

국내 고조파저감기술관련 연구 50년사

최규하^{*}, 한병문^{**}, 정승기^{***}

(*건국대 전기전자공학부 교수, **명지대 전기전자공학부 교수, ***광운대 전기공학과 교수)

1. 서론

고조파(harmonics)란 60Hz 등의 기본파 주파수를 중심으로 배수가 되는 모든 차수의 정현파 성분을 총칭하며 기본파의 분수배가 되는 분수조파(Subharmonics) 까지를 포함하는 용어인데, 사실 높은 주파수신호에 관련한 고주파라는 용어와 제대로 구분하지 못하던 것이 불과 얼마전이었다.

특정한 비선형 부하에 의해 고조파 전류가 발생되고 이는 계통의 선로 임피던스와 결합하여 또 다시 고조파 전압을 만들게 되어 많은 문제를 유발시킨다. 그 중에서 역률개선용 콘덴서 및 직렬 리액터 등 조상설비의 손상, 회전기의 과열 및 토크 맥동, 케이블의 절연과괴 및 손상, 계측기류의 오동작, 통신선로의 유도장해나 신호장해 등의 문제가 주된 것으로 보고되고 있다.[1] 60Hz의 기본파 성분에 함유되는 고조파에 의한 문제점들이 발생되고 이 때문에 고조파에 대한 연구가 시작되었고 그동안의 연구를 조사해 보면 고조파에 강인하도록 하거나 고조파를 억제 또는 제거하고자 하는 것이 주된 내용들이다. 최근 능동전력필터에 대한 연구까지 발전된 것을 보면 실로 기술의 큰 발전이 있었음을 실감케 해 준다.

고조파저감기술에 대한 논문이나 보고서는 국내 여러 논문지, 기술관련 잡지나 보고서 등에서 다루어졌지만 여기서는 전기학회지에 수록된 내용으로 한정하여 기술하고자 한다.

2. 고조파저감기술 발전동향

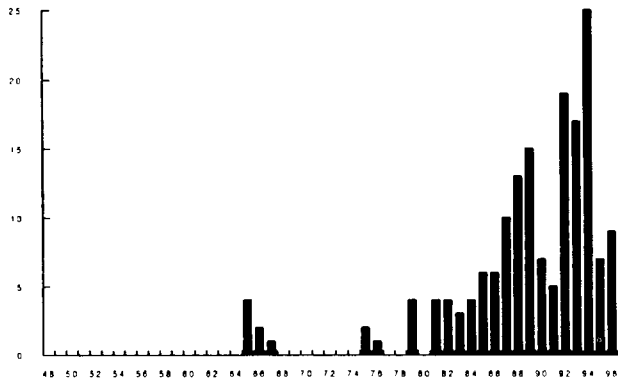
세계 최초로 고조파에 의한 문제로 인지, 보고된 것은 미국 Salt Lake시의 어느 구리정련소에서 정류기운전중 전회선로에 발생하는 심한 잡음현상이었다. 이와 유사한 문제는 캐나다의 동부 광산 지역에서도 나타난 바 있었는데 그

원인은 바로 고조파에 의한 전회선로의 유도장해로 밝혀졌다. 그 당시 전력선과 전회선이 동일 전주상에 서로 가까이 근접되어 있었기 때문에 발생한 유도장해현상으로 서로 이격시켜 재설치함으로써 개선되었다. 바로 고조파저감방법중 하나인 separation방법이다. 그리고 전력계통에서의 고조파 연구는 1933년 Schilling이 220kV 송전선로에서의 고조파현상을 조사, 분석한 논문이 최초인 것으로 알려져 있다.[2]

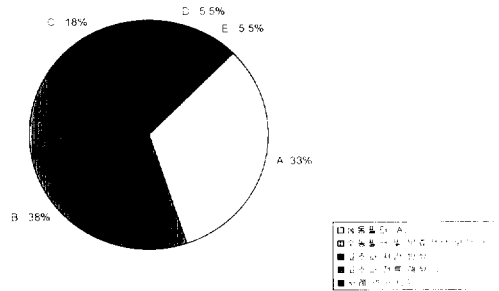
국내의 경우 지난 1948년도부터 1996년 현재까지 고조파 및 무효전력에 관한 연구논문은 대략80여편 정도 발표되었는데 최초의 논문은 1965년 5월호에 '아날로그 전자계산기에 의한 3상 정류파형의 해석(양홍식·박민호)'으로 정류회로의 파형 해석 및 고조파분석에 관하여 다루었다.[3] 그후 1966년 4월호에 게재된 '전력계통 고조파전류의 해석(우형주·박영문)'의 논문은 전력계통에 대한 고조파문제를 다룬 국내 최초의 논문으로 생각된다.[4] 그로부터 지금까지 고조파 관련 연구논문들이 매년 꾸준히 늘어나서 그 발표편수도 늘어나고 질적 수준 또한 계속 높아지고 있으며 현재에는 많은 교수나 현장기술자들이 고조파문제에 대해 깊은 관심을 갖고 연구하고 있다.

1948년부터 1996년 현재까지 전기학회 논문지와 매년 개최되는 하계 및 각 학술대회 논문집에 발표된 논문의 연도별 총 편수를 조사해 보면 그림1과 같다. 1948년부터 1964년까지와 1968년에서 1974년까지, 그리고 1977년에는 전기학회지에 고조파관련 논문이 전혀 발표된 바 없었다. 그림1(a)는 전기학회 논문지와 학술대회 논문지에 발표된 논문을 합한 연도별 총 편수를 조사한 도표로서 1965년을 시작으로 1987년에는 약10여편의 논문이 발표되기 시작, 이후 꾸준한 증가추세를 보이고 있다. 그리고 그림(a)의 도표를 학술대회 논문과 학회지 논문의 각 게재 편수로 나누어 다시 그리면 그림1(b)과 같다. 특히 1988년도부터는 학술회의 논문발표수가 학회지의 게재논문수를 초과하고 있는 것으로 보아 국내에서 고조파문제에 대한 관심과 연구의 중요성이 상당히 고조되어졌음을 알 수 있었다.

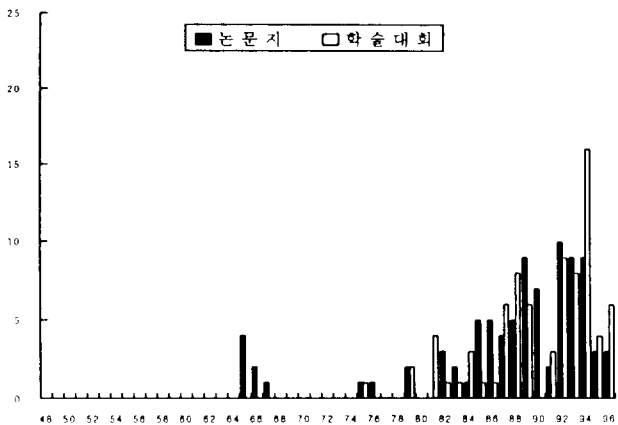
그리고 대한전기학회에서 발표된 전체 논문을 토대로 세부연구분야별로 크게 분류해 보면 능동필터(A), 수동필터 및 무효전력보상(B), 고조파저감방식(C), 고조파해석(D) 그



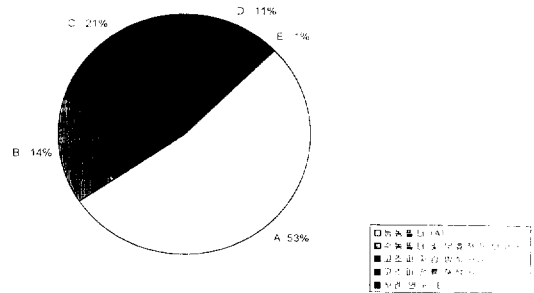
(a) 학술대회와 학회지 논문의 합계 편수



(a) 학술대회 논문



(b) 학술대회 및 학회지논문의 개별 편수
그림 1. 발표논문 총 편수의 연도별 변화



(b) 학회지 논문

그림 2. 고조파분야 논문의 세부분야별 구성비

리고 사례연구(E) 등의 5개 분야로 나누어 졌다. 그림 2는 이러한 세부 연구분야별로 발표된 논문 편수에 대한 상대적 구성비를 학회 논문지와 학술대회 논문집의 경우로 나누어 나타내었다.

조사 결과 논문지의 경우 수동필터 및 무효전력보상에 대한 연구논문의 편수가 38%로 가장 큰 비율을 나타내고 있었고, 학술대회의 경우 53%로 능동필터에 대한 논문 편수가 압도적으로 높은 비율을 차지하고 있었다. 전반적으로 능동필터분야의 논문에 대한 연구가 큰 비중을 차지하고 있어 국내 고조파의 연구가 첨단지향적임을 엿볼 수 있었다.

이러한 고조파문제에 대한 연구경향에 힘입어 1992년 학회내 고조파저감기술조사전문위원회를 발족하기 까지 이르르게 되었으며 현재에는 많은 교수나 현장기술자들이 고조파문제에 대해 깊은 관심을 갖게 되었다.

3. 국내 고조파저감기술 동향

위에서 언급한 바와 같이 70년대까지는 국내에서 고조파에 대한 문제의식이 그다지 크지 않았던 관계로 전력계통 내에서의 고조파저감을 위한 적극적인 연구는 거의 없었다. 고조파가 현실적인 문제로서 본격적으로 거론된 것은 국내에서 전력전자 관련기술들이 도입되는 80년대 부터인데 일례로 발전소의 대용량 송풍기구동시 에너지 절감을 위해 인버터를 도입하는 연구의 일환으로 수행하였던 '동력 절약형 교류 가변속장치에 관한 조사연구(한국전력공사)'에서 대용량 전류형 인버터를 발전소내에 설치시 고조파의 파급효과가 분석되었던 바 있다. 당시 수동필터의 설치이외에는 또 다른 고조파 저감방법이 없었기 때문에 고조파에 의한 영향 분석과 이를 위한 고조파 시스템의 수리모델에 관한 연구가 위주이었다고 볼 수 있다.

고조파와 관련된 연구분야는 전력계통분야, 전기기기분야, 전력전자분야를 생각할 수 있는데 전기학회에 발표된 논문들을 기준으로 볼 때 전력계통분야에서는 무효전력에

관한 연구가 위주로 되었고 고조파문제는 그다지 다루지 않았다. 전기기기분야에서는 초전도에너지 저장장치에 관한 기초 연구가 수행되면서 초전도 코일과 계통의 연계를 위한 싸이리스터 컨버터에 의해 나타나는 고조파의 분석이 행해진 바 있으나 그 이상의 특기할 만한 연구내용을 발견하기 어렵다. 그러나 전력변환장치가 고조파의 주된 발생원으로 됨에 따라 주로 전력전자분야에서 고조파 저감에 관하여 가장 첨예한 문제의식을 가지게 되었으며 그 방법론에 있어서도 전력전자의 기술이 가장 핵심적 역할을 한다고 볼 수 있다. 이에 따라 고조파저감 관련 연구는 대체로 전력전자분야에 집중되어 다루어 왔고, 앞의 그림2에서도 이러한 양상을 볼 수 있다.

전력전자분야에서의 고조파저감연구는 기존의 전력변환장치보다 고조파 발생량이 적은 기기, 소위 계통친화형 기기에 관한 것과 고조파 자체를 제거하기 위한 능동 전력필터에 관한 두가지 유형으로 이루어져 왔다. 전자의 경우 계통에 접속되는 전력변환장치의 선단부가 대부분 다이오드 또는 싸이리스터 정류기이기 때문에 입력전류에 많은 고조파가 함유되었고 그로 인한 많은 문제점들이 보고된 바 있다. 따라서 입력전류를 정현파에 가깝게 제어하는 저고조파 발생형 정류기에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 단상에서는 소용량 다이오드 정류기를 대체하기 위한 부스트형 정류기가 주로 연구되고 있으며, 3상의 경우 전류제어형 전압형 컨버터에 관한 연구가 그 주류를 이루고 있다. 이러한 유형의 컨버터에 의해 정류기 입력측의 고조파 저감은 물론 입력역율도 개선할 수 있어, 예컨대 서보제어용 인버터 시스템에 적용, 상용화되고 있으며 근래 활발히 연구가 진행되고 있다.

능동전력필터는 반도체능동소자를 사용한 컨버터를 사용하여 비선형부하에서 발생하는 고조파를 제거하거나 고조파에 의해 전원이 오염되는 것을 방지하는 기능을 갖는다. 이에 대한 기본 개념은 70년대 중반 Gyugyi 등에 의해 제시되었는데 전력계통과 부하사이에서 접속되는 구조상 병렬형과 직렬형으로 구분된다. 병렬형은 부하에서 필요로 하는 고조파 전류를 대신 주입함으로써 전원에 고조파 전류가 흐르지 않도록 하며 직렬형은 고조파전류에 의해 전원임피던스에 나타나는 전압의 왜형을 보상하여 준다. 어느 경우이건 비선형부하가 다른 부하와 함께 접속되는 공통접속점에서 전압왜곡이 일어나지 않게 함으로서 여타기기에 영향을 미치지 않도록 하는 목적을 갖는다.

이러한 전력용 능동필터에 관한 국내의 논문으로는 1984년 전기학회 하계학술대회에서 발표된 'PWM 전류주입 방식에 의한 입력전류의 고조파저감(박민호·최규하)'이 처음이라 할 수 있다.[5] 이는 병렬형 능동필터를 전류형 컨버터로 구현하는 방식을 제한한 것인데, 당시로서는 실용적으로 구현할 수 있는 여건이 되지 못했었기 때문에 이론적 가능성만을 보인 것이지만 이듬해 전기학회지에 발표된 후속논문과 함께 국내에서 이 분야 연구의 시초가 되었다는 점에서 의의를 지니고 있다. 그 이후 고속 전력소자의 도입

과 더불어 능동필터에 관한 연구가 비교적 활발히 진행되고 다수의 논문이 발표되었는데 대다수가 병렬형에 관한 것이었고 직렬형에 관한 관심은 거의 없었던 것으로 보인다.

병렬형 능동필터에서도 사용되는 컨버터에 따라 전류형과 전압형으로 다시 구분되는데 비슷한 기간 중 외국에서의 연구가 주로 전압형에 치중하였던 것에 비하면 국내에서는 전류형에 관한 연구가 상대적으로 비중이 높았던 것이 특색이었다. 이는 이미 외국에서 전압형에 관한 연구가 많이 이루어져서 새로운 연구재료가 많지 않은 관계로 컨버터 변조기법이 보다 까다롭고 해결되어야 할 측면이 보다 많은 전류형에 관심을 갖게 한 것으로 판단된다. 그러나 90년대에 들어 와서는 산업계에서 능동필터에 관한 관심이 높아짐에 따라 전압형에 여러 가지 제어기법을 적용하는 연구와 구현의 간이화를 추구하는 연구가 많이 증가하는 추세에 있다. 연구의 내용상 전류형의 경우 주로 펄스폭변조기법에 의한 전류형 능동필터의 성능 개선 연구가 위주로 되어 왔던 반면 전압형의 경우 전압형 컨버터를 전류형처럼 동작시키는 전류제어형 PWM인버터기술의 도입으로 고역률 전압형 컨버터 제어기술과 병행 연구되어왔다. 현재 일부 기업체에서 전압형 컨버터에 의한 병렬형 능동전력필터가 개발되고 있으나 아직 현장 적용 및 시험 단계에 있다.

그리고 90년대에 들어 계통내 고조파문제에 대한 관심의 증대를 앞질러 정보화 기기에 직접적인 영향을 미치는 EMI, EMC에 관한 관심이 증대하면서 가전제품등의 응용을 염두에 둔 단상 소용량 능동필터에 관한 연구도 진척되고 있다. 그리고 고속전철의 도입으로 급전선 내에서의 고조파 공진문제나 공진형 컨버터의 토폴로지를 능동필터에 접목시키고자 하는 연구도 비록 초보단계이지만 눈에 띈다. 특히 근래에 국내 전동기구동용 인버터제어기술이 어느 정도 수준에 도달함에 따라 전류형에 비해 보다 현실적으로 구현이 용이한 장점을 살려 제어기법이라든가 마이크로프로세서화, 무센서화 등에 주안점이 두어져 왔다.

연구내용상에 있어서도 전반적으로 고조파와 관련된 이론적인 측면보다는 고조파를 저감하는 구체적이고 지협적인 방법론에 치중되어 왔던 것으로 보인다. 예컨대 새로운 전력소자의 적용, 마이크로 프로세서에 의한 제어방식의 적용, 각종 현대 제어이론의 적용 등에 관한 연구가 많은데 이는 국내 이 분야의 연구수준이 아직 외국에서 제안된 이론들을 받아들이는 과정에 있으며 새로운 토폴로지의 고안이나 이론의 생산단계에는 이르지 못하고 있음을 반증하고 있다. 이론적인 분야라 한다면 고조파와 관련된 전기이론의 재정립, 그 연장선상에서의 고조파의 측정과 평가에 관한 문제, 고조파가 부하 및 전력계통 등에 미치는 영향의 분석 등을 들 수 있는데 이러한 분야에 대한 연구의 활성화가 요망된다.

4. 고조파저감기술조사전문위원회

국내에서도 고조파에 대한 연구의 필요성에 대한 분위기

가 일어났고 1991년 10월 25일 제8차 조사위원회에 최규하 교수(건국대)가 제안하여 수차례 조사위원회에서 검토된 후 1992년 2월 14일 제2차 이사회에 상정, 통과되었고, 그 후 고조파저감기술조사전문위원회라는 명칭으로 발족하여 1992년 3월 5일 15시 학회 회의실에서 제1차 전문위원회를 가짐으로써 조사연구를 개시하였다.

고조파저감기술조사전문위원회는 그후 약1년여동안 조사연구를 수행하였으며 1993년 8월 하계학술대회에서 발표회를 가졌고 기술조사보고 제7호 '고조파저감기술 현황과 전망'이라는 제목의 보고서로 출간되었다.[6] 임한석교수(건국대)를 위원장으로 하여 제1분과 위원장 신중린교수(건국대), 제2분과 위원장 박종근교수(서울대), 그리고 제3분과 위원장 홍순찬교수(단국대) 등을 중심으로 도합 14명의 교수 및 기업체 전문가들이 연구에 참여하여 결실을 보게 되었다.

이러한 고조파 조사연구에서 수행된 결과를 그 주된 주제만을 간략히 소개하면 다음과 같다.

(1) 제1분과 위원회:신중린, 김재철, 강영석, 김중구

전력시스템 영향 평가

- 과제 1: 전력계통의 고조파 문제 및 해석 기법
- 과제 2: 전력계통의 고조파 실태 조사를 위한 설문 조사

(2) 제2분과 위원회:박종근, 최재호, 장도현, 신형섭

고조파 발생요인 분석 및 대책수립

- 과제 1 : 고조파 발생원 및 장해
- 과제 2 : 고조파 저감대책

(3) 제3분과 위원회:홍순찬, 백형래, 최규하, 정승기, 박영길

고조파 보상기술 조사

- 과제 1 : 수동 및 능동필터의 기술
- 과제 2 : 저감기술사항의 검토 및 전망

5. 국내 고조파 관련분야의 연구 방향과 전망

앞으로 고조파에 대한 연구는 매우 절실할 것으로 전망되며 최근 선진국에서는 고조파 뿐만 아니라 총체적인 전력의 질(power quality)을 개선하는 연구에까지 치중하고 있다.

우선 단기적인 측면에서 국내에 필요한 고조파분야의 연구를 살펴 보면 우선 현장조사나 사례연구 등을 통해 고조파문제에 대한 체계적인 영향 평가 및 분석연구가 수행

되어야 한다. 이를 위해서는 고조파 측정, 분석 및 감시 제어 시스템에 관한 연구나 해석 및 영향 분석을 위한 소프트웨어적 연구도 반드시 병행되어야 할 것이다. 물론 이러한 것들은 수동필터나 능동필터 등 직접적인 고조파저감장치를 개선하기 위한 것으로 연구, 발전되어야 할 것이다. 일반적으로 고조파 보상을 위한 전력전자 장비는 대용량이므로 개발을 위해 대용량 고전압 인버터, 고신뢰도 고효율 인버터, 그리고 구동기술 등의 연구가 필요할 것이며 대형화 등을 위해 초전도 마그네트나 고에너지밀도 커패시터에 대한 연구도 병행됨이 요망된다. 고조파 보상장비의 운용, 배전계통과의 인터페이스 등의 연구도 결코 제외될 수 없을 것이다.

선진국의 경우 고조파의 문제를 넘어서서 총체적인 전력 품질(power quality)을 개선하는 연구에 치중하고 있는데 대표적인 것으로 미국 전력연구원이 추진하고 있는 custom power project인데, 이미 몇몇 장비가 이러한 목적으로 개발되어 시험 운용중에 있다. 이 프로젝트에서는 고조파는 물론 전압강하(voltage sag), 전압상승(voltage swell), 과도전압, 순간정전 등에 의한 배전계통의 신뢰도와 전력의 질적 저하를 총체적으로 개선하기 위해 최신 전력전자 기술과 데이터통신 및 컴퓨터제어 기술을 배전계통에 응용하는 것이 주된 내용이다. 이와 유사한 프로젝트는 현재 일본과 유럽에서도 연구에 착수되어 있는 것으로 알려져 있다. 장기적인 측면을 고려할 때 국내의 고조파 연구의 방향도 고조파에만 국한하는 것보다 이를 포함한 배전계통의 신뢰도와 전력의 품질 개선을 총체적으로 다루는 연구가 착수되어야 할 것 같다.

이를 위해서는 우선 전력 품질에 대한 국내 평가기준이 마련되어야 할 것이다. 물론 이러한 기준에는 전력회사측에서의 평가 기준이나 사용자 및 장비 제작자측에서의 평가 기준이 모두 포함되어야 할 것이다. 그리고 전력의 품질을 측정 및 분석하는 기술 및 장비의 개발에 대한 연구도 중요하며, 전력 품질을 개선하는 전력전자장비 즉 능동 필터, 무효전력보상기, 동적 전압보상기 및 능동 전력조정장치 등의 연구도 적극적으로 수행되어야 한다.

앞서 설명된 바와 같이 고조파문제의 중요성을 보다 넓게 인식시키고 활성화를 위해 과거 고조파저감기술조사전문위원회와 같은 상설기구의 설치도 필요하다고 본다. 그리하여 연구소나 대학, 산업체 등의 관련 전문가들이 이러한 위원회를 중심으로 고조파 관련분야의 연구를 폭넓게 다루고 또한 참여할 수 있도록 환경을 조성해 줄 필요가 있다.

6. 맺는 말

여기서는 지난 50년간 국내 전기학회를 통해 발표된 학회지의 게재논문과 학술대회의 발표문헌을 중심으로 국내의 고조파 관련저감기술 및 동향에 대해 조사하였다.

국내의 고조파 관련연구는 아직 초보적인 단계를 벗어

나지 못하고 있다. 전기분야 전문가들의 고조파연구 참여도가 여전히 낮은 실정이며 저변 연구인력 또한 빈약하다고 생각된다. 사실 고조파저감과 관련 된 국내의 연구는 그 중요성과 관심도에 비해 상대적으로 그리 많다고 볼 수 없으며, 비교적 연구가 늦게 시작된 관계로 발표된 연구내용도 기초적 기반기술의 토착화보다는 신규성이 높은 분야에 치중되고 있다. 따라서 대학이나 연구소의 연구결과가 산업체와 기밀한 연결고리를 형성하지 못하여 온 원인이 된 것도 부인할 수 없다. 그러나 언젠가는 반드시 해결해야 할 숙제이고 해가 거듭될수록 더욱 심각해지고 있음을 우리는 선진외국의 경우를 통해서도 잘 알고 있다.

고조파 관련문제는 전력계통내에서의 환경오염으로 그 경제적인 효과가 직접적이라기 보다는 간접적인 특성이 있어 연구결과의 최종 수요자인 산업계에서의 관심이 상대적으로 낮을 수 밖에 없다. 따라서 전력공급자인 한국전력 내지는 정부에서 관련 연구를 주도적으로 이끌어 나감으로써 전력환경의 열악화에 대비하여야 할 필요가 있으며 고조파에 관련된 적절한 규정을 제정하고 시행하는 데에 기초가 되는 관련 연구를 체계적으로 계획하여 장기적인 성과를 추구하는 사고의 전환이 필요하다고 하겠다.

열악한 국내의 연구여건까지 생각한다면 지난 10여년의 연구결과는 충분히 의미있으며 앞으로 고조파분야의 연구에 대한 좋은 토대가 될 것으로 믿는다. 만약 학회내 고조파연구에 대한 상설기구를 설치하고 공동으로 연구 노력한다면 머지않은 장래에 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 어쩌면 지금부터 50년이 더 지난 100주년 특집시 국내 고조파연구만을 다루는 특집호가 나오게 되고, 전기학회의 고조파관련 보유기술이 세계 제일로 될 수도 있을 것이다.

끝으로 본 원고를 위해 기초 자료를 조사하는 데 많은 수고를 해 준 건국대 박사과정 이승요군에게 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Group for Harmonic Control and Reactive Power Converter, IEEE Std 519-1982.
- [2] IEEE Working Group on Power System Harmonics, "Power System Harmonics: An Overview," IEEE Trans. on PAS, Vol. 102(8), Aug. 1983.
- [3] 양홍석, 박민호 "아날로그 전자계산기에 의한 3상 정류파형의 해석," 전기학회지 1965년 5월호.
- [4] 우형주, 박영문 "전력계통 고조파전류의 해석," 전기학회지 1966년 4월호.
- [5] 박민호, 최규하 "PWM 전류주입방식에 의한 입력전류의 고조파저감," 전기학회 하계학술대회 논문집, 1984년 7월.
- [6] 임한식 외, 고조파 저감기술 현황과 전망, 대한전기학회 기술조사보고 제7호, 1993년.

저 자 소 개



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업.
1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
1987년~1988년 미국 오레곤주립대 객원교수. 현재 건국대 공대 전기공학과 교수.



한병문(韓炳文)

1953년 7월 5일생. 1976년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 미국 아리조나 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1978년~1986년 대한항공 기술연구소. 1983년~1984년 미국 Northrop 중앙연구소. 1987년~1992년 미국 아리조나 주립대 전력 및 에너지 연구소. 1992년~1996년 시립인천대 공대 전기공학과 조교수. 현재 명지대 공대 전기전자공학부 조교수.



정승기(鄭勝基)

1960년 3월 26일생. 1982년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년 광운대 공대 전기공학과 전임강사, 조교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 부교수. 1994년 미국 Texas A&M 대학교 전기공학과에 1년간 Visting Scholar로 체재