

극 배치 기법을 이용한 양방향 DC-DC 컨버터의 제어기 설계

노세진, 손경민, 최재호
충북대학교

Controller design of a bidirectional DC-DC converter based on pole-assignment

Sejin Noh, Kyoungmin Son, Jaeho Choi
Chungbuk National University

ABSTRACT

In Korean urban transit system, when the railcar starts, the electric power is absorbed from the line, and then the line voltage is instantaneously collapsed to provide a large accelerating torque. On the other hand, when the railcar brakes, the regenerative power is created and it increases the line voltage at the pantograph of the railcar. Therefore, by using the energy storage system near the train, the regenerated power can be saved to this system. The energy storage system is consisted of supercapacitor and a bidirectional DC-DC converter. In this paper, controller design of a bidirectional DC-DC converter based on pole-assignment is proposed. This method can be easy to design controller. Simulation results by using the calculated parameters are presented.

1. 서론

회생에너지는 인접한 차량의 감속과 역행이 동시에 발생하는 경우에는 회생에너지를 활용할 수 있으나, 인접한 차량의 역행과 제동이 일치하지 않는 경우 또는 운행시격이 길어서 변전소의 가선구간에 에너지를 흡수할 차량이 존재하지 않는 경우, 가선의 전압을 상승시키는 요인이 된다.^{[1][2]} 그림 1은 이런 가선 전압을 보여주고 테이블 1은 1주일동안 변전소에서 측정된 소비된 에너지와 회생된 에너지를 보여준다.

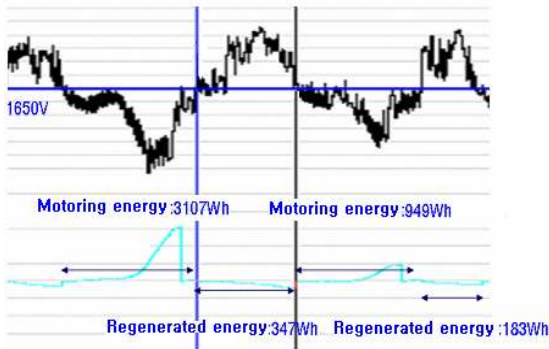


그림 1 기본 전압에서 소비된 에너지와 회생된 에너지
Fig. 1 Consumed and regenerated energy in the reference voltage

인접한 전동차량에 에너지 저장장치를 사용함으로써, 회생에너지는 이 장치에 저장할 수 있고 또한 전압 강하와 전력 변동을 감소시킬 수 있다. 변전소가 너무 멀리 떨어져 있는 경우와 새로운 변전소를 설치하기 어려운 경우, 그림 2에서 보여주는 것처럼 이런 문제점은 변전소사이에 에너지 저장장치를 설치함으로써 효과적으로 운용할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 요인들을 해결하고 효율적인 전동차 회생에너지를 활용하기 위한 방법으로 슈퍼커패시터를 이용한 에너지 저장장치 고안하였다. 에너지 저장장치는 전동차량 정차 시 발생하는 에너지를 저장장치에 저장하여 가선의 조건에 따라 공급하여 주는 방식이다.^[3]

표 1 변전소 에너지 측정 결과
Table 1 substation energy measurement results

Date	Consumption power [kWh/day]	Regenerated power [kWh/day]	Consumption power [won/day]	Regenerated power [won/day]	Regenerated ration[%]
2007.1.30	65,914.3	-13,699.4	5,932,289	1,232,942	20.8
2007.1.31	69,419.9	-12,727.7	6,247,794	1,145,495	18.3
2007.2.01	70,511.3	-12,997.2	6,346,014	1,169,747	18.4
2007.2.02	68,887.5	-13,586.6	6,199,879	1,222,794	19.7
2007.2.03	63,638.1	-11,675.0	5,706,640	1,044,257	18.3
2007.2.04	50,801.7	-12,770.2	4,565,229	1,147,831	25.1
Average value	64,862.1	-12,909.4	5,832,974	1,160,511	20.1

본 논문에서는 응용분야가 점차 확대 되어가는 슈퍼커패시터를 사용한 에너지 저장장치에 양방향 DC/DC 컨버터의 단일 루프 제어기를 극 배치 방법으로 각각의 파라미터 구하고, 이를 양방향 DC/DC 컨버터에 적용시켜 PSiM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

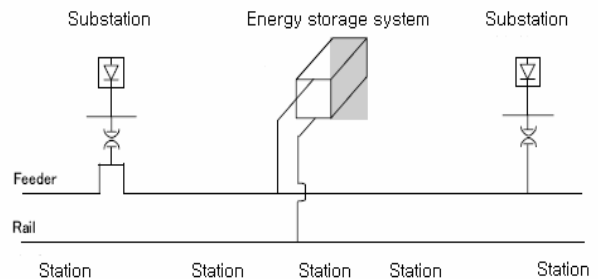


그림 2 두 변전소 사이에 설치된 에너지 저장 시스템
Fig. 2 Energy storage system installed between two substations

2. 제어기 설계

2.1 슈퍼커패시터의 전기적 모델

전동차량에 에너지 저장장치의 특징을 알아보기 위해서, 먼저 본 연구에서는 슈퍼커패시터의 전기적 모델링을 하였다. 일반적인 커패시터는 직렬저항(ESR)과 병렬저항(ESP)으로 구성할 수 있다. 하지만 이는 실제 슈퍼커패시터의 전기적인 응답을 나타내지 못하며, 좀 더 정확한 슈퍼커패시터의 전기적 응답을 나타내기 위해서 전기 화학적 메커니즘을 기본으로, 슈퍼커패시터는 서로 다른 시정수를 가진 수많은 병렬 RC 전송라인으로 모델링 되어야 한다. 그림 2와 같이 3개의 전송라인의 커패시터는 전압 의존성을 반영하기 위해서, 고정 커패시터와 전압상승에 따라서 비선형적으로 증가하는 전압 의존 커패시터로 모델링 되었다. 슈퍼커패시터의 등가회로 모델을 이용하여 실제 슈퍼커패시터의 각각의 파라미터를 실험적인 방법으로 계산하여 축소 모델 시뮬레이션 하였다.^[4]

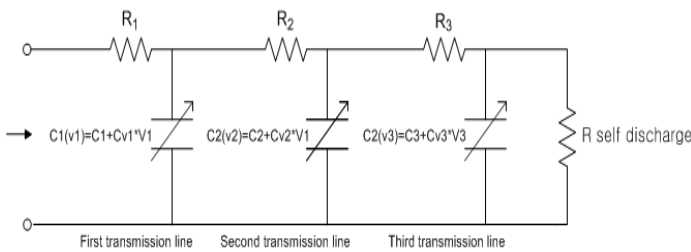


그림 2 슈퍼커패시터의 등가회로 모델
Fig. 2 Equivalent circuit model of supercapacitor

2.2 양방향 DC/DC 컨버터 등가회로

양방향 DC/DC 컨버터의 페루프 제어기를 설계하기 위해서 시스템의 상태방정식을 사용하였다. 전류제어기를 사용한 양방향 DC/DC 컨버터의 블록도는 그림 3과 같다. 전류제어기는 PI 제어기를 사용하였다.

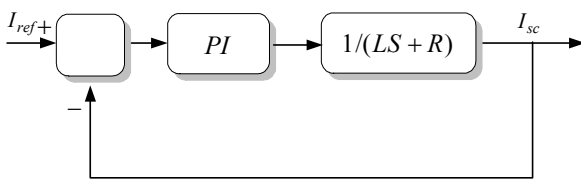


그림 3 DC/DC 컨버터의 전류제어기 블록도
Fig. 3 Current controller block diagram of DC/DC converter

1차 시스템의 모델을 식(1)과 같이 제안한다.

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT} \quad (1)$$

그림 3의 블록도를 이용하여 전달함수를 구하면 식 (2)와 같다.

$$\frac{I_{sc}}{I_{ref}} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 L + (R + K_p)s + K_i} \quad (2)$$

식(2)의 특성방정식은 식(3)으로 표현할 수 있고, 식(3)과 식(4)의 계수를 비교하여 K_p 와 K_i 의 파라미터를 구하면 식(5)와 같이 구할 수 있다. 여기서 ζ 는 진동계수로서 본 논문에서는 0.7로 설정하였으며, ω 는 $1/(2\zeta T)$ 보다 큰 값으로 본 논문에서는 25로 설정하였다.^[5]

$$D(s) = s^2 L + (R + K_p)s + K_i \quad (3)$$

$$s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2 = 0 \quad (4)$$

$$K_p = 2\zeta\omega L - R s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2 = 0 \quad (5)$$

$$K_i = L\omega^2$$

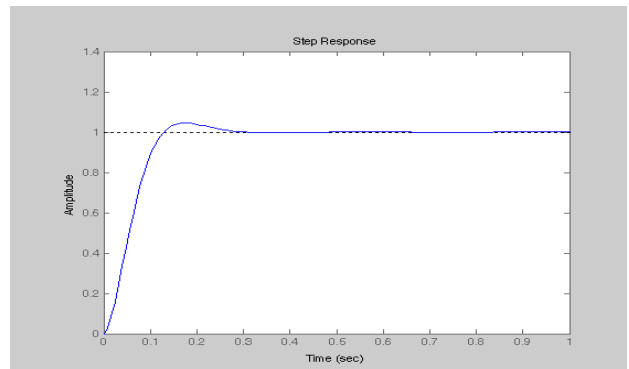


그림 4 시스템의 계단함수 응답
Fig. 4 Step response of system

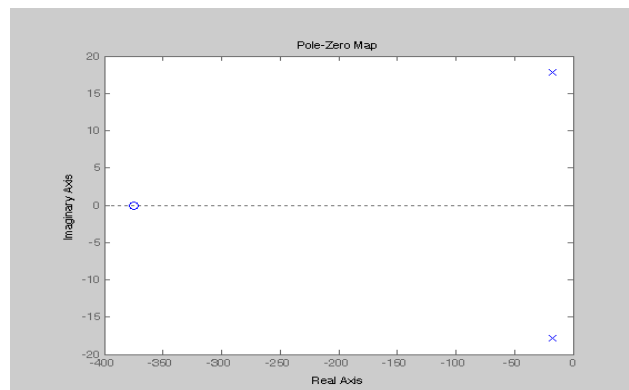


그림 5 시스템의 pole-zero map
Fig. 5 pole-zero map of system

그림 4는 식(5)에서 구한 제어기 파라미터를 대입하여 구한 시스템의 계단함수 응답을 나타낸 그래프이고 그림5는 시스템의 pole-zero map을 나타낸 것이다. 제어기의 파라미터는 표 2와 같다.

표 2 제어기 파라미터
Table 2 Controller parameters

항목	사양
K_p	0.005
K_i	1.875
ζ	0.7
ω	25

3. 축소 모델 시뮬레이션 결과

3.1 시뮬레이션 회로도

축소 모델 시뮬레이션을 이용하여 슈퍼커패시터의 초기 충전 모드를 극 배치 방법에 의해서 제어기 파라미터를 구하고 계산된 파라미터를 사용하여 축소 모델 시뮬레이션 하였다. 축소 모델 시뮬레이션은 가선에서 슈퍼커패시터를 이용하여 가선 전압을 안정화 시키는 제어기법의 타당성을 검증하고자 한다. 그림 6의 (b)는 PSiM 시뮬레이션을 이용한 양방향 DC/DC 컨버터와 슈퍼커패시터의 전기적 모델을 사용한 축소 모델 시뮬레이션 회로도이다. 축소 모델 시뮬레이션에서 사용된 파라미터는 표 3과 같고, 그림 6의 (a)는 경산 시험선의 전차선을 모델링한 회로도이다.^[6]

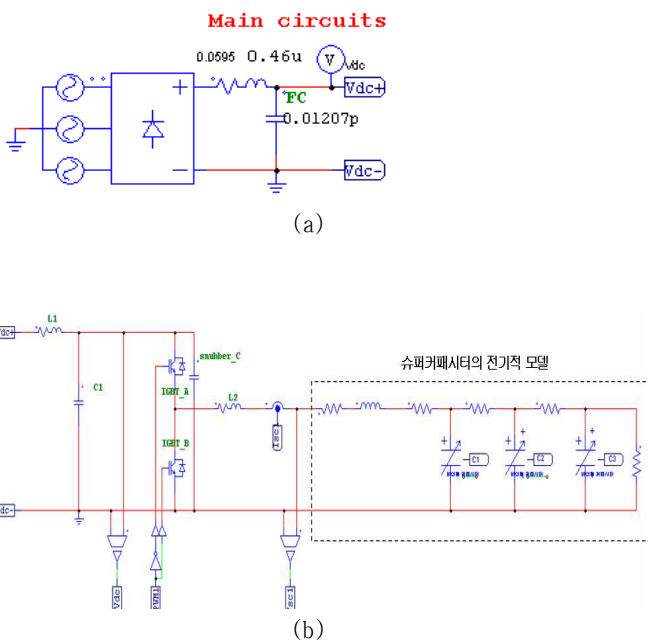


그림 6 축소 모델 시뮬레이션
Fig. 6 Reduction model for simulation

표 3 시뮬레이션 파라미터
Table 3 Simulation parameters

항 목	사 양
DC 가선 전압	750V
슈퍼커패시터 정격 전압	45.8V
인덕턴스	3mH
슈퍼커패시터 용량	165F
스위칭 주파수	5KHz

3.2 시뮬레이션 결과

축소모델 시뮬레이션을 이용하여 그림 7과 같은 충전모드 시뮬레이션 하였다. 초기의 과도상태에서는 30A 정 전류 충전을 하지 못하지만 전류의 상승이 IGBT 사양의 범위에 있는 38A로 제어가 되는 모습을 볼 수 있다. 과도상태가 지나고 정상상태가 되면 전류 지령인 30A를 잘 추종하여 정 전류로 충전하는 모습을 보여주고 있다.

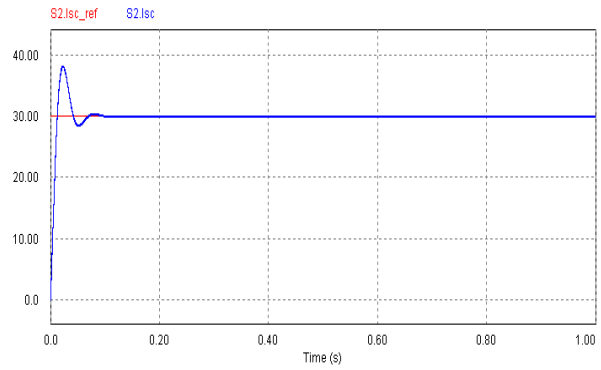


그림 7 충전모드 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation result in charge mode

4. 결 론

본 논문은 양방향 DC/DC컨버터에 극 배치 기법을 사용한 PI 전류제어기를 적용하였고 전동차량에 사용되는 양방향 DC/DC 컨버터의 충전회로를 제안하였다. 양방향 DC/DC 컨버터의 단일 전류 루프 제어기를 극 배치 방법으로 각각의 파라미터 계산하였고, 이를 PSiM을 사용한 축소 모델 시뮬레이션을 수행하여 입증 하였다.

이 논문은 한국철도기술연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 김길동, 김종대, 이한민 "전동차 회생 에너지 저장 시스템 개발에 관한 연구," 한국철도학회회학술발표대회 논문집, pp. 24-28, 2005.
- [2] 김길동, 이한민 "전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 기술," 한국조명전기설비학회 논문집, 제20권, 제2호, pp. 10-15, 2006.
- [3] B.J. Arnet, L.P. Haines, "High power DC-to-DC converter for supercapacitors," Electric Machines and Drives Conference, pp. 985-990, 2001.
- [4] 노세진, 이진목, 이재문, 최재호 "PSiM을 이용한 슈퍼커패시터의 전기적 모델링," 전력전자학술대회논문집, pp. 160-162, 2007.
- [5] Karl Johan Astrom, Tore Hagglund, *PID Controllers*, 2nd Edition, Instrument Society of America, pp. 173-174, 1995.
- [6] William D. Stevenson, Jr, *Elements of power system analysis*, 4th edition, pp. 48-50, 1982.