

전동차 주행성능평가를 위한 데이터취득 및 분석

이강원\*, 김명룡\*, 백광선\*, 심재복\*\*, 장상훈\*  
 한국철도기술연구원\*, 산업기술시험원\*\*

Data Acquisition and Analysis for Running Performance Evaluation of the Electric Train

K. W. LEE\*, M. Y. KIM\*, K. S. BAIK\*, J. B. SHIM\*\*, S. H. CHANG\*  
 KRRI\*, KTL\*\*

**Abstract** - The running of the electric train are done by powering, breaking and coasting. Powering to start and accelerate the rolling stock means driving the three-phase electric induction motors controlled by VVVF inverters which are connected to overhead power line directly(DC) or indirectly(AC, DC/AC). Breaking is achieved by blending control which is the proportional combination between regenerative breaking of VVVF inverter and air pressure control of breaking operating unit(BOU). Therefore, Data obtained during two operation are very important items to evaluate the running performance of RS. This paper has investigated in real time data acquired from VVVF inverter and measured by pressure sensor directly connected to air breaking line(motor car and trailer car). By analyzing data in the region of time and frequency, fundamental methods for evaluating the running performance of RS quantitatively and objectively have been suggested.

하게 된다. 속도의 증가는 가속계로 측정되는 가속도에 변화를 주게 된다. 이때 전동차의 성능을 나타내는 가속도값은 역행 4노치로 출발하여 역행을 유지한 경우, 전동차가 움직이기 시작한 후 정토크영역인 5~35km/h사이의 증가된 기울기로 계산한다.

1. 서 론

전동차는 가선전압에 따라 직류용, 교류용, 직/교류용으로 나눌 수 있으며 이에 따라 인버터의 형태 및 제어방법도 차이가 있게 된다. 그러나 전동차의 구동 및 제동을 위하여 유도전동기를 제어하고, 제동장치를 이용하는 것은 세 가지 경우 모두 동일하다. 전동차의 주행(역행, 제동, 타행)은 전동차의 정시성, 승객의 승차감 및 안전감 등에 있어 매우 중요한 사항이므로 전동차의 주행성능은 정확하고 객관적으로 평가 및 관리되어야 한다. 본 논문에서는 직류용 전동차로서 세 개역 사이를 주행하며 데이터획득장치로 획득된 여러 가지 주행데이터들의 주행패턴을 분석하였고 이들 주행데이터들을 이용한 주행성능평가에의 적용방안에 대하여 살펴보았다.

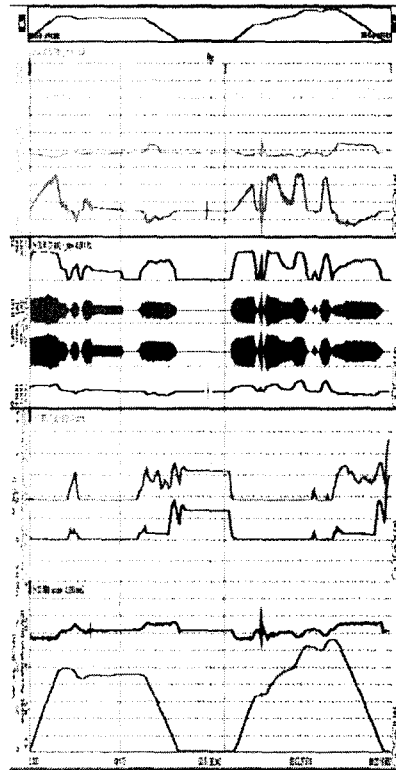
2. 본 론

2.1 실험방법 및 구성

직류용 전동차의 VVVF인버터는 인버터보호동작 및 전동기제어를 위하여 가선상태(전압/전류)와 주행상태에 대한 데이터를 제어기에서 지속적으로 관리하고 있으므로 이러한 내부데이터를 출력하기 위한 전용보드를 설치하게 되면 인버터제어기로부터 출력된 파형을 통하여 전동차의 주행 중 변동되는 각종 전압/전류 데이터를 실시간으로 확인이 가능하고 또한 인버터로부터 출력되지 않는 각 차량의 제동압력은 압력센서를 제동장치에 부착하여 직접 측정된 전압값의 형태로 확인이 가능하다. 측정된 제동압력과 VVVF인버터로부터 출력된 아날로그전압들은 데이터획득장비(DEWE3010)를 이용하여 실시간으로 관찰 및 저장되었고 저장된 데이터는 데이터처리 응용프로그램인 FLECPRO에 의해 원하는 데이터형태로 가공처리되어 분석되었다.

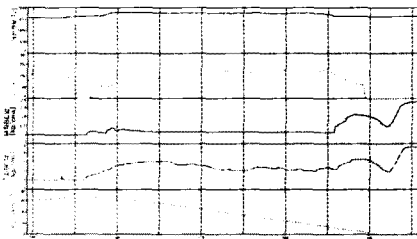
2.2 실험결과 및 고찰

전동차의 주행은 역행(powering)과 제동(breaking) 및 타행(coasting)으로 구성되며 VVVF인버터와 공기제동장치와의 상호작용에 의하여 이러한 일련의 동작이 수동 또는 자동으로 제어될 수 있다. 전동차의 역행은 표준전동차의 경우, 역행시 4 step 노치에 의해 역행토크가 단계적으로 증가하고 제동은 7 step 노치에 의해 제동력이 단계적으로 증가된다. 그림 1은 직류전동차를 이용하여 세 개의 역사를 주행한 경우 측정된 주행데이터들을 보여주고 있다. 맨 위부터 차례대로 주행속도곡선, 가선전압, 인버터출전전압, 인버터입력전압, 인버터 출력전류 실효치, 인버터 U상 출력전류, 인버터 V상 출력전류, 슬립주파수, T차 BC(제동)압, M차 BC(제동)압, 가속계출력, 속도곡선을 보여주고 있다. 그림 1에서 주행곡선 중 첫 번째 역간 주행은 역행 및 제동명령 등에 의해 정상적으로 이루어지고 있으나 두 번째 역간 주행 시 차륜의 과도 슬립에 의한 전동기과전류 보호동작으로 인해 VVVF인버터의 정지 후 재가동 동작이 발생하여 이에 따른 비정상적 데이터들의 동작파형들이 발생된 것을 보여주고 있다. 정상적인 주행은 역행노치를 증가시키면 초기에 정착제동이 풀리고 제동력은 0으로 감소하며 역행노치에 따라 견인력이 증가되면 인버터의 주행전류패턴이 변화하고 전동차의 속도가 증가



<그림 1> 주행데이터

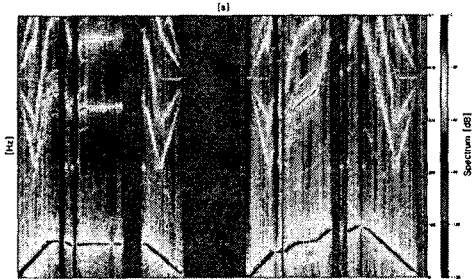
다음으로 주행 중 제동노치에 따라 제동력을 증가시키면 VVVF인버터에 의해 제어된 전동기는 회생제동을 하게 되고 제동장치는 전동차에 대한 감속도를 보상하기 위하여 인버터가 설치되지 않은 차량의 공기제동값을 증가시키고 인버터가 설치된 차량에 대해서는 감속도에 대한 회생제동력의 부족분만을 공기제동값으로 주게 되어 전체적으로 혼합제동(blending breaking)에 의한 제동제어(그림2)를 받게 된다.



<그림 2> 혼합제동

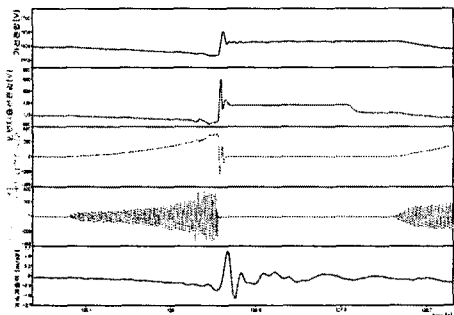
물론 VVVF인버터에 의한 회생제동만을 이용한 제동제어도 가능하나 현재 국내에서 영업운행 되는 전동차의 대부분은 회생제동과

공기제동을 혼합하여 쓰는 혼합제동을 사용한다. 전동차의 회생제동은 가선전압을 증가시키고 만약 과도하게 가선전압이 증가될 경우에는 가선전압을 일정전압이하로 낮추기 위해 회생제동이 차단된다. 제동의 감속도는 제동이 전동차에 작용된 후 직선적으로 감소되는 부분의 기울기로서 표현되며, 혼합 제동시 fade in/out부분을 가능한 제한한 80km/h주행 중 제동 시 75~5km/h 사이의 감소된 기울기로서 계산한다.



〈그림 3〉 인버터 U상 출력전류에 대한 STFT결과

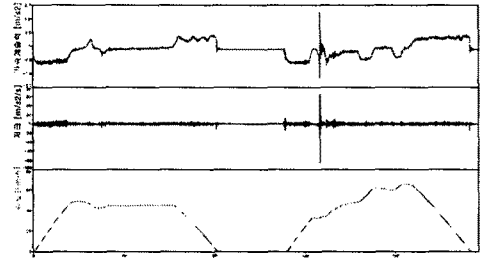
그림 3은 그림 1의 주행데이터들 중 VVVF인버터에 의해 제어된 U상 출력전류파형의 시간에 따른 주파수분포를 STFT(short time fourier transform)를 이용하여 나타낸 것이다. 사용된 window는 rectangular window이고 196680개의 데이터에 대해 window 길이 ( $\sqrt{196680} \times 2$ )는 886point를 적용하였고 증첩된 데이터의 개수는 window 길이의 절반인 443point로 하였으며 최대 주파수는 500Hz까지 계산되었다. 그림 3에서 주파수분포의 크기가 매우 낮게(=0) 나타난 시간구간은 타행 즉 전동차가 관성에 의해 움직이는 동안을 나타낸다. 또한 그림 3의 시간-주파수 분포는 전동차의 전동기를 제어하기 위한 VVVF인버터의 특성을 잘 나타내고 있다. 그림 3을 보면 전동기에 대한 기본적 전압/주파수제어는 100Hz 미만의 영역에서 이루어지고 있으며, 이 곡선패턴은 그림 1의 주행시 속도곡선과 매우 일치된 형태를 보여주고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 기본 파성분인 100Hz이상의 주파수 영역을 살펴보면, PWM제어에 의한 반송파 및 고조파 성분들이 200Hz이상의 주파수영역에서 나타나고 있다. 만약 해당 인버터의 대표적인 정상주행패턴을 정규화 하여 데이터베이스로 구축할 수 있다면 역행 및 제동시 출력제어전류의 시간-주파수분포의 패턴인식을 이용하여 인버터의 정상제어여부 판별이 자동화되어 실시간으로 가능할 것으로 보여진다. 그림 4는 역행에 의한 가속 중 차륜의 파슬림에 의한 인버터의 보호동작으로 인해 인버터가 차단될 때의 가선전압, 인버터충전전압, 인버터입력전류 및 가속계 가속도의 순간적 과도파형을 보여준다. 초기 가속 중 가선전압 및 인버터충전전압은 부하의 증가에 따라 감소하고 인버터입력전류는 증가하지만 인버터가 차단되는 시점에서 인버터입력전류는 순간적으로 전동기의 잠류자속에 의한 회생동작으로 전류의 방향은 반대로 바뀌고 이때 가선전압과 인버터충전전압은 선로저항에 의해 제한된 과도전압치로 overshoot한 후 1초이내로 정상적인 전압상태로 되돌아 가는 것을 그림 4에서 확인할 수 있다.



〈그림 4〉 인버터차단시 가선전압, 인버터충전전압, 인버터입력전류 및 가속도의 변동

그러나 가선전압 또는 인버터충전전압의 과도한 상승은 가선에 연결된 주변기기 및 전동차내에 설치된 다른 전력 및 제어기기들에 악영향을 줄 수 있고, 또한 그림 4의 가속계로 측정되었듯이 전동차가 인버터 차단 시 급격한 회생제동에 의해 전후로 충격을 받게 되어 급격한 저크의 상승이 발생되면 승객의 승차감과 안정감을 해칠 수 있으며 차량과 차량사이를 연결하는 연결기에도 무리를 줄 수 있으므로 주행 중 인버터의 고의적 또는 우발적 차단은 가급적 일어나지 않도록 인버터 설계시 충분한 고려가 필요할 것으로 보인다.

다. 앞에서 설명하였듯이 승객의 승차감과 안정감은 전동차로서 영업운전을 함에 있어 매우 중요한 고려사항 중 하나로서, 전후, 좌우, 상하의 3축 진동의 수리적 계산을 통하여 승차감을 평가할 수 있으나 이와 함께 전후방향의 단속 가속도를 시간에 대해 미분한 저크의 크기로서도 간단히 살펴볼 수 있다.(그림 5). 그림 5의 맨 위에 위치한 그림은 주행 중 가속계로 측정된 가속도를 나타낸 것이고 가운데 그림은 가속도를 시간에 대해 미분한 저크의 시간에 따른 크기변화를 보여주고 있다. 저크의 크기는 기동 시 또는 정지시 가장 크게 나타나고 인버터 차단되는 경우 가장 큰 값을 보여주고 있다는 것을 알 수 있으며 실제 전동차에 탑승하여 느껴지는 흔들림도 이 경우들에서 크게 느껴짐을 확인할 수 있었다.



〈그림 5〉 주행속도에 따른 가속도 및 저크의 변동

### 3. 결 론

전동차의 주행시 VVVF 인버터의 전동기제어성능 및 제동장치의 원활한 제동성능은 전동차의 주행성능을 나타내는 주된 고려대상이므로 본 논문에서 살펴보았듯이 주행 중 인버터 및 제동장치등으로부터 얻어진 각종 주행데이터들에 대한 정확한 분석은 주행성능의 객관적인 평가를 가능하게 하였다. 그러나 주행성능은 정성적이 아닌 정량적으로 평가되어야 하므로 주행성능의 정량적으로 나타낼 수 있는 주행데이터들에 대한 특성치의 설정에 대한 연구가 앞으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 건설교통부, "도시철도차량의성능시험에관한기준", 2000. 5. 17