

수중로봇용 AC구동시스템의 속도센서 제거를 위한 속도추정법 연구

전봉환[○], 임용곤, 이판묵
한국기계연구원, 선박해양공학연구센터
E-mail: bhjeon@mailgw.kimm.re.kr

An Approach to a Speed Estimation Method to Remove Speed Sensor of Underwater Robot's AC Drive Systems

Bong-Hwan Jeon[○], Yong-Kon Lim, Pan-Mook Lee
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KIMM
E-mail: bhjeon@mailgw.kimm.re.kr

This paper describes an approach to a speed estimation method to remove speed sensor of underwater robot's AC drive systems. AC motors have been widely used in the field of underwater robot's manipulator or propulsion system. Most of these AC motors for underwater use have usually filled oil to compensate the high pressure in deep-sea operation, where a resolver is adopted to feed back the speed of rotor. But this kind of speed feedback devices gives rise to some defects arising from their mechanical complexity and numerous signal lines; a resolver needs 6 or 7 signal lines for proper operation. This paper presents a speed estimation method to improve these problems of induction motor, which is adopted as a prototype of AC motor. The proposed speed estimation method is based on the RFO(rotor flux orientation) vector control method of voltage-fed AC drives. Using the controller of voltage-fed AC drives, it is unnecessary to measure the voltage for the estimation of rotor speed, which reduces the effects of measurement error. Numerical simulation is carried out to investigate the validity of the method and the effects of rotors resistance variation.

1. 서 론

근래 해양개발에 대한 관심이 크게 대두되면서 심해저 탐사와 개발을 효과적으로 수행하기 위한 수중 로봇의 개발이 선진국을 중심으로 하여 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 우리 나라도 태평양 공해상의 심해저 광구 개발과 같은 대형 사업에 참여하고 있을 뿐만 아니라, 해저 광케이블의 매설 및 보수 작업의 필요성이 날로 증대되고 있어 이를 효과적으로 수행하기 위한 수중로봇의 개발에 대한 관심이 날로 높아지고 있다.

한국기계연구원, 선박해양공학연구센터(KRISO)에서는 1989년부터 수중무인잠수정 개발에 관한 연구를 수행해 오고 있다. 그 결과 유식식 무인잠수정 CROV300을 1990년에, 무작식 자율무인잠수정 VORAM AUV를 1997년에 각각 개발하였으며 현재, 중작업용 수중로봇의 개발에 관한 연구를 수행하고 있다. 이들 수중로봇의 개발기술은 기계, 전기, 전자, 계측, 제어, 조선 등을 포함한 종합기술을 요구할 뿐만 아니라, 수중로봇의 성능을 개선시키거나 특수한 목적의 수행을 위해서는 이들 기술을 바탕으로 한 요소기술의 확보가 뒷받침 되어야 한다.

이러한 요소기술 중 구동장치에 관한 기술로 수중로봇의 추진장치의 구조를 개선하기 위한 기초 연구가 수행되었다. 수중로봇의 추진용으로 사용되는 전동기는 심해의 높은 압력에서도 안정한 회전 성능을 얻기 위해 전동기 케이스 내에 기름을 채워 넣고 압력 보상기를 설치해 외부 수압, 혹은 그보다 높은 압력을 유지시켜 수압으로 발생하는 축계의 과도한 마찰을 방지하는 유침균압법을 사용한다. 전동기의 회전자는 기름 속에서 회전하게 되고 따라서, 직류 전동기는 절연유에 의해 회전자 축으로의 전류 전달 효율이 떨어지고, 브러시와 정류자의 마모로 인해 절연유가 쉽게 오염되므로, 이런 문제점이 없는 AC전동기가 널리 사용되고 있다. 전동기의 속도 피드백을 위한 센서도 엔코더와 같은 광학식 방법은 불가하여 레졸버 등의 센서를 사용하고 있으나 심해저에서 이런 센서를 사용한다는 것 자체가 시스템을 복잡하게 한다는 단점을 갖고 있다.

본 논문에서는 기계적인 속도 피드백 센서 없이 수중로봇용 AC구동시스템의 속도를 추정하여 피드백하기 위해 속도추정 방법을 제안한다. 대상 AC전동기로는 유도전동기를 이용하였고, 회전자의 자속에 dq축의 d축을 일치시키는 조건에서 속도 추정식을 유도하였다. 속도의 추정정도를 검토하기 위해 전동기의 수치 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 정상 및 과도상태에서 속도의 추정 정도와 회전자속 저항이 변동함에 따른 속도추정 성능의 변화를 고찰하였다.

II. 본 론

2.1 수중로봇용 AC구동시스템

수중로봇용 AC구동시스템에는 동기전동기와 유도전동기가 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 AC구동시스템용 전동기로 유도전동기를 선정하고 기계적인 속도센서 없이 그 속도를 얻기 위한 연구를 수행하였다. 이는 내압 방수가 필수적인 심해저 수심에서 기계적인 장치와 이를 연결하는 신호선을 제거하여 하드웨어를 줄이는 대신 소프트웨어에 의해 속도를 추정함으로써 시스템의 유연성 및 유지보수에 있어서의 장점을 얻기 위함이다.

Fig.1은 전동기의 속도센서를 제거한 수중로봇용 AC구동시스템을 나타내고 있다. 전동기와

드라이브가 세 라인의 전원선으로만 연결되어 내압 방수를 필요로 하는 케이블과 커넥터의 수를 줄일 수 있다. 그리고, 전동기에 장착될 속도센서가 제거됨으로써 전체 크기가 줄어들 수 있으며, 기계적으로도 간단한 구조를 갖게되는 장점을 얻을 수 있다.

드라이브는 전동기를 구동하기 위한 3상 인버터, 속도 제어기 그리고, 속도추정기로 구성된다. 본 논문에서 주로 다루고자하는 부분은 속도추정기로, 전동기에 인가되는 전압과 전류를 검출하여, 전동기 회전자의 속도를 계산하는 방법이다. 이에 대한 자세한 내용은 다음절에서부터 상술한다.

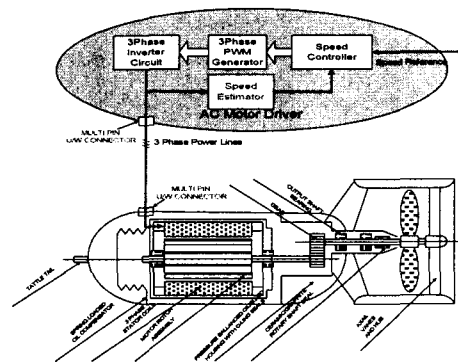


Fig.1 Thrust system without speed sensor

2.2 속도 추정식

3상 유도전동기를 동기속도로 회전하는 직교좌표계에서 표현하면 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_1 L_s \\ \omega_1 L_s & R_s + pL_s \\ pL_m & -(\omega_1 - \omega_{er})M \\ (\omega_1 - \omega_{er})L_m & pL_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} pL_m & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_m & pL_m \\ R_r + pL_r & -(\omega_1 - \omega_{er})L_r \\ (\omega_1 - \omega_{er})L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (2)$$

여기서,

v_{ds}, v_{qs} : d축 및 q축 고정자 전압
 i_{ds}, i_{qs} : d축 및 q축 고정자 전류
 i_{dr}, i_{qr} : d축 및 q축 회전자 전류
 R_s, R_r : 고정자 및 회전자 저항
 L_s, L_r, L_m : 고정자, 회전자 및 상호인덕턴스
 ω_1, ω_r : 동기속도 및 회전자 전기각속도
 T_e : 발생토크
 p : 미분연산자
 P : 극수

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (16)$$

이다.

한편, (11)식과 (12)식은 다음과 같이 ω_1 에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$a\omega_1 - b = 0 \quad (17)$$

$$c\omega_1 - d = 0 \quad (18)$$

(1)식을 회전자 자속에 대해 나타내면, 다음식들로 나타내어진다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p\lambda_{ds} - \omega_1 \lambda_{qs} \quad (3)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + p\lambda_{qs} + \omega_1 \lambda_{ds} \quad (4)$$

$$0 = R_r i_{dr} + p\lambda_{dr} - \omega_s \lambda_{qr} \quad (5)$$

$$0 = R_r i_{qr} + p\lambda_{qr} + \omega_s \lambda_{dr} \quad (6)$$

여기서, ω_s 는 슬립주파수이다.

$$\omega_s = \omega_1 - \omega_{er} \quad (7)$$

이때, 회전좌표계의 d축을 회전자 자속과 일치시키면,

$$\begin{aligned} \lambda_{dr} &= \lambda_r \\ \lambda_{qr} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$0 = R_r i_{dr} + p\lambda_r \quad (9)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \omega_s \lambda_r \quad (10)$$

로 되어 전압전류 방정식은

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + pL_\sigma i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} p\lambda_r - \omega_1 L_\sigma i_{qs} \quad (11)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + pL_\sigma i_{qs} + \omega_1 (L_\sigma i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \lambda_r) \quad (12)$$

$$L_\sigma = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \quad (13)$$

로 변환된다. (5)식과 (9)식 및 (6)식과 (10)식에서

$$\lambda_r = \frac{L_m}{1 + pT_r} i_{ds} \quad (14)$$

$$\omega_s = \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{qs}}{\lambda_r} \quad (15)$$

를 각각 얻을 수 있다. 여기서 T_r 은 회전자의 시정수로

여기서,

$$a = L_\sigma i_{qs} \quad (19)$$

$$b = -v_{ds} + (R_s + pL_\sigma) i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} p\lambda_r \quad (20)$$

$$c = L_\sigma i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \lambda_r \quad (21)$$

$$d = v_{qs} - R_s i_{qs} - pL_\sigma i_{qs} \quad (22)$$

이다. a, b, c, d 는 (14)식을 이용하여 회전자 자속을 연산하고, 고정자 전압과 전류를 검출하여 얻을 수 있다. 전압을 연산하여 입력하는 방식의 전압 입력형 제어 방법을 이용한다면, 전압은 검출하지 않아도 된다. (17)식과 (18)식은 이론적으로 같으나, 실제로 있어서는 전압·전류의 검출 오차와 노이즈 그리고, 연산에서 발생하는 오차 등에 의해 일치하지 않는 경우가 많다. 따라서 두 식의 오차를 최소로 하는 ω_1 을 구한다.

(17)식과 (18)식의 제곱의 합을 Q 라 하여 다음식을 얻고,

$$Q = (a\omega_1 - b)^2 + (c\omega_1 - d)^2 \quad (23)$$

(23)식을 최소로 하는 조건을 구하면, Q 의 미분값이 0일 때 (17)식과 (18)식의 오차는 최소로 된다. 따라서 추정 속도를 $\hat{\omega}_1$ 로 표시하면,

$$\hat{\omega}_1 = \frac{ab + cd}{a^2 + c^2} \quad (24)$$

을 얻어 1차 축의 각주파수를 연산할 수 있다. 이 과정을 블록선도로 나타내면 Fig.2와 같다.

2.3 시뮬레이션

앞 절에서 제시한 속도추정법의 특성을 고찰하기 위해 전압 입력형 제어를 상정하여 시뮬레이션을 수행하였다. (1)식을 이용하여 전압을 입력으로 하고, 전류를

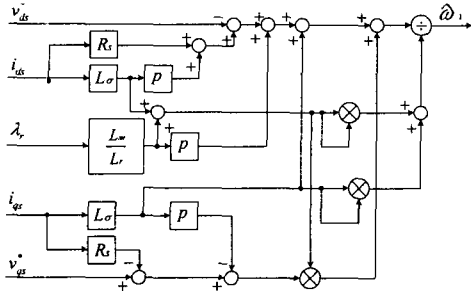


Fig.2 Block diagram of speed estimator

상태변수로 하면 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \omega_1 + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_{er} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ -\left(\omega_1 + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_{er}\right) & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{L_m}{\sigma L_s} \omega_{er} & 0 \\ \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} & -\frac{L_m}{\sigma L_s} \omega_{er} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & 0 \\ \frac{L_m}{\sigma L_r} \omega_{er} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} & 0 & -\left(\omega_1 - \frac{\omega_{er}}{\sigma}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (26)$$

$$\frac{d\omega_{er}}{dt} = \frac{P}{J} (T_e - T_L) \quad (27)$$

여기서, J 는 회전자의 관성모멘트, T_L 은 부하토크이다.

(25), (26), (27)식을 전동기 모델로 하여 모델이 RFO(Rotor Flux Orientation) 벡터 제어되는 조건에서 제어입력 전압과 시스템의 상태중 검출 가능한 고정자 전류를 이용하여 (24)식에 따라 회전자의 전기적 각속도를 연산하였다. Fig.3에 시뮬레이션을 위한 블록선도를 나타내었다.

Fig.4와 Fig.5는 각각 30rpm과 1000rpm으로 회전자를 회전시켰을 때 실제 rpm과 추정 rpm의 특성을 보이고 있다. 과도상태에서 30rpm의 경우는 최대 0.8rpm, 1000rpm의 경우는 최대 6rpm의 오차가 발생하였고, 이들 오차는 회전자의 속도가 급격히 변화할 때 즉, 지령전압이 급격히 변화할 때 속도의 오차가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig.6과 Fig.7은 회전자의 저항이 10%감소하였을 경우 30rpm과 1000rpm에 대해 실제속도와 추정속도를 각각 비교한 결과이며, 실선은 실제속도를, 점선은 추정속도를 나타낸다. Fig.8과 Fig.9는 같은 조건에서 회전자

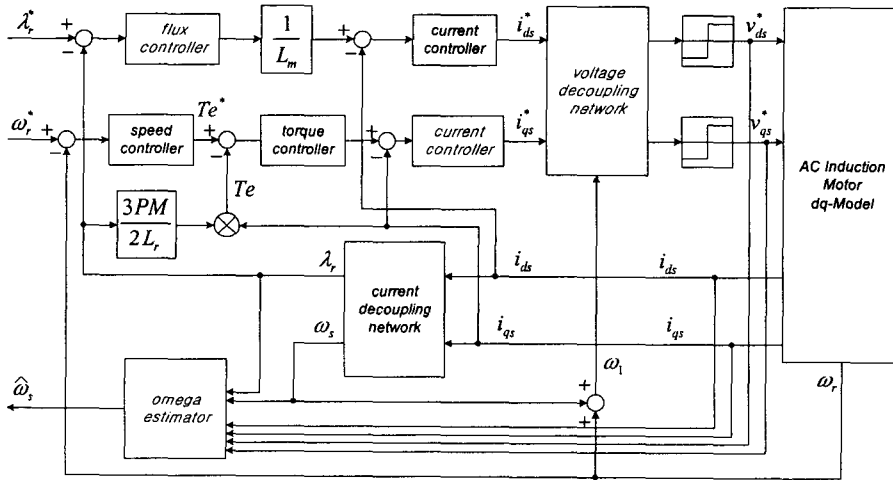


Fig.3 Simulation block diagram

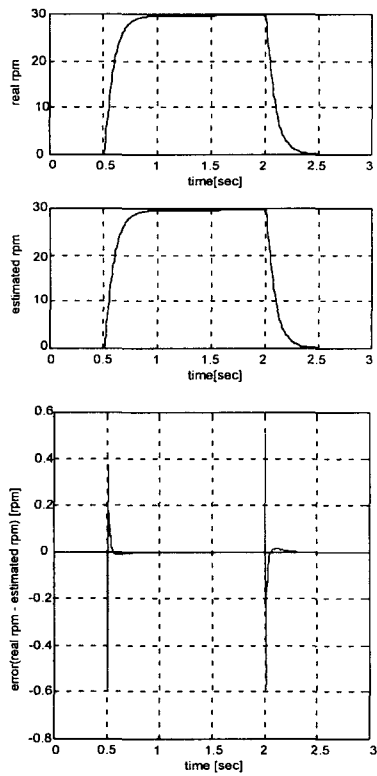


Fig.4 Characteristics of real and estimated speed at low speed

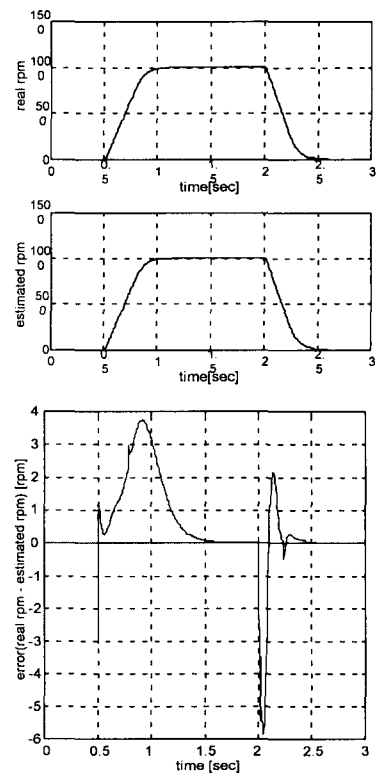


Fig5. Characteristics of real and estimated speed at high speed

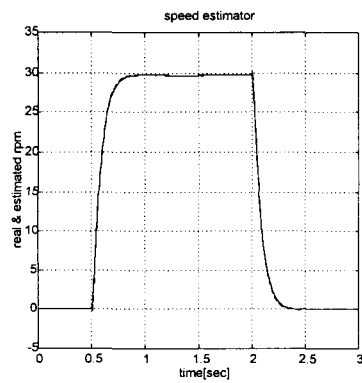


Fig.6 Characteristics of real & estimated speed with 10% rotor resistance variation at low speed

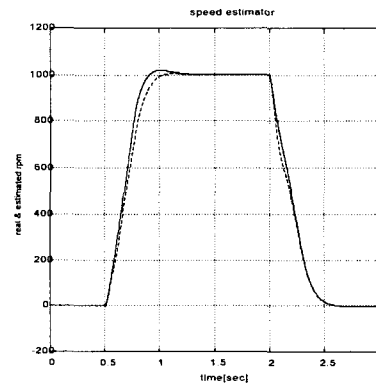


Fig.7 Characteristics of real & estimated speed with 10% rotor resistance variation at high speed

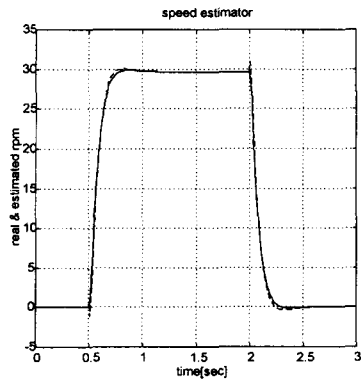


Fig.8 Characteristics of real & estimated speed with 20% rotor resistance variation at low speed

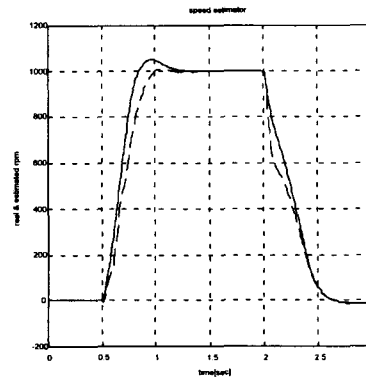


Fig.9 Characteristics of real & estimated speed with 20% rotor resistance variation at high speed

의 저항이 20% 감소했을 때의 결과를 나타내고 있다. 먼저 속도제어 결과에서 실제 속도에 오버슈터를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 2차 저항이 10%감소함에 따라 과도 상태에서 추정된 속도는 목표속도의 약 4%정도 오차를 보였으나, 정상상태에서는 오차가 0으로 된다.

III. 결 론

본 논문에서는 수중로봇에 사용되는 AC구동 시스템을 개선하기 위한 방법으로 기계적인 속도 피드백 센서 없이 그 속도를 추정하는 방법에 대해 연구하였다. 대상 전동기로 유도전동기를 선정하였고, RFO 벡터 제어되는 조건에서 속도의 추정식을 도출하였고, 추정성능을 확인하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 1000rpm에서 실제 속도와 추정속도의 오차의 피크값이 최대 6rpm까지 나타났으며, 회전자 저항이 10% 변동할 경우 과도상태에서 96%의 추정 정도를 나타내었다.

후 기

본 연구결과는 한국기계연구원에서 수행한 자체연구사업 "수중로봇용 센서리스 AC구동시스템의 속도 제어기법 연구" 결과의 일부임을 밝혀 둡니다.

참고문헌

[1] 한국기계연구원, "200m급 탐사용 AUV 개발", 3차년도 연차보고서, pp. 15~19, 1997

[2] 정석권, 전봉환, 김상봉, "유도전동기의 토크 속응제어방식에 근거한 속도추정법의 제안" '96 대한전기학회 하계학술대회 논문집(1995, 7, 20~22) pp.255~pp.257, 1995

[3] Jinsheng Jiang and Joachim Holtz, "High Dynamic Speed Sensorless AC Drive with On-Line Model Parameter Tuning for Steady-State Accuracy", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 2, pp.240~246, 1997

[4] Marc Bodson, "Trends in Electronics for Electric Motor Control", IEEE Control System, pp.88-96, Oct. 1996

[5] Inoue, Suji "A Speed Sensorless Vector Control Method of Induction Motor", Sumitomo Heavy Industry Technical Review, Vol. 39, pp.30~34, 1991

[6] Yamamura, S., "Spiral vector theory of AC motor analysis and control", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting New York, Vol.1, pp.79~86, 1991

[7] Ion Boldea, Syed A. Nasar, "Vector Control of AC Drives", CRC Press, pp.1~146

[8] Tae-Woong Kim, "Sensorless Slip Frequency Estimation Based Speed Control of Induction Motor in the Very Low Speed Region", 일본 요코하마대학, 박사학위논문, 1996,3