

## 상태관측기를 이용한 PMSM의 On-Line 과부하 모니터링 시스템

장기찬, 서석훈, 우광준

단국대학교 대학원 전자컴퓨터공학과

전화 : (041) 550-3543 / 팩스 : (041) 550-3543

### Observer-Based On-Line Overload Monitoring System of PMSM

Ki-Chan Jang, Suhk-Hoon Suh, Kwang-Joon Woo

Department of Electronic And Computer Engineering, Dankook University

E-mail : madness@anseo.dankook.ac.kr, sc1023@chollian.net, wookj@anseo.dankook.ac.kr

**Abstract** - This paper presents observer-based on-line overload monitoring scheme for a PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) drive system. Proposed scheme is to monitor overload status of motor drive system at remote place. The drive system is previously installed on main system and has no communication function. Proposed scheme consists of intelligent sensing head and monitoring part. Intelligent sensing head acquire motor 3-phase currents and transmit data to monitoring part over serial communication interface. Monitoring part estimates motor speed using state observer. By comparing estimated speed with reference speed, we can detect motor fault. In this scheme observed information must coded and transmitted over a digital communication channel with finite capacity. We consider communication constraint as time delay and we design discrete-time observer. The proposed scheme is tested on the actual drive system.

## 1. 서 론

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)은 제어성이 높고, 브러시가 없기 때문에 고장이 적고 유지, 보수가 용이하며, 구조상 냉각이 용이하므로 여러분야의 산업용 기계에 사용되고 있다. 그러나 높은 신뢰성에도 불구하고 PMSM 역시 고장이 발생할 가능성을 가지고 있다. 과부하와 고온은 고정자 코일을 파괴할 수 있으며, 베어링의 결합은 마찰력을 증가시킨다. 또한, 회전자 자극의 위치를 검출하는데 사용되는 홀 소자도 고장이 발생할 가능성이 있다. 그러나 시스템이 페루프 제어되는 동안에는 시스템 내부에서 발생한 고장은 외부에 나타나지 않으며, 결과적으로 치명적인 오동작을 유발한다. 그러므로, 유지, 보수측면에서 시스템에 치명적인 오동작이 발생되기 전에 실시간으로 고장의 징후를 발견하는 것이 매우 중요하다.[1]

최근의 대형 시스템은 부 시스템간의 정보교환을 위하여 네트워크를 사용하는 경우가 많아지고 있다. 네트워크를 사용함으로써 인하여 시스템을 제어하거나 모니터링하는데 필요한 케이블 수를 줄일 수 있으며 유지, 보수가 쉬워지고 모듈화된 시스템을 설계할 수 있다. 그러나 측정값들이 디지털 코드로 변환된 후 통신 채널을 통해 전송되므로 대역폭 제한을 받게 된다. 그러므로, 원 거리의 시스템을 On-Line 상태에서 실시간으로 제어 및 모니터링하기 위하여 제어용 네트워크를 사용하는 경우에는 통신채널에서 발생하는 시간지연이 시스템의

성능에 중요한 영향을 미치므로, 사용되는 프로토콜이 실시간 요구를 만족시킬 수 있어야 한다.[2] Brockett는 네트워크에 의한 대역폭 제한을 갖는 시스템의 제어 문제를 최초로 연구하기 시작하였다.[3] 고장진단의 목적은 고장발생시 고장부위 및 정도를 결정하여 이에 관한 정보를 운전자나 혹은 다른 시스템에 제공함으로써 고장에 대한 적절한 대응조치를 취하도록 하는데 있으며 고장부위를 빨리 발견할수록 치명적인 오동작을 방지할 수 있다.[4]

본 논문에서는 PMSM 구동 시스템의 과부하 상태를 On-Line, 실시간으로 검출할 수 있는 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 기존에 설치된 구동 시스템을 수정하지 않고 적용할 수 있도록 하기 위하여 비접촉식 홀 전류센서를 사용하여 진단대상 PMSM의 전류를 검출하며, 검출된 전류정보를 이용하여 과부하상태를 판단한다. On-Line 과부하 모니터링 시스템은 전류센서와 통신기능을 가진 Intelligent Sensing Head와 Intelligent Sensing Head로부터 전송된 정보를 이용하여 과부하상태를 판단하는 모니터링부로 구성되며 Intelligent Sensing Head와 모니터링부는 직렬통신(RS-232)으로 연결된다. 또한, 통신채널로 인한 대역폭 제한의 영향을 줄이기 위하여 주기적인 통신패턴을 사용하여 시간지연이 일정하게 일어나도록 하였다. 제안된 시스템은 실험을 통하여 효용성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 2.1장에서 과부하 모니터링 시스템에 대하여 기술하였으며 2.2장에서는 과부하상태를 판단하는 방법에 대하여 설명하였고 2.3장에서 실험 및 결과 그리고 3장에서 결론을 기술하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 과부하 모니터링 시스템

PMSM의 속도와 토크는 반비례 관계이므로, 속도정보를 얻을 수 있으면 과부하 상태를 판단할 수 있다. 그러나 속도를 측정하기 위해서는 회전축에 센서를 설치해야 하므로 기존의 시스템을 수정하여야 한다. 반면에 홀 전류센서는 비접촉식 센서이므로 기존 시스템을 수정하지 않고 쉽게 설치할 수 있다. 본 시스템에서는 기존 시스템의 구성에 영향을 주지 않기 위하여 전류센서를 이용하여 전류를 검출하고 전류 정보와 상태 관측자를 이용하여 속도를 추정하여 과부하상태를 검출하였다. 또한, 전류를 검출하는 Intelligent Sensing Head와 과부하 상태를 판단하는 모니터링부가 멀리 떨어져 있으므로 직렬통신(RS-232)을 사용하여 검출한 전류를 모니터링부로 전송하였다. 그림1은 전체 시스템의 구성을 나타내고 있다.

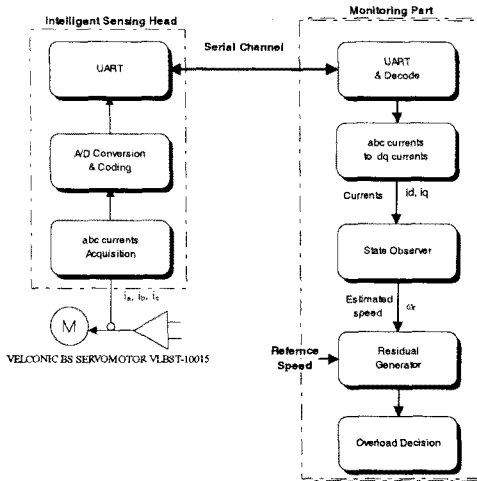


그림 1 제안된 과부하 모니터링 시스템의 구성  
Fig. 1. Proposed overload monitoring scheme

Intelligent Sensing Head는 모니터링 대상이 되는 PMSM 구동부 가까이 설치되어 전류를 검출하며, 검출된 전류정보를 먼 거리까지 전송하기 위하여 디지털 데이터로 변환한 후 직렬통신 채널을 이용하여 모니터링부로 전송한다. 그러므로, Intelligent Sensing Head는 아날로그 신호의 검출기능과 통신기능이 필요하므로 A/D 컨버터와 UART(Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) 기능을 내장하고 있는 마이크로컨트롤러를 사용하여 구현하였다. 모니터링부는 Intelligent Sensing Head로부터 전송된 3상의 전류정보를 d-q축 전류  $i_d, i_q$ 로 변환한 후 상태 관측기를 이용하여 PMSM의 속도를 추정하며 추정된 속도와 기준 속도를 비교하여 과부하 상태를 판단한다. 모니터링부의 기능은 펠터업 PC와 C언어를 이용하여 구현하였다.

본 시스템에서 Intelligent Sensing Head와 모니터링부는 직렬통신채널을 이용하여 정보를 교환하므로 대역폭 제한을 받게된다. 데이터의 양이 많아지거나 적어지면 시간지연도 커지거나 작아지게 되어 상태관측기를 이용하여 PMSM의 속도를 추정할 때 영향을 주게된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 제안한 시스템에서는 주기적인 통신 패턴을 설계하여 통신에 의한 시간지연이 일정하게 일어나도록 하였고, 이를 상태 관측기 설계에 반영하였다. 통신 패턴은, 먼저 모니터링부에서 일정한 시간 간격(sampling time)으로 Intelligent Sensing Head에 데이터 요구 메시지를 전송하면 Intelligent Sensing Head는 응답을 한다. 요구와 응답에 필요한 데이터는 모두 18(Byte)로 구성하였으며, 통신 속도는 38400(bps)로 설계하였으므로 4.6875(msec)의 통신 지연시간이 발생하고 이시간을 고려하여 이산 관측기 설계에 필요한 Sampling time을 5(msec)로 정하였다. 그림2는 설계된 통신 패턴을 나타내고 있다.

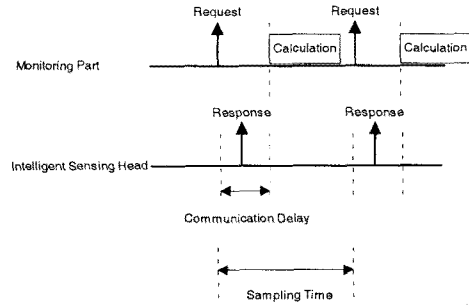


그림 2 통신 패턴  
Fig. 2 Communication pattern

## 2.2 과부하 상태의 판단

PMSM의 과부하 상태를 판단하기 위하여, 인가된 속도 명령과 상태관측기를 이용하여 구한 속도를 비교하여 잔차를 계산하고 잔차의 크기가 임계치보다 큰 값이 나온 경우 과부하 상태임을 판단할 수 있다. 3장에서는 PMSM의 수학적 모델을 유도하고 이산 상태 관측기를 설계하였다.

### 2.2.1 PMSM의 수학적 표현

d-q축에서 PMSM의 상태방정식은 식(1)과 같이 표현된다. [5]

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_s L_q i_q$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_s L_d i_d + \omega_s \lambda_f \quad (1)$$

식(1)에서  $u_d, u_q$ 는 d-q축의 고정자 전압,  $i_d, i_q$ 는 d-q축의 고정자 전류,  $L_d, L_q$ 는 d-q축의 인덕턴스를 나타내며,  $\lambda_f$ 는 회전자 자속이고  $R_s$ 와  $\omega_s$ 는 각각 고정자 저항과 인버터 주파수이다.

PMSM의 운동방정식은 식(2)와 같이 표현될 수도 있다.

$$\frac{d^2 \theta_r}{dt^2} = \frac{1}{J} (T_e - T_l - B \omega_r) \quad (2)$$

식(2)에서  $\theta_r, \omega_r$ 은 각각 회전자의 위치와 속도를 나타내며  $T_l$ 은 부하 토크를 나타낸다. 또한, 전기적인 토크는 식(3)과 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (3)$$

식(3)에서  $J, B$ 와  $P$ 는 각각 관성, 마찰력 계수, 회전자의 극 수를 나타내고 있다.  $i_d, i_q, \omega_r$ 을 상태변수로 선정하면 다음과 같은 비선형 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d i_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{P L_d}{L_d} i_q \omega_r + \frac{1}{L_d} u_d$$

$$\frac{d i_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{P L_d}{L_q} i_d \omega_r - \frac{P \lambda_f}{L_q} \omega_r + \frac{1}{L_q} u_q$$

$$\frac{d \omega_r}{dt} = \frac{3P \lambda_f}{2J} i_q + \frac{3P}{2J} (L_d - L_q) i_d i_q - \frac{B}{J} \omega_r \quad (4)$$

식(4)를 동작점  $i_d = i_q = 0[A]$ ,  $\omega_r = 1000[rpm]$ 에서 Jacobian 행렬을 이용하여 선형화 하면 식(5)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{d i_d}{dt} \\ \frac{d i_q}{dt} \\ \frac{d \omega_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{P L_d}{L_d} \omega_r & 0 \\ -\frac{P L_d}{L_q} \omega_r & -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{P \lambda_f}{L_q} \\ 0 & \frac{3P \lambda_f}{2J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

추정된 3상 전류는 park transformation(5)에 의하여 d-q축 전류,  $i_d, i_q$ 로 변환되며,  $i_d, i_q$  전류는 상태 관측기의 입력으로 인가된다.

### 2.2.2 상태 관측기

제안된 구성에서는 통신채널에 의하여 시간 지연이 발생되므로 이를 고려하여 이산 상태 관측기를 설계하였다. 식(6)은 선형, 시불변 이산 상태방정식을 나타낸다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (6)$$

위 식에서  $x$ 는  $n \times 1$  상태벡터,  $u, y$ 는 각각 스칼라 입력, 스칼라 출력을 나타내며,  $A$ 는  $n \times n$  상수 행렬,  $B$ 는  $n \times 1$  열벡터를 나타낸다. 관측기의 상태변수를 되먹임하는 페루프 관측기는 식(7)과 같이 표현되며

$$\hat{x}(k+1) = (A-LC)\hat{x}(k) + Ly(k) + Bu(k) \quad (7)$$

오차 방정식은 식(8)과 같이 표현된다.

$$\tilde{x}(k+1) = (A-LC)\tilde{x}(k) \quad (8)$$

식(8)에서  $(A-LC)$ 의 고유값을 임의의 위치에 설정할 수 있으면 오차  $\tilde{x}(k)$ 를 제어할 수 있다.[6]

상태 관측기에 의하여 추정된 속도값과 기준 속도를 식(9)에 대입하여 잔차를 계산하고 계산된 잔차가 임계치보다 큰 경우 과부하 상태임을 판단할 수 있다.

$$\text{잔차} = |\text{기준속도} - \text{추정된속도}| \quad (9)$$

## 2.3 실험 및 결과

### 2.3.1 실험

실험장치는 VELCONIC BS SERVO VLBST-10015 PMSM 과 VLAST-015P2V 앰플을 이용하여 구성하였다. PMSM은 무부하 상태에서 1000(rpm)으로 동작되며 100초 후에 1.0(Kg)의 부하를 인가하였다. 그 후 연결하기 전과 연결한 후의 잔차를 비교하여 과부하 상태를 판단하였다. 표1은 사용된 PMSM의 정격과 파라미터를 표시하고 있다.

표1 PMSM의 파라미터  
Table 1 PMSM parameters

nominal output	P <sub>o</sub>	1[KW]
stator resistance	R <sub>s</sub>	2.2[Ω]
stator inductance	L <sub>s</sub>	19[mH]
back EMF coefficient	λ	0.79[V/rad/sec]
number of pole pairs	P	4
inertia	J	2.62 × 10 <sup>-3</sup> [Kg·cm <sup>2</sup> ]
viscous	B	0.0001[Nm/Krpm]

PMSM 시스템은 식(5)와 같이 표시되며 상태벡터는  $x = [x_1, x_2, x_3]^T = [i_d, i_q, \omega_r]$  이다. 그림2와 같은 주기적인 통신패턴에 의한 시간지연으로 인하여 이산 상태관측기의 샘플링 시간은 10[msec]로 선정하였으며, 고유값 지정 방법을 이용하여 pole을  $[-9500, (-4990.6 + 8083.6j), (-4990.6 - 8083.6j)]$ 에 위치하게 하였다. 식(10)은 설계된 이산형 상태 관측기이다.

$$\begin{aligned} A-LC &= 1.0 \times 10^{-8} \begin{bmatrix} -0.0295 & -0.1515 & -0.0091 \\ 0 & 0.0002 & 0 \\ 0.0957 & 0.4766 & 0.0296 \end{bmatrix} \\ L &= 1.0 \times 10^7 \begin{bmatrix} 2.6210 \\ 0.0019 \\ -8.5496 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0.4568 & -0.0004 \\ 0 & 0 \\ -1.4660 & 0.2702 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

그림 3은 설계된 관측기의 성능을 나타내는 모의 실험 결과이며, 초기값을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 모두 상태를 정확하게 추정한다는 것을 알 수 있다. 모의 실험에서 고려된 초기값은  $x_1(0)=0, x_2(0)=0, x_3(0)=5$  이다.

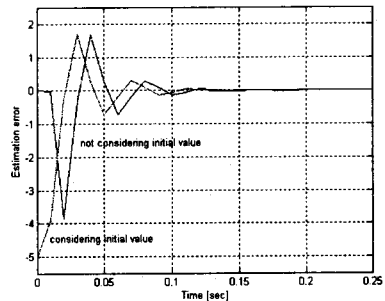


그림 3 관측기의 모의실험 결과  
Fig. 3 Simulation results of the observer

### 2.3.2 실험결과

그림 4는 모니터링부로 전송된 3상 전류를 이용하여 d-q축 전류  $i_d$ 와  $i_q$ 로 변환한 결과이다. 모니터링부의 상태관측기는  $i_d, i_q$  전류를 이용하여 PMSM의 속도를 추정하며 그림 5는 추정된 속도를 그래프로 나타낸 것이다.

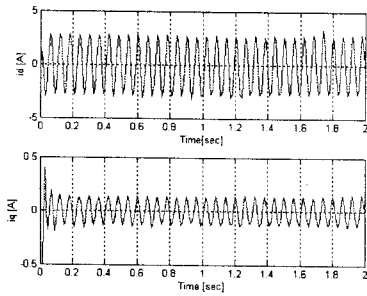


그림 4 d-q축 전류  
Fig. 4 Calculated d-q frame currents

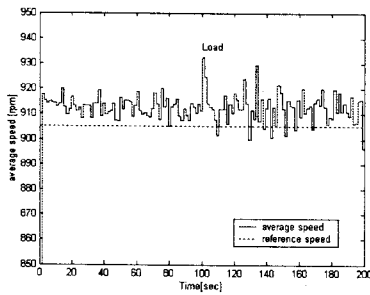


그림 5 추정된 속도  
Fig. 5 Estimated speed

그림 5로부터 PMSM 구동 시스템은 정상 부하에서 1000(rpm)으로 회전하고 있을때 관측기의 출력은 905(rpm)으로 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 기준 속도를 905(rpm)으로 두고 식(9)를 이용하여 잔차를 계산하면 그림 6과 같은 결과를 얻는다. 그림 6으로부터 잔차를 이용하여 PMSM의 과부하 상태를 검출할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

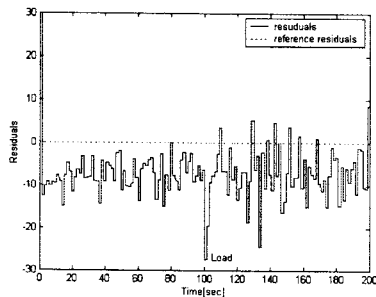


그림 6 계산된 잔차  
Fig. 6 Generated residuals

### 3. 결 론

본 논문에서는 PMSM의 과부하 상태를 On-Line 상태에서 실시간으로 모니터링하기 위한 시스템을 제안하였다. 제안

된 시스템은 기존에 설치된 구동 시스템에 수정없이 적용될 수 있도록 하기 위하여 비접촉식 센서를 사용하여 전류를 검출하며, 속도를 추정하여 과부하 상태를 판단한다. 전체 시스템은 Intelligent Sensing Head와 모니터링부로 나뉘며 두 부분은 직렬 통신 채널로 연결된다. Intelligent Sensing Head와 모니터링부는 직렬 통신 채널을 이용하여 정보를 교환하며 이로 인하여 대역폭 제한 문제가 생긴다. 본 논문에서는 통신 채널로 발생하는 대역폭 제한 문제를 해결하기 위하여 주기적인 통신 패턴 방식의 프로토콜을 사용하여 시간지연이 일정하게 일어나도록 하였다. 또한, 시간지연을 고려하여 이산 상태 관측기를 설계하여 PMSM의 속도를 추정하였다. 제안한 On-Line 과부하 모니터링 시스템은 실험을 통하여 효용성을 확인하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Olaf Moseler, Dani Juricic, Andrej Rakar, Norbert Muller, "Model-Based Fault Diagnosis of an Actuator System Driven by the Brushless DC Motor," *Proc. American Control Conference*, San Diego, California, June, 1999, pp. 3779-3783.
- [2] H. Ishii and B. A. Francis, "Stabilization with control networks," *Proc. UKACC Control 2000*, Cambridge, UK.
- [3] R. Brockett, "Stabilization of motor networks" *Proc. of 34th Conf. on Decision and Control*, pp. 1484-1488.
- [4] 김지홍, 신형 동적 시스템의 고장진단 알고리즘, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1989
- [5] G. Zhu, L. A. Dessaint and O. Akhrif, "Observer-Based Speed Tracking Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor", *Proc. of the American Control Conference 1997*, pp. 114-119.
- [6] Chi-Tsong Chen, *Linear System Theory and Design*, Saunders College Publishing, 1984