creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266767

2018年 2月
碩士學位論文

철도차량 부하의 고조파 저감대책에 관한 연구

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

張 榮 哲

2018年 2月 碩士學位論文

철도차량 부하의 고조파 저감대책에 관한 연구

張 榮 哲

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

철도차량 부하의 고조파 저감대책에 관한 연구

A Study on Reducing Harmonics for Load of Railroad Vehicle

2018 年 2月 24日

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

張 榮 哲

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

철도차량 부하의 고조파 저감대책에 관한 연구

指導敎授 曺 錦 培

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2017年 10月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

張 榮 哲

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

張榮哲의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 敎授 김 남 훈 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 김 용 재 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 조 금 배 印

2017年 11月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT

Ⅰ. 서 론 1

Ⅱ. 이론적 배경 3
A. 고조파(Harmonic)의 정의 3
B. 고조파 발생원리 및 해석 4
1. 고조파 발생원리 4
2. 고조파 분석 5
C. 철도의 고조파 발생원인 7
1. 저항제어 전동차 7
2. Thyristor 위상제어 전동차 9
3. 가변전압가변주파수제어(VVVF) 전동차 10
D. 고조파의 영향 11
E. 고조파 관리 기준 13
1. 국내외 고조파 관리 기준 13

Ⅲ. 고조파(Harmonic) 저감 기술 18
A. Passive Filter 18
1. 동조필터 18
2. 배전계통의 Passive Filter 19
B. Active Filter 20

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅳ. 실험 및 결과고찰 22
A. 고조파 측정 장비 23
B. 고조파 측정 23

Ⅴ. 결론 29

Reference 31

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표목차

표 1 고조파와 noise의 비교 ····· 3
표 2 고조파 발생원과 대표적 파형 ····· 11
표 3 기기별 고조파 영향 ····· 12
표 4 국내의 고조파 관리 기준 ····· 13
표 5 일본의 고조파 관리 기준 ····· 14
표 6 스웨덴의 고조파 관리 기준 ····· 15
표 7 미국의 고조파 관리 기준 ····· 15
표 8 프랑스의 고조파 관리 기준 ····· 15
표 9 호주의 고조파 관리 기준 ····· 16
표 10 핀란드의 고조파 관리 기준 ····· 16
표 11 영국의 고조파 관리 기준 ····· 16
표 12 뉴질랜드의 고조파 관리 기준(전압왜형률) ····· 17
표 13 뉴질랜드의 고조파 관리 기준 (고조파 전류함유율) ····· 17
표 14 PNA-2010으로 측정된 데이터 ····· 24

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

도목차

그림 1 고조파의 발생원리 및 흐름 ····· 4
그림 2 저항제어 전동차 추진 장치 구성도 ····· 8
그림 3 저항제어 전동차에서 발생하는 고조파 전류함유율 ····· 8
그림 4 Thyristor 위상제어 전동차 추진 장치 구성도 ····· 9
그림 5 Thyristor 위상제어 전동차의 고조파 전류함유율 ····· 10
그림 6 전기차별 고조파 전류함유율 ····· 14
그림 7 LC필터로 구성된 기본회로 ····· 18
그림 8 동조필터의 기본특성 ····· 19
그림 9 Passive Filter의 설치 예시 ····· 19
그림 10 Active Filter의 설치 예시 ····· 20
그림 11 전력 단선도 ····· 22
그림 12 측정 장비(FLUKE-435, PNA-2010) ····· 23
그림 13 R, S, T상의 측정된 전압 · 전류 ····· 25
그림 14 R, S, T상의 측정된 전압 왜형률 ····· 26
그림 15 R, S, T상의 측정된 전류 왜형률 ····· 27

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on Reducing Harmonics for Load of Railroad Vehicle

JANG YEONG CHEOL
Advisor : Prof. Geum-Bae Cho, Ph.D.
Electrical Engineering Technology Convergence
Industrial Technology Convergence
Graduate School of Chosun University

Unlike the effects of other power quality and harmonics, which are caused by electromagnetic interference, such as electrical characteristics, due to the nature of railway transport, research is progressing steadily.

Since the introduction of the electric railway system for continuous power quality surveys is underway, each device is under consideration for the influence of the current harmonics of the device on the railway car.

In this thesis, the causes of the harmonics of the power system was investigated. The counter measures for such harmonics are described in terms of the voltage fluctuation from contact with the current collector input power In particular, the main power flowing through the input stage inverter is measured. The harmonic analysis is also performed by analyzing the input power of the input rail and the input power of each unit. The validity of the current through the software of the gain

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

controller indicates the validity of the filter design. The main power converter was verified by a manual reset of the filter. As a result, by increasing the harmonic generation and resonance phenomena of the power converter for high-speed railway vehicles that convert the power and influence of the switching power converter and the main-pass harmonic filter. It is possible to reduce the resonant phenomenon by setting the resonant rising to an error. The main power conversion unit confirms that harmonics can be reduced by redesigning the filter converter to reset the converter's inverter and converter software.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅰ. 서 론

태백선은 충청북도 제천시의 제천역과 강원도 태백시의 백산역을 운행하는 철도 노선으로서 전철화를 통해 전기철도가 도입된 이후, 산업선 및 수도권에 전기철도가 운영되고 있다.[1] 전철화는 에너지 이용효율 증대(동력비 절감 : 약25%), 수송능력 향상(선로용량 증대 : 약25%, 운행시간 단축 : 약27%) 및 친환경적인 교통수단이라는 다양한 장점 등을 가지고 있다. 전 세계 철도망의 전철화가 진행중이며, 우리나라도 2025년까지 전 철도의 80%를 전철화 한다는 계획을 목표로 사업을 적극 추진중에 있다.[2-3] 전기철도 시스템은 에너지의 효율적 운용과 온난화, 환경문제 해결이 가능한 친환경적인 시스템으로서 수송능력 향상 및 원가절감 등으로 철도 경영환경 개선에 기여하고 있으며 또한 세계 각 각국들은 앞다투어 기술 개발에 심혈을 기울이고 있는 실정이다.[4-6] 우리나라에서도 경부고속철도 및 호남고속철도, 동서고속철도를 비롯한 일반 주요간선의 고속 전철화로 반나절 생활권이 가능해졌으며, 경의선과 유라시아 횡단철도망이 연결되면 유럽까지 고속열차가 운행될 것으로 전망하고 있다. 전기철도는 다양한 장점을 가지고 있는 반면, 고속철도 운행에 필요한 각종 시스템은 변전소로부터 공급받은 고압의 전기를 차량에 탑재된 각종 반도체 등의 주전력변환장치를 사용하므로서, 전압강하 및 고조파, 전압 불평형 등을 유발시킬 수 있는 단점을 지니고 있다. 전기를 동력으로 공급받아 움직이는 전기차량은 각종 주회로 장치와 주행 중 회전력을 가·감속하게 하는 control system 으로 이루어져 있다. 설비들은 차량의 내외부 조명 및 냉·난방 전원공급용인 보조전원장치와 연결되어 절연구간 switching 작용시 고조파를 발생시키고 있는 것으로 나타나고 있다. 전력계통의 송배전 계통은 통상적으로 3상 평형부하인 반면 전기철도는 단상전원을 주동력으로 대용량의 집중부하로 특성상 이동과 정지가 빈번하여 부하 변동이 극심한 전기적 특성을 가지고 있기 때문에 급전시스템에 전압강하로 인한

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

전압불평형 및 전압변동 등이 발생한다. 또한 전기철도차량은 main power circuit로 전력반도체 소자를 사용하여 전기철도 차량을 컨트롤하기 때문에 고조파에 관한 문제를 야기시킨다.[7-10] 고조파는 전기철도 차량의 전기설비의 과열 및 오작동을 일으켜 대형사고를 초래할 수 있다. 또한 최근에 제작되어진 전기철도 차량의 특성상 inverter, converter 등의 전력변환장치의 사용이 많기 때문에 고조파 발생으로 인한 전력의 품질저하, 보호계전기의 오작동 및 각종설비의 오차가 증대, 기계적 소음 및 진동발생, 통신선의 전자유도장애 등의 문제를 일으킬 수 있으며, 부하의 변동 또한 시간적 공간적으로 심하며 고조파의 발생 빈도와 왜곡의 강도 또한 변화하므로 열차 운행에 따른 고조파와 같은 전기적인 문제점에 대한 분석 및 연구가 필요하다.[11-13]

본 논문에서는 이러한 전원 노이즈들 중 고조파가 철도차량 주전력변환장치 등 전력변환기에 영향을 미치는 부하의 고조파를 측정 및 분석하였으며, 측정 결과를 통해 고조파 저감대책 방안을 검토하고, 합리적인 고조파 저감대책을 수립하고자 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅱ. 이론적 배경

A. 고조파(Harmonic)의 정의

발전과 송배전시스템에서 이론적으로 동일한 주파수를 가지는 정현파의 주 전압을 생각하게 된다. 실질적으로 전압과 주파수에 변이가 발생하며, 주 전원에 연결된 비선형부하에 의하여 발생하는 고조파는 심각한 문제를 일으키기도 한다. 고조파는 제 n조파라는 것은 기본 주파수에 대해 2, 3, 4배와 같이 정수배에 해당하는 물리적 전기량을 의미하며 우리나라의 상용전력 계통은 60Hz를 기준으로 정수배에 해당하는 주파수들이 고조파 주파수에 해당한다. 고조파의 발생에는 여러 가지 원인이 있지만 일반적으로 전력전자소자를 사용하는 설비에서 발생하며 AC를 DC, DC를 AC로 변환가는 장치 또는 교류 아크로, 형광등, 가정에서 사용하는 전기기기 등 대부분의 전기기기에서 발생하며 이러한 변환장치는 지극히 낮은 역률을 나타내며, 고조파 전류를 발생시켜 계통으로 유입시키고, 역률 보상용 콘덴서 BANK에 과도한 고조파 전류를 유입시키는 등의 문제를 유발시킨다. 전력계통의 고조파의 범위는 제 1 고조파에서 제 51 고조파까지를 말하며, 고조파 중에서 제 3, 5, 7차 고조파가 사실상 문제가 되며 DC를 사용하는 설비에서는 고차 고조파가 (11차 이상 고조파)다수 발생하기도 한다. 전력계통에 있어 고조파의 대상이 되는 주파수 범위는 통상적으로 약 3kHz 정도까지를 얘기하며, 노이즈와는 확실히 구별되는 파형이다. 고조파와 노이즈의 비교는 표 1과 같다.[14-17]

표 1 고조파와 noise의 비교

항목	고조파	노이즈
주파수	2~51 고조파	고주파(10 kHz~1 MHz)
환경	전원 임피던스, 선로	거리, 공간, 경로
피해계기 내량	계기마다 정격 표시	계기사양에 따라 다름
정량적 파악	이론적 계산가능	랜덤하게 발생, 정량적 파악 어려움
발생량	부하용량에 거의 비례	변화율에 따라

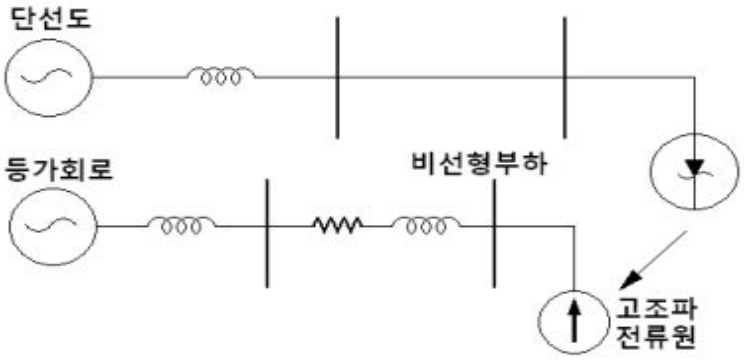
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

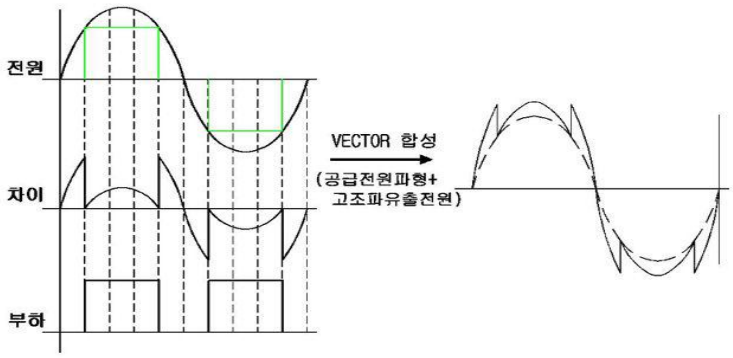
B. 고조파(Harmonic) 발생원리 및 해석

1. 고조파(Harmonic) 발생원리

그림 1과 같이 고조파를 전류원으로 해석하는 것이다. 전력전자부품을 사용하는 전력변환기, Inverter, 사무기기 등 반도체 응용계기와 같이 비선형 특성을 갖는 부하에 정현파 전압을 인가시 흐르는 전류는 통상적으로 고조파 함유율을 가지고 있는 왜형파의 형태가 된다.[18-19]



(a) 고조파 발생원을 전류원으로 해석



(b) 고조파 파형 발생

그림 1 고조파의 발생원리 및 흐름

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 전류를 분해하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다. 즉, 전류 I는,

$$I = \sqrt{2}\, I_1 \sin(wt + \Phi_1) + \sum_{2}^{\infty} I_n \sin(nwt + \Phi_n) \qquad (1)$$

여기서, n=2, 3, 4,……, 2m+1(m=1,2,3,…∝)

I_n : n차 고조파

I_1 : 정격전류

식(1)에서와 같이 그 정수배의 주파수 성분(In)과 상용주파수 성분(I_1)의 합성된 파형으로 나타내며, 왜형파 전류는 각각의 고조파 성분의 중첩으로서 나타낼 수 있다. 따라서 고조파 발생원을 전류원을 사용하여 다루면 고조파 전류는 아래와 같은 특성을 갖는다.

※ 고조파 전류원은 각 차수마다 존재하며 발생한 전류는 부하단에서 전력계통 및 다른 부하단으로 유출된다.

※ 임피던스(Impedance)에 비례하여 분류되는 고조파 전류는 전 계통에 걸쳐 흐른다.

※ 고조파 회로는 발생차수만큼 존재하며, 계통 임피던스(Impedance)는 주파수에 의해 변하기 때문이다.

※ 실제 회로의 파형은 복수 고조파의 순시치 및 기본파가 합성된 값이다.

※ 배전계통의 고조파 전압은 계통의 여러 곳에서 유입되는 임피던스(Impedance) 와 계통의 고조파 전류에 의해서 발생한다.

2. 고조파 분석

고조파의 분석은 보통 퓨리에 급수를 이용한다. 정현파 교류에 대하여 정현파가 아닌 모든 주기적인 전류, 전압를 비정현 주기파라 한다. 비정현 주기파는 위상과 크기 등이 동일하지 않으므로 회로에 미치는 영향 등을 분석하기 어려우며, 따라서 비정현파는 주파수와 위상, 크기가 다른 복수개의 정현파가 중첩되어 나타나는 현상으로 분석할 수 있다. 또한 주기적으로 변화하는 전압(전류) y를 퓨리에 급수로 해석하면 식(2)와 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$y = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nwt + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nwt \tag{2}$$

식(2)를 전개하면 식(3), (4)와 같으며 크기는 A_n, 위상은 Θ_n 으로 표시한다.

$$a_n \cos nwt + b_n \sin nwt = A_n \sin(nwt + \theta_n) \tag{3}$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}\ , \qquad \tan\theta_n = a_n / b_n \tag{4}$$

따라서 전압 및 전류는 식 (5)와 같이 정의 할 수 있다.

$$y = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(nwt + \theta_n) \tag{5}$$

비정현 주기파는 직류분 α_0와 각 주파수 ω, 2ω, …로 된 정현파 교류의 크기 A1, A2, … 위상차 Θ1, Θ2, … 를 더한 것이라 할 수 있다.

a. 종합 고조파 왜곡률(THD : Total Harmonic Distortion)

계통의 전압 및 전류의 고조파를 평가하는 방법 중 대표적인 것은 종합 고조파 왜곡률이다. THD는 기본파 실효치 성분과 고조파들의 전류 및 전류 실효치 값으로 나타냈다. 보통 고조파는 2고조파에서 50고조파까지 계산하여 식(6)처럼 THD가 표현된다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{50}^{n=2} V_n^2}}{V_1} \tag{6}$$

b. 총 수요 왜곡률(TDD : Total Demand Distortion)

전류의 고조파 분석 시 철도차량의 경우는 운전모드에 의해 부하전류량이 변동하므로 기본파형을 분모로하는 THD보다는 설비나 시스템의 정격전류를 분모로 사용하는 TDD가 전류 고조파 분석하는데 적합하다. TDD는 THD와 분자는 동일하지만 분모는 기본파형 대신 정격전류를 사용하여 식(7)처럼 계산되어진다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{50}^{n=2} I_n^2}}{I_{rated}} \tag{7}$$

C. 철도의 고조파(Harmonic) 발생원인

반도체 변환장치가 아닐 경우 고조파와 기본파의 부조화 및 교류 시스템에서의 비동기적인 지연 및 불평형 등의 현상이 발생하며 또한 부하가 반도체 변환장치일 경우 동일한 고조파 특성을 갖는다. 하지만 일반적으로 고조파 문제를 주로 발생시키는 것은 사이리스터 또는 정류기 등을 사용하는 반도체 변환장치에 의해 제어되어지는 부하들이다. 전기철도에서 전기차량은 주변압기, 정류기, 보조전원장치 및 견인장치 등으로 구성되는데 일반적으로 주변압기, 정류기, 견인장치는 다른 장치에 비해 전력 소모가 크며 고조파의 주 발생 요인으로 볼 수 있다.[20-23] 다음으로 전동차 견인제어방식별 고조파 발생 특성은 다음과 같다.

1. 저항제어 전동차

수도권에서 운행중인 전동차는 전차선으로부터 인가된 AC전압을 단상 정류기에 의해 DC로 정류시키고 직류전동기의 약자계 제어를 통해 견인력을 변화시켜 저항제어에 의해 운행 속도를 변화시킨다. 저항제어는 직류전동기의 기동 및 속도제어 방식으로 예전부터 널리 사용되고 있으며 저항제어를 통해 직류전동기를 가동시킬 때 가선과 귀선의 전압차에 대해 과한 전류가 발생하지 않기 위해서는 직류전동기에 직렬로 저항기를 접속하여 가동하며 회전수가 점차 상승하여 역기전력이 높아짐에 따라 저항을 순차적으로 단락해 가는 방식이다. 저항제어와 병행하여 속도를 상승시키고 싶을 경우에는 약자계 제어를 사용하며, 식(8)에서 계자 자속 ϕ를 변화시켜서 속도 n을 제어한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$n = \frac{E_t - IR}{K\varphi} \tag{8}$$

E_t : 단자전압
I : 전동기전류
R : 회로저항
K : 상수
φ : 계자자속

저항제어 전동차의 추진제어장치의 개략도는 그림 2와 같고 가선 측으로 발생되는 조파별 고조파 전류함유율은 그림 3과 같다. 그림 3에서 보는바와 같이 고조파 전류함유율은 1~5의 저차조파에서 크게 나타나며 조파가 증가할수록 비례적으로 감소함을 볼 수 있다.

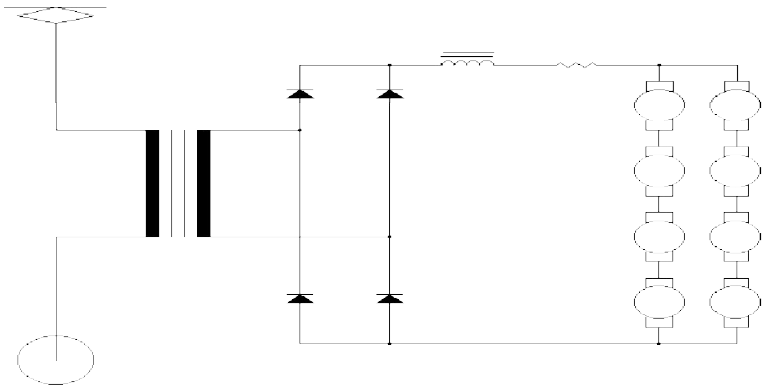


그림 2 저항제어 전동차 추진 장치 구성도

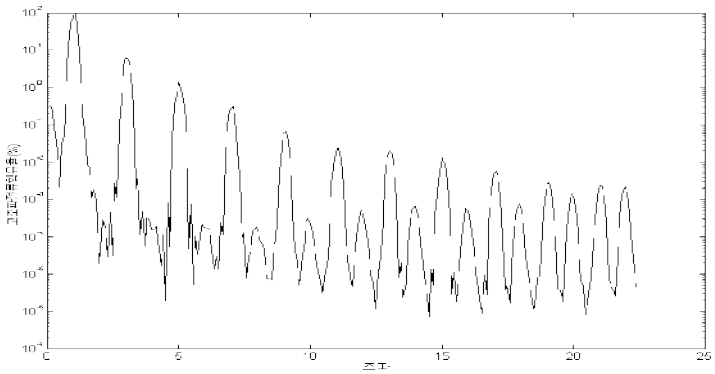


그림 3 저항제어 전동차에서 발생하는 고조파 전류함유율

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. Thyristor 위상제어 전동차

산업선철도에서 운행하는 전동차는 전차선으로부터 인가된 교류전압을 사이리스터와 다이오드가 복합된 정류기를 사용하여 사이리스터의 위상을 제어하여 속도를 변화하면서 약자계 제어에 의해 직류 견인전동기의 견인력을 변화시킨다. 정류기 방식 대신 사이리스터 위상 제어방식을 사용하면 가선 측의 역률이 저하하며 고조파도 증가하는 결함이 있다.[24-25] 사이리스터 위상제어를 사용하는 전기기관차의 추진제어장치는 그림 4와 같고 가선 측으로 발생하는 사이리스터 점호 위상각의 변화에 따른 조파별 고조파 전류함유율은 그림 5와 같다. 그림 5에서 보는바와 같이 사이리스터 제어방식에서는 위상각이 클수록 파형의 찌그러짐이 커지므로 낮은 조파 영역에서 대체로 고조파가 발생하며, 고조파 전류함유율이 커짐을 알 수 있다.

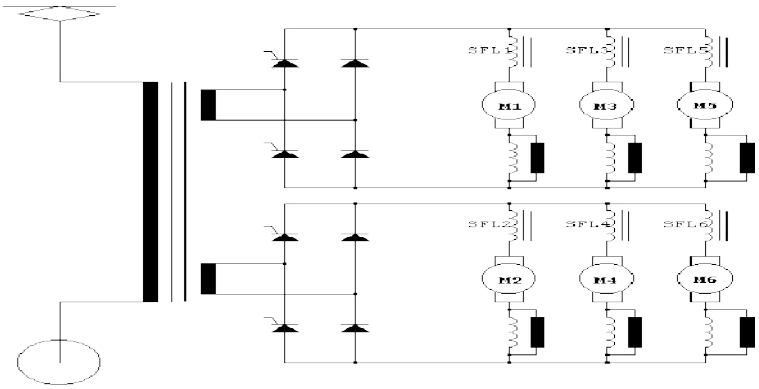


그림 4 Thyristor 위상제어 전동차 추진 장치 구성도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

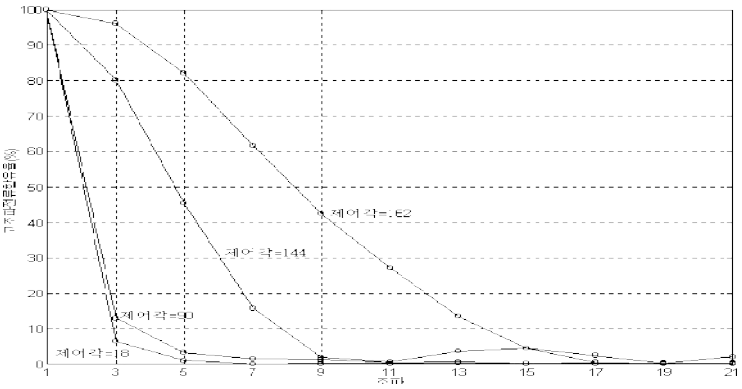


그림 5 Thyristor 위상제어 전동차의 고조파 전류함유율

3. 가변전압가변주파수제어(VVVF) 전동차

VVVF 전동차는 전차선으로부터 인가된 교류전압을 PWM 컨버터를 사용하여 정류하며 VVVF 인버터에서 가변주파수 제어방식, 가변전압에 의해 3상 교류로 변환하여 유도전동기의 속도를 제어하는 역할을 수행한다.[26] VVVF 전동차의 고조파 전류함유율의 분포는 앞에서 설명한 저항제어 전동차나 사이리스터 위상제어를 수행하는 전동차와는 다르게 주파수가 높은 영역에서 PWM 반송파 주파수에 기인하는 고조파 성분이 발생된다. 통상적으로 PWM 컨버터의 가선측에서 발생하는 고조파 전류의 주파수(f_h)는

$$f_h = 2mnf_c \pm kf_s \tag{9}$$

m ; 1, 2, 3, ... , k ; 1, 3, 5, ...과 같다.

운행중인 전동차의 경우는 PWM 컨버터의 스위칭 주파수(f_c)는 기본주파수(f_s)가 60Hz이고 기본주파수(f_s) 한 주기에 7개의 펄스를 발생하며 420Hz를 사용한다. 컨버터의 상수(n)는 2상으로 고조파가 발생하는 주파수(f_h)는 아래식 10과 같으며

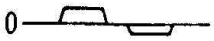
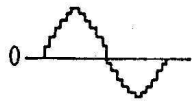
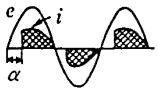
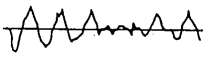
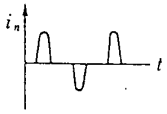
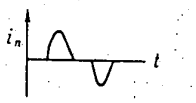
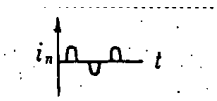
$$f_h = 1680m \pm 60k \tag{10}$$

이므로, 고조파는 1680, 3360,..... (Hz)의 측대역에서 생성된다.[27]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 2 고조파 발생원과 대표적 파형[28]

발 생 원	주요한 회로방식	입력전류파형 예	품명 예
전력용 변환장치	6상 정류		VVVF
	12상 정류		UPS
	24상 정류		Thyristor 모터
	교류전력조정		모터 제어
전기로	위상제어		교류 아크로
사무용 가정용 기기	전파 정류 condenser 평활		UPS, 사무기기
	정류 평활 전파 배전압		ROOM 에어콘 (보급형 인버터)
	전파 위상 제어		백열 전구용 조광기

D. 고조파(Harmonic)의 영향

고조파는 주로 전력계통에서 병렬과 직렬공진에 의한 고조파 성분의 증폭, 전송 및 소비하는데 있어서의 효율 저하, 전력의 생성, 전기설비의 절연 저하 및 수명 단축, 기계설비 및 보호계전기의 오동작을 발생 시킨다.[29] 각 설비에 미치는 고조파의 영향은 표 3과 같다.

전기철도에 있어 고조파에 의해 발생 할 수 있는 장해로는 통신유도장해, 보호계전기의 오작동, 고조파 공진현상의 발생, 병렬 캐패시터로의 과대전류, 과전류계전기 코일의 소손, 형광등 안정기의 소손, 배전용 차단기의 오동작

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

등이 있으며, 전기철도에서의 고조파 장해의 발생 원인을 검토해보면 고조파 장해는 고조파 전압과 전류의 크기도 연관이 있지만 전력전자 기기의 설계와 회로 구성이 원인인 경우가 많다. 전력전자기기 제작 및 설계시 고조파를 고려하지 않고 설계할 경우 고조파 장해발생의 요인이 된다. 통상적으로 전력계통은 정전압회로로 구성되어 있으며 전압에 고조파가 함유되어 있을 경우 가장 손상을 입는 설비는 캐패시터이다. 캐패시터가 손상이 큰 이유는 주파수가 증가하면서 캐패시터의 임피던스는 감소하므로 고조파가 함유가 되면 고조파에 의한 과전류가 흐르기 때문이다. 또한 고조파 공진으로 인한 고조파 전류 확대 현상을 일으켜 통신유도장해를 일으키는 경우도 있다. [30]

표 3 기기별 고조파 영향

장치구분	영 향	비고
회전기기	· 동손과 철손에 의한 온도 증가 · 기기의 진동 및 효율에 의한 회전력 변화	
전력선	· 시스템에서 공진이 있을 경우 전력선은 전압 Stress와 코로나를 일으킴 · 실효 전류값 증가로 인한 추가적인 전송 손실 · 고조파 전류에 의한 전압 강하	
변압기	· 동손과 철손 증가 · 변압기 권선 및 선의 정전용량에 의해 공진 발생 · 절연 손실 발생 · 고조파에 의한 소음 및 온도 증가	
계측기	· 공진에 의하여 높은 고조파의 전류 및 전압에 의해 영향을 받으며, 왜형에 의한 상불평형은 장치의 오작동을 일으킬 수 있음	
전자설비	· 전력의 전자설비는 고조파에 의한 오작동 발생에 둔감하지만 그 외의 전자설비들은 AC전력을 사용 할 때 영향을 받을 수 있음	
캐패시터	· 유전율 손실에 의한 온도 증가 · 고조파 확대에 의한 시스템 공진 유발 · 과전압 발생	
스위치기어와 계전기	· 고조파 전류에 의한 발열과 손실이 증가하여 흐를 수 있는 절연에 의한 수명 단축 및 전류의 감소	
유선통신 간섭	· 전자계를 통해 유선통신 측에 영향을 미치며, 간섭은 고조파 크기와 주파수에 범위에 좌우됨	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

E. 고조파(Harmonic) 관리 기준

고조파 관리 기준은 국가별로 다르며, 우리나라에서는 고조파 규제에 관한 기준을 한국전력공사에서 규정하고 있으며 고조파 규제 항목으로는 전압왜형률과 등가방해전류로 규정하고 있다.

1. 국내외 고조파 관리 기준

a. 국내

국내에는 고조파의 발생이 우려되거나 고조파를 발생 시킬 수 있는 부하에 대해 전력을 공급하는 경우 제도적인 장치로 한국전력공사의 전기공급규정 41조에 의해 장해를 방지할 수 있는 장치 및 시설을 요구할 수 있다.[31-32] 이 규정에 의거하여 고조파에 대한 관리를 위해 한국전력공사에서는 전기공급약관세칙 전기의 공급/사용(2001. 8. 1), 제26조 전기사용에 따른 보호 장치, 제4절 전기사용에 따른 협력 등의 시설에 표 4와 같이 고조파 허용 기준을 작성하여 시행하고 있다. 그러나 전기철도만의 독립적 고조파 관련 관리 기준은 없는 실정이다.

표 4 국내의 고조파 관리 기준

계통전압	S/S에서 지중선로 공급하는 수용		S/S에서 가공선로 공급하는 수용	
	전압왜형률(%)	등가방해전류(A)	전압왜형률(%)	등가방해전류(A)
66kV	3.0	-	3.0	-
154kV	1.5	3.8	1.5	-

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

b. 일본

일본의 경우 특고압 수용가에 대한 고조파 발생기계의 고조파 관리 기준은 표 5와 같으며 등가방해전류는 3.8A이하, 등가방해전류의 경우 각 조파의 등가방해전류는 1.9A이하로 규정하고 있다. 또한 일본은 철도분야에서는 측정에 의해 경험적으로 전기차의 제어방식에 상관없이 각각의 조파의 고조파 전류함유율 n이 고조파 차수일 경우 $200/n^2$(%)보다 작아야 한다.

표 5 일본의 고조파 관리 기준

계통전압	각 조파별 전압왜형률	비고
66kV이상	1.0% 이하	전압왜형률은 2% 이하
150kV이상	0.5% 이하	전압왜형률은 1% 이하

전기차별 조파에 따른 고조파 전류함유율은 그림 6과 같으며 그림에서 전동차는 모든 주파수 대역에서 $100/n^2$ 이하를 만족하고 사이리스터 제어차량의 경우 9조파 이하에서 $200/n^2$ 이하지만 9조파 이상에서는 만족하지 못한다.

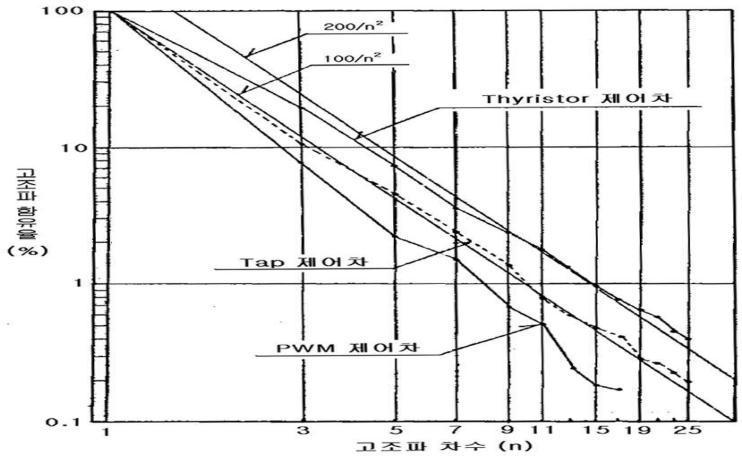


그림 6 전기차별 고조파 전류함유율

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

c. 스웨덴

스웨덴의 경우 고조파 관리 기준은 표 6과 같다.

표 6 스웨덴의 고조파 관리 기준

계통전압	전압왜형률(%)
430/250V	4.0
3.3 ~ 24kV	3.0
84kV까지	1.0

d. 미국

미국의 경우 고조파 관리 기준은 표 7과 같다.

표 7 미국의 고조파 관리 기준

계통전압	전압왜형률(%)	
	일반적인 전력계통	독립된 전력계통
2.4 ~ 69kV	5.0	8.0
115kV이상	1.5	1.5

e. 프랑스

프랑스에서는 각 조파별 고조파 관리 기준은 표 8과 같다.

표 8 프랑스의 고조파 관리 기준

3상		단상			
차수	전압왜형률(%)	차수	전압왜형률(%)	차수	전압왜형률(%)
5	2.0	3	2.0	2	1.5
7	2.0	9	1.0	4	1.0
11	1.5	15	0.3	6	0.5
13	1.5	≥21	0.2	8	0.2
17	1.0			10	0.2
19	1.0			≥12	0.2
23	0.7				
25이상	$0.1+\frac{2.5}{n}$				

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

f. 호주

호주의 경우 고조파 관리 기준은 표 9와 같다.

표 9 호주의 고조파 관리 기준

계통전압	전압왜형률(%)	홀수고조파(%)	짝수고조파(%)
배전 33kV까지	5.0	4	2.0
송전 22.33 ~ 66kV	3.0	3	1.0
110kV이상	1.5	1	0.5

g. 핀란드

핀란드의 경우 고조파 관리 기준은 표 10과 같다.

표 10 핀란드의 고조파 관리 기준

계통전압	전압왜형률(%)	각 조파별 전압왜형률(%)
1kV	5.0	4.0
3 ~ 20kV	4.0	3.0
30 ~ 45kV	3.0	2.0
110kV	1.5	1.0

h. 영국

영국의 경우 고조파 관리 기준은 표 11과 같다.

표 11 영국의 고조파 관리 기준

계통전압	전압왜형률(%)	각 조파별 전압왜형률(%)	
		홀수	짝수
0.415kV	5.0	4.0	2.0
6.6, 11kV	4.0	3.0	1.75
33, 66kV	3.0	2.0	1.0
132kV	1.5	1.0	0.5

i. 독일

독일의 경우 각 조파별 고조파 관리 기준의 전압왜형률의 제한치는 제 15조파까지는 기본파의 5%이내이고, 제 100조파에서 1%까지 감소하며 종합전압왜형률은 10% 이내로 제한한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

j. 뉴질랜드

뉴질랜드에서는 66kV 이상의 송전선로에서 각 조파별 고조파 관리 기준은 전압왜형률과 고조파 전류함유율은 표 2.12, 표 2.13과 같다.

표 12 뉴질랜드의 고조파 관리 기준(전압왜형률)

고조파 차수		각 조파별 전압왜형률(%)
홀수	3	2.3
	5	1.4
	7	1.0
	9	0.8
	11	0.7
	13	0.6
	15	0.5
	17 ~ 21	0.4
	23 ~ 49	0.3
짝수	2	1.2
	4	0.6
	6	0.4
	8, 10	0.3
	12 ~ 50	0.2

표 13 뉴질랜드의 고조파 관리 기준(고조파 전류함유율)

고조파 차수		각 조파별 고조파 전류함유율		
		220kV	110kV	66kV
홀수	3	5.7	2.9	1.7
	5	3.4	1.7	1.1
	7	2.5	1.3	0.8
	9	1.9	1.0	0.6
	11	1.6	0.8	0.5
	13	1.4	0.7	0.4
	15	1.2	0.6	0.4
	17	1.0	0.5	0.3
	19 ~ 21	0.9	0.5	0.3
	23	0.9	0.4	0.3
	25 ~ 49	0.7	0.4	0.3
짝수	2	2.9	1.5	0.9
	4	1.5	0.8	0.5
	6	1.0	0.5	0.3
	8	0.8	0.4	0.3
	10	0.6	0.3	0.2
	12 ~ 14	0.5	0.3	0.2
	16, 18	0.4	0.2	0.2
	20 ~ 50	0.3	0.2	0.2

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅲ. 고조파(Harmonic) 저감 기술

전기철도에서 고조파의 발생에 대한 저감 기술로는 Passive Filter와 Active Filter 두가지 종류의 필터설비 방법이 일반적이다. 고조파 필터는 리액터와 커패시터로 이루어진 교류 LC필터와 인버터를 사용하여 능동적으로 고조파를 억제하는 Active Filter가 있다. Passive Filter는 리액터와 커패시터의 조합으로 구성되며, 특정 고조파 차수에 대해서 저 임피던스가 되도록 LC를 구성해서 고조파를 억제한다. Active Filter는 대상 고조파와 역위상의 고조파를 발생시켜 그 합성으로 고조파를 저감한다.

A. Passive Filter

Passive Filter는 L과 C로 구성된 기본 회로는 그림 7과 같으며, 일반적으로 동조필터, 고차필터, 3차형필터가 사용된다.

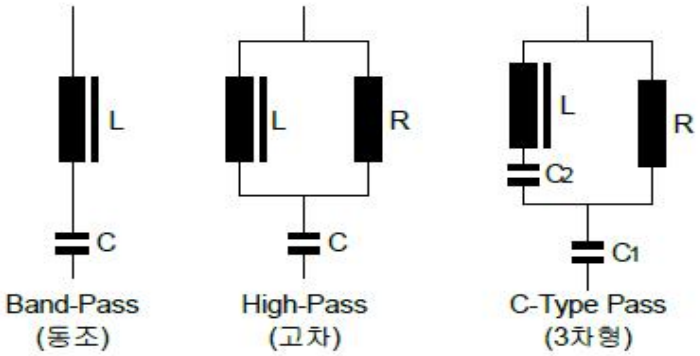


그림 7 LC필터로 구성된 기본회로

1. 동조필터

동조필터는 그림 7에서처럼 L-C-R의 조합으로 된 직렬공진 회로이며, 임피던스는 다음의 식 11과 같다.

$$Z(w) = R + j(wL - 1/wC) \tag{11}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 11에 다음 파라메타를 대입하여 정리하면

$$nw = \frac{1}{\sqrt{LC}},\ Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}},\ \delta = \frac{(w-nw)}{nw},\ Q = \frac{nwL}{R} = \frac{Z_0}{R},$$

$$Z(w) = Z_0\sqrt{\frac{1}{Q^2} + 4\delta^2} \qquad (12)$$

식 12와 같이 표시 할 수 있으며, 동조필터의 기본특성은 그림 8과 같이 나타난다.

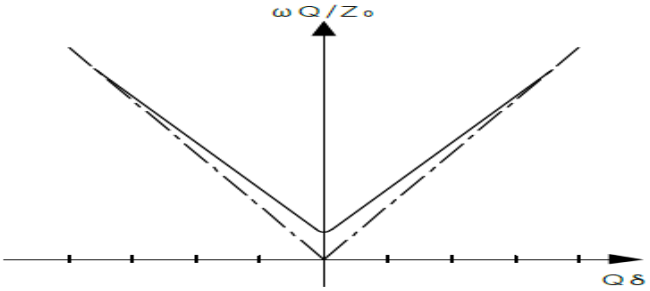


그림 8 동조필터의 기본특성

2. 배전계통의 Passive Filter

배전계통은 억제 대상의 고조파가 여러 조파가 존재하므로 통상적으로 동조필터를 2~5회로 배합하여 구성한다. 그림 9는 Passive Filter의 설치 예시를 보여준다.

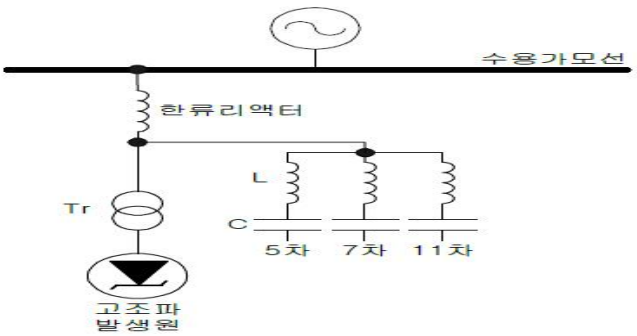


그림 9 Passive Filter의 설치 예시

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Passive Filter를 사용하는 경우 발생하는 고조파 전류를 계산하여 설치하는 필터에 고조파 전류의 분류를 고려하여 용량을 산출한다. 또한 전원측에서 발생 가능한 고조파 전류를 파악하며 유입 고조파 전류 또한 고려할 필요가 있다. 배전계통의 임피던스 map을 작성 Passive Filter와의 계통에서의 공진 점을 파악 공진에서의 고조파 전류의 증가를 방지할 필요가 있다. 필터 설치 후 고조파 발생원이 증가한 경우에는 필터가 과부하가 방생하는 경우가 있다. 필터의 단계적인 증설은 곤란한 경우가 많기 때문에 설계 시 추가 증설 가능을 충분히 고려하여 설계하여야 한다. Passive Filter를 사용하는 경우는 부하 및 전원측의 조건, 운전개시 후의 조건, 계통의 조건 등을 상세히 조사하여 악영향을 받는 경우가 없도록 조심해야 한다.

B. Active Filter

Active Filter는 부하에 병렬로 연결되며 전류변성기를 통해 부하전류를 검출하며 부하전류에 포함되어 있는 고조파 전류성분을 검출하며, 이 고조파 성분의 전류를 전류제어의 기준으로 인버터에 흐르는 전류를 제어하고 고조파 전류와 역위상의 전류를 Active Filter에 흘림으로써 전원전류에 포함하는 고조파 전류를 상쇄 가능하도록 작용한다.

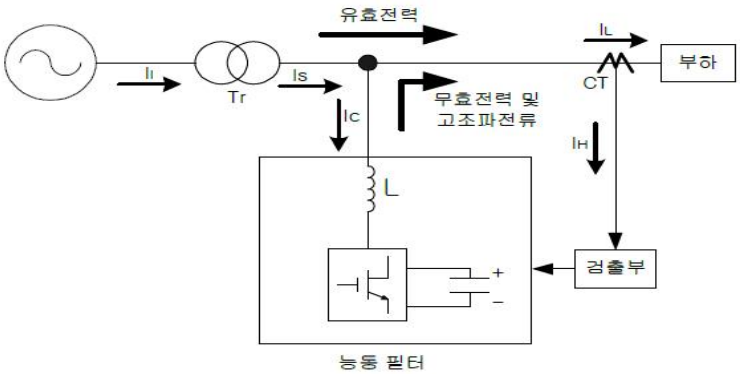


그림 10 Active Filter의 설치 예시

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 10에서 전원측에서는 기본파 성분인 정현파형이 되고 역위상인 전류 I_C와 고조파 성분 I_H를 흐르도록 제어되기 때문에 I_C는 I_H에 의해서 상쇄된다. Active Filter는 기술한 바와 같이 고조파의 저감 및 억제를 하기 위해 발생하는 고조파 전류를 파악해서 Active Filter의 용량을 산출하면 고조파의 저감이 가능해진다. Passive Filter와 다르게 고조파의 발생량이 증가해도 Active Filter는 전류 제한 가능한 기능을 가지고 있어 과부하가 되지 않는다. 또한 전원 임피던스에 변경이 발생하거나 고조파 전류의 차수에 변화가 발생해도 억제 능력에는 변화가 없다. 따라서 Active Filter는 부하조건, 전원조건의 변화에 추종할 수 있기 때문에 이상적인 고조파 필터로 사용 가능하다. Active Filter를 사용하는 경우 다음 사항을 주의해서 계획해야 한다.

- 억제하는 계통에 역률개선 커패시터가 접속하는 경우, Active Filter에서 발생하는 보상전류도 역률개선 커패시터에 유입하기 때문에 역률개선 커패시터의 전류 변성기 신호를 Active Filter에 입력하여야 한다.
- 발생하는 고조파 전류가 제 25차 고조파 이상으로 집중하는 경우 Active Filter의 억제 능력이 현저히 저하되기 때문에 2차형 고차 필터와의 병용이 필요하다.
- 전류 변성기와 Active Filter는 인접한 장소에 설치해야하며, 부하의 전류 검증용 전류 변성기가 필요하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅳ. 실험 및 결과고찰

그림 11은 전력 시스템의 단선도이며, 변전소는 공급전압 154[kV], 단락용량 5740[MVA], 단락 임피던스 100[MVA] 기준으로 0.17+j1.73[pu]이다. 송전선로의 선로 임피던스는 1.19+j15.26[Ω]이고, 선로 어드미턴스는 j12.62[℧]이다. 철도차량은 한국전력공사에서 154[kV]를 수전하여 스코트 변압기에 의해 55[kV]으로 변압하여, 단권 변압기에 25[kV]전압을 공급한다. 단권 변압기의 급전방식은 변전소에서 Feeder Line을 선로에 따라 가선하여 Feeder Line과 Trolly wire사이에 약 10[km] 간격으로 단권 변압기를 병렬로 설치 접속하여 변압기 권선의 중성점을 Rail에 접속하는 방식이다. 고조파 측정을 위해 고조파 저감을 위한 45[MVA]의 Active-Filter가 설치되어 있다.

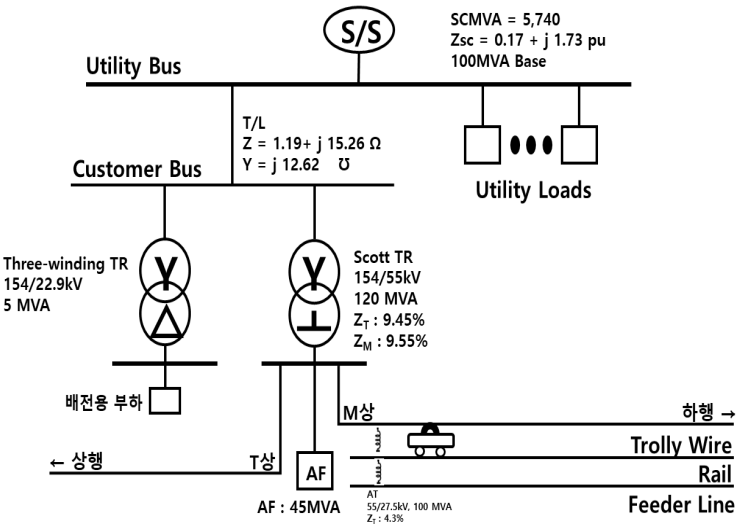


그림 11 전력 단선도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

A. 고조파(Harmonic) 측정 장비

고조파 측정과 평가는 전력회사와 수용가가 만나는 지점, 즉 공통결합점에서 이루어지는며, 고조파는 시간에 따라 변동하므로 IEC 61000-4-7에 따라 측정 한다. 고조파 측정장비는 전력품질분석장비로 FLUKE-435, PNA-2010 장비를 사용하였다. 그림 12의 FLUKE-435는 10사이클로 측정하고, PNA-2010은 10 사이클 측정에 38사이클 간격은 0.6초에 한번씩 측정하여 구성하였다. 두 장비는 전력품질분석장비로 널리 사용되고 있는 장비로 전압, 전류 오차율은 0.2% 미만의 높은 정밀도를 가지고 있어 측정장비로 신뢰성 있는 측정이 가능하다.

그림 12 측정 장비(FLUKE-435, PNA-2010)

B. 고조파(Harmonic) 측정

고조파 측정에는 FLUKE-435를 사용하여 순시치를 측정하였다. 또한, 고조파가 매 순간 빠르게 변하기 때문에 고조파는 3초 측정을 권장하고 있으며, 3초 측정은 전기를 사용하는 설비의 순간 영향 및 오작동을 일으키는 원인을 파악하는데 주로 사용하고 있다. PNA-2010 장비를 사용하여 하루동안 측정한 데이터는 표 14와 같다.

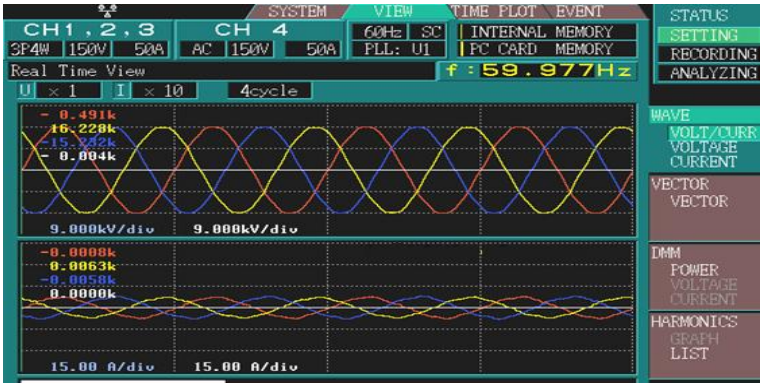
Collection @ chosun

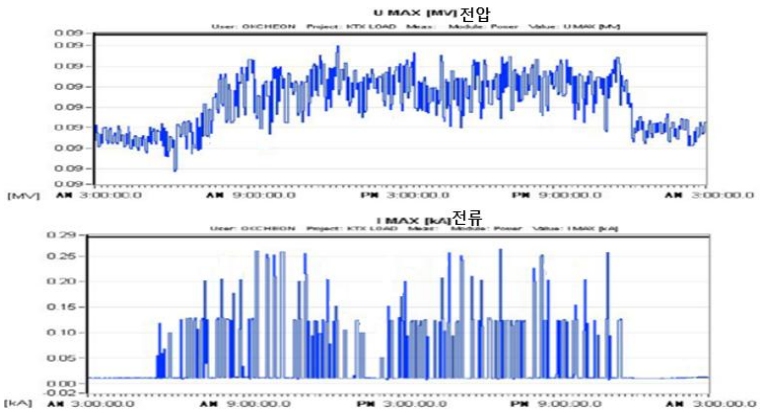
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 14 PNA-2010으로 측정된 데이터

	R상	S상	T상
전압[kV]	90.5	91.5	91.3
전류[kA]	0.04	0.06	0.04
유효 전력[GW]	0.003	0.003	0.003
피상 전력[GVA]	0.005	0.004	0.002
역률[pu]	0.398	0.402	0.453
전압 왜형률[%]	1.254	1.025	1.152
전류 왜형률[%]	10.985	14.853	7.205

그림 13는 고조파 측정 장비로 하루동안 측정된 전압과 전류의 파형 및 실효값이며, 하루동안의 평균 전압 및 전류는 각각 91.1[kV], 44[A]이다.





R

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

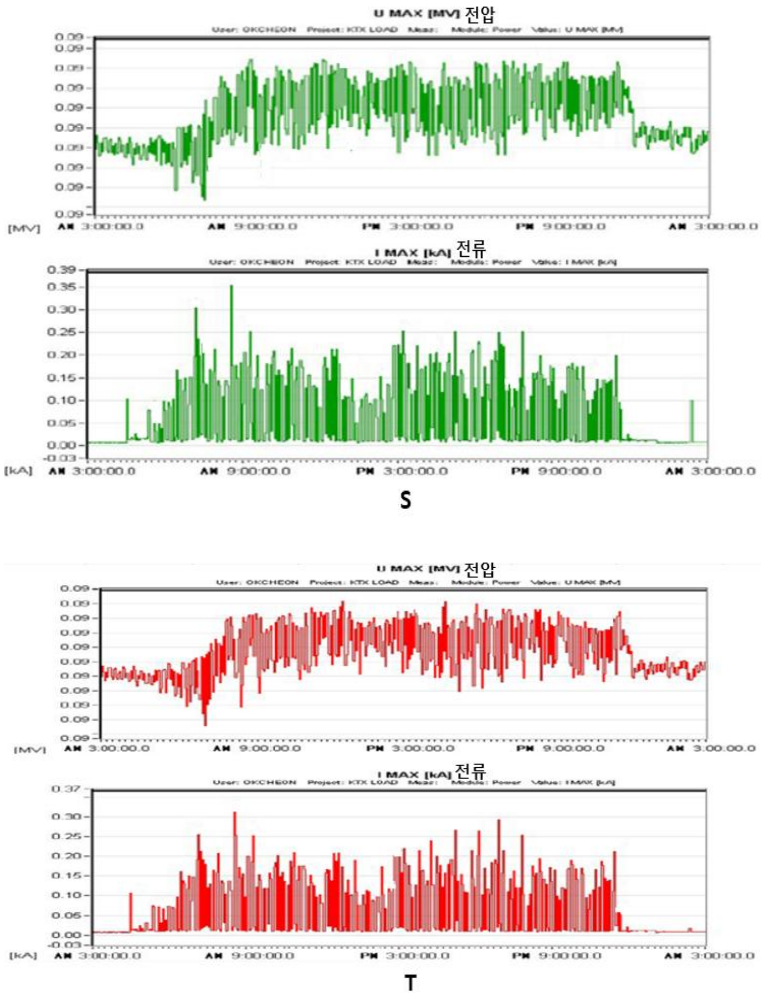


그림 13 R, S, T상의 측정된 전압 · 전류

그림 14은 하루동안의 전압 왜형률(THD)의 시간에 따른 변화를 보여주고 있으며, 전압 왜형률의 범위가 광범위 하기 때문에 고조파를 평가하기 위해서는 다른방법의 기법이 요구된다. 그림 14과 15에서 전압 왜형률과 전류 왜형률은 매 순간마다 변하는 특성을 가지고 있으며, 시간에 변하는 고조파를 평가하기 위한 방법에는 누적확률(CP, Cumulative Probability)를 사용한다. 누적확률은95%의 값을 측정시간 동안의 대표값으로 간주 된다. 그림 15는 하루동안의 전류 왜형률을 나타내며, 그림 14에서는 THD로 범위는 0~

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

10000[%]까지 나타내고 있으며, 국제 기준에 의해 종합 왜형률(TDD)로 올바른 범위를 찾을 수 있다. THD는 측정동안의 기본파의 크기에 대한 고조파 크기를 TDD는 최대값 또는 정격에 대한 고조파의 크기이기 때문에 최대값 또는 정격으로 환산된 용량에 대한 고조파의 크기로 나타낼 수 있다. 또한 전압 왜형률 및 전류 왜형률의 측정값으로 모든 차수의 고조파 성분이 존재함을 확인 할 수 있다. 그러므로 고조파 필터 설치에 있어서도 꾸준하고 다양한 연구가 필요할 것이다.

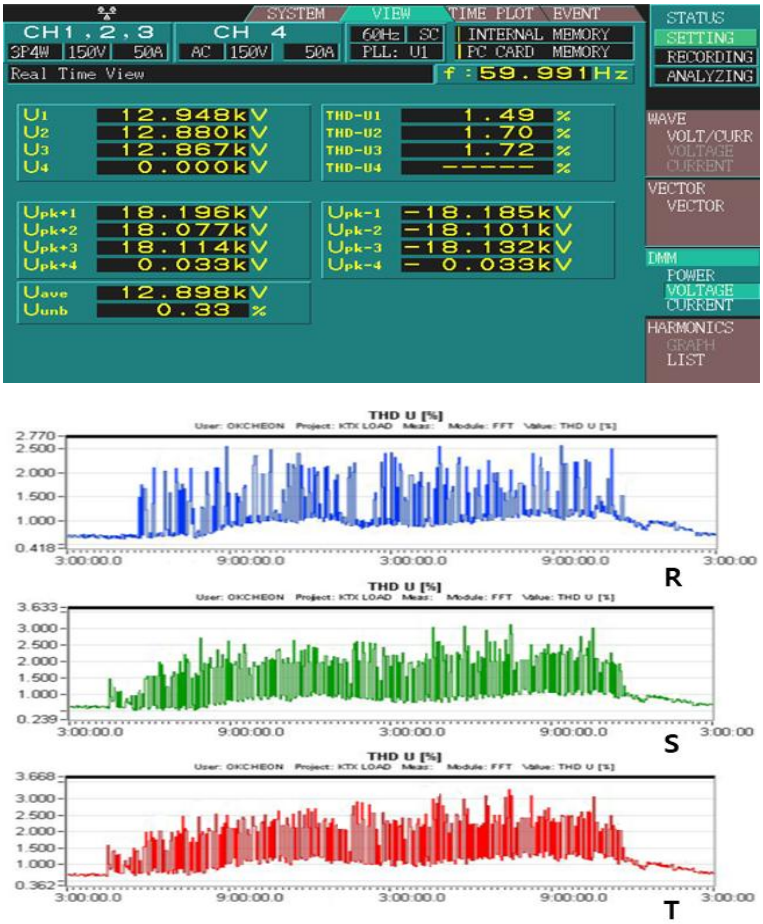


그림 14 R, S, T상의 측정된 전압 왜형률

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

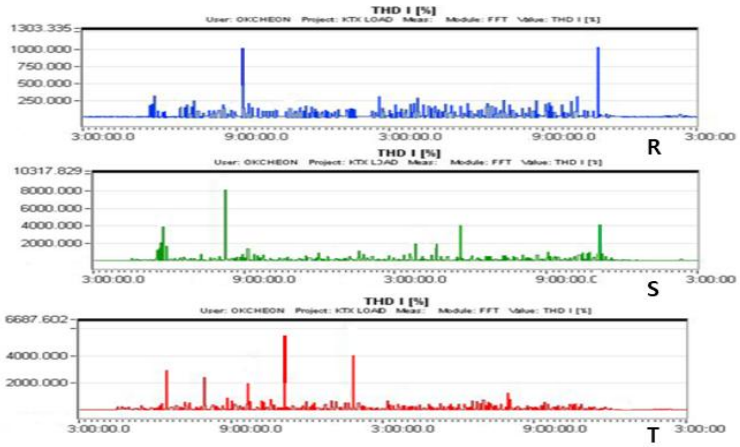


그림 15 R, S, T상의 측정된 전류 왜형률

고조파를 국제 기준을 적용하여 3초 측정법을 사용하여 시간에 따른 고조파를 측정하였다. 고조파 평가는 95% 누적확률 값을 적용하여 평가의 신뢰성을 높였으며, 측정 시간동안 95%의 누적확률을 적용한 전압 왜형률은 약 1.74% 였다. 한국전력 기준치 1.5%보다 높은 값으로 이는 자정부터 새벽까지 운행하는 철도차량이 거의 없는 경부하 시간대이며, 이 시간때의 전압 왜형률은 약 0.68%로 측정되었으며 앞으로 검토가 필요할 것으르 판단된다. IEC 61000-3-6 기준에 의거 고조파 전압 평가 결과 IEC 기준인 3.0% 보다는 작은 약 1.81% 이었으나 몇 개의 차수(9, 15, 21 25)에서 IEC 기준치를 초과한

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

것을 확인 할 수 있었다. 또한, 고조파 전류 평가 결과는 약 13.5%로 IEC에 의한 고조파 전류 평가 결과는 IEC 기준치 6~8%를 초과하였다. 고조파 전압 평가 결과는 IEEE 기준치 2.5% 보다 적은 약 1.81% 였으며 IEEEStd 519-1992 기준을 적용한다. 또한 고조파 전류 평가 결과는 IEEE 기준치 4.0%를 많이 초과하는 약 13.5% 였다. 대부분 홀수차 고조파가 기준치를 초과하는 특성을 보였으며, 고조파에 대한 측정 및 분석과 Active-Filter의 성능을 재검토할 필요가 있다고 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅴ. 결론

전기철도의 전기차량은 전력변환장치, 보조전원장치, 정류기, 견인장치 등으로 이루어져 있으며 전기차량의 경우 전력변환장치 및 정류기, 견인장치는 고조파의 주 발생원으로 볼 수 있다. 전력변환장치는 위상제어, 펄스폭 변조 방식에 의해 제어되는 인버터와 컨버터로 구성 된다. 인버터는 추진 제어장치에 의해 가변전압 및 가변주파수의 전원을 전동기에 공급하여 속도를 조절하며, 컨버터는 제동시 회생 에너지의 공급, 입력 역률의 향상, 고조파 저감 기능을 가지고 있다. 이러한 전력변환장치는 감속 및 정지을 수시로 하는 변동 부하이고 스코트 변압기,단권변압기등의 비선형 부하를 많이 포함하고 있기 때문에 고조파를 많이 발생시킨다.이러한 특성을 평가하기 위해서 IEC 61000-3-6, IEEE Std.519를 기준으로 누적확률 값을 사용하였다. 고조파는 주로 수용가측에서 발생하며 고조파의 크기가 클 경우 연계된 전력계통의 다른 수용가에 영향을 미친다. 또한 고조파의 발생은 비선형부하에 의해 일어나며, 철도차량은 정현파 전압을 공급할 때 비정현파 전류를 발생한다. 철도차량에서 발생되는 고조파는 철도신호 장애의 원인이 될 뿐만 아니라 전원계통에 유입되는 경우에는 기기의 효율을 저하, 인접한 통신선의 유도장애, 전력용 콘덴서의 과열 및 진동, 전기설비 부품의 절연 저하 및 수명을 단축시키고 보호 계전기를 오작동을 일으킬 우려가 있다. 우리나라의 고조파에 대한 관리 기준은 한국전력공사의 관리 규체치가 있다. 대용량의 전기를 사용하는 전기철도의 고조파에 대한 관리 기준 및 세부적인 기준이 필요하다. 철도차량에서 발생하는 고조파가 전철 변전소를 통해 전원계통으로 유입되어진 고조파를 저감하기 위한 대책으로는 수동 필터, 능동 필터, 리액터 설치, 전력변환기의 다중 펄스화, 역률 개선 커패시터에 고조파 필터를 설치 등이 있다. 본 논문에서는 고조파를 국제 기준에 의해 3초 측정법을 적용하여 하루 동안 측정하였으며, 고조파 평가는 95% 누적확률 값으로 하여 평가의 신뢰성

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

을 높였으며, 측정 시간동안 95%의 누적확률을 적용한 전압 왜형률은 약 1.74% 였다. 한국전력 기준치 1.5%보다 높은 값이다. 자정부터 새벽까지는 운행하는 철도차량이 거의 없는 경부하 시간대이며, 이 시간때의 전압 왜형률은 약 0.68%로 측정되었으며 좀 더 검토할 필요가 있다고 판단된다. IEC61000-3-6기준에 의거 고조파 전압 평가 결과는 IEC 기준인 3.0% 보다는 작은 약 1.81% 이었으나 몇 개의 차수(9, 15, 21 25)에서 IEC 기준치를 초과하였다. 전류 평가 결과는 약 13.5%로 IEC에 의한 고조파 전류 평가 결과는 IEC 기준치 6~8%를 초과하여 고조파 필터가 요구된다고 할 수 있다. 고조파 전압 평가 결과는 IEEE 기준치 2.5% 보다 적은 약 1.81% 였으며 IEEEStd 519-1992 기준을 적용한다. 또한 고조파 전류 평가 결과는 IEEE 기준치 4.0%를 많이 초과하는 약 13.5% 였다. 대부분 홀수차 고조파가 기준치를 초과하는 특성을 보였으며, 고조파 필터를 설치할 경우 고려할 사항이다.

고조파는 철도차량이외의 부하설비에서도 발생하므로 논문에서 적용한 측정법을 이용하면 신뢰성 있는 고조파 전력품질의 평가를 얻을 수 있다. 또한, 분석한 결과를 토대로 향후 현재보다 더 고속화 되어가는 전기철도 차량의 전력변환장치로 인해 발생될 수 있는 고조파의 악영향을 저감시키는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Reference

[1] "시스템분야 업무자료", 철도시설공단, 2004

[2] 국토해양부, 한국건설교통기술평가원, "도시철도차량 탑재용 회생에너지 저장 및 활용 기술개발 기획", 2012.

[3] 한국철도기술연구원, "에너지 저장 기술 시스템 역사 적용을 위한 적용성 연구", 2006.

[4] 최병운, "직류 전기철도 에너지 절감방안 연구 - 전력회생인버터 시스템 적용을 중심으로", 서울산업대학교 석사학위논문, 2006.

[5] 건설교통부, 국가기간 교통망계획(2000~2019) , pp :37~39, 1999.

[6] 한국철도기술연구원외, The open seminar for the countermeasure of harmonics on the electric railway , 1997.

[7] 과학기술부외 8개 연구기관, 고조파 저감 및 제어기술 개발(제2차년도 연차보고서) , pp :11~17, 1998.

[8] 이유경,"전기철도계통의 전력품질 안정화를 위한 고조파 저감 방안연구", 숭실대학교 대학원 박사학위 논문, 2008.8

[9] ames H. McClellan, Ronald W. Schafer, Mark A.Yoder"한국어판 Hello 신호처리", 홍릉과학출판사, 2005.8

[10] Rufer. A and Lemofouet. S, "Efficiency considerations and Measurements of a Hybrid Energy Storage System based on compressed Air and Super Capacitors". IEEE IAS Conf. Rec. pp 2077-2081, 2006.

[11] H. Wu and Dougal. R, "Comparison of Fuel Cell Hybrid Propulsion Topologies with Super-Capacitor", IEEE IAS Conf, Rec. pp 156-532. 2005.

[12] 장수진, 김용기, 방효진, 송상훈, 안규복, 원충연, "고조파 저감능력을 가진 직류 전철 회생인버터 시스템",조명전기설비학회 논문지, 제18권, 제5호, 2004.

[13] Aaron Brooker, Kristina Haraldsson, Terry Hendricks, Valerie

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Johnson, Kenneth Kelly, Bill Kramer, Tony Markel, Michael O'Keefe, Sam Sprik, Keith Wipke, Matthew Zolot, “ADVISOR Documentation”, NREL, 2002.

[14] "급전시스템 기술강좌", 일본철도총합연구소, 1995

[15] Zempachi Ougumi, Takeshi Abe, Minoru Inaba and Yoshiharu Uchimoto, “Lithium Niji Denchi”, 2008.

[16] R. M. Schupbach, J. C. Balda, "Comparing DC-DC Converters for Power Management in Hybrid Electric Vehicles", Electric Machines and Drives conference, 2003. IEMDC' 03. IEEE International Vol.3. pp.1369-1374, 2003.

[17] Yu Du; Xiaohu Zhou, Sanzhong Bai, Lukie, S, Huang, A, "Review of Non-isolated Bi-directional DC-DC Converters for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charge Station Applications at Municipal Parking Decks" Applied Power Electronics Conference and Exposition and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE, pp.1145-1151, 2010.

[18] Stefan Waffler, Johann W. Kolar, "A Novel Low-Loss Modulation Stategy for High-Power Biderectional Buck+Boost Converters," IEEE Trans. Power Electron, vol.24, no.6, pp.1589～1599, 2009.

[19] Ned Mohan, Tore M. Undeland, “Power electronics: converters, applications, anddesign”, 2007.

[20] "고속전철 서울-대전구간 고조파 불평형 역률 예측계산 및 대책설계", 한국철도기술연구원, 1999.12

[21] 김길상 "경부고속철도 시험선구 고조파 예측에 관한 연구", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 1998,

[22] Yasunao Sekijima, Masayuki Inui, Yukitaka Monden, Hiroyuki Nishikawa,『Application Study of Electric Double Layer Capacitoron regenerative braking for DC railway system』,IEE Japan, pp.195-196, 2004.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[23] Takeshi Konishi, Shin-ichi Hase, Yoshinibu Nakamichi, Hidetaka Nara, Tadashi Uemura, Michihiro Sekizawa, Tetsuzo Yamamoto, 『Application of Electric Double Layer Capacitors for Railway Power Supply System』, Meidensha TER-04-48, pp.1-6, 2004.

[24] Alfred Rufer,『Energy Storage for Railway Systems, Energy Recovery and Vehicle Autonomy in Europe』, IEEE The 2010 International Power Electronics Conference, pp.3124-3127, 2010.

[25] A. Okui, S. Hase, H. Shigeeda, T. Konishi, T. Yoshi, 『Application of Energy Storage System for Railway Transportation in Japa n』,IEEE The 2010 International Power Electronics Conference, pp.3117-3123, 2010.

[26] 김병진, 문학용, 송양회, 임병국, 전희종 “전압제어형 능동전력필터를 이용한 비선형부하의 고조파저감 및 역률개선”, 전력전자학회논문지, 2000. 8

[27] 노의철, 정규범, 최남섭, “전력전자공학”, 문운당, 2004. 1

[28] 日新電機株式會社 “The Countermeasure of Voltage Fluctuation & Harmonic on the Electric Railway" 2002. 9. 4

[29] 최규하, 한병문, 정승기, “국내 고조파저감기술관련 연구 50년사” 전기학회지, 1997년

[30] 정승기 "계통 고조파 현상의 원인 및 대책”

[31] "고속전철 서울-대전구간 고조파 불평형 역률 예측계산 및 대책설계", 한국철도기술연구원, 1999.12

[32] 김길상 "경부고속철도 시험선구 고조파 예측에 관한 연구", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 1998,

Collection @ chosun