

전극길이 및 펄스반복율에 대한 부하임피던스 특성변화에 관한 연구

정 종한*, 송 우정, 전 진안, 이 유수, 김 회영, 김 희제
 부산대학교 전기공학과, 동주대학 컴퓨터멀티미디어학과, 한국전력공사

A Study on the Characteristics of Corona Critical Voltage on Increasing Load Impedance

Jong-Han Joung, Woo-Jung Song, Jin-An, Jeon, U-Soo Lee, Hwi-Young Kim, Hee-Je Kim
 Dept. of Electrical Engineering PNU, DongJU College, KEPCO

Abstract - In this paper, we studied EMTP analysis and characteristics of critical voltage of pulse corona and load impedance on variable electrode length. To obtain a stable pulse voltage, we designed a compact pulse generator switched MOSFET and tested their characteristics by adjusting electrode length and pulse repetition. As a result, critical voltage of pulse corona and load impedance on increasing electrode length were decreased. These results indicate we can control critical voltage of pulse corona and suppress arc discharging between two electrodes.

1. 서 론

펄스코로나 방전에 대한 여러가지 특성들이 전기적, 광학적, 화학적 계측을 통해서 현재까지 폭넓게 연구되고 있으며, ^[1-2] 특히 화력발전소의 배연가스 제거, 오페수처리, 전기집진기 등 환경 개선분야에 널리 적용되고 있으며, 더욱 실용적이고 경제적인 방법으로 이러한 환경오염원을 해결하기 위해서 많은 나라들이 관심을 가지고 있다. ^[3-5] 전극사이의 아크 방전은 대전류를 동반하며 전극표면에 스파터링으로 인한 손상을 주며, 계속적으로 간헐적인 아크 방전을 유도시키는 주 원인이 되므로 외부 공급에너지는 목적 대상체의 전리 혹은 해리를 시키지 못한 채 방전을 따라서 전극에 흡수되어 손실로 되어 버린다. ^[5] 따라서, 아크 방전은 전기집진기에서의 집진효율 및 플랜트의 탈황/탈질 효율 저하를 초래할 뿐만 아니라 고가의 펄스발생기의 회로손상 및 장치수명을 단축시키는 주원인이다. 그러나, 상기의 세가지 요소에 해당되는 변수에 따른 부하 임피던스의 변화 특성 및 펄스코로나 임계전압을 추이할 수 있다면 주 전원과의 임피던스 정합 및 대전류 발생의 원인이 되는 아크를 억제시킬 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 펄스코로나 방전을 이용하여 일정한 전극간격을 기준으로 전극길이 및 펄스 반복율에 따른 유전체의 라디칼 형성과 직접적 관련이 있는 펄스전압과 전류를 측정하고 그에 따른 펄스코로나 임계전압, 펄스에너지 및 부하 임피던스의 변화 특성을 과도현상 해석 프로그램인 EMTP (Electro-Magnetic Transient Program)로 모의한 결과와 비교 검토함과 동시에 상기의 특성을 이용하여 전극사이에서 발생하는 아크 방전 발생 억제에 관한 연구를 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 펄스발생기(Pulse generator)

2.1.1 펄스발생회로

본 연구를 위해 직접 제작된 펄스 발생회로 및 MOSFET 제어회로를 그림 1에 나타내었다. 그림 1과

같이 펄스발생회로는 입력회로, 펄스발생회로, MOSFET 제어회로로 크게 3부분으로 구성된다. 펄스발생기는 펄스변압기의 1차측에 에너지를 인가하기 위해 2배압 회로에 의해 충전된 C1(100 μ F/250V)과 C2(100 μ F/250V)의 충전전압은 C3(7 μ F/1000V)에 최대 630V까지 충전되며 전압조정기에 의해 충전전압을 가변시킬 수 있다. 간략한 동작은 다음과 같다. C3의 충전전압은 주파수 및 스위칭 특성이 우수한 MOSFET(model:IRF 830)의 드레인과 소스사이 인가되며 게이트의 신호가 입력되면 충전전압은 정극성으로 감겨져 있는 권수비 1:32의 펄스변압기에 전달되어 2차전압이 유기됨으로써 부하에 공급되도록 구성되어 있다. 또한, 펄스반복율은 IR(International Rectifier)사의 IR2110의 9번핀 입력 주파수를 제어함으로써 펄스반복율 및 부하에 전달되는 펄스에너지를 제어하였다. 그리고, 입력에너지는 식(1)로 구하면 펄스당 1.4J로써 펄스반복율 500pps인 경우 최대 700W의 입력에너지를 얻을 수 있다.

$$E_{input} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C} [J] \quad (1)$$

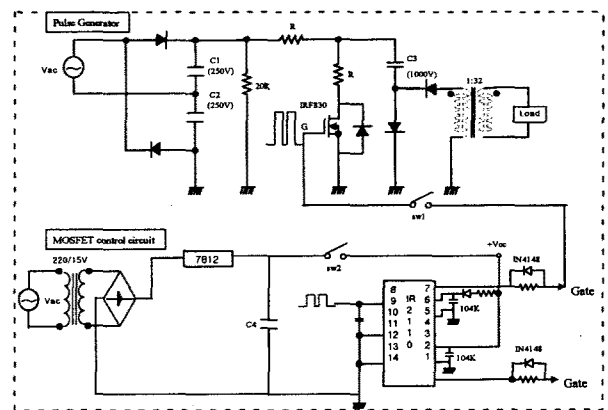


그림. 1 펄스발생회로 및 MOSFET 제어회로

Fig. 1 Schematic of pulse generator and MOSFET control circuit

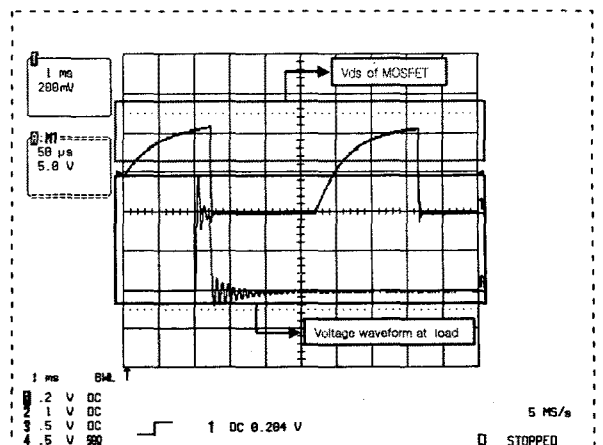


그림. 2 드레인과 소스사이의 인가전압 및 방전 파형

Fig. 2 Discharging waveform and Vds of MOSFET

그림 2는 MOSFET의 드레인-소스사이의 전압 V_{ds} 및 부하의 방전파형을 나타내었다. 그림 2에서 1은 V_{ds} 300V를 의미하며, (A)는 1:32의 펄스변압기에 의해 변성된 방전파형을 나타낸다. 대기압 상온에서 펄스폭 $25\mu s$, gap 5mm일 때 펄스전압 14kV에서의 펄스코로나 방전파형으로써 대기압의 질소가스로 인해 푸른빛의 방전색을 관찰할 수 있다. 충전시간은 RC시정수에 의해 비례하므로 그림 1에서의 C3의 충전저항보다 방전저항을 매우 작게하여 1 펄스내에 방전을 마무리할 수 있도록 결정하였다.

3. 실험 결과

3.1 전극길이에 따른 펄스코로나 임계전압, 전류 및 부하 임피던스 변화특성

그림 3은 전극의 정극성, 부극성에 따른 펄스전압 및 전류파형을 비교한 그림이다. 그림 3에서 파형 A, B는 정극성의 펄스전압 및 전류파형이며 C, D는 부극성의 펄스전압 및 전류파형으로써 선 대 선 방전전극에 있어서는 전극극성에 따른 펄스전압 및 전류는 거의 동일함을 알 수 있다. 이 외에도 코로나 발생 임계전압 및 부하 임피던스의 변화는 양극성에서 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 방전전극의 형상이 달라지면 그와 함께 V-I 특성이 다르게 나타난다.

그림 4는 전극길이를 증가시킨 경우의 펄스코로나 임계전압 파형을 나타낸 그림이다. 그림 4에서 L1*L2는 각각 (+), (-)극성의 전극수(혹은 길이)를 의미하며, L2 증가는 부극성에서 (-)극성의 전극길이 증가를 나타낸다. 각 전극길이는 (+) 전극길이 168mm, (-) 전극길이 190mm이며, 전극간격 5mm, 펄스 반복율 10pps 일 때 그림 4A와 같이 1*1의 전극은 17kV에서 펄스코로나 방전이 발생하며, 1*2 전극에서는 그림 4B와 같이 15kV에서 방전이 발생된다. A, B, C, D는 각각 (-) 전극을 증가시킨 경우의 펄스파형으로써 (-) 전극길이 증가할수록 펄스코로나 발생 전압은 거의 선형적으로 감소하게 되고, 펄스지속시간은 증가하는 특성을 가진다. 이는 전극길이가 증가하면 전류의 통로 증가, 부하의 등가 인덕턴스 감소 및 커패시턴스 증가 등에 의해 결과적으로 부하 임피던스가 감소하게 되어 펄스 코로나 발생 전압도 함께 감소하는 특성을 가지기 때문에 펄스 코로나 발생 전압 V_c 가 감소하게 된다.

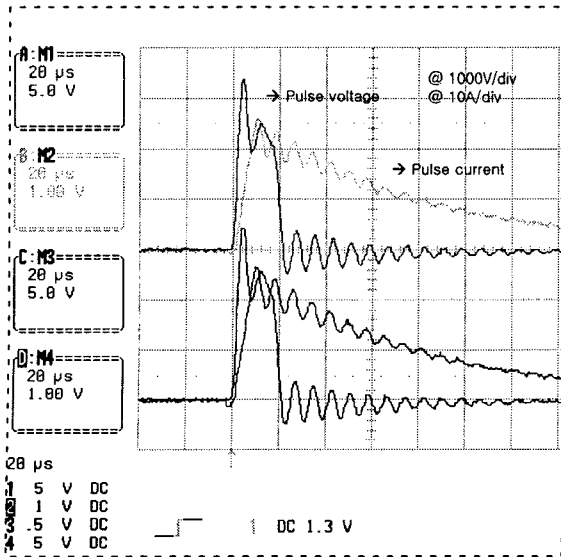


그림 3 정극성, 부극성의 펄스전압 및 전류파형 비교
Fig. 3 Pulse voltage and current waveforms of positive, negative

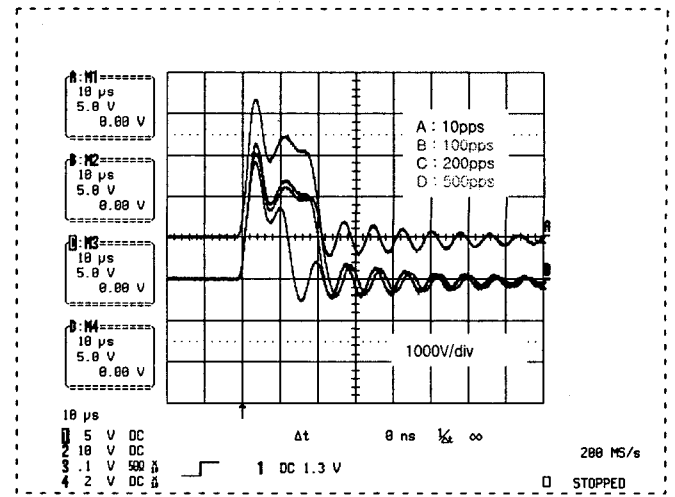


그림 4 전극길이에 따른 펄스코로나 임계전압 파형
Fig. 4 Pulse corona firing voltage waveforms on increasing electrode length

3.2 펄스코로나 발생시 펄스 에너지 및 부하 임피던스 변화 특성

그림 5는 각각 펄스코로나 전압/전류파형, 펄스 에너지 및 부하 임피던스의 방전시간 동안의 변화 특성을 나타내는 그림이다.

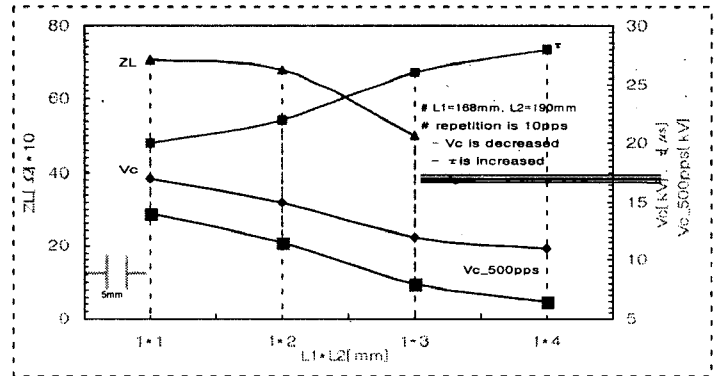
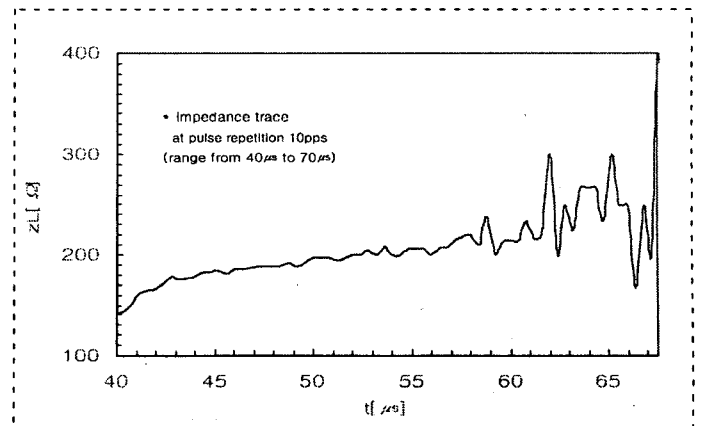


그림 5 전극길이에 따른 각 변수의 특성 변화
Fig. 5 Characteristics of each parameters on increasing length

그림 6은 펄스전압 및 전류파형이며, 그림 6(a)에는 방전이 일어나는 동안의 임피던스 변화를 나타내었다. 그리고, 그림 6(b)는 그 때의 펄스에너지 변화 곡선을 그림으로 나타내었다. 그림 6(a), 6(b)에서와 같이 펄스코로나 방전 동안에는 거의 안정하고 낮은 부하 임피던스를 가지지만, 펄스 에너지가 부하에 대부분 전송된 방전 후기에서는 급격한 임피던스의 변화를 나타내면서 부하 임피던스 값이 증가한다. 따라서, 방전을 시작한 후 펄스전압 및 전류가 첨두치에 도달할 경우 부하 임피던스는 최저치가 되고 그 후에는 부하 임피던스의 급격한 변화를 가지며 증가하는 특성을 지닌다.



(a) 방전시간동안의 임피던스 변화곡선

본 연구에서는 펄스코로나 방전을 이용하여 일정한 전극간격을 기준으로 전극길이 및 펄스 반복율에 따른 유전체의 라디칼 형성과 직접적 관련이 있는 펄스전압과 전류를 측정하고 그에 따른 펄스코로나 임계전압 및 펄스에너지, 부하 임피던스의 변화 특성을 과도현상 해석 프로그램인 EMTP를 이용한 모의결과와 비교 검토한 결과 다음과 같다.

(1) 전극길이에 따른 V_c 및 $V_{c,500pps}$ 는 선형적 감소하는 특성을 지니므로 그에 따른 관계식을 유도하였으며, 이를 이용하면 부하 임피던스의 변화를 추이할 수 있다.

(2) 부하임피던스는 펄스코로나 방전 동안에는 거의 안정하고 낮은 값을 가지지만, 펄스 에너지가 부하에 대부분 전송된 방전 후기에서는 급격한 임피던스의 변화를 나타내면서 급격히 부하 임피던스 값이 증가하는 특성을 지닌다.

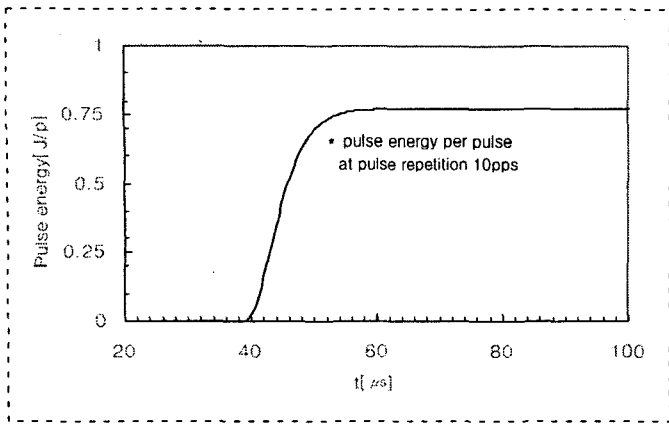
(3) 펄스 반복율을 500pps로 증가시킨 경우 $V_{c,500pps}$ 는 10pps와 비교해서 최대 4kV 감소하며 전극길이 증가에 비해서 거의 34%정도 감소한 값으로, 펄스 반복율 및 전극길이에 따라서 펄스코로나 임계전압은 최대 10kV정도로 감소되는 현저한 차이가 발생하였다.

(4) 양전극 및 음전극을 동시에 증가시킨 경우는 부전극만을 증가시킨 경우에 비해서 코로나 임계전압은 최대 1kV미만의 차이가 발생하였다. 일정한 전극간격에서 전극길이 및 펄스반복율을 제어하여 펄스코로나 임계전압 및 부하임피던스를 가변시킬 수 있는 기술을 확보하였다.

(5) EMTP로 모의 실험한 결과 부하 인덕턴스의 영향은 펄스코로나 임계전압에 직접적 영향을 주었으며, 특히 실제 방전파형과 비교한 결과 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

(참고 문헌)

[1] J. S. Chang and S. Masuda, "Mechanism of pulse corona induced plasma chemical process for the removal of NOx, SOx from combustion gases", presented at the IEEE Ind. Applicat.Soc. Annu. Conf., 1988.
 [2] Akira Homma, "High-voltage subnanosecond pulse transformer composed of parallel-strip transmission lines", presented at the Review of Scientific INS, vol. 70, pp. 232-236, 1998.
 [3] J.H. Joung, "A Study on the Pulse Voltage and Cascading Ratio of Compact Pulse Generator using Cascading Method", presented at the KIEE, vol. 50C, pp. 329-333, 2001.
 [4] S. Masuda and S. Hosokawa, "Pulse energization system of electrostatic precipitator for retrofitting application", presented at EPA-EPRI 5th Symp. on Transfer and Utilization of Particulate Contr. Technol., Aug. 1984.
 [5] H. J. Hall, "History of pulse energization in electrostatic precipitation", J. electrostatics, vol. 25, pp. 1-22, 1992.



(b) 펄스코로나 방전동안의 펄스에너지

그림 6 펄스코로나 방전동안의 임피던스 및 펄스에너지 변화 특성
 Fig. 6 Characteristics of impedance and pulse energy during pulse corona discharging

전극길이에 따른 V_c 및 $V_{c(500pps)}$ 는 선형적으로 감소하므로 1차 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$V_c = -0.1L + 19[\text{kV}] \quad (2)$$

$$V_{c(500pps)} = V_c - 3[\text{kV}] \quad (3)$$

단, V_c (kV), $V_{c(500pps)}$ (kV)는 각각 코로나 임계전압 및 반복율 500pps인 경우의 코로나 임계전압이며, L(cm)은 전극길이를 의미한다. $V_{c(500pps)}$ 은 그림 5에서와 같이 V_c 와 거의 같은 기울기로 감소하며 전극길이 더욱 증가될 경우 0.5kV의 오차값을 고려해 주어야 한다.

3.3 EMTP 결과 해석

과도해석 프로그램인 EMTP로 모의실험한 것을 본 연구의 결과와 비교, 검토하였다. 그림 7은 부하인덕턴스 증가에 대한 모의결과파형으로써 부하 인덕턴스가 감소할수록 방전 개시전압이 감소하며, 또한 진동이 감소되면서 안정된 형상을 나타낸다. 이는 본 연구결과와 동일한 것으로서 전극길이 증가시 부하 인덕턴스가 감소되어 결과적으로 코로나 임계전압 및 부하임피던스가 감소하게 되는것이다. 방전에 있어서 전극자체의 표류 인덕턴스 및 커패시턴스 성분으로 인하여 완벽한 임피던스 정합은 불가능하지만, 본 연구결과와 같이 전극길이 및 펄스반복율을 이용한 코로나 임계전압 및 부하 임피던스의 가변이 용이하다.

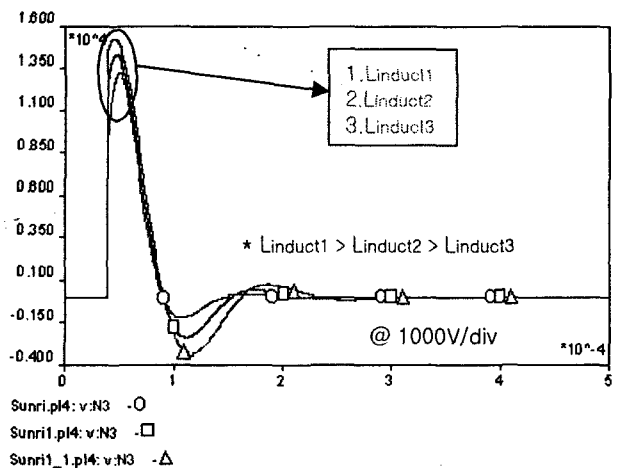


그림 7 부하인덕턴스에 따른 모의결과 파형
 Fig. 7 Simulation of pulse voltage on variable load inductance