# 정현파 역기전력을 갖는 BLDC의 직접토크 제어에 관한 연구

김정수, 김철우, 조수억*
부산대학교, OTIS-LG*

# The study of Direct Torque Controlled BLDC Motor Drive with Sinusoidal EMF

J.S. Kim, C.U. Kim, S.E. Cho*
Pusan National Univ ersity, *OTIS-LG

ABSTRACT

This paper describe a control scheme for direct torque control of BLDC Motor.
The proposed Luenberger Observer scheme calculate flux errors in order to control the torque and flux more correctly.
This proposed control scheme has not the requirement of a separate current regulator and proportional-integral (PI) control of the flux and torque, there by improving transient performance and also has the advantage of less torque ripple in steady state with a fixed switching period. The effect of proposed method has been proven by simulations.[1]

## 1. 서 론

일반적인 직접토크 제어방식은 전동기의 정수중에 서 고정자 저항에 대한 정보만을 필요로 하므로 급 작스런 부하 변동이나 순간적인 지령치 변동 등에 대한 속응성이 우수하다. 하지만 직접토크 제어방식 은 기동시 또는 저속운전시 큰 토크 리플이 발생하 기 쉽고, 고정자 자속을 이용하여 인버터의 스위칭 패턴을 발생 시킴으로 고장자 자속에 대한 정확한 정보를 필요로 하나 기존의 전압형 고정자 자속모델로부터 유도된 개루프 자속추정방식은 운전조건의 변화 등에 의해 고정자 저항값이 변화 되는 경우 추 정값이 부정확해 지므로 토크 제어의 속응성이 보장 되지 않는다. 이러한 영향은 특히 역기전력 성분이 적고 상대적으로 전류의 영향이 큰 저속영역에서 심한 특성을 보인다.[4]

따라서 본 논문에서는 직접토크 제어방식을 브러시리스 직류전동기에 적용하기 위한 시스템을 모델링하고 저속영역에서 보다 정밀한 토크와 속도를 구현하기 위한 루엔버거 관측기를 적용하여 저속에서도 우수한 토크 제어특성이 유지됨을 Simulink로서 입증하였다.

## 2. SPMSM의 직접토크 제어

### 2.1 브러시리스 직류전동기의 수학적 모델링

그림 1은 전동기의 극수를 4극으로 가정한 브러시리스 직류전동기의 등가 모델을 나타낸다.

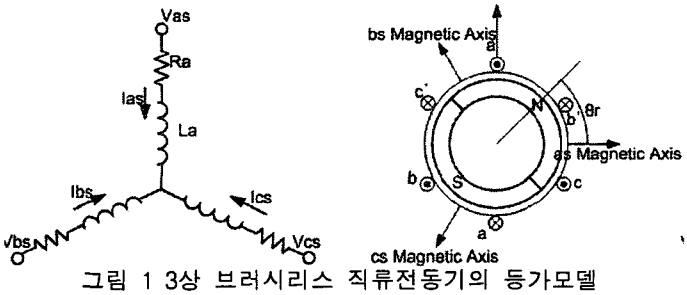


그림 1 3상 브러시리스 직류전동기의 등가모델
Fig. 1 The equivalent mode of 3 phase BLDCM

그림 1의 3상권선에서 고정자 기준 좌표계로 표현한 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^s &= R_s i_{ds}^s + L_s \frac{d}{dt} i_{ds}^s - \lambda_m \omega_r sin\theta_r \\ &= R_s i_{ds}^s + L_s \frac{d}{dt} i_{ds}^s + e_{ds}^s \\ v_{qs}^s &= R_s i_{qs}^s + L_s \frac{d}{dt} i_{qs}^s + \lambda_m \omega_r sin\theta_r \\ &= R_s i_{qs}^s + L_s \frac{d}{dt} i_{qs}^s + e_{qs}^s \end{aligned} \quad (1)$$

$$R_s = R_a, \quad L_s = \frac{3}{2} L_p$$

식(1)로부터 고정자 자속은 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{sd} = \int (v_{sd} - R_s i_{sd})$$
$$\lambda_{sq} = \int (v_{sq} - R_s i_{sq}) \quad (2)$$

그리고 고정자 자속과 전류의 관계에서 토크에 대한 식은 다음과 같다.

$$Te = \frac{3}{2} P(\lambda_{sd} i_{sq} - \lambda_{sq} i_{sd}) \quad P\text{는 극수} \quad (3)$$

그리고 식(1),(2),(3)로부터 브러시리스 직류전동기의 고정자 변수에의한 상태방정식은 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{i_{sd}} = \frac{R_s}{L_s} i_{sd} - \frac{\lambda_m \omega_r}{L_s} sin\theta_r$$
$$\dot{i}_{sq} = \frac{R_s}{L_s} i_{sq} + \frac{\lambda_m \omega_r}{L_s} sin\theta_r$$
$$\dot{\lambda_{sd}} = v_{ds} - R_s i_{sd} \quad (4)$$
$$\dot{\lambda_{sq}} = v_{ds} - R_s i_{sq}$$
$$\dot{\omega_r} = \frac{3P}{2J}(\lambda_{sd} i_{sq} - \lambda_{sq} i_{sd}) - \frac{1}{J} T_L$$
$$\dot{T_L} = 0$$

### 2.2 확장된 루엔버거 관측기[2]

확장된 루엔버거 관측기에 의한 브러시리스 직류전동의 고정자 자속관측기 설계과정은 다음과 같다.

#### 2.2.1 시스템 모델링

$$\dot{x} = f(x,u) = Ax + Bu$$
$$y = h(x) = Cx \quad (5)$$

여기서,

$$Ax = \begin{pmatrix} -a_1 x_1 - x_5 x_2 + a_3 x_3 + a_1 x_4 x_5 \\ x_5 x_1 - a_1 x_2 - a_4 x_3 x_5 + a_3 x_4 \\ -a_5 x_1 \\ -a_5 x_2 \\ a_9 x_2 x_3 - a_9 x_1 x_4 - a_{10} x_6 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$Bu = \begin{pmatrix} bu_1 \\ bu_2 \\ u_1 \\ u_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \qquad Cx = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix}$$

$x_1 \sim x_6$은 식 (4)의 상태변수를 의미한다.

#### 2.2.2 관측기 이득행렬

확장된 루엔버거 관측기를 구성하기 위한 이득행렬 식은 다음과 같다

$$K(\dot{x}) = ([p_{11} + p_{21} ad_{-f} + \cdots + p_{1n_1} ad_{-f}^{n_1 - 1}] s_1(\hat{x}), ..$$
$$[p_{j1} + p_{j2} ad_{-f} + \cdots + p_{jn_1} ad_{-f}^{n_1 - 1} + ad_{-f}^{n_1}] s_j(\hat{x})) / \left(\frac{\partial h}{\partial x_n}\right) \quad (5)$$

$p_{xx}$ : ELO 오차 동특성 방정식의 특성계수

$ad_f s = \frac{\partial s}{\partial x} f - \frac{\partial f}{\partial x} s$ (Lie braket)

$s_x$ : 스타팅 벡터

$\frac{\partial h}{\partial x_n}$ : 측정 가능한 출력의 편도함수

식 (6)의 같이 주어진 관측기의 이득행렬이 존재하기 위해서는 우선 식 (5)의 시스템에 대한 가관측성을 검토하고, 다음과 같이 역가관측성 행렬을 계산하고 스타탕 벡터 및 출력의 편도함수를 결정하여야 한다.
식 (5)에서 측정 가능한 출력변수가 d축 및 q축의 고정자 전류($x_1, x_2$) 및 회전자 속도 ($x_6$)라 하면 식 (5)에 대한 가관측성 행렬은 비선형 관측기 원리에 따라 다음과 같이 구성된다.

$$Q(x,u) = \begin{bmatrix} dh_1 \\ L_f(dh_1) \\ dh_2 \\ L_f(dh_2) \\ dh_3 \\ L_f(dh_3) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -d_1 & 0 & d_3 & d_4 x_5 & d_4 x_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -d_1 & -d_4 x_5 & d_3 & -d_4 x_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -d_9 x_4 & d_9 x_3 & d_9 x_2 & -d_9 x_1 & 0 & -d_{10} \end{bmatrix}$$

여기서, $L_f$는 다음과 같은 리이 도함수(Liederivatives)이고

$$L_f(dh_j) = \left(\frac{\partial (dh_j)^T}{\partial x} f(x)\right)^T + dh_j \frac{\partial f(x)}{\partial x},$$
$$L_f^{n_q}(dh_j) = L_f^{n_q-1} L_f^1(dh_j), L_f^0(dh_f) = (dh_j)$$

변수 $d_1 \sim d_{10}$은 식 (6)의 리이 도함수의 계산에 의해 주어지는 상태변수를 포함하지 않는 상수항을 정의한 것이다.

식 (7)은 비특이 행렬이므로 비선형 관측기의 원리에 따라 관측 가능하다고, 식 (7)으로부터 이의 역행렬을 구하면 다음과 같다.

$$Q(x,u)^{-1} = \frac{1}{D}\begin{bmatrix} D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D & 0 & 0 & 0 \\ k_1 & k_2 & -k_3x_5 & -k_4x_5 & m_{35} & 0 \\ k_3x_5 & k_4x_5 & k_1 & k_2 & m_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 \\ m_{61} & m_{62} & m_{63} & m_{64} & m_{65} & m_{66} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$D = a_3^2 a_{10} + a_4^2 a_{10} x_5^2$

$k_c$ : 상수, $m_{yy}$: 상수와 상태변수로 구성된 변수식

확장된 루엔버거 관측기 구성에 필요한 스타팅 벡터는 다음과 같다.

$$s_j(\hat{x},u) = \overline{\frac{\partial h_j^*}{\partial x_{n_j}^*}}(\hat{x},u) Q^{-1}(\hat{x},u) e_{nj} \quad (9)$$

식 (9)의 스타팅 벡터에 포함된 출력 편도함수는 임의로 지정할 수 있으므로 다음과 같이 역 가관측성 행렬 식 (8)의 행렬식을 출력 편도함수로 지정하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \overline{h_1^*}}{\partial x_2^*} = \frac{\partial \overline{h_2^*}}{\partial x_4^*} = \frac{\partial \overline{h_3^*}}{\partial x_6^*} = D \quad (10)$$

식 (5)로 주어진 시스템의 출력변수에 해당하는 각서브 시스템의 이득 행렬 $k_1$, $k_2$ 및 $k_3$의 식은 다음과 같이 주어진다.

$$k_1 = \frac{1}{D}\{p_{11} * s_1 + p_{11} * a d_f s_1 + a d_f^2 s_1\}$$
$$k_2 = \frac{1}{D}\{p_{21} * s_2 + p_{22} * a d_f s_2 + a d_f^2 s_2\} \quad (11)$$
$$k_3 = \frac{1}{D}\{p_{31} * s_3 + p_{33} * a d_f s_3 + a d_f^2 s_3\}$$

여기서,

$$s_1 = [0, D, \quad k_2, \quad k_4 x_5, \quad 0, m_{62}]^T$$
$$s_1 = [0, 0, -k_4 x_5, \quad k_2, \quad 0, m_{64}]^T$$
$$s_1 = [0, 0, \quad 0, \quad 0, \quad 0, m_{66}]^T$$

2.2.3 관측기 구성

식 (5)의 시스템 모델 식과 식 (11)의 관측기 이득행렬을 이용하여 고정자 자속 추정을 위한 관측기는 다음과 같이 구성된다.

$$\hat{x} = f(\hat{x},u) + K(\hat{y} - y) \quad (12)$$

여기서, 이득행렬은 다음과 같으며

$$K(\hat{y} - y) = k_1(\hat{y_1} - y_1) + k_2(\hat{y_2} - y_2) + k_3(\hat{y_3} - y_3)$$

이득행렬에 포함되는 출력변수는 다음과 같다.

$y_1 = i_{ds}, \quad y_2 = i_{qs}, \quad y_3 = \omega_r$

## 3. 직접토크 제어기법[4]

직접토크 제어는 지령치 토크와 자속의 정보와 브러시리스 직류전동기로부터 추정되어지는 토크와 자속의 관계로부터 오차를 발생시키고, 발생한 오차는 히스테리시스 밴드폭과 비교하여 그 오차가 최소화 되도록 인버터의 전압 벡터를 선정하는 방법으로 동작하게 된다. 그리고 그림 2는 제안된 직접토크 제어 방식의 블록도이다.

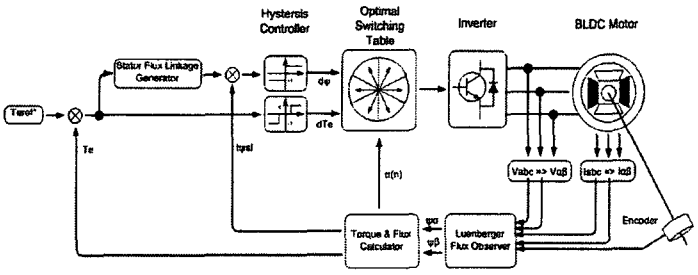


그림 2 제안된 직접토크 제어기의 블록도
Fig. 2 Proposed DTC Block diagram

3.2 최적 전압 스위칭 벡터 테이블[2]

지령치 토크/자속과 추정치인 토크/자속간의 오차가 히스테리시스 제어기의 밴드폭과 비교하여 각각 그 값이 최소화 되도록 스위칭 벡터를 선정하는 제어 방법으로서, 여기에는 토크와 자속 정보 이외에 각 섹터를 결정하는 자속의 위치각에 대한 정보가 필요하다.

식(13)에서 $\Delta T_e$와 $\Delta\lambda_s$는 토크와 자속의 오차가 각각의 히스테리시스 제어기의 밴드폭과 비교하여 얻어진 자속과 토크의 증감을 나타내는 것으로 그 결과 값이 자속의 위치각과 함께 스위칭 벡터를 선정하기 위한 논리수로서 발생된다.

$$
\begin{aligned}
&|\lambda_{sref}| - |\lambda_s| \leqq \lambda_{band} \quad \text{이면} \quad \Delta\lambda = 1 \\
&|\lambda_{sref}| - |\lambda_s| \geqq \lambda_{band} \quad \text{이면} \quad \Delta\lambda = -1 \\
&|T_{eref}| - |T_e| \leqq T_{band} \quad \text{이면} \quad \Delta\lambda = 1 \\
&|T_{eref}| - |T_e| = T_{band} \quad \text{이면} \quad \Delta Te = 0 \\
&|T_{eref}| - |T_e| \geqq T_{band} \quad \text{이면} \quad \Delta Te = -1
\end{aligned}
\tag{13}
$$

표 1은 $\Delta Te$, $\Delta\lambda$ 그리고 $\Delta\rho$의 정보에 의해 선정되어질 전압벡터 테이블이고, 그림 3은 자속이 섹터 1일때 각각의 기준전압 벡터에 의한 자속과 전압의 관계를 나타낸 그림이다. 그리고 표 2는 그림 3에서 기준전압 벡터에의한 자속과 토크의 변화를 섹터1을 기준으로 타내었다.

표 1 최적 전압 스위칭 벡터 룩업 테이블
Table. 1 Optimum voltage switching vector look-up table

| Δλs | ΔTe | sector (ρ) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 1 | u2 | u3 | u4 | u5 | u6 | u1 |
| | 0 | u7 | u8 | u7 | u8 | u7 | u8 |
| | -1 | u6 | u1 | u2 | u3 | u4 | u5 |
| -1 | 1 | u3 | u4 | u5 | u6 | u1 | u2 |
| | 0 | u8 | u7 | u8 | u7 | u8 | u7 |
| | -1 | u5 | u6 | u1 | u2 | u3 | u4 |

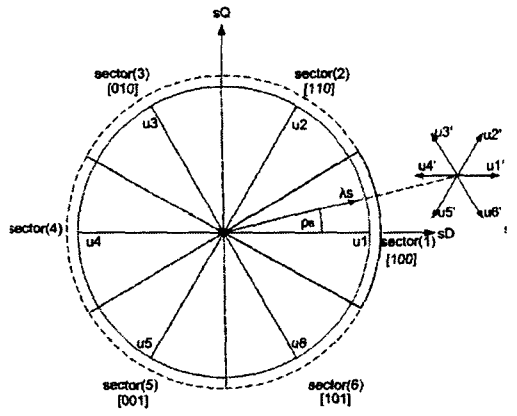


그림 3 자속과 토크에 대한 기준전압 벡터의 영향
Fig. 3 Effect of based voltage vector on λs & Te

표 2 섹터1에서 기준전압벡터에의한 자속과토크의 변화
Fig. 2 Changing of λs & Te controlled by based voltage vecor in sector 1

| 전압벡터 | \|Δλs\| | ΔTe |
|---|---|---|
| u2 | 증가 | 증가 |
| u7 | 변화없음 | 감소 |
| u6 | 증가 | 감소 |
| u3 | 감소 | 증가 |
| u8 | 변화없음 | 감소 |
| u5 | 감소 | 감소 |

## 4. 시뮬레이션

### 4.1 시뮬레이션 구성

본 논문에서 제안된 시스템의 타당성을 입증하기 위해 Simulink를 사용하여 그림 4 그리고, 그림 7과 같이 시스템 블록도를 구성하였으며, 그리고 시뮬레이션에 사용된 브러시리스 직류전 동기의 정수는 표 3에 나타내었다. 그리고 제안한 직접토크제어 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 기존의 직접토크제어 알고리즘과 비교하여 시뮬레이션 하였다.

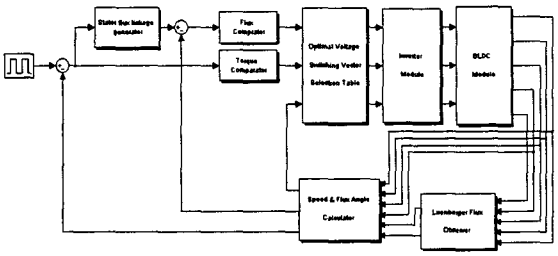

그림 4 Simulink로 구성한 시스템 블록도
Fig. 4 System Block diagram using Simulik

표 3 브러시리스 직류전동기의 정수
Table. 3 BLDC Parameter

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|---|---|---|---|
| 극수 | 4 | 정격토크 | 31.8[Nm] |
| 정격출력 | 1[KW] | 정격속도 | 300[rpm] |
| 정격전압 | 300[V] | Rs | 4.3[Ohm] |
| 정격전류 | 2.7[A] | Ls | 0.114[mH] |

### 4.2 시뮬레이션 결과

그림 5는 토크의 지령치를 -20~20[Nm]로 하였을 때 기존의 직접토크제어 방식에서의 토크응답을 나타낸 파형이다. 그리고 그림 6은 같은 조건에서 제안한 확장된 루엔버거 관측기를 가진 시스템에서의 토크응답을 나타낸 파형이다.

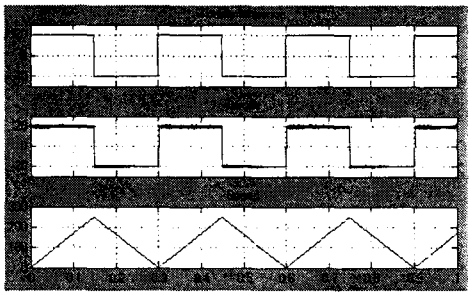

그림 5 기존의 직접토크 시스템에서의 토크 응답
Fig. 5 Response of torque in conventional DTC system

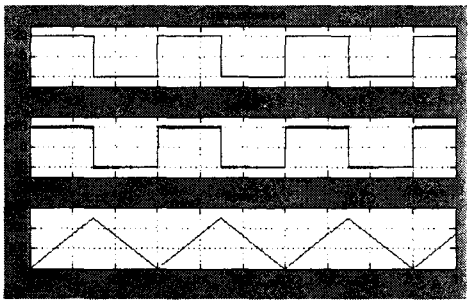

그림 6 제안한 직접토크 시스템에서의 토크 응답
Fig. 6 Response of torque in proposed DTC system

그림 7은 그림 4의 시스템에서 PI 속도제어기를 추가하여 속도에 대한 토크와 고정자 자속의 파형을 살펴보기 위한 시뮬레이션 시스템 블록도 이다.

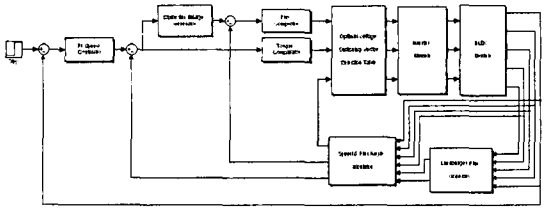

그림 7 PI 속도제어기를 추가한 시스템 블록도
Fig. 7 System Block diagram added PI speed controller

그림 8은 최적 전압 스위칭 벡터에 의해 인버터로부터 출력되어진 상전압과 각도를 나타낸 파형이다.

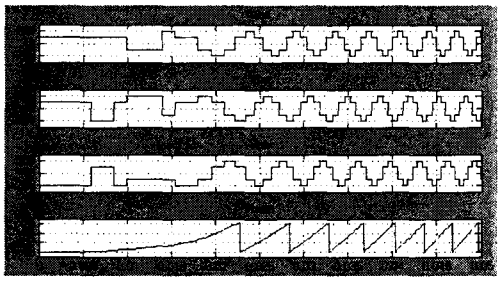

그림 8 최적 전압 스위칭 벡터에의한 인버터 출력전압과 위치각
Fig. 8 Output voltage of inverter and position controled by optimum voltage switching vector

그림 9는 속도에 따른 토크와 고정자 자속을 나타낸 파형이다.

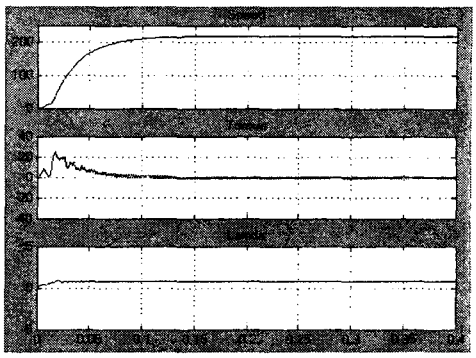

그림 9 속도에 따른 토크와 고정자 자속
Fig. 9 Torque and stator-flux within speed

## 5. 결 론

본 논문은 정현파 역기전력을 갖는 브러시리스 직류전동기의 직접토크 제어에 관한 것으로서 벡터제어 알고리즘에 비해 그 구조가 간단하지만 빠른 고정자 자속과 토크의 응답을 얻을 수 있었다.

또한 저속영역의 운전 특성을 개선하기 위한 목적으로 루엔버거 관측기를 사용하여 고정자 저항의 변화에 따른 고정자 자속의 변화를 보다 정확하게 추정하여 저속영역에서의 동특성을 향상 시킬 수 있었음을 Simulink를 이용한 시뮬레이션으로 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌


[1] PETER VASi, "SENSORLESS VECTOR AND DIRECT TORQUE CONTROL",OXFORD SCIENCE.

[2] 조금배, 최연옥, 백형래 "저속영역에서의 동특성개선을 위한 유도전동기의 직접토크제어", 전력전자학회논문지, 제5권6호, pp. 601-609, 2000.12.

[3] 권태성, 신명호, 현동석, "약계자영역에서 루엔버거관측기를 이용한 유도전동기의 속도 센서리스 고정자자속 기준제어", 전력전자학회논문지, 제8권5호, pp. 375-380, 2003.10.

[4] 박준현, 정종진, 최종우, 김홍근, 노의철, 전태원, "고정자 자속을 기반으로 한 유도전동기의 새로운 직접 토크 제어", 전력전자학회논문지, 제7권3호, pp. 297-302, 2002. 6.

[5] 조금배, 최연옥, 정삼용, "확장된 루엔버거 관측기를 이용한 유도전동기 회전자 자속 추정", 전력전자학회논문지, 제6권2호, pp. 115-124. 2001.4.