

140kV, 20mA급 Pilot 집진기용 고압 펄스 전원장치 개발

論 文
50B-2-4

Development of 140kV, 20mA Rated High Voltage Pulsed Power System for Pilot EP

金元鎬* · 姜유리* · 李廣學** · 金鍾洙*** · 林根熙*** · 金喆禹§

(Won-Ho Kim · Iouri Kang · Kwang-Hak Lee · Jong-Soo Kim · Geun-Hie Rim · Chul-U Kim)

Abstract - With the increasing demands for clean environment, development of air cleaning systems has been received increasing attention. One of the key technologies in the electrostatic precipitator(EP) is high voltage pulsed power supply, which affects the performance of the overall system. In this study, a high voltage microsecond pulse power supply for the pilot EP is developed. The power supply has a dc source and a pulsed one. The ratings of the dc and the pulse source are 60kV and 70kV respectively. The width of pulse voltage is 140us and the maximum pulse repetition frequency is 200Hz.

Key Words : Electrostatic Precipitator, Pulse power

1. 서론

마이크로 펄스 개념(Micro-pulse concept : 이하, MPC)^{[1]-[2]}을 적용한 집진 방식은 종래의 직류 하전 방식이나 세미 펄스(Semi-pulse) 하전 방식^{[3]-[4]}에 비해 최근에 개발된 첨단 하전 방식으로서 집진 효율과 역전리 발생 억제 등 그 성능 면에서 탁월한 장점을 지니고 있는 것으로 보고되고 있다.

기존에 설치된 집진기(EP : Electrostatic Precipitator)의 성능 개선 대책으로 예전에는 아래와 같은 방법들이 여러 용도의 집진기에 채용되었다.

- ◆ 연료의 변경
- ◆ 배기가스 중의 조질제 주입(SO₃, NH₃ 등)
- ◆ 배기가스 중의 수분 첨가에 의한 온·습도조정
- ◆ 플랜트 조업 조절에 의한 온도 조정
- ◆ EP 증설
- ◆ EP 하전 제어 장치의 개량(간헐 제어 하전, 역전리 제어 등)
- ◆ 전극으로 집진된 분진의 제거 방법 개량

그러나, 모든 방법들이 연료의 제약, 운전 가동비의 증대, 운전관리의 복잡화, 설치 면적 증대, 보수의 복잡화, 성능 개선율의 부족, 공사로 인한 장기간 플랜트 휴지 등의 결

점이 있었다. 이에 비해서 전원 장치의 성능을 향상시키는 방식인 세미 펄스하전 방식이나 마이크로 펄스하전 방식을 적용한 전원 장치에 의한 기존설치 집진기의 성능개선은 종래의 결점을 해소한 새로운 방법이다.

기존의 마이크로 펄스^{[1]-[2]}방식의 전원 장치는 펄스 발생부의 주회로 구성에 있어 저압 스위치를 직렬로 수십 ~ 백여 개를 직렬로 연결하여 고압을 직접 스위칭 하는 방식으로 가격적인 문제나 유지 보수 측면에서 많은 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서 제안한 MPC 방식의 주회로는 이 펄스 발생부의 주회로 구성을 고압 펄스 변압기를 사용함으로써 장치의 크기나 유지 보수 측면을 개선하였다. 장치는 각기 다른 형태의 전압을 발생하는 두 가지 부분^{[5]-[6]}으로 나누어지는데 전압을 일정한 값으로 집진기에 연속적으로 인가하면서 집진된 분진의 재비산을 방지하는 가변 직류 전압 발생부 및 순간적인 고압을 인가하여 코로나 발생을 균일하면서도 강력하게 발생하도록 하는 펄스 전압 발생부로 나누어지며 집진기에 최종적으로 인가되는 전압은 이 두 개의 장치에서 출력되는 전압이 중첩된 형태이다.

본 논문에서 새로이 개발한 전기집진기용 MPC 주전원회로는 500MW급 발전소에 설치되는 집진기를 동일한 구조와 모양으로 소형화한 10MW급 파일릿 집진기에 적합하도록 설계된 것으로 각종 산업용 전기 집진기 등에 응용될 수 있다. 새로이 제안하는 주회로의 특징은 직류 고전압에 고압 펄스 전압을 중첩시킨 전원장치를 구성하였는데 펄스 변압기와 공진 회로를 이용하여 고압 펄스를 발생시키며 펄스의 피크치 크기, 펄스 주기 및 펄스 폭 등을 원하는 대로 조절하기가 손쉬운 장점이 있다. 또한, 여러 개의 스위치를 직렬 구동시키는 종래의 방식에 비해 펄스 변압기가 사용되므로 절연 공간을 줄일 수 있어 더욱 소형화될 수 있으며 제작 가격 측면에서도 훨씬 유리하다.

본 연구 과정을 통해 최종적인 실험 결과로 도출한 전압

* 正 會 員 : (주)세원테크

** 正 會 員 : 蔚山大工大 金屬工學科 教授

*** 正 會 員 : 韓國電氣研究所

§ 正 會 員 : 釜山大工大 電氣工學科 教授

接受日字 : 2000年 8月 4日

最終完了 : 2000年 2月 7日

값은 직류 전압이 60kV이며 펄스 전압의 피크치는 70kV이다. 그리고, 펄스 전압의 최소폭은 140μsec 정도이며 펄스의 주기와 폭은 설계치 조정에 의해 가변적이다.

2. 펄스 전압 발생장치의 구성

파일럿 집진기용 펄스 전압 발생 장치는 직류 전압에 고압 펄스 전압을 중첩시키는 방식으로 구성하였는데 펄스 변압기와 공진 회로를 이용한 고압 펄스의 발생을 특징으로 한다.

주회로는 각기 다른 형태의 전압을 발생하는 두 가지 부분으로 나누어지는데 먼저, 가변 직류 전압을 일정한 값으로 부하에 연속적으로 인가하는 직류 전압 발생부 및 순간적인 고압 펄스를 발생하여 부하에 공급하는 펄스 전압 발생부로 나누어지며 부하에 최종적으로 인가되는 전압은 이 두 개의 장치에서 출력되는 전압이 중첩된 형태이다. 또한, 펄스 발생 후에 펄스 변압기에 존재하는 자기 성분을 일정하게 하기 위해 펄스 전압 발생부에 펄스 변압기 감자 전원이 별도로 구성된다.

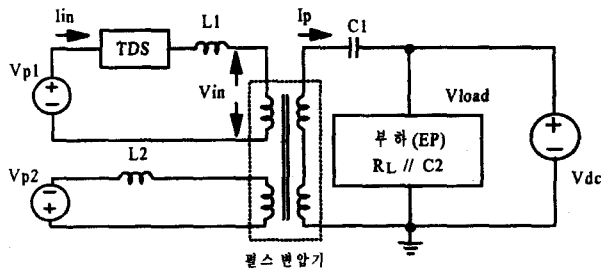


그림 1 파일럿 EP의 간이하 등가회로
Fig.1 Simplified circuit for pilot EP

고압 펄스 전압 발생회로는 일반적으로 공진 방식 또는, 고압 스위치 제어에 의해 얻어지는데 제안하는 방식은 이 공진회로의 구성을 달리하여 펄스 전압 발생 회로의 낮은 전압을 사용한 순간 공진과 펄스 변압기에 의해 고압 펄스 파형을 얻을 수 있으므로 제작 시에 기존의 회로와 비교하여 절연 공간이 줄어들어 크기와 무게가 감소하며 부하에 인가되는 직류 전압과 펄스 전압의 피크치의 크기 및 펄스의 주기를 사용자가 필요에 따라 조정을 할 수 있으며 펄스 폭 등의 값은 회로에 사용되는 소자들의 설계치 조정에 의해 가변적이다. 또한, 공진 발생을 위한 반도체 스위칭 소자로 TDS(Thyristor diode switch)를 사용한다.

그림 1은 파일럿 집진기용 펄스 전압 발생 주회로의 간이하된 그림으로서 기본 구성은 다음과 같다.

- ◆ 펄스 발생용 전원 Vp1
- ◆ 입력 직류 전원을 온, 오프 동작으로 출력 측에 단속시키는 TDS
- ◆ TDS와 직렬로 연결되어 LC 공진에 의해 펄스 전압을 발생시키는 펄스 변압기 1차측 공진 인덕터 L1
- ◆ 입력측의 전압을 부하에 고압으로 변환시키는 펄스 변

압기

- ◆ 펄스 변압기와 직렬로 연결되어 LC 공진을 일으키는 공진 커패시터 C1
- ◆ 부하에 정해진 직류 전압을 인가하는 가변 직류 전압 발생부 Vdc
- ◆ 펄스 변압기에 존재하는 잔류 자기 성분을 제어하는 변압기 감자용 전원 Vp2

그림 1에서 부하(EP)로 표현된 것은 전기집진기를 나타내는 것으로 집진기는 등가적으로 저항 및 커패시터가 병렬로 연결되어 있는 부하로 볼 수 있다.

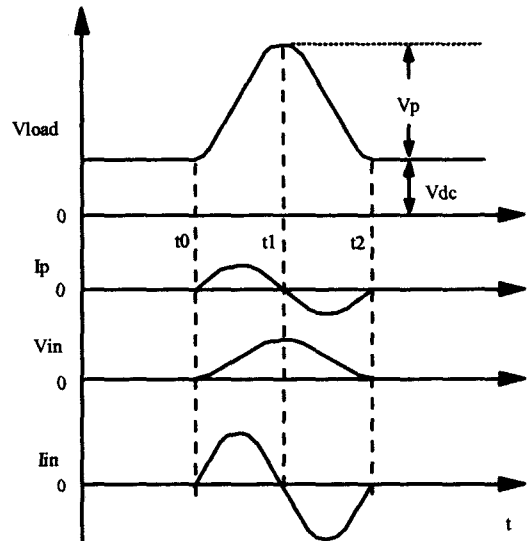


그림 2 파일럿 EP에 인가되는 각부 파형도
Fig.2 Voltage and current waveforms of pilot EP

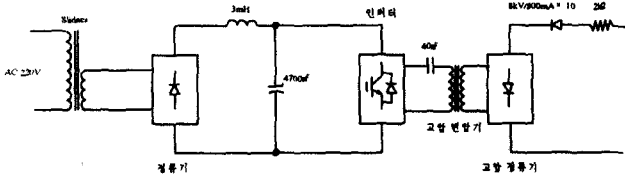
고압 펄스를 발생시키는 회로의 구성은 교류 전원부로부터 정류기를 사용하여 직류 전압을 얻고 이 직류 전압을 전원으로 인버터 회로로 구성되며 공진 회로 구성은 고주파 변압기를 기준으로 1차측에 공진 인덕터와 2차측에 공진 커패시터가 연결되며 TDS의 동작은 임의 주파수에 따라 싸이리스터를 온 하면 공진 전류가 흐르기 시작하며 공진 전류의 흐름이 바뀌는 순간부터는 TDS의 다이오드로 역전류의 흐름이 생기므로 별도의 복잡한 스위칭 동작이 필요 없다.

입력 직류 전원에 부가적으로 구성된 펄스 변압기 감자용 전원은 펄스가 발생된 이후에 펄스 변압기에 존재하는 잔류 자기 성분을 제어하여 펄스 변압기의 포화를 피할 수 있다. 또한, 부하에 인가되는 직류 기저전압은 별도의 가변 직류 전원 회로에서 공급되고 펄스전압은 TDS, 1차측 공진용 인덕터 및 2차측 커패시터에 의해 발생된다.

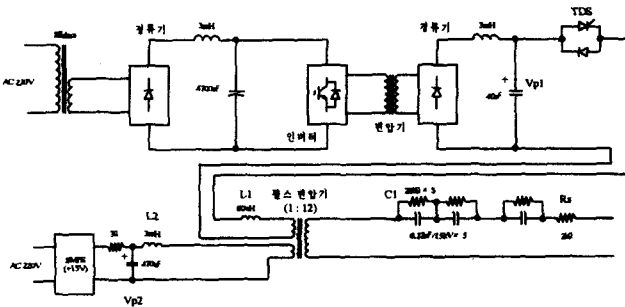
3. 펄스 전압 발생 원리

그림 2는 펄스 발생 시에 펄스 변압기 1차측과 부하양단에 인가되는 전압 및 전류 파형을 나타내는 그림이다. 초기 상태에는 공진 커패시터가 가변 직류 전원 장치에서 공급하

는 크기만큼의 전압 V_{dc} 로 충전되어 있다. $T = t0$ 인 순간에 TDS가 온되면 공진 커패시터 $C1$ 에는 가변 직류 전원에서 공급하는 전압이 충전된 상태에서 입력측에서 공급하는 전원에 의해 공진이 발생하기 시작한다. TDS가 도통된 상태에서 펄스 변압기 1차측 공진용 인덕터 $L1$ 및 펄스 변압기 2차측 공진용 커패시터 $C1$ 그리고, 부하를 따라 직렬 공진회로가 형성된다. TDS의 싸이리스터에 흐르는 전류는 $t = t1$ 의 시점에서 전류의 방향이 바뀌고 TDS의 다이오드를 통해서 역전류가 흐르기 시작한다. 이 때, 역전류의 흐름에 의해서 싸이리스터는 오프되며 이 상태가 TDS의 전류가 다시 0($t = t2$)이 될 때까지 지속되며 전류가 $t = t2$ 의 시점에서 공진이 종료된다. 위와 같은 과정이 원하는 펄스의 주기로 반복된다.



(a) 직류 전압 발생 회로부
(a) Circuit for DC voltage generation



(b) 펄스 전압 발생 회로부
(b) Circuit for pulse voltage generation

그림 3 파일럿 EP의 주 회로도
Fig.3 Circuits for Pilot EP

공진용 커패시터에는 다음과 같은 에너지가 충전된다. 최초 공진 시작점에서 공진용 커패시터에 충전된 전압 V_{dc} 는 가변 직류 전압과 같은 크기로 충전되어 있다고 할 때, 이 상태에서 TDS를 온시키면 공진 회로에 공진이 발생한다. 공진 주기는 순환 전류가 정현 파형으로 다시 제로 값이 될 때까지 지속된다. 이 상태에서 공진에 의해 발생하는 펄스의 피크치는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$\text{만일, } R_L \gg n\sqrt{L1 \cdot \frac{(C1+C2)}{C1 \cdot C2}} = \rho \quad (1)$$

일때, n 은 펄스 변압기의 1차측 턴(turn)수에 대한 2차측

턴(turn)수의 비, $C1$ 은 공진 커패시턴스, $C2$ 는 부하 커패시턴스, R_L 은 부하 저항을 나타내며 ρ 는 주회로의 등가 임피던스 성분을 나타낸다.

이 때, 고압 변압기 2차측에 흐르는 전류는

$$I_p = \frac{V_{p1}}{n\rho} \sin \omega t \quad (2)$$

로 나타나며, $\omega = 1/n\sqrt{\frac{L1 \cdot C1 \cdot C2}{(C1+C2)}}$ 이다. 그리고, 부하 측에 인가되는 전압은

$$V_{load} = \frac{I_p}{C2 \cdot \omega} (1 - \cos \omega t) \quad (3)$$

이며 여기서, 펄스 전압의 피크치는

$$V_p = 2nV_{p1} \frac{C1}{(C1+C2)} \quad (4)$$

로 나타난다.

그림 2에서 부하 전압 V_{load} 를 보면 일정한 부의 직류 값 V_{dc} 를 가지다가 공진 순간에 펄스 전압 V_p 가 중첩됨을 볼 수 있다.

그림 3은 실제 설치된 파일럿 집진기용 전원장치의 상세 회로를 나타낸다. 그림 3의 (a)는 가변 직류 전원 장치의 구조를 나타내는데 인버터, 고압 변압기, 정류기 및 펄스 유입 방지 다이오드로 구성되어 일정한 크기로 부하에 전압을 공급한다. 인버터는 IGBT를 이용하여 일정한 값으로 스위칭 주파수를 고정하고 듀티를 조정하여 직류 전압 V_{dc} 를 제어한다. 그림 3의 (b)는 펄스 전압 발생 장치의 구조를 나타내는데 전원부는 직류 전압 발생 장치와 같으며 인버터 후단부터의 구성이 다르다. 그림에서 R_s 로 표현된 저항은 집진기에 스파크가 발생된 경우에 2차측 전류를 제한하기 위하여 삽입한 저항이다.

그림 4는 전체 시스템의 구성도를 나타낸다. 그림에서 직류 및 펄스 전원 장치는 각각 별도의 변압기로 제작하여 시설 파일럿 집진기에 설치하였으며 제어 패널과 전력 및 신호선들이 인터페이스되는 구조이다.

4. 실험 결과

그림 5에서 그림 8까지는 새로이 개발한 파일럿 집진기용 고압 펄스 발생 장치를 파일럿 집진기에 설치하여 출력한 집진기 전압 및 전류를 나타내는 결과이다.

그림들에서 보여주는 전압, 전류값들은 모두 센서를 통해 측정한 것들이다. 그림 5에서는 집진기에 직류 고전압만이 인가된 것을 보여주는 그림이다. 그림 6과 그림 7은 직류 전압과 펄스 전압이 동시에 인가되는 상황에서의 집진기 출력 전압 및 펄스 전류의 파형을 나타낸 그림들이다. 그림

6에서는 펄스 전압과 전류를 확대하여 보여주는데 펄스 전류는 부의 정현파 부분에서 손실이 발생하기 때문에 정의 펄스 전류 부분과 대칭을 이루지 못하고 있으나 집진 특성에는 아무런 영향을 미치지 않는다. 그림 7은 최대 펄스 운전 주파수인 200pps에서 동작중일 때의 파형을 나타내는 그림이다. 그림 8은 펄스 발생 시, TDS 양단에 인가되는 전압 파형을 나타낸다. 그림들에서 보는 바와 같이 직류 및 펄스 전압이 중첩된 형태에서 정상적으로 발생되고 있음을 알 수 있다.

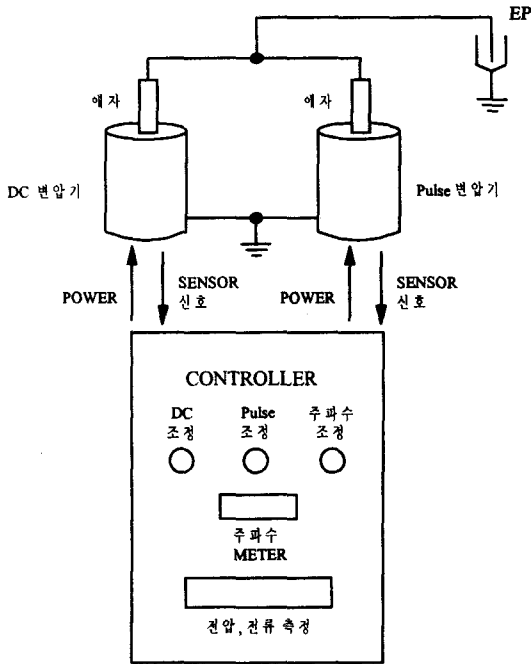


그림 4 전체 시스템의 구성도
Fig.4 Diagram of total system

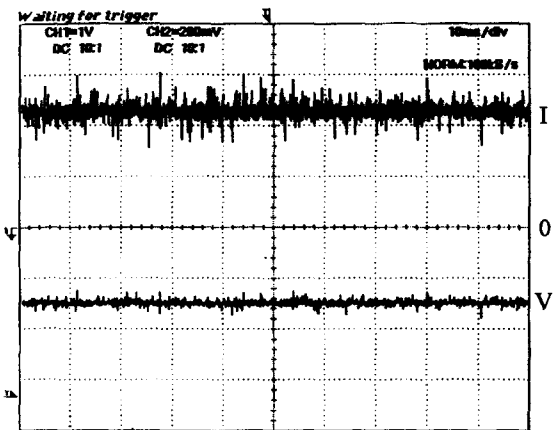


그림 5 EP에 인가되는 전압, 전류 파형(40kV/div, 10mA/div)
Fig.5 Voltage and current waveforms for EP(40kV/div, 10mA/div)

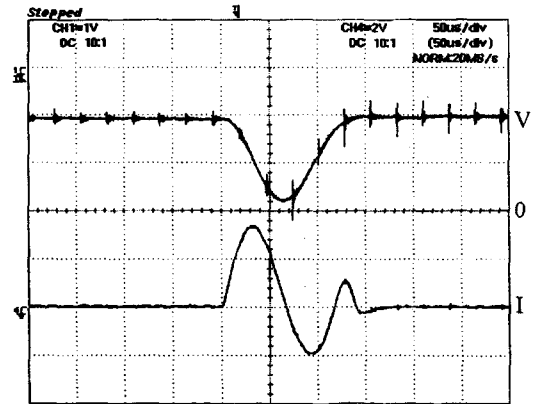


그림 6 EP에 인가되는 전압, 전류 파형 (40kV/div, 0.2A/div)
Fig.6 Voltage and current waveforms for Pilot EP(40kV/div, 0.2A/div)

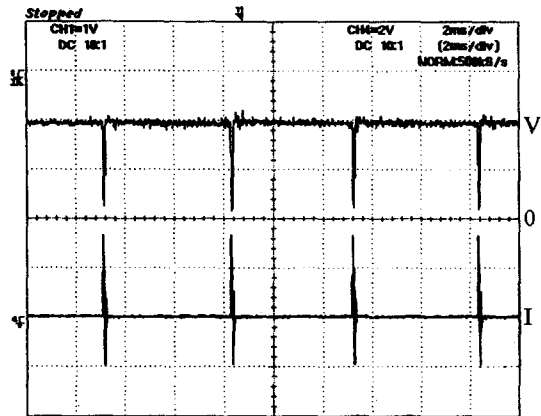


그림 7 파일럿 EP에 인가되는 전압 및 전류 파형 (40kV/div, 0.2A/div, 주파수 200pps)
Fig.7 Voltage and current waveforms for Pilot EP (40kV/div, 0.2A/div, frequency 200pps)

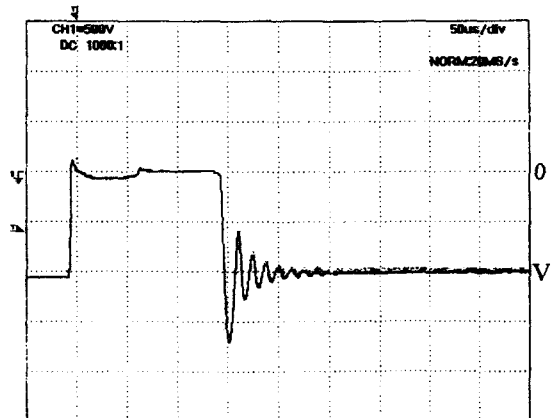


그림 8 펄스 발생 시, TDS 양단에 인가되는 전압(500V/div)
Fig.8 Voltage waveforms for TDS(500V/div)

5. 결 론

본 연구에서 개발한 파일럿 집진기용 고압 펄스 발생회로의 특징은 공진에 의해 발생된 펄스 전압을 펄스 변압기에 의해 고압 펄스 파형으로 얻을 수 있으므로 여러 개의 스위치를 직렬로 구성하여 고압 펄스를 발생시키는 종래의 방식과 비교하여 절연 및 설치 공간이 줄어들어 크기와 무게가 감소한다. 기저전압 공급을 위한 직류 전압 발생 장치도 펄스 변압기를 사용함으로써 전체적인 시스템의 부피와 가격을 줄일 수 있다. 또한, 부하에 인가되는 직류 전압과 펄스 전압의 피크치 크기 및 펄스의 주기를 사용자가 필요에 따라 조절을 할 수 있으며 펄스 폭 등의 값은 회로에 사용되는 소자들의 설계치 조절에 의해 가변적이다. 또한, 공진 발생을 위한 반도체 스위칭 소자로 TDS를 사용하여 제어기가 간단하며 시스템의 구성을 단순화할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 松井義雄, K. Porle, "Improvement of ESP's Performance Achieved with Microsecond Pulsing Energization", 火力原子力發電, Vol. 41, No. 2, pp92~101, 1990
- [2] 火力原子力發電技術協會, "火力發電所環境保全技術設備", Vol. 41, No. 6, pp779~794, 1990
- [3] 富松一隆, et al, "高速流電氣集塵裝置(HV-EP)의開發", 三菱重工業報, Vol. 29, No. 4, pp290~295, 1992
- [4] R. M. Fhrlich, et al, "AC Electrostatic Precipitation", IEEE Massachussetts Institute of Technology, Bambridge, MA, pp1211~1214, 1984
- [5] G. H. Rim, W. H. Kim, J. S. Kim, I. Kang, "A High Voltage Pulsed Power System for Electrostatic Precipitators", Korea · Germany Advanced Power Electronics Symposium Proc., pp 1-4, 1998.
- [6] W. H. Kim, I. Kang, H. J. Ryoo, G. H. Rim, J. S. Kim, "A Gate Driver for High Voltage Thyristor Diode Switch", in IEEE ICPE '98 Conf. Rec., pp. 855-858, 1998.
- [7] 김원호, 강유리, 김종수, 임근희, 김철우, "140kV, 20mA 급 전기집진기용 고압 펄스 발생장치 개발", '99 전기학회 하계학술대회 논문집, pp 2623-2625, 1999.
- [8] W. H. Kim, J. S. Kim, I. Kang, G. H. Rim, C. U. Kim, "A High Voltage Pulsed Power System for Electrostatic Precipitators", IAS '99 Conf. Rec., 1999.

저 자 소 개



김 원 호 (金元鎬)

1968년 6월 20일생. 1991년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. 1993년~현재 한국전기연구소 전기물리연구팀 선임연구원

Tel : 054-779-9031
E-mail : mtspark@chollian.net



김 중 수 (金鍾洙)

1959년 12월 26일 생. 1982년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 경남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 경남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1982년~현재 한국전기연구소 전기물리연구팀

선임연구원
Tel : 055-280-1453, Fax : 055-280-1406
E-mail : jskim@keri.re.kr



강 유 리 (姜유리)

1945년 2월 18일 생. 1969년 러시아 전기기술대학교 졸업 (석사). 1980년 러시아 전기물리설비연구소(NIEFA) 박사. 1969년~현재 러시아 전기물리설비연구소(NIEFA). 현재 한국전기연구소 위촉연구원

Tel : 054-779-9034, Fax : 054-280-1406
E-mail : mtspark@chollian.net



임 근 희 (林根熙)

1955년 10월 7일 생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 Virginia Polytechnic Institute and State University 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 Virginia Polytechnic Institute and University 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국전기연구소 전력전자연구부 책임연구원

Tel : 055-280-1450, Fax : 055-280-1406
E-mail: ghrim@keri.re.kr



이 광 학 (李廣學)

1949년 4월 5일 생. 1977년 울산대 금속공학과 졸업. 1984년 고려대학교 대학원 금속공학과 졸업(공박). 1981년~현재 울산대 금속공학과 교수. 1999년~현재 (주)세원테크 대표이사

Tel : 052-259-2233
E-mail : kwanghak@uou.ulsan.ac.kr



김 철 우 (金喆禹)

1942년 12월 5일 생. 1969년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대학 전자공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경공업대 전기전자공학과 객원교수. 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 부산대 공대 전기공학과 교수.

Tel : 051-510-1488
E-mail : kimcu@hyowon.cc.pusan.ac.kr