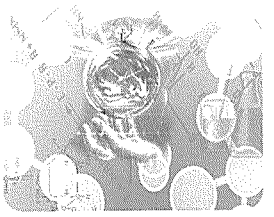
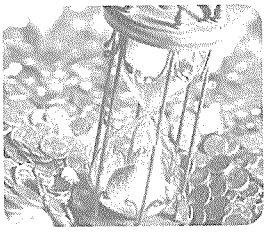
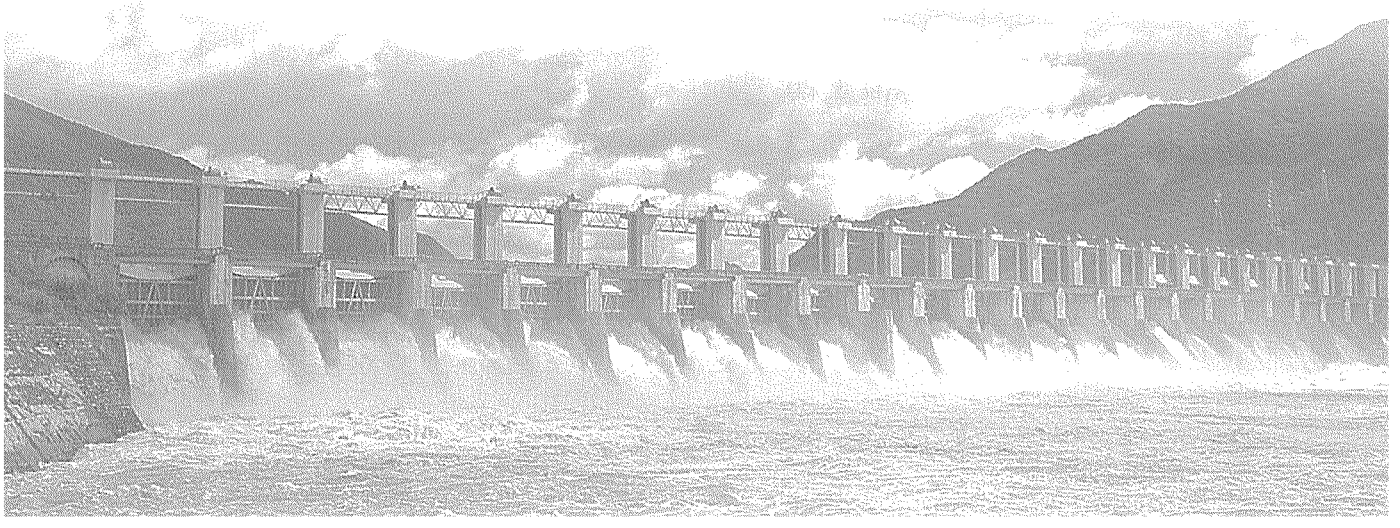
SPECIAL-3
논단 & 특집





전력용 하이브리드 고조파 필터 개발

전력품질기술(주) 박병주대표이사



■ 배 경

선형부하가 주류를 이루었던 과거와 달리 1980년대 하반기 이후 전력전자기술의 폭발적인 수요와 더불어 정보화 사회의 가속화가 급진전 되고 있다. EPRI가 자국의 전력소비패턴을 조사한 바에 따르면 1992년 15~20%에 불과했던 비선형부하의 비중이 2000년에는 50~70%까지 육박한 것으로 알려졌다. 비선형 부하는 DC 전원장치와 같은 IT 인프라설비, 개인용 컴퓨터, UPS, 출력제어가 용이한 인버터, 컨버터, 엘리베이터, 전자식안정기 등이 주류를 이루고 있다. 고조파 발생원의 확산은 백화점, 공공기관, 아파트, 빌딩, 공장 등에서 변압기, 케이블, 차단기, 정밀전자장비 등의 과열, 화재, 오동작과 같은 심각한 피해를 발생시키고 있다. 이러한 고조파에 의한 피해를 막기 위해 그 동안 미국과 유럽, 일본 등지로부터 수입에만 의존되어왔던 고조파필터가 국내기술진의 4년여의 연구노력 끝에 마침내 상용화의 결실을 맺게 되어 수급의 원활과 피해예방 및 대처를 보다 쉽게 할 수 있는 계기를 마련하게 되었다.

1. 서론

흔히 사용되어 왔던 고조파 전류의 저감방식에는 다펄스정류방식과 PWM 스위칭제어와 같은 비선형부하의 설계 단계에서 검토되는 것과 다수의 단일동조필터와 고차고조파필터를 병행하는 것, 그리고 능동형고조파필터 등이 있다. 그러나 이러한 저감방법에는 몇 가지 한계점이 있다. DCL, ACL은 저감율이 작아 IEEE Std. 519에서 규제하고있는 총합전류왜형율(ITDD; Total Demand Distortion)의 규제치에 만족할 수 없으며 지나지 않으며, 다펄스정류방식과 PWM 스위칭 제어방식은 다권선변압기의 추가 시설과 다수의 정류키트가 소요되어 경제성이 크게 떨어지는 문제가 있기 때문에 특별한 경우를 제외하고는 그 활용도가 매우 낮은 편이다. 다수의 단일동조필터를 시설하는 경우에도 막대한 설계 엔지니어링 비용과 설치 후 이상 고조파의 반공진현상이 발생될 확률이 높고, 영상분고조파필터의 경우 영상분에 국한된 필터효과의 한계가 있다. 능동형고조파필터의 경우, 고가인 점이 문제되어 부하 변동이 급격히 변화하는 경우나 불특정 다수의 부하를 한 개소에서 제어하는 경우에만 한정적으로 사용되고 있다. 이번에 전력품질기술㈜가 상용화한 전력용 하이브리드고조파필터는 순수 수동형의 RLC 복합소자만을 응용한 토폴로지를 구성하여 기존필터들의 단점을 보완한 간결하고 효용성이 높은 필터로서 원리와 특성, 모의결과, 실측자료를 소개한다.

- HHF; Hybrid Harmonic Power Filter 전력용 하이브리드 고조파 필터
- 특허청; 특허등록No. 0383791)
- 산업자원부 기술표준원; EM인증 제2003-091호

2. 필터회로

기존의 고조파 저감 방법으로는 비선형부하가 설치된 개소에 예측되는 고조파 전류의 차수에 맞추어 다수의 L-C직렬동조 필터 회로를 구성하는 것이 보편적 이었다.
콘덴서는 계통의 역율을 보상하는 기능과 함께 인덕터와 동조회로를 이루어 계통에 병렬로 접속이 된다. 이러한 필터 사용시 문제점은 콘덴서의 용량성이 계통의 변압기, 케이블 등의 인덕턴스 성분과 결합되어 해당 차수에 근접된 저차고조파영역에서 반공진을 유발시키는 데에 있다.
이러한 문제점 때문에 기존의 고조파 필터는 계통을 사전 연구 검토하여 문제를 최소화 할 수 있는 Solution 즉, 계통의 임피던스 맵 작성, 모의, 고조파 조류 계산, 최적의 상수를 적용한 수동부품의 설계 등 시간과 비용면에서 크게 불리한 면이 많다.

하이브리드고조파필터는 이 같은 단점을 극복한 것으로 구성은 그림1.과 같이 직렬 접속된 라인리액터, 로드리액터와 병렬접속된 필터콘덴서, 필터리액터로 구성된다. 라인리액터와 로드리액터는 외부 유입 고조파 전류의 차단과 고조파전류 흡수에 따른 전압파형의 왜곡현상을 보정하며 필터콘덴서에 의한 전압 상승효과를 억제하여 비선형 부하

가 정격전압 이내에서 동작하도록 한다. 필터콘덴서와 필터 리액터의 기능은 해당 주파수대 이상의 고조파전류를 흡수하고 비선형 부하의 역율을 개선한다.

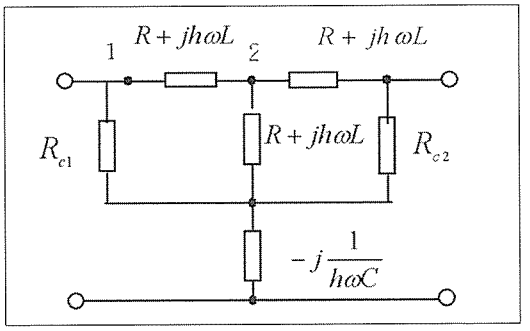


그림1. 하이브리드고조파필터 단선도

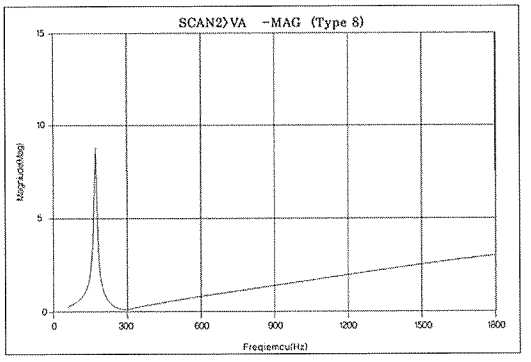


그림2. 동조필터 3rd, 5th, 7th, High-Pass 필터 계통의 주파수 응답 특성

그림2.는 제3고조파, 제5고조파, 제7고조파 필터와 High-Pass필터를 조합 설치한 경우 계통의 주파수에 대한 임피던스응답특성을 나타낸다. 180Hz, 300Hz, 420Hz, 660Hz의 특성은 비교적 안정적이나 120Hz, 240Hz, 360Hz 영역에서 반공진을 형성하여 근접한 고조파전류가 유입될 경우 전압왜율의 확대 문제를 초래할 수 있다.

그림3.은 HHF를 적용한 경우 계통의 주파수 응답으로 저차 주파수에서 피크가 있는 것을 제외하고는 전영역에서 뛰어난 안정도를 보이고 있어 비선형 부하로부터 발생되는 비정수 고조파, 우수 및 기수 고조파를 망라하여 뛰어난 필터링 효과를 나타낸다.

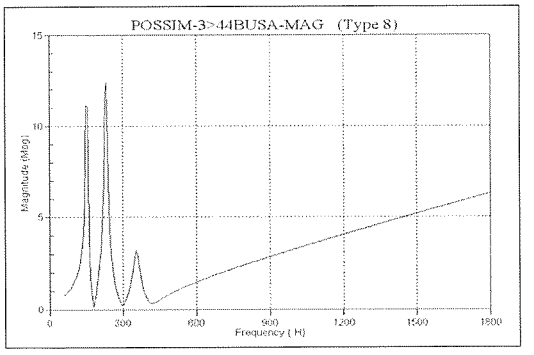


그림3. HHF 계통의 주파수 응답 특성

익히 알려진 바와 같이 6Pulse bridge 컨버터의 전형적인 고조파 발생 스펙트럼은 5th, 7th, 11th……의 크기 순으로 나타나는데 HHF는 특히 6Pulse 다이오드, 사이리스터를 포함한 모든 컨버터 부하에 적합한 성능을 발휘하도록 되어있다.

3. 성능 평가 비교

3-1. 6Pulse 정류기인버터 입력전력품질

EMTP(Electro Magnetic Transient Program), TOP, HIOKI 810 Power Analyzer가 모의 및 실측에 이용되었다. 그림4.는 모의 전류파형, 그림5.는 실측 전류파형을 나타낸다.

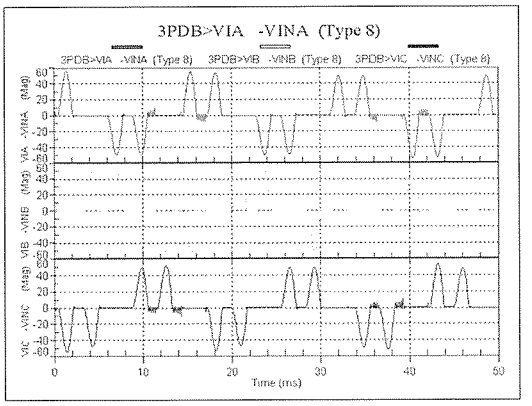


그림4. 6Pulse 정류기의 모의 전류파형

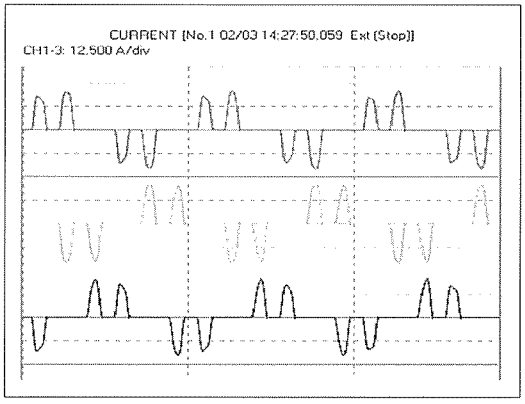


그림5. 6Pulse 정류기 실측 전류파형

표1.과 표2.는 6Pulse 정류기의 모의와 실측 고조파 특성으로 주로 제5차, 제7차,제11차 고조파 전류의 순으로 비슷한 패턴을 나타낸다.

- 표1; THD_모의스펙트럼
  Total Harmonic Distortion(모의)
- 표2; IHD_실측스펙트럼
  Total Harmonic Distortion(실측)

표1. 6Pulse 정류기 모의 고조파 스펙트럼 THD

차수	In[%]	차수	In[%]
1	100	11	30.2
2	1.3	12	2.9
3	1.5	13	17.0
4	6.0	14	0.9
5	82.9	15	0.4
6	5.4	16	1.2
7	68.0	17	3.6
8	1.7	18	1.3
9	1.8	19	5.9
10	3.5	THD	115.0

표2. 6Pulse 정류기 실측 고조파 스펙트럼 THD

HARMONICS LIST [No. 1 02/03 14:27:50.059 Ext(Stop)] CH1 I VALUE iHarm OFF					
O..	(%)	O..	(%)	Or..	(%)
1	100.00	18	0.13	35	2.24
2	0.84	19	13.06	36	0.07
3	8.71	20	0.32	37	3.50
4	0.84	21	5.26	38	0.09
5	80.43	22	0.36	39	1.02
6	0.44	23	8.99	40	0.13
7	69.45	24	0.18	41	0.61
8	0.43	25	10.38	42	0.05
9	6.24	26	0.22	43	1.12
10	0.25	27	2.16	44	0.05
11	31.77	28	0.27	45	1.00
12	0.30	29	1.37	46	0.04
13	17.05	30	0.10	47	0.85
14	0.63	31	1.62	48	0.03
15	2.54	32	0.12	49	1.69
16	0.56	33	1.57	50	0.05
17	3.52	34	0.12	THD	75.37(%)

표3. 6Pulse 정류기 실측 전력품질 특성

DMM[No.1 02/03 14:27:50.059 Ext(Stop)]					
PO..		VOLT..		CUR...	
P1	1.218kW	U1	379.36V	I1	8.642A
P2	1.236kW	U2	378.39V	I2	8.897A
P3	1.150kW	U3	376.97V	I3	8.234A
Psum	3.60kW	THD-U1	2.68%	THD-I1	75.37%
S1	1.885kVA	THD-U2	2.65%	THD-I2	76.66%
S2	1.949kVA	THD-U3	2.54%	THD-I3	76.08%
S3	1.794kVA	Upk+1	0.5317kV	Ipk+1	20.75A
Ssum	5.63kVA	Upk+2	0.5305kV	Ipk+2	21.05A
Q1	1.439kvar	Upk+3	0.5280kV	Ipk+3	21.11A
Q2	1.507kvar	Upk-1	-0.5324kV	Ipk-1	-20.91A
Q3	1.378kvar	Upk-2	-0.5306kV	Ipk-2	-20.92A
Qsum	4.32kvar	Upk-3	-0.5283kV	Ipk-3	-20.65A
PF1	0.6459	Uave	378.24V	KF1	35.44
PF2	0.6343	Uunb	0.38%	KF2	35.00
PF3	0.6408			KF3	36.45
PFsum	0.6402			Iave	8.591A
				Iunb	4.26%

표3.은 6Pulse 정류기형 인버터 입력 전력품질 특성을 나타낸다. 유효전력 3.67KW, 피상전력 6.6KVA, 무효전력

5.49kVAr, 역률 0.55, 전류 10A, THD-I 85%, VTHD 2.68%, 피크전류 Ipk 37A, K factor 76으로 극히 낮은 특성을 나타내고 있다. 참고로 K factor 3.33인 경우 변압기의 최대 허용전류는 0.885pu, K factor 31인 경우 변압기의 최대 허용전류는 0.47pu로 제한된다.

3-2. HHF 설치 후 6Pulse정류기 인버터 입력전력품질

그림 6, 7.은 HHF에 의한 6Pulse 정류기형 인버터의 입력전류 모의, 실측결과이며 거의 동일함을 알 수 있고 그림5. 와 비교하면 왜형의 개선 정도를 짐작할 수 있다.

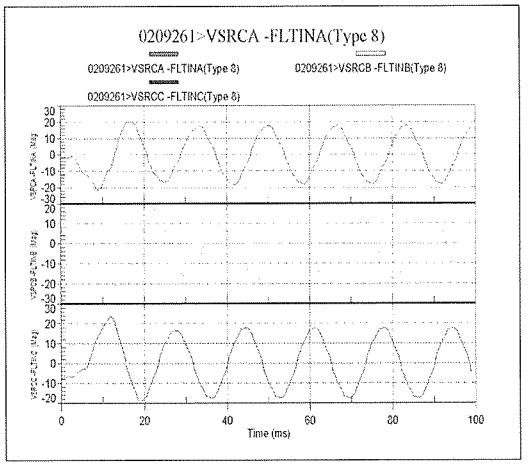


그림6. HHF 적용 6Pulse정류기 입력전류 모의

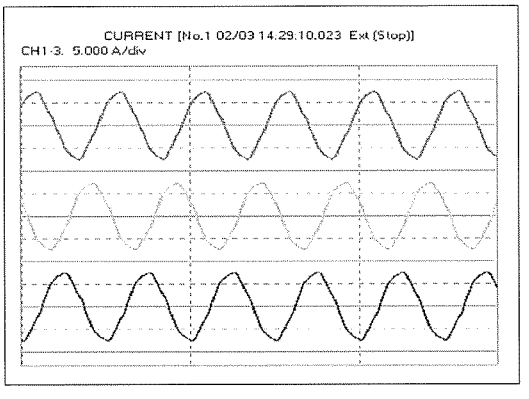


그림7. HHF 적용 6Pulse정류기 입력전류 실측

표4. HHF 모의 고조파 스펙트럼

차수	In[%]	차수	In[%]
1	100.00	11	1.30
2	0.71	12	0.05
3	0.51	13	0.70
4	0.49	14	0.06
5	2.73	15	0.04
6	0.12	16	0.02
7	1.35	17	0.51
8	0.10	18	0.03
9	0.06	19	0.42
10	0.04	THD	3.65

표5. HHF 적용 실측 고조파 Spectrum

HARMONICS LIST [No.1 02/03 14:29:10.023 Ext9 stop)] CH2 I VALUE iHarm OFF					
O..	(%)	O..	(%)	Or..	(%)
1	100.00	18	0.01	35	0.10
2	0.08	19	0.32	36	0.01
3	1.78	20	0.01	37	0.08
4	0.02	21	0.09	38	0.01
5	3.11	22	0.01	39	0.05
6	0.02	23	0.24	40	0.00
7	0.69	24	0.01	41	0.08
8	0.01	25	0.15	42	0.01
9	0.04	26	0.01	43	0.05
10	0.02	27	0.06	44	0.01
11	1.31	28	0.01	45	0.04
12	0.01	29	0.16	46	0.01
13	0.67	30	0.01	47	0.06
14	0.00	31	0.12	48	0.01
15	0.14	32	0.01	49	0.05
16	0.01	33	0.06	50	0.01
17	0.39	34	0.01	THD	3.99(%)

표5, 6.은 HHF를 적용한 경우의 인버터 입력전류 Spectrum을 나타낸다. 전류총합왜형율 THD-I는 3.65%와 3.99%로 모의 및 실측에 차가 없는 것으로 나타났다. 참고로 이 값은 IEEE Std. 519-1992의 SCR 20이하에서 규정한 ITDD

5%를 충족시키고 있다.

표6. HHF 인버터 입력 전력품질

DMM[No.1 02/03 14:29:10.023 Ext(Stop)]					
PO..		VOLT..		CUR...	
P1	1.100kW	U1	379.43V	I1	5.087A
P2	1.127kW	U2	378.05V	I2	5.174A
P3	1.134kW	U3	377.00V	I3	5.252A
Psum	3.36kW	THD-U1	1.25%	THD-I1	4.95%
S1	1.110kVA	THD-U2	1.28%	THD-I2	3.99%
S2	1.133kVA	THD-U3	1.28%	THD-I3	4.50%
S3	1.144kVA	Upk+1	0.5353kV	Ipk+1	7.50A
Ssum	3.39kVA	Upk+2	0.5354kV	Ipk+2	7.36A
Q1	-0.150kvar	Upk+3	0.5344kV	Ipk+3	7.62A
Q2	-0.119kvar	Upk-1	-0.5350kV	Ipk-1	-7.45A
Q3	-0.149kvar	Upk-2	-0.5358kV	Ipk-2	-7.31A
Qsum	-0.42kvar	Upk-3	-0.5340kV	Ipk-3	-7.56A
PF1	-0.9908	Uave	378.16V	KF1	1.10
PF2	-0.9944	Uunb	0.38%	KF2	1.08
PF3	-0.9915			KF3	1.09
PFsum	-0.9923			Iave	5.171A
				Iunb	1.72%

표6. 은 HHF를 부착한 경우의 6Pulse 정류기형 인버터 입력전력품질특성으로 유효전력 3.2kW, 피상전력 3.26kW, 무효전력 0.59kVAr, 역률 0.98, 전류 5.0A, THD-I 4.8 ~ 6.5%, 피크전류 7.5A, K factor 1.1을 보였다. 표3.과 비교하면 크게 대비되어 향상된 것을 볼 수 있다.

표7. HHF 적용 시 전력특성 비교

구 분	필터 적용 전	필터 적용 후
피상전력[kVA]	6.60	3.26
무효전력[kVAr]	5.49	0.59
유효전력[kW]	3.67	3.20
전류[Arms]	10.67	5.05
피크전류[Ap]	37.27	7.53
역률[Cos δ]	0.55	0.98
THD-I[%]	85.17	4.84
K factor[%]	76.75	1.19

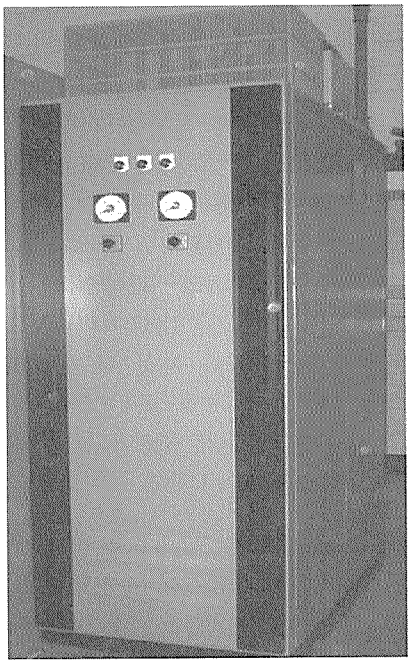
4. 결 론

HHF를 적용한 결과, 피상전력 절감량 50%, 무효전력량 85%, 유효전력 평균 15%, 전류량 53%, 피크전류 80%로 나타났으며 역율 또한 98%로 나타나 크게 개선이 되었음을 알 수 있다. 이 같이 RLC 수동형 소자만을 이용하여 6펄스 컨버터에 적합한 토폴로지를 구현하여 고조파전류 왜형율 ITDD를 5%이내로 제한할 수 있게 되었다.
개발된 모델의 특징은 다수의 단일동조형필터 계통이나 능동형필터, 12Pulse 정류기형 컨버터에 비해 회로가 간결하며 경제성과 성능이 우수하다는 것이다. 하이브리드고조파필터의 국산화가 이루지게 됨으로써 관련부문의 기술개발 촉진과 부품 생산기술향상은 물론 가격경쟁력확보에 따른 수입대체효과가 가능하게 되었다.

전력품질기술㈜는 1000HP급의 DC모터드라이브용 HHF를 성공리에 납품하여 대용량에서도 설계기술과 정전용량 변화율ΔC, 인덕턴스 변화율ΔL, 특히 소음과 Heat-run등 열안정성이 뛰어나 생산기술을 인정 받게 되었다.

전력용 하이브리드고조파필터 개발은 산업자원부 에너지관리공단 주관의 현대중공업, 포스콘, 에네스산전, 전력품질기술의 공동개발과제 "진단 및 감시 기능을 갖는 6600V 2MVA급 전동기 가변속 제어용 전압형 인버터 개발"의 세부과제인 "인버터 입출력 전력품질 개선용 필터 개발"로 추진되었음을 밝힌다.

그림8. HHF381000, 380V 1000HP



참고문헌

1. IEEE Std C57.110-1998
IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents
2. 고조파 사용실태 조사 및 개선방안 연구, 한국전력공사 수요관리실, 2002.2
3. Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill
4. IEEE Std 519-1992
IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
5. Modeling Power Electronics in Power System Using EMTP, KEUG, 1994.12

저자소개

박 병 주
- 전력품질기술㈜ 대표이사 현재
- 삼화콘덴서공업㈜ SE팀장
- 전기응용기술사
- 고려대학교 전기공학 박사과정

유 항 규
- 전력품질기술㈜ 기술영업팀장 현재
- 삼화콘덴서공업㈜ 필름콘덴서 기술과장
- 성균관대학교 전기공학 석사

고 중 현
- 전력품질기술㈜ 부설연구소 과장 현재
- 미국 블랙엔비취 전력엔지니어링
- 미국 위스콘신메디슨대학교 전기공학 석사

윤 동 철
- 전력품질기술㈜ 부설연구소 대리 현재
- 명지대학교 전기공학 석사