

# ETC 구동용 BLDC 제어시스템의 홀센서리스 위치제어를 위한 신호처리기법에 관한 연구

이 상 훈<sup>\*1)</sup> · 이 선 봉<sup>2)</sup> · 박 철 휴<sup>3)</sup>

대구기계부품연구원<sup>1)</sup> · 계명대학교 기계자동차공학부<sup>2)</sup> · 대구기계부품연구원<sup>3)</sup>

## A Study on the Signal Processing Method for the Hall Sensorless Position Control of ETC Control System using a BLDC Motor

SangHun Lee<sup>\*1)</sup> · SeonBong Lee<sup>2)</sup> · CheolHu Park<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>System Control Team, Mechatronics Center, Deagu Machinery Institute of Components & Materials, 12 Horim-dong, Dalseo-gu, Daegu 704-240, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

<sup>3)</sup>Mechatronics Center, Deagu Machinery Institute of Components & Materials, 12 Horim-dong, Dalseo-gu, Daegu 704-240, Korea

(Received 3 January 2008 / Accepted 10 March 2008)

**Abstract** : This paper describes an signal processing method for the hall sensorless position control of ETC control system using a BLDC motor. The proposed ETC control system, which is mainly consisted of a BLDC motor, a throttle plate, a return spring and reduction gear, has a position sensor with an analog voltage output on the throttle valve instead of BLDC motor for detecting rotor position of motor. So the additional commutation information is necessarily needed to control the mentioned ETC module. In order to estimate and determine the commutation state, it is proposed to properly manipulate the resolution of A/D converter considering the mechanical parameter, that is, the number of motor slot and the ratio of reduction gear. Through this method, the estimation of commutation state for operating the system is possible and the discrete signal for commutation is stably obtained. The validity of the method is examined through the experimental results.

**Key words** : Electric throttle control(전자스로틀제어), Hall sensorless control(홀센서리스제어), Commutation estimation method(전류추정기법), BLDC motor control(브러시리스 모터제어), High-response position control (고속응 위치제어)

### Nomenclature

R : resistance [ $\Omega$ ]

L : inductance [ $H$ ]

$\theta$  : position [ $rad$ ]

$T_e$  : developed torque [ $Nm$ ]

$\omega_m$  : rotation speed [ $rpm$ ]

MSB : most significant bit

LSB : least significant bit

### Subscripts

SW : swtich

SW\_state(n) : switching state value

F.C. : full closed

F.O. : full open

\*Corresponding author, E-mail: lshdmi@naver.com

$M_{param}$  : mechanical parameter  
 Pos\_cmd : command position  
 Pos\_real : real position  
 Pulse\_Pos\_cmd : external pulse-type command signal of position  
 L\_side : lower-arm side switch of inverter  
 H\_side : upper-arm side switch of inverter

### 1. 서론

최근 엔진 연료공급 장치의 제어 및 관리기술은 환경오염방지, 연료 효율성 향상과 안전성 증대, 차량의 지능화 등의 관점에서 빠르게 발전하고 있으며, 이러한 기술변화의 추세는 차량의 기능, 요구사항 변화 그리고 차량 부품의 모듈화를 통하여 그 적용범위를 확대해가고 있다.

X-by-Wire 적용기술의 하나로 기계적 링크를 통한 동력전달수단을 전기적 신호로 대체하는 ETC 시스템은 전자화된 가속페달의 변위에 따라 스로틀 밸브를 변화시켜 실린더로 유입되는 흡기량을 제어하게 된다.

ETC 시스템의 구성 요소인 모터는 엔진의 성능 및 연료의 효율 등을 결정하는 핵심적인 구성품으로서 이에 대한 다양한 연구<sup>1-4)</sup>가 수행되어 왔다.

구동용 모터로서 스텝 모터의 경우, 정밀각 제어가 어려운 단점을 가지고 있으며, DC 모터의 경우 현재 시판중인 차량에 널리 사용되고는 있으나 내구성 증대 요구에 대하여 내환경성과 내구성 문제를 수반하고 있다.

그러나 BLDC 모터는 비용 상의 문제로 중소형 승용차량의 적용에 제한적이지만, 내구 수명과 효율, 성능 면에서 우수한 성능을 갖는다.

따라서 본 논문에서는 BLDC 모터 기반 제어 시스템에서 부가적 비용 발생의 원인 중 하나인 회전자의 자극 위치 확인용 홀센서 적용 방식을 기존 DC 모터의 스로틀 밸브 변위 각 감지용으로 사용되는 자기 센서나 포텐서미터로 대체하는 기법을 제안하였다. 또한, 제안한 BLDC 모터의 전류 정보 간접 추정 기법인 전류신호처리기술을 이론적으로 검증하고 실험을 통해 제안한 기법으로 스로틀 밸브의 연속적인 위치 제어와 고속 반응 위치 제어가 가능함을

증명하였다.

### 2. ETC구동용 BLDC 제어시스템

ETC 구동시스템의 주요 부분은 Fig. 1과 같이 ETC 모듈과 스로틀 밸브 제어를 위한 제어모듈로 구성된다.

ETC 모듈은 BLDC 모터와 스로틀 밸브의 위치 제어를 위한 포텐서미터, 감속기 그리고 모터 구동 장치에서 위치 복귀를 위한 리턴 스프링으로 구성되어 있다.

제어모듈은 ECU로부터 입력된 PWM 신호의 듀티에 비례하는 위치지령( $\theta^*$ )에 대하여 위치 센서의 출력 정보( $\theta$ )를 이용하여 BLDC 모터의 현재 위치와 전류 정보를 결정함으로써 BLDC 모터와 감속기를 통한 기계적 출력을 생성하게 된다.

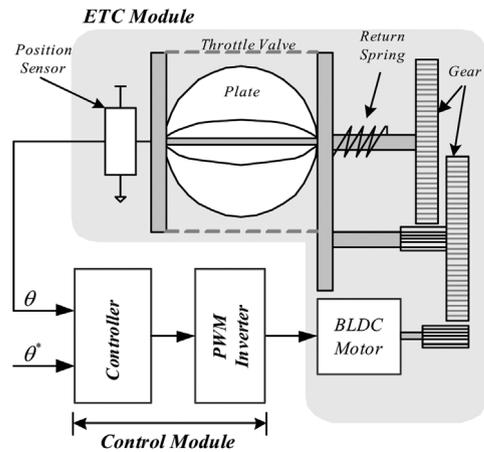


Fig. 1 ETC System using BLDC motor

#### 2.1 BLDC 모터의 수학적 모델링<sup>5)</sup>

Fig. 2는 BLDC 모터의 등가회로를 나타낸 것으로 모터의 권선에 존재하는 인덕턴스( $L_x, x = a, b, c$ )와 저항( $R$ ) 그리고 속도에 비례하는 사다리꼴 파형을 갖는 역기전력( $e_x, x = a, b, c$ )으로 등가화 할 수 있고 전압 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L_a & L_{ta} & L_{ca} \\ L_{ta} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

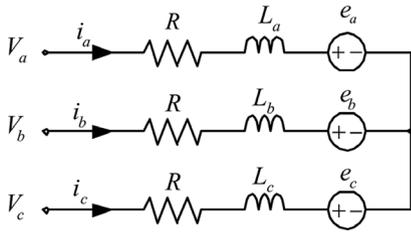


Fig. 2 Equivalent circuit of BLDC motor

식 (1)에서  $v_a, v_b, v_c$  는 각 상전압이고  $R$ 은 고정자 권선의 저항을 나타내며  $i_a, i_b, i_c$  는 각 상전류이고  $L_a, L_b, L_c$ 는 자기 인덕턴스를  $L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}$ 는 상호 인덕턴스를 각각 나타낸다.

회전자의 위치에 따른 3상 고정자 권선의 인덕턴스의 변화가 없다고 가정하면 각 상의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스가 동일하므로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_a &= L_b = L_c = L_s \\ L_{ab} &= L_{bc} = L_{ca} = M \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 BLDC 모터의 저항 및 인덕턴스가 일정하다고 가정하면  $i_a + i_b + i_c = 0$ 이므로 이를 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (4)와 같이 정리된다.

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서,  $L = L_s - M$ 이다.

이로부터 3상 BLDC 모터의 출력과 토크는 다음 식 (5)와 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{out} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = T_e \omega_m \quad (5)$$

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (6)$$

## 2.2 ETC 구동시스템의 제어

ETC를 구동하기 위해서는 계자의 자극 위치를

기준으로 전기자 전류를 순차적으로 인가해 주어야 하며, 고정자측 권선의 전류 방향 및 순서를 바꾸기 위해서는 회전자의 절대적인 위치를 검출할 센서가 요구된다. 일반적으로 계자의 자극위치에 대한 정보는 홀센서를 사용하여 이를 전류용 신호로 사용한다.

본 연구에서 제안한 방법은 Fig. 3과 같이 ETC 모듈에 직접적인 홀센서를 부착하는 것이 아니라 자기 센서나 포텐서미터를 ETC 모듈의 변위 각 센서로 사용하여 감속기를 통해 모터에 연결된 스로틀 밸브의 연속적인 위치를 검출하게 된다.

따라서 이러한 방식이 적용된 ETC 모듈에서는 적절한 모터의 구동을 위해 BLDC 모터의 전류정보를 얻기 위한 부가적인 신호처리방법이 필요하다.

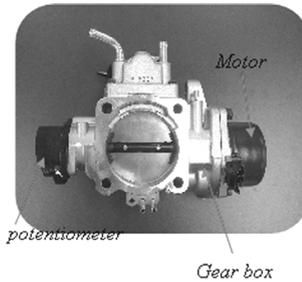


Fig. 3 Composition of ETC module

## 3. 전류추정기법

이를 위해 본 논문은 전류 정보를 추정하기 위한 방법으로 Fig. 4와 같이 아날로그 출력을 갖는 포텐서미터의 출력값으로부터 A/D변환기의 분해능을 고려하여 BLDC 구동을 위한 전류 정보를 결정하고, 이를 통해 안정적인 위치제어가 가능한 신호처리방법을 제안하였다.

Fig. 4는 스로틀 밸브의 위치에 따른 포텐서미터의 출력값을 나타낸 것으로, 각 모듈 생산 업체마다 다소의 차이를 보이지만, 사용된 ETC 모듈의 경우 센서입력 5V 입력범위내에서 최소전압 0.44V에서 최대전압 4.48V 범위를 갖는다.

Fig. 5와 같이 BLDC 모터의 2상 개루프 여자 시 전력 변환부의 스위칭 경로를 고려하여 TPS의 출력 전압을 나타내면 Fig. 6과 같은 계단파형으로 표현된다.

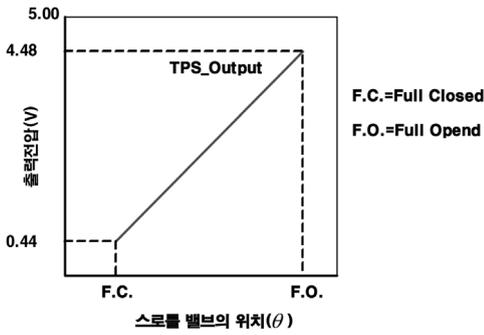
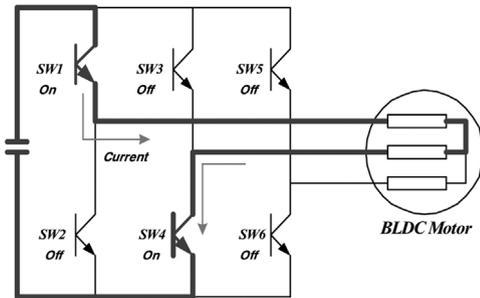
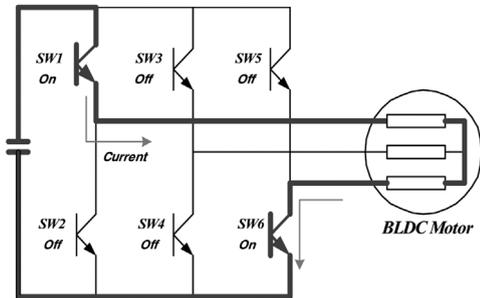


Fig. 4 Throttle valve position vs. voltage output



(a) Conduction Path (SW1→SW4)



(b) Conduction Path (SW1→SW6)

Fig. 5 Conduction path at 2 phase conduction

Fig. 6의 계단파형에서 각 단계값은 2상 스위칭 동작시 해당 상이 여자될 때마다 표현되는 상태값으로써 천이되기 전의 상태값과 천이된 후의 상태값을 각각 SW state<sub>(n-1)</sub>과 SW state<sub>(n)</sub>의 값으로 표현할 수 있으며, 이는 프로세서내부에서 A/D 변환된 값을 통하여 인식된다.

A/D 변환을 통해 추정되는 각 상태값은 Fig. 6에서 알 수 있듯이 상태값간 차이가 크기 때문에 Fig. 7과 같이 A/D 변환값을 ETC 모듈에 적용된 모터의 슬롯수와 감속비를 고려하여 분해능을 선택적으로

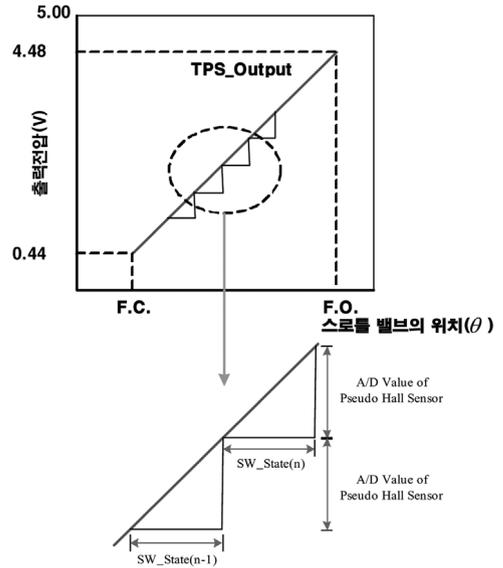


Fig. 6 Commutation information detection using the A/D value of TPS voltage output

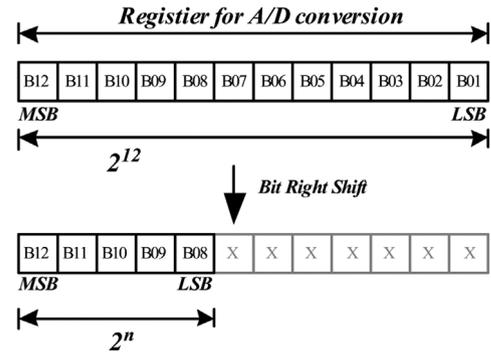


Fig. 7 Signal processing of A/D conversion value

줄임으로써 A/D 변환 레지스터의 LSB 주변값에 대한 노이즈 제거 효과와 함께 전류를 위한 각 상태값을 안정적으로 추정할 수 있다.

Fig. 7에서  $2^n$ 의  $n$ 은 전류추정을 위한 A/D 분해능을 의미하며, 이는 식 (7)과 식 (8)에 의해 최적화된 A/D 분해능을 선택적으로 결정할 수 있다.

$$n = \text{Min}\{(2^m > M_{param}), (m = 1, 2, \dots)\} \quad (7)$$

$$M_{param} = \frac{360^\circ}{M_{slot\_vm}} \times \frac{1}{G_{ratio}} \quad (8)$$

여기서,  $m$ 은 정수이고  $M_{slot\_num}$ 는 모터의 슬롯

수,  $G_{ratio}$  는 감속 기어비를 의미하며, 본 논문에서는  $M_{slot\_num} = 6$ ,  $G_{ratio} = 16$ ,  $n = m = 5$ 로 사용하였다.

Fig. 8은 2상 여자시 각각의 스위칭 패턴과 이때 A/D 분해능 조정을 통하여 발생하게 되는 이산적인 TPS의 출력전압값을 나타낸 것으로, 이를 통해 BLDC 모터 구동을 위한 직접적인 전류정보를 결정할 수 있다.

이는 BLDC 모터의 2상 운전 시 해당 상 여자에 따라 스로틀 밸브의 위치변위가 발생하고, 이때 TPS 출력전압은, 상술한 A/D 분해능의 조정 방식에 의하여, 위치 변위시 LSB 주변에 존재할 있는 각종 오차 성분들이 자동 제거되는 안정된 상태값이 될 뿐만 아니라 Fig. 8과 같이 변화폭이 균일한 이산적인 값의 형태로 증감될 수 있기 때문이다.

그러므로 BLDC 모터의 회전자가 어떠한 임의의 위치에 있더라도 이산화된 TPS 출력값을 통해서 회전자의 현재 위치와 현재 상여자 정보 그리고 이동하기 위한 다음 상여자 정보 즉, 전류정보를 결정할 수 있게 된다.

이는 일반적으로 모터에 자극검출용 홀센서를 직접 부착한 BLDC 모터의 위치 제어시 홀센서를 통

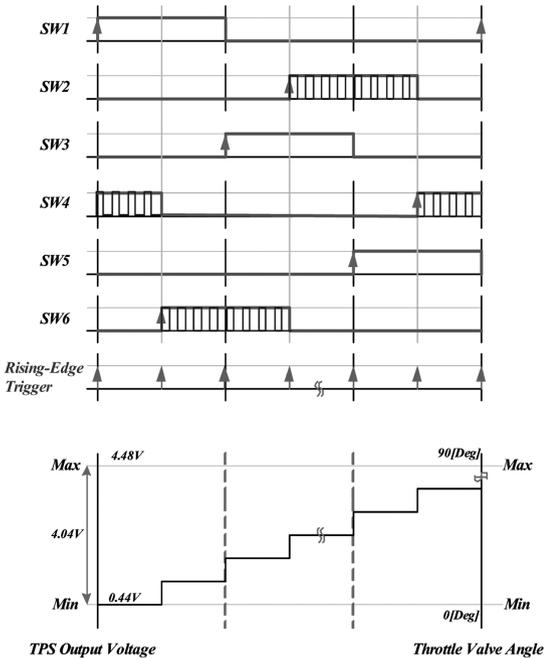


Fig. 8 Switching pattern vs. TPS output

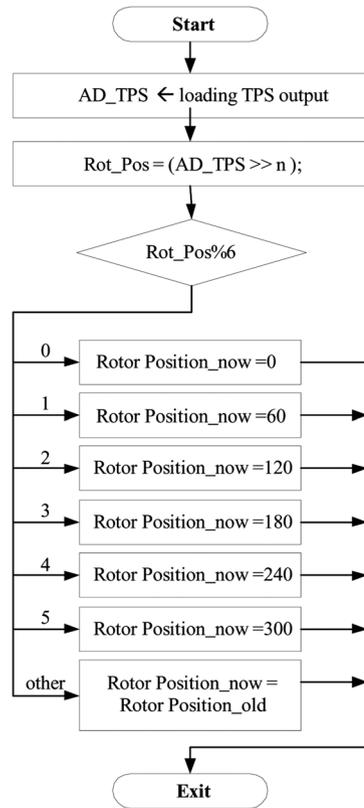


Fig. 9 Flow chart of estimation of rotor position

해 얻을 수 있는 이산화된 전류정보와 개념적으로 동일하게 볼 수 있다.

Fig. 9는 이산적인 전류정보를 통하여 회전자의 위치를 추정하는 서브 제어 흐름 도를 보인 것이다.

따라서 본 연구와 같이 직접적으로 모터에 홀센서를 부착하지 않고, 스로틀 밸브에 선형출력을 갖는 위치센서를 부착한 시스템에서도 A/D 분해능 조절을 통하여 기존 방식과 같이 이산화된 전류정보를 추정할 수 있다.

또한 ETC 모듈에 사용된 모터의 슬롯수와 극수 그리고 감속비에 따라 스로틀 밸브 변위각의 분해능을 증가시킬 수 있으며, 분해능의 결과는 Fig. 8의 계단상의 출력전압의 크기로 나타난다.

#### 4. 시스템의 구성

Fig. 10은 ETC구동용 BLDC의 제어시스템의 구성을 나타낸 것으로, 제어를 위하여 TI사의 TMS320

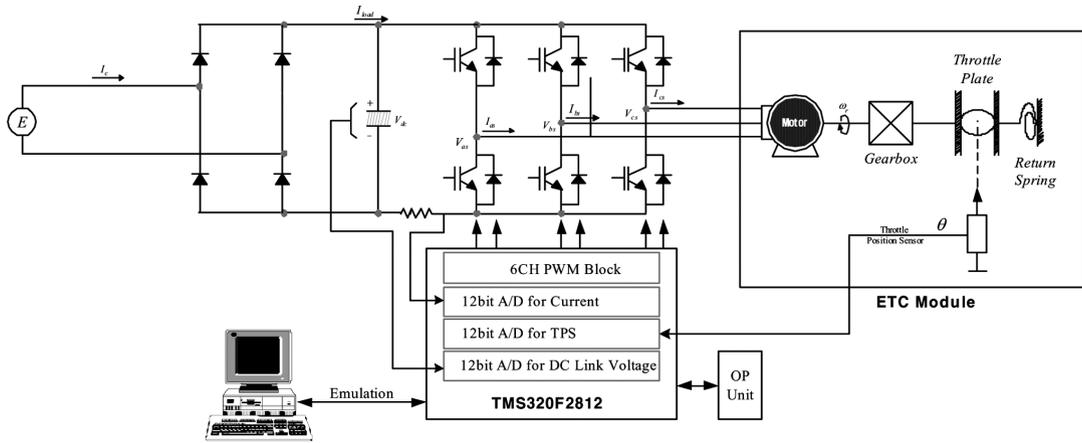


Fig. 10 Overview of ETC control system

F2812 DSP 프로세서를 사용하였고, 전력변환부는 외부 DC 13.5V를 입력전압으로 하고, 12V 단일전원을 이용하여 각상 개별 스위칭이 가능하도록 구성하였다.

특히, 제안된 추정기법의 신호처리와 관련하여 프로세서에 내장된 12bit A/D 컨버터를 사용하였으며, 이를 통해 스로틀 밸브의 위치변이에 따른 TPS 출력신호를 5bit 분해능을 갖는 A/D 변환값으로 설정하여 이산화된 전류신호를 추정하였다.

Table 1은 Fig. 10의 구동시스템에 사용된 ETC 모

Table 1 Main specification of ETC control system

정격전압	13.5V( Max. 24V)	
정격전류	1.2A ( Max. 3A)	
출력주파수	최대 400[Hz]	
위치검출형식	0 ~ 5V (Potentiometer)	Min. 0.44V
		Max. 4.48V
프로세서	TMS320F2812	
BLDC 모터	6 Slot / 4 pole	
모터속도	Max. 5,000[rpm]	
감속비	16 : 1	

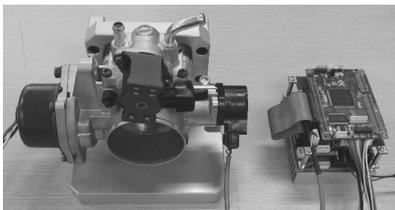


Photo. 1 ETC control system for experiment

듈과 스로틀 밸브제어를 위한 제어모듈의 주요사양을 정리한 것이다.

Photo 1은 제안된 방식의 실험을 위해 사용된 ETC 모듈과 제작된 제어기의 실제 구성을 보인 것이다.

## 5. 실험 내용

본 논문에서는 ETC 구동시스템의 홀센서리스 위치제어를 위해 제안된 전류추정기법의 유용성과 타당성을 검증하기 위하여 2상 여자시 발생하는 스위칭 패턴과 TPS 신호의 상관관계를 Fig. 11과 Fig. 12를 통하여 고찰하였다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 실험에 적용된 모터가 6슬롯, 4극 BLDC 모터이고 스로틀 밸브의 개도각이 최대 90° 이므로 2상 여자시 각 상여자에 따른 총 스텝 수는 24 스텝이 됨을 알 수 있다.

구간 A의 경우, Fig. 5와 Fig. 6에서 언급한 바와 같이 U상\_H side(SW1)와 V상\_L side(SW4)가 턴-온인 상태에서 U상\_H side(SW1)와 W상\_L side(SW6)로 턴-온인 상태로 스위칭 조건이 천이될 때, A/D 변환 과정상의 분해능 조정을 통하여 TPS 출력신호를 이산적인 신호로 나타낼 수 있음을 보인 것이다.

또한 Fig. 11과 Fig. 12에서 나타난 이산적인 TPS 출력신호는 2상 여자되는 전 구간에서 균일한 폭과 높이를 나타내므로 자극 검출용 홀센서를 직접 부착한 일반적인 BLDC 모터에서 홀센서를 통해 얻을 수 있는 이산화된 전류정보와 개념적으로 동일하게

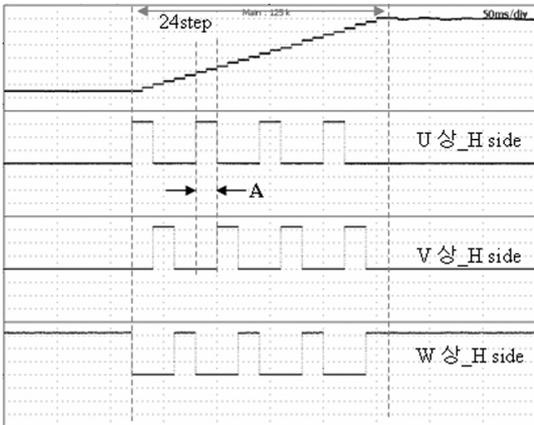


Fig. 11 TPS signal vs. Switching pattern (H-side)

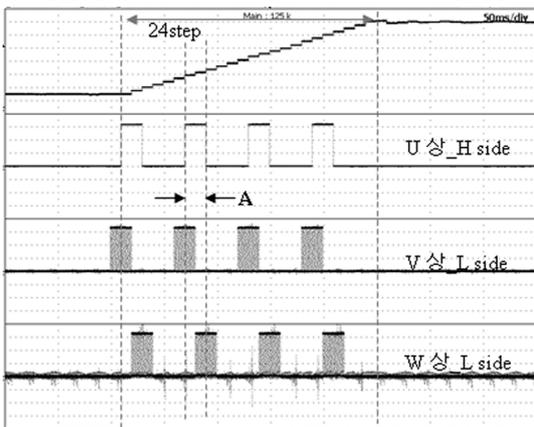


Fig. 12 TPS signal vs. Switching pattern (L-side)

볼 수 있다.

이로부터 홀센서리스 타입의 스로틀 밸브에서 선형출력을 갖는 위치센서를 부착한 시스템에서도 A/D 분해능의 선택적인 조정을 통하여 기존 방식과 같이 이산화된 전류정보를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 본 연구에서 제안한 이산화된 위치정보를 이용하여 BLDC 모터를 2상 운전했을 때 전류가 원활히 수행됨을 보이기 위한 실험을 통해 검증하였다.

이를 위해 각각 단계별 위치지령에 의한 스텝운전특성을 고찰하였고, 위치 제어 시 속도 응답성 고찰을 위하여 외부로부터 PWM 듀티비(최소:20%, 최대:80%)를 이용한 최소 개도각 11.25°(@duty 27.5%)에서 최대 개도각 82.5°(@duty 75%)구간 운전을 통

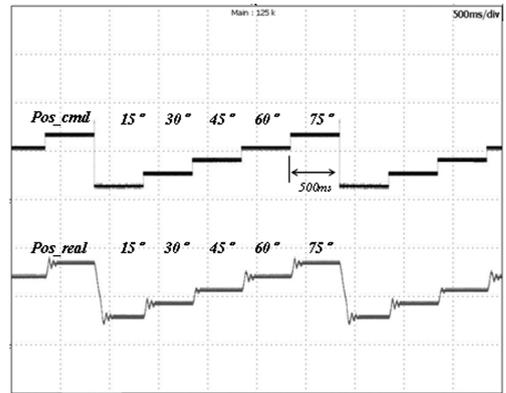


Fig. 13 Step operation test

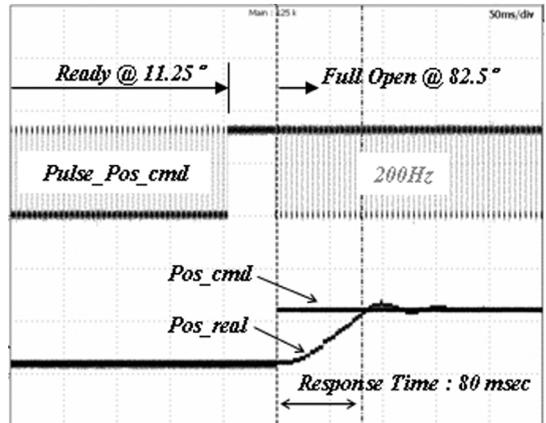


Fig. 14 Response test using PWM duty pulse (@200Hz)

해 응답성을 살펴보았다.

Fig. 13으로부터 균일한 스텝상의 위치 지령값 ( $Pos\_cmd$ )에 대한 실제 위치값 ( $Pos\_real$ )의 추종 특성을 살펴봄으로써 제안된 전류추정기법을 이용한 전류특성이 원활히 수행됨을 검증할 수 있다.

Fig. 14로부터 200[Hz]의 주파수를 갖는 외부의 PWM 신호를 이용하여 스로틀 밸브의 응답성을 고찰한 결과 80[msec]의 응답성을 보였다.

그러므로 BLDC 모터의 회전자가 어떠한 임의의 위치에 있더라도, 본 논문에서 제안한 내용과 같이, ETC 모듈에 적용된 모터의 슬롯수와 감속비를 고려하여 선택적인 A/D 분해능을 결정할 수 있으며, 이를 통해 변화폭이 균일한 이산화된 TPS 출력값을 이용하여 ETC 모듈 구동을 위한 전류 정보를 추정할 수 있다.

제안된 내용의 유용성은 실험에서 검증한 것과 같이 위치 제어 시스템 운전상의 추종 성능과 최대 개도각 운전상의 속도 응답성을 통해 알 수 있다.

## 6. 결론

- 1) ETC 구동용 BLDC 제어 시스템의 홀센서리스 위치 제어를 위한 전류추정기법을 제안하였다.
- 2) 제안된 내용은 2상 여자시 아날로그상의 선형적인 출력을 갖는 스톱틀 밸브의 위치 센서출력을 변화의 폭이 균일하고 이산화된 센서출력 신호로 전환함으로써 일반적인 홀센서 부착형 BLDC 모터에서 검출되는 전류정보를 추정하는 방법과 동일한 전류를 수행할 수 있는 추정기법을 제안하였다.
- 3) 추정과정에서 상술한 이산화된 전류신호를 추정하기 위하여 시스템이 갖는 A/D 변환기의 분해능을 조정하고, 이때 최적의 분해능을 결정하기 위하여 ETC 모듈에 적용된 모터의 슬롯수와 감속비를 고려한 관계식을 도출하였다.
- 4) 제시된 개념도와 실증실험을 통하여 제안된 추정기법으로 안정된 전류와 위치제어가 수행됨을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지역산업중점기술개발과제에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- 1) H. Sim and M. Sunwoo, "A Study on an Electronic Throttle Control using Drive-By-Wire(1)," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.187-192, 1996.
- 2) K. Shin, D. P. Chun and W. T. Lee, "Development of an Electronic Throttle Controller using an Intelligent Driver IC," Proceeding of Electrical & Electronic System, ITS Symposium, KSAE, pp.11-16, 2005.
- 3) Pechlaner, A. and S. BjOrn, "Electronic Throttle Control with Contactless Position Sensor and Smart Power Full-Bridge," Electronic Engine Controls, SAE 2001 World Congress, Detroit, Michigan, 2001.
- 4) R. Isermann, "Fault-tolerant Drive-by-Wire Systems," IEEE Control System Magazine, pp.64-81, 2002.
- 5) P. C. Krause, "Analysis of Electric Machinery and Drive Systems," 2nd Edn., pp.109-136, McGraw-Hill, 1987.