

소결공장의 Micro Pulse 하전 제어기법에 관한 연구

김민호^(*), 황광호^(*), 최창호^(*), 홍영기^(*), 장성덕^(☆), 손윤규^(☆), 오중석^(☆), 조무현^(☆)
(주) 포스콘^(*), 포항공과대학교 가속기연구소^(☆)

Study on the Sinter Plant Micro Pulse System of Control Algorithm.

M. H. Kim^(*), G. H. Hwang^(*), C. H. Choi^(*), Y. K. Hong^(*), S. D. Jang^(☆),
Y. G. Son^(☆), J. S. Oh^(☆), M. H. Cho^(☆)
POSCON^(*), Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH^(☆)

ABSTRACT

전기집진기는 여타의 집진 설비에 대한 집진 효율과 유지 보수성이 우수한 설비이며 소결공장의 배출 분진과 같은 고온(120~160°C)의 미세분자(5~12 μm) 및 고비저항($10^{12} \sim 10^{13} \Omega \text{cm}$)을 포집할 때 DC하전에 비해 Pulse 하전이 효과적이며 Energy 절감이(60~90%) 된다. 본 논문은 소결공장의 DC하전에서 Pulse 하전으로 전환 시 EP 특성 및 부하변화에 따른 제어방안을 제시한다. 현재 제철소의 소결 전기집진기 경우 정수 직후에는 전압이 정상적으로 공급하다가 시간이 지남에 따라서 DC 전압이 낮아지고 Back Corona 현상이 발생하여 서서히 분진농도는 급격히 상승하는 문제점을 가지고 있다. 이에 비해 Pulse 하전으로 운전할 경우에는 Back Corona 현상 발생억제로 출구농도 상승 기울기를 조장방법 및 Ramping장치와 관련장치 등을 최적으로 운용할 수 있는 방법을 소결공장 실험하였다.

1. 서 론

환경설비중의 하나인 전기집진 설비에 대한 전원장치를 포항공대와 공동 개발하여 현재 포항종합제철의 제 3소결 운전 중에 있으며 전기집진기 설비의 제어에 관한 제어방법과 운전 중에 생길 수 있는 여러 가지 인터록과 파라메타 선정을 가변 하면서 최적의 운전조건을 도출하였다. 부하인 전기집진기는 고전압을 사용하는 설비여서 미세분자 입자인 먼지의 분진 비저항과 밀접한 관계를 가진다. 분진입자의 저항비가 높은 경우는 마이크로 하전방식이 유리하나 대체적으로 분진 비저항치가 $10^6 \sim 10^7$ 의 경우는 직류전원만을 사용하는 설비가 유리하다. 포항제철의 분진 비저항치는 $10^{10} \sim 10^{12}$ 정도가 대부분 이어서 이 전원 방식인 마이크로 펄스 하전시스

템이 적합하다. 본 논문에서는 마이크로 펄스 하전 시스템에 적용되는 제어방법과 원격제어에 관한 제어기법에 대한 결과를 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 전기집진의 원리

전기집진이란 고전압에 의하여 코로나 (corona) 방전을 발생시켜 가스 중의 입자가 대전토록 하여 (방전극부) 대전입자를 전기장내에서 전기력에 의해 가스와 분리하는 (집진극부) 작용과 입자를 정전기력에 의해 포집하는 것이다. 전기집진에 있어서 입자의 분리 이동 속도 (migration velocity)는 1 micron 이하의 미세한 범위에서도 중력 또는 원심력에 의한 침강 속도처럼 급격히 저하하는 것이 아니므로 초미립자에 있어서는 매우 유리한 집진 방식이다. 또한 가스의 압력손실도 10 ~ 25 mmH₂O 정도이므로 문제되지 않는다.

2.1.1 전기 집진기의 구조

전기집진기는 방전극, 집진극, 집진실, 가스 정류장치, 래핑 장치, 하전설비, 애자 및 애자실, 분진 배출장치 등으로 이루어져 있다. 이러한 것들이 전기집진기의 주요 구성요소이며, 습식에 있어서는 래핑장치 대신에 전극 세정 장치가 필요하며, 가스 및 분진 입자의 조건에 따라서는 가스 조절 장치 등의 부대 설비가 필요하다. 이러한 전기집진기에서 가스의 흐름 및 분진 입자의 처리 순서는 [그림1]과 같다. 처리 가스는 입구측 정류판을 통해 가스 분포가 균일화되어 다수의 방전극 및 집진극을 통과한다. 이때 가스중의 입자들이 코로나 영역이나 대전장(charging field)을 통과하면 입자들은 음의 전하

(negative electric charge)를 띄게 된다.^[1] 이렇게 음의 극성을 가진 입자들은 가스의 흐름을 따라 움직이면서 전기력에 의해서 집진극에 쌓이게 된다. 집진극에 부착 포집된 분진 입자는 기계적 충격이나 water washing 등에 의해서 호퍼 (hopper)로 낙하된다. 호퍼로 낙하된 분진을 일정시간 저장 후 외부로 이송시키거나 혹은 항시 분진 배출장치에 의해 외부로 이송된다. 집진실에서 입자와 분리 처리된 가스는 장치 출구를 통해서 외부로 배출된다.

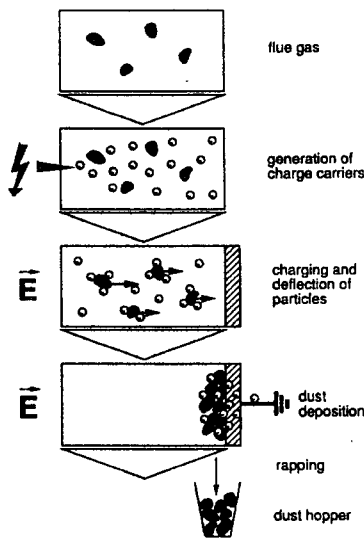


그림 1 ESP 시스템의 먼지 분리 공정도
Fig. 1 Schematic illustration of the separation process in ESP

2.2 펄스하전(Pulse energization)

산업용 펄스 하전시스템으로 개발된 전기집진기는 꾸준한 기술적 발전을 하여 고전압 트랜스포머와 정류기에 근본을 둔 전통적인 전원공급장치가 개발되었다. 이 방법은 전기집진기의 주요한 제약 중의 하나인 고저항 입자들에 대한 집진 효율을 향상시키기 위해 개발되어졌다. 펄스하전은 기저전압위에 짧은 주기를 가지는 고전압 펄스를 중첩시키는 것으로 구성된다. 전기집진기 전원장치로 개발된 펄스시스템은 일반적으로 마이크로 세컨드범위 혹은 수십 초의 범위를 갖는다. 수 μ s 고속 펄스인가를 위해 필요한 내구성과 안정성을 겸비한 스위칭기술의 부재로 현재 100 μ s 정도의 펄스폭을 가진 펄스시스템만이 상용으로 개발되어 있는 실정이다.^[2] 고전압 펄스는 1/400 pulse/s 범위의 특정주파수에서 반복되어진다. 인가된 전압의 전형적인 파형은 [그림 2]에 100pps의 주파수에 대해서 나타나 있다. 전통적인 DC집진 방식과 마이크로 펄스 하전방식에 대한 차이점은 다음과 같이 요약할 수 있다.

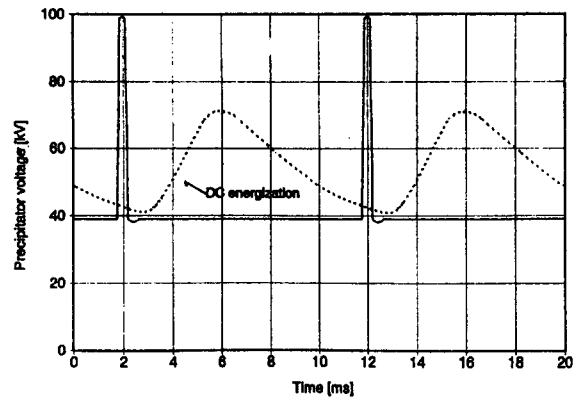


그림 2 DC직류전원과 펄스하전시스템에서의 전압파형
Fig. 2 Typical voltage waveform obtained with the pulse energization and the comparison with the DC energization

- 짧은 펄스 폭으로 첨두전압을 높게 인가하여 충전의 역할수행 한다.
- 기저전압은 코로나개시 전압에 근접해 있으면서 집진의 역할을 수행한다.
- 전기집진기 전압의 첨두치는 기저전압과 펄스전압의 합과 같고 그것의 값은DC 시스템의 첨두치보다 크다.

높은 반복수의 싸이리스터 스위치 발명과 전력소비를 줄이기 위해 개량된 시스템은 미국, 일본과 유럽의 회사들에 의해 독특한 펄스시스템이 개발됐고 1970년 후반에 이르러서는 full-scale테스트가 가능하게 되었다.

전세계적으로 상업적인 펄스 하전시스템의 운전과 함께 표준 생산품으로서 미국, 일본 그리고 유럽의 펄스공급 회사들이 있다. 하자만 대부분 수 ms 영역의 펄스 폭을 갖는 시스템이며 마이크로대의 펄스 폭을 갖는 펄스시스템은 기술의 난이성으로 인해 극소수의 제작사가 있는 실정이다.

2.3 전기적인 시스템

그림 2에서 묘사되었듯이 펄스 하전시스템은 기저전압에 중첩시켜 좁고 높은 펄스를 전달한다. 따라서 전기시스템은 펄스발생회로와 기저전압 전원공급장치가 따로 요구되며 펄스주기 및 기저전압과 펄스 반복 수는 특정한 제어원리에 따라서 변화되며 이 기능은 특정제어기 마이크로 프로세서에 의해 수행되어진다. 전기시스템의 기본요소에 대한 Block diagram을 [그림 3]에 표기하였다. 첫 번째 형태는 일반적으로 두개의 고전압 탱크(하나는 펄스발생장치를 위해 그리고 또 다른 하나는 기저전압을 위해)

와 제어시스템으로 구성된다^[3]. 두 번째 형태는 일반적으로 하나의 제어 캐비닛과 고전적인 전원공급장치와 비슷한 하나의 고전압탱크를 사용한다. 양쪽 다 등가회로로서 전기집진기를 커패시터로 표시하는 직렬 LC공진 회로에 기반을 둔 에너지 회수원리를 사용하는 것이 회로의 중요한 부분이다

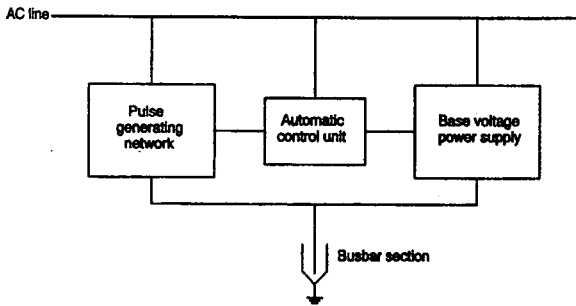


그림 3 펄스 하전시스템의 블록다이어그램
Fig. 3 Simplified block diagram of a pulse energization system

2.4 전기집진기용 마이크로 펄스 전원장치개요

마이크로 펄스 전원장치의 부하는 전기집진기의 각 실에 해당되고 펄스 시스템에는 등가 적으로 콘덴서부하에 해당된다. 이러한 부하에 에너지 손실이 없이 펄스를 인가하는 방법으로 공진형 회로를 선택하는 것이 바람직하다. [그림 4]는 이 개념을 구현할 수 있는 공진형 펄스 발생기의 개략도를 보여주고 있다. Cs 충전 콘덴서에 저장된 에너지는 고전압 반도체 스위치와 공진 인덕터 L_s 에 의해 부하인 Corona Reactor에 전달되었다가 회수되며 이 때 반주기 사인파 펄스가 부하에 인가되게 된다. Cs 콘덴서는 부하 정전용량과 같은 값을 선택해야 하며 L_s 인덕터는 펄스 폭을 만족시킬 수 있는 값을 갖도록 결정된다. 전기집진기용 마이크로 펄스 전원장치의 사양을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 정격 집진기 정전용량 : 130 nF
- 2) 최대 직류전압 : + 70 kV
- 3) 최대 직류전류 : 0.5 A
- 4) 펄스 전압 범위: 10 ~ 70 kV
- 5) 최대 펄스전류: 220 A
- 6) 정격 펄스 폭: 120 μ s
- 7) 최대 실효 전류: 25 A
- 8) 최대 반복률: 200 Hz
- 9) 격 입력 전원: 단상 440V, 60 Hz, 114 A
- 10) 제어: 자동/수동, 현장 판넬제어, 원격감시 신호 및 원격제어기능 제공

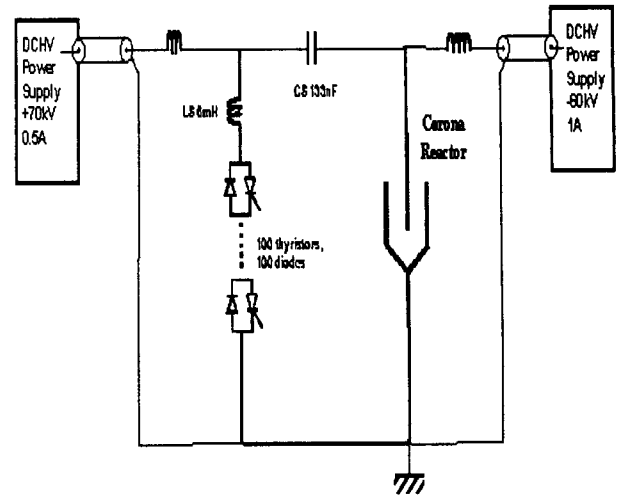


그림 4 MPS 시스템의 전기회로도
Fig. 4 Schematic diagram of MPG

2.5 마이크로 하전식 집진시스템 제어기

펄스 침투전압과 펄스주파수 제어를 통한 집진시스템 운전, 부하 이상 발생의 진단과 시스템 정지 및 자동복구기능, 마이크로 프로세서를 이용한 집진공정을 자동/수동 제어시스템으로 개발을 목표로 다음과 같은 과정으로 구현하였다.^[4]

1. 제어시스템 요구조건 및 제어 flow-chart 설계.
2. HV-pulse 동작의 remote sensing 및 제어방법 설계.
3. 전원 제어판넬 개발.
4. 마이크로프로세서 설계 및 제작 (H/W 및 S/W)..
5. 테스트 스탠드를 이용한 성능시험.

Microprocessor에 의한 Programmed Control Strategy에 따라서 DC Voltage, Pulse Voltage Amplitude, Pulse Repetition Frequency(PRF)를 제어한다. 이 장치는 크게 Control Strategy, Monitoring System, Alarm & Feedback Processing System을 포함한다. 가능한 가장 높은 DC Voltage의 상태에서 집진기에 가능한 가장 높은 $V_{dc} + V_{pulse}$ 를 공급하는 것이며, Automatic Control은 PRF를 변화시킴으로써 Emission Current를 일정하게 유지하는 것이 목표이다.

2.5.1 전압의 제어원리

Start sequence 후에 DC Voltage가 Corona

Onset Voltage Level로 조정된다. 이 후 Start Value에 해당하는 Pulse Amplitude와 Repetition Frequency를 가진 펄스가 인가된다. Vpulse, VDC, PRF가 설정된 상승률로 증가된다. 정상운전상태이지만 Pulse 인가시 Spark가 발생하면 Pulse Amplitude가 Adjusted Setback에 의하여 감소된다. Pulse간에 Spark가 발생하면 DC Voltage가 Adjusted Setback에 의하여 감소된다. 펄스가 인가되지 않는 상태에서, DC Voltage는 단독으로 Corona Current를 일으키는 값 근처로 유지되도록 DC level이 주기적으로 측정된다. 최종적으로 DC Level, Pulse Amplitude가 Adjustable Upper Limit에 도달한다.

2.5.2 Pulse Repetition Frequency(PRF)의 제어원리

정격 Pulse Repetition Frequency(PRF)는 200 PPS이다. Average Current가 설정된 값보다 작으면 PRF는 일정한 상승률(20 %/min)로 선형적으로 상승하고, Average Current가 설정된 한계 값을 초과하면 설정 값을 초과하지 않을 때까지 빠른 속도(800 pps/min)로 선형적으로 감소한다. PRF는 2 pps와 200 pps의 사이에서 조정 가능하며, Adjustable Upper Limit에 의하여 제한되어질 수 있다.

2.5.3 Spark Detection and Classification

Pulse Interval 중에 발생하는 것은 Pulse Spark이고, 두개의 펄스 사이에서 발생하는 것은 DC Spark이다. Type 1 Spark는 집진기의 전압이 Preset Limit 이하로 떨어져서 20 ms 보다 짧은 시간 내에 복귀하는 경우이고 Type 2 Spark는 이 보다 긴 시간 뒤에 복귀하는 경우이다. 이 경우는 DC Power Supply에 있는 Thyristor는 일정시간동안 차단된다.

2.5.4 Pulse spark rate monitor

이 Monitor는 Thyristor Switch 및 보호회로의 Thermal Overload를 방지하기 위하여 Temperature Rise를 나타내는 0-100 % 범위의 Signal이 생성된다. 각각의 Spark에서 Signal은 Rated VDC와 Vps에서 20 %의 step으로 증가하고, 14 %/sec의 Slope로 선형적으로 감소한다. VDC와 Vps가 Rated Value보다 낮으면, Step은 합(VDC + Vps)에 대하여 비례적으로 감소된다. Signal이 정해진 Level을 넘으면 일정 값만큼 펄스 전압을 감소시킨다.

2.5.5 DC Spark monitor

이 Monitor는 DC Spark Rate를 0.2 회/min-20 회/min 사이에서 제한하도록 조정된다. Monitor는 DC Spark에 대하여 10 %/min으로 증가되는 Signal을 수신하여 Adjusted Spark rate에 따라 0으로 선형적으로 감소한다. Signal이 30 %의 Level을 초과

하면 VDC는 Preadjusted Value로 감소된다.

그림 5는 마이크로 하전식 집진 시스템의 공정제어를 그림으로 나타내었다.

2.5.6 MMI(Man Machine Interface)

MMI의 Software구성은 모든 실을 Monitoring할 수 있는 Main화면 및 Bar Graphic화면, 해당실의 현재 값을 Graph로 나타내는 Operator Display화면상에서 Remote 제어기능, Fault발생 시 나타내는 Fault Display화면, Parameter 변경 시 나타나는 Log Display화면, 실별 운전상태를 일보/월보로 출력된다. [그림 5]는 MMI Main화면은 각각의 장치에 대한 제어 값을 보여주고 있다. Report Display 화면, 과거 Data를 볼 수 있는 Backup Display 화면 등의 운용방법과 기능에 대한 내용을 포함한다.

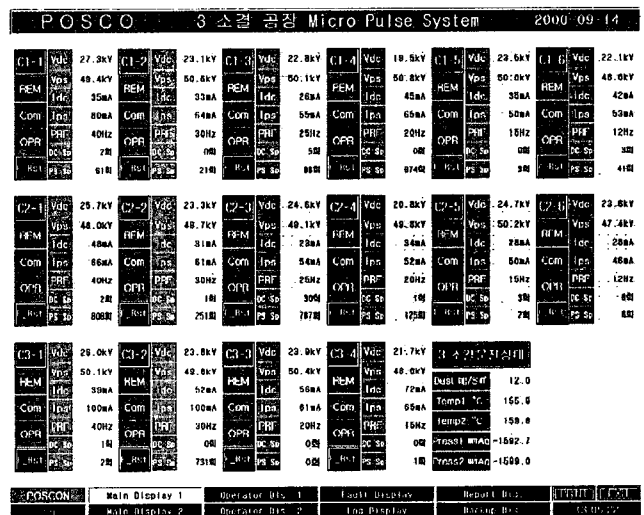


그림 5 MMI Main화면 구성도
Fig. 5 MMI Main Display

2.6 제어기 동작 특성 및 실험

제어기의 동작은 전기 집진시스템의 원활한 운전과 개인의 안전을 우선적으로 고려하여 설계되었고 부하의 동작 조건과 전원장치의 상태를 감시하는 기능을 제공한다.

본 시스템 제어를 위해 개발된 제어기는 초기 전원 투입시 전압을 올려서 아크가 발생하는 지점을 찾고, 아크 직전까지 흐르는 전류 값을 찾아서 제어해야 할 대상을 선정한다. 제어기의 각종 파라메타 설정은 아크가 생기기 직전 전압 값으로 세팅하고 코

이 논문의 작성에 아낌없는 지원과 협조를 해 준
(주)포항종합제철에 감사를 드립니다.

로나 전류를 감시하여 초기운전이 실행된다. 간헐적으로 생기는 아크에 대해 자동으로 설정전압을 내리고 직류 부전원에 대해 펄스전압인가 시점을 제어하도록 프로그래밍 되어있다. 실험결과 아크직전까지 코로나 방전개시 전압은 전기집진기 내부상태에 따라 다르나 평균적으로 30 kV였고 그때 흐르는 전류는 25 mA이었다. Stack에 배출되는 먼지분진을 정부 규제치 이하로 유지해야하므로 전기집진기의 각실에 운전되는 파라메타 설정도 달리해야 한다. 전기집진기의 최종 목표 값은 분진량을 최소화하는데 그 목적이 있으며, 집진기 내부 청결상태나 온도, 압력 등이 주요 인자로 작용한다. 목표 값에 도달하기 위한 제어방법은 집진기에 공급하는 집진 전원과 하전전원을 제어하는 것이며, 아울러 하전전원인 마이크로 펄스의 반복율(PRF)을 제어한다. 집진 전원만을 사용하는 시스템과 마이크로 펄스 하전시스템의 전력사용량을 비교해보면 전자에 비해 1/3정도의 전력사용량으로 운전됨을 알 수 있다. 에너지 절감 차원에서 보면 마이크로 펄스 하전시스템을 최소의 집진 전원에 펄스전원을 함께 인가하므로 집진 전원에 비해 적은 양의 전력을 투입하고 같은 효과를 얻으므로 경제적이다.

3. 결 론

3.1 실험 결과 및 고찰

집진기 전원장치 및 분진농도 감시를 위해 개발된 제어기는 포항제철 소결공장에 설치되어 운전 중에 있다. 개발된 제어기의 실험결과 제어목표 값인 분진농도의 감시와 전원장치의 운전상태를 실시간으로 제어가 가능하도록 되어있다.

집진기 제어기로서 요구되는 사항을 살펴보면

1. 원격제어로 집진 전원 및 마이크로 하전전원 제어가 가능하다.
2. 펄스 반복율(PRF) 제어가 용이하다.
3. 코로나 전압 확인 및 부하단락 상태를 감시하는 기능이 있다.
4. 전기집진기 제어에 필요한 마이크로 프로세서 설계 및 제작을 하였다.
5. 기존 시스템에 비해 전력사용량을 70~90%정도 감소시켰다.
6. 기존시스템 대비 분진농도 감소효과를 가져왔다.

향후 사용될 마이크로 펄스하전전원 시스템의 부피를 1/3정도 감소시켜 콤팩트화하고 제어개념은 인터넷 기반을 구축으로 하는 시스템을 개발해 나갈 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 포항공과대학교, "Development of Micro Pulse Generator for ESP 보고서", 1999.
- [2] K.R Parker, Applied Electrostatic Precipitation, Blackie Academic & Professional, 1997.
- [3] Sabert Oglesby, Jr. and Grady B. Nichols, Electrostatic Precipitation, Marcel Dekker, Inc., 1978.
- [4] 포항제철, "광양 소결 공장 1,2 소결 Waste E.P 전압 Control System 설치공사 보고서", 1996.