

부하 특성에 따른 교류 급전시스템에서의 보호방식 연구

정호성, 한문섭, 이장무, 김주락
한국철도기술연구원

A Study on Protection system to the Load Characteristics on the AC Feeder System

Jung Ho-Sung, Han Moon-Seob, Lee Chang-Mu, Kim joorak
Korea Railroad Research Institute

Abstract - At present, distance relay and ΔI current increment relay are used as primary and secondary protection in the AC feeder system. However, electric railway vehicles according to power electronic's development had developed resistance control, thyristor phase control and PWM control system, and operation of train is increasing in a feeder section.

Therefore this paper analyzes the load characteristics and situation of relay's maloperation caused by load current increase, harmonics, regenerative braking current and operation of the different vehicles in same feeder section. Based on this analysis, this paper proposes consideration items for relay correction and advanced adaptive relay that can change operation area according to load current.

1. 서 론

고속철도 개통과 더불어 우리나라 철도시스템의 전철화는 비약적으로 증가되고 있다. 간선의 전철시스템 대부분은 교류 급전시스템으로 전력회사로부터 수전한 3상 교류전력을 스코트 변압기를 이용하여 90° 위상차가 나는 2개의 단상 전력으로 변환하여 전력을 공급하고 있다. 이러한 교류 급전시스템도 직접급전방식에서 BT 급전방식으로 그리고 최근에는 AT급전방식을 발전해 오고 있다. 또한 전기철도차량도 전력전자 기술개발에 따라 저항제어차량, 사이리스터 위상제어차량 그리고 PWM 제어차량으로 발전해 왔다. 이러한 교류 급전시스템에서의 고장은 차량 및 지상설비의 피해뿐만 아니라 열차운행 중단이나 인명 및 재산피해 등으로 파급되기 때문에 보다 신뢰성 있는 보호방식이 요구된다. 변전소에는 일반적으로 변전소에서 계속되는 임피던스의 크기를 이용하는 거리계전기를 주보호로 그리고 일정시간동안의 전류 변화량을 이용하는 ΔI 형 고장선택장치를 후비보호로 사용하고 있다.

하지만 여객·화물 수송량의 증가에 따라 동일 급전구간내에 열차 운행 횟수의 증가와 인버터 제어방식으로 인한 고조파 발생과 회생제동방식의 채택으로 인한 역행 부하와 회생부하의 경합, 그리고 동일 급전 구간내에 상이한 제어방식 차량의 운행 등으로 인해 고장 발생시 고장검출이 어려워지며 또한 계전기의 오동작을 발생시킬 수 있다.

따라서 본 논문에서는 현재 운행중인 다양한 전기철도 차량의 부하특성과 운행 상황에 따라 발생할 수 있는 계전기의 오동작 상황을 비교 분석하였으며 신뢰성 있는 보호를 위해 계전기 정정시 고려할 사항 및 기능이 개선된 보호계전방식을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 교류 급전시스템에서의 보호 방식

교류 급전시스템에서는 거리계전기와 ΔI 형 고장선택장치를 이용한 이중화된 보호방식을 적용하고 있다. 그림 1에서와 같이 주보호 기법인 평행사변형 거리계전기(44F)에서는 변전소(SS)로부터 급전구분소(SP)간의 선로 임피던스의 120%까지 보호하도록 정정되어 있다. 또한 후비보호 기법인 교류 ΔI 형 고장선택장치(50F)는 부하전류의 변화분과 고장전류의 변화분을 크기의 차를 이용하여 고장을 검출하도록 되어 있다.

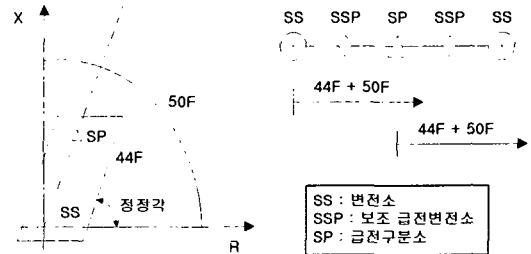


그림 1. 교류 급전시스템의 보호계전방식

거리계전기법은 변전소에서 계속되는 전압과 전류를 이용하여 임피던스를 구하고 그 크기가 RX 평면상의 고장 임피던스 영역 이내로 수렴하는 경우에 고장을 검출한다. 하지만 초기 급전시 AT투입이나 절체 색선 통과 시 차량용 변압기의 무부하 여자돌입으로 인한 2고조파의 인한 오동작을 방지하기 위해 2고조파의 크기가 일정치 이상인 경우에는 계전기의 동작을 제한하고 있다.

ΔI 형 고장선택장치는 차량부하의 증가로 인해 거리계전기법의 부하영역과 고장영역의 구분이 어려운 경우(식 (1)에서와 같이 부하전류의 notch별 전류변화분 (ΔI_1)과 고장전류의 전류변화분 (ΔI_2)의 크기를 비교하여 고장을 검출하는 기법이다.

$$\Delta I_1 < \Delta I < \Delta I_2 \tag{1}$$

ΔI 형 고장선택장치에서도 초기 급전시 및 재폐로시에 큰 무부하 여자돌입전류에 대한 계전기의 오동작을 방지하고 있다. 또한 고장이 발생하기전의 부하전류의 크기에 따라 그 보호범위를 조정할 수 있어 부하증가에 따른 오동작을 방지할 수 있다.

그림 2는 AT 교류 급전시스템에서의 계전기 동작을 보여주기 위한 임피던스 맵이다. 거리계전기에서의 리액턴스 요소의 정정은 변전소로부터 급전구분소간의 선로 리액턴스의 120%정도로 정정되어 있으며, 저항요소의 정정은 급전시스템의 고압기기의 접지저항인 10 Ω (제 1종 접지기준)으로 정정되어 있다. 또한 후비보호인 ΔI 형 고장선택장치는 최대부하전류의 50%~60%를 적용

하고 부하전류의 크기에 따라 보호 영역을 조정하며 거리계전기의 보호영역과 중첩이 되지 않도록 조정한다.

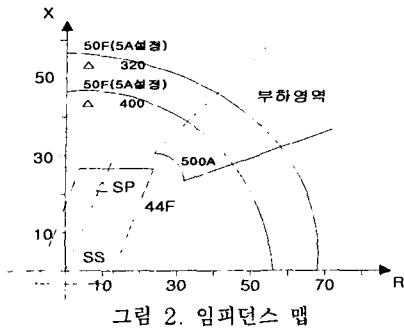


그림 2. 임피던스 맵

2.2 교류 급전시스템 보호를 위한 부하 특성

교류 급전시스템에서는 직접급전방식, BT 급전방식에서 단상교류 25kV를 급전전압으로 하는 AT 급전방식으로 발전해왔다. 또한 전기차량의 제어방식도 전력전자소자의 기술개발에 따라 저항제어 방식에서 사이리스터 위상제어방식으로 그리고 PWM 제어방식으로 발전해왔다. 현재 산업선에서는 사이리스터 위상제어 방식인 EL800대 차량에서 PWM제어방식인 EL8100대 차량으로 교체중이며 고속선에서는 사이리스터 위상제어방식인 KTX가 운행되고 있으며, 향후 PWM 제어방식인 한국형 고속전철 차량이 운행될 계획이다. 따라서 동일 구간에 상이한 제어방식의 차량 운행과 운행횟수의 증가로 인한 부하특성을 고려해야 한다.

2.2.1 차량 제어방식에 따른 부하 특성

그림 3은 전차선으로부터 인가된 교류전압을 세미브리지형 사이리스터와 다이오드가 복합된 정류기를 이용하여 사이리스터 위상을 제어하여 속도를 변화시키고 약 계자제어에 의해 견인력을 변화시키는 사이리스터 위상 제어차량의 구성도이다.

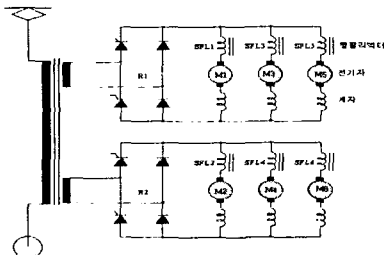


그림 3. 사이리스터 위상제어차량 구성도

그림 4는 변전소에서 본 저항제어 및 사이리스터 위상제어 차량의 부하 임피던스를 나타낸 것으로 최대 역행시 역률이 0.7~0.8 정도이며, 부하 급증시 거리계전기 보호영역에 근접함을 알 수 있다.

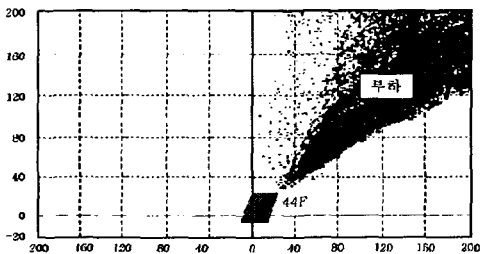


그림 4. 저항제어 및 사이리스터 위상제어차의 부하영역

고속철도에서 운행되는 사이리스터 위상제어방식인 KTX의 경우에는 PFC(Power Factor Compensator)를 투입하여 역률을 보상하고 있어 차량 1대당 부하역률을 0.8이상으로 유지하고 있다.

그림 5는 단상교류 상용주파수의 급전전압에서 직류 정전압으로 전력을 변환하고 전력변환기에서 발생하는 교류전압이 펄스전압으로 구성되어 펄스폭을 교류전압으로 변환시키는 PWM 제어차량의 구성도이다.

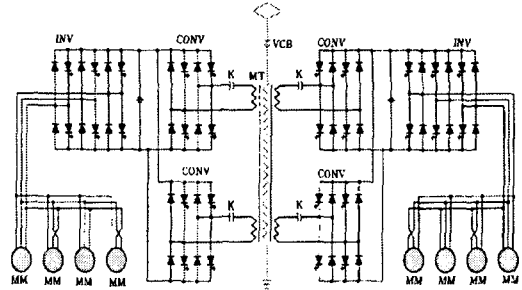


그림 5. PWM 제어차량 구성도

PWM 제어차량은 교류입력전압이 거의 정현파에 가까워서 다른 제어방식에 비해 저차 고조파의 함유가 매우 작다. 또한 연속속도로 역행과 회생제어를 할 수 있으며 급전전압 및 견인전동기의 크기에 관계없이 역률이 항상 ±1이 되도록 제어된다. 그림 6은 PWM제어차량의 부하영역으로 역행시의 역률은 +1이며, 회생시의 역률은 -1에 유지됨을 알 수 있다.

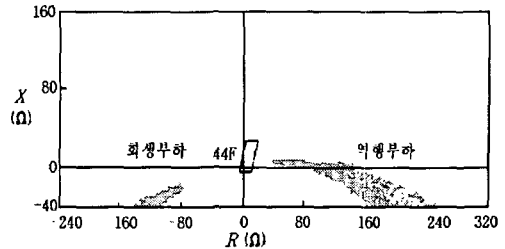


그림 6. PWM 제어차량의 부하영역

사이리스터 위상제어차량과 PWM 제어차량은 운행시에 고조파 전류가 발생하는데 이로 인해 기본과 전류에 영향을 미치게 된다. 그림 7은 사이리스터 위상제어방식인 KTX의 역행과 회생시 그리고 PWM 제어방식인 전기기관차(EL8100대)의 역행시 발생하는 고조파 전류의 크기를 비교한 것이다.

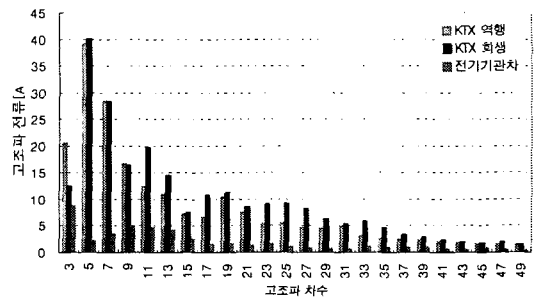


그림 7. 제어방식에 따른 고조파 전류 크기

일반적으로 PWM제어방식의 차량의 고조파 전류의 크기가 사이리스터 위상제어 방식에 비해 작다. 그리고

KTX의 경우에는 회생시에 고조파 전류가 역행시보다 크게 발생하였으며 PFC가 투입되지 않아 역률이 저하된 경우에는 저차 고조파의 크기가 현저히 커지는 특성이 있어 고조파에 대한 대책이 요구된다.

2.2.2 차량부하 증가에 따른 보호대책

경부고속철도의 경우에 개통시점에서의 평균 운행간격은 38.4[km]정도이며 통상 변전소의 방면별 급전거리가 25[km] 전후임을 볼 때 대체로 상·하행 각각 1대의 열차가 운행되고 있다. 하지만 향후 완전개통 시점에서의 평균 운행간격을 13.9[km]로 계획하고 있어 동일 급전구간에 4대(상·하행선 각각 2대)로 운행될 수 있다. 이와 같이 한 급전구간에 전기철도차량의 운행이 증가되면 기존에 정정되어 있는 계전기에서의 고장영역과 부하영역의 구분이 매우 어려워진다. 특히 사이리스터 위상제어차량의 경우에 역률보상을 위해 PFC를 수시로 투입하고 있으나 PFC의 동작이 원활하지 못하여 역률이 저하되는 경우에는 오동작을 할 수 있다(그림 8-D). 또한 무부하 변압기에 전원 투입시 및 섹션 통과시에 기존에 역행하는 차량부하와 섹션 통과차량의 부하 특성이 중첩되면 변전소에서 계속되는 임피던스를 고장 임피던스 영역 이내로 수렴할 수 있다(그림 8-E). 그리고 효율적인 급전시스템 운영을 위해 차량의 회생제동을 채용하고 있는데 이로 인해 회생제동 부하와 역행하는 부하의 중첩으로 인해 고장으로 판단할 수 있다(그림 8-F).

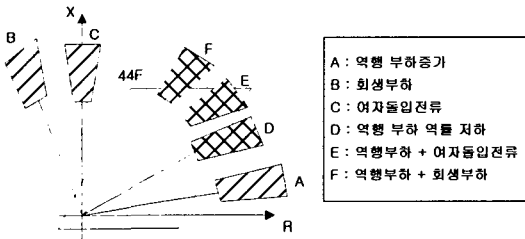


그림 8. 차량부하 증가로 인한 부하 임피던스 특성

또한 사이리스터 위상제어차나 저항제어차의 운행시에는 매우 큰 기수 고조파가 발생하여 전체적인 왜형률이 크게 되며 이로 인해 기본파 성분이 영향을 받게 되어 오동작의 우려가 있다. 또한 PWM 제어차량의 경우에서도 제어 특성상 발생하는 전압 스파이크 현상으로 인해 부하전류에 spike현상이 발생하게 된다. spike현상은 지속시간이 매우 짧아 보호에 크게 영향을 미치지 않는 않지만 동시에 여러 차량이 중첩되는 경우에 후비보호 계전 방식인 ΔI 고장선택장치의 오동작을 일으킬 수 있다.

이 외에도 사이리스터 위상제어차와 PWM제어차가 급전구간에 동시에 운행되는 경우에는 제어 특성으로 인한 부하역률, 고조파 발생 및 회생특성으로 보다 다양한 현상이 나타날 수 있다.

2.3 급전회로 보호시 고려사항

위에서 제시한 바와 같이 차량의 제어방식에 따라 다양한 부하특성이 나타나고 있으며 다양한 운전조건에 따라 계전기의 오동작이 발생할 수 있다. 따라서 부하특성과 운행조건에 따라 급전구간 보호시 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

- 방면별 급전방식, 연장급전, 병렬계전, 상하 타이급전방식 등의 급전시스템 구성과 급전구간의 급전선과 전차선, 급전선과 선로, 전차선과 선로와의 임피던스 특징 분석
- 사이리스터 제어차, PWM 제어차 등 전기차 제어방식별 부하특성 분석 및 상이한 제어방식의 차량이 동일 급전구간에서 운행할 경우의 특성 분석 : LOAD ANGLE, 고조파 크기, 여자돌입시 2고조파 크기

- 차량운행시 유효, 무효전력 분석(역률 분석)
- 구간내 최대부하전류의 크기

또한 부하 특성에 따라 보다 신뢰성 있는 보호를 위한 기능이 개선된 계전방식의 적용이 요구된다. 거리계전기법의 경우에 고장전류에는 고조파가 거의 없는 데 반해 부하전류에 상당한 양의 고조파가 함유되어 있는 특징을 이용하여 보호영역을 변경할 수 있는 적응형 기법이 적용되어야 한다. 이러한 기법으로는 식 (2)에서와 같이 고조파의 크기의 따라 고장검출을 위한 대(大)영역과 오동작을 방지하는 소(小)영역으로 동작영역을 전환하는 기법이나 식 (3)에서 같이 고조파의 크기에 따라 영역을 가변할 수 있는 기법 등이 있다.

$$K_3 = (K_1 I_{2f} + I_{3f} + I_{5f}) / I_{1f} = 5 \sim 15\% \text{ (1\% 간격)} \quad (2)$$

$$Z_{SET}' = 1 / (1 + K \Sigma_h) \cdot Z_{SET} \quad (3)$$

$$(K \Sigma_h = (I_{2h} + I_{3h} + I_{5h} + I_{7h}) / I_{1h})$$

또한 ΔI형 고장선택장치에서는 PWM 제어차가 운행되는 경우의 부하 역률각과 고장발생시 위상각의 차이가 커지는 특징을 이용한 벡터연산방식을 적용하여 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

이와 같이 보호의 신뢰성을 향상시키기 위하여 동일 급전계통에 다양한 제어차량의 운행으로 인한 보호계전기 정정시 고려할 사항과 기능이 개선된 적응형 계전방식을 제시하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 동일 급전구간내에 열차 운행의 증가로 인한 부하 증가와 인버터 제어방식으로 인한 고조파 발생과 회생제동방식의 채택으로 인한 역행부하와 회생부하의 경합, 그리고 동일 구간내에 상이한 제어방식 차량의 운행 등으로 보호계전기의 오동작이 발생할 수 있다.

따라서 보호의 신뢰성을 확보하기 위해 현재 운행중인 다양한 전기철도차량의 부하특성과 운행 상황에 따라 발생할 수 있는 계전기의 오동작 상황을 비교 분석하였다. 이를 바탕으로 계전기 정정시 고려사항을 제시하였으며 부하전류에 따라 동작영역을 가변할 수 있는 적응형 제시하였다.

향후 실계통을 대상으로 정정시 고려사항을 따라 데이터를 취득하여 분석하고 나아가 적응형 계전기법법의 검증을 통해 보다 신뢰성 있는 보호기법을 확립하고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] 交流電氣鐵道における保護技術調査専門委員會, “交流電氣鐵道における保護技術”, 日本電氣學會, 1996
- [2] 한국철도기술연구원, “경부고속철도 서울-대구 구간 전력 품질 안정화대책 연구(1)”, 한국고속철도건설공단, 2002
- [3] 한국철도기술연구원, “전차선로 회로정수 측정 및 보호회로 최적화 방안 연구”, 철도청, 1998
- [4] 이장무, 창상훈, 한문섭, 오광해, “전기철도 급전계통 임피던스 분석장치 개발”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp387-389, 1998
- [5] Gao Shibin, He Weijun, Chen Xiaochuan, “Study on Microprocessor-Based Adaptive Protective Relay for Heavy Duty Electric Traction System”, Developments in Power System Protection Conference Publication No. 434, pp319-322, 1997
- [6] Tefvik Sezi, Frank E. Menter, “Protection Scheme for a New AC Railway Traction Power System”, IEEE Transmission and Distribution Conference vol 1, pp388-393, 1999