자동차 연료 펌프용 BLDC 모터의 센서리스 기동 및 연료 압력 제어

장 진 욱¹⁾ · 윤 덕 용^{*2)}

현담산업 기술연구소¹⁾ · 공주대학교 전기전자제어공학부²⁾

Sensorless Starting Method and Fuel Pressure Control of BLDC Motor for Fuel Pump of Vehicle

Jin-Wook Chang¹⁾ · Duck-Yong Yoon^{*2)}

¹⁾R&D Center of Hyundam Ind. Co., Ltd., 343-21 Yeok-ri, Youngin-myun, Asan-si, Chungnam 336-822, Korea

²⁾College of Engineering, Kongju National University, Chungnam 330-717, Korea

(Received 23 May 2012 / Revised 31 July 2012 / Accepted 3 August 2012)

Abstract : High efficiency operation is required for motors of vehicle to increase fuel efficiency due to the regulation of exhaust gas. This paper presents a control method of fuel pressure to increase fuel efficiency and a sensorless control method of BLDC motor to get higher efficiency than conventional brushed DC motor. Initial rotor position of BLDC motor is detected from current value that is occurred by test voltage pulse and rotor is accelerated by defined sequence to enter sensorless operation mode. The algorithm to control flow rate of fuel pump uses PI controller that is control motor speed to maintain the target fuel pressure commanded by ECU.

Key words : Fuel pump(연료 펌프), BLDC motor(브러시리스 모터), Sensorless control(센서리스 제어), Fuel pressure control(연료 압력 제어), Fuel efficiency(연비), Rotor position detection(회전자 위치 검출)

1. 서 론

지구 온난화가 가속되고 자동차의 연비와 배출 가스에 대한 규제가 강화됨에 따라 연료의 효율을 높이기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 차량에서의 연료 펌프 시스템은 엔진 최대 출력에 필요한 유량을 연료 펌프가 송출한 후 남는 유량은 다시 연료 탱크로 회수하는 방식을 사용하고 있다. 이 때문에 연료 펌프에서 엔진이 필요로 하는 유량만을 보내주도록 제어한다면 연료 펌프 모터의 부하를 경감시켜 자동차의 연비를 개선할 수 있다.

이와 같이 에너지 효율을 개선하기 위하여 최근 검토되고 있는 방식으로는 연료 배관 내부의 압력을 제어하는 방식이다.¹⁾ 엔진이 많은 연료를 소비할

경우에는 배관 내부의 압력이 낮아지므로 목표 압력을 유지하기 위하여 BLDC 모터의 회전 속도를 증가시키고, 엔진이 적은 유량을 소비할 경우에는 배관 내부의 압력이 올라가므로 BLDC 모터의 회전 속도를 감소시키도록 제어함으로써 엔진이 필요로 하는 유량을 실시간으로 공급한다.

또한 자동차에 사용하는 모터에 대하여도 효율을 향상시키기 위한 노력이 이루어지고 있다. 연료 펌프의 경우에도 모터의 효율을 향상시키기 위하여 기존의 브러시형 DC 모터에서 BLDC 모터로 변경이 진행되고 있다.²⁾

BLDC 모터에서는 회전자의 위치 정보가 필요하므로 홀(Hall)센서를 이용하여 위치 정보를 검출한다. 회전자 위치 검출 센서는 모터의 가격 및 크기를 증가시키고 주변 온도나 습도 등 사용 환경에 제한

*Corresponding author, E-mail: yoon3m@kongju.ac.kr

을 받으며, 특히 연료 펌프와 같이 액중에서 작동되는 모터에는 적용하기 어렵다. 따라서 연료 펌프용 BLDC 모터는 센서리스 방식으로 제어하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 안정적인 기동 방법과 센서리스 구동에 대한 연구가 필요하다.

현재 널리 사용되는 초기 기동 방법은 어느 여자상에 전압을 인가하여 회전자를 정해진 위치로 강제 정렬시키고 이 위치로부터 인버터를 구동하여 모터를 기동하는 방법이다. 그러나 이 방법에서는 모터 부하 또는 인가 전압의 크기 등에 따라 회전자를 강제 정렬하는데 필요한 시간이 달라진다. 자동차 연료 펌프용 BLDC 모터의 경우에는 차량의 전압 변동과 연료의 온도에 따른 점도 변화로 기동할 때마다 부하의 크기가 달라지므로 기동에 실패할 위험성이 높아진다. 이 문제를 개선하기 위하여 본 논문에서는 테스트 전압 펄스를 이용한 초기 회전자 위치 검출 방식을 사용하고자 한다.

현재 BLDC 모터의 센서리스 제어에서 회전자의 위치 정보를 얻기 위하여 일반적으로 선호되는 방법은 역기전력 검출 방법이다. 전기자의 역기전력은 모터의 회전 속도에 비례하므로 BLDC 모터가 상당히 높은 속도에 도달해야만 위치 검출에 필요한 정도의 역기전력 파형을 얻을 수 있다. 이를 위하여 초기 위치 검출 후 강제적으로 모터를 가속시키는데, 만약 초기 기동에 실패하게 되면 차량 엔진의 시동성 문제가 발생하므로 연료 펌프용 BLDC 모터의 센서리스 제어에서는 안정적인 기동 특성이 매우 중요하다.

본 논문에서는 연료 펌프용 BLDC 모터의 센서리스 모드 제어를 수행하고 이를 자동차 연료 펌프에 안정적으로 적용할 수 있음을 보였다.

2. 센서리스 기동 및 연료 압력 제어

2.1 회전자의 초기 위치 검출

3상 BLDC 모터의 각 상에 대한 전압 방정식은 식 (1)과 같다. 모터가 정지 상태에서는 역기전력을 발생하지 않으므로 식 (1)에서 전류를 구하면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$v_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a$$

Fig. 1 Current response according to the change of inductance

Table 1 Definition of currents for six commutation voltages

정류 방법	전류
AB	i_1^+
BA	i_1^-
CA	i_2^+
AC	i_2^-
BC	i_3^+
CB	i_3^-

$$v_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (1)$$

$$v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c$$

$$i = \frac{v}{R} [1 - e^{-\frac{R}{L}t}] \quad (2)$$

그런데, 고정자 권선의 인덕턴스는 회전자 위치에 따라 달라지므로³⁾ 고정자 권선에 일정한 전압 펄스를 인가하더라도 회전자의 위치에 따라 전류 응답이 달라지게 된다. Fig. 1은 인덕턴스의 변화에 따른 전류 증가 곡선을 나타낸 것이며, 회전자 위치 판별을 위한 3쌍의 전류를 Table 1과 같이 정의하고 여기에 6개의 여자상에 해당하는 전압 펄스를 인가한 후 일정 시간 후에 전류 응답을 측정하여 Tabel 2와 같이 회전자의 초기 위치를 판별할 수 있다.⁴⁾

2.2 초기 강제 구동

BLDC 모터의 초기 회전자 위치를 검출한 후에는 센서리스 모드로 진입하기 위한 역기전력을 검출하기 위하여 개루프 방식으로 모터를 가속한다. 이때

Table 2 Polarity of $\Delta\Delta i$ on the rotor position

회전자 위치	$\Delta i_1 - \Delta i_2$	$\Delta i_2 - \Delta i_3$	$\Delta i_3 - \Delta i_1$
	$\Delta \Delta i_1$	$\Delta \Delta i_2$	$\Delta \Delta i_3$
30° ~ 90°	+	+	-
90° ~ 150°	+	-	-
150° ~ 210°	+	-	+
210° ~ 270°	-	-	+
270° ~ 330°	-	+	+
330° ~ 390°	-	+	-

일반적으로 선호하는 방식은 역기전력을 확실하게 검출할 수 있는 속도까지 가속하여 전동기가 이 속도를 넘으면 센서리스 모드로 전환하는 것이다.⁵⁾

그러나 이러한 방법에서는 모터를 무조건 충분한 속도까지 가속해야 하므로 초기 구동에서부터 센서리스 모드로 전환되기까지의 시간이 길어지게 되며, 또한 모터의 상황에 따라 실제로 역기전력이 정확히 검출될 것인지 확인하기 어렵다.

본 논문에서는 위와 같은 문제점을 개선하기 위하여 강제 구동시 실시간으로 역기전력 파형을 검출하여 역기전력에 의한 ZCP(Zero Crossing Point) 인터럽트가 전동기의 1/2회전에 해당하는 3회 이상 연속으로 발생하게 되면 역기전력이 충분히 검출되고 있다고 판단하여 센서리스 모드로 전환하는 방식을 적용하였다.

Fig. 2 Flow chart of BLDC motor starting

2.3 연료 펌프용 BLDC 모터의 PI 압력 제어

연료 펌프용 모터의 소비 전류는 연료 압력과 엔진의 최대 연료소비량으로 결정된다. 그러나 엔진에 공급된 최대 유량의 대부분은 실제로 엔진에서

Fig. 3 Control block diagram of BLDC motor for fuel system

소비되지 않고 남게 되어 연료 탱크로 다시 회수된다. 예를 들어 저속으로 운행하는 일반적인 시내 주행의 경우에는 아주 일부의 연료만 엔진에서 소비되고 대부분의 연료는 연료 탱크 내부로 회수되므로 연료 펌프의 에너지 손실이 크다.

이상적인 연료 공급 시스템은 엔진 및 차량의 운전 조건에 따라 연료 압력 및 유량을 가변하여 연료 펌프의 출력을 제어하는 방식이다. 그러나, 실제로 유량을 계측하여 제어하는 것은 매우 어려우므로 여기서는 연료의 압력을 제어하여 결과적으로 유량이 제어되도록 하였다.

Fig. 3은 BLDC 모터를 사용한 연료 공급 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 엔진 ECU로부터 목표 연료 압력을 지령받고 배관의 실제 압력을 측정하여 PI 제어기로 목표 압력을 추종하도록 제어한다. 제어기와 엔진 ECU와의 통신은 CAN 통신 방식을 사용하였다.

3. 실험 및 검토

3.1 실험 장치

연료 펌프용 BLDC 모터의 센서리스 제어를 위한 하드웨어는 Fig. 4와 같은데, 이는 크게 BLDC 모터의 구동회로, CAN 통신회로, 압력센서 구동회로의 3부분으로 구성된다. 컨트롤러의 MCU로는 8비트 ATmega32M1을 사용하였으며 CAN 통신 드라이버 소자는 MCP2521을 사용하였다.

실험 장치는 실제 차량과 동일한 조건에서 평가하기 위하여 Fig. 5 및 Fig. 6과 같이 구성하였다. 실제 차량의 ECU에 해당하는 모니터 보드를 사용하여 목표 연료 압력을 컨트롤러에 지령하며, 컨트롤

Fig. 4 Hardware block diagram of BLDC motor controller for fuel pump

Fig. 5 Layout of test equipment

Fig. 6 Test equipment

Fig. 7 Voltage waveform of sensorless drive

Fig. 8 Phase current of six pulses to detect rotor position

Fig. 9 Phase current of rotor position detection to remove noise effect

러는 BLDC 모터의 센서리스 제어를 수행하면서 배관의 실제 압력과 모터의 상태 정보를 모니터 보드로 전송한다. 엔진이 사용하는 유량에 따른 모터의 부하를 유량 조절기로 가변하면서 목표 연료 압력을 잘 추종하는지 실험하였다.

3.2 실험 결과

실험은 회전자의 초기 위치 검출 성능, 강제 구동에서 센서리스 모드로 전환되는 시간, 센서리스 제어가 수행되는 속도 범위, 목표 연료 압력에 대한 응

답 특성, 부하 변동에 따른 응답 특성 등으로 나누어 실시하였다.

Fig. 7은 회전자의 초기 위치 검출과 강제 구동, 센서리스 모드로 진입하는 과정의 전체 파형을 나타낸다. 회전자의 초기 위치 검출이 문제없이 수행되며, 약 120ms의 강제 구동 과정을 거쳐서 안정적으로 센서리스 모드로 전환되는 것을 보여준다.

Fig. 8은 회전자 초기 위치 검출을 위한 6개의 테스트 펄스에 대한 전류 응답 파형이다. Fig. 9에는 회전자 초기 위치 검출 과정에서 전류의 노이즈를 제

(a) In case of duty ratio 16%

(b) In case of duty ratio 100%

Fig. 10 Back EMF waveform according to duty ratio

거하기 위하여 각 전압 펄스를 4번씩 반복적으로 인가하여 측정된 전류 파형을 나타냈으며, 소프트웨어로 이 전류를 평균 처리하였다.

Fig. 10은 듀티비(duty ratio)에 따른 역기전력 파형을 나타낸 것이며, 안정적인 센서리스 구동을 할 수 있는 듀티비의 영역은 16%~100%로서 최저 969RPM까지 역기전력 파형이 검출되어 센서리스 구동에 문제가 없음을 알 수 있다. 연료 펌프의 경우 터빈 방식의 펌프를 사용하며 연료를 송출하기 위

한 최저의 회전수가 2000RPM이므로 이와 같이 역기전력 검출을 통한 센서리스 운전 방식은 자동차의 연료 펌프에 문제없이 적용할 수 있다.

Fig. 11은 목표 압력에 대한 응답 특성을 나타낸 것으로서 연료 펌프가 목표 압력을 잘 추종하며 제어되는 것을 볼 수 있다. 자동차 연료 펌프의 제어 범위가 250~500kPa임을 고려하여 여기서는 목표 연료 압력을 300kPa에서부터 100kPa씩 증가 또는 감소시켰다. 응답 특성은 모터 부하인 유량에 따라 달

Fig. 11 Response characteristics for target pressure

라지므로 송출 유량은 엔진 최대 출력시 필요 유량인 190L/h가 흐르는 조건에서 실험하였다.

Fig. 12는 일정 목표 연료 압력에서 모터의 부하인 유량을 변동시킨 경우의 과도 응답 특성을 측정한 실험 결과이다. 목표 연료 압력을 500kPa로 일정하게 유지하고 유량을 100L/h에서 190L/h로 증가시켰을 때의 연료 압력 응답 특성과 이를 다시 190L/h에서 100L/h로 감소시켰을 때의 연료 압력 응답 특성을 측정하였다. 부하 변동에 대하여 연료 압력이 잠시 흔들리지만 약 300ms 후에는 목표 압력으로 안정되게 복귀되는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 자동차 연료펌프용으로 사용하는 BLDC 모터의 센서리스 운전 성능을 개선하기 위한 기술을 개발하였다. BLDC 모터 센서리스 운전의 기동 특성을 개선하기 위하여 6개의 테스트 전압 펄스를 인가하여 정해진 시간 후에 측정된 전류로 회전자의 초기 위치를 검출하였고, 이로부터 지정된 시퀀스로 3상 인버터를 구동하여 BLDC 모터를 가속하면서 역기전력 파형을 검출하여 센서리스 모드로 진입이 가능한지 여부를 판단하였다. 이렇게 하여 센서리스 모드로 진입하면 목표 연료 압력에 따라 연료 펌프를 제어하기 위하여 BLDC 모터의 속도를 제어하였다.

자동차 연료 펌프의 유량을 제어하는 방식은 ECU로부터 지령받은 목표 압력을 추종하도록 PI 제어기로 구현하였으며, 실험 결과 연료 펌프의 압력 및 유량 변동에 대하여 응답 특성이 우수함을 확인하였다. 이를 실제 자동차 연료 펌프와 동일한 조건을 갖는 모의 실험장치에 적용하여 연료 펌프가 요구하는 250~550kPa의 압력 범위에서 안정적으로 제어가 수행되는 것을 확인하였다.

제어기는 저가형의 8비트 마이크로컨트롤러를 사용하여 구현하고 제어 프로그램은 C언어를 사용하여 작성하였으며, 나머지 제어회로에도 범용한 부품들을 사용하여 최소의 비용으로 컴팩트하게 구성함으로써 본 연구 결과가 실제 자동차 연료 펌프에 충분히 적용될 수 있다는 것을 보였다.

References

- 1) P. S. Choi, D. M. Ryoo, B. Y. Ryu, Y. D. Lee and J. W. Jang, "A Variable Fuel Pressure System Development for Improvement of Fuel Efficiency and Performance of GDI Engine," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.939-943, 2011.
- 2) S. H. Lee, S. B. Lee and C. H. Park, "A Study on the Signal Processing Method for the Hall Sensorless Position Control of ETC Control System Using a BLDC Motor," Trans-

(a) In case of increment (100L/h → 190L/h)

(b) In case of decrement (190L/h → 100L/h)

Fig. 12 Response characteristics of pressure according to flow rate

actions of KSAE, Vol.16, No.5, pp.92-99, 2008.

- 3) W. J. Lee and S. K. Sul, "A New Starting Method of Brushless DC Motor without Position Sensor," KIPE Power Electronics Annual Conference, pp.646-650, 2004.
- 4) G. H. Jang, J. H. Park and J. H. Chang, "Position Detection and Start-up Algorithm of a Rotor in

a Sensorless BLDC Motor Utilising Inductance Variation," IEEE Proc. Electric Power Application, Vol.149, No.2, pp.137-142, 2002.

- 5) S. Y. Kim, T. Q. Vinh, T. W. Chun, H. G. Kim and E. C. Nho, "Sensorless Control Method of BLDC for Fuel Pump," KIPE Power Electronics Annual Conference, pp.672-674, 2009.