

전기기계 브레이크가 적용된 연료전지 자동차의 회생제동 시스템의 고장해석 Analysis of Fault Diagnosis of Regenerative Braking System for Fuel Cell Vehicle with EMB System

송현우¹ · 최정훈¹ · 황성호^{1*} · 전광기² · 최성진²

H. Y. Song, J. H. Choi, S. H. Hwang, K. K. Jeon and S. J. Choi

Received: 6 Aug. 2012, Accepted: 23 Oct. 2012

Key Words : Regenerative Brake(회생제동), Transient Region Characteristic(천이구간 특성), Fault Diagnosis(고장진단), Fuel Cell Vehicle(연료전지 자동차), Electro Mechanical Brake(전자 제어식 브레이크)

Abstract: Recently, researches about the eco-friendly vehicles such as hybrid electric vehicle, fuel cell vehicle and electric vehicle have been actively carried out. The regenerative braking system is a key technology to improve the vehicle energy utilization efficiency because it transforms the kinetic energy to the electric energy through the electric motor. This new braking system requires cooperative control between electric controlled brake and regenerative brake. Therefore, it is necessary to establish fault-diagnosis and fail-safe evaluation criteria to secure reliability of the regenerative braking system. In this paper, the failure types and causes in regenerative braking system were analyzed. The transient behavior characteristics were examined based on fault-diagnosis and fail-safe upon failure of regenerative braking system.

1. 서 론

- i_{α} : battery output current, A
- E : electromotive force, V
- R_i : resistance of battery, Ω
- $P_{battery}$: require battery power, W
- $V_{battery}$: battery voltage, V
- V_{bus} : dc/dc converter bus voltage, V

1. 서 론

최근 국제 유가 상승과 환경 문제 등으로 인하여

자동차의 수요가 점점 친환경, 고효율로 옮겨가면서 차량의 효율을 높이기 위한 연구가 여러 분야에서 활발히 이루어지고 있다. 현재 하이브리드 자동차가 양산이 되고 있는 가운데 플러그인 전기자동차가 자동차 시장 틈새를 비집고 들어올 준비를 하고 있으며, 하이브리드 자동차 및 전기자동차, 연료전지 자동차 같은 친환경 자동차의 효율을 높이는 기술에 대한 연구가 진행되고 있다.⁶⁾

회생제동 시스템(Regenerative Braking System)은 제동시 차량의 운동에너지를 전기에너지로 회수하는 시스템으로, 전기에너지를 동력원으로 사용하는 자동차에서는 핵심적인 기술이다. 회생제동 시스템이 적용된 차량에서 시스템이 정상상태일 때 차량의 속도나 배터리 SOC(State of Charge), 차량의 온도 등에 따라 회생제동이 제한되는 경우가 있다. 이 때 부족한 제동력을 기계적인 브레이크로 보상해 줘야만 운전자가 요구한 제동력을 추종할 수 있게 된다.

회생제동의 제한으로 인하여 전체적인 제동력이 부족해지면 기계적인 브레이크를 직접 제어하여 제동력을 분배해 주어야 한다. 이를 위하여 EMB(Electro-Mechanical Brake) 시스템의 적용이 필요하고, 브레이크의 특수성을 고려하여 회생제동 시스템의

* Corresponding author: hsh@me.skku.ac.kr
 1 Mechanical Engineering, SungKyunKwan University, Suwon 440-746, Korea
 2 Korea Automotive Technology Institute, Cheonan 330-912 Korea
 Copyright © 2012, KSFC
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고장에 대비한 고장 해석 및 대응에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 EMB가 적용된 연료전지 자동차의 회생제동 시스템의 구현을 위한 시뮬레이터 구성과 회생제동 시스템의 성능과 안정성 확보를 위해 발생할 수 있는 고장의 종류와 원인을 분석하고, 시뮬레이션 환경에서 고장 해석에 대한 연구를 진행하였다.

2. 연료전지 차량 모델링

EMB가 적용된 연료전지 자동차의 회생제동 시스템을 구현하기 위하여 연료전지 차량의 시뮬레이터를 구성하였다.⁷⁾ 본 논문의 연구 대상인 연료전지 차량은 전륜에 인라인 모터를 사용하는 구조로 되어있고 이외에 연료전지 스택(stack)과 배터리, DC/DC컨버터 등으로 이루어져 있다.

연료전지 차량모델을 완성하기 위하여 차량을 구성하고 있는 각 주요 부품들의 모델링을 우선적으로 수행하였으며 이에 따른 각 요소들의 동력 및 신호 전달 구조에 따라 MATLAB/Simulink를 이용하여 Fig. 1과 같이 연료전지 자동차의 시뮬레이터를 구성하였다.

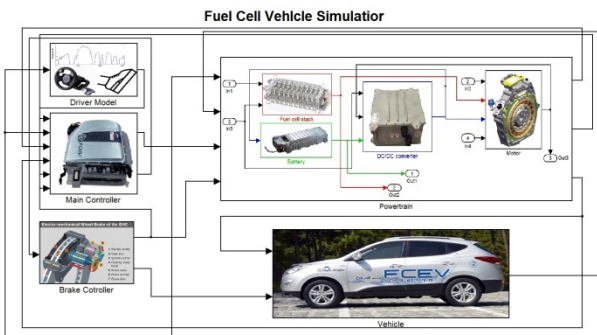


Fig. 1 Fuel cell vehicle performance simulator

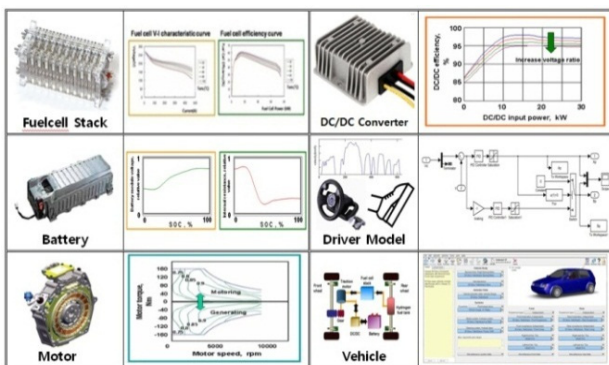


Fig. 2 Modeling of core components of fuel cell vehicle

차량에 탑재된 주요부품들은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 성능곡선, 특성 맵, 과도상태 특성 및 동역학 등을 기반으로 수행되었으며 배터리는 내부 저항의 특성에 따른 배터리 SOC모델을 사용하였다.²⁾ 차량의 주행모드는 출발, 가속, 정속 주행, 감속, 연료전지 정지 5가지 모드로 나누어 각각의 제어기를 모델링하였고, 각 모드에 따른 운전자의 요구를 반영하기 위한 운전자 모델링을 수행하였다.³⁾

2.1 연료전지 모델링

연료전지는 특성 맵을 이용하여 모델링 되었다. 요구 전력을 입력으로 받아 그에 맞는 전압과 전류를 출력한다.

2.2 모터 모델링

모터는 효율 맵과 성능 곡선을 이용하여 모델링 하였다. 속도, 연료전지 출력, 요구 운전출력, 요구 회생제동 토크를 입력으로 받아 모터의 각속도와 토크를 출력한다.

모터 토크는 구동(motoring) 모드와 발전(generating) 모드로 나누어지며, 각 모드에 따라 배터리의 충 방전이 결정된다.

2.3 배터리 모델링

배터리는 모터의 모드에 따라 충 방전이 이루어진다. 구동 모드나 외부에서 전력을 요구하는 상황에는 배터리로부터 방전이 이루어지고, 발전 모드 즉, 회생제동 모드에서는 충전이 이루어진다. 배터리 충 방전 모델링에 이용한 관계식은 다음과 같다.

$$i_{\alpha} = \frac{-E + \sqrt{E^2 - 4R_i P_{battery}}}{2R_i} \quad (\text{charge}) \quad (1)$$

$$i_{\alpha} = \frac{E + \sqrt{E^2 - 4R_i P_{battery}}}{2R_i} \quad (\text{discharge}) \quad (2)$$

2.4 DC/DC컨버터 모델링

모터를 사용하는 차량의 경우 연료전지 스택이나 배터리의 전압, 모터의 구동 전압 등이 다르기 때문에 각각의 요소들이 요구하는 전압을 맞추어 주기 위한 컨버터가 필요하다. DC/DC 컨버터는 입력된 직류 전류를 교류로 변환하여 전압을 조절한 후 다시 직류로 변화하여 출력하는 모듈이다. 방전 시에는 배

터리 전압의 입력 값이 연료전지 스택의 전압을 결정하고, 충전 시에는 연료전지 스택 전압의 입력 값이 전압을 결정하며, 변환 효율은 전압률에 따라 달라지는데 이는 충전 시와 방전 시가 각각 다르다. 충전 방전 시의 전압률 관계식은 다음과 같다.

$$\text{Voltage ratio} = \frac{V_{battery}}{V_{bus}} \text{ (charge)} \quad (3)$$

$$\text{Voltage ratio} = \frac{V_{bus}}{V_{battery}} \text{ (discharge)} \quad (4)$$

2.5 컨트롤러 모델링

페루프 시뮬레이션에서 각각의 변수들의 입력에 따라 요구 되는 출력 값의 계산이 필요하며 연료전지 차량의 경우 입력 값으로 차량의 현재 속도, 요구 속도, 액셀 및 브레이크 페달의 위치, 배터리 SOC, 연료전지 스택의 전압, 모터 각속도 값 등을 받아 연료전지 파워, 연료전지 요구 파워, 배터리 요구 파워, 회생제동 요구 파워, 연료전지 작동 여부, 차량 주행 모드, 요구 제동력, 배터리 전압 등의 출력 값을 내어주는 게 필요하다. 따라서 차량의 5가지 주행모드, 출발, 가속, 정속 주행, 감속, 연료전지 정지 각각의 상황에 따라 컨트롤러의 내부 알고리즘을 통하여 각 변수들의 값이 결정된다.

2.6 시뮬레이터 연동

차량의 동적 거동 해석은 Carsim을 이용하였다. Simulink의 운전자 모델에서 출력되는 액셀, 브레이크 및 조향 값에 따라 컨트롤러 모델에서 연료전지 출력을 결정하면 모터에서 구동력이 출력된다. 이 구동력은 Carsim내의 차량 모델로 전달되어 시뮬레이션이 수행되어 차량의 동적 거동 해석이 가능해진다. 차량 동적 특성에 따른 차량 속도, 요 값 등의 변수를 다시 Simulink 컨트롤러 모델로 전달하여 알맞은 출력 값으로 변환 후 차량 모델로 전달하는 절차가 순환적으로 이루어진다.

3. 회생제동 시스템의 고장분석

3.1 EMB 시스템과 천이구간

회생제동 시스템이 정상 상태일 때 차량의 속도나 배터리 SOC, 차량의 안정성 등에 의해 회생제동은 제한된다. 이 때 부족한 제동력을 기계적인 브레이크

시스템이 보상하는 과정에서 응답속도나 특성의 차이에 따라 차량의 감속도가 변하게 된다. 이는 곧 제동 이질감으로 운전자나 탑승자가 느끼게 되는데 이 구간을 천이구간이라 말한다.

부족해진 제동력을 보상하기 위해서는 브레이크 상호간에 협조제어가 이루어져야 한다. 브레이크 시스템을 적절히 제어하기 위해서는 현재 상용되는 기계적인 유압식 브레이크보다는 EMB 와 같은 전자 제어식 브레이크 시스템 장착이 유리하다.

EMB는 기존 브레이크 시스템에서 유압으로 캘리퍼에 압력을 가하는 대신에 전기모터와 볼스크류(ball screw) 메커니즘을 이용하여 캘리퍼에 압력을 가해 제동을 하는 시스템이다. EMB 모델은 공동연구를 진행한 카이스트에서 EMB 시뮬레이터를 제공받아 연료전지 자동차 시뮬레이터에 적용하여 시뮬레이션에 반영되도록 모델링 하였다.¹⁾ Fig. 3은 연료전지 자동차 시뮬레이터에 EMB 모델이 적용되는 모습이다.

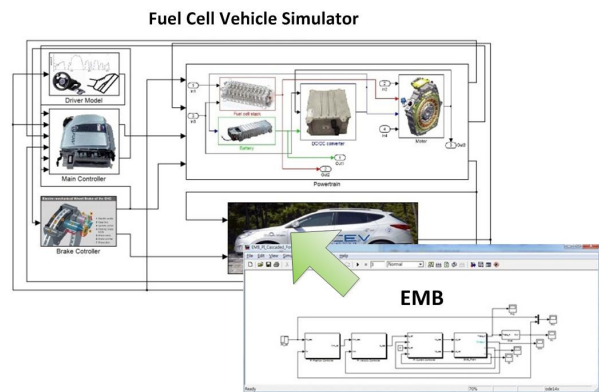


Fig. 3 Fuel cell vehicle simulator with EMB

3.2 회생제동 고장 원인 분석

회생제동 모터의 결함은 크게 전기적 결함과 기계적 결함으로 분류할 수 있다. Table 1에는 결함의 종류에 대한 원인이 간략히 정리되어 있다. 일반적으로 기계적인 결함 보다는 전기적 결함의 발생 빈도가 더 높은 편이며 전기적 결함 발생의 70% 이상은 결상에 의한 고장과 회로 단락이 차지한다. 결상은 고정자에 의해 발생할 수 있다. 모터와 인버터의 연결에서 3상 중 1개 상에서 개방이 일어나면 나머지 2개 상에 약 1.5배의 불균형 전류가 공급되며 토크는 약 60% 감소하고 리플 토크(ripple torque)가 발생한다. 반대로 3상 모터에서 1개 상이 단락이 일어나면 입력전류가 흐르지 않는 공심 코일(air cored coil)과 공극 자속 밀도(airgap flux density)의 상호작용으로 인하여 유기 기전력이 발생하여 순환전류(circulation

current)가 유도된다. 이 때 코일에서 순환전류의 제곱에 비례하여 열이 생기게 되어 상을 파괴하며 토크는 약 60% 감소하게 된다.⁴⁾ 이러한 모터의 주요 고장은 공통적으로 토크감소와 전류증가를 야기하여 모터의 더 큰 결함을 발생시키거나 화재로까지 번질 수 있다. 따라서 차량의 회생제동 시스템의 안정성 확보를 위하여 이러한 고장에 대한 진단과 대안이 필요하다.

Table 1 Types and forms of the defects of the motor

Electrical fault	<ul style="list-style-type: none"> - Over current - Over voltage - Phase open / short
Mechanical fault	<ul style="list-style-type: none"> - Overload - Bearing wear - Heat

차량 시뮬레이션 환경에서 회생제동 시스템의 고장진단과 대응을 위하여 전기적 결함의 약 70% 이상을 차지하는 주요 원인인 회로 단락과 결상에 대하여 모터의 토크가 감소하는 것으로 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

3.3 고장 진단과 대응

유도 전동기의 고장 진단 방법에는 진동 취득을 통한 주파수 분석 방법, 소음 및 온도를 측정하는 방법, 고정자 전류 분석 방법 등이 있다.

회생제동 시스템의 고장상태, 즉 전동기/발전기의 단락이나 개방과 같은 고장 시에는 요구 제동력에 비해 회생제동력이 60~70% 감소하게 되어 제동 안정성에 문제가 생긴다. 또한 모터의 고장 이후 지속적인 사용은 권선에 흐르는 전류의 양을 증가시키고 열을 발생시켜 모터의 더 큰 결함을 야기시킨다. 따라서 회생제동 시스템의 고장 시 이를 신속히 판단하여 회생제동을 제한하고 필요한 요구 제동력을 EMB 시스템이 보상하도록 해야 한다.⁵⁾

고장이 발생하게 되면 공통적으로 토크감소가 이루어지기 때문에 회생제동 토크를 감소시켜 고장이라고 가정하여 회생제동 제한 로직을 제외하고 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 4는 회생제동 제한 로직이 적용되지 않은 시뮬레이션 결과이다. 1.8초에서 고장이 발생하여 회생제동 토크가 감소하게 된다. 회생제동 제한 로직이

적용하지 않았기 때문에 부족해진 제동력을 보상해 주지 않으므로 Fig. 4의 3번째 감가속도 변화량 그래프에서 보듯이 고장발생과 동시에 전체 가속도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

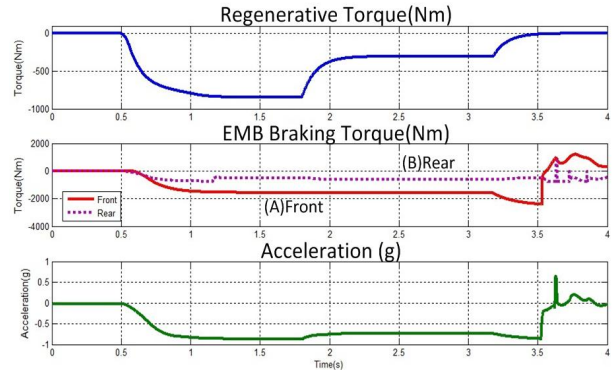


Fig. 4 Simulation results without fail safe logic for regenerative braking

다음으로 고장 발생시 회생제동 제한 로직을 적용하여 앞선 시뮬레이션과 공통 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. 1.8초에 고장이 발생하여 회생제동력을 차단하였고 이로부터 부족해진 제동력을 전륜의 EMB 브레이크가 보상하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 회생제동 제한 로직이 적용된 시뮬레이션 결과이다.

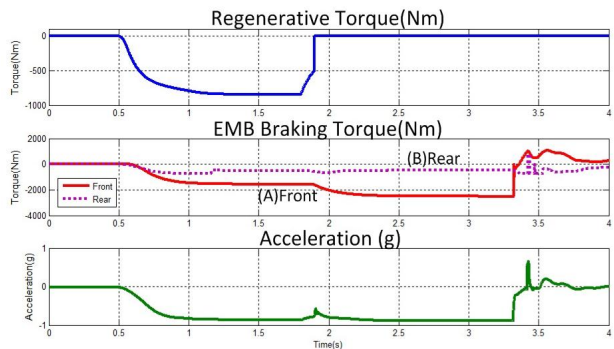


Fig. 5 Simulation results with fail safe logic for regenerative braking

시뮬레이션 결과 회생제동이 차단되고 EMB시스템이 부족한 제동력을 보상하는 과정에서 천이구간에서의 감가속도의 변화량이 상대적으로 많음을 확인할 수 있었다.

천이구간에서는 회생제동 시스템의 정상상태 유무에 관계없이 순간적인 전체 제동력 변화로 인하여 급격하게 감가속도가 변화하게 된다. 이 과정에서 운

전자는 제동 이질감을 느낄 수 있기 때문에 각 제동 시스템의 협조제어를 통하여 차량의 총 제동력의 변화를 줄이고 제동 이질감을 개선할 수 있는 제어 로직이 필요하다.

Fig. 6은 고장 시 천이구간에서의 각 요소들의 힘의 변화량을 보여준다.

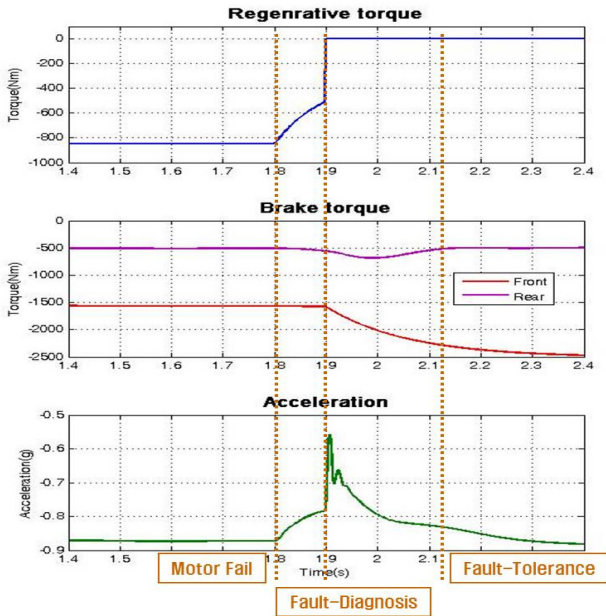


Fig. 6 Transient response in switching state

회생제동 시스템의 고장진단과 대응 방법에 따라 고장 시 천이구간의 특성에 영향을 끼칠 수 있다. 이러한 특성을 반영하여 차량의 제동성능 측면에서 회생제동 시스템의 고장을 감지하는 진단 능력과 EMB와의 협조제어를 통하여 회생제동을 제한하면서도 제동 이질감을 없애고 전체 제동력을 추종할 수 있는 대응 기술이 필요하다.

4. 결 론

회생제동 시스템의 고장 원인은 다양하나 그 중에서 약 70% 이상은 결상과 단락으로 인한 고장으로 조사되었다. 상 결상이나 상 개방의 경우 공통적으로 모터의 토크가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 모터의 요구 제동 토크보다 실질적으로 발생하는 제동 토크 양이 적을 경우를 고장이라고 판단하였고, 이 때 부족한 차량의 제동력을 EMB 시스템이 보상하는 방식으로 대응을 하는 시뮬레이션을 수행하였다.

본 논문에서는 회생제동 시스템의 고장진단에 대

한 연구를 진행하기 위하여 우선적으로 연료전지 차량 시뮬레이터를 구성하였으며, 연료전지 차량의 회생제동 시스템에서 모터의 고장 종류와 원인에 대하여 조사한 결과 공통적으로 토크가 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 모터의 토크를 감소시켜 시뮬레이션 한 결과 부족한 모터의 제동 토크를 EMB 시스템이 보상하는 과정에서 순간적으로 차량의 감속도가 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 곧 운전자가 느낄 수 있는 제동 이질감으로써, 차후 개선하기 위한 제어 알고리즘에 대한 연구가 수행될 예정이다.

후 기

본 논문은 지식경제부에서 시행한 전략기술인력양성사업과 산업원천기술개발사업에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

- 1) J. K. Ahn, K. H. Jung, D. H. Kim, H. B. Jin, H. S. Kim, S. H. Hwang, "Analysis of A Regenerative Braking System for Hybrid Electric Vehicles using An Electro-Mechanical Brake", IJAT, Vol.10, No.2, pp.229~234, 2009.
- 2) T. Kim. *et al.* "Regenerative Braking Control of a Light Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle", Electric Power Components and Systems, Vol.39, pp.446~460, 2011.
- 3) D. H. Yang, J. H. Park, Sung-Ho Hwang, "Development of Regenerative Braking Control Algorithm for In-wheel Motor Type Fuel Cell Electric Vehicles Considering Vehicle Stability", J. of KFPS, Vol.7, No.2, pp.7~12, 2010.
- 4) S. M. Shin, R. K. Park, J. S. Kim, J. S. Kim, B. K. Lee and I. S. Jung, "Output Voltage compensation Method for Three Phase SVPWM Inverter with Shunt Resistor", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp.1~6, 2011.
- 5) K. Jeon, H. Hwang, S. Choi, D. Yang, S. Hwang, H. Park, and S. Choi, "Development of Reliability Evaluation Technology for Green Car Regenerative Braking System with Electronic Brake PART-(1)", KSAE10-B0163, pp.908~914, 2010.

- 6) J. Huh, H. Jin, D. Seo, and S. Hwang, "Analysis of Braking Characteristics and Development of Regenerative Braking Control Algorithm for a Passenger Fuel Cell Electric Vehicle", KSAE Autumn Conference, pp.2188~2193, 2007.
- 7) D. Yang, B. Cho, K. Jeon, H. Hwang, S. Choi, and S. Hwang, "Establish of Fuel Cell Vehicle Simulation Environment for Regenerative Brake system Reliability Estimation," KSAE10-A0536, pp.3013~3018, 2010.