

새로운 전기철도 시스템의 보호회로

김찬기, 유병우, 양병모, 정길조
한국전력 전력연구원

New protection circuit of electrical railway system

Chan-Ki Kim, Byeong-Woo Ryu, Byeong-Mo Yang, and Gil-Jo Jung
KEPRI(Korea Electric Power Research Institute)

ABSTRACT

본 논문에서는 직류선로 접지의 보호알고리즘을 제안한다. 전형적인 보호알고리즘과 비교하면 제안된 알고리즘은 공급선로와 고장선로 사이의 차이를 구별하는 장점을 갖는다. 제안된 알고리즘의 내용은 블로킹 필터와 PLC(Power Line Carrier)의 사용에 의해서이다. 시뮬레이션의 결과는 제안된 알고리즘이 매우 유용함을 나타낸다.

1. 서론

AC계통이나 DC계통은 전원단에서 수용가까지 직접적으로 전력을 전송하는 망(Network)을 구성하기 때문에 적게는 수십 개의 선로에서부터 많게는 수만 개의 망으로 구성된다. 우리가 사용하는 전력의 대부분은 낮은 가격으로 장거리 전송이 가능한 AC계통으로 이루어 졌고, 전자설비와 제어전원 그리고 지하철 또는 압연기와 같이 높은 에너지 집적도를 요하는 곳에서는 DC 계통을 이용하여 전력을 전송한다. DC계통은 AC계통과 다르게 커패시턴스와 인덕턴스에 의한 위상변화나 무효전력 소모 그리고 방향성을 고려할 필요가 없기 때문에 DC계통의 보호 알고리즘은 대단히 간단하지만, 이러한 간단한 알고리즘은 DC계통에서 보호기능의 단순화를 초래하여 “대구지하철 참사”와 같은 대형 사고를 유발한다.^[1]

지하철 구동 시스템은 그림 1과 같이 AC전압을 다이오드 브리지가 사이리스터 브리지를 이용하여 선로에 DC전력을 공급하고, DC선로에 연결된 인버터를 이용하여 전동차의 유도전동기를 구동한다. 그림 1에서 보여주는 지하철 구동시스템에서 DC선로의 지락 고장 검출 방식은 그림 2와 같이 구성되어 있다. 그림 2 a)는 정상상태에서 DC회로의 전류 루프를 표현하고 있으며, 그림 2 b)는 선로사고 시에 DC회로의 전류루프를 보여주고 있다. 그리고 그림 2 c)는 지하철 DC시스템에서 선로고장

알고리즘을 보여주고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 DC선로에 고장이 발생하는 경우에는 그림 2 a)와 b)와 같은 저항 다이오드회로를 이용하여 고장을 검출한다.

그림 2에서 보여주는 지락 검출 방식은 그림 3과 같이 병렬로 여러 회선이 있는 경우에는 사고가 발생한 선로를 찾을 수 없다는 단점을 가지고 있다. 즉, 그림 3에서 ①번 선로나 ②번 선로 그리고 ③번 선로에 지락이 발생하는 경우에는 사고가 발생한 선로를 구분하지 못하고 ④번으로 표현된 지락검출 회로가 동작한다. 일단 지락 검출회로가 동작하면, DC시스템은 모든 선로를 차단한 후에 각각의 선로를 수동으로 복구하면서 사고의 유무를 확인한다. 이러한 방식은 ①호선에서 고장이 발생한 경우에 정상적으로 운전되어야 할 ②호선이나 ③호선도 동시에 정지를 시키는 단점을 가지고 있으며, 최악의 경우에는 대구 지하철 사고와 같은 대형 참사를 유발할 수 있다. 혹자는 각 선로마다 전압계와 전류계를 설치하여 전압강하나 전류성분을 측정하여 보호회로에 이용하면 되지 않느냐하는 질문을 가질 수 있으나, 지하철 시스템의 DC선로의 전압과 전류는 여러 대의 전동차가 수시로 기동/정지를 하기 때문에 심한 왜곡과 변동은 가져오고 이러한 심한 변동은 DC선로의 고장에 의해서 발생하는 것인지 아니면 전동차의 기동/정지에 의하여 발생하는 것인지를 구분하기 힘들다.^[3]

이러한 이유로 인해서 전 세계적으로 지하철의 DC계통의 선로 지락 검출시스템은 그림 2와 같은 방식을 이용하고 있다.

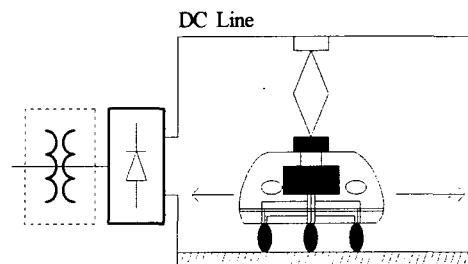


그림 1 지하철 구동시스템

Fig. 1 Subway Driving System

2. PLC를 이용한 DC선로 보호

2.1 PLC회로의 일반적인 사항^[2]

PLC는 Power Line Carrier의 약자로서 전력 계통선로에 고주파를 이용하여 통신을 하는 방식으로 매우 오랜 역사를 가지고 있다.

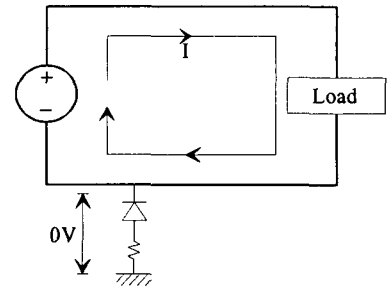
그림 4는 PLC 알고리즘을 보여주고 있는 것으로 선로 양단에 특정 고주파를 차단하는 블록킹 필터와 선로에 고주파를 인가하는 부분 그리고 선로의 전압과 전류를 검출하는 신호 측정부로 구성되어 있다. 그리고 그림 4 b)는 선로에 고주파를 인가하는 부분을 보여주고 있는 것으로 오실레이터는 선로에 인가하고자 하는 고주파를 발생시키는 부분이고, 오실레이터 필터는 특정 고주파를 증폭하고 다른 고주파는 제거하는 부분이며, 커플링 필터는 특정 고주파만을 통과시키는 기능을 가지고 있다. 또한 커플링 콘덴서는 고주파 인가회로를 주 전원과 분리시키면서 고주파를 직류선로에 인가해주는 부분이다.

2.2 DC선로에 PLC 회로의 적용

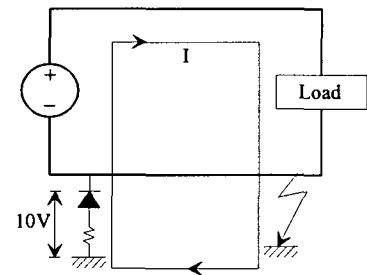
그림 5는 위에서 설명한 PLC 회로를 DC선로에 적용한 경우를 보여주고 있다. 그림 5의 알고리즘은 그림 2에서 보여주는 기존의 알고리즘에 그림 5에서 보여주는 PLC 알고리즘을 합성한 것으로 각각의 선로에 PLC 알고리즘을 적용하고 PLC 회로에서 나오는 Trip 신호(정지신호)와 기존의 지락 사고 시에 발생하는 다이오드 저항회로의 Trip 신호를 AND회로를 거쳐 각각의 AC차단기의 Trip 신호로 입력한 것이다.

2.3 PLC 회로의 신호 측정부

그림 6은 그림 4와 그림 5에서 보여주는 신호 검출부분을 신호 흐름 선도로 보여주고 있는 것으로 직류선로로부터 검출된 전류와 전압은 제어회로의 레벨에 맞는 신호레벨로 변화시켜주기 위해서 전류는 전류 게인을 거치고, 전압은 위상을 보정하는 위상보정회로와 전압 게인을 거친 후에 전류와 전압 신호는 비교기에서 신호를 서로 비교하여 전압과 전류의 오차신호는 밴드 패스 필터로 주입된다. 밴드 패스 필터는 전압과 전류의 오차신호에 포함되어 있는 고주파만을 통과시키는 회로이며, AC 커플링 회로는 밴드 패스 필터를 통과한 신호 중에서 직류신호는 제거하고 순수한 AC고조파 성분만을 통과시키는 회로를 말한다. 교류 커플링 부를 통과한 신호는 전파 정류 회로와 평활 필터를 거친 후에 직류레벨로 바뀌고, 직류레벨로 바뀐 신호는 비교기에서 고장에 대한 신호 레벨을 가지고 있는 기준 값 ①(Reference ①)과 비교하여 신호를 발생시킨다. 발생된 신호는 정해진 시간동안 동작을 지연시키는 Time Delay 회로를 거친 후에 Trip 신호(정지 신호)를 발생시킨다. 그림 6 부분에서 전압과 전류와 같이 차원이 다른 신호를 서로 산술적으



(a) 정상상태에서 DC회로의 전류루프



(b) 선로사고 시에 DC회로의 전류루프

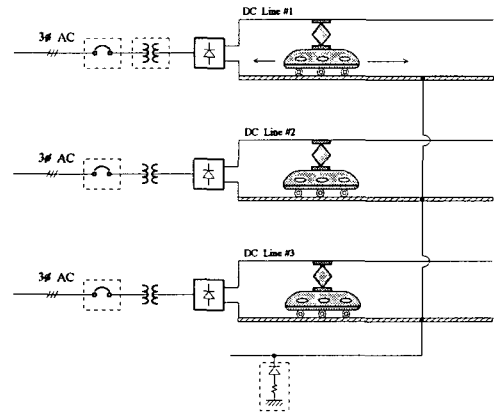


그림 2 DC선로의 지락검출방식
Fig. 2 Fault Detection of DC line

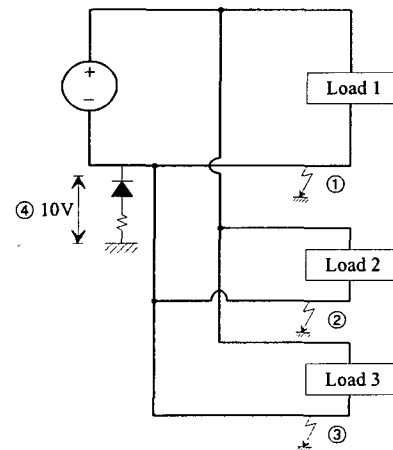
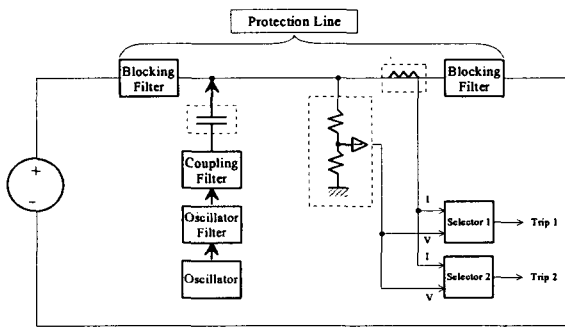
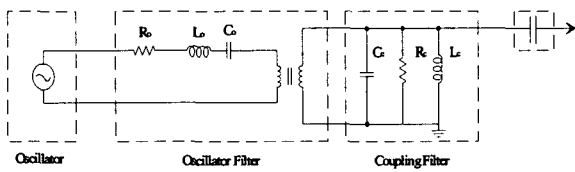


그림 3 병렬 DC선로에서 고장이 발생한 경우
Fig. 3 The Case of Parallel DC Line Faults.



(a) PLC 알고리즘



(b) 선로에 고조파 인가

그림 4 PLC 알고리즘

Fig. 4 PLC Algorithm

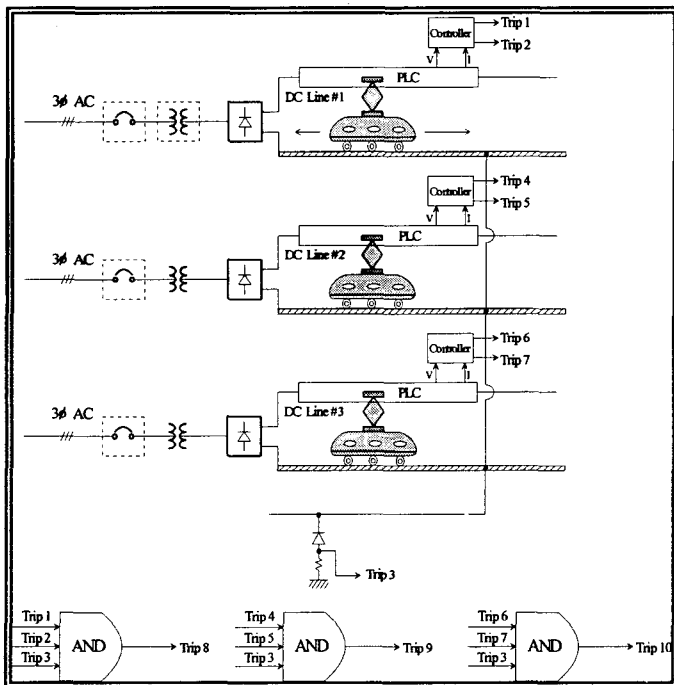


그림 5 PLC를 이용한 DC선로의 고장 검출 알고리즘

Fig. 5 DC Line Fault Detection Using PLC Algorithm

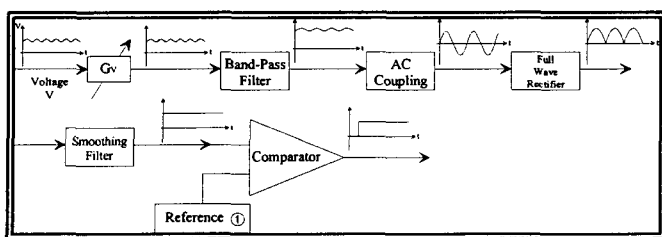


그림 7 신호 측정부의 Selector 2

Fig. 7 Selector 2 of Signal Measurement

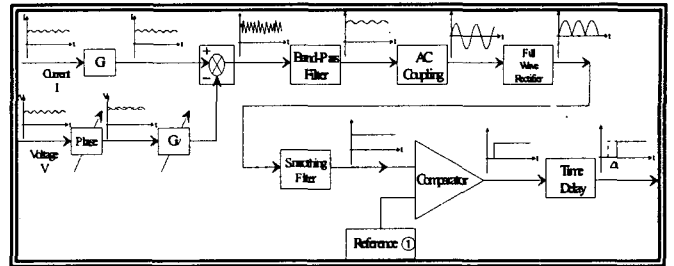


그림 6 신호 측정부의 Selector 1

Fig. 6 Selector 1 of Signal Measurement

로 가감하는 이유는 DC선로에서 원거리 고장이 발생하면, 전압이 완전히 영(零)이 되는 것이 아니라 선로의 저항과 커패시터 그리고 인덕턴스에 의해서 크기와 위상이 바뀌기 때문에 이러한 점을 이용하여 선로 고장을 검출하는 알고리즘이다. 한편 그림 7은 전압신호를 이용하여 근거리 선로고장을 검출하는 알고리즘으로써 전압신호는 직류선로의 고장에 대한 많은 정보를 가지고 있기 때문에 전압 신호만을 검출하여 이 신호를 밴드 패스 필터와 AC 커플링을 거치고 이 신호를 직류레벨로 맞추기 위해서 전파 정류회로와 평활 필터회로를 거친다. 마지막으로 평활된 신호는 고장에 대한 신호 레벨을 가지고 있는 기준 값 ①(Reference ①)와 비교하여 Trip 신호(정지 신호)를 발생시킨다.

3. 제안된 DC선로 고장검출 알고리즘의

시뮬레이션

그림 8은 제안된 알고리즘을 확인하기 위해서 시뮬레이션을 수행하기 위한 모델링을 보여주고 있는 것으로 그림 8에서 보여주는 선로의 모델링은 π 등가회로를 4개 연결한 것으로 집중정수회로와 분포정수회로가 갖는 장점을 이용한 것이며, 시뮬레이션 상에서 나타날 수 있는 수치적인 돌입전류와 수치적인 공진현상을 제거하기 위해서 만든 회로이며, 블록킹 필터로 사용되는 커패시터는 우리가 차단하고자하는 공진주파수에 맞도록 설계해야 한다. 그림 8에서 보여주는 회로는 기존의 선로에 추가적으로 RLC회로를 추가한 회로이기 때문에 정상상태에서는 큰 문제를 유발하지 않지만 전동차가 기동하는 경우 또는 선로를 투입하는 경우에는 아무리 커패시턴스와 인덕턴스가 DC회로에서는 영향이 없다하더라도 과도적인 돌입전류와 왜곡된 전류가 발생할 수 있다. 따라서 과도상태에서는 왜곡된 돌입전류와 전압에 의한 DC선로 공진이 발생할 수 있기 때문에 댐핑회로의 저항 R의 설계는 필수적이다. 또한, 선로에 인가하는 신호용 고주파의 선택은 제안한 시스템의 성능을 좌우하는 요소로써, 선로길이와 손실 그리고 커패시턴스의 크기를 좌우하는 역할을 한다. 표 1은 시뮬레이션에 사용되는 선로정수 파라미터와 블록킹 필터의 값 그리고 고조파원에 대한 값을 나타낸다. 그림 9는 블록킹 필터가 동작되는 상태를 보여주고 있으며 그림 9 (a)는 블록킹 필터 전단의

전류파형이고 그림 9 (b)는 블로킹 필터를 통과한 후의 전류 파형을 나타낸다. 블로킹 필터를 통하여 전류 고조파 성분이 제거됨을 보여주고 있다. 그림 10 ~ 그림 12는 그림 8에서 나타난 각 위치에서 지락사고가 발생한 경우의 전류와 전압파형을 나타내고 있다. 사고의 위치가 ①번과 ②번은 지락사고 후에 전압이 0으로 되지만 ③번은 지락사고 후에도 0으로 되지 않고 일정한 값을 갖는다. 그림 13 ~ 그림 15는 대지저항을 고려한 상태에서의 지락사고를 나타내며, 이때는 전압이 0으로 되지 않고 약간 하강하게 된다. 그림 16 ~ 그림 18은 선로에서 개방사고시의 각 위치에서 전류와 전압의 파형이다. 근거리에서 사고가 발생하였을 경우에는, 즉 ①번 위치에서 개방사고가 발생하였을 경우에는 전류가 0으로 되고 전압은 상승한다. 하지만 ②번 위치와 ③번 위치에서는 다른 지로가 있기 때문에 사고가 나기 전의 전류의 값과 전압의 값이 사고가 발생한 이후에도 유지된다.

그림 19와 20은 주입한 고조파주파수를 1kHz와 100Hz일 때의 필터 전단과 후단의 전류 파형을 나타내었다. 동일한 커패시터 용량에서 주파수가 높은 경우에는 필터링이 되고 있지만, 주파수가 낮은 경우에는 필터링이 되지 않음을 보인다. 만약 저주파수에서 필터링을 하려면 필터 커패시터의 용량을 증가시켜야 한다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation Parameter

Parameter		Value
Input	DC Current	840A
	Amplitude	10A
Harmonic Source	Frequency	520Hz
	Coupling capacitor	1uF
	Capacitor	500uF
Blocking Filter	Resister	50Ω
	Capacitor	0.05uF
Line Constant	Inductor	6.5mH
	Resister	0.166Ω

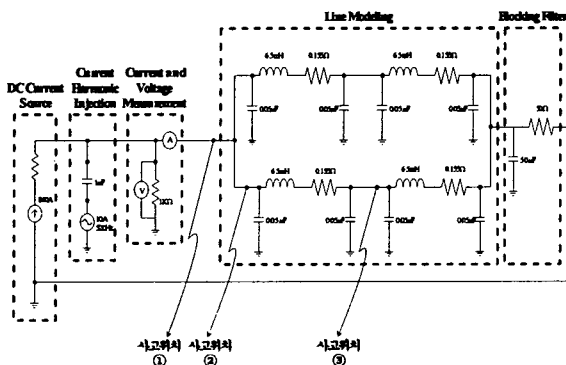
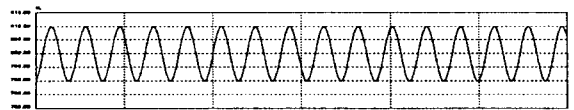
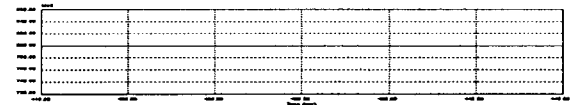


그림 8 시뮬레이션 모델링

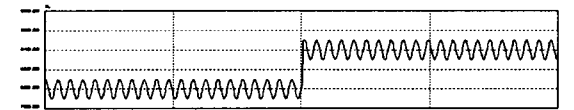


(a) 필터앞단의 전류파형

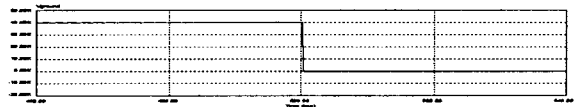


(b) 필터 뒷단의 전류파형

그림 9 전류주입시 필터링 전과 후의 전류파형

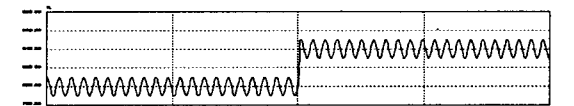


(a) 전류파형

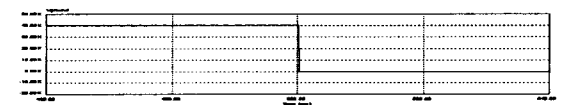


(b) 전압파형

그림 10 근거리 지락시 전류와 전압파형 (①번 위치)

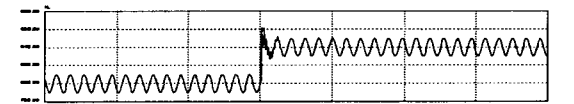


(a) 전류파형

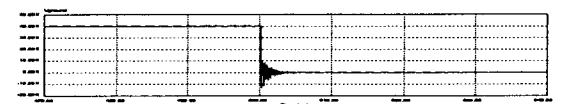


(b) 전압파형

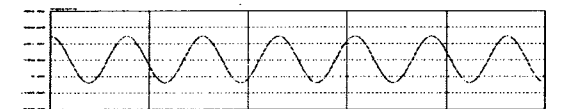
그림 11 2번 위치에서 지락사고 발생시



(a) 전류 파형

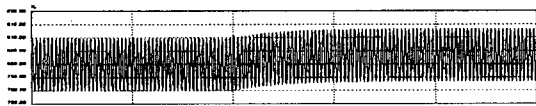


(b) 전압파형

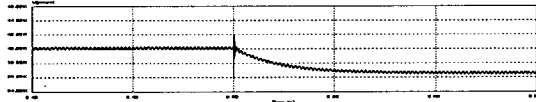


(c) 지락후의 전압파형

그림 12 3번위치에서의 지락사고 발생시

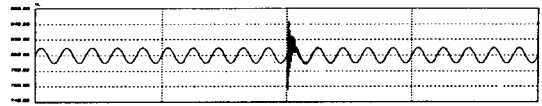


(a) 전류파형

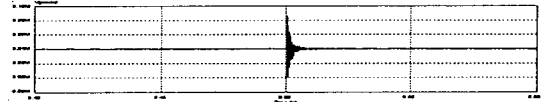


(b) 전압파형

그림 13 근거리 대지저항 고려한 지락사고 발생시(500Ω)

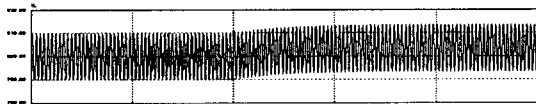


(a) 전류파형

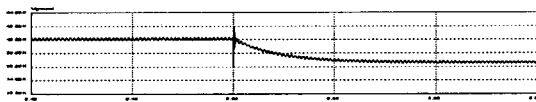


(b) 전압파형

그림 18 3번 위치에서 개방사고 발생시



(a) 전류파형



(b) 전압파형

그림 14 2번 위치에서의 대지저항을 고려한 지락사고 발생시

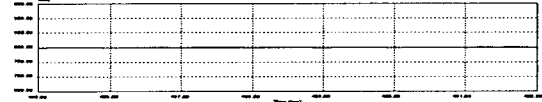
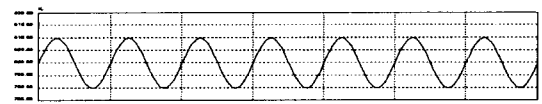
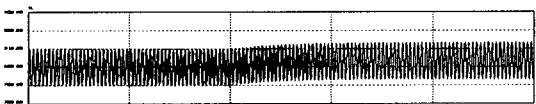
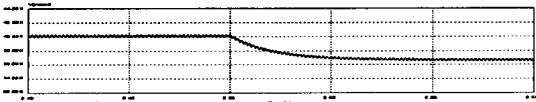


그림 19 주입 주파수를 1kHz로 한 경우에 필터 전단과 후단의 전류파형



(a) 전류파형



(b) 전압파형

그림 15 3번 위치에서의 대지저항을 고려한 지락사고 발생시

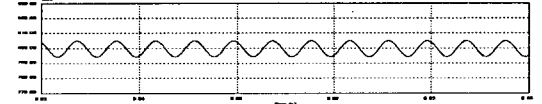
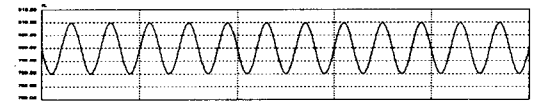


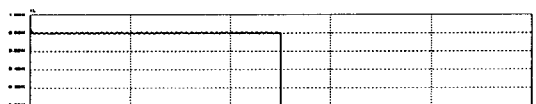
그림 20 주입 주파수를 100Hz로 한 경우에 필터 전단과 후단의 전류파형

5. 결 론

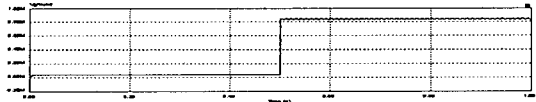
본 논문에서는 기존의 병렬 DC선로 보호시스템에서 감지하지 못하는 문제점을 PLC를 이용하여 해결하였다. 제안된 방법은 단순하면서도 효율적으로 적용될 수 있는 것으로 앞으로 본격적인 이용이 기대된다고 볼 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] "지하철 구동시스템", 우진산전 보고서, 2000.
- [2] "HVDC Handbook", EPRI, 1999.
- [3] Aoyama, A. Nishio, Yasuoka, and E. Takahara, "The Individual-Axle-Control (IAC) Traction System for Electric Railcars", *Proc. IPEC-Yokohama*, p. 801, 1995.
- [4] Duffy, M.C., "Three-phase motor in railway traction" *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A*, Volume 139 Issue 6, pp. 329-337, Nov. 1992.

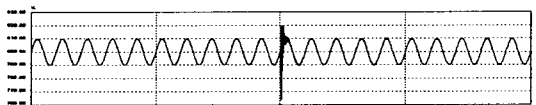


(a) 전류파형

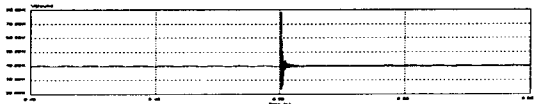


(b) 전압파형

그림 16 근거리 개방사고 발생시



(a) 전류파형



(b) 전압파형

그림 17 2번 위치에서 개방사고 발생시