

LPG 연료펌프 구동용 BLDC모터 제어기 개발

하근수*, 정종기*, 류세현*, 이성호*, 손진우**
 *전자부품연구원 정밀기기연구팀, **충원기화기공업(주) 기술연구소

A study on the BLDC Motor Controller providing fuels for a tank in LPG vehicles

Keun-Soo Ha, Joong-Ki Chung, Se-Hyun Rhyu, Seong-Ho Lee, Jin-Woo Son

Abstract - 자동차 산업의 활성화로 인하여 차량의 연료 소비의 고효율화 및 구동모터의 고정밀 설계 기술의 향상이 대두되고 있는 실정이다. 특히, LPG 차량의 연료 펌프 모터의 고속화, 저진동, 저소음화의 추세로 인하여 기존의 Brush타입의 DC모터를 대체하기 위한 Brushless DC 모터의 개발이 증대되고 있다.

본 논문에서는 이러한 Brushless DC모터의 고정밀 속도제어 및 빠른 응답 특성을 가지는 제어기를 개발하였으며, 회전자와 위치를 파악하기 위하여 역기전력을 이용한 센서리스형 제어기를 개발하였다. 본 논문에서 개발한 제어기는 가변속도제어범위를 가지며, 2000rpm에서 정격 속도를 가진다.

제어기의 성능 검증을 위하여 정격 속도에서의 단위 스텝 응답 특성 실험을 하였으며, 각각의 계인 설정에 따른 제어 성능 실험을 하였다.

1. 서 론

차량을 구동하기 위해서는 적절한 양의 연료를 엔진에 공급하여야 한다. 종래의 가솔린 차량은 그림 1과 같이 엔진에 연료를 공급하기 위하여 DC motor를 이용한 펌프를 사용하였다. 공급된 연료는 엔진에 연소하는데 사용되며, 연소되지 못한 연료는 피드백되어 되돌아온다. 피드백된 연료는 연료 탱크 내의 온도를 상승시키는 원인이 된다. 또한, DC motor는 브러시-정류자의 구조를 가져 마찰에 의한 추가적인 온도 상승이 일어난다. 그러나, 가솔린 연료의 특성상 상기에 의한 온도 상승은 문제되지 않는다. 따라서, 가솔린 차량의 연료 펌프는 항상 정격 출력이 되도록 작동된다. 즉, 일련의 제어회로 없이 차량 시동시 배터리에 연결되어, 시동과 동시에 일정한 속도로 구동된다.

Gas 연료가 사용되는 차량의 경우 연료의 특성상 종래의 DC motor를 사용할 때 야기되는 탱크 내의 온도 상승은 탱크 내 연료압을 상승시켜 안전성이 문제되며, 펌프에 작용하는 부하를 높여 소비 전류를 증가시키는 단점이 있다. 또한, DC motor의 브러시에 사용되는 카본은 특성상 액상의 gas 연료에서 용해되므로 사용하기 힘들다. 이를 극복하기 위해 BLDC Motor를 사용하는데, 종래와 같이 배터리에 일련의 제어회로 없이 직접 연결되어 사용할 수 없다.

이에 본 논문에서는 고압의 Gas 연료로 인한 BLDC Motor의 고부하 조건에서의 초기 시동성을 확보하고, 가변 속도 제어 기법을 이용하여 tank 내부 온도 및 압력의 추가 상승을 억제하여 Gas 연료 tank의 안전성을 향상시키기 위한 센서리스형 제어기를 개발하였으며, 성능 검증을 위하여 정격 속도에서의 단위 스텝 응답 특성 실험을 하였으며, 각각의 계인 설정에 따른 제어 성능 실험을 하였다.

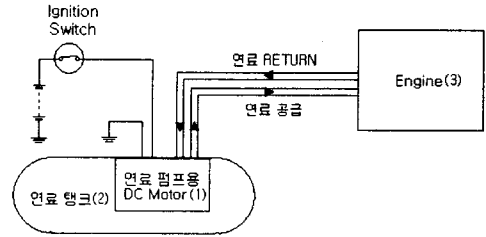


그림 1. 기존의 연료공급 시스템

2. 본 론

2.1 제어기 구성

본 논문에서 구성된 제어기는 속도 기준신호와 속도 피드백 신호를 받아들여 PI 제어를 실행하는 PIC 컨트롤러, PIC 컨트롤러의 제어 신호를 받아 구동 드라이버에 PWM 신호를 주는 동시에 전류 검출 신호를 받아 전류 제한 신호를 발생시키는 PWM 신호 발생 디바이스, PWM 신호를 받아 인버터에 120° 통전 방식의 3상 구동 로직을 발생시키며, Zero-Crossing되는 역기전력 파형을 이용한 속도피드백 신호를 발생시켜주는 Sensorless BLDC motor 드라이버 디바이스, 3상 구동 로직을 이용하여 3상 BLDC Motor에 구동 전류를 흘려 보내주는 인버터, 인버터에 공급되는 주전원을 제어하는 N-Channel의 MOSFET, 전원 필터, 스위칭 구동 전원을 위한 Charging pump, Gate 드라이버 및 전류 검출 소자로 구성되었다.

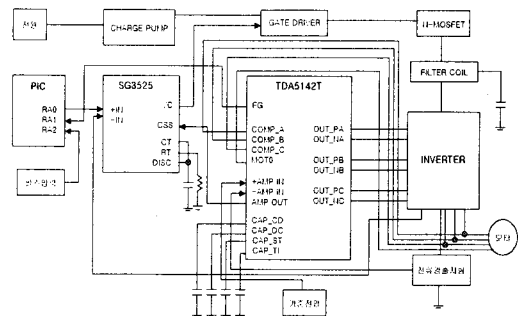


그림 2. 제어기 Block Diagram

본 논문에서 구성한 제어기의 블록도는 그림 2와 같으며, SG3525(Pulse Width Modulation Circuits), TDA5142T(BLDC Motor Drive Circuit), PIC16F84(One-Chip Microcontroller) 등으로 구성되었다.

사용되는 전원(Battery)의 경우, 정상상태의 경우 13.5V를 유지하며, 방전이 이루어지거나 날씨가 급격하게 저하될 경우 8.5V의 전원 전압레벨을 가지며, 센서리스 구동을 위한 초기 기동은 TDA5142T 주변에 설치된 4개의 콘덴서로 기동이 이루어지며, 기동이 시작되는 전압 레벨은 약 0.6V이다.

TDA5142T의 경우, BLDC 모터의 역기전압의 Zero-Crossing점을 이용하여 모터의 속도 피드백 신호(FG)를 만들어 PIC16F84에 보내주며, 0.15Ω (1/8W)의 저항을 병렬로 연결하여 권선에 흐르는 전류를 검출한다. 검출된 저항은 LPF를 거쳐 TDA5142T의 인가되는 기준전압과 비교되어 전류를 제한하며, 본문에서 구성되어진 전류 제한치는 약 7.5A이다.

한편, N-Channel MOSFET의 스위칭을 위하여 SG3525에서 발생하는 PWM신호(약 65kHz)를 이용하여 게이팅을 위한 Charging Pump회로를 구성하였으며, 이는 인버터 상단에 있는 N-Channel MOSFET와 고주파 제거용 필터를 거쳐 BLDC 모터의 속도제어를 위한 PWM 신호 듀티폭을 결정한다.

2.2 제어 알고리즘

본 논문은 우선 BLDC motor 회전자속의 기초 정보가 되는 엔진에 필요한 연료량에 따른 속도 기준 명령치를 ECU로부터 Microprocessor에서 받아들이는다.

우선 Microprocessor는 시동상태인지를 판별하여 초기시동 알고리즘을 적용하며, 초기구동이 이루어질 경우, Sensorless BLDC motor driver device에서 나오는 속도 피드백을 받아들여 PI 제어를 실행한다.

본 논문에서 사용되는 BLDC motor를 Gas 연료 탱크 내에 설치되는 것으로 고압의 연료로 인해 고부하가 적용된다. 초기 시동시 PI제어기는 특성상 P 성분에 영향을 받아 초기의 제어신호는 거의 최대 출력을 생성한다. 이로 인해 초기 시동시 모터 회로에 과전류가 흐르게 된다. 이를 방지하기 위해 초기 시동에는 약 70%의 출력을 일정 기간(약 500ms) 발생하여 원활한 시동성을 확보하는 동시에 과전류를 방지한다.

본 논문에서 BLDC motor의 open-loop 전달함수는 pole이 1개이므로, 제어기로는 1개의 pole과 1개의 zero를 가지는 PI 제어기를 선택하였다. 또한, 기준속도가 변하면 고정된 PI 제어기로 변화에 적응하지 못하므로 Gain scheduling을 이용한 Adaptive-PI 제어기를 구성하였다.

그림 3은 전체의 제어 알고리즘을 나타내며, 그림 4는 Adaptive-PI제어기를 블록도를 나타내고 있다.

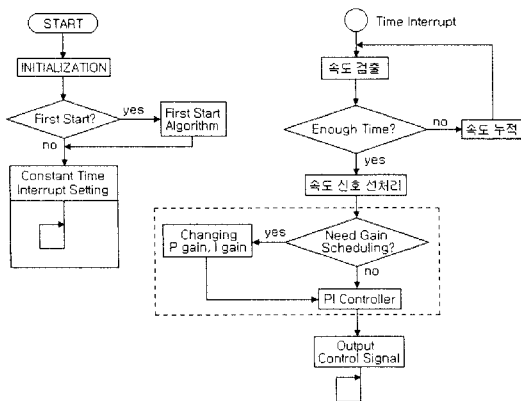


그림 3. 제어알고리즘 Flow Chart

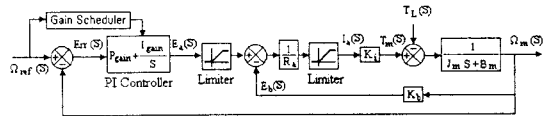


그림 4. PI 제어기의 Black Diagram

2.3 실험결과

표 1은 실험에서 사용된 BLDC 모터의 사양이다.

변수	단위	비고	변수	단위	비고
R_a	(Ω)	저항	T_m	(N-m)	모터 기동 토크
L_a	(H)	코일	T_L	(N-m)	펌프 부하 토크
E_a	(V)	기전력	J_m	(N-m/rad/s ²)	Rotor Inertia
E_b	(V)	역기전력	B_m	(N-m/rad/s)	Viscous-friction Coefficient
I_a	(A)	모터 전류	K_t	(N-m/A)	Torque Constant
ω_m	(rad/s)	모터 속도	K_b	(V/rad/sec)	Back-EMF Constant

표 1. BLDC모터의 사양

그림 5는 무부하시와 정격부하시에 초기구동 알고리즘을 적용할 때와 하지 않았을 때 정격 속도의 스텝 응답을 나타내고 있다. 여기서, 초기구동은 70% duty 출력을 500(ms)동안 출력하며, P 이득은 0.5, I 이득은 0.1의 값을 가진다.

그림에서 보듯이 초기 구동 알고리즘을 추가함에 따라 무부하 및 정격부하에서의 초기 시동성을 원활하게 하며, 초기에 BLDC motor 제어기에 흐르는 과전류를 방지한다.

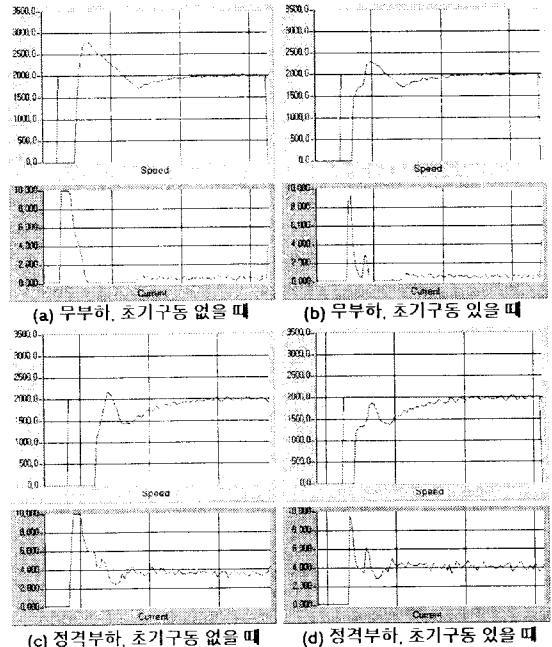


그림 5 정격 속도의 스텝 응답

그림 6은 정격 부하 조건에서 정격속도 및 고속, 저속 상태일 때 P 이득과 I 이득을 변경시켰을 때의 제어성

능 실험을 나타내고 있다. 여기서 가로축은 P 이득이며, 세로축은 I 이득이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 아경산업자동화연구소편저, "서보모터제어이론과실습", 성안당, pp.210~pp.221, 1997
- [2] Datasheet, "Integrated Circuits", Philips, 1994
- [3] TJE Miller & J.R Hendershot Jr, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Oxford, 1994
- [4] 박홍배 & 이균경 공역, "최신제어시스템(Dorf)", 반도출판사, 1993
- [5] 과학기술정보연구소, "제어용인버터실무기술및응용", STII910309, 1991

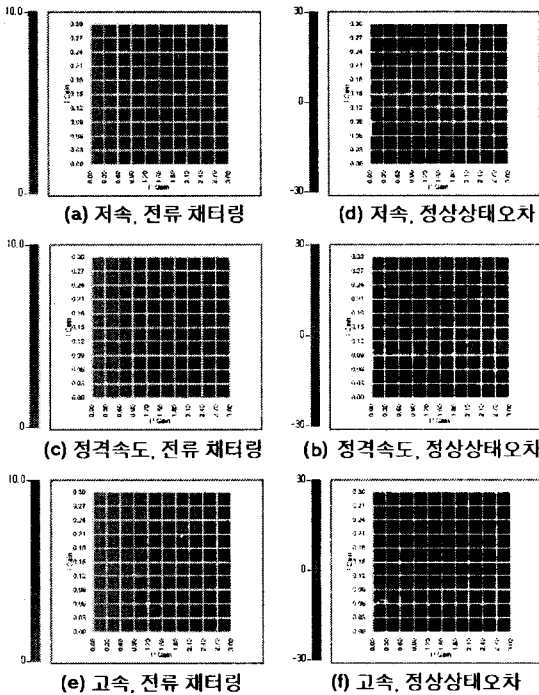


그림 6 계인 및 I 계인의 변화에 따른 제어 성능

본 논문은 창원기화기공업(주)의 재원으로 전자부품연구원(KETI)에서 受託課題로 창원기화기공업(주)와 공동 수행하였으며, 과제명은 "LPG 연료펌프 구동용 BLDC 모터 및 센서리스형 Controller 개발"이다.

그림 6과 같이 고압의 gas 연료에 의한 고부하 환경 하에서 작동하는 BLDC motor는 기준속도의 변화시 P gain 및 I gain의 조절이 필요한 것을 알 수 있다.

정상상태오차(Steady State Error)를 살펴보면 이는 I gain이 지배적인 영향을 가진다. 0.1을 기준으로 안정한 영역에 들어간다. P gain의 값이 증가할수록 정상상태오차가 없어지는 영역은 확대됨을 알 수 있다.

Current chattering을 살펴보면 P gain에만 영향을 받음을 알 수 있다. P gain이 적을수록 떨림 현상도 줄어든다.

결과를 살펴보면 정격속도에서, P 계인은 0.5, I 계인은 0.1의 값에서 최적의 제어 성능을 가지며, 이 때의 Rising time은 444[ms]이며, 정상상태 오차는 -1.38rpm (=0.05%)이다.

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 가솔린 펌프에서 사용되는 DC motor가 Gas 연료에 적용될 수 없는 단점을 보완하여 BLDC motor를 사용하는데 있어서 원활한 제어를 이루고자 하였다. Gas 연료로 인한 고부하 조건에서 초기 시동 알고리즘을 통해 안정적인 초기 시동을 하며, Gas 연료 tank의 안전도를 향상시키기 위해 엔진의 연료 요구량에 adaptive-PI 가변 속도 제어를 통해 연료의 피드백량을 최소화하고, Pump의 효율을 증가시켜 추가적인 에너지 낭비를 억제하여 Gas 연료 tank 내의 온도 및 압력 상승을 최소화하였다.