

전기철도 전차선 이선이 전력변환장치에 미치는 영향 연구

신승철*, 김재철*, 한성호**, 이수길**
 *숭실대학교, **한국철도기술연구원

A Study on The Effect of Power conversion system for De-wiring Trolley wire by Electric Railway System

Seung-chul Shin*, Jae-chul Kim*, Seong-ho Han**, Su-gil Lee**
 *Soongsil university, **Korea Railroad Reserch Institute

Abstract - A de-wiring trolley wire usually makes the electrical system complex and may have an adverse effect on the electrical system inside the train. It is important to analyze the effect on trains in de-wiring trolley wire. we accomplished an equivalent model of the electric train system. We used PSCAD/EMTDC, an electromagnetic transient program. The result of this study can be used as a facility design to use a power conversion system filter and needs to prove through actual field data in the main circuit of an electric train for a precise analysis about effect of de-wiring.

1. 서 론

철도의 구동 방법이 디젤 기관에서 전기로 바뀌면서 기존에는 문제시 되지 않았던 여러 가지 전기적인 문제들이 발생하고 있다. 전차 내부의 전력 품질 문제가 이 중 하나이다. 저 품질의 전력이 전차 내부로 들어오면 고조파·전자파를 발생시키게 되고, 또한 시스템의 전력 변환장치에 손상을 줄 수 있다. 본 논문에서는 전력 품질을 저하시키는 요인 중 하나인 팬토그래프와 전차선 사이가 이선될 때 발생하는 아크가 전력변환장치인 인버터 및 컨버터 소자에 미치는 영향을 분석하였다. 열차가 이선구간 통과 시 열차에는 급전이 중지되고, 관성에 의해 이선구간을 통과한다. 열차가 이선구간 통과 전후에 인버터의 스위칭 동작에 의해 발생하는 서지가 차량 내부로 유입되어 차량 및 신호에 악영향을 미칠 수 있다. 또한 철도 차량은 일반 계통 부하와는 달리 가변부하이며, 특히 회생제동 시 전차선의 전압이 순간적으로 상승하고 고조파가 유입되는 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이들에 대한 연구가 수행되어 전차선 설계 시 활용할 필요가 있다.

2. 본 론

2.1 주변환장치

전철 변전 설비는 일반 변전 설비와 같이 전압을 변경하는 설비이지만, 일반 변전 설비는 보통 전동·전력의 부하 공급을 주된 목적으로 하고 있는 데 반해 전철 변전설비는 전기차량의 부하 공급을 주된 목적으로 한다. 따라서 전철 변전 설비는 운행 중에 파손이 생기지 않도록 구조 안정성이 확보되어야 한다. 전기철도의 주변환 장치는 전동차에 탑재되어 있으며, 전동기 네 대의 전원을 제어하는 장치로서 컨버터부, 직류중간회로의 필터 커패시터부, 인버터부 등으로 구성된다.

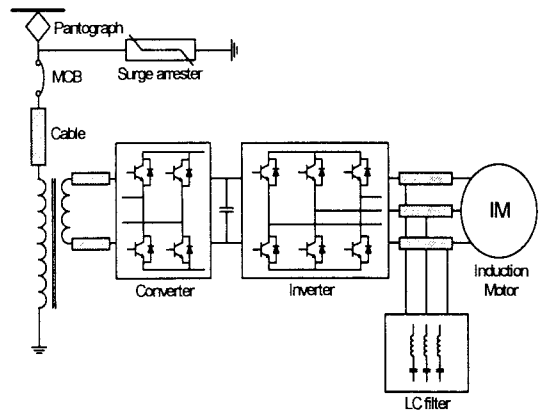
2.1.1 주변환장치 회로 및 차량 내부

일반적으로 전기철도에서 이용되는 주변압기의 권선은

판토그래프로부터 전원을 공급받는 일차권선, 견인전동기에 전원을 공급해주는 견인권선, 각종 보조기에 전원을 공급하는 보조권선으로 구성된다. 견인권선, 보조권선 및 내장된 리액터의 개수와 정격용량, 정격전압은 추진시스템의 구성방식에 따라 결정되므로 변압기의 형태는 전력변환방식, 견인전동기의 종류 등에 따라 상당한 차이가 있을 수 있다.

가선으로부터 AC 25kV의 특고압 전력을 받아 이것을 단상 1,040V로 변화시켜, 2차측에서는 네 대의 Converter/Inverter에 각각 두 대씩의 유도전동기를 구동한다. 따라서 판토그래프 하나를 사용하여 여덟 대의 유도전동기가 구동된다. 3차측은 보조 전원 장치로 실제 열차를 구동시키는 것 이외의 냉난방 장치, 또는 조명장치 부하를 위한 전원으로 사용된다.

소내용으로 사용되는 보조전원 장치는 실제 열차를 구동하는 데 사용되는 것과는 다르므로 주변압기 과도 특성 해석에는 실제 전동기를 구동하는데 이용되는 main converter/inverter부를 이용하며, 2차측이 동일한 소자를 사용하는 네 대의 C/I로 나뉘어져 있으므로 이 중 하나를 해석한다. 따라서 본 논문에서 이용되는 전기철도 모델은 <그림 1>와 같다.



<그림 1> 주회로 시스템 모델

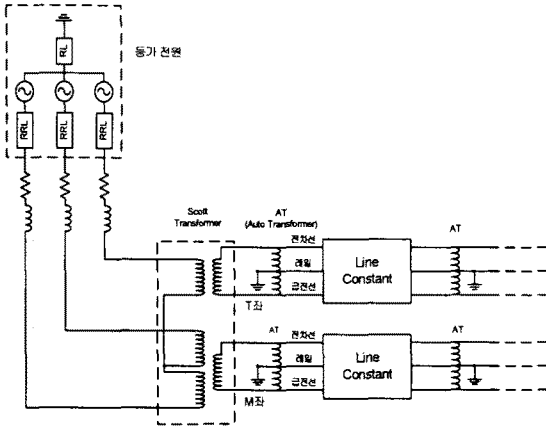
2.2 모델링

사구간 통과시 인버터의 스위칭 써지 영향을 모의하기 위해 급전계통, DC전원으로 동작화 한 전원부와 인버터, 케이블, 유도전동기에 이르는 구간을 모델링 하였다.

2.2.1 급전계통 모델링

전기철도 교류 급전계통의 등가 구성도는 <그림 2>와 같다. 154[kV]의 3상 전원을 수전 받아 스코트 변압기를 통해 단상 55[kV]의 전압으로 변환 한다. 이 때 스코트 변

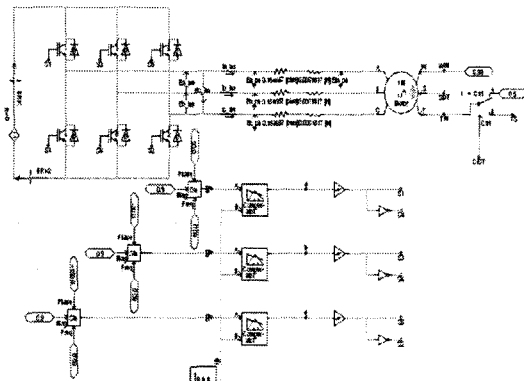
압기의 2차 측에는 T좌와 M좌 두 개의 단상 급전이 가능하도록 되어 있으며, T좌와 M좌 사이에는 90°의 위상차가 생긴다. 스로트 변압기 2차측은 평균 10[km] 간격마다 AT(Auto Transformer)를 통해 접지를 한다.



<그림 2> 전기철도 급전계통의 PSCAD/EMTDC 모델

2.2.2 인버터 모델링

전기철도 추진 및 제어시스템인 인버터와 유도전동기의 동가 구성도는 <그림 3>과 같다. 인버터는 PWM 제어방식의 3-level 인버터를 사용하였다. PWM 인버터는 가변속 유도전동기의 속도 제어를 위해 사용된다. 이는 가변 전압과 가변 주파수(VVVF : Variable Voltage Variable Frequency)의 출력을 동시에 제어하여 자속을 일정하게 유지하므로 광범위한 가변속 운전에 대해 전동기의 효율과 역률의 저하 없이 속도 제어가 가능하다. 또 특정 고조파의 제거 혹은 감소시킬 수 있는 이점이 있으므로 교류전동기의 속도 제어와 최대 토크 운전이 많이 쓰이고 있다. PWM 인버터의 큰 장점은 고조파를 감소시키기 위해 특별한 감쇄필터가 필요 없으며 인버터 출력전압의 크기를 제어하는 변조된 펄스파형으로 쉽게 제어가 가능하다는 점이다. 반면 스위칭 소자의 빈번한 ON/OFF 동작으로 인해 많은 고조파를 발생시켜 전력 손실은 물론 전자기 장애, 소음, 토크 리플 등의 문제를 초래할 수 있다. PWM 인버터는 본질적으로 일정한 입력 전압(Vdc)을 가지고 크기와 주파수에서 3상 출력 전압을 만들어 제어하는 것이다. 따라서 120°의 전압 위상차 때문에 기본적인 주파수에서 선간전압은 진폭 변조비(ma)를 고려해야 한다.



<그림 3> 전기철도 인버터 및 유도전동기 모델

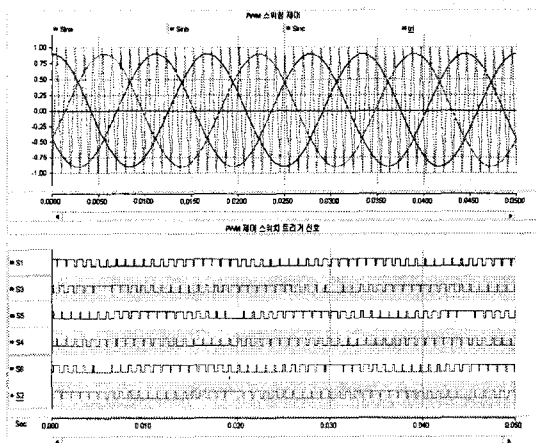
<표 1> 주변환장치 구성 및 건인전동기 제원 사항

컨버터 장비 : 단상 전압형 PWM CONVERTER		
형식	STC??-A0	1유닛 x 4Set
스위칭 소자	3300V-1200A IGBT	4EA x 4Set
GATE AMP.	Optical interface type	1EA x 4Set
상 커패시터	2000V, 200μF	2EA x 4Set
필터 커패시터	1800V, 1800μF	1EA x 4Set

인버터 장비 : 3상 전압형 PWM INVERTER		
형식	STC??-A0	1유닛 x 4Set
스위칭 소자	3300V-1200A IGBT	4EA x 4Set
GATE AMP.	Optical interface type	1EA x 4Set
상 커패시터	2000V, 200μF	2EA x 4Set
필터 커패시터	1800V, 1800μF	1EA x 4Set

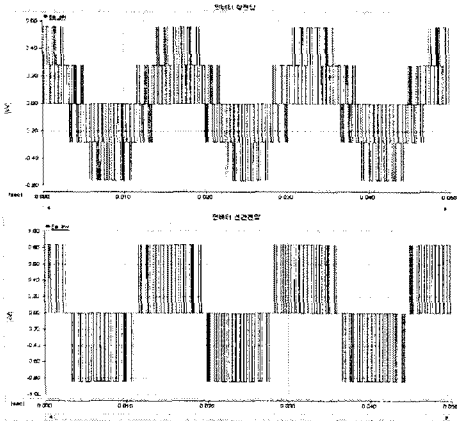
3상 유도형 전동기 대차장가방식	
극수	4극
냉각방식	자기 동풍방식
정격출력	250kW-1350V-130A -2955-100Hz-1.4%slip
절연등급	H종 이상
절연내력	5400V
최대 속도	5627rpm (200km/h with 780mm wheel에서)
초과속도시험	6755rpm
차륜직경	860mm(at new condition) 820mm(at calculating condition) 780mm(at fully worn condition)
치차비	91/22 (4.136)
중량	약 600kg

<그림 5>는 PWM 스위칭 제어를 위해 3상의 120° 위상차가 나는 크기가 0.9인 60[Hz]의 3상 사인파를 발생시켜서, 이를 주파수가 1[kHz]이고 크기가 1인 삼각파와 비교한 것과 사인파와 삼각파의 비교를 통해 얻어진 인버터 소자의 트리거 신호이다.



<그림 5> PWM 제어를 위한 신호들

PWM 제어방식에 의해 만들어진 3-level 인버터 출력단의 상전압과 선간전압은 <그림 6>와 같이 나타난다.

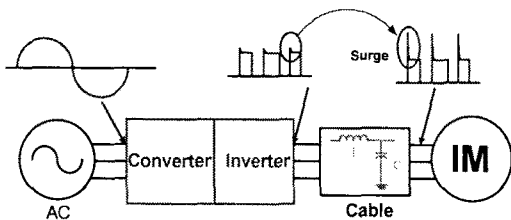


<그림 6> 인버터 출력단 상전압 및 선간전압

2.2.3 스위칭 써지 전압

전력용 스위칭 소자의 발달로 인해 고주파 스위칭 운전이 가능해 지고, 이에 따라 전기철도에서도 차량운전을 위해 사용되는 유도전동기의 구동을 위해 PWM 스위칭 방식을 이용한 인버터가 널리 이용된다. 하지만, PWM 인버터 펄스 출력 전압에는 필요한 기본 성분 이외에 스위칭 주파수에 의한 많은 고조파 성분이 포함된다. 전동기는 기본파 성분에 의해 구동되며 그 밖의 고조파 성분은 손실이나 잡음 등을 발생시킬 수 있다.

인버터는 상용전원을 직류로 정류하고 스위칭으로 제어하기 때문에 출력 전압의 피크치는 통상 직류전압(교류전압 실효치의 $\sqrt{2}$ 배) 이하로 된다. 하지만, 스위칭 주파수의 증가는 인버터의 PWM 전압의 상승시간을 줄이게 되므로 인버터 출력 전압의 상승률을 높이는 원인이 된다. 따라서 스위칭에 의한 약간의 써지 전압이 발생하고 인버터와 전동기 사이의 배선에는 인덕턴스와 부유용량이 존재하여 LC공진현상에 의해 더 증폭된 써지 전압이 전동기측 입력단에 인가된다. 또한 이러한 부유용량으로 인해 인버터와 전동기 사이에 충방전 전류가 흐르게 된다. 이 충방전 전류는 매우 높은 고주파 성분을 가지면서 접지를 통해 인버터와 전동기 사이를 순환하게 된다. 이러한 고주파 누설전류는 일반적으로 인버터에는 파전류 트랩의 원인이 되기도 하며 스위칭 소자의 전류정격을 넘어설 경우에는 소자를 파괴시키기도 한다.



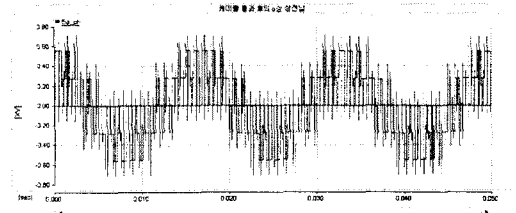
<그림 7> 인·출력단과 유도전동기 입력단에서의 전압 파형

또한 <그림 7>와 같이 전동기측 입력단에 인가된 써지 전압은 인버터 출력전압 피크치의 최대 2배에 이른다. 즉, 써지 전압은 스위칭시 파형의 상승시간과 배선길이에 따라 발생전압이 다르지만 PWM 방식의 인버터에는 피할 수 없는 현상이다.

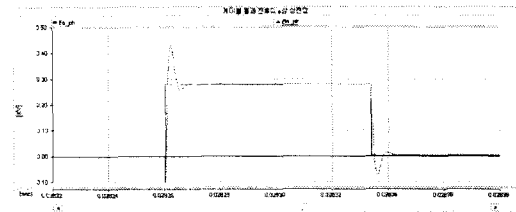
2.2.4 스위칭 써지 전송 모의 결과

<그림 7>은 케이블 통과 후의 a상 상전압을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 인버터 자체에서의 출력 전압은 스위칭 써지의 영향을 거의 찾아볼 수 없을 정도

로 3-level의 깨끗한 파형을 지닌다. 하지만, 써지가 케이블을 통해 유도전동기로 전송되는 과정에서 스위칭 써지 반사 작용이 일어나게 되고, 이로 인해 본래 크기의 최대 두 배에 이르는 써지 전압이 모터에 인가된다. <그림 8>은 케이블 통과 전후의 써지 전압을 비교하여 확인한 것이다.



<그림 7> 케이블 통과 후의 a상 상전압



<그림 8> 케이블 전송에 의해 증폭된 스위칭 써지

3. 결 론

본 논문에서는 열차의 속도가 점차 증가함에 따라 발생하는 이선시 발생하는 전압 품질의 문제에 대해 다루었다. 인버터 동작에 따른 스위칭 써지의 영향 또한 연구되었다. 마지막으로 전체 주회로 시스템의 모델링을 통해 차량 부하가 변동할 때 영향이 분석되었다.

차량 부하의 변동이 전차선에 미치는 영향을 분석하였다. 차량 부하 변동을 모의하기 위해 전기철도 급전계통을 모델링 하였다. 모델링된 급전계통에 차량부하를 삽입하여 부하를 회생제동모드와 역행운전 모드로 가변시키며 시뮬레이션 하였고 이에 따른 영향을 분석하였다. 전기철도는 대용량 수송 부하로 작은 결합이 대형사고로 직결되기 때문에 시스템 설계 시 면밀한 검토가 이루어져야 하며, 시뮬레이션 결과를 통해 불 때 써지성 전압파형을 감소시키기 위해 필터의 성능을 개선시킬 필요가 있다. 또한, 향후 이선의 영향에 관한 더욱 정확한 분석을 위해 전기철도 주회로 시스템에서의 실측 데이터를 통한 입증이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 철도기술연구개발사업에서 지원된 "주회로 시스템 과도특성 시험 및 평가"에 관한 연구 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김인철, "전기철도 전원분장장치와 팬터그래프 인터페이스 최적화에 관한 연구", 서울산업대학교 철도기술대학원 석사학위논문, 2003.2
- [2] 김길동 외, "추진 및 제어시스템 개발", 한국철도기술연구원, 2002
- [3] 송승엽, "EMTP를 이용한 인버터 구동 고압 유도전동기의 스위칭 써지 특성 분석", 숭실대학교 일반대학원 석사학위논문, 2004.6
- [4] 김진우, 박인기, 장진희, 왕영용, 한창수, "고속전철용 가선-팬터그래프 시스템의 모델링 및 접촉력 해석", 한국소음진동공학회 논문집, 제 13권 6호, pp. 474-483, 2003.
- [5] 김양수, 유해철, "전기철도공학", 통일출판사, 2000.2.25