

PTW를 이용한 수변전 계통의 고조파 분석기법

(Harmonics Analysis of Distribution System using PTW)

설용태* · 이의용** · 김응래*** · 최중문****

(Yong-Tae Sul · Eui-Yong Lee · Eung-Rae Kim · Jong-Moon Choi)

요 약

본 연구에서는 실제 운용중인 대규모의 산업용 수변전 계통에서의 고조파 특성을 PTW(Power Tools for Windows)를 이용하여 분석하는 기법을 제시하였다. 고조파 조류계산을 통해 계통내의 각 모선, 단자에서의 전압과 전류의 고조파 왜형률에 대한 정확한 진단과 커패시터 뱅크와 필터와의 효용성을 비교분석 하였다. 또한 필터의 용량에 따른 선로의 용량성에 따른 과도 고조파 특성과 부하변동과 같은 시스템 변화에 의한 전압, 전류의 고조파 왜형을 등을 해석하였다. 이러한 분석기법은 산업용 수변전 계통의 전력품질에 대한 상세한 분석이 가능함을 보였다.

Abstract

This paper describes the harmonic analysis method of industrial power systems using PTW(Power Tools for Window). Voltage/current distortion levels and filter at steady state are calculated by harmonic load flow. Special features of its input processes PTW is utilized in order to facilitate creation of new simulation cares. Harmonics at transient state, the filter and the load variation, are analysed to diagnosis the power quality in actual industrial plant model.

1. 서 론

전력계통에서는 변압기와 회전기의 자기포화현상, 아크로와 같은 비선형부하, 사이리스터를 이용한 전력조정기 및 정류기와 같은 전력변환기 등에 의해서 고조파가 발생한다. 이러한 고조파는 전원파형의 왜곡화, 고조파 전류에 의한 잡음과 유도장해 등으로 전기기기에 진동을 유발하여 기기의 성능과 수명저

하는 물론 보호계전기의 오동작 등을 유발 할 수 있다. 특히 최근에는 전력전자 기술의 발전으로 반도체 스위칭 소자의 사용이 증가함에 따라서 고조파 장해로 인한 전기의 품질에 대한 중요성이 높아지고 있다[1-3]. 컴퓨터를 이용한 고조파 분석에는 EMTP, EDSA, MATLAB 등과 같은 시뮬레이션하는데, 기존의 기법들은 주로 1기 계통에 대한 필터의 설계해석에 주안점을 두어 운용중인 실제의 대규모 시스템에서의 종합적인 고조파 분석에는 한계가 있었다. 특히 부하용량의 변화와 선로의 용량성 및 고조파 전류에 대한 특성해석 등이 미흡하였다[4-7].

본 연구에서는 실제 운용중인 대규모의 산업용 수

* 정회원 : 호서대학교 전기공학과 교수
 ** 정회원 : 호서대학교 대학원 전기공학과 박사과정
 *** 정회원 : 호서대학교 대학원 전기공학과 박사과정
 **** 정회원 : 호서대학교 전기공학과 교수
 접수일자 : 2001년 2월 28일

변전 계통에서의 고조파 특성을 PTW(Power Tools for Windows)를 이용하여 다양하게 분석하는 기법을 제시했다. 먼저 계통내의 여러 고조파 발생원들에 따른 고조파 현상을 구하였고, 커패시터와 필터의 특성 비교와 필터의 용량에 따른 선로의 용량성에 대한 가능성을 검토하였다. 또한 고조파 전류 특성과 부하 변화에 따른 고조파 전압, 전류의 왜형을 등을 분석함으로써 수변전 계통의 설계와 운용시 전력품질에 관련된 고조파 현상에 대한 종합적인 해석이 가능하게 하였다.

2. 기본 이론

계통에서 발생하는 n차 고조파 전류 I_n 은 식 (1)과 같이 표현된다[6].

$$I_n = \frac{I_1}{n} \times \frac{2\sqrt{A^2 + B^2}}{(n^2 - 1)\sqrt{u^2 - u \cdot \sin 2u + \sin^2 2u}} \quad [A] \quad (1)$$

여기서,

n : 고조파 차수

I_1 : 기본파 전류 [A]

I_d : 직류 부하전류 [A]

$$A = n \cdot \sin u \cdot \cos nu - \cos u \cdot \cos nu$$

$$B = n \cdot \sin u \cdot \sin nu + \cos u \cdot \cos nu - n$$

기본파 전류 I_1 을 다시 쓰면,

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times I_d \times \frac{\sqrt{4(1 - \cos^2 u)^2 + (2u - \sin^2 u)^2}}{4(1 - \cos u)} \quad [A] \quad (2)$$

$$u = \cos^{-1} \left(1 - \frac{6 X_s I_d}{\pi E_{d0}} \right) \quad [rad] \quad (3)$$

여기서,

I_d : 직류 부하 전류 [A]

X_s : 직류 리액턴스 [Ω]

E_{d0} : 직류 무부하 전압 [V]

와 같고, 부하측으로 유입되는 고조파 전류 $I_{H(n)}$ 은 식 (4)와 같다.

$$I_{H(n)} = I_{HG(n)} \times \frac{r_\theta + jn x_\theta}{(r_s + r_\theta) + jn(x_s + x_\theta)} \quad [A] \quad (4)$$

여기서,

$I_{HG(n)}$: 정류기에서 발생하는 고조파 전류 [A]

$r_s + jn x_s$: 전원 측의 고조파 임피던스 [Ω]

$r_\theta + jn x_\theta$: 부하 측의 고조파 임피던스 [Ω]

또한 전압 왜형률(ΔV_h)은 다음 식 (5)와 같고,

$$\Delta V_h = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_{ph}} \times 100 \right)^2} \quad [\%] \quad (5)$$

여기서,

V_n : 고조파 전압 [V]

V_{ph} : 교류측 상전압 [V]

고조파 발생의 정도를 나타내는 종합 고조파 왜형률(THD: Total Harmonics Distortion)은 식 (6)과 같이 고조파 전압의 실효치와 기본파 전압의 실효치의 비로 표시된다.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100 \quad [\%] \quad (6)$$

여기서,

V_1 : 기본파 전압

V_2, V_3, \dots, V_n : 각 차수별 고조파 전압

3. 고조파 분석과 필터용량

3.1 고조파 분석

본 연구에서는 산업용 수변전계통의 고조파 분석을 위해서 배전계통의 조류계산, 고장계산, 안정도 및 고조파 등을 시뮬레이션 할 수 있는 종합적인 S/W인 PTW의 HI-WAVE 프로그램을 이용하였다 [7]. 이 프로그램을 이용하기 위해서는 그림 1과 같이 케이블, 변압기 및 부하 등에 대한 계통의 각종 입력 자료가 필요한데, 실제 운용중인 계통의 경우 이러한 구성설비의 정확한 값을 구하기가 어렵다. 본 논문에서는 다음과 같은 방법으로 입력 데이터를 구하였다.

1) 케이블 : 케이블의 경우는 선로길이와 정·역상

PTW를 이용한 수변전 계통의 고조파 분석기법

분 임피던스가 필요한데 정상분 임피던스 값은 제조 회사의 자료로부터 구하고, 역상분 임피던스는 대칭 좌표법 등의 근사화 기법으로 산정하였다.

2) 변압기 : 변압기의 경우는 임피던스, 결선상태, 1,2차 측 전압 등이 필요하며 이러한 자료들은 제작 회사의 자료를 이용하였다.

3) 전동기 부하 : 부하의 경우는 용량, 역률, 효율, 극수 및 차과도 리액턴스 등이 필요하며, 이들 값은 제작회사의 자료를 이용하였다.

4) 고조파 발생 부하 : 고조파 발생 부하는 각 부하에서 발생하는 고조파 발생원을 선택하여 입력하였다.

5) 필터 : 필터는 종류와 용량에 대한 자료가 필요한데 단일 동조 필터를 사용하고, 용량은 고조파 차수와 개선 전 역률과 개선 후 역률을 고려하여 산정하였다.

단일 동조필터는 그림 2와 같이 R-L-C의 직렬회로로 구성되며, n차 고조파 필터의 임피던스 Z_n 은 식 (7)과 같다.

$$Z_n = R_n + j(\omega L_n - \frac{1}{\omega C_n}) [\Omega] \quad (7)$$

여기서,

ω : 각속도

R_n, L_n, C_n : 각각 n차 고조파 필터의 저항, 리액턴스, 커패시턴스

수동필터의 용량 Q_p 는 식 (8)과 같이 역률변화를 이용하여 구한다.

$$Q_p = (Q_1 - Q_2) \times \frac{1}{n^2} \quad (8)$$

여기서,

Q_1, Q_2 : 각각 역률의 개선 전, 후 무효전력

n : 특정 고조파 차수

이러한 수동필터는 특정 고조파만을 상쇄하므로 부하에 두 가지 이상의 고조파가 발생하는 경우는 수동필터를 병렬로 연결하고, 용량은 각 고조파의 발생 크기에 비례하여 산출한다.

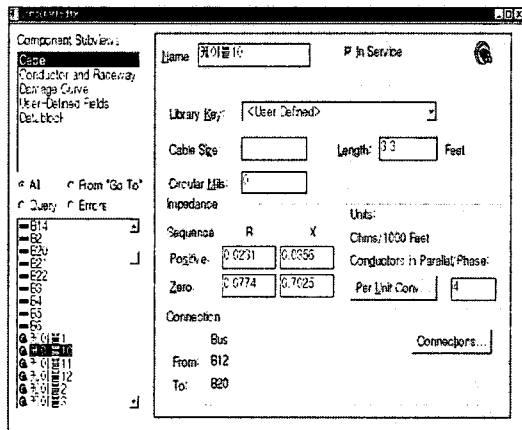


그림 1. PTW의 입력 데이터 화면
Fig. 1. Input data of PTW

3.2 필터 용량

산업용 수변전 계통에는 일반적으로 역률개선과 고조파 저감 겸용으로 커패시터 뱅크가 사용되거나 고조파 저감만을 위한 필터가 사용된다. 필터는 크게 수동필터와 능동필터로 구분되며 수동필터는 다시 단일동조 필터와 2차형 고차필터 등이 있는데, 저차의 고조파 발생량이 많은 수전계통의 경우는 고가의 능동필터보다는 대부분 그림 2와 같은 수동필터의 한 종류인 단일동조 필터가 이용된다.

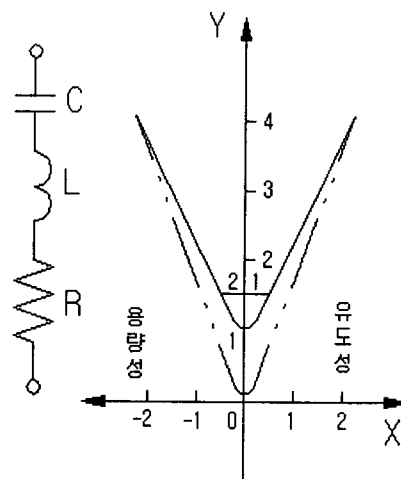


그림 2. 단일 동조필터 특성도
Fig. 2. Diagram of single tuned filter

4. 사례 연구 및 분석

사례연구를 위하여 그림 3과 같은 수전용량 4,500[kVA], 전압 22.9[kV]의 실제 운용중인 공장의 수전설비도의 일부분을 모델계통으로 선정하였다[8].

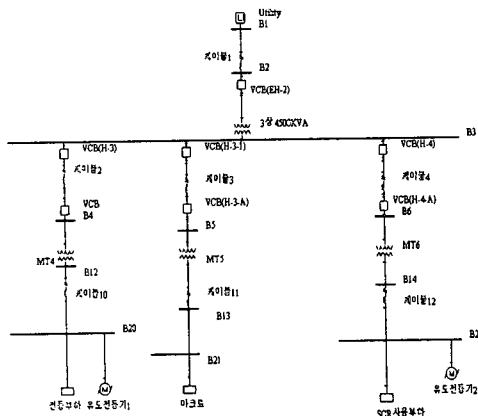


그림 3. 모델 계통도
Fig. 3. Diagram of model system

모델계통의 부하는 전동, 아크로, SCR사용 전력변환기 및 유도전동기 등으로 다양하게 구성되어 있으며, 고조파 발생원에 따른 차수별 전압 고조파의 크기는 표 1과 같이 규정되어 있으며, 고조파 발생원에 따라서 서로 다르게 특정 고조파가 발생함을 알 수 있다.

표 1. 고조파 발생원에 따른 전압 고조파의 크기
Table 1. Harmonic voltage to harmonic sources

차수 \ 발생원	5차	7차	11차
IEEE 12pulse	0.51	1.87	4.5
ARC Furnace	3.27	0.96	1.12
AC Drive	104	2	2.11
6Pulse SCR	23	10	9
DC Drive	21.89	12.18	9.07
6Pulse IGBT	44	24	7

(단위 : [%])

4.1 고조파 전압, 전류의 분석

모델계통의 전력조류와 전압강하 등의 전기적 특성을 계산한 결과는 그림 4와 같다. 그림 4의 필터 1, 2, 3은 3차 고조파를 저감하기 위한 필터로서 용량은 100[kVAR], 30[kVAR], 220[kVAR]이고, 4는 5차 고조파 저감용으로 용량은 154.5[kVAR]이다.

모델계통의 각 모선에서의 고조파 전압의 크기와 필터의 효과를 표 2에 나타내었다. 부하가 연결된 모선 20에 3차 고조파 저감용인 100[kVAR]의 단일 동조필터와 5차 고조파 저감용인 154.5[kVAR]의 단일 동조필터를 설치한 경우와 일반적으로 수변전 계통에서 비용상의 문제로 필터를 대신하여 역률보상을 겸해 설치 운용중인 용량 261.6[kVAR]의 커패시터 बैं크의 경우를 비교 분석하였다.

표 2. C뱅크와 필터 설치 시 모선 12, 20 고조파 전압의 크기
Table. 2. Harmonic voltage by C bank and filter at bus 12, 20

고조파	모선 12		모선 20			
	C뱅크		필터	C뱅크		필터
	설치 전	설치 후		설치 전	설치 후	
3차	79.68	3.12	0.37	71.13	3.18	0.39
5차	23.59	50.01	2.10	23.64	50.09	2.23
7차	1.21	18.08	0.78	1.10	18.11	0.81

(단위 : [%])

표 2에서 보면 3차 고조파가 커패시터 बैं크의 경우 기준치에 근접한 3.18[%]로 필터의 경우는 0.39[%]로 현저하게 저감됨을 알 수 있다. 그러나 커패시터 बैं크의 경우 필터와는 달리 5차와 7차 고조파는 오히려 증가함을 알 수 있다. 따라서 이러한 분석결과를 근거로 전력의 품질과 경제성을 비교 할 경우 커패시터 बैं크와 필터의 사용에 대한 결정을 할 수 있다. 전압에 대한 고조파에 비해서 상대적으로 소홀히 하기 쉬운 전류의 왜형률을 분석하기 위해 케이블 10~12에 대해서 시뮬레이션 한 결과는 표 3과 같다.

PTW를 이용한 수변전 계통의 고조파 분석기법

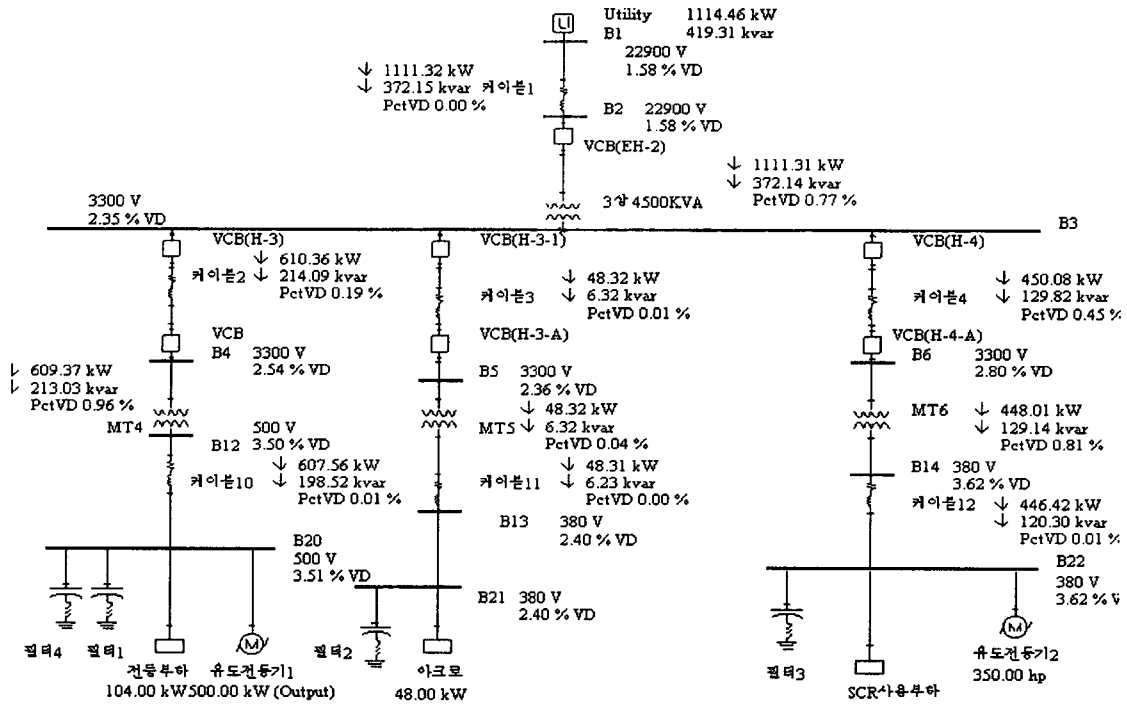


그림 4. 모델계통의 조류계산도
Fig. 4. Load flow diagram of model system

표 3. 케이블에서의 고조파 전류의 왜형률
Table 3. Harmonic currents distortion in cable

케이블 왜형률	케이블 10		케이블 11		케이블 12	
	설치 전	설치 후	설치 전	설치 후	설치 전	설치 후
Isc/Il	19.7		212		22.8	
5차	27.51	0.12	272.8	7.14	498.66	0.13
7차	18.3	0.13	32.98	6.32	25.95	4.22
11차	6.22	2.09	22.71	3.13	35.89	2.35

(단위 : [%])

케이블 10의 단락전류(ISC)는 184.996[A], 부하전류(IL)은 939[A]로서 ISC와 IL의 비는 19.7이다. 고조파 전류의 왜형률을 나타내는 IEEE 519TDD 기준에 따르면 ISC/IL의 값이 20이하이고 고조파 차수가 11차 미만인 경우는 왜형률의 4% 미만이어야 되는데, 표 3의 결과에서 보면 필터 설치 이후 3, 5, 7 및 11

차 고조파의 왜형률이 모두 기준범위 내로 감소함을 보였다. 케이블 12의 경우는 단락전류가 20.23[kA], 부하전류는 96[A]로서 ISC/IL의 값이 212로서 IEEE 519TDD에 의하면 왜형률이 5% 이내라야 되는데, 이 경우도 역시 필터의 설치로 모든 차수의 고조파가 기준치 이내로 감소하였다.

4.2 시스템의 변화

필터나 커패시터 뱅크 등을 설치 운용시 계통이 용량성이 되면 그림 5와 같이 계통이 용량성으로 변화하는 임계점에서는 거의 0까지 감소 한 후 다시 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 계통이 용량성이 되면 수전단 전압이 송전단 전압보다 높아지는 페란티 현상이 발생하여 유도성인 경우에 비해서 사용기기의 손상과 병렬 공진시의 위험성이 높아지는 등의 나쁜 영향을 줄 수 있다.

이러한 현상을 방지하기 위한 방법의 하나로 수동 필터 보다는 능동 필터를 설치하는 것이 바람직하다.

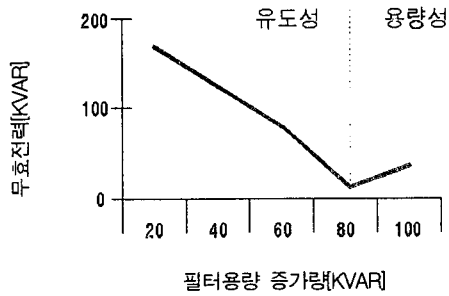
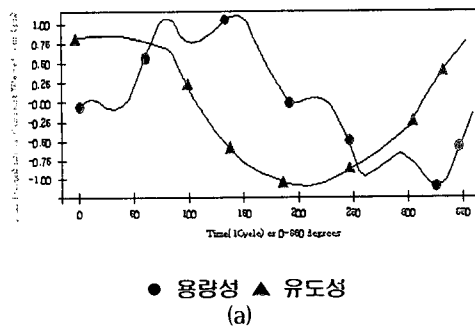
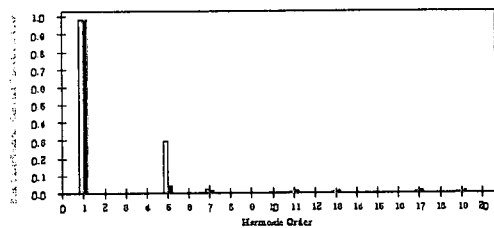


그림 5. 필터 용량 증가량과 무효전력의 관계
Fig. 5. Relation between filter capacity and reactive power.



● 용량성 ▲ 유도성
(a)



□ 용량성 ■ 유도성
(b)

그림 6. 임피던스 변화 시 고조파 전류의 변화
(a) 1사이클 당 전류파형 (b) 차수별 고조파 크기
Fig. 6. Harmonics current to impedance variation

(a) Current waveform per 1 cycle
(b) Harmonics order size

또한 그림 6과 같이 전류파형의 찌그러짐도 용량성인 경우가 유도성인 경우에 비해서 더 심함을 보였다.

부하의 용량변화에 따른 고조파 현상을 분석하기 위해서 모선 20의 유도전동기 용량을 500[kW]에서

50[%] 증감하였을 경우를 분석한 결과는 표 4와 같다.

표 4에서 보면 부하가 증가한 경우 모선 20의 경우 전압의 왜형률 4.6[%]에서 27.1[%]로 약 5배 이상 증가한 반면에 전류의 왜형률은 25.2[%]에서 26.6[%]로 증가폭이 작았다. 또한, 부하 감소의 경우도 전압 왜형률은 약 50[%] 정도 감소한 반면에 전류의 경우는 1[%] 미만의 감소를 보임으로서 부하의 변화에 따라서 전압의 왜형률에 비해서 전류는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이러한 현상은 인접모선인 모선 21과 22 및 전원모선인 2에서도 유사함을 보였다.

표 4. 부하 변화 시 전압 왜형률과 전류 왜형률
Table 4. THD and TDD to load change

모선	변화 없음		증가		감소	
	V. THD	I. TDD	V. THD	I. TDD	V. THD	I. TDD
모선2	1.3	4.6	1.9	5.8	1.0	2.9
모선20	4.6	25.2	27.1	26.6	2.4	24.1
모선21	1.9	8.8	2.7	8.9	1.4	8.7
모선22	3.2	25.1	3.4	32.8	3.1	17.6

(단위 : [%])

5. 결론

본 연구에서는 실제 운용중인 대규모 산업용 수변전 계통에서의 고조파 현상을 PTW를 이용하여 분석하는 기법을 제시하였다. 고조파 조류계산을 통해 계통내의 각 모선, 단자에서의 전압, 전류의 고조파 왜형률 계산과 필터의 추가 등에 대한 상세한 검토가 가능하였다. 또한 필터의 과용량, 부하 변화 등 시스템 변화에 따른 선로의 용량성과 과도현상에 대한 해석 등으로 산업용 수변전 계통의 설계 운용시 전기 품질에 대한 진단기법으로 활용 할 수 있다.

참고 문헌

- (1) "전력계통의 고조파 대책 연구", 서울대학교 생산기술연구원, pp.16~17, 1986.
- (2) 박영문, 김재철, "전력계통의 고조파 해석", 서울대학교 공내연구 보고서 제 18권 제1호, pp.103~109, 1986.

PTW를 이용한 수변전 계통의 고조파 분석기법

- [3] 신중린, "송변전설비의 비선형특성으로 인한 전력계통의 고조파 해석" 한국전력공사 연구보고서, 1994.
- [4] 김형권, "전력설비의 비선형 특성으로 인한 고조파 분석", 건국대 석사학위논문, 1995.
- [5] "전기사용장소의 고조파 장애 분석 연구", 한국전기 안전공사 pp.99~131, 1996.
- [6] 송보호 "수전설비의 고조파 진단과 대책에 관한 연구", 인하대 석사학위논문, 1996.
- [7] SKM Systems Analysis, "H_WAVE reference manual", 1999..
- [8] 삼성전자 전기설비 진단 보고서, pp. 55~77.

◇ 저자소개 ◇

실 용 태 (契龍泰)

1979년 한양대 공대 전기과 졸. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸(석사). 1984년 한양대 대학원 전기공학과 졸(박사). 현재 호서대학교 전기공학과 교수.

이 의 용 (李懿鏞)

1991년 순천향대 이공대 전기공학과 졸. 1993년 호서대 대학원 전기공학과 졸(석사). 현재 호서대 대학원 전기공학과 박사과정.

김 응 래 (金應來)

1986년 호서대 이공대 전기과 졸. 1991년 호서대 대학원 전기공학과 졸(석사). 현재 Lafarge Halla Cement(Co.)소속. 호서대 대학원 전기공학과 박사과정.

최 종 문 (崔種汶)

1974년 연세대 이공대 전기과 졸. 1977년 연세대 대학원 전기공학과 졸(석사). 1983년 연세대 대학원 전기공학과 졸(박사). 현재 호서대학교 전기공학과 교수.