

전동차의 전기 제동 성능 향상을 위한 연구

이지호*, 이형철*, 곽재호**
한양대*, 한국철도기술연구원**

A study for improvement performance of electric brake for electric train

JeeHo Lee*, Hyeongcheol Lee*, JaeHo Kwak**
Hanyang University*, Korea Railroad Research Institute**

Abstract - 최근 전기 철도 시스템에서 높은 속도 제어 성능, 친환경성, 에너지 절약, 탁월한 유지 보수성에 있어서 전기 제동 시스템이 주목 받고 있다. 전기 제동이라 함은 전기 모터의 힘으로써 차량의 속도를 감속 하고, 정지하는 것을 말하는데, 감속을 위해 모터에서 역토크를 발생시킴으로써 모터가 발전기로 동작하게 된다. 이때 감소되는 운동 에너지가 전기 에너지로 변환되는데, 이 에너지를 회생 에너지라 한다. 특히 전동차에서는 추진 시스템이 VVVF 인버터로 바뀌어 가면서 회생 제동이 가능해지게 되었지만, 여전히 몇 가지 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 회생 제동이 기계 제동에 비해서 뛰어난 점을 분석하고 전기 제동법이 안고 있는 문제점을 언급한다. 또한 이를 보완하기 위한 방안으로서 연구되고 있는 방법을 나열하고 각각의 특성에 대해 살펴본다.

1. 서 론

2003년 대구 지하철 사고 이후로 철도에 대한 종합적 안전대책 수립과 같은 문제가 제기 되어왔다. 차량 시스템에 있어서 안전상 가장 중요한 요소는, 차량의 속도를 제어하여 확실히 차량을 정지 시키고 필요에 따라서 정지 상태를 유지할 수 있는 제동 시스템이다. 한편 비용 절감이나 친환경성을 고려하는 관점에서 제어기가 간편하고 에너지 회수가 효율 좋게 일어날 수 있게 하는 것 또한 요구된다. 첫째 관점에서 전통적으로 사용된 기계 제동은 비상 제동과 같은 보안 제동으로서 중요성이 불변하지만, 둘째 관점에서는 회생 제동이 가능한 전기 제동의 중요성이 주목 받고 있다. [1]

기계 제동 시스템과 전기 제동 시스템의 특징을 검토한 뒤 전기 제동의 문제점을 해결하여 효율적으로 사용할 수 있는 방안을 모색하여 보았다.

2. 기계 제동 시스템

전기 철도 시스템에서도 오랜 기간 동안 기계적 마찰력을 이용한 제동 시스템이 많이 이용되어 왔다. 철도 차량에서는 마찰력을 얻기 위하여 컴프레셔로 압축한 공기를 이용하여, 제동자를 차량이나 제동 디스크에 밀어 붙여 제동력을 얻는다. 이를 공기 제동이라고 하는데, 이 방식은 신뢰도가 높아 널리, 그리고 오랫동안 사용 되어 왔지만 다음과 같은 문제를 안고 있다.

2.1 느린 응답성

지령을 내린 뒤 압축된 공기의 압력이 제동 시스템까지 전달되고 제동자가 디스크나 차륜과 밀착하여 제동력이 작용 하는데 수백 msec 이상의 시간이 걸린다.

2.2 높은 유지 보수비

제동자와 디스크, 차륜과의 물리적인 마찰에 의해 제동력을 얻는 이상 마찰 면에서의 마모는 피할 수 없다. 마모가 심화 되면 제동 시스템이 동작 하더라도 제동력이 발생하지 않아 위험한 사태가 일어날 수 있으므로 주기적으로 점검, 보수를 할 필요가 있다.

2.3 주변 환경 악화

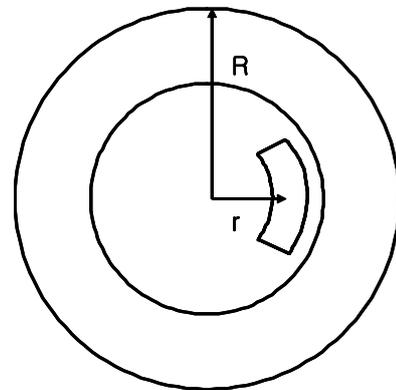
제동자와 디스크, 차륜이 마모되면서 비산되는 마모분으로 인해 오염이 될 수 있고, 소음이 발생한다. 또한 마찰면에서 발생한 열은 특히 지하철의 경우 터널 내의 온도를 상승시키는 원인이 된다.

2.4 발생 제동력의 불확실성

[그림 1]과 같은 기계 제동 시스템에서 차륜의 일량과 디스크 제륜자에서의 일량은 같으므로 다음과 같은 수식을 유도할 수 있다.

$$F = \frac{r}{R} \cdot T \cdot f \quad \text{수식 1}$$

여기서 R 은 차륜의 반경, r 은 제륜자 작용반경, T 는 제륜자에 작용하는 압력, f 는 디스크와 라이닝 사이의 평균마찰계수이다.



<그림 1> 차륜과 디스크 제동자

수식 1의 평균마찰계수 f 는 제륜자의 온도에 따라 달라지는데, 제동 시간이 길어질수록 제륜자의 온도가 상승하여, 마찰계수가 변하게 된다. 표 1은 제동사용시간에 대한 Galton's 실험식으로 얻은 마찰계수이다.[4]

속도(km/h)	제동초기	5초	10초	15초	20초
21.94	0.213	0.193	-	-	-
27.43	0.205	0.157	-	0.116	-
38.40	0.182	0.152	0.133	0.110	0.099
43.88	0.171	0.130	0.119	0.081	0.072
49.37	0.163	0.107	0.099	-	-

54.85	0.153	-	-	-	-
60.34	0.152	0.096	0.083	0.069	-
65.92	0.144	0.093	-	-	-
76.79	0.132	0.080	0.070	-	-
87.76	0.106	-	-	0.045	-
96.54	0.072	0.063	0.058	-	-

〈표 1〉 Galton's 실험식에 의한 마찰계수

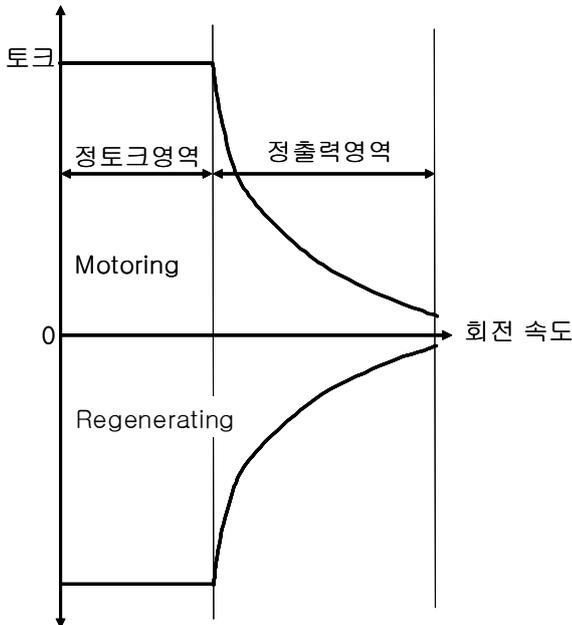
위의 표 1에서 보듯이, 일정한 압력으로 제동력을 얻고자 하였을 때, 제동 시간에 따라 마찰계수가 변하기 때문에 일정한 압력에도 불구하고 실제 제동력은 변하게 된다. 이 때문에 승차감이 나빠지고, 정지 위치의 정밀도가 악화되는 것이다.

3. 전기 제동의 장점과 문제점

전기를 이용하여 제동력을 발생하는 방법은 과전류 제동, 레버 흡착제동등이 있으나 본 논문에서는 모터가 발생시키는 토크로서 제동력을 얻어 운동에너지를 전기 에너지로 변환 할 수 있는 회생 제동에 한정하여 다룰 것이다.

전기 제동에서 발생하는 제동력은 모터의 속도-토크 특성을 따르게 된다. 그림 3은 전형적인 모터의 제어 특성을 나타내고 있다. 정 토크 영역은 저속에서 최대한 큰 가속을 얻기 위하여 일정한 토크 제어를 한다. 그 이후 정 출력 영역에서는 토크가 회전 속도에 반비례하여 감소하게 된다.

이런 모터를 이용한 제동 시스템의 장점은 앞 절에서 언급했던 기계 제동의 단점을 반대로 생각하면 된다. 즉, 빠른 응답성(수~수십 msec), 확실한 제동력 발생에 기인한 제어의 정확성, 레일과 차륜 사이의 외에는 마모가 발생하지 않는 점, 그리고 운동에너지를 전기에너지로 회생하여 다시 사용할 수 있어 보다 친환경적이다.



〈그림 3〉 모터 제어 특성 곡선

하지만 전기 제동 시스템 역시 단점을 가지고 있다. 첫째, 그림 3에서는 나타나 있지 않지만 극 저속에서는 사실상 토크가 발생되기 힘들다. 이는 저속에서는 높은 정밀도의 속도 신호를 얻기 힘들기 때문이다. 둘째 동력계의 정격을 크게 설계하지 않는 이상 고속에서는 위 그림에서 나타나듯이 제동력을 크게 가질 수 없다. 셋째 제동으로 인해 발생된 회생 전력을 소비해주는 부하가 없으면 원리적으로 제동력이 발생하지 않는데, 이를 회생 실패(Regeneration failure)라 한다.[2]

4. 전기제동 문제점 해결 방안

본고에서는 차량 안전성에 가장 치명적인 회생 실패에 대한 대책을 중점으로 전기제동의 문제점 해결 방안을 찾아 볼 것이

다.

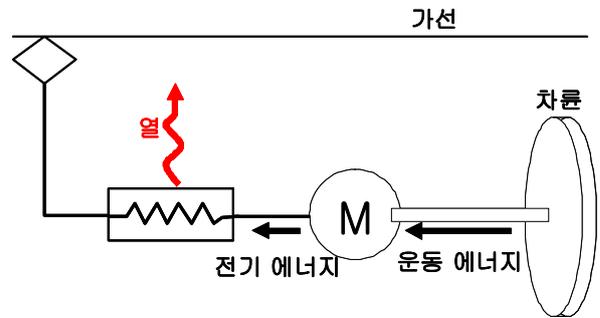
회생 제동은 발생한 전기 에너지가 소모될 부하가 없으면 그 제동력을 잃게 되는 현상을 회생 실패라고 하는데, 회생 제동의 신뢰도를 떨어뜨리는 요인 중 한가지다.[2] 회생 실패를 방지하기 위해서는 제동 시 발생하는 전기 에너지를 부하에서 소비해줄 필요가 있다. 일반적으로 같은 가선에 연결된 차량 중 역행중인 다른 전동차가 있다면 회생 에너지가 소비되어 회생 실패가 일어나지 않지만 그렇지 않은 경우에는 에너지를 소비할 다른 방법을 마련해야 한다.

4.1 기계-전기 하이브리드 제동

회생 실패가 발생하여 전기 제동력이 모자란 경우 가장 간단한 대책이 공기 제동으로써 보충하는 방법이다. 모터 드라이버로 부터 현 상황에서 모터가 낼 수 있는 제동력을 피드백 받아 지령값으로 부터의 부족분을 기계 제동 시스템으로 보충 하는 것이다. 하지만 이는 제동자, 제동 디스크를 마모 시키므로 앞서 언급한 기계 제동의 문제점을 가지게 된다.

4.2 발전 제동

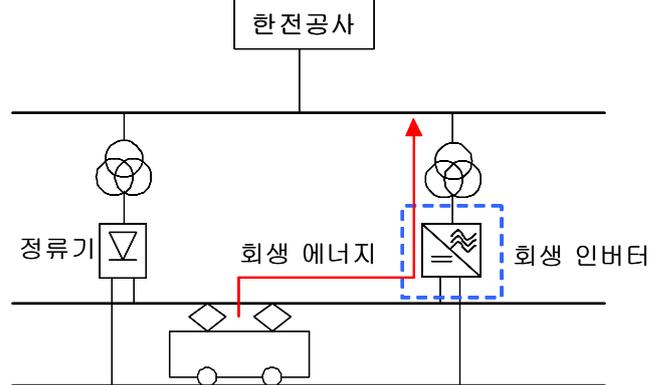
제동 시에 발생된 전기 에너지를 저항기를 통해 열에너지로 변환 시키는 방법이다. 차량이나 변전소에 저항기를 설치하여 회생 실패가 발생하게 되었을 경우, 모터에서 발생된 회생 에너지를 안정적으로 소비함으로써 제동력을 얻을 수 있으나, 전기 에너지를 열로 낭비 하게 되어, 지하철에서 사용할 경우 터널 온도를 높이는 결과를 낳는다.



〈그림 4〉 발전 제동

4.3 회생 인버터

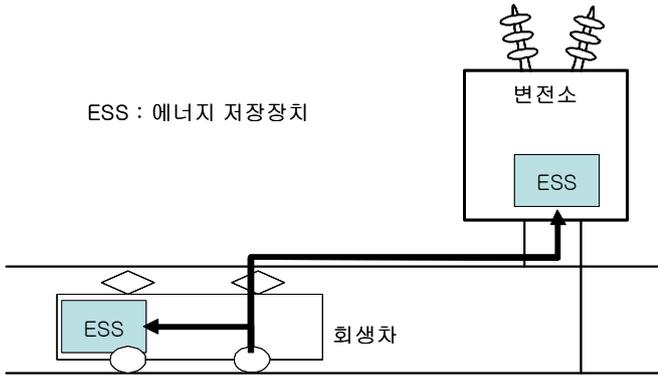
변전소에 교류 모선으로 에너지를 전송할 수 있는 인버터를 설치하여 회생된 전기 에너지를 다른 변전소나 역에서 사용할 수 있도록 하는 방법이다.



〈그림 5〉 회생 인버터

4.4 에너지 저장장치

전동차나 변전소에 배터리나 전기이중층 커패시터(EDLC), 플라이휠과 같은 에너지 저장장치를 설치하여 제동 시에 발생한 전기 에너지를 충전 하였다가 역행중인 차량에서 다시 사용하는 방법이다.



〈그림 6〉 에너지 저장장치

5. 마치며

본고에서는 기계 제동과 비교하여 전기 제동의 장점과 문제점을 살펴보고 장점을 살리면서 문제점을 해결 하는 방안에 대해서 언급했다. 국제 유가가 나날이 최고 기록을 갱신하고 있는 오늘날 에너지 절약은 가장 중요한 고려 사항이 되었다. 이런 상황에서 회생 제동을 통해 에너지를 아낄 수 있고 유지 보수에 있어서도 유리한 전기 제동의 중요성은 커져 가고 있다. 하지만 앞에서 언급했던 바와 같이 아직 전기 제동은 여러 가지 문제점을 안고 있다. 실제로 회수한 에너지의 양을 나타내는 회수율에 있어서도 40%정도로[3] 기대보다 높지 않게 나오고 있다. 전기 제동의 문제점을 해결하여 에너지 회수율과 전기 제동의 안전성, 신뢰성을 높이는 연구는 앞으로도 더욱 중요해질 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] Takafumi KOSEKI, Technology of electric brake in electric railway and regenerative braking in DC-electrified systems, 日本AEM學會誌, Vol.14, No.1, 2006
 [2] Masamichi OGASA, Energy saving and Environment in railroad - For example hybrid vehicle, IEEJ Journal, Vol.127, No.4, 2007
 [3] 김길동, 이한민, 전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 기술, KIIEE, Vol.20, No2, 2006
 [4] 박광복, 鐵道車輛工學, 도서출판 삼성종합출판, 2004