전기동차 계기용 변압기 소손 해결방안 고찰

Solution Review of Potential Transformer burnout is installed in the EMU

장제혁*†, 이동수*, 김진돌*, 이봉운*

Jeahyok Chang*†, Dongsu Lee*, Jindol Kim*, BongWoon Lee*

Abstract The EMU, which operates in the Korean 186 cars in 1973 has been introduced is the first contract. (KORAIL126, Seoul Metro60) August 15, 1974, the train of the Seoul metropolitan area was opened. A velocity control system by the resistance control which was first introduced copper wheel. Is currently undergoing development, the train of the inverter control system that has been introduced into the first has been operating in 1994 Gwacheon line.

While running a new inverter control electric vehicles, some cases in which the vehicle potential transformer is burned occurs inconvenience to customers who use the train occurs. By presenting a solution to the cause of these failures was closely analyzed, I want to contribute to the improvement of services to the fall the image of recovery and national construction.

Keywords **:** EMU, Potential Transformer, Inverter, IGBT

초 록 국내에서 운영하고 있는 전기동차는 1973년 186량(당시 철도청 126량, 서울지하철 60량)이 최초 계약되어 도입되었으며, 1974년 8월 15일 수도권 전철이 개통되었다. 최초 도입된 전기동차는 저항제어에 의한 속도제어 방식이며, 현재는 발전을 거듭하여 1994년 과천선에 최초 도입된 인버터 제어 방식의 전동차가 운행중에 있다.

신형 인버터제어 전기동차를 운영하면서 일부 차량의 계기용 변압기(Potential Transformer)가 소손되는 사례가 발생되어 열차를 이용하는 고객에게 불편을 야기 시켰다. 이러한 장애 원인을 면밀히 분석하여 해결방안을 제시함으로써 공사의 실추된 이미지 회복 및 대국민 서비스 향상에 기여하고자 한다.

주요어 : 전기동차, 계기용변압기, 인버터, IGBT

1. 서 론

국내 전기동차는 1973년 대일 차관금에 의해 전기동차 186량(철도청 126량, 서울지하철60량)이 구매, 계약 되었으며, 1974년 4월 일본에서 차량이 최초 도입되었다. 이 차량이 1974년 8월 15일 1호선(서울-수원, 구로-인천, 청량리-성북) 노선의 시초가 되었다. 당시 도입된 차량은 6량 1편성(Tc-M-M`-M-M`-TC의 4M2T구성)이며, 속도제어 방식은 저항 제어 속도 방식을 적용하였다. 현재의 전기동차 차량 편성이 10량(5M5T구성) 1편성, IGBT소자에 의한 인버터제어 방식과는 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

† 교신저자: 한국철도공사 연구원 엔지니어링센터(delmicro@korail.com)

* 한국철도공사 연구원

최초의 인버터 속도제어 방식의 전기동차는 1993년에 과천선과 분당선에 도입되었으며, 인버터 소자는 GTO가 적용되었으며, VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)제어 방식에 의한 속도 제어가 가능하게 되었다. 이와 함께 견인전동기도 직류전동기에서 3상 농형 유도전동기를 채택해서 사용하게 되었다. 2004년 이후에 도입된 전기동차는 인버터 소자를 GTO에서 최신 전력소자인 IGBT를 적용하게 되었으며, 2018년 이후 도입예정 전동차는 디스크 방식의 IGBT에서 모듈형 IGBT를 적용할 예정에 있다.

2. 본 론

2.1 계기용 변압기 소손 발생

2.1.1 계기용 변압기 역할

전기동차에서 계기용 변압기는 가선 전압을 검지하여 차량에 전차선의 전압과 주파수 정보를 차량에 설치된 열차종합정보장치(TGIS)에 달하는 역할을 담당하고 있다. 만약, 전차선 전압이 너무 낮거나, 높을 경우 차량의 변압기와 주전력변환장치(C/I)를 보호하기 위해 주회로차단기(MCB)를 차단한다. 계기용 변압기는 전차선(1차권선) AC 25kV를 검지하여 100V로 전압강하여 2차권선으로 검지한다.

2.1.2 발생 현황

계기용 변압기 소손 사례는 2006년부터 집계 되었으며, 세부 내역은 Table.1과 같다. 년도별 고장현황과 노선별 고장현황을 분석한 결과 2014년도 28건이 발생되어 2013년 4건에 비해 약 7배 증가함을 알 수 있고, 특히 분당선에서 23건이 발생되었음을 알 수 있다.

계기용 변압기의 소손은 폭발음과 함께 계기용 변압기에 설치된 비산물들이 분사되어 철도를 이용하는 고객에게 공포감을 제공하였으며, 공사의 이미지를 상당히 실추시킨 사건으로 조속한 원인분석 및 대책이 필요하게 되었다.

Table 1 Potential Transformer Failure Status

년도	경부	경의	경인	과천	분당	수인	안산	중앙	합계
2006	3								3
2007	1						1		2
2008									0
2009		1							1
2010		1							1
2011		1						3	4
2012	1		2			1		1	5
2013					3			1	4
2014	6			1	18		2	1	28
2015			1		2				3
합계	**11**	**3**	**3**	**1**	**23**	**1**	**3**	**6**	**51**

2.2 원인 분석

2.2.1 계기용변압기 2차측 전원 측정

계기용 변압기 소손 원인을 분석하기 위해서 분당선 노선에서 계기용 변압기 2차측에 계측기를 설치하여 계기용 변압기에 미치는 영향을 분석 하였다.

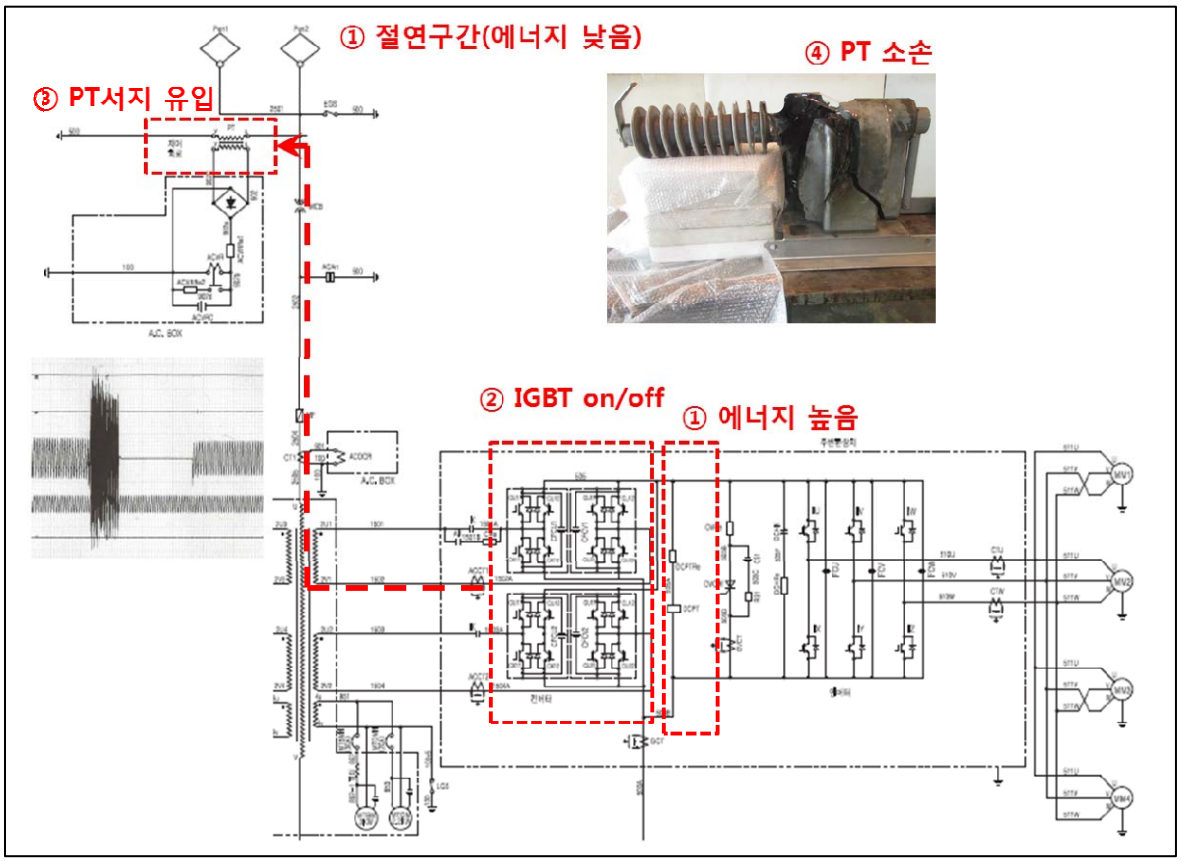

Figure 1 Surge Mechanism

계기용 변압기 2차측 전원을 측정한 결과 분당선에서 절연구간(총 2개소)을 통과하는 과정에서 계기용 변압기로 최대 141kVrms의 서지전원이 유입된 것을 확인하였다. 서지 전원이 계기용 변압기로 유입되는 원인을 분석한 결과 주전력변환장치(C/I)의 컨버터 부에 저장된 전력(에너지)이 무가압구간(절연구간)으로 진입하면서 에너지가 낮은 전차선 측으로 서지를 유입시킨 것으로 확인되었으며, 이 과정에서 전차선과 가장 가까이 위치한 계기용 변압기에 악영향을 미친 것으로 판단된다.

2.2.2 계기용 변압기 소손품 분석

계기용변압기의 소손 원인을 조금 더 명확히 분석하기 위하여 계기용 변압기 파손품을 수거하여 워터젯 절단을 시행하여 내부 코일의 열화 상태를 진단하였다. 진단 결과 계기용 변압기 1차측 코일 부분에 지속적인 과전압이 유입되었으며, 1차측 코일과 2차측 코일에 존재하는 층간 절연지 쇼트에 의해 계기용 변압기가 파손됨을 확인 하였다.

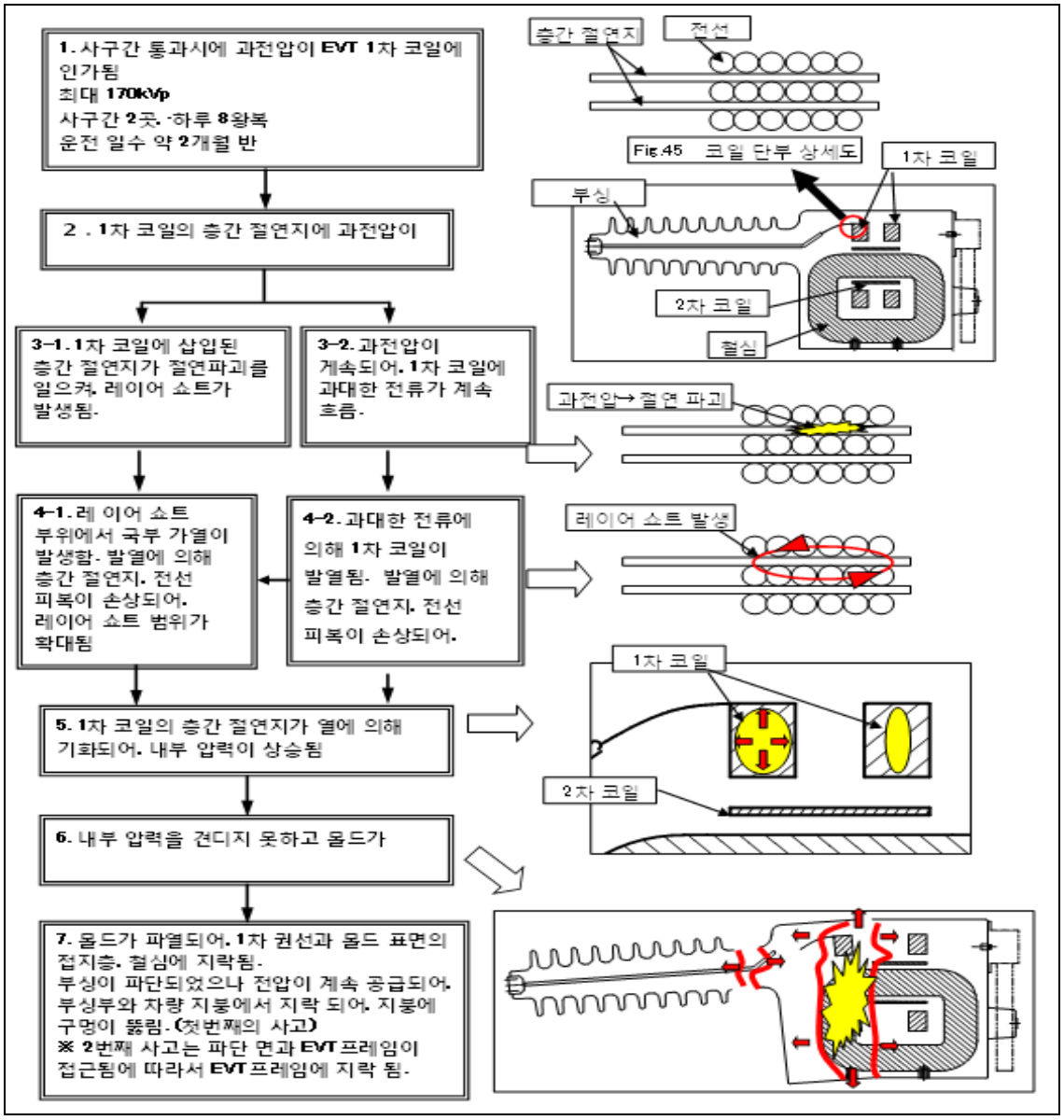

Figure 2 Potential Transformer failure analysis

2.2.3 전력 품질 측정

상기 Table.1 에서 알 수 있듯이 특정노선(분당선)과 특정 년도(2014년) 이후에 계기용 변압기 소손이 급격히 증가된 원인을 분석하기 위해 전차선의 전력 품질을 측정하였다.

전력 품질을 측정한 결과 왕십리 부근의 전차선 전압이 타 구간보다 높게 형성된 것을 확인 할 수 있으며, 전압 왜형율(THD) 또한 높게 형성됨을 확인할 수 있었다. 이것은 분당선 연장개통(`13.11)으로 운행구간이 증가한 시점과 일치하고, 특히 왕시리-서울숲 구간에서 집중적으로 발생한 것과 간접적 연관이 있는 것을 확인 할 수 있었다.

다만, 왕십리 구간 개통전에 측정한 전력 품질에 대한 데이터가 없고, 전압 왜형율이 높게 형성시키는 고조파가 차량에서 발생되는 것을 감안할 때, 전차선 전력 품질이 계기용 변압기 소손의 직접적인 원인으로 단정지을 수는 없는 것으로 판단된다.

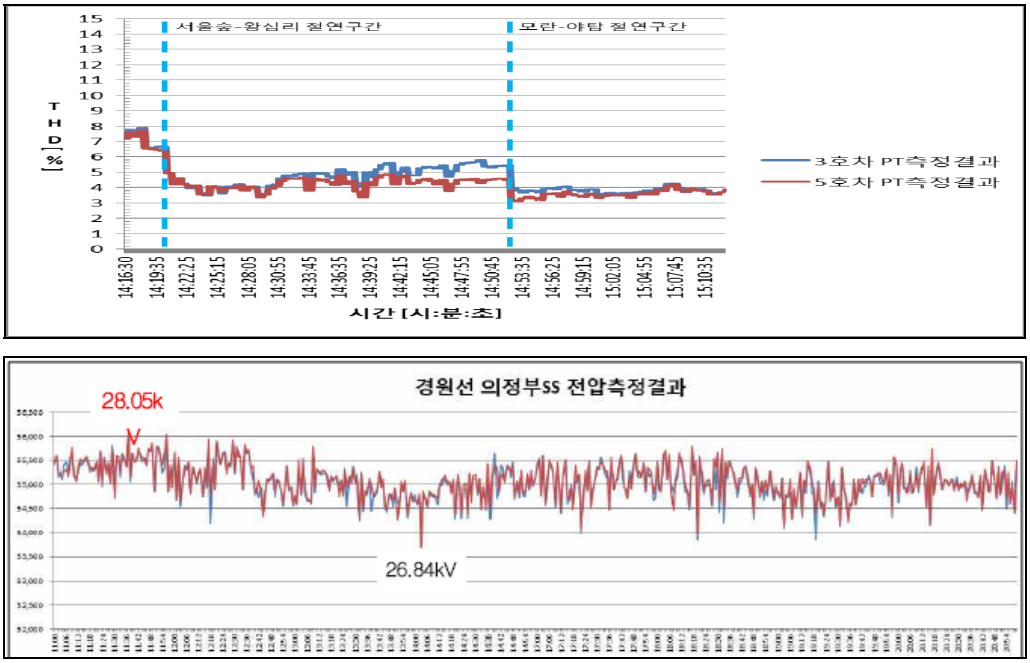

Figure 3 Catenary power quality measurements

2.3 대책

2.3.1 주전력변환장치 소프트웨어 변경

절연구간 통과시 계기용 변압기에 유입되는 서지전압을 억제 시키기 위해서는 절연구간 통과시 컨버터 DC링크단에 축적된 에너지가 에너지가 낮은 전차선 측으로 유입되지 않도록 해야 할 것으로 판단된다. 이러한 현상이 발생되는 원인은 컨버터 내부의 IGBT가 절연구간 내에서도 ON/OFF 동작을 하기 때문에 발생되는 것으로 판단된다.

따라서, 절연구간 진입 전 지상에 설치되어 있는 절연구간 지상자로부터 절연구간 진입 신호를 수신할 경우 컨버터를 정지하도록 소프트웨어와 회로를 개선하였다.

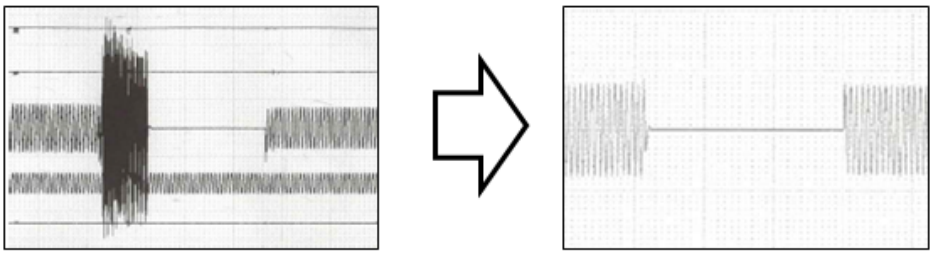

Figure 4 Improvement compared before and after surge

2.3.2 계기용 변압기 절연 성능 강화

계기용 변압기가 소손된 원인을 분석한 결과 크게 두 가지로 요약할 수 있다. 첫번째 원인은 절연구간 진입시 계기용 변압기 측으로 서지전압 유입이 원인이 될 수 있고, 두번째 원인은 계기용 변압기의 서지전압 내성이 약한 것이 원인이 될 수 있다.

첫번째 원인의 대책으로 절연구간 진입시 발생된 서지전압은 주전력변환장치(C/I) 소프트웨어 변경을 개선 가능하며, 두번째 원인의 대책으로 계기용 변압기의 서지전압 내성을

향상시켜야 한다. 물론 계기용 변압기는 IEC 60044-2(계기용 변성기 : 유도형 계기용 변압기)에 의거 최대 170kV(1.2/50us)의 충격전압에 견딜 수 있도록 설계 되었으나, 철도차량의 운용 환경의 특수성을 감안하여 더욱 큰 충격전압에 견딜 수 있도록 설계할 필요성이 제시되었다.

따라서, 계기용 변압기 1차 코일의 절연지를 약 1.5배 정도 두께를 향상시켰으며, 철심 코어에 갭을 추가함으로써 예기치 못한 자기포화에 대비 할 수 있도록 성능을 개선시켰다.

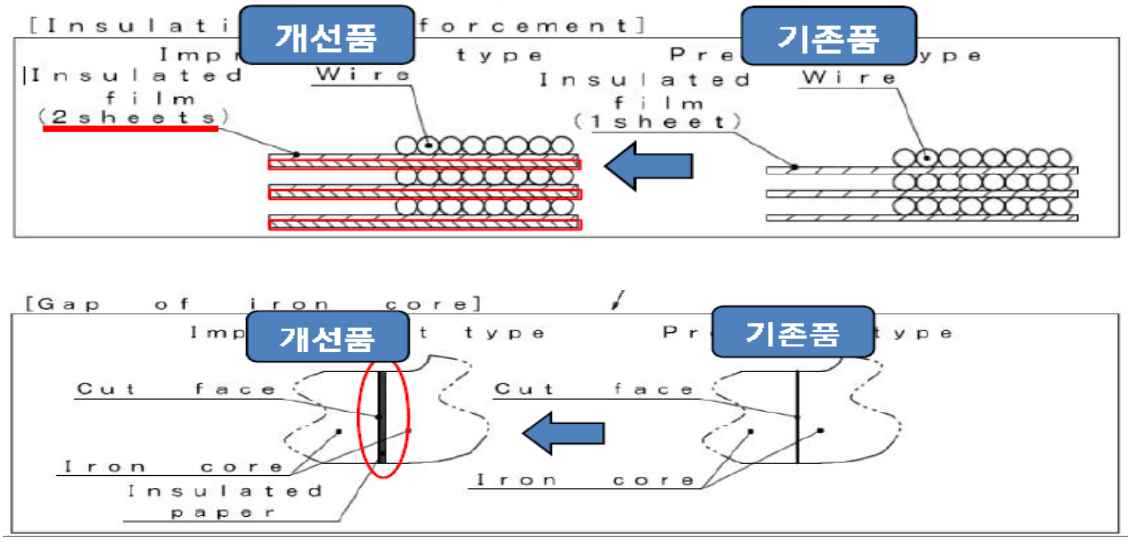

Figure 5 Improvement compared before and after insulation performance

이러한 개선사항을 확인하기 위하여 뇌 임펄스 250kV 전압을 200회 인가하여 시험하였으며, 계기용 변압기가 소손 되지 않는 것을 확인하였다. 기존품과 개선품의 V-n 곡선을 그려 확인 한 결과 170kV의 서지전압이 내력이 기존품 100,000회에서 10,000,000회로 향상된 것을 확인 할 수 있었다.

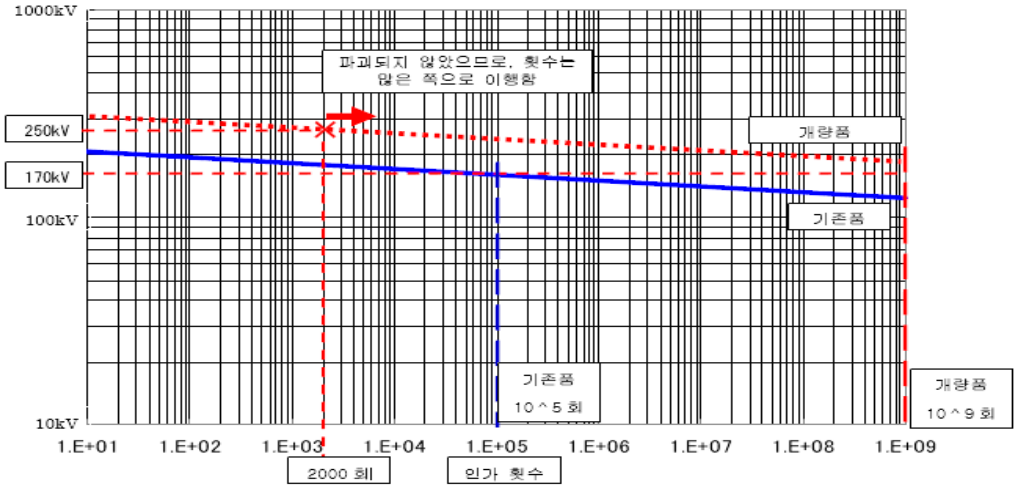

Figure 6 Improve product performance V-n curve (predicted)

3. 결 론

이번 논문에서 다룬 전기동차 계기용 변압기 소손은 2006년도 이후 58건 발생되었고, 특히 2013년 11월 이후 분당선 연장개통 이후 방생빈도가 높아짐을 알 수 있다.

계기용 변압기 소손 원인을 밝혀내기 위해 계기용 변압기 2차측 유입 전원측정, 소손품 분석, 전차선 전력 품질측정 등을 통해 원인분석을 시행하였다. 그 결과 직접적 원인으로 주전력변환장치(CI) 측에서 절연구간 진입시 서지가 발생됨을 확인 할 수 있었고, 간접적 원인으로는 분당선 연장 개통 됨에 따라 전압변동률이 커짐과 동시에 고조파가 커짐을 알 수 있었다.

계기용 변압기 소손을 예방하기 위해 차량 회로 및 소프트웨어 개선과 동시에 계기용 변압기 서지 내성을 향상 시킬 수 있도록 설계 개선을 시행하였으며, 2015년 6월 이후 약 10개월 동안 모니터링을 시행한 결과 동일한 차량고장은 발생하지 않고 있으므로 계기용 변압기 소손 방안이 적절했음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 국가R&D 연구과제인 “전동차 동력제어용 IGBT 개발” 연구비 지원으로 작성되었습니다.

참고문헌

[1] EMU Potential Transformer of failure causes and solutions report (KORAIL internal reports)

[2] IEC 60044-2 Instrument transformers - Part 2: Inductive voltage transformers