

회생 차량의 구분 장치 통과 방법

박정균, 오세호, 최현영, 류형선, 김양모
충남대학교 전기공학과

Passing through of Regenerative Rail Cars at air section

Jung-Gyun Park, Se-Ho Oh, Hyun-Young Choi, Hyoung-Sun Ryu, Yang-Mo Kim
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - The rail car with the regenerative brake are very efficient on energy savings. But if these cars under regeneration exist in the rail system, various problems is raised.

In this paper, the characteristics of the feeding system is analyzed and the effective passage is presented when the regenerative rail cars pass through the sections.

1. 서 론

근대화전의 급전시스템은 전기차에서의 회생을 생각하지 않고 만들어져 급전 계통도 열차의 원활한 운행만이 목적으로 한 것이지만 회생이 가능한 전기차량이 속속 보급되면서 회생차에서 급전시스템으로 제공되는 전력에도 관심을 가지게 되었다.

여기서 교류 급전은 직류급전과 달리 인접 변전소와 위상이 달라 병렬 운전이 불가능하기 때문에 회생에너지를 다른 역행차가 이용하는 것이 어렵다. 또한 회생에너지를 원래 전원으로 변환할 수 있지만 단상전력을 3상측으로 변환하기 때문에 전압 불평형이 발생한다. 이렇듯 급전시스템에서의 회생 전력의 이용은 회생차에서 볼 때 회생차의 근처에 부하가 없어 일어나는 회생실효와 이에 연관된 전차선 전압의 과상승과 회생실효로 부족한 브레이크력을 기계적 브레이크로 보충함으로써 브레이크 슈의 마모와 발열 등 바람직하지 않은 현상들이 발생한다. 더군다나 급전시스템에는 dead section, air section, section insulator 등과 같은 구분장치가 있어 급전시스템의 단절을 일으키며 회생에너지를 받아들 전력 구동차의 위치와 환경에도 많은 제약이 따르게 된다. 또한 현재, 열차가 구분장치를 안정적으로 통과하기 위해 타행 운전의 방법을 사용하고 있지만 이러한 경우 여러 가지 사고가 발생할 수 있으며 회생차가 구분장치를 통과하는 동안 회생 전력을 얻을 수 없다.

본 논문에서는 회생차량이 서로 다른 전원 시스템을 통과하는데 있어서의 문제점을 분석해 보고 통과 가능한 방법을 제시하고자 한다.

2. 회생차에서의 일반적인 절환

직류 급전 계통은 원칙적으로 병렬 급전되고 있기 때문에 운행 빈도가 한산한 때를 제외하고는 계통 전체로서 회생전력이 역행 전력보다 많을 확률은 낮지만 역행 부하가 멀리 있을 때에는 급전선 저항 때문에 회생차에서 충분한 전력이 공급되지 않고 역행차 부근의 변전소로부터 공급되어 회생실효에 이르게 된다. 또한 변전소가 양방향성이지만 일반적으로 병렬 급전되지 않기 때문에 다른 전원의 맞닿은 구분장치에서는 계속적인 회생이 불가능하다. 맞닿은 구분장치에 수반되는 문제는 역행될

때에도 존재하지만 회생할 때에는 轉流 실패나 과전압 발생이 예상되어 역행 이상으로 복잡한 문제가 존재한다.

동일 전원 계통에서 위상차가 거의 없는 곳에 대하여는 항상 병렬급전하고 있어 문제가 발생하지 않는다. 그러나 서로 다른 전원 계통에서는 병렬 급전을 할 수 없으며 충분한 절연을 넣은 절연구분장치를 사용하여 구분한다. 또한 열차가 절연구분장치를 통과 할 때는 무부하로 하는 것이 원칙으로 한다. 하지만 장열차의 가속구간이나 저속 운전 구간에 절연구분장치를 설치하는 것은 바람직하지 않다. 그렇기 때문에 서로 다른 전원 계통의 맞닿은 부분의 구분장치를 절환 구분장치로 하고 구분장치 가운데 열차가 들어온 상태에서 일단 개방하고 일정 시간 후에 출구를 전원으로 절환하는 방식을 사용한다.

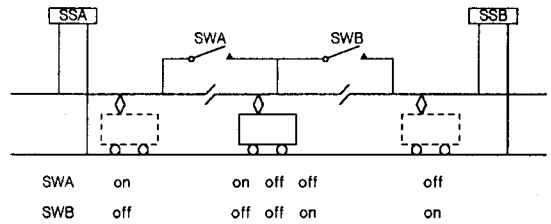


그림 1. 절환 구분장치

그림 1과 같이 SWA와 SWB는 회생차가 절환 구분장치에 있는 곳에 따라 동작을 하게된다.

그림 2는 e_A 는 절환전에 공급되는 전원이고 e_B 는 절환 동작후에 공급되는 전원을 보여 주고 있다. 여기서 e_A 를 기준으로 e_B 는 e_A 보다 τ 만큼 지연시간 가지며 τ 의 범위는 0에서 $T_A(=1/f_A)$ 의 사이가 됨을 알 수 있을 것이다.

$$e_A = E \sin 2\pi f_A(t)$$

$$e_B = E \sin 2\pi f_B(t - \tau) \text{ 이다.}$$

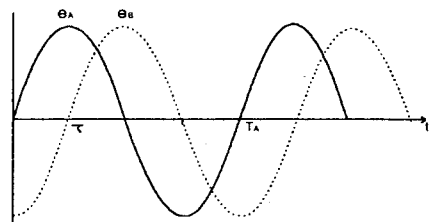
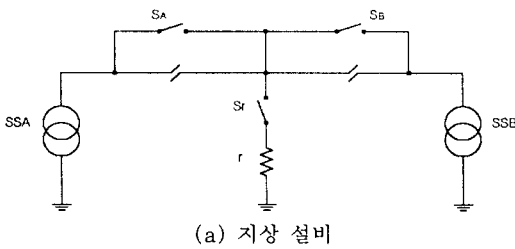


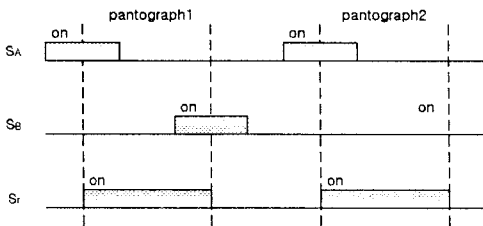
그림 2. 공급 전·후 전원의 관계

절연구분장치나 절환 구분장치를 통과 시에 차량은 단 시간 무전압 후의 돌입 전류 등에 의한 문제를 회피하기 위해 무전압을 검지하면 재투입에 맞춰 저항을 회로에 삽입하게 된다. 이 때문에 pantograph의 이선과 구별 가능한 정도의 긴 무전압 시간을 설정하여 놓게되고 이러한 것은 승차감의 문제나 공기기의 중단과 같은 악영향이 생기게 된다. 또한 회생차가 절환 구분장치를 통과할 때 SWA, SWB가 모두 off가 되는 시간동안은 회생이 되지 않아 여러 가지 문제를 수반한다. 따라서 회생이 가능한 방법을 모색하는 것이 중요하다.

기존의 절환방식은 역행차나 타행차에 대한 절환방식으로 구분장치 부근에서 제동상태에 들어갈 때 특히 회생 에너지를 발생하는 제동일 때에는 여러 가지 문제가 발생한다. 회생제동 때 전후 변전소에 연결될 때는 급전 시스템을 통해 회생제동이 될 수 있으나, 구분장치와 구분장치의 중앙 중성 영역에서는 회생 에너지를 받아들일 적절한 부하가 없으므로 회생실효가 될 수밖에 없다. 따라서 기존 절환 방식 중 중성영역에 들어 갈 때에는 전원간의 절환을 피하는 대신 적절한 회생 에너지 소비 부하가 필요하다. 이 경우 전력 축적장치이면 바람직하겠지만 비용측면에서 회생 실효가 일어나지 않도록 저항으로 소비해 버리는 것이 바람직하다. 따라서 그림 3의 (a)와 같이 지상 설비를 갖추고 (b)와 같은 시퀀스의 절환 방식을 택하면 비용측면에서 저가이고 회생 실효를 방지할 수 있는 절환방식이 가능하다.



(a) 지상 설비



(b) 절환 시퀀스

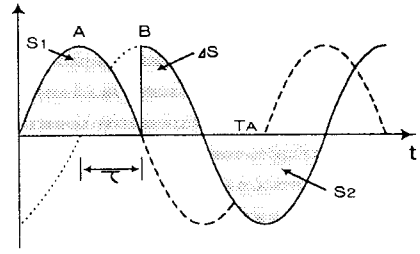
그림 3. 회생차 대응 설비와 절환 시퀀스

3. 미소 시간 절환

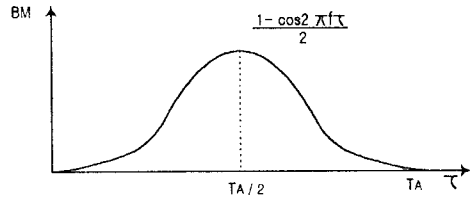
그림 4의 (a)와 같이 A전원이 0이 되는 순간에 A를 끊어 B로 절환 방법은 지연시간 τ 에 의해 변압기에 불평형이 되어 偏磁가 발생한다.

$$BM = \frac{S_1 + \Delta S - S_2}{S_2} = \frac{1 - \cos 2\pi f \tau}{2}$$

위의 식은 편자율 BM을 나타낸 것인데 ΔS 가 크면 클수록 편자율은 커지게 된다. 또한 식에서 그림 4의 (a)에서 보는 것과 같이 τ 는 ΔS 와 직접적으로 관계되어진다. 따라서 편자율 BM은 두 전원의 시간지연 τ 에 따라 달라지며 이것은 그림 4의 (b)와 같이 나타난다.



(a) 순시 절환



(b) τ 에 따른 BM

그림 4. 순시 절환과 τ 에 따른 BM

위의 같이 순시적 절환 방식에 나타나는 편자 현상을 완화시키기 위해 전압형 인버터의 콘덴서에 일시적으로 회생 에너지를 저장함으로써 위상차로 기인되는 어쩔 수 없이 생기는 편자를 완화시킬 수 있다.

그림 5는 VVVF 제어차의 회로도를 간략화 시킨 그림으로 회생 제동시 구분장치 통과 방안을 고려하기 위하여 같이 간략화 시킨 것이다.

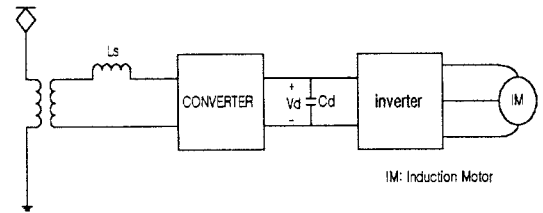


그림 5. 간략화된 전차구성 블록

그림 5에서 보는 것과 같이 회생일 때 전력은 모터로부터 중간회로를 거쳐 전원쪽으로 흐르게 되는데 전원이 끊어지면 회생에너지는 직류 중간 회로의 콘덴서에 축적된다. 하지만 콘덴서의 내압 때문에 정전 시간에는 제약이 따르게 된다. 정전중에 V_d 는 아래와 같다.

$$V_d = V_{d0} + \int I_d dt, \quad I_d = \frac{P}{V_d}$$

여기서 P는 모터의 순시 전력의 최대치를 나타낸다. 콘덴서의 내압을 V_{max} 라 하면 정전시간 t는 다음 식을 만족하여야 한다. 즉

$$t < \frac{C_d (V_{max}^2 - V_{d0}^2)}{2P}$$

그림 6의 (a)의 지연시간 τ 가 t_{max} 보다 작을 때에 정전시키면 불평형은 없지만 τ 가 t_{max} 보다 크면 불평형이 생기게 된다. 따라서 불평형을 억제시키기 위해 그

림 6의 (b)와 같이 정전시간을 t_{max} 로 취한다.

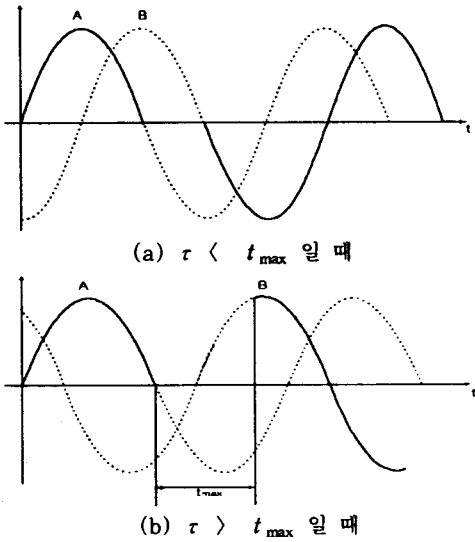


그림 6. 미소시간 절환에 의한 불평형

콘덴서와 회생 에너지를 축적할 수 있는 최대 시간 t_{max} 는 회생전력 P와 Vdo에 의해 결정되며 회생 제동시 브레이크 력이 일정하다고 가정하면 회생 전력 또한 일정하므로 콘덴서의 최대 허용전압에 의해 결정된다. 과 전압비에 대한 t_{max} 를 나타낸 것은 그림 7과 같다.

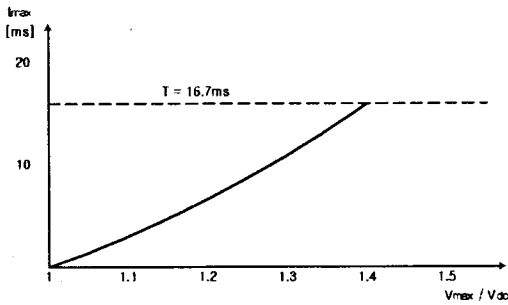


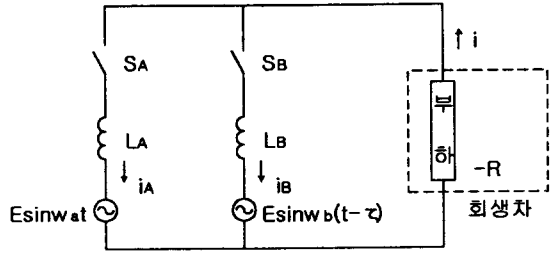
그림 7. 과 전압비에 대한 tmax

여기에서 브레이크 전력 $P = 3MW$, 콘덴서 용량 $30000\mu F$, $V_{do} = 1800[V]$ 로 하여 계산하였다. 여기서 t_{max} 가 전원 주파수 $60Hz$ 의 주기 $T = 16ms$ 를 넘을수 없기 때문에 상용주파수와 t_{max} 를 비교하기 위하여 함께 나타내었다. V_{max} 를 VVVF 회생차의 정격 전압의 1.4배까지 허용한다면 두 전원의 시간차 τ 가 주기에 근접한다 해도 콘덴서에서 회생 에너지를 축적할 수 있어 회생 실효의 부작용을 줄일 수 있음을 의미한다.

4. 미소 병렬 절환

그림 8은 회생시의 열차와 구분장치를 포함한 급전시스템을 나타내고 있는데 회생시의 부하를 $-R$ 로 나타내고 회생전류가 전원 쪽으로 흐르고 있다. 전원 B를 넣은 후 i_A 가 0이 되는 순간에 전원 A를 끊게 되지만 병렬 급전이 시작되는 시간 t_{AB} 에서 0이 되기까지 시간은 τ 와 t_{AB} 에 따라 결정된다.

따라서 i_A 가 빠른 시간내에 0이 되지 않으면 극히 짧은 시간에서의 절환이 불가능하다.



$$\begin{aligned} \text{여기서 } w_a &= 2\pi f_A \\ w_b &= 2\pi f_B \end{aligned}$$

그림 8. 회생차량과 구분장치의 급전계통 등가회로

두 변전소의 상용 주파수는 같으므로 시간적 지연 τ 는 A, B 변전소와 구분장치의 위치에 따라 결정되며 병렬로 급전되는 t_{AB} 시간 동안 순환전류가 흐르게 되고 이로 말미암아 편자(偏磁)현상이 발생할 수 있다. 따라서 그림 9와 같이 on되는 시점을 선택함으로써 편자는 해소될 수 있다.

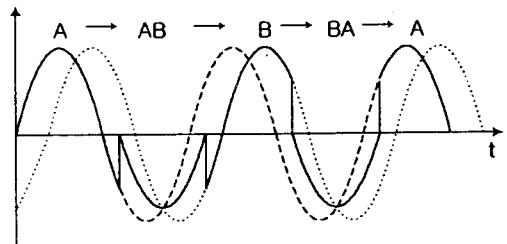


그림 9. 편자 없는 병렬 절환방법

이상적인 절환을 가정하면 위상차에 따라 병렬로 절환되는 시점이 결정되며 각 구분장치마다 정해진 형태가 될 것이다.

5. 결 론

본 논문은 회생 능력을 지닌 회생차가 구분 장치의 통과 시에 생기는 문제점들에 대한 통과 방법을 논하였다. 특히 회생차와 같은 열차가 구분장치를 통과할 때에 무부하 운전을 하지 못하는 저속구간이나 가속구간 등에서 계속해서 전원을 공급할 필요가 있을 때를 중점적으로 다루었다.

이러한 구분 장치 통과 방법은 이상 구분 장치에서 생기는 문제점들을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 회생전력을 이용하는 회생차에 대단히 바람직한 통과 방법이 될 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김양수, "전기철도 교/직 절연구간에서의 전동차 운행에 관한 연구", 고려대학교 석사학위논문, pp.18, pp.1623, 1999
- [2] 김태수, "전기철도 방식선정 및 성능향상에 관한 연구", pp. 424, 연세대학교 석사학위논문, 1996
- [3] 松村清, "電車線裝置", JR教本研究會, pp.3850, pp.5967, 1995