

차량용 전자제어식 주차 브레이크 시스템을 위한 고장 안전 기법

정한별*, 이충우**, 이두호*, 정정주***, 손영섭****, 윤팔주****
 한양대학교 전기공학과*, 한양대학교 전자통신전파공학과**, 한양대학교 전기제어생체공학부***, (주) 만도****

Fail-safe logic for EPB (Electric Parking Brake) system

Han Byul Chung*, Choong Woo Lee**, Doo Ho Lee*, Chung Choo Chung***, Young Seop Son****, Paljoo Yoon****
 Division of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University*, **, Division of Electrical and Biomedical Engineering,
 Hanyang University***, MANDO Corporation Central R&D Center****

Abstract - 본 논문에서는 차량용 전자제어식 주차 브레이크(Electric Parking Brake, EPB) 시스템의 고장 허용 제어(fault tolerant control)를 위한 고장 안전 기법(fail-safe logic)을 제안한다. 고장 안전 기법의 구현을 위하여 EPB 구동 모터에 흐르는 전류 리플을 측정하여 센서리스 위치 추정을 한다. 추정값과 홀 센서의 출력을 비교하여 잔차(residual)를 발생하고, 이를 이용하여 시스템 내부의 고장을 진단하고 고장 안전 기법을 통하여 전체 시스템의 오작동을 방지한다. 시스템 오작동을 방지하기 위한 고장 안전 기법에 대하여 정의하고 모의실험을 통하여 내부 시스템의 고장이 발생 시 이 기법이 고장을 진단하고 시스템을 안전하게 운영할 수 있음을 확인하였다.

여기에서 v_a 는 모터의 전압, i_a 는 모터에 흐르는 전류, e 는 역기전력, R_a 는 모터의 저항, L_a 는 모터의 인덕턴스, K_e 는 역기전력 상수, ω_r 은 모터의 회전 속도, T_e 는 토크 값을 의미한다. 그리고 ϕ_e 는 전체 excitation flux, ϕ_{pm} 은 평균 excitation flux, ϕ_{osc} 는 excitation flux의 진동 성분, N_T 는 회전자의 slot 수를 의미한다.

(1)-(4) 식을 정리하여 모터에 흐르는 전류 식을 유도하면 다음과 같다. 이 때, 전류의 대략적인 경향을 살펴보기 위하여 모터의 회전 속도는 정수로 가정하였다.

1. 서 론

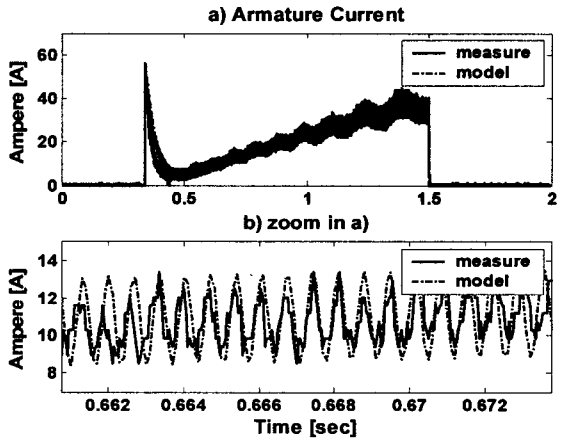
$$i_{aDC} = \frac{V_a - \omega_r K_e \phi_{pm}}{R_a} \tag{5}$$

전자제어식 주차 브레이크(Electric Parking Brake, EPB) 시스템은 차량 시스템의 안전성과 편의성을 향상시키기 위해서 최근에 도입되고 있다[1]. 차량의 전자제어 기술은 내부 요소의 고장으로 인한 영향이 인명 피해까지 이어질 수 있는 분야로서 고장 안전 기법(fail-safe logic)의 중요성이 높아지고 있다[2]. 최근 고장 안전 기법을 적용하기 위한 다양한 고장 진단(fault diagnosis) 기술의 연구가 이루어지고 있다. Frank 등은 일반적인 시스템에 모델 기반의 관측기를 적용한 고장 진단 기술의 강인성에 대하여 연구하였다[3]. 또한, 비선형 시스템에 대한 고장 진단의 정확성을 높이기 위하여 유전 알고리즘, 퍼지 이론 등을 적용한 연구가 진행되고 있다[4][5]. 하지만 이러한 기법은 고장 진단의 정확성에 비하여 연산 과정이 복잡하여 저가의 차량용 ECU(Electric Control Unit)에서 구현하기에는 어려움이 따른다[6]. 최근 Consoli 등은 DC 모터 회전자의 slot에 의하여 발생하는 주기적인 전류의 리플을 이용한 센서리스 위치 제어 기법을 제안하였다[6]. 이 기법은 기존의 상태 관측 기법보다 간단한 연산 과정을 통하여 기존의 기법과 동일한 수준의 위치 제어 결과를 얻을 수 있었다. 또한 모터 상수의 변화에 영향을 적게 받으며, 연산 과정의 단순함으로 인하여 차량용 ECU에 대한 적용이 용이하였다.

$$i_{aAC} = \frac{-\omega_r K_e \phi_{osc}}{R_a + L_a^2 N_T^2 \omega_r^2} (R_a \sin(N_T \omega_r t) - L_a N_T \omega_r \cos(N_T \omega_r t)) \tag{6}$$

수식 (5)는 전류의 DC 성분을, 수식 (6)은 전류의 AC 성분을 표현하고 있다.

본 논문은 [6]에서 제안한 위치 추정 기법을 이용하여 EPB 시스템에서 발생할 수 있는 고장을 진단하고, 전체 시스템이 안전하게 동작할 수 있는 고장 안전 기법을 제안한다. 본 연구에서 사용하는 기존의 EPB는 홀 센서와 전류 센서를 이용하여 와이어의 장력을 제어하고 있다. 제안된 기법은 부가적인 고장 안전 기법을 위해 전류 센서를 통하여 받아들인 전류의 리플을 이용하여 모터의 회전각을 추정한다. 이 값은 홀 센서의 출력 정보를 통해 얻어진 변위와 비교되고 그 차이를 통해 고장 발생을 진단하고 필요시 위험 신호를 발생시킨다. 모의실험을 통하여 센서와 와이어 연결에서 발생하는 고장을 빠르게 진단하고 위험 상태를 나타내는 것을 확인하였다. 본 연구 기술은 차량 시스템에 적용이 용이한 기술로서 별도의 추가 비용 없이 시스템의 안전성을 높이는 데에 기여하리라 예상된다.



〈그림 1〉 EPB 모델링 검증

그림 1은 약 12 초간 최대 전압(12 V)을 인가하였을 때 모터에 흐르는 유도 전류를 나타낸 것이다. 실험 결과와 모델링 결과는 전체적으로 유사한 형태를 보인다. 그림 1. b)는 그림 1. a)를 부분 확대한 것으로서 전류의 리플을 자세히 살펴볼 수 있다. 그림 1을 통하여 각 전류 리플의 진폭과 주기가 유사한 것을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에서는 본 논문에서 다룬 EPB 시스템의 모델링을 설명한다. 2.2절에서는 본 연구에서 다루는 기법에 대해 설명하고, 검증을 위한 모의실험 결과는 2.3절에서 다루도록 한다. 그리고 3절에서는 결론을 제시한다.

2. 본 론

2.1 EPB 시스템 모델링

EPB 시스템은 DC 모터와 기어박스, 스크류, 와이어, 홀 센서, 전류 센서 등으로 이루어졌다. Simulink와 Dymola를 이용하여 이를 모델링하였으며, 본 연구에서는 전류의 리플을 표현한 모델식을 이용하였다. EPB 모터의 모델식은 다음과 같다[6].

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e \tag{1}$$

$$e = K_e \omega_r \phi_e \tag{2}$$

$$\phi_e = \phi_{pm} + \phi_{osc} \sin(N_T \omega_r t) \tag{3}$$

$$T_e = K_e \phi_e i_a \tag{4}$$

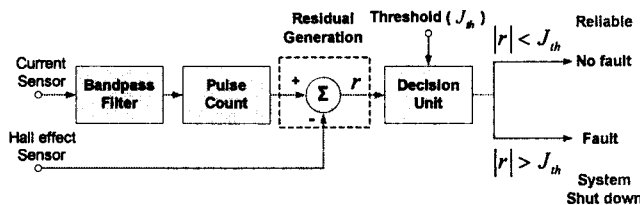
2.2 전류의 리플을 이용한 고장 안전(Fail-safe) 기법

고장 안전 기법은 자동차, 항공 분야 등에서 내부 시스템의 고장으로 인한 인명 피해를 막을 수 있는 필수적인 기술이며, 시스템의 신뢰성 및 유용성을 높일 수 있다[7]. 고장 안전 기법을 위해서는 시스템의 고장 진단 기술이 필요하며 이에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

차량 시스템의 고장 안전 기법에는 비용과 성능을 함께 고려한 모델 기반의 잔차 발생법(model-based residual generation)이 이용되고 있다. 모델 기반의 잔차 발생법은 하드웨어의 추가 없이 다수의 센서 출력을 수학적 관계를 통하여 추정, 비교하는 기법이다. 이 때 추정값과 측정값의 차를 잔차(residual, r)라고 하며, 잔차가 특정 기준값 이상이 될 때 고장을 감지하게 된다. 이 기법은 별도의 추가 비용 없이 고장을 진단할 수 있다는 장점이 있지만, 모델의 불확실성에 민감하다는 단점이 있다[3]. 이를 해결하기 위하여 강인 고장 진단 기술에 대한 연구가 활발히 진행되었다. H_∞ 이론, 비선형 적응 추정기, 퍼지 이론 등의 적용이 연구되었다[3]. 그러나 저가의 차량용 ECU에서는 이에 대한 연산의 어려움이 존재한다.

최근 DC 모터의 전류 리플을 이용한 센서리스 위치 제어 기법이 제안되었다[6]. DC 모터는 회전자의 slot 구조로 인하여 회전 시 자속의 변화가 발생되고, 유도 전류에 주기적인 리플이 발생한다. Consoli 등은 모터의 1회전 마다 발생하는 리플의 파형이 반복되는 점에 착안하여 전류 리플을 카운팅하고 이를 이용하여 회전각을 추정하는 기법을 제안하였다. 이 기법은 저가의 마이크로 컨트롤러에서도 연산할 수 있는 간단한 과정으로서 차량용 시스템에 적용하기 적합하다. 또한 수식 (6)을 통하여 알 수 있듯이, 전류의 리플 주파수는 모터의 회전속도와 slot 개수에만 영향을 받는다. 따라서 이 기법은 일반적인 모델 기반의 위치 추정에 비하여 모터 상수의 변화에 영향을 덜 받게 된다[6]. 그러므로 본 논문에서는 [6]의 방법을 이용하여 잔차를 생성하고 이를 EPB 시스템의 고장 안전 기법에 적용한다.

고장 안전 기법의 전체 블록도를 그림 2에 나타내었다.



〈그림 2〉 고장 안전 기법 블록도

EPB 시스템은 전류 센서와 홀 센서를 통하여 시스템의 상태를 파악하고 와이어의 장력을 제어한다. 전류 센서를 통하여 받아들인 전류 값은 밴드패스 필터를 통하여 전류의 DC 성분과 노이즈 성분을 제거한 리플 정보로 변환된다. 전류의 리플을 카운팅하여 계산된 위치 정보는 홀 센서의 출력을 통해 계산된 위치 정보와 비교하여 잔차를 생성한다. 그리고 이 값을 기준값(threshold, J_{th})과 비교하여 잔차의 절대값이 기준값 이상이 되는 경우, 센서의 고장을 감지하여 경고 신호를 발생하고, 그렇지 않은 경우에는 현재의 동작을 유지하게 한다.

이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$N \times \frac{1}{2N_T} = rev_{current} \quad (7)$$

$$v_{hall} \times \frac{1}{Gain_{hall}} \times ratio_{screw} \times ratio_{gear} = rev_{hall} \quad (8)$$

$$r = rev_{current} - rev_{hall} \quad (9)$$

여기에서 N 은 전류 리플의 피크 수, v_{hall} 은 홀 센서 출력 전압, $Gain_{hall}$ 은 홀 센서 변위 대비 출력 이득, $ratio_{screw}$ 는 스크류비, $ratio_{gear}$ 는 기어 비를 의미한다. 수식 (7)은 전류 센서를 통해 추정된 모터의 회전 정보를, 수식 (8)은 홀 센서 출력을 통해 추정된 모터의 회전 정보를 의미한다. 수식 (9)는 두 추정값을 통하여 잔차를 계산하는 것을 보여준다. 위의 과정을 통하여 잔차가 기준값보다 커지면 고장을 진단하여 경고 신호를 발생한다.

2.3 모의실험 결과

제안된 기법을 이용하여 모의실험을 진행하였다. 기준값은 모터의 10 회전을 의미하는 10으로 정하였고, 이는 힘의 오차가 약 20 kgf 이상 발생하는 상황을 의미한다. 고장 상황은 센서에 고장이 발생한 경우와 물리적 연결에 고장이 발생한 경우로 나누었다. 먼저 홀 센서의 고장이 발생한 경우를 가정하였다. 센서 출력에 임의의 고장 신호를 더하여 센서의 고장 상황을 만들고, 이에 따른 고장 진단 성능을 검증하였다.

그림 3. a)는 정상적인 동작을 하는 홀 센서의 출력과 고장이 발생한 홀 센서의 출력을 나타낸다. 홀 센서의 고장을 가정하기 위하여 0.4 초와 0.8 초에 +1.5 V와 -1.5 V를 각각 0.03 초 동안 정상 출력에 더하였다. 모의실험을 통하여 고장이 발생한 후 약 0.01 초가 지난 후에 경고 신호가 발생함을 확인하였다.

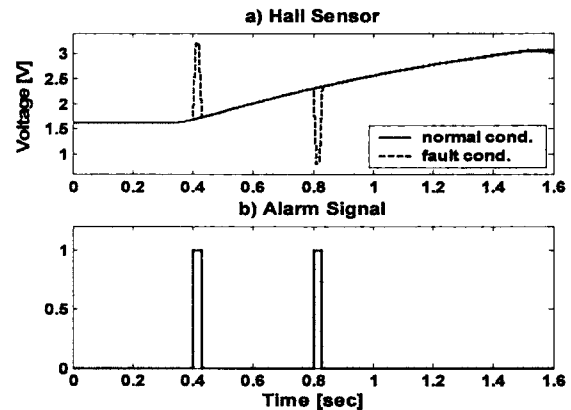
다음으로 와이어의 연결이 끊어진 상태를 가정하였다. 와이어의 연결이 끊어진 상태에서 EPB 시스템에 전원이 인가되었을 때의 모의실험 결과를 그림 4에 보였다. a)는 모터의 회전속도와 전압, b)는 홀 센서의 출력, c)는 경고 신호를 의미한다. 전원의 크기는 100 배로 스케일링 하였다. 전원은 약 0.3 초에서 1.5 초 사이에 인가되었으며, 모터는 최대 속도로 회전을 계속하였다. 홀 센서의 출력은 변화가 없으며, 경고 신호는 약 0.42 초부터 발생하였다.

센서와 와이어의 고장 상황을 가정한 모의실험을 통하여 제안된 기법은 약 0.1 초 안에 고장을 진단하고, 경고 신호를 발생하는 것을 확인하였다.

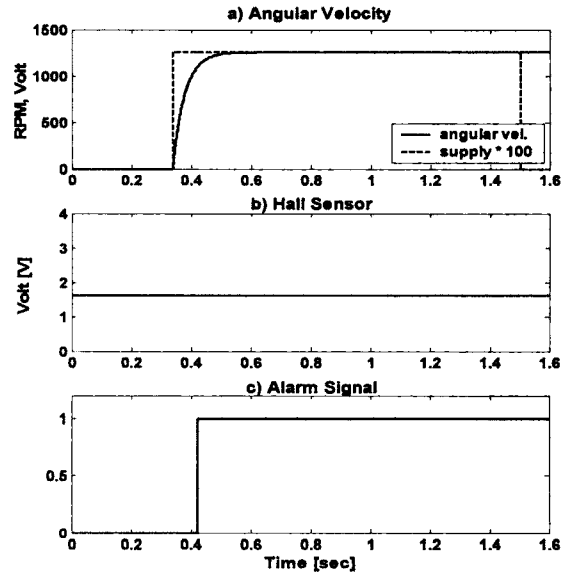
3. 결 론

본 논문은 모터에 흐르는 전류의 리플을 이용하여 EPB 시스템의 고장을 진단하고, 위험 상태를 확인할 수 있는 고장 안전 기법을 제안한다. 홀 센서와 와이어 연결 고장을 가정한 모의실험을 통하여 빠른 시간 내에 내부 시스템의 고장을 진단하고 경고 신호를 발생하는 것을 확인하였다. 본 기법은 기존의 모델 기반 고장 진단법에 비하여 간단한 알고리즘을 통하여 구

현되었으며, 모델 상수의 변화에 영향을 적게 받는 기법이다. 따라서 실제 차량용 시스템에 적용이 용이할 것이며, 별도의 추가 비용 없이 시스템의 안전성을 높이는 데에 기여하리라 예상된다. EPB 시스템의 보다 안전한 동작을 위해서는 센서의 추가를 통하여 고장 허용 제어(fault tolerant control)를 적용하는 연구 또한 진행되어야 할 것이다.



〈그림 3〉 홀 센서의 고장 신호와 경고 신호



〈그림 4〉 와이어 연결의 고장과 경고 신호

감사의 글
본 논문은 부품·소재 기술 개발 사업(과제번호: 0401-DB2-012) 지원으로 수행되었습니다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Christian Baier-Welt, "Smart actuator for Intelligent electrical parking brake system - functionality and safety, system approach," Actuator 2002.
- [2] 민경찬, "차량 주행안정성 제어시스템의 자동안전 로직," 한양대학교 대학원 석사학위논문, 2005.
- [3] P. M. Frank and X. Ding, "Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems," Journal of process control, v.7 no.6, pp.403-424, 1997.
- [4] M. M Polycarpou, A. T. Vemuri, "Learning methodology for failure detection and accommodation," IEEE control systems, v.15 no.3, pp.16-24, 1995)
- [5] R. J. Patton, J. Chen, and C. J. Lopez-Toribio, "Fuzzy observers for nonlinear dynamic systems fault diagnosis," Decision and Control, 1998. Proceedings of the 37th IEEE Conference on, 1998 v.1, pp.84-89, 1998.
- [6] A. Consoli, G. Bottiglieri, R. Letor, R. Ruggeri, A. Testa, and S. De Caro, "Sensorless position control of DC actuators for automotive applications," Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, pp.1217-1224, 2004.
- [7] Jie Chen and R. J. Patton, "Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems," Kluwer Academic Publisher, 1999.