

(51) 국제특허분류:
H02P 21/14 (2006.01)

(21) 국제출원번호: PCT/IB2017/056323

(22) 국제출원일: 2017년 10월 12일 (12.10.2017)

(25) 출원언어: 한국어

(26) 공개언어: 한국어

(30) 우선권정보: 10-2016-0132091 2016년 10월 12일 (12.10.2016) KR

(71) 출원인: 경북대학교 산학협력단 (KYUNGPOOK NATIONAL UNIVERSITY INDUSTRY-ACADEMIC COOPERATION FOUNDATION) [KR/KR]; 41566 대구시 북구 대학로 80, Daegu (KR).

(72) 발명자: 최종우 (CHOI, Jong Woo); 42759 대구시 달서구 조암남로 132, 106동 602호, Daegu (KR). 조권재 (JO,

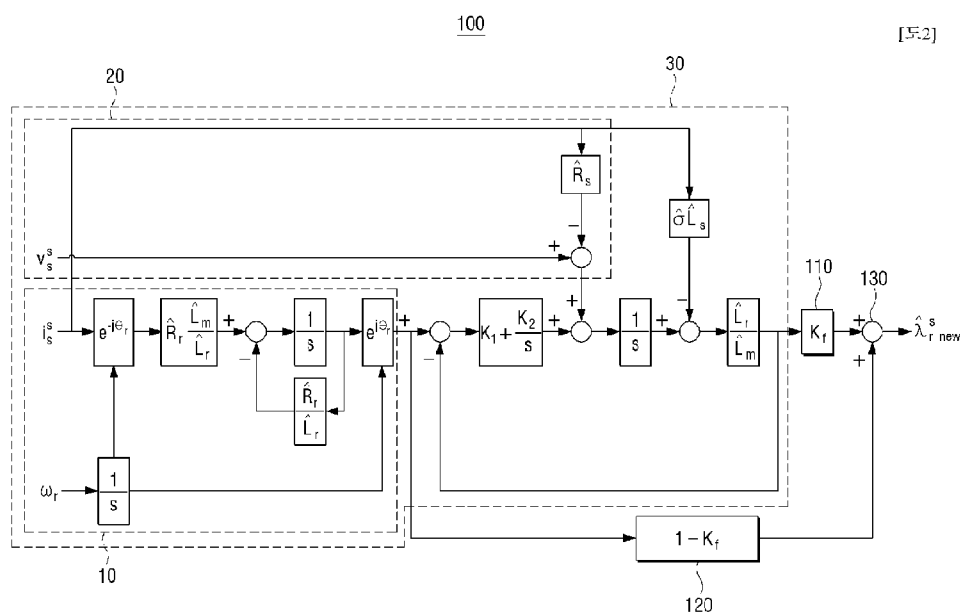
Gwon Jae); 41036 대구시 동구 팔공로 26길 19-5, Daegu (KR).

(74) 대리인: 김태현 (KIM, Tae-hun); 06626 서울시 서초구 강남대로 343 신덕빌딩 9층, Seoul (KR).

(81) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 국내 권리의 보호를 위하여): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: FLUX OBSERVER FOR INDUCTION MOTOR AND FLUX ESTIMATION METHOD FOR INDUCTION MOTOR

(54) 발명의 명칭: 유도전동기의 자속관측기 및 자속 추정 방법

(1) $\hat{\lambda}_r^s$

(57) **Abstract:** Disclosed are a flux observer for an induction motor, and a flux estimation method for an induction motor. The flux estimation method for the induction motor is characterized by including: a step in which a current model flux observer receives input of a stator current to calculate a current model-estimated rotor flux; a step in which a Gopinath flux observer including a current model flux observer receives input of a stator voltage and a stator current to calculate a Gopinath model-estimated rotor flux; a step in which a first calculator calculates a first flux that is corrected by multiplying the calculated Gopinath model-estimated rotor flux by a first gain value; and a step in which a second calculator calculates a second flux that is corrected by multiplying the calculated current model-estimated rotor flux by a second gain value; and a step in which the first totalizer calculates a final estimated rotor flux (I) by





(84) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 유럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

공개:

- 국제조사보고서 없이 공개하며 보고서 접수 후 이를 별도로 공개함 (규칙 48.2(g))

adding the corrected first flux and the corrected second flux.

(57) 요약서: 유도전동기의 자속관측기 및 자속 추정 방법이 개시된다. 유도전동기의 자속 추정방법은 전류 모델 자속관측기가 고정자 전류를 입력받아 전류 모델 추정 회전자 자속을 산출하는 단계와 전류 모델 자속관측기를 포함하는 고피나스 자속관측기가 고정자전압과 고정자 전류를 입력받아 고피나스 모델 추정 회전자 자속을 산출하는 단계와 제1 연산기가 산출된 고피나스 모델 추정 회전자 자속에 제1 이득값을 곱한 수정된 제1 자속을 산출하는 단계와 제2 연산기가 산출된 전류 모델 추정 회전자 자속에 제2 이득값을 곱한 수정된 제2 자속을 산출하는 단계와 제1 가산기가 수정된 제1 자속 및 수정된 제2 자속을 더하여 최종 추정 회전자 자속(I)을 산출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

명세서

발명의 명칭: 유도전동기의 자속관측기 및 자속 추정 방법

기술분야

- [1] 본 발명은 유도전동기의 자속 추정 방법 및 자속관측기에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 파라미터 오차에 강인한 유도전동기의 자속 추정 방법 및 자속관측기에 관한 것이다.

배경기술

- [2] 전동기는 현대 사회에서 가장 중요한 동력원으로 다양한 산업 분야 및 생활 가전 등 많은 영역에 사용되고 있다. 특히, 내구성과 효율이 높은 유도전동기는 벡터 제어 이론의 등장으로 인해 순시 토크 제어가 가능해져 전동기의 정밀 구동에 많이 이용되고 있다. 회전자 자속 기준 직접 벡터 제어가 주로 사용되는데, 자속 정보를 알아내기 위해 자속관측기를 이용하여 이를 추정하는 방식이 주로 이용된다.
- [3] 대표적인 방식으로 전압 모델, 전류 모델과 상태관측기를 이용하는 방법이 있다. 전압 모델은 회전자 파라미터의 오차에 강인하다는 장점이 있으나, 저속 영역에서는 역기전력이 낮고 노이즈의 영향이 크기 때문에 이 영역에서는 구현이 어려운 단점이 있다. 추가적으로, 전압 모델은 옵셋 전압 성분 때문에 순수 적분이 불가능하여 실제 구현하는 것이 어렵다. 한편, 전류 모델은 회전자 파라미터 오차에 민감하기 때문에 자속의 오차가 커지는 단점이 있다. 그래서 두 모델의 장점을 혼합한 페루프 고포나스 모델이 등장하였다. 그러나, 전동기 파라미터의 오차가 있을 경우, 고포나스 모델은 특성 함수의 성질 때문에 중속 영역에서 오히려 전류 모델보다 자속 오차가 커지는 단점이 있다. 또한, 고포나스 모델은 전 속도 영역에서 전류 모델을 이용하므로 오차가 더 커지는 단점이 있다.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [4] 본 발명의 목적은 자속의 오차를 줄임으로써 회전자 자속의 위치를 정확하게 파악하여 유도전동기를 효율적으로 제어할 수 있는 유도전동기의 자속관측기 및 자속 추정 방법을 제공함에 있다.

과제 해결 수단

- [5] 상기 문제점을 해결하기 위하여, 옵셋 전압에 영향이 없는 전압 모델 자속관측기 및 자속 추정 방법을 제안한다. 기본적으로 고포나스 모델의 자속관측기를 이용하고, 특성함수의 해석을 통해서 실현된다.
- [6] 본 발명은 상기 목적을 달성하기 위해, 전류 모델 자속관측기가 고정자 전류를 입력받아 전류 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_cm}^s$)을 산출하는 단계와 상기 전류 모델 자속관측기를 포함하는 고포나스 자속관측기가 고정자 전압과 상기 고정자

전류를 입력받아 고피나스 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_gm}^s$)을 산출하는 단계와 제1 연산기가 산출된 상기 고피나스 모델 추정 회전자 자속에 제1 이득값(k_f)을 곱한 수정된 제1 자속을 산출하는 단계와 제2 연산기가 산출된 상기 전류 모델 추정 회전자 자속에 제2 이득값($1-k_f$)을 곱한 수정된 제2 자속을 산출하는 단계와 제1 가산기가 상기 수정된 제1 자속 및 상기 수정된 제2 자속을 더하여 최종 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)을 산출하는 단계;를 포함하는 유도전동기의 자속 추정 방법을 제공한다.

- [7] 동기 각속도(ω_e)가 기 설정된 경계 각속도(ω_b)보다 큰 경우, 상기 최종 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)은 정상상태에서 전압 모델 자속관측기의 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_vm}^s$)일 수 있다.

- [8] 상기 제1 이득값(k_f)은, $k_f = \frac{1}{F_{gm}(s)}|_{s=j\omega_e}$ 에 의해 산출되고, 상기 $F_{gm}(s)$ 는 고피나스 모델의 특성함수인 $F_{gm}(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i}$ 이다.

- [9] 동기 각속도(ω_e)가 기 설정된 경계 각속도(ω_b)보다 작은 경우, 상기 최종 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)은 전압 모델 자속관측기와 전류 모델 자속관측기의 혼합된 추정 회전자 자속일 수 있다.

- [10] 동기 각속도(ω_e)가 기 설정된 경계 각속도(ω_b)보다 작은 경우, 상기 제1 이득값(k_f)은, 기 설정된 경계 각속도(ω_b)에 대한 동기 각속도(ω_e)의 비의 제곱에 고피나스 모델의 정상상태 특성함수의 역수의 곱으로 산출될 수 있다.

- [11] 감산기가 상기 최종 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)의 제1 자속각과 적분기로부터 피드백된 제2 자속각을 입력 받아 자속각의 오차를 산출하는 단계와 비례적분 제어기가 산출된 상기 자속각의 오차로부터 보상 동기 각속도($\Delta\omega_e$)를 산출하는 단계와 제2 가산기가 상기 산출된 보상 동기 각속도와 상기 유도전동기의 파라미터를 이용하여 산출된 전향 보상 각속도를 더하여 상기 동기 각속도를 추정하는 단계와 상기 적분기가 상기 산출된 동기 각속도를 입력받아 상기 제2 자속각을 산출하는 단계;를 더 포함하고, 상기 제1 자속을 산출하는 단계는 상기 추정된 동기 각속도를 입력받아 상기 추정된 동기 각속도를 기초로 상기 제1 이득값(k_f)을 산출하고, 상기 제2 자속을 산출하는 단계는 상기 추정된 동기 각속도를 입력받아 상기 추정된 동기 각속도를 기초로 상기 제2 이득값($1-k_f$)을 산출할 수 있다.

- [12] 본 발명은 고정자 전류를 입력받아 전류 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)을

산출하는 전류 모델 자속관측기와 상기 전류 모델 자속관측기를 포함하며, 고정자 전압과 상기 고정자 전류를 입력받아 고피나스 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_gm}^s$)을 산출하는 고피나스 모델 자속관측기와 산출된 상기 고피나스 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_gm}^s$)에 제1 이득값(k_j)을 곱한 수정된 제1 자속을 산출하는 제1 연산기와 산출된 상기 전류 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_cm}^s$)에 제2 이득값($1-k_j$)을 곱한 수정된 제2 자속을 산출하는 제2 연산기와 상기 수정된 제1 자속 및 상기 수정된 제2 자속을 더하여 최종 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)을 산출하는 제1 가산기;를 포함하는 유도전동기의 자속관측기를 제공한다.

발명의 효과

- [13] 본 발명은 순수 적분 문제로 인하여 구현이 어려운 전압 모델을 정상상태에서 구현을 할 수 있으며, 전압 모델의 성능이 좋지 않은 저속 영역에서는 기존의 고피나스 모델 보다 성능이 뛰어난 전류 및 전압 혼합 모델을 제공하여, 유도전동기의 파라미터 오차에 강인한 자속 벡터의 추정이 가능하다.

도면의 간단한 설명

- [14] 도 1 및 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기의 자속 추정 알고리즘을 나타내는 블록선도(Block diagram)이다.
- [15] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기의 자속 추정 방법을 나타내는 순서도이다.
- [16] 도 4는 동기 각속도를 추정하는 방법을 나타내는 순서도이다.
- [17] 도 5는 동기 각속도의 추정기를 나타내는 블록선도이다.
- [18] 도 6은 정계 각속도를 기준으로 동기 각속도의 변화에 따른 특성함수를 나타내는 그래프이다.
- [19] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 유도전동기의 자속 추정 방법을 시뮬레이션 및 실험하기 위한 유도전동기의 사양 및 파라미터를 나타낸 표이다.
- [20] 도 8 및 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 유도전동기의 자속 추정 방법을 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 그래프이다.
- [21] 도 10 및 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 유도전동기의 자속 추정 방법을 이용하여 실험한 결과를 나타낸 그래프이다.

발명의 실시를 위한 형태

- [22] 이하, 본 문서의 다양한 실시예가 첨부된 도면을 참조하여 기재된다. 그러나 이는 본 문서에 기재된 기술을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 문서의 실시예의 다양한 변경(modifications), 균등물(equivalents), 및/또는 대체물(alternatives)을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 도면의 설명과 관련하여, 유사한 구성요소에 대해서는 유사한 참조 부호가 사용될 수 있다.
- [23] 또한, 본 문서에서 사용된 "제 1," "제 2," 등의 표현들은 다양한 구성요소들을,

순서 및/또는 중요도에 상관없이 수식할 수 있고, 한 구성요소를 다른 구성요소와 구분하기 위해 사용될 뿐 해당 구성요소들을 한정하지 않는다. 예를 들면, 제 1 사용자 기기와 제 2 사용자 기기는, 순서 또는 중요도와 무관하게, 서로 다른 사용자 기기를 나타낼 수 있다. 예를 들면, 본 문서에 기재된 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제 1 구성요소는 제 2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제 2 구성요소도 제 1 구성요소로 바꾸어 명명될 수 있다.

- [24] 본 문서에서 사용된 용어들은 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 다른 실시예의 범위를 한정하려는 의도가 아닐 수 있다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함할 수 있다. 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 용어들은 본 문서에 기재된 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가질 수 있다. 본 문서에 사용된 용어들 중 일반적인 사전에 정의된 용어들은, 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 동일 또는 유사한 의미로 해석될 수 있으며, 본 문서에서 명백하게 정의되지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다. 경우에 따라서, 본 문서에서 정의된 용어일지라도 본 문서의 실시예들을 배제하도록 해석될 수 없다.
- [25] 도 1 및 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100)의 자속 추정 방법을 나타내는 블록선도(Block diagram)이다.
- [26] 도 1 및 도 2를 참조하면, 유도전동기 자속관측기(100)는 전류 모델 자속관측기(10), 고피나스 모델 자속관측기(30), 제1 연산기(110), 제2 연산기(120)와 제1 가산기(130)를 포함할 수 있다.
- [27] 전류 모델 자속관측기(10)는 고정자 전류를 입력받아 전류 모델 추정 회전자 자속을 산출할 수 있다. 전압 모델 자속관측기(20)는 고정자 전류 및 고정자 전압을 입력받아 전압 모델 추정 회전자 자속을 산출할 수 있다.
- [28] 고피나스 모델 자속관측기(30)는 상기 전류 모델 자속관측기(10) 및 전압 모델 자속관측기(20)를 포함할 수 있으며, 고정자 전압과 상기 고정자 전류를 입력받아 고피나스 모델 추정 회전자 자속을 산출할 수 있다.
- [29] 도 1로부터 고피나스 모델 자속관측기(30)의 고피나스 모델 추정 회전자 자속 식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[30] \quad \hat{\lambda}_{r_{gm}}^s = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} \hat{\lambda}_{r_{vm}}^s + \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \hat{\lambda}_{r_{cm}}^s$$

$$[31] \quad K_p = -\frac{\hat{L}_r}{\hat{L}_m} K_1, K_i = -\frac{\hat{L}_r}{\hat{L}_m} K_2$$

- [32] 상기 식을 살펴 보면 고피나스 모델 추정 회전자 자속은 전압 모델과 전류 모델 추정 회전자 자속에 각각 고주파 통과 필터(high pass filter)와 저주파 통과 필터(low pass filter)를 거친 형태로 나타난다.

- [33] 고피나스 모델 추정 회전자 자속의 직류 성분 ($\Lambda_{r_gm}^s$)은 전압 모델의 직류 성분에 상기 고피나스 모델 추정 회전자 자속 식의 고주파 통과 필터($\frac{s^2}{s^2+K_p s+K_i}$)를 거친 형태와 같다. 따라서, 정상 상태에서 아래의 식과 같이 직류 성분이 0이 되므로 고피나스 모델로 전압 모델의 순수 적분 문제를 해결할 수 있다.

$$[34] \quad \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{V_o + \lambda_{r0}^s s}{s^2 + K_p s + K_i} = 0$$

- [35] 한편, $F_{gm}(s)$ 를 고피나스 모델의 특성함수 $F_{gm}(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i}$ 로 정의 하면,

고피나스 모델 추정 회전자 자속 식은 아래와 같이 정리된다.

$$[36] \quad \hat{\lambda}_{r_gm}^s = F_{gm}(s) \hat{\lambda}_{r_ym}^s + (1 - F_{gm}(s)) \hat{\lambda}_{r_cm}^s = \hat{\lambda}_{r_cm}^s + (F_{gm}(s) (\hat{\lambda}_{r_ym}^s - \hat{\lambda}_{r_cm}^s))$$

- [37] 고피나스 모델의 특성함수를 운전 각속도(ω_e)에서 주파수 응답해석을 하면, 다음과 같다.

$$[38] \quad F_{gm}(j\omega_e) = \frac{\omega_e^2}{\sqrt{(K_i - \omega_e^2)^2 + (K_p \omega_e)^2}} e^{j\alpha} \quad \alpha = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{K_i - \omega_e^2}{K_p \omega_e}$$

- [39] 고피나스 모델의 특성함수의 크기 $|F_{gm}(j\omega_e)|$ 는 운전 주파수가 '0'이면 '0'이 되고,

운전 주파수가 '∞'이면 '1'이 된다. 그러므로 저속에서는 전류 모델이 우세(dominant)하며 고속에서는 전압 모델이 우세하다. 또한, 차단 주파수는 전압 모델과 전류 모델의 경계가 되는 전이 주파수(transition frequency)로 해석될 수 있다. 그러나 중속에서는 실제 자속의 위치를 신뢰할 수 있는 전류 모델과 전압 모델로부터 자속을 추정하기 어려운 문제점이 있고, 고피나스 모델은 중속에서 성능이 좋지 않다.

- [40] 고피나스 모델의 전이 주파수를 매우 낮게 설정한다면, 고피나스 모델은 대부분 속도 영역에서 전압 모델로 구현될 수 있다. 그러나 고피나스 모델의 전이 주파수를 낮게하여 고피나스 모델이 전압 모델과 유사하게 동작되더라도 과도 상태(transient-state)에서 자속의 직류 성분이 오랫동안 남아있게 되므로 정상 상태 도달 시간이 길어지는 단점이 있다.

- [41] 도 1에 따른 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100)는 아래의 식과 같다.

[42] 최종 추정 회전자 자속은

$$[43] \quad \hat{\lambda}_{r_new}^s = k_f \hat{\lambda}_{r_gm}^s + (1 - k_f) \hat{\lambda}_{r_cm}^s$$

$$[44] \quad \hat{\lambda}_{r_new}^s = k_f F_{gm}(s) \hat{\lambda}_{r_ym}^s + (1 - k_f F_{gm}(s)) \hat{\lambda}_{r_cm}^s$$

- [45] 로 나타나고, 자속관측기(100)의 특성 함수는 다음과 같은 새로운 특성 함수 $F_{new}(s)=k_f F_{gm}(s)$ 로 변경된다. 여기서, k_f 는 다음과 같이 고피나스 모델의 정상 상태에서의 특성 함수인 $F_{gm}(j\omega_e)=\frac{\omega_e^2}{\sqrt{(K_i-\omega_e^2)^2+(K_p\omega_e)^2}}e^{j\alpha}$ 의 역수이다.

- [46] $k_f=\frac{1}{F(j\omega_e)}=1-\frac{K_i}{\omega_e^2}-j\frac{K_p}{\omega_e}$ 와 같이 제1 이득 k_f 가 결정되면, 새로운

자속관측기(100)의 특성 함수는 다음과 같고, 정상상태에서는 1이 된다.

- [47] $F_{new}(s)=(1-\frac{K_i}{\omega_e^2}-j\frac{K_p}{\omega_e})\frac{s^2}{s^2+K_p s+K_i}$

- [48] $F_{new}(j\omega_e)=(1-\frac{K_i}{\omega_e^2}-j\frac{K_p}{\omega_e})\frac{\omega_e^2}{\omega_e^2-K_i-jK_p\omega_e}=1$

- [49] 따라서, 정상상태에서 최종 추정 회전자 자속은 다음과 같다.

- [50] $\hat{\lambda}_{r_new}^s=k_f F_{gm}(j\omega_e)\hat{\lambda}_{r_vm}^s+(1-k_f F_{gm}(j\omega_e))\hat{\lambda}_{r_cm}^s=\hat{\lambda}_{r_vm}^s$

- [51] 도 1 및 도 2에 따른 본 발명의 유도전동기의 자속관측기(100)에 의하면, 결국 전류 모델이 상쇄되면서 전압 모델만을 출력할 수 있다. 추정 자속의 직류성분은 기존의 고피나스 모델과 마찬가지로 상쇄되고, 순수 적분의 문제점을 해결하는 전압 모델이 구현될 수 있다.

- [52] 도 3은 도 1 및 도 2의 자속관측기(100)가 자속을 추정하는 방법에 대해서 순서도를 나타낸 것이다.

- [53] 도 3을 참조하면, 전류 모델 자속관측기(10)가 고정자 전류를 입력받아 전류 모델 추정 회전자 자속을 산출할 수 있다(S310). 전류 모델 자속관측기(10)를 포함하는 고피나스 모델 자속관측기(30)가 고정자 전압과 상기 고정자 전류 및 전류 모델 추정 회전자 자속을 입력받아 고피나스 모델 추정 회전자 자속에 제1 이득값을 곱한 수정된 제1 자속을 산출할 수 있다.(S320) 제1 연산기(110)가 산출된 고피나스 모델 추정 회전자 자속에 제1 이득값을 곱한 수정된 제1 자속을 산출할 수 있다.(S330) 제2 연산기(120)가 산출된 상기 전류 모델 추정 회전자 자속에 제2 이득 값을 곱한 수정된 제2 자속을 산출할 수 있다.(S340) 제1 가산기(130)가 수정된 제1 자속 및 수정된 제2 자속을 더하여 최종 추정 회전자 자속을 산출할 수 있다.(S350)

- [54] 도 4는 동기 각속도를 추정하는 방법을 나타내는 순서도이다.

- [55] 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100)를 구현하기 위한 제1 이득(k_f)의 연산 과정에는 동기 각속도(ω_e)가 필요하다. 동기 각속도는 회전자의 동기

좌표계(synchronous reference frame) q축 전압 방정식인

$$v_{qr}^e = \hat{R}_r i_{qr}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qr}^e + (\hat{\omega}_e - \omega_r) \hat{\lambda}_{dr}^e \quad \text{와 회전자의 쇄교 자속식인} \quad \lambda_r^\omega = \hat{L}_r i_r^\omega + \hat{L}_m i_s^\omega$$

로부터 얻어질 수 있다. 동기 각속도의 추정식은 아래와 같다.

[56]

$$\hat{\omega}_e = \omega_r + \hat{R}_r \frac{\hat{L}_m}{\hat{L}_r} \frac{i_{qs}^e}{\hat{\lambda}_{dr}^e}$$

[57]

상호 인덕턴스(L_m)와 회전자 인덕턴스(L_r)의 비는 약 1로 상호 인덕턴스(L_m)의 변동에는 큰 영향이 없지만, 회전자 저항(R_r)이 오차에 영향을 끼친다.

[58]

이러한 문제를 해결하기 위해 자속관측기(100)의 출력에서 자속각($\hat{\theta}_e$)을 미분하여 동기 각속도(ω_e)가 얻어질 수 있다. 하지만 실제 전동기 구동 시스템에서는 고주파와 노이즈의 때문에 미분을 구현하는 것은 불가능하기 때문에 도 4 및 도 5와 같이 구현하였다.

[59]

도 4를 참조하면, 감산기(210)가 상기 최종 추정 회전자 자속의 제1 자속각과 적분기(240)로부터 피드백된 제2 자속각을 입력받아 자속각의 오차를 산출할 수 있다(S410). 비례적분 제어기(220)가 산출된 자속각의 오차로부터 보상 각속도($\Delta\omega_e$)를 산출할 수 있다(S420). 제2 가산기(230)가 산출된 보상 각속도와 유도전동기의 파라미터를 이용하여 산출된 전향 보상 각속도를 더하여 동기 각속도를 산출할 수 있다(S430). 적분기(240)가 산출된 동기 각속도를 입력받아 상기 제2 자속각을 산출할 수 있다(S440). 상기 단계를 거쳐 동기 각속도가 추정된다.

[60]

이렇게 추정된 동기 각속도는 자속관측기(100)의 자속 추정 방법 단계에서, 제1 자속을 산출하는 단계는 추정된 동기 각속도를 입력받아 추정된 동기 각속도를 기초로 제1 이득값(k_f)을 산출하고, 제2 자속을 산출하는 단계는 추정된 동기 각속도를 입력받아 추정된 동기 각속도를 기초로 제2 이득값($1-k_f$)을 산출한다.

[61]

이하에서, 도 5를 참조하여 동기 각속도 추정기(200)의 구성을 살펴본다.

[62]

도 5는 동기 각속도 추정기(200)를 나타내는 블록선도이다.

[63]

동기 각속도 추정기(200)는 감산기(210), 비례적분 제어기(220), 제2 가산기(230)와 적분기(240)를 포함할 수 있다.

[64]

감산기(210)는 최종 추정 회전자 자속의 제1 자속각과 적분기(240)로부터 추정 동기각속도의 적분된 제2 자속각을 피드백 받아 자속각의 오차를 구한다. 비례적분 제어기(220)는 자속각의 오차로부터 보상 각속도($\Delta\omega_e$)를 산출한다.

[65]

제2 가산기(230)는 유도전동기의 파라미터를 이용하여 구한 동기각속도($\hat{\omega}_e = \omega_r + \hat{R}_r \frac{\hat{L}_m}{\hat{L}_r} \frac{i_{qs}^e}{\hat{\lambda}_{dr}^e}$)을 보상 각속도($\Delta\omega_e$)에서 전향 보상하여 최종 출력단의

제2 자속각이 제1 자속각($\hat{\theta}_e$)으로 수렴하는 동안의 과도상태를 보상한다.

이러한 과정을 거쳐 최종적으로는 동기각속도($\hat{\omega}_e = \frac{d}{dt} \hat{\theta}_e$)로 출력된다.

- [66] 도 6은 경계 각속도를 기준으로 동기 각속도의 변화에 따른 특성함수를 나타내는 그래프이다.
- [67] 그래프에서 확인된 것처럼, 도 4 및 도 5에서 구해진 동기 각속도(ω_e)가 기 설정된 경계 각속도(ω_b)보다 큰 경우, 상기 최종 추정 회전자 자속은 정상상태에서 전압 모델 자속관측기(20)의 추정 회전자 자속으로 나타내도록 설계가 된다.
- [68] 동기 각속도(ω_e)가 기 설정된 경계 각속도(ω_b)보다 작은 경우에는 전압 모델과 전류 모델의 혼합 모델로 구현될 수 있다.
- [69] 우선, 동기 각속도(ω_e)가 기 설정된 경계 각속도(ω_b)보다 큰 경우, 제1 이득값(k_f)은 $k_f = \frac{1}{F(j\omega_e)} = 1 - \frac{K_i}{\omega_e^2} - j \frac{K_p}{\omega_e}$ 로 고피나스 모델의 특성함수의 역수로 이루어져, 최종 추정 회전자 자속은 전압 모델 추정 회전자 자속으로 이루어지게 된다. 이에 대한 설명은 앞에서 언급하였으므로 생략한다.
- [70] 동기 각속도(ω_e)가 기 설정된 경계 각속도(ω_b)보다 작은 경우, 제1 이득값(k_f)은 기 설정된 경계 각속도(ω_b)에 대한 동기 각속도(ω_e)의 비의 제곱에 고피나스 모델의 정상상태의 특성함수의 역수의 곱으로 산출되어 아래와 같이 표현된다.
- [71]
$$k_f = \left(\frac{\omega_e}{\omega_b}\right)^2 \frac{1}{F_{gm}(s)} \big|_{s=j\omega_e}$$
- [72] 상기 제1 이득 값을 이용하여 구해진 정상 상태에서의 혼합 모델의 특성 함수는 다음과 같다.
- [73]
$$F_{new}(j\omega_e) = \left(\frac{\omega_e}{\omega_b}\right)^2$$
- [74] 최종적인 정상 상태의 최종 추정 회전자 자속은 다음과 같다.
- [75]
$$\lambda_r^s = \left(\frac{\omega_e}{\omega_b}\right)^2 \lambda_{r_vm}^s + \left\{1 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_b}\right)^2\right\} \lambda_{r_cm}^s$$
- [76] 이와 같이 설계된 본 발명의 추정 자속기의 경우, 경계 주파수 이상에서는 추정 자속 벡터가 전압 모델에 위치하며, 경계 주파수 이하에서는 혼합 모델로서 전류 모델과 전압 모델의 중간 지점에 위치한다. 특히, $F_{new}(j\omega_e) = \left(\frac{\omega_e}{\omega_b}\right)^2$ 와 같이 특성 함수는 오직 실수로 설계되므로, 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기 모델은 기존의 고피나스 모델과 달리 중속에서도 자속 오차가 작기 때문에, 보다 정확한 자속이 추정될 수 있다.
- [77] 도 7은 본 발명의 일 실시예인 유도전동기의 자속 추정 방법을 시뮬레이션 하기 위한 유도전동기의 사양 및 파라미터를 나타낸 표이다.

- [78] 시뮬레이션에 의해, 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100)가 경계 주파수 이상에서 전압 모델로 구현되는지 확인하고자 한다. 사용된 유도전동기의 사양 및 파라미터는 도 7에 나타난 표와 같고, 인버터의 출력 전압의 윗 성분은 정격의 1%인 1.3 V로 설정하였다.
- [79] 자속관측기의 비교 대상은 기존의 전압 모델, 전류 모델, 고피나스 모델, 그리고 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100)의 모델이다.
- [80] 기존의 전압 모델은
$$\hat{\lambda}_{r_vm}^s = \frac{\hat{L}_r}{\hat{L}_m} \left\{ \left(\int v_s^s - \hat{R}_s i_s^s dt \right) - \hat{\sigma} \hat{L}_s i_s^s \right\} \quad \left(\hat{\sigma} = 1 - \frac{\hat{L}_m^2}{\hat{L}_s \hat{L}_r} \right)$$
와 같이 연산하되 v_s^s 에 윗 전압이 없도록 이상적인 것으로 한 것이며, 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델이 정상 상태에서 전압 모델로 구현되는지 확인을 위한 것이다. 고피나스 모델과 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델의 차단 주파수는 10 Hz로 설계하여 비례 제어기의 이득을 같게 하여 조건이 같도록 하였다. 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델의 혼합 모델과 전압 모델의 경계가 되는 경계 주파수는 10 Hz로 설계되었다. 그리고 성능의 평가가 되는 자속 오차는 실제 회전자 자속 벡터와 자속관측기의 추정 회전자 자속 벡터의 거리로 정의되었다. 최초 무부하에서 운전 중에 반부하가 인가되었다. 파라미터 오차는 회전자 파라미터인 회전자 저항(R_r)과 상호 인덕턴스(L_m)에 오차를 주었다.
- [81] 도 8 내지 도 9는 본 발명의 일 실시예인 유도전동기의 자속 추정 방법을 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 그래프이다.
- [82] 도 8을 참조하면, 유도전동기가 300 rpm으로 운전하는 것을 나타낸 것이다.
- [83] 부하 인가 전과 인가 후 모든 경우의 정상 상태에서, 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델은 전압 모델로 구현된다. 비록 부하가 인가된 과도 상태에서 본 발명의 일 실시예에 따른 모델의 자속 오차가 일시적으로 상승하지만, 기존의 고피나스 모델과 전류 모델보다는 자속 오차가 훨씬 낮다. 고피나스 모델은 전압 모델을 부분적으로 이용하지만, 특성 함수의 위상으로 인하여 오히려 전류 모델보다 자속 오차가 더 크게 나타난다.
- [84] 도 9를 참조하면, 유도전동기가 1000 rpm 운전하는 것을 나타낸 것이다. 고피나스 모델은 전이 주파수보다 높은 고속에서 전압 모델로 상당수 넘어가기 때문에 전류 모델보다 자속 오차가 작다. 본 발명의 일 실시예에 따른 모델은 300 rpm과 마찬가지로 전압 모델로 구현된다. 정상 상태뿐만 아니라 과도 상태에서도 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델은 전압 모델과 거의 동일하게 동작한다.
- [85] 도 10 내지 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 유도전동기의 자속 추정 방법을 이용하여 실험한 결과를 나타낸 그래프이다.
- [86] 실험의 조건은 시뮬레이션의 조건과 동일하다.

- [87] 시뮬레이션과 마찬가지로 비교대상은 전류 모델, 고피나스 모델과 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델이다.
- [88] 도 10은 회전자 저항의 오차가 있는 경우이다. 무부하에서는 차이가 없으나 부하를 인가한 이후에 차이가 나타난다. 300 rpm과 1000 rpm에서 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델이 정상 상태에서 전압 모델로 구현되면서 자속 오차가 0 Wb 이다. 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델은 중속과 고속에서 고피나스 모델 전류 모델보다 작은 자속의 오차를 가진다.
- [89] 혼합 모델로 구현되는 100 rpm에서도 본 발명의 일 실시예에 따른 모델은 기존의 모델보다 자속 오차가 낮다. 기존의 고피나스 모델과 달리 특성 함수의 위상이 없도록 설계를 했기 때문이다.
- [90] 도 11은 상호 인덕턴스의 오차가 있는 경우이다. 300 rpm과 1000 rpm에서 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델이 전압 모델로 구현되므로 무부하와 반부하 모두 자속 오차가 거의 0 Wb에 가깝다. 혼합 모델로 구현되는 100 rpm에서도 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델의 자속 오차가 기존의 모델보다 낮다.
- [91] 상기 시뮬레이션과 실험 결과를 살펴보면, 고피나스 모델은 특성함수의 성질에 따라 중속에서는 추정 자속의 오차가 크게 발생된다. 그러나 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100) 모델은 추정 자속의 오차가 중속과 고속에서는 전압 모델을 이용하게 되므로 오차가 정상상태에서는 거의 발생하지 않고, 저속에서도 혼합 모델을 이용하므로, 고피나스 모델보다 오차가 적게 발생된다. 따라서, 본 발명의 일 실시예에 따른 자속관측기(100)를 이용하면, 전 속도 영역에서 추정 자속의 오차가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 다양한 유도전동기의 회전자 파라미터 오차에도 강인한 특성을 가지는 자속관측기(100)가 제공된다.
- [92] 이상과 같이, 본 발명은 비록 한정된 실시 예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 이것에 의해 한정되지 않으며, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 본 발명의 기술 사상과 아래에 기재될 특허청구범위의 균등범위 내에서 다양한 수정 및 변형 가능함은 물론이다.

청구범위

- [청구항 1] 전류 모델 자속관측기가 고정자 전류를 입력받아 전류 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_cm}^s$)을 산출하는 단계;
- 상기 전류 모델 자속관측기를 포함하는 고피나스 모델 자속관측기가 고정자 전압과 상기 고정자 전류를 입력받아 고피나스 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_gm}^s$)을 산출하는 단계;
- 제1 연산기가 산출된 상기 고피나스 모델 추정 회전자 자속에 제1 이득값(k_f)을 곱한 수정된 제1 자속을 산출하는 단계;
- 제2 연산기가 산출된 상기 전류 모델 추정 회전자 자속에 제2 이득값($1-k_f$)을 곱한 수정된 제2 자속을 산출하는 단계; 및
- 제1 가산기가 상기 수정된 제1 자속 및 상기 수정된 제2 자속을 더하여 최종 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)을 산출하는 단계;를 포함하는 유도전동기의 자속 추정 방법.
- [청구항 2] 제1항에 있어서,
상기 최종 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)은,
동기 각속도(ω_e)가 기 설정된 경계 각속도(ω_b)보다 큰 경우,
정상상태에서 전압 모델 자속관측기의 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_vm}^s$)인,
유도전동기의 자속 추정 방법.
- [청구항 3] 제2항에 있어서,
상기 제1 이득값(k_f)은,
 $k_f = \frac{1}{F_{gm}(s)}|_{s=j\omega_e}$ 에 의해 산출되고, 상기 $F_{gm}(s)$ 는 고피나스 모델의 특성함수인 $F_{gm}(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i}$ 인, 유도전동기의 자속 추정 방법.
- [청구항 4] 제1항에 있어서,
상기 최종 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)은,
동기 각속도(ω_e)가 기 설정된 경계 각속도(ω_b)보다 작은 경우, 전압 모델 자속관측기와 상기 전류 모델 자속관측기의 혼합된 추정 회전자 자속인, 유도전동기의 자속 추정 방법.
- [청구항 5] 제1항에 있어서,
상기 제1 이득값(k_f)은,
동기 각속도(ω_e)가 기 설정된 경계 각속도(ω_b)보다 작은 경우, 기 설정된

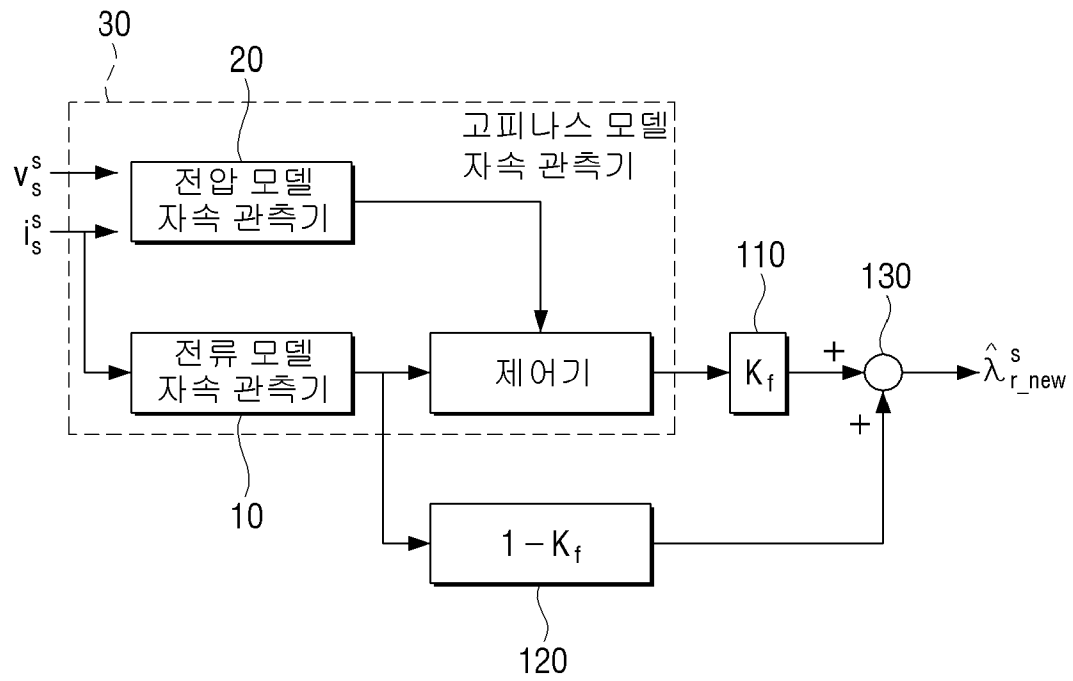
경계 각속도(ω_b)에 대한 동기 각속도(ω_e)의 비의 제곱을 이용하여,

으로 산출되고, 상기 $F_{gm}(s)$ 는 고피나스 모델의

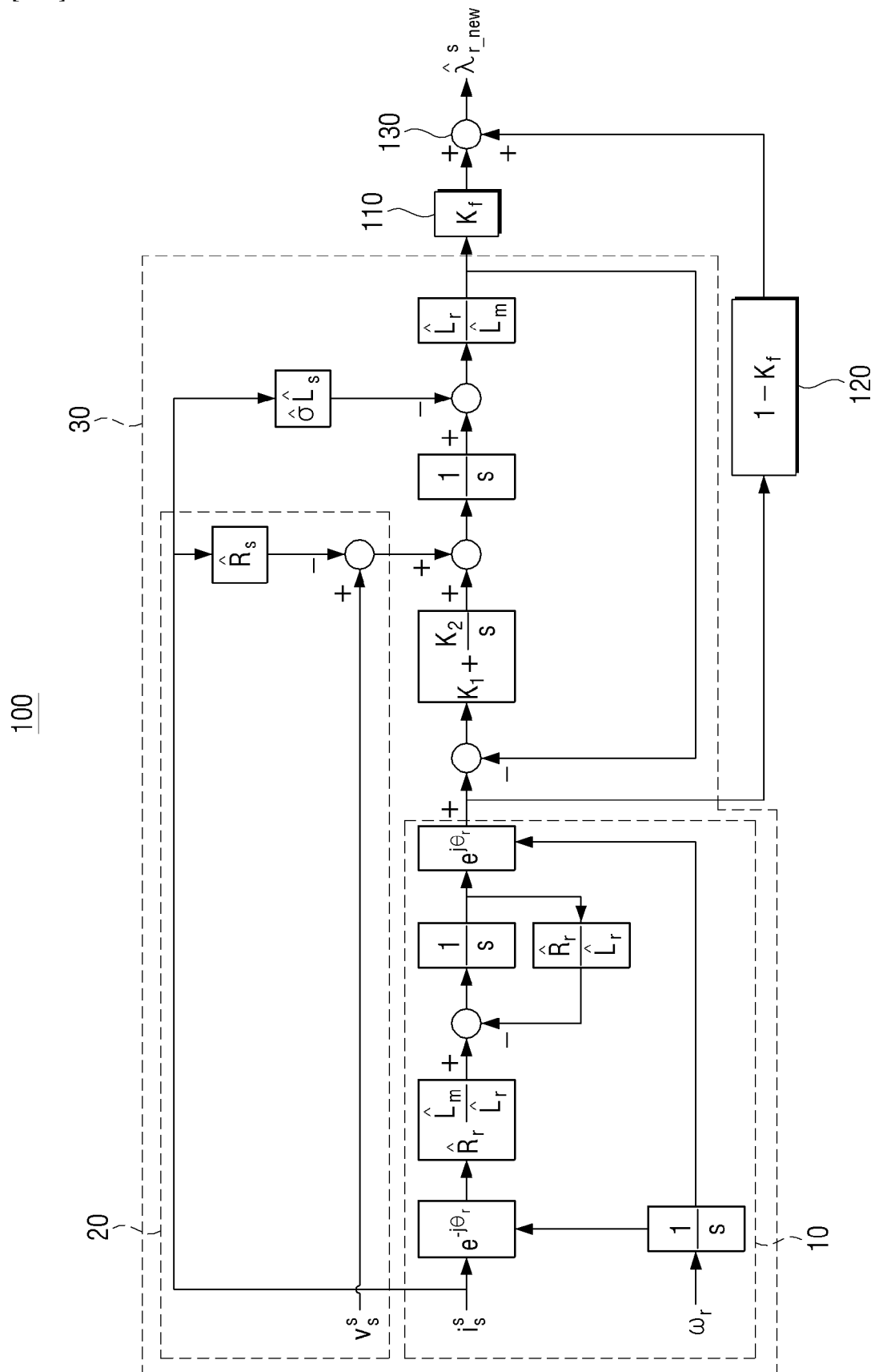
특성함수인 $F_{gm}(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i}$ 인, 유도전동기의 자속 추정 방법.

- [청구항 6] 제2항 내지 제5항 중 어느 한 항에 있어서,
 감산기가 상기 최종 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)의 제1 자속각과
 적분기로부터 피드백된 제2 자속각을 입력 받아 자속각의 오차를
 산출하는 단계;
 비례적분 제어기가 산출된 상기 자속각의 오차로부터 보상 동기 각속도($\Delta\omega_e$)를 산출하는 단계;
 제2 가산기가 상기 산출된 보상 동기 각속도와 상기 유도전동기의
 파라미터를 이용하여 산출된 전향 보상 각속도를 더하여 상기 동기
 각속도를 추정하는 단계; 및
 상기 적분기가 상기 산출된 동기 각속도를 입력받아 상기 제2 자속각을
 산출하는 단계;를 더 포함하고,
 상기 제1 자속을 산출하는 단계는 상기 추정된 동기 각속도를 입력받아
 상기 제1 이득값(k_f)를 산출하고,
 상기 제2 자속을 산출하는 단계는 상기 추정된 동기 각속도를 입력받아
 상기 제2 이득값($1-k_f$)를 산출하는, 유도전동기의 자속 추정 방법.
- [청구항 7] 고정자 전류를 입력받아 전류 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)을
 산출하는 전류 모델 자속관측기;
 상기 전류 모델 자속관측기를 포함하며, 고정자 전압과 상기 고정자
 전류를 입력받아 고피나스 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_gm}^s$)을 산출하는
 고피나스 모델 자속관측기;
 산출된 상기 고피나스 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_gm}^s$)에 제1 이득값(k_f)
)을 곱한 수정된 제1 자속을 산출하는 제1 연산기;
 산출된 상기 전류 모델 추정 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_cm}^s$)에 제2 이득값($1-k_f$)을
 곱한 수정된 제2 자속을 산출하는 제2 연산기; 및
 상기 수정된 제1 자속 및 상기 수정된 제2 자속을 더하여 최종 추정
 회전자 자속($\hat{\lambda}_{r_new}^s$)을 산출하는 제1 가산기;를 포함하는 유도전동기의
 자속관측기.

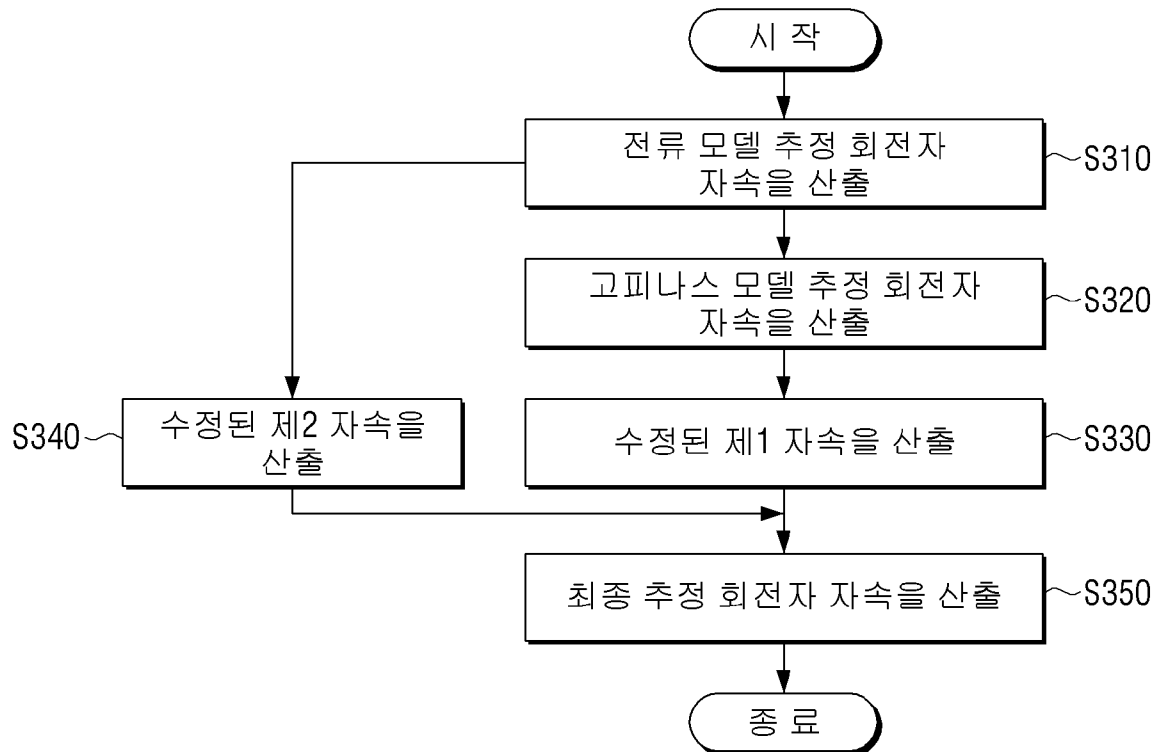
[도1]



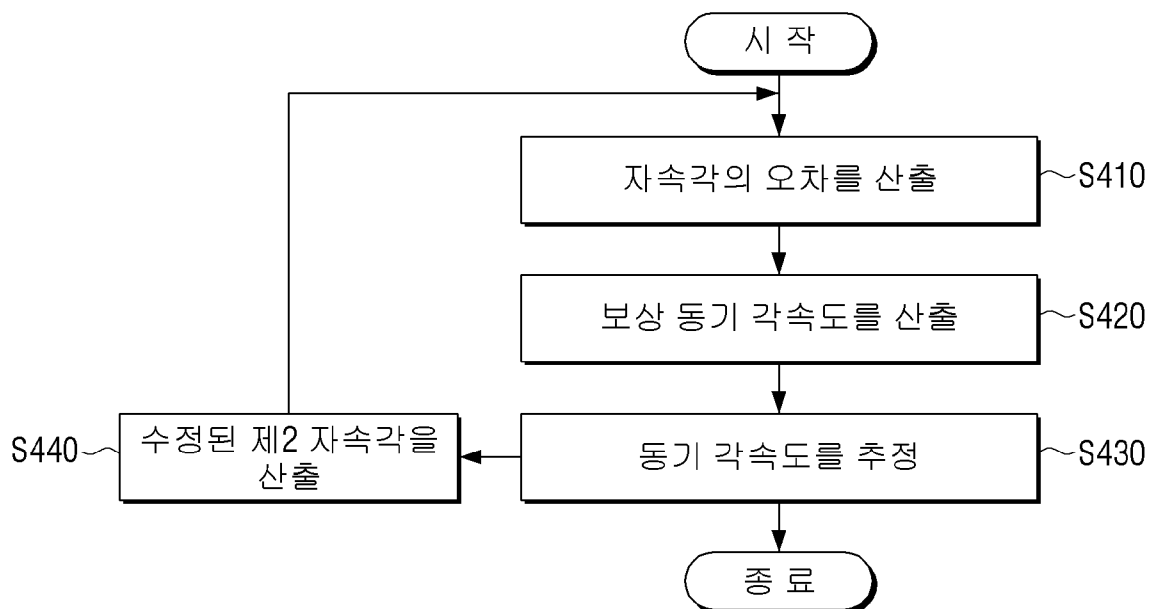
[도2]



[도3]

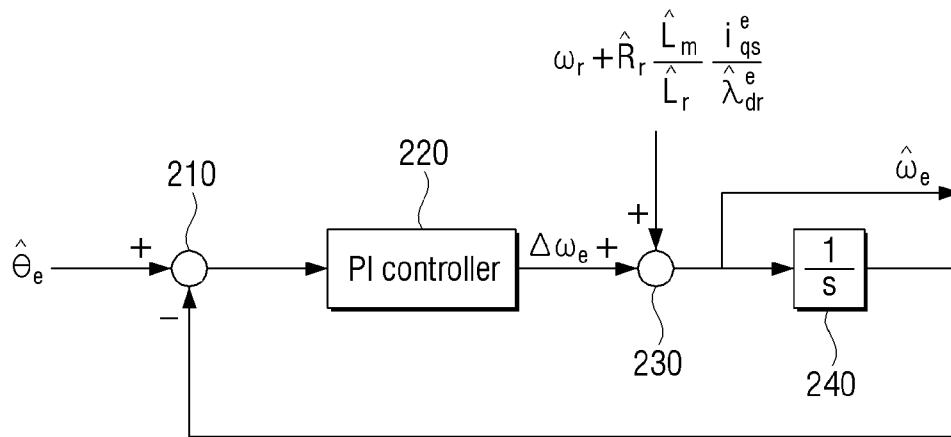


[도4]

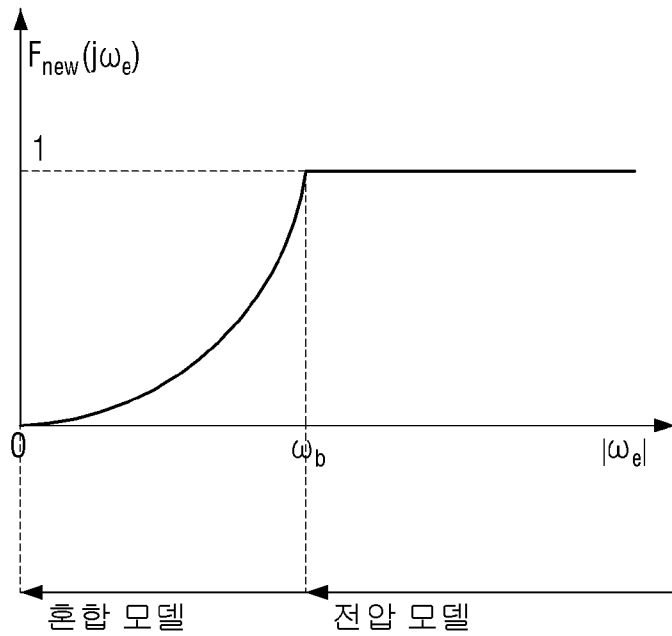


[도5]

200



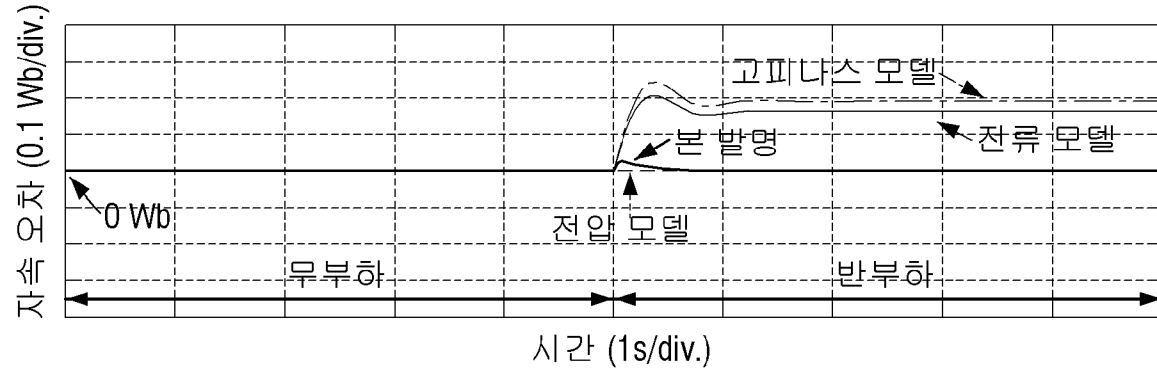
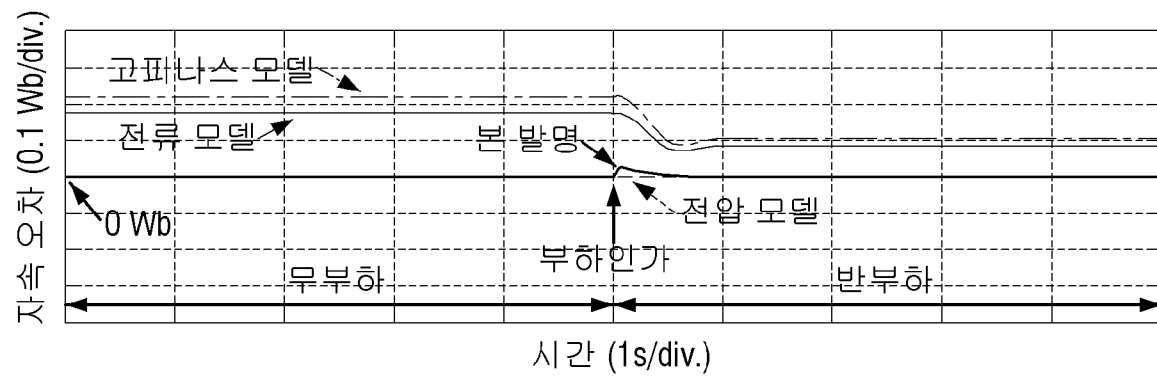
[도6]



[도7]

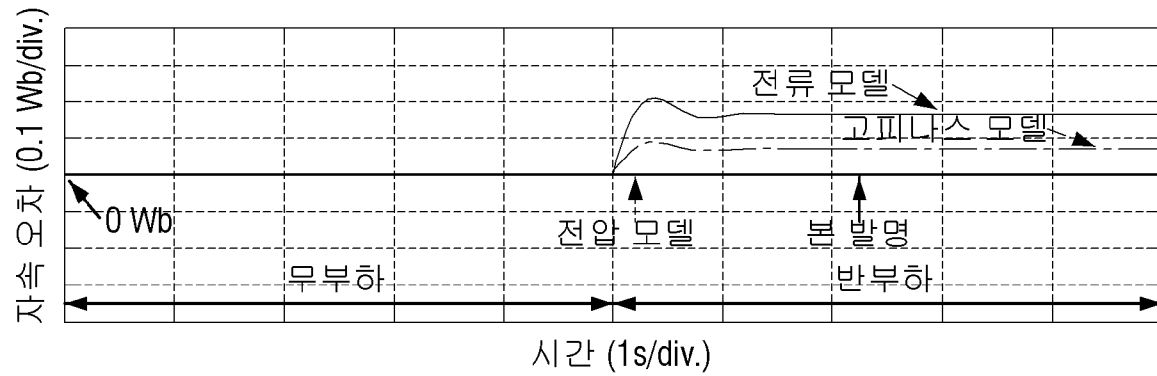
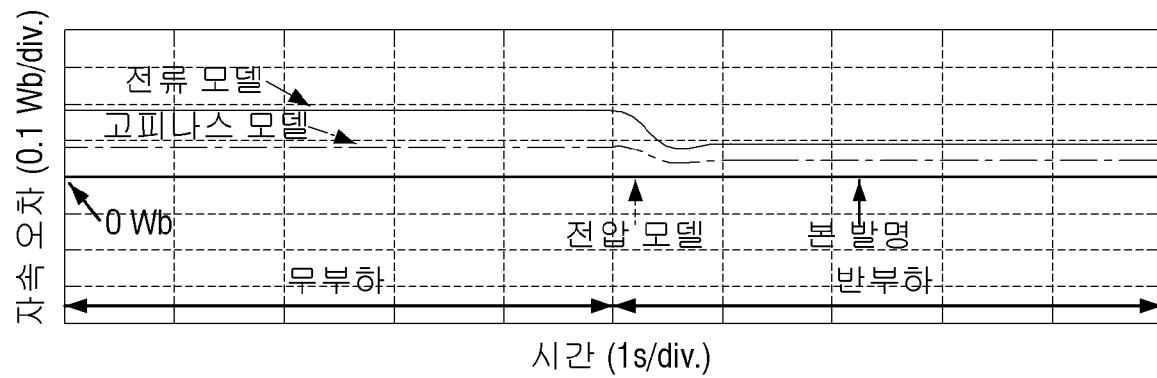
용량	1.5 kW
극수	4극
정격 속도	1,435 rpm
정격 토크	9.44 N · m
R_s	2Ω
R_r	0.9Ω
σL_s	11.73 mH
L_m	160 mH
L_r	166 mH

[도8]

(a) $\hat{R}_r = 0.6R_r$ (b) $\hat{L}_m = 1.4L_m$

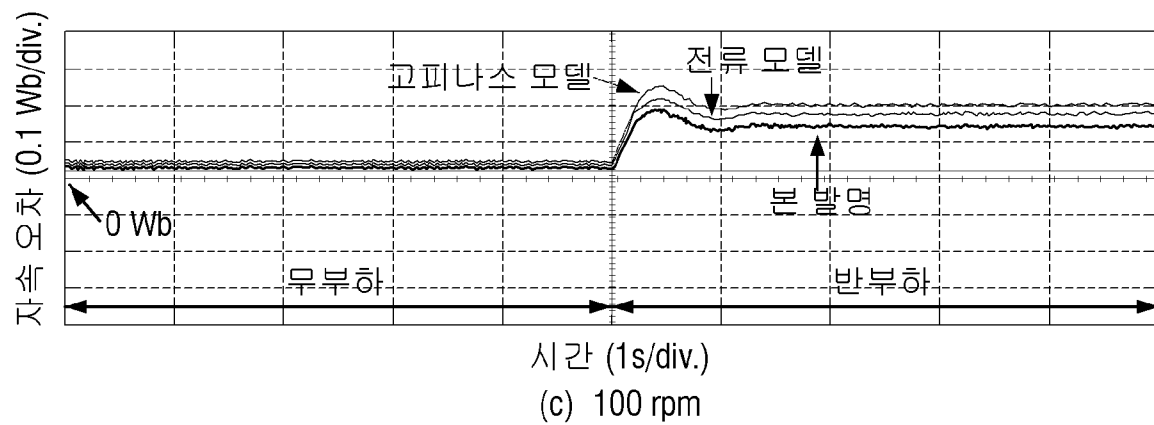
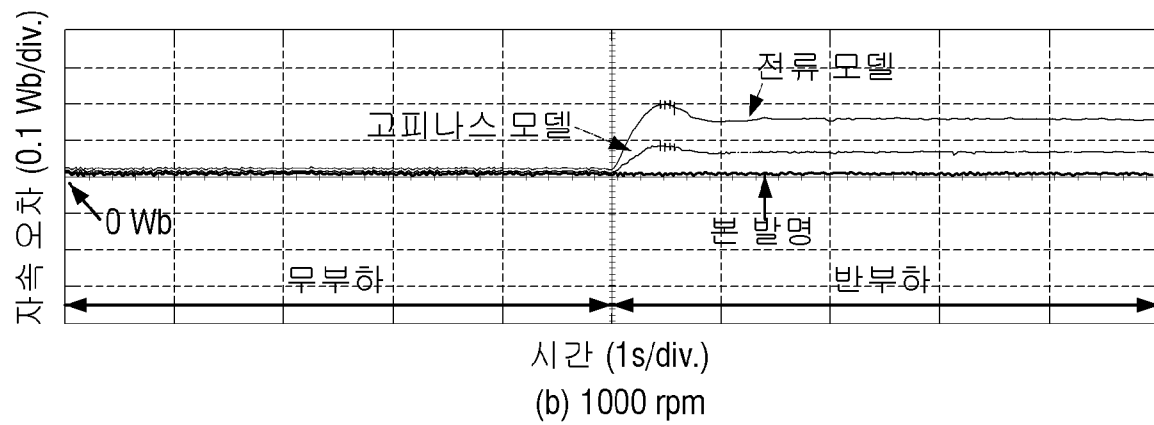
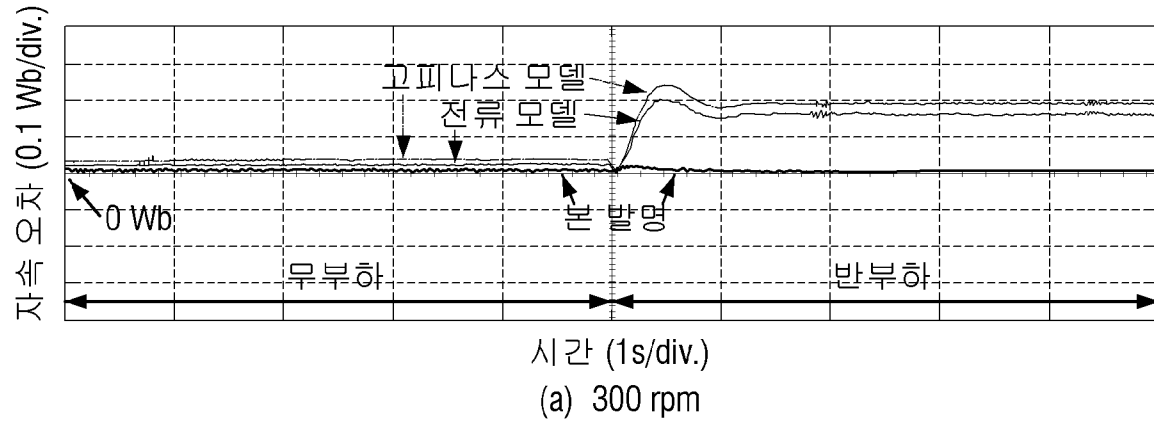
자속 관측기의 자속 오차 (300 rpm)

[도9]

(a) $\hat{R}_r = 0.6R_r$ (b) $\hat{L}_m = 1.4L_m$

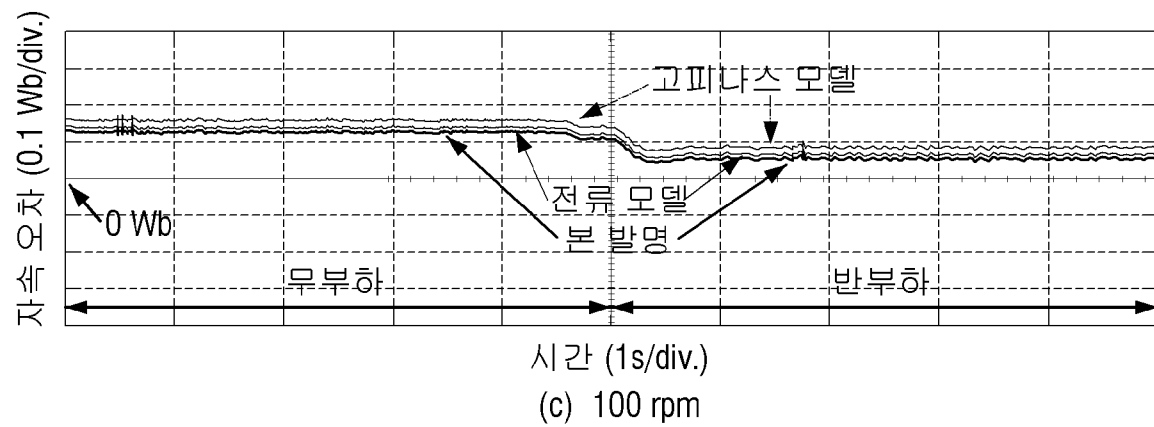
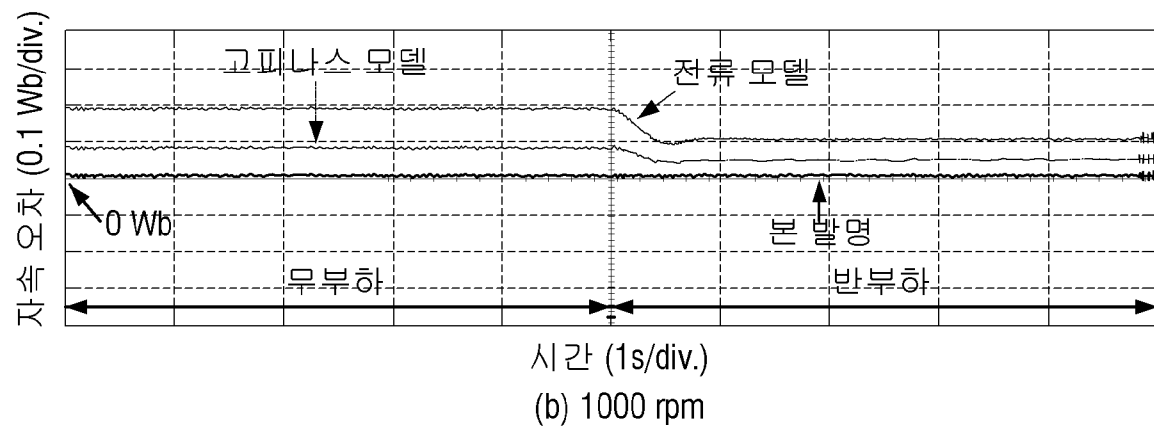
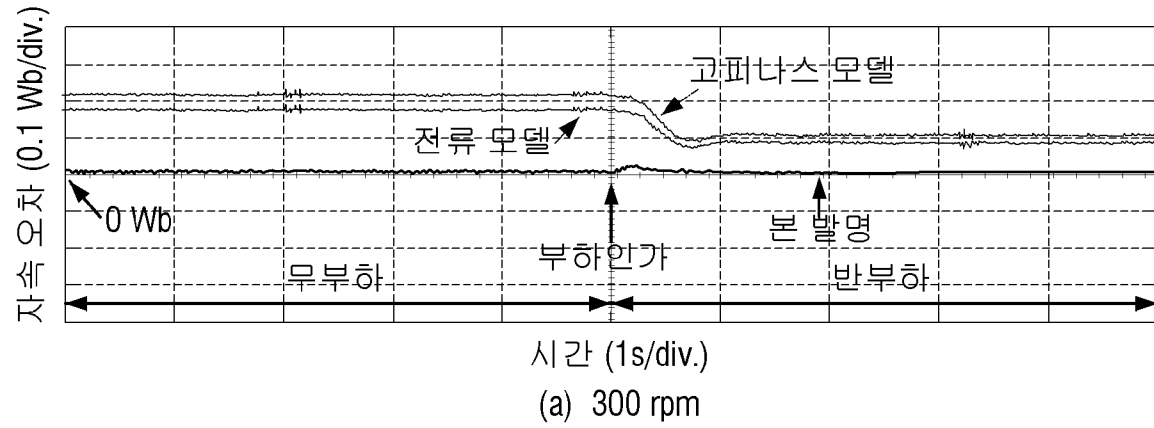
자속 관측기의 자속 오차 (1000 rpm)

[도10]



자속 관측기의 자속 오차 ($\hat{R}_r = 0.6R_r$)

[도11]



자속 관측기의 자속 오차 ($\hat{L}_m = 1.4L_m$)