

고조파 전류가 변압기 진동에 미치는 영향에 관한 연구

김수열 · 김연환 · 김장목[†] · 임익현 · 이 현

한국전력공사 전력연구원

(2000. 2. 19. 접수 / 2000. 3. 21. 채택)

The Study of the Harmonic Currents Effects on the Transformer Vibration

Su Yeol Kim · Yeon Whan Kim · Jang-Mok Kim[†] · Ik-Hun Lim · Hyun Lee

Korea Electric Power Corporation Research Institute

(Received February 19, 2000 / Accepted March 21, 2000)

Abstract : EP(Electrostatic Precipitator) has been used to keep the natural environment from fly-ash in the industrial fields and operated in intermittent PEC(Pulse Energized Control) mode to improve dust-collecting efficiency. Intermittent PEC mode induces low-frequency harmonic currents into power system, therefore EP transformer vibrates. This continuous transformer vibration develops transformer abnormal audio-noise and if it is too much or operates in the region of natural frequency, transformer will be damaged in the end. EP interruption caused by transformer damage results in power generation stopped, power quality down and economic loss. Therefore, this paper explains harmonic currents and transformer vibration-core vibration, winding vibration, and proposes the measures of suppressing the vibration with EP operated in intermittent PEC mode. And this results is proposed to be used for future EP transformer design or EP control method to operate EP-concerned equipment safely keeping from system faults caused by transformer vibration.

1. 서 론

발전소에서 전력을 생산함에 있어 주요 기기는 보일러, 터빈, 발전기이며 변압기는 발전기에서 발생된 전력을 전력계통에 연계하여주는 전기설비 중 하나이다. 이러한 변압기는 교류 전력을 이송하며 부하에 전력을 공급하게 하는 기본이 되는 전기설비이며 교류를 취급함으로써 필연적으로 교류 주파수와 관련하여 진동이 발생된다. 실제 산업체에서는 정기적인 절연 점검등과 같은 방법으로 변압기의 연속 진동으로 인한 고장을 미연에 방지하고자 하는 노력이 있어 왔다¹⁾. 수 KVA 용량의 소용량 변압기의 소음, 진동에 대해 3차권선의 설치 및 적절한 전기적 제어로 고조파에 의한 진동을 줄임으로써 소음을

저감시키는 논문도 발표된 바 있으나 대용량 변압기의 경우 추가설비를 실용화하기에는 경제적인 부담이 너무 크다. 고조파 전류를 발생하는 부하를 갖는 변압기는 기본적으로 고조파에 의하여 발생하는 진동 이외에 다른 원인에 의한 고조파의 진동이 추가로 발생하여 복잡한 형태의 진동 특성을 보인다.

일반적으로 전기 집진기는 석탄이 연소된 후 발생된 미세 분진이 연돌을 통해 대기로 방출되기 전에 음이온으로 하전시키고, 양이온으로 대전된 집진판에 부착시켜 추타장치로 분진을 제거하는 설비이다. 전기집진기는 상용 고압 전원을 정류하여 발생된 직류를 이용하여 집진장치를 통과하는 분진을 하전시켜, 집진하는데, 집진 효율을 향상시키기 위해 연소게스의 분진을 하전시킬 때는 순간적으로 높은 고전압을 공급하고 추타를 실시할 때에는 공급전압을 낮게 하여 분진과 집진판의 결집력을 없애는 간헐하전방식

[†]To whom correspondence should be addressed.
kjm@kepri.re.kr

이 이용되고 있다. 즉, 상용전원의 싸이클 중 간헐적으로 일부 싸이클을 이용하여 정류, 집진하는 방식을 간헐하전방식이라 하고, 연속적으로 모든 싸이클로 운전되는 방식을 연속하전방식이라 한다²⁾. 현재는 집진효율이 좋은 간헐하전방식에 대한 논문이 주로 보고되고 있다³⁾. 하지만 간헐하전방식으로 인하여 저주파를 기본파로 하는 고조파가 필연적으로 발생되며, 설상가상으로 대형 발전소에서는 여러 대의 전기집진 장치가 운전되는데, 이들이 상호 연계되어 제어되는 것이 아니고 별개의 장치로서 동작하므로 고조파의 영향은 경우에 따라서 아주 심화될 가능성이 있다. 이 고조파가 변압기 진동에 어떤 영향을 주는지 구체적인 사례연구로 밝혀 이러한 사실적인 근거에 의하여 간헐하전 방식을 운전하고 있는 산업체에서 최대한 경제적인 손실없이 그리고 연속적인 운전에 최대한 지장이 없는 방법에 따라서 고조파의 저감대책이 제시되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 구체적인 고조파 전류 발생원인과 고조파에 의한 변압기의 진동 원인에 대해 조사하고 고조파와 철심진동, 권선진동과의 관계를 밝혀 전기집진기의 집진 효율을 높이는 간헐하전방식으로 운전할 경우 로드센터 변압기의 고조파를 저감하면서 경제적인 손실을 최소화하고 기존의 설비를 최대한 이용하는 방법을 선택하여 발전소의 중요 전기설비의 운전 정지가 없도록 하기 위하여 전기집진기와 같은 주요 구성 전기설비의 안전을 도모하여 전기설비의 신뢰성을 향상시킬 수 있도록 한다.

2. 변압기의 전기적 특성과 진동원인

이상적인 변압기는 그 원리상 부하변화에 따라 철심자속이 변하지 않고 항상 일정하다. 만약 철심 자속이 변하게 되었다면 이는 전압의 변동을 의미한다. 실제로는 자기저항이 존재하므로 과도상태에서 자속의 변화가 있을 수 있겠지만 이론적으로 자기적인 평형을 유지하고 있다. 따라서 변압기 2차측의 전류변화에 상응하는 기자력이 1차측에 발생하여 자기적인 평형을 계속 유지하기 때문에 변압기 2차측의 부하변동에 따른 전류변화가 철심자속의 변화로 이어지지 않는다⁴⁾. 고조파 전류에 대한 전원측 임피던스가 작아 고조파 전압이 발생하지 않는다면 고조

파 전류는 1, 2차 권선진동에는 영향을 미칠 수 있지만 철심에는 어떠한 영향도 미치지 못하게 된다. 따라서 자화전류에 의한 자화주기 동안의 적철심의 수축과 팽창이 철심진동의 주요인이며 그 힘이 자속의 제곱에 비례하므로 기본 주파수의 2배 주파수로 진동을 하게된다. 이렇게 발생된 진동은 철심이나 조임쇠 등과 기계적 공명을 일으키면서 진폭이 커지기도 한다. 하지만 이는 자화전류에 의한 성분이므로 상용 변압기에서도 존재하는 것으로 변압기 소음의 기본원인이 되는 요소이며, 또한 철심의 설계에 따라서 진동힘이 달라질 수 있다¹⁾. 하지만 실제 변압기에서는 철심의 접속부에서 발생하는 자기력과 고조파 전류에 관계하는 누설자속도 또한 철심진동의 요인이 된다. 권선진동은 누설자속과 권선전류 상호작용에 의해 발생하게 되는데, 전류밀도와 누설자속을 부하전류의 선형함수로 표현할 수 있는 변압기에서는 권선에 작용하는 힘은 부하전류의 제곱에 비례하는 함수가 된다. 즉 권선에 작용하는 힘은 부하전류 기본 주파수의 두 배가 되는 주파수를 갖게 된다. 그러나 부하전류에 고조파 성분이 포함되거나 누설자속이 부하전류에 비선형인 경우 고조파 성분을 갖게 되고, 기계적 공진현상과 겹쳐서 복잡한 형태의 진동을 발생시킨다¹⁾. 따라서 고조파 전류의 왜곡이 심하여 권선에 발생하는 힘에 의한 가진력(加振力)이 변압기의 공진 범위안에 놓이게 되면 고조파 전류에 의한 피해가 클 수 있다. 이상에서 살펴 보았듯이 고조파 전류에 의한 변압기 진동의 주요인은 권선 진동임을 알 수 있다. 권선간의 절연파괴로 발생할 수 있는 단락 가능성을 줄이기 위해 변압기의 진동을 줄여야 하는데, 이는 진동의 원인인 고조파 발생 부하에 대하여 전기적인 방법으로 고조파를 억제하든지, 아니면 경제적인 비용이 많이 들지만 기계적으로 변압기의 구조를 개선하여 변압기의 기계적인 강성을 높이는 것이 주요한 해결방법이다.

3. 사례 연구

3.1. 전기집진제어기의 고조파 전류 분석

A 사업체의 전기집진 제어기는 호기당 2대의 로드센터 변압기(load center TR)를 통하여 전력을 공급받고 있으며 대당 10대의 전기집진 장치

를 담당하고 있다. 그림 1은 로드센터 변압기 1대에 대한 간략화된 전기집진장치의 블록도이다. 각 전기집진장치는 직류전원 공급장치와 집진판으로 구성되어 있으며, 다시 직류전원 공급장치는 집진제어기(전력변환설비 및 제어기), 펄스변압기, 정류기로 구성되어 있다. 로드센터 변압기는 1500KVA 용량으로서 1, 2차 Δ/Y 결선으로 변압비 6900/440[V]이며 전기집진 제어기의 정격전압은 60KV, 정격전류는 1800mA이다. 로드센터 변압기는 AB상에 4대(A1-1, A1-4, A2-2, A2-5), BC상에 3대(A1-2, A1-5, A2-3), CA상에 3대(A1-3, A2-1, A2-4)의 집진장치가 부하로써 연결되어 있고, 집진장치는 각각 전력변환설비를 통하여 제어되고 있다. 이들이 연속하전방식의 경우, 전력변환설비의 입력전류 파형은 그림 2와 같다. 그림 3은 1 : 2 간헐하전방식 경우 전류파형이며, 60Hz 중에서 1 사이클 ON 후 2 사이클이 OFF되는 방식으로 총 주기는 3 사이클이므로 각 전력변환설비 입력측에 $60/3 = 20\text{Hz}$ 를 기본파로 하는 전류가 추가로 발생한다. 하지만 이들이 총 60Hz의 3 사이클 중 그림 3에서처럼 A1-3은 첫 번째 사이클, A2-4는 두 번째 사이클에서 점호하여 운전되고, A2-1은 그림과 달리 세 번째 사이클에서 점호를 시작하여 운전하면 로드센터 변압기측의 부하전류 파형은 3사이클을 고르게 이용하는 것이 되어 연속하전방식과 같은 전류파형이 될 것이고, 20Hz를 기본파로 하는 전류는 발생되지 않을 것이다. A 사업소의 전기집진기는 그림 3의 A1-3과 A2-1이 같은 사이클을 이용하는 것으로부터 알 수 있듯이 개개의 집진장치가 상호 연관되어 제어되는 것

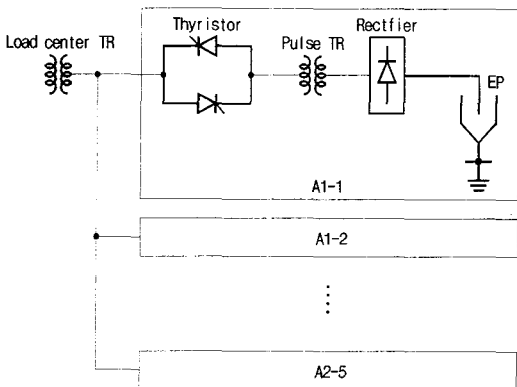


Fig. 1. Block diagram of EP

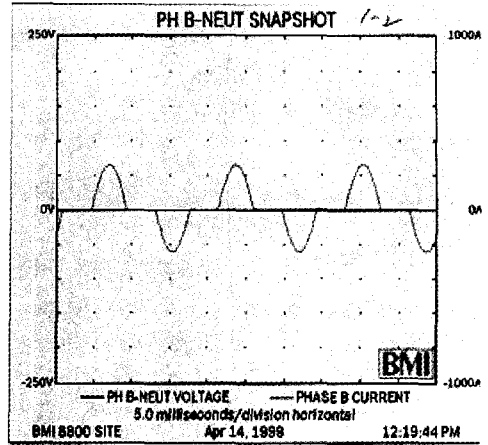


Fig. 2. CA phase current waveform of continuously energized control mode

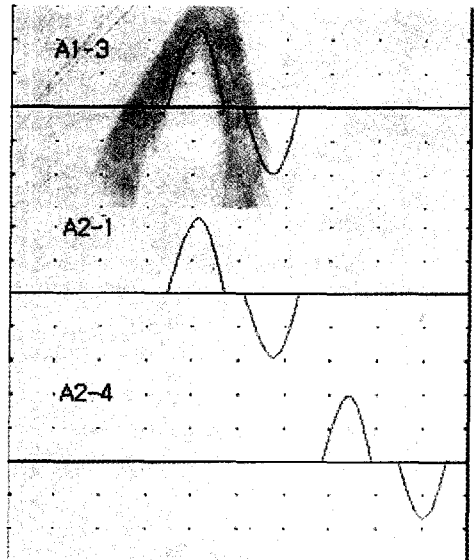


Fig. 3. current waveform of 1:2 PEC mode

이 아니고, 개별설비로 독립적으로 제어되고 있으므로 필연적으로 로드센터 변압기 전류는 저차 고조파를 포함하고 있다. 따라서 간헐운전방식에 따른 고조파가 더 심화되고 있다.

그림 4와 그림 5는 각각 1 : 2와 2 : 3 간헐운전방식의 경우 변압기 2차측의 전류 특성이다. 간헐운전방식의 경우 연속운전시에 존재하지 않는 20, 12Hz를 기본파로 하는 고조파 전류가 보인다. 이 고조파 전류와 변압기 권선진동, 소음과의 관계를 규명하기 위해 변압기의 진동특성 시험을 수행하였다.

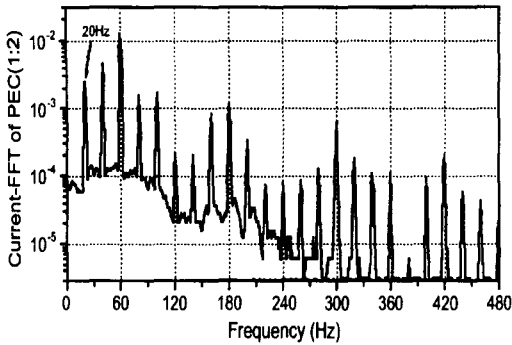


Fig. 4. current char. of 1:2 PEC mode

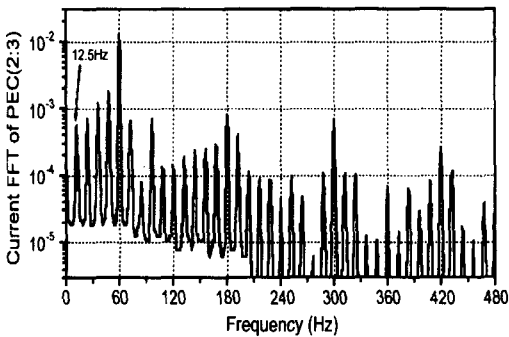


Fig. 5. current char. of 2:3 PEC mode

간헐하전방식 운전시의 변압기 진동특성을 규명하기 위하여 고유진동수 응답 실험을 수행하였다. 전기집진기를 정지시킬수 없기 때문에 변압기 운전중에 몰드권선의 수평방향에 대하여 가속도센서를 부착하여 충격시험을 수행하였다. 충격시험용의 고무망치에 Ch. 1의 가속도센서를 부착시켰으며, 몰드권선의 수평진동의 측정을 위하여 몰드변압기 외피의 중간위치에 Ch. 2의 가속도센서를 부착하여 실험하였다. 충격시험으로 얻어진 자료는 주파수 분석을 통하여 자료 처리하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 3상 모두에서 권선의 공진 위치가 330Hz에 위치하며 약하지만 주변에 300Hz, 360Hz성분이 동시에 위치하는 특성을 보인다. 권선진동의 가진력이 이 주파수 대역에 놓이게 되면 공진하게 되어 진동이 증폭된다.

간헐하전시의 진동은 가속도센서를 몰드외피의 중간위치에 설치하여 측정하였고, 소음은 변압기 주위에 설치하여 측정하였다. 그림 7은 2 : 3 간헐하전시의 변압기 권선의 진동을 보여준다. 일반적으로 변압기 진동은 주로 철심에서 나타

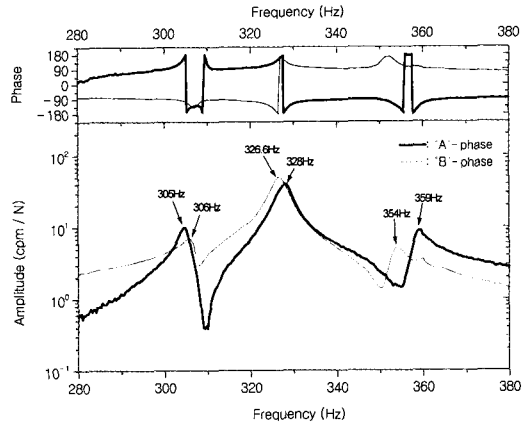


Fig. 6. natural freq. of TR Pri. winding

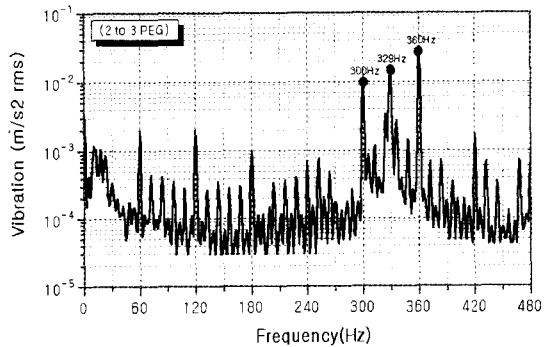


Fig. 7. vibration char. of TR Pri. winding in PEC

나며 기본주파수 120Hz 성분의 고조파들이 주를 이루나 간헐하전방식으로 운전할 경우 2차측 전류로부터 1 : 2 간헐하전방식의 경우에는 20Hz 관련 고조파가, 2 : 3 간헐하전방식의 경우에는 12Hz관련 고조파가 유입되게 되며 이 성분들이 권선에 전자의 경우는 20Hz를, 후자의 경우에는 12Hz를 기본파로 하는 고조파 진동이 유기되었다. 이는 전류의 고조파 성분들이 변압기의 권선에 가진력을 주고 또한 작지만 철심부에 가진력을 주는데서 기인한다. 특히 그림 7에서 공진 주파수인 330Hz 근처에 위치하는 12Hz의 27배가 되는 324Hz 고조파에 의한 공진된 진동레벨은 다른 성분들에 비하여 크게 증폭되는 것을 알 수 있다. 만약 1:2 간헐운전의 경우에는 20Hz의 16, 17배인 320, 340Hz성분에 의해 변압기 진동이 증폭될 것이다. 하지만 320Hz나 340Hz보다 324Hz가 보다 공진점에서 더 가까이 존재하므로 변압기 진동의 증폭효과는 더 커진다. 즉 고조파

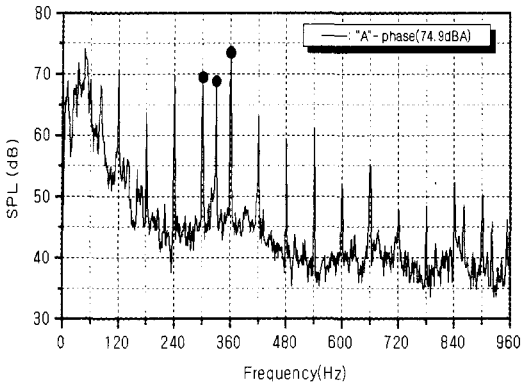


Fig. 8. noise char. of TR Pri. winding in PEC

배수의 성분 중 330Hz성분이 존재한다면 이 때의 변압기는 공진점에서 운전하게 되고, 고조파가 설비 소손에 직접적인 영향을 미치게 된다.

그림 8은 변압기 내함에서의 소음분포를 나타내며 공진점의 진동성분들이 소음에 기여하는 정도도 큰 것을 알 수 있다.

이상의 실험 결과에서 간헐하전 주기에 따라 발생 고조파가 바뀌게 됨을 알 수 있고, 또한 이 고조파가 변압기 진동, 소음에 직접적인 원인이 됨을 확인할 수 있었다. 이와 같은 간헐하전방식을 수대의 전기집진장치의 적절한 병렬운전을 통하여 연속하전과 같은 변압기 부하 전류 특성을 갖게 된다면 변압기의 진동, 소음은 연속하전처럼 작아질 것이다.

3.2. 전기집진기의 고조파 저감

간헐하전방식일 경우의 부하전류가 연속하전방식일 경우의 변압기 부하전류와 비슷한 형태라면 변압기 부하측의 저주파 발생 고조파는 연속하전일 경우와 비슷하게 되어, 변압기 소음, 진동의 저감을 예측할 수 있으므로 이를 위해 기계적으로는 부하의 특성에 따른 설계 검토를 충분히 하여 진동요인에 대하여 공진이 발생하지 않도록 기계적인 강성을 좋게 하는 것인데 이는 변압기의 설계를 다시 하게 됨으로써 추가적인 많은 비용이 소요된다. 그리고 고조파 전류에 의한 변압기 진동, 소음을 제거하기 위해서는 연속하전 방식처럼 운전모드를 변경하여 고조파를 저감하면 된다. A 사업소의 전기집진기는 on cycle이 1 - 5 cycle, off cycle이 1 - 10 cycle까지 변경 가능하여 여러 가지의 운전모드가 있으나

모두가 집진제어기를 개별적으로 제어하는 운전방식이기 때문에 기존 설비로써는 고조파 저감을 구현할 수가 없다. 하지만 1 : 2의 운전모드 경우 한상에 3대의 집진제어기가 있으므로 한 주기 3사이클을 3대의 집진제어기로 하여금 균등히 사용하도록 제어하면 20Hz의 고조파 전류를 최소화할 수 있을 것이다. 따라서 이를 구현하기 위한 첫째 방법은 통신을 통하여 타 집진제어기의 점호자료를 이용하여 집진제어기를 연계 제어하는 것인데, 이로써 60Hz 사이클을 균등히 이용할 수 있다. 둘째로는 수 대의 집진제어기의 전력변환설비 점호 시작신호를 제어하는 것이다. 이 경우, 신뢰성 저하를 방지하기 위하여 점호시작 신호의 이중화 방안이 강구되어야 한다.

전기집진기의 간헐하전방식에 따른 진동에 기인한 사고를 미연에 방지하기 위해서 변압기의 강성을 좋게 하여 고조파 전류에 견딜수 있게 하는 것이고, 몰드 변압기보다는 유입 변압기가 추천된다. 하지만 이 방법은 변압기의 설비 대체로 인한 소요비용이 크기 때문에 신규 사업시를 제외하고는 적용하기 힘들다. 전력변환설비간 점호신호 자료를 통신으로 공유하여 제어하는 방법은 제어회로의 근본적인 수정이 요구되는 문제이므로 제작시에 고려되어야 할 사항이다. 간단한 설비개선으로 해결할 수 있는 방안은 각 전력변환설비의 점호시작신호를 제어하는 것인데 이 방법 또한 제어카드의 하드웨어적인 변경이 요구되어지는 방법이므로 발전소의 운전 정지시 설비 개선되어야 할 것이므로 사실상 어려운 점이 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 고조파 전류 발생원인을 분석하였고, 고조파가 변압기의 진동에 영향을 미침을 확인하였다. 개별 전기집진장치의 60Hz 한 사이클의 입력 전류 파형은 연속운전이나 간헐운전 모두 같은 파형이기 때문에 60Hz보다 큰 고조파 전류를 기본파로 갖지는 않으나, 간헐운전의 경우 60Hz 사이클을 간헐적으로 이용함으로써 60Hz보다 작은 저차의 고조파 전류가 전력변환설비의 입력측에 필연적으로 존재하게 된다. 이를 제거하기 위해서 60Hz 사이클을 균등

히 이용할 수 있도록 하여 전기집진기의 집진 효율을 높이는 간헐하전방식으로 운전을 하면서 전기집진설비간의 유기적인 운전을 하게 함으로써 고조파에 의한 진동을 저감할 수 있는 운전 방법을 제안하였으며, A 사업소에 대하여 설비의 개선방법을 제시하였다. 하지만 설비의 개선 시 요구되는 것은 설비를 개선함으로써 기존 설비의 신뢰성이 저하되지 않도록 하여 전기품질의 저하를 초래하지 않도록 하여야 한다.

참고문헌

- 1) 정상진 외 변압기 권선 고장 검출을 위한 진동분석 시스템 개발 연구(최종보고서), 한국전력공사 전력연구원, 1994.
- 2) 허성광 외 절전형 전기집진기 제어기의 개발(최종보고서), 한국전력공사 전력연구원, 1991.
- 3) 임근희 외 A High Voltage Power System for Electrostatic Precipitators, Korea-Germany Advanced Power Electronics Symposium, 1998.
- 4) 박민호 유도기기 동명사.
- 5) 김현식 외 변압기 사고 검출을 위한 진동신호 연구, 대한전기학회 추계학술대회, 1995.
- 6) Avinash Chandra, Investigations on Electrostatic Precipitator : A Case Study, Industry Applications Conference, 1998, 33rd IAS Annual Meeting, Vol. 3, pp. 1947~1952. 1998.
- 7) Senichi Masuda, Pulse Energization System of Electrostatic Precipitator for Retrofitting Application, IEEE Trans. on industry applications, Vol. 24, No. 4, Jul./Aug. 1988.
- 8) T. R. Rangaswamy, Efficient Thyristor Controller for ESP. Power Energy Systems for Industrial Growth, Proc. of the 1996 International Conference, Vol. 2, pp. 840~844, 1996.