써 왜란이나 모델링 오차에 의한 오검출 및 미검출을 최소화할 수 있다.

[0152] 본 명세서에 기재된 본 발명의 실시예와 도면에 도시된 구성은 본 발명의 가장 바람직한 실시예에 관한 것이고, 발명의 기술적 사상을 모두 포괄하는 것은 아니므로, 출원시점에 있어서 이들을 대체할 수 있는 다양한 균등물과 변형예들이 있을 수 있음을 이해하여야 한다. 따라서 본 발명은 상술한 실시예에 한정되지 아니하며, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 누구든지 다양한 변형실시가 가능한 것은 물론이고, 그와 같은 변경은 청구범위 기재의 권리범위 내에 있게 된다.

부호의 설명

[0153] 100 : 위치 추정부

200 : 실제 위치 검출부

300 : 잔차 산출부

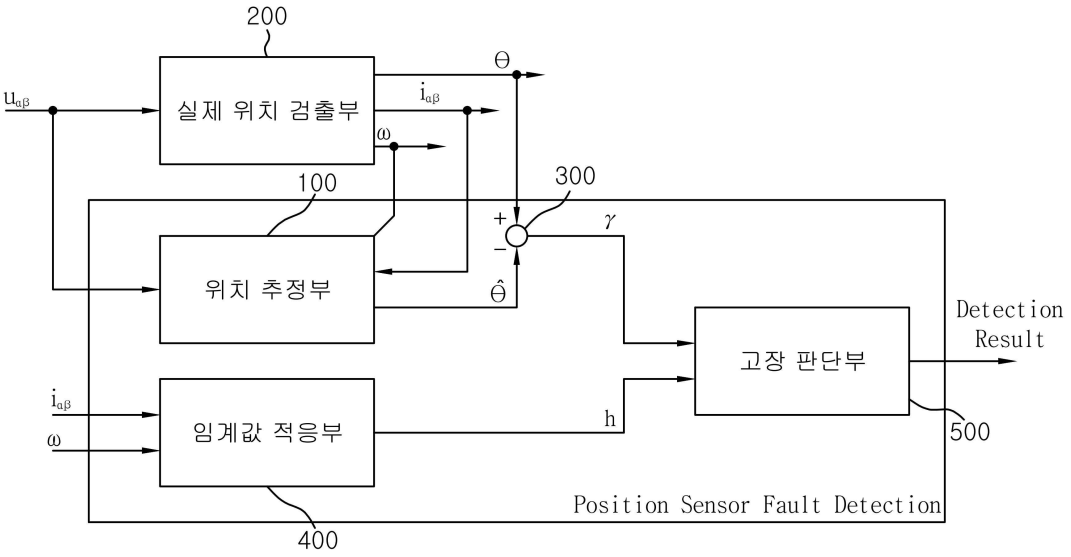
400 : 적응 임계값 산출부

500 : 고장 판단부

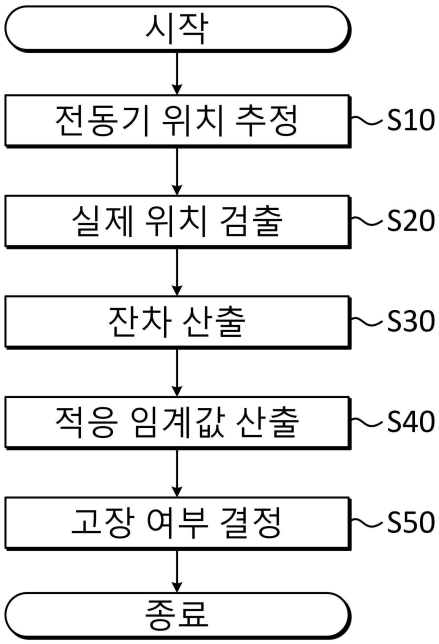
u_{abc}, u_a, u_b, u_c	고정 좌표계에서 3 상 정보로 표현된 전압
$u_{\alpha\beta}, u_\alpha, u_\beta$	고정 좌표계에서 2 상 정보로 표현된 전압
u_{dq}, u_d, u_q	회전 좌표계에서 2 상 정보로 표현된 전압
u_{xo}	극전압
u_{xn}	상전압
u_{no}	중성점 전압
U	전압의 크기
U_{dc}	DC 버스 전압
i_{abc}, i_a, i_b, i_c	고정 좌표계에서 3 상 정보로 표현된 전류
$i_{\alpha\beta}, i_\alpha, i_\beta$	고정 좌표계에서 2 상 정보로 표현된 전류
i_{dq}, i_d, i_q	회전 좌표계에서 2 상 정보로 표현된 전류
I	전류의 크기
e_{abc}, e_a, e_b, e_c	역기전력
R	상저항
L	자기 인덕턴스
M	상호 인덕턴스
$L_d\ L_q$	d 축 및 q 축 인덕턴스
λ_m	영구자석 쇄교자속
θ	전동기 회전각
ω	전동기 회전각속도
τ	전동기 발생 토크
τ_l	전동기 부하토크
F	제동력
x^*	특정 물리 량의 지령치
$\hat{x}$	특정 물리 량의 측정치 또는 추정치
$\overline{x}$	특정 물리 량의 평균치
$\dot{x}$	특정 물리 량의 미분치
γ	잔차
h	임계값
$\mathbf{x}$	관측기의 상태 벡터
$\mathbf{y}$	관측기의 출력 벡터
$\mathbf{u}$	관측기의 입력 벡터
$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$	관측기의 특성 행렬, 입력 행렬 및 출력 행렬
$\mathbf{G}$	관측기의 이득 행렬
λ	행렬의 고유치
T_{dead}	데드 타임
T_{pwm}	PWM 주기
U_{fw}	다이오드 순방향 전압강하
R_{on}	FET 도통 저항

도면

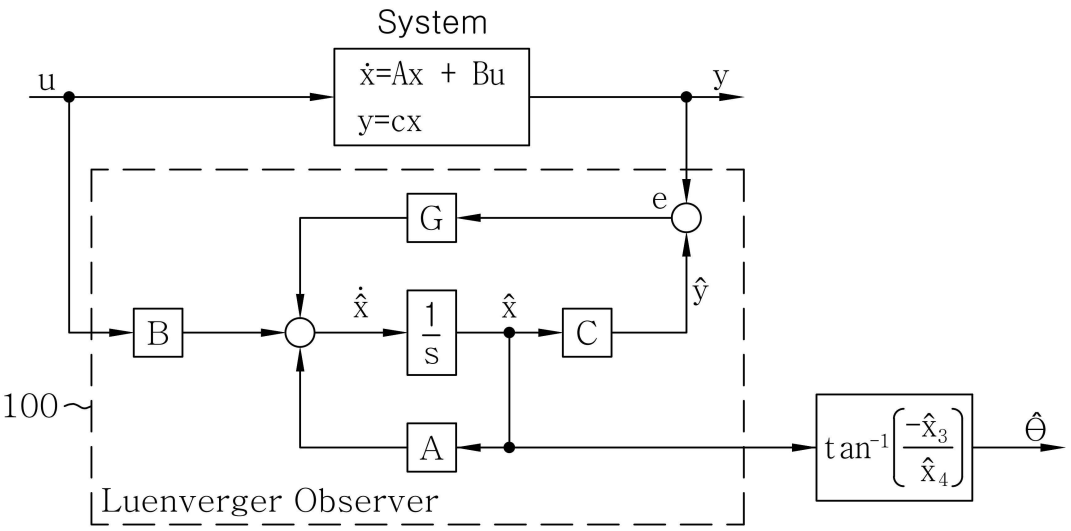
도면1


200
실제 위치 검출부
Θ
$i_{\alpha\beta}$
ω
$u_{\alpha\beta}$
100
300
위치 추정부
+
−
γ
$\hat{\theta}$
고장 판단부
Detection
Result
500
$i_{\alpha\beta}$
ω
임계값 적응부
h
Position Sensor Fault Detection
400

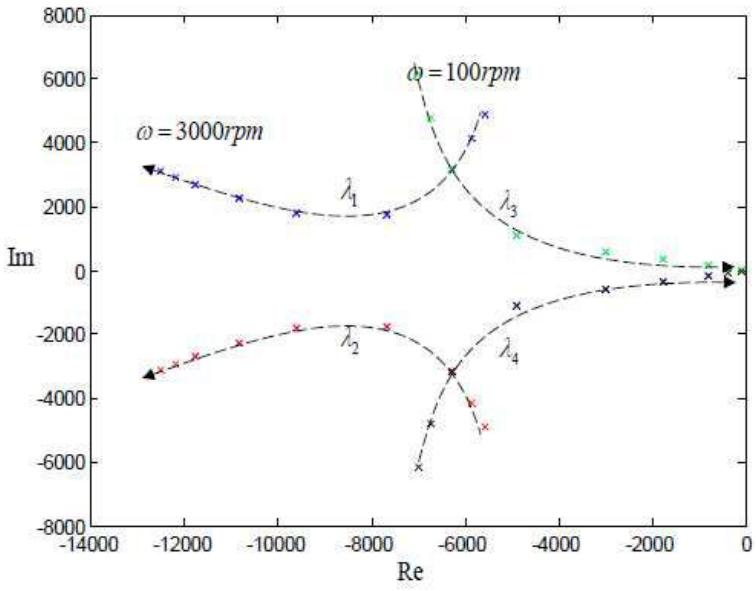
도면2


시작
전동기 위치 추정
S10
실제 위치 검출
S20
잔차 산출
S30
적응 임계값 산출
S40
고장 여부 결정
S50
종료

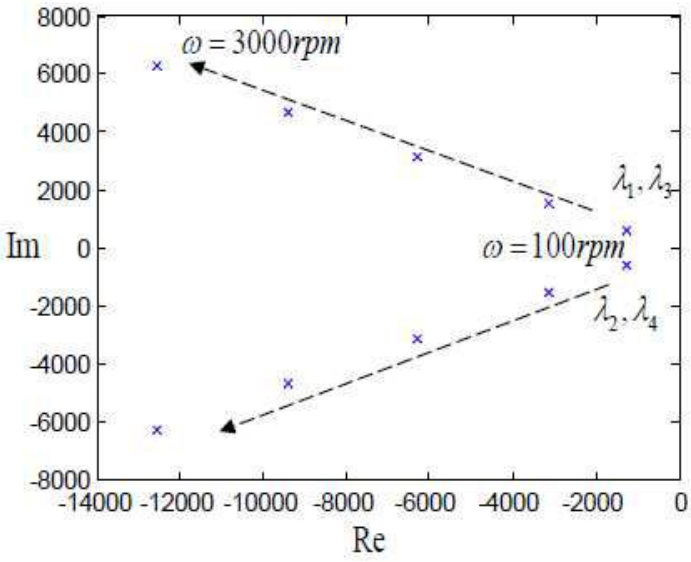
도면3


System
u
ẋ=Ax + Bu
y=cx
y
e
G
B
ẋ
1/s
x̂
C
ŷ
100
A
Luenverger Observer
tan⁻¹(-x̂3/x̂4)
θ̂

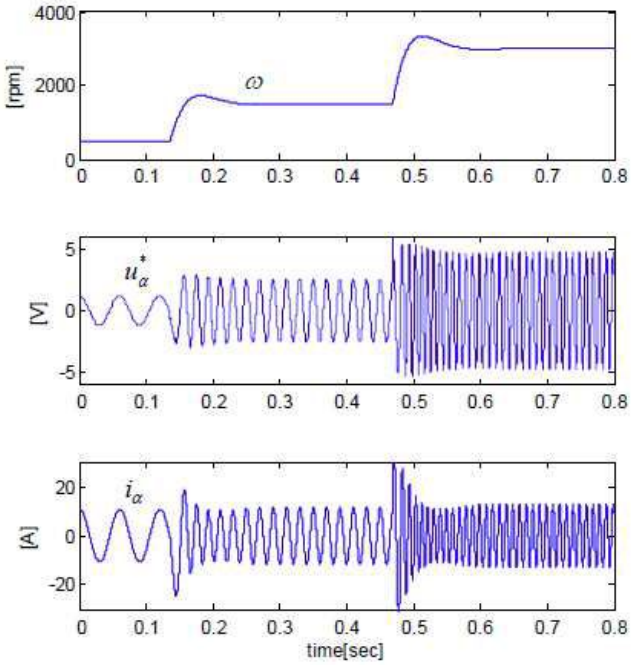
도면4


ω = 100rpm
ω = 3000rpm
λ1
λ2
λ3
λ4
Im
Re
8000
6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
-8000
-14000
-12000
-10000
-8000
-6000
-4000
-2000
0

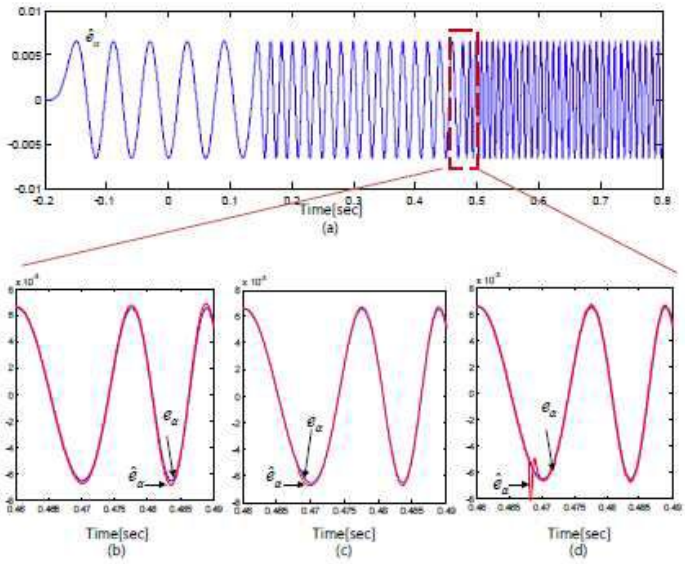
도면5


8000
6000
4000
2000
Im 0
-2000
-4000
-6000
-8000
-14000 -12000 -10000 -8000 -6000 -4000 -2000 0
Re
ω = 3000rpm
λ1, λ3
ω = 100rpm
λ2, λ4

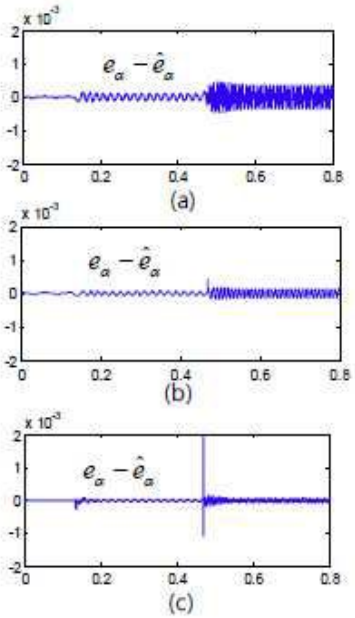
도면6


4000
2000
0
[rpm]
ω
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8
5
0
-5
[V]
u*α
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8
20
0
-20
[A]
iα
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8
time[sec]

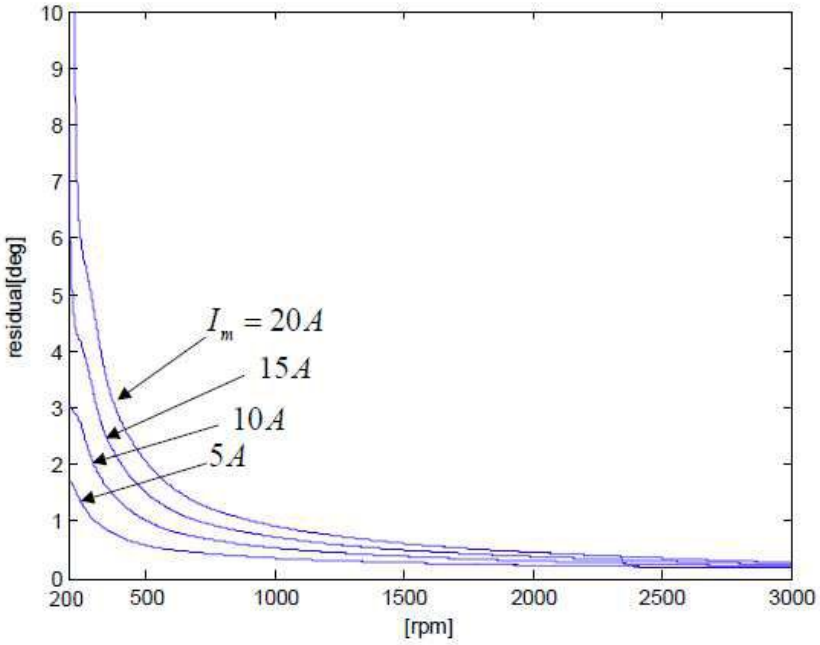
도면7



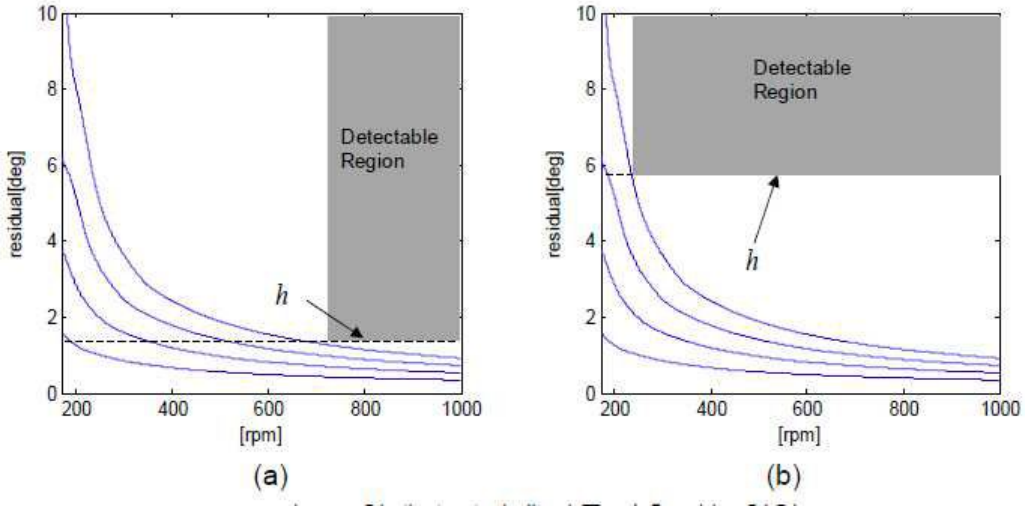
도면8



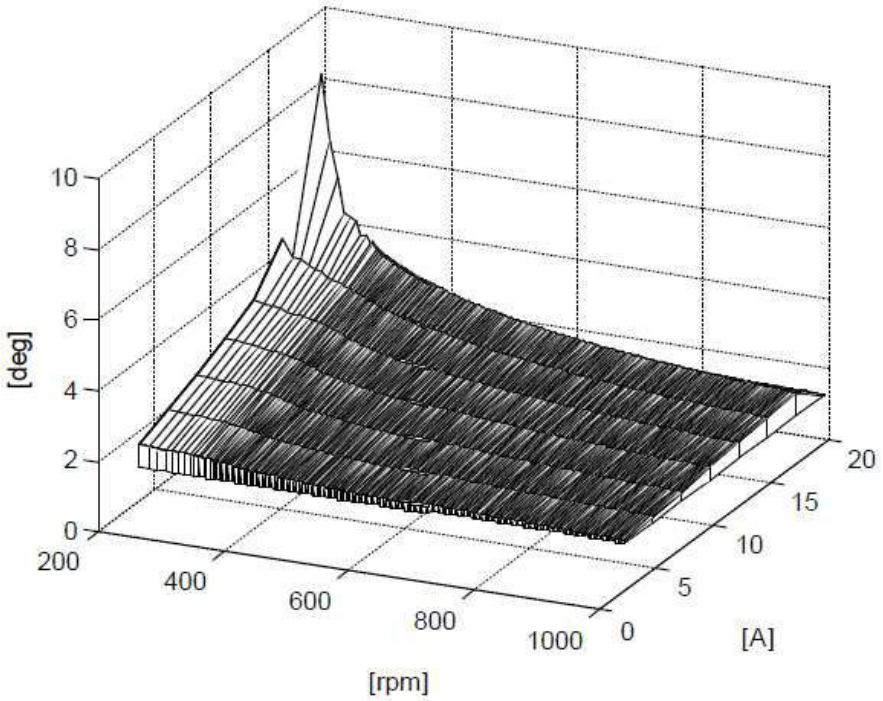
도면9


residual[deg]
[rpm]
$I_m = 20A$
$15A$
$10A$
$5A$

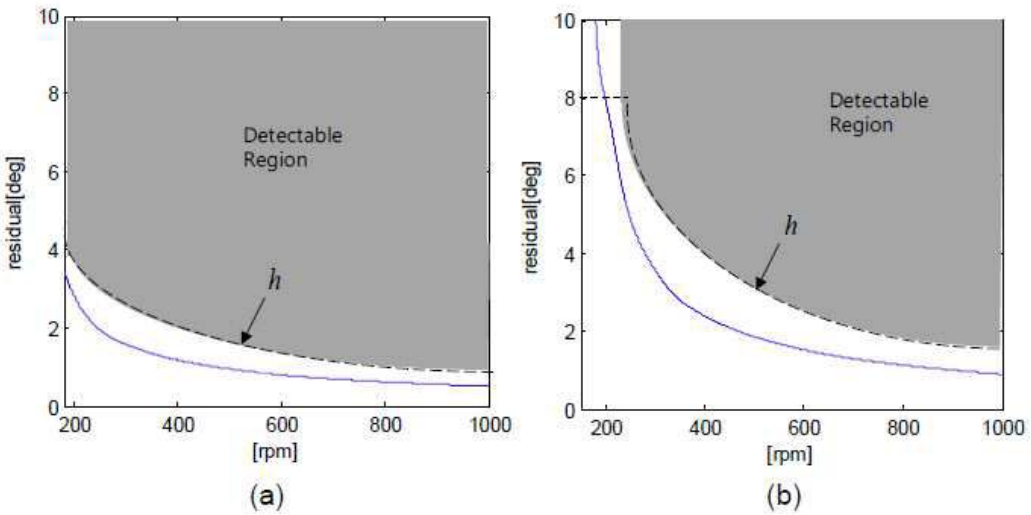
도면10


residual[deg]
[rpm]
Detectable Region
h
(a)
(b)

도면11


10
8
6
4
2
0
[deg]
200
400
600
800
1000
[rpm]
0
5
10
15
20
[A]

도면12


residual[deg]
Detectable
Region
h
200
400
600
800
1000
[rpm]
(a)
residual[deg]
Detectable
Region
h
200
400
600
800
1000
[rpm]
(b)