전기기관차 병렬구동 견인전동기의 실시간 접지개소 검출에 관한 연구

이을재*, 최정수
이경산전(주)*, 경기공업대학

A Study on the Real Time Earth Detection Method for the Parallel Connected Traction Motors of the Locomotives

Lee Eul-jae*, Choi Jung-Su
E-kyoung Sys Co.*, Ltd, Kyonggi Institute of Technology

Abstract - 전기기관차에 사용되는 6-병렬 구조의 견인용 직류전동기 접지개소를 실시간으로 검출하기 위하여 병렬회로가 갖는 등가 임피던스 변화를 이용한 새로운 접지검출 방법에 대하여 제안한다. 기존 보호회로가 접지 릴레이를 사용하여 접지의 발생 유무만을 인식한 것에 비하여 제안된 방법에서는 각 직류전동기의 회전자 및 계자의 접지를 선별적으로 구분하는 것이 가능한 특징을 갖는다. 제안된 검출방법의 타당성 조사를 위하여 병렬견인구동회로에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 서 론

현재 국내에서 운행중인 전기기관차의 대부분은 80년대에 제작된 관계로 직류 직권형 견인전동기를 사용한 사이리스터 컨버터 방식이 대부분이며, 2000년 이후 VVVF 인버터를 사용한 교류 견인전동기 방식의 신형 전기기관차가 3 편성 운행되고 있다. 이렇게 전기기관차의 대부분을 차지하고 있는 직류전동기 견인형 기관차는 94편성으로 사용된 견인전동기의 수만도 기관차 당 6대씩 그리고 예비품을 포함하여 총 600여대의 전동기가 운전 중에 있다. 하지만 직류전동기의 특성상 고장의 빈도가 매우 빈번하며 특히 접지에 의한 권선의 소손발생이 가장 자주 발생하고 있다. 표 1은 지난 93년 이후 발생한 직류 견인전동기의 고장현황으로 매년 평균 300여 건에 육박하는 전동기의 고장을 보여주고 있다.

한편 운행중에 발생한 견인전동기의 고장은 여러 가지의 심각한 문제점을 유발하는데 그 이유는 견인회로의 병렬연결 방식에 따라 고장난 견인전동기를 신속하게 제거시키지 못하는 구조상의 문제 때문이다. 즉 운행 중에 전동기 회로에 접지가 발생하면 기관사는 6개의 전동기 중에서 접지가 발생한 부분을 차단하기 위하여 최악의 경우 5회 이상 차단스위치를 수동으로 동작시켜야 하고 이 과정에서 접지가 발생한 전동기는 연속적인 손상이 누적되어 결과적으로 전동기 내부에 심각한 고장을 야기하게 된다. 또한 운행의 관점에서도 운전 중 보호회로가 동작하여 주회로가 차단되면 이를 복귀하기 위한 조작시간이 최소 1~2분에서 최대 10여분 까지도 소요되므로 운행지연에 따른 여객의 불편함과 경제적 손실 또한 간과할 수 없는 사항이 되고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 견인전동기의 접지 사고 시에 고장이 발생한 전동기의 검지는 물론 전기자와 계자의 접지 개소까지 파악이 가능한 새로운 방식의 견인전동기 접지검출 방식에 대하여 제안하고자 한다.

표 1 직류 견인전동기의 연도별 고장발생 건수

93	94	95	96	97	98	99	00	01
220	323	383	505	482	415	319	279	265

2. 실시간 접지 검출방안

2.1 8000 계열 전기기관차 견인구동회로 구조

그림 1은 현재 국내에서 운행중인 8000계열 전기기관차의 견인구동회로 부분에 대한 간략도이다. 견인회로는 총 6개의 직류직권 전동기를 두 대의 컨버터(RDTH1, 2)가 각 3대씩 병렬로 제어한다. 견인용 컨버터는 사이리스터를 사용한 세미 컨버터 구조로 되어 있으며 그림에는 나와있지 않으나 발전제동을 위한 저항기와 접촉기 회로가 추가로 구성되어 있다. 컨버터와 모터회로 사이에는 전류평활을 위한 평활용 리액터(SL1~6)가 삽입되어 있으며 모터의 전기자 권선(AM1~6)과 계자 권선(FE1~6) 사이에는 전류검출을 위한 절연 트랜스(Tr1~6)가 위치한다. 계자 권선에는 약계자 제어를 위한 고정저항(RPS1~6)이 상시 병렬로 연결되어 있으며 평소에는 사용하지 않으나 고속운전을 위해 추가로 약계자 제어를 수행할 수 있도록 스므징 리액터(SJ1~6)와 저항(RS1~6) 및 접촉기 회로(S1~6)가 연결되어 있다. 발전제동시에는 모터회로가 주회로와 분리되어 컨버터로부터 전류가 차단되며 전기자의 경우에는 독립적인 접촉기를 사용하여 각각의 전류용 저항이 병렬로 구성되며 계자권선은 약계자 저항이 병렬로 연결된 채로 6개의 권선이 직렬 연결되는 형태가 된다.

운전중 접지를 검출하기 위한 기존의 방법은 QOP로 불리는 접지검출 계전기와 축전지 전압를 이용하여 접지시에 구성되는 계전기 폐회로에서 계전기 코일의 전압이 약 40Vdc를 초과하면 계전기를 동작시켜 주회로를 차단시키는 간단한 방식을 사용하고 있다. RQOP 저항은 이러한 동작전압 감지와 계전기 동작시의 환류를 목적으로 QOP 계전기에 병렬로 연결된다. 하지만 QOP 계전기를 사용한 접지 검출방식은 단순히 접지의 발생유무만을 확인하고 보호회로를 동작시켜 주회로를 차단시키는 기능만 가지고 있다.

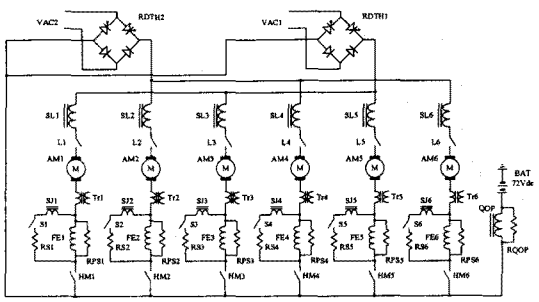

그림 1 8000 계열 전기기관차 견인회로 구성

표 2 견인회로 주요 파라메터

항목	파라메터 값
입력전압	1040[Vac]
모터전류	0~1100[Adc]
평활 리액터(SL)	17[mH]
전기자(AM) 인덕턴스	500~800[uH]
계자(FE) 인덕턴스	200~300[uH]
약계자 저항(RPS)	0.7[ohm]
축전지(VAT) 전압	72[Vdc]

2.2 제안하는 접지검출 방법

본 논문에서는 병렬구성의 모터회로에 대하여 순시적인 교류등가회로를 해석하여 접지시에 나타나는 모터회로의 인덕턴스 변화를 검출하는 방법을 사용하여 접지개소를 검지한다. 또한 기존회로의 동작을 100% 보장하여야 하므로 QOP 계전기의 동작을 포함하여 회로해석을 수행하였다.

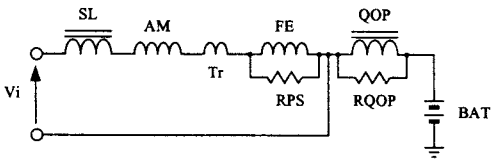

그림 2 해석을 위한 1 모터 등가회로

그림 2는 동작해석을 위하여 모터 회로부 1개를 등가회로로 나타낸 것이다. 모터의 입력부에 위치하고 있는 전류 평활용 리액터 SL은 약 17[mH]의 철심코어 인덕터이다. 전기자 권선(AM)과 계자 권선(FE)은 모터의 외부에서 연결하도록 되어 있으며 각각 약 700[μH]와 250[μH]의 크기를 갖고 내부저항은 모두 0.5[Ω] 이하의 작은 값으로 되어 있다. 약계자 저항(RPS)은 약 0.7[Ω]의 크기를 갖는다. 병렬연결된 모터의 음극 부분에 위치하는 접지검출 계전기(QOP)의 인덕턴스는 최소 200[mH] 이상이며 전압 밸런스용 저항(RQOP)의 크기는 150[Ω]이다. 한편 QOP 계전기를 동작시키기 위한 차내 축전지는 정상상태에서 72[Vdc]이다.

실시간 접지개소 검출을 위하여 제안하는 방법은 견인구동용 직류회로와는 별개의 검출용 교류회로를 독립적으로 동작시키는 것이다. 즉 차량의 접지를 음극으로 하고 모터의 전기자 권선에 일정 주파수를 갖는 교류 신호를 주입하여 전기자와 계자 및 QOP 계전기 코일부분의 리액턴스를 측정하여 접지 발생시의 리액턴스 변화를 검출하는 방법으로 각각의 모터에 대한 접지의 발생여부 및 접지개소를 판별하는 방식을 제안한다. 이를 위하여 일정주파수의 교류신호에 대하여 동작하는 하나의 모터회로 등가 회로를 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

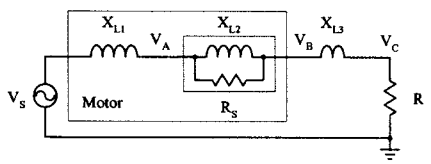

그림 3 접지검출을 위한 등가회로

그림에서 X_{L1}과 X_{L2}는 각각 전기자 및 계자의 리액턴스 성분이다. X_{L3}은 계자의 접지발생을 검출하기 위하여 삽입되는 추가의 리액턴스 성분이다. 회로에서 보면 SL이 제거되어 있는데 이것은 교류신호 V_S에 대하여 SL의 리액턴스가 매우 크므로 직류적으로는 병렬구조로 해석되나 교류적으로는 분리된 것으로 설정하여도 회로의 해석상 문제가 되지 않기 때문이다. 마찬가지로 QOP 계전기의 인덕턴스 성분도 SL의 수십 배에 해당할 만큼 매우 크므로 등가적으로 병렬로 연결된 저항 성분만 회로에 포함시켰다. 이와 함께 검출을 위한 교류신호에 대해서만 해석을 수행하므로 직류성분인 모터의 역기전력과 입력전압은 등가회로에서 제외하였다. 검출신호 V_S에 대하여 각 부분의 등가전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼저 계자 부분의 병렬등가 임피던스를 X_{L2}'로 놓으면

$$X_{L2}' = X_{L2} // R_S \tag{1}$$

가 되고 각 부분의 전압 V_A, V_B 및 V_C는,

$$V_A = \frac{X_{L2}' + X_{L3} + R}{X_{L1} + X_{L2}' + X_{L3} + R} \cdot V_S \tag{2}$$

$$V_B = \frac{X_{L3} + R}{X_{L1} + X_{L2}' + X_{L3} + R} \cdot V_S \tag{3}$$

$$V_C = \frac{R}{X_{L1} + X_{L2}' + X_{L3} + R} \cdot V_S \tag{4}$$

가 된다. X_{L3}은 모터의 외부에 위치하는 리액턴스이므로 모터의 내부에서 접지가 발생한다면 X_{L1} 또는 X_{L2}가 변동하게 되므로 주입신호 V_S에 대한 V_A 또는 V_B가 변동할 때 변화량 ΔV를 측정하면 각 모터의 접지발생 여부를 실시간으로 검출하는 것이 가능하게 된다.

2.3 신호의 주입 및 검출방안

전기기관차의 견인회로부는 최고전압 약 1400V의 직류회로이다. 또한 모터에 흐르는 전류 역시 최대 1000A 이상으로 동작하므로 모터 회로에 검출신호를 주입하는 것은 상당한 주의가 요구된다. 본 논문에서는 그림 4와 같이 직류를 차단하기 위한 캐패시터 분압회로를 사용하여 검출신호를 주입하고 접지에 따른 전기자 권선과 계자권선의 교류전압변화를 측정한다.

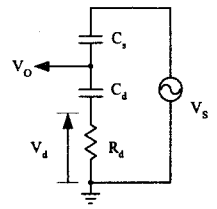

그림 4 신호주입 및 검출회로

먼저 접지가 발생되지 않은 경우에 대하여 회로의 동작을 살펴보면 다음과 같다. 주입신호 V_o는 SL과 연결되는 전기자의 시작부분에 주입된다. 접지가 발생하지 않는다면 0 전위에 대하여 무한대의 임피던스를 갖게되므로 검출신호 V_d는 다음과 같이 구해진다. 편의상 C_s와 C_d가 동일한 크기를 갖는 캐패시터로 정의하면,

$$X_{Cs} = X_{Cd} = X_C \tag{5}$$

$$V_d = \frac{X_C + R_d}{2X_C + R_d} \cdot V_s \tag{6}$$

가 된다. 만일 R_d가 충분히 커서 $X_C \ll R_d$ 가 된다면 식 (6)은 다음과 같다.

$$V_d \cong \frac{R_d}{R_d} \cdot V_s = V_s \tag{7}$$

따라서 접지가 발생하지 않는다면 V_d는 V_s와 거의 동일한 전압으로 검출된다. 한편 전기자나 계자에 접지가 발생하게 되면 다음과 같은 전압이 검출된다. 먼저 모터 회로의 직렬등가 임피던스를 X_m이라 할 때,

$$X_m = X_{L1} + X_{L2}' + X_{L3} + R \tag{8}$$

가 되고,

$$V_d = \frac{X_m // (X_{Cd} + R_d)}{X_{Cs} + X_m // (X_{Cd} + R_d)} \cdot V_s$$
$$= \frac{X_m // R_d}{X_{Cs} + X_m // (R_d)} \cdot V_s \tag{9}$$

가 되어 X_m의 변화에 대하여 검출되는 전압 V_d가 변화하게 됨을 알 수 있다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션회로의 구성

제안한 접지개소 접출방법의 유효성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 프로그램은 PSpice를 사용하여 수행하였으며 시뮬레이션 회로 및 사용된 파라메터는 아래와 같다.

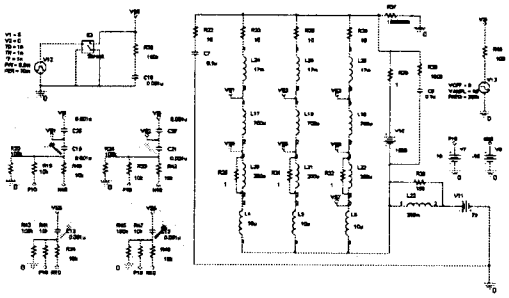

그림 5 시뮬레이션 회로의 구성

표 3 시뮬레이션 파라메터

항 목	파라메터 값
검출신호 주파수	정현파 200[kHz]
검출신호 전압	10[Vp]
검출 캐패시터 Cs, Cd	0.001[μF]
검출저항	10[kΩ]
전기자 인덕턴스	700[μH]
계자 인덕턴스	200[μH]
약계자 저항	1[Ω]
계자 인덕턴스	200[μH]
SL 인덕턴스	17[mH]
삽입 인덕턴스	10[μH]
축전지 전압	72[Vdc]
모터 전압	1000[Vdc]

시뮬레이션 방법은 하나의 컨버터에 병렬로 연결된 3대의 모터에 대하여 각각 전기자 상단(VS1, VS2, VS3) 및 계자 상단(VS4, VS5, VS6)에 검출 포인트를 지정하고 검출용 신호(VSI)를 각 모터의 전기자 상단에 주입한 후 일정시간이 지난 다음에 임의 모터의 전기자 및 계자를 접지시켰을 때 나타나는 각 부분의 파형을 관찰하였다.

표 4 신호 검출 위치

항 목	검출 위치
VS2	2번 모터 전기자
VS3	3번 모터 전기자
VS5	2번 모터 계자
VS6	3번 모터 계자
VS7	3번 모터 계자 후단

3.2 결과 및 고찰

그림 6은 시간축 9.5ms 지점에서 2번 모터 전기자 상단(VS2)이 접지된 것을 가정하여 시뮬레이션을 수행한 결과로 상위 첫 번째로부터 각각 2번 모터의 전기자(VS2)와 계자(VS5), 3번 모터의 전기자(VS3)와 계자(VS6)의 신호검출 파형이다. 그림에서 보이는 것처럼 접지가 발생하면 임피던스가 급격히 줄어들게 되어 검출전압이 0에 근접하게 된다. 반면 접지가 발생된 부분을 제외한 나머지 부분은 과도상태가 지나 안정상태가 되면 여전히 검출신호가 발생되고 있음을 볼 수 있다. 그림 7은 2번 모터의 계자측에서 접지가 발생된 것을 가정한 것으로 그림 6에서와 마찬가지로 검출전압이 0에 근접하면서 접지가 발생되었음을 보이고 있다. 그림 8은 3번 모터의 계자의 후단 즉 모터 내부의 코일 중에서 리액턴스가 가장 작은 부분에 접지가 발생된 것을 가정하고 시뮬레이션을 수행한 것이다. 이 경우에도 그림 6, 7에서처럼 접지가 분명하게 검출될 수 있음을 보이고 있다.

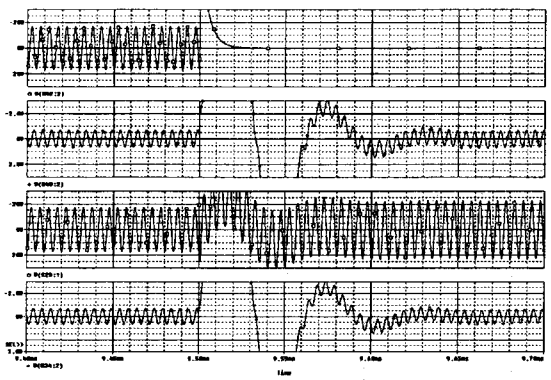

그림 6 전기자 접지시 부분 파형

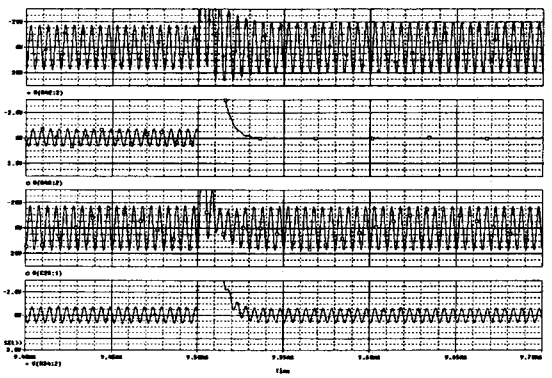

그림 7 계자 접지시 부분 파형

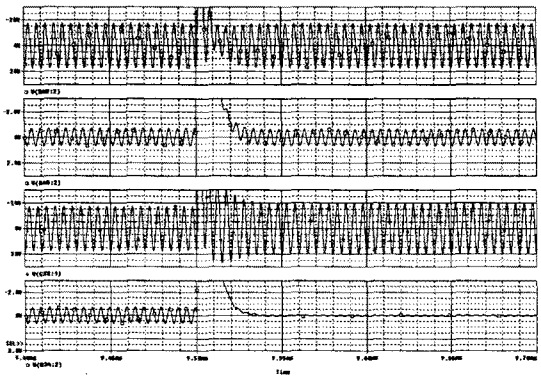

그림 8 계자 후단 접지시 부분 파형

4. 결 론

전기기관차 견인용 병렬구동 직류전동기의 접지개소를 검출할 수 있는 새로운 접지검출 방법에 대하여 제안하였다. 기존의 일괄 접지검출방법과는 달리 제안된 방법에서는 각각의 모터 접지를 선택적으로 구분할 수 있을 뿐 아니라 전기자와 계자의 구분이 가능한 특징을 갖는다. 또한 기존의 계전기 전압검출 방식의 경우 기계적인 접점의 동작으로 인하여 접지발생 후 수십 ms 이상이 지난 후에야 보호회로가 동작되어 모터에 가해지는 스트레스가 증가되는 현상이 있었으나 제안된 방식에서는 1ms 이내에 접지를 검출하는 것이 가능하므로 모터에 가해지는 스트레스를 상대적으로 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 도출된 시뮬레이션 결과를 바탕으로 검출 하드웨어를 제작하였으며 현재 실차 테스트를 준비 중에 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 박현준 외, "과도서지에 의한 견인전동기 고정자코일의 상태진단 연구", 전력전자학회 논문지, 제8권, 제3호, 247-252, 2003.6

[2] 왕종배 외, "철도차량용 견인전동기의 수명예측 및 절연신뢰성 평가방법에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 449-451, 1999.

[3] 철도청, 전기기관차 검수, 철도청, 1979.