

대전력용 트리가트론의 시동 특성에 관한 유한요소해석

이형구*, 지원영, 주흥진, 최승길, 고광철
한양대학교 전기공학과

A Finite Element Analysis on the Triggering Characteristics of a High power Trigatron

Hyeong-Goo Lee*, Won-Young Jee, Heung-Jin Ju, Seung-Kil Choi, Kwang-Cheol Ko,
Electrical Engineering, Hanyang Univ.

Abstract - 유한요소법을 이용하여 대전력용 트리가트론의 전극 전압의 극성 변화와 전극 구조의 변화에 따른 전계 분포를 해석하였다. 시동 특성을 좋게 하기 위해서는 트리거 전극과 접지 전극 사이의 적절한 거리를 찾아야 한다. 유한요소법을 이용한 전계 분포를 가지고 이 거리를 정할 수 있다. 본 논문은 트리거 갭과 주 갭(트리거 전극과 반대 주전극 사이)에서 동시에 절연 파괴가 일어날 때 트리가트론이 최적으로 동작한다는 연구 결과를 바탕으로 한다. 본 논문은 실험을 위한 예비 단계로서, 시뮬레이션을 통하여 최적의 전극 구조를 찾는 데 드는 비용과 시간을 줄일 수 있다.

조는 그림 1과 같다.

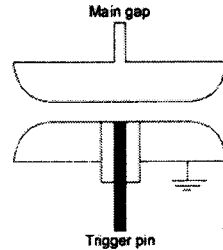


그림 1. 트리가트론 구조

1. 서 론

대전력 스위치 개발의 기본이 되는 주요 인자는, 출력 펄스를 형성하고 시간을 조절하면서, 펄스 발생기에서 부하로의 에너지 전달의 효율이다. 효율의 효과는 예를 들면, 스위치 자체에서의 손실로부터 나타난다. 부하에 전달되는 에너지는 보통 주어진 상승 시간(rise time)과 지속 시간(duration)의 펄스로서 전달되어야 한다. 또한 펄스의 전달 시간도 정확히 조절되어야 한다. 스위치가 대전력 시스템에 영향을 주어서 중요한 역할을 하기 때문에, 각 시스템에서 스위치의 최적의 조건을 찾는 것이 중요하다.

일반적으로 기체, 액체 및 고체에 의해 절연되는 전력 기기의 전계 현상은 전극의 형상, 전극간의 거리, 인가 전압의 파형 및 크기에 영향을 받으며, 인가 전압에 의해 전극간에 분포하는 전계의 세기가 절연 재료가 갖는 임계값 이상이 되면 절연이 파괴되어 전력 계통의 고장을 일으키므로 전계 현상을 미리 파악하는 것이 필요하다. 유한요소법이 그 전계 현상을 해석하는데 사용되는 방법 중의 하나이다.

고압 기체 스위치는 고전압, 대전류 스위칭을 필요로 하는 펄스 파워 시스템에서 주로 사용된다. 본 논문에서는 많은 다른 종류의 스위치 중에서 트리가트론을 사용하였다.

트리가트론은 일반적으로 두 개의 마주보는 전극과 트리거 핀으로 구성된다. 이 전극을 각각 고전압 전극과 접지 전극이라 명한다. 트리거 핀은 보통 접지 전극의 중앙에 설치되며 접지 전극으로부터 기체나, 자기나 유리와 같은 절연물로 절연된다. 본 논문에서는 테프론으로 가정하였다. 트리거 핀은 접지 전극의 표면과 수평으로 설치된다. 트리거 핀을 사용하는 목적은 주전극 사이에 인가된 전계를 절연 파괴가 시작될 정도로 왜곡시키는 것이다. 전계의 왜곡은 트리거 갭에서 스파크를 일으켜 작은 방전을 형성함으로써 얻어진다. 이 방전은 자외선 방사와 충격파의 방출에 의해서 수반된다. 짧은 파장의 방사는 전계에서 전자 사태를 일으켜 절연 파괴 채널을 형성하는 전자들을 광전리에 의해 생성한다. 트리거 전극 주위의 작은 영역에서의 수반되는 전계 강화는 전자 사태와 결과적인 절연 파괴에 필요한 조건을 제공하는데 도움을 준다. 본 논문에서 사용한 트리가트론의 구

본 논문에서 사용된 트리가트론은 실험에서 사용될 펄스 충전 모드에서 작동한다고 가정하였다. 펄스 충전 스위치는 일반적으로 몇 가지 요인에 의해 전극 갭의 DC 절연 파괴 전압을 초과하는 전압에서 작동한다. 가능한 파괴전압의 정확한 정도는, 스위치 구조와 통계적(statistical) 및 형성(formative) 시간 지연과 인가 전압 펄스 상승 시간과 지속 시간을 포함하는 몇 가지 요인에 의존한다. 펄스 충전 모드에서 트리가트론을 작동하는 주요 이유는 높은 절연 파괴 전압, 짧은 지연 시간, 지연 시간에서의 작은 변동(jitter), 그리고 빠른 전압 붕괴 시간(즉, 큰 dV/dt) 때문이다.

2. 시뮬레이션

2.1 각 전극 전압의 극성 변화에 따른 전계 해석

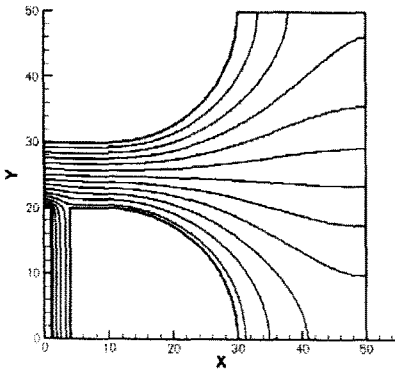
본 논문에서는, 축대칭 3차원 유한요소법을 사용하였다. 따라서 그림 1의 좌측 반만을 해석하였다. 유한요소법 정식화에 사용된 범함수는 다음과 같다:

$$x = \int_V \left(\int_0^E \epsilon E \cdot dE \right) r dr dz d\theta - \int_V \rho \phi r dr dz d\theta \quad (1)$$

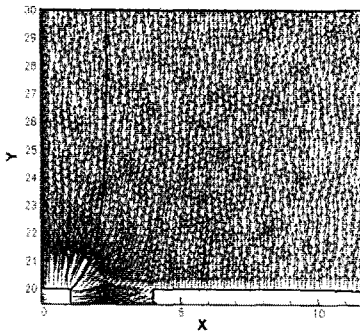
음(-)의 주 갭 전압과 양(+)의 트리거 갭 전압은 (-)-(+) 극성이라 표시하였고, 양의 주전극 전압과 음의 트리거 갭 전압은 (+)-(-) 극성이라 표시하였다. 이 두 극성이 혼합 극성 그룹이다. 또한 음의 주 갭 전압과 음의 트리거 갭 전압은 (-)-(-) 극성, 양의 주 갭 전압과 양의 트리거 갭 전압은 (+)-(+) 극성이라 표시하였다. 이 두 극성은 동일 극성 그룹이다.

주 갭은 10 mm의 갭 간격을 가지고, 트리거 갭은 3 mm의 갭 간격을 가진다. 트리거 전극에 인가된 전압은 10 kV(혹은 -10 kV)이고 반대 주전극에 인가된 전압은 30 kV(혹은 -30 kV)이다.

2.1.1 혼합 극성 그룹



(a)



(b)

그림 2. (-)-(+) 극성에서의 전위 분포(a)와 전계 분포(b).

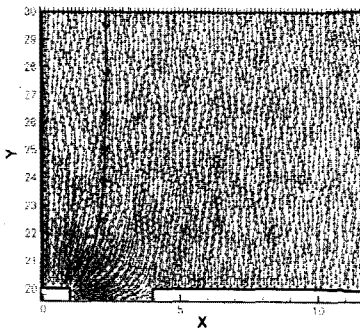


그림 3. (+)-(-) 극성에서의 전계 분포.

(+)-(-) 극성의 전위 분포는 (-)-(+) 극성의 전위 분포와 같다. 위 그림은 그림 2(a)의 좌측 중앙 부분을 확대해서 해석한 것이다. 전계 분포 그림에서 중앙의 진한 화살표로 이어진 곡선은 최대 전계의 스트림선(streamline)을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 전계는 트리거 전극의 주위에 집중되어 있고 다른 부분보다 전계의 세기도 크다.

(-)-(+) 극성에서, 절연 파괴는 트리거 핀 주위의 강한 전계에 의한 공간 전하 때문에 트리거 핀과 반대 주전극 사이에서 먼저 일어난다. 반면에 (+)-(-) 극성은 트리거 핀 근처의 전계 방출에 의해 접지 전극으로 먼저

절연 파괴가 일어난다. 두 극성 모두에서, 절연 파괴는 streamer에 의해 개시된다. (-)-(+) 극성에서는 positive streamer에 의해, (+)-(-) 극성에서는 negative streamer에 의해 개시된다. positive streamer가 negative streamer보다 20배 정도까지 빠르기 때문에, 전자가 후자보다 절연 파괴가 빨리 일어난다. 따라서 (-)-(+) 극성의 시동 특성이 더 좋다는 것을 알 수 있다.

2.1.2 동일 극성 그룹

동일 극성 그룹의 경우에는 축방향 평균 전계의 크기가 트리거 전압이 가해지면 줄어들어서 절연 파괴가 일어나기 어렵게 된다. 시뮬레이션에 의한 평균 전계 크기 감소를 표 1에 나타내었다.

표 1. 전극 극성에 따른 평균 전계 크기, E_{av} .

트리거 핀 반대 주전극	트리거 전압 비인가	트리거 전압 인가	
		(+)	(-)
(+)	2467.81	2421.43	2769.67
(-)	2467.81	2769.67	2421.43

단위 [V/mm]

2.2 인가 전압과 갭 간격에 따른 스위치 최적화

주 갭 간격이 길지 않고 트리거 전압이 인가되지 않았을 경우, 주 갭에서의 전계는 평등 전계 또는 준평등 전계라고 가정할 수 있다. 대기압에서 평등 전계의 공극의 절연 파괴 전압에 관한 실험식이 다음과 같다:

$$V_s = 2440d + 61\sqrt{d} \quad [\text{kV}] \quad (2)$$

여기서 d 는 미터 단위의 갭 길이이다. 따라서 트리거 전압이 인가되지 않았을 때, 주 갭 전압은 V_s 이하이어야 한다.

일단 트리거 갭 간격과 주 갭 간격이 결정된다면, 최적의 동작을 위한 트리거 전압은 다음 식을 통해서 계산될 수 있다.

$$\frac{V_t}{V_g} = -\frac{d_t}{(d_g - d_t)} \quad (\text{혼합 극성 그룹에 대해}) \quad (3)$$

$$\frac{V_t}{V_g} = \frac{d_t}{(d_g + d_t)} \quad (\text{동일 극성 그룹에 대해}) \quad (4)$$

그러나 위의 식들만으로 전압을 정하는 것은 실제에 맞지 않는 결과를 낳을 수도 있기 때문에, 시뮬레이션에 의한 확인이 필요하다. 또한 전압이 주어질 경우에도 위 식들과 시뮬레이션에 의해 적절한 거리를 결정할 수 있다.

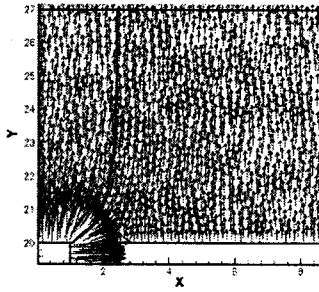
그림 5는 트리거 갭 간격의 변화에 따른 전계 분포를 나타낸다. 주 갭 간격은 7 mm이고, 주 갭 전압은 -22 kV, 트리거 전압은 10 kV로 하였다.

그림에서 알 수 있듯이, 그림 5(a)는 트리거 갭에서 먼저 절연 파괴가 발생하고, 그림 5(c)는 반대 주전극과 트리거 전극 사이에서 먼저 절연 파괴가 발생한다는 것을 나타낸다. 따라서 최적의 거리는 그림 5(b)를 나타내는 2 mm이라고 할 수 있다. 이는 위 식 (3)에 의한 계산 결과(2.1875 mm)와도 근접한다.

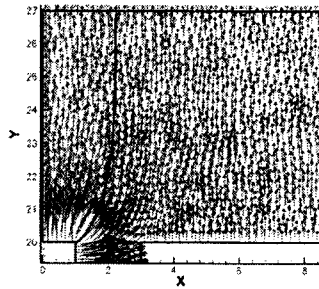
고압에서 절연 파괴 특성의 일반화된 실험식은 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\rho t = 97800(|E|/\rho)^{-3.44} \quad (5)$$

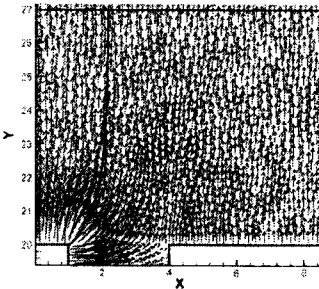
여기서 ρ 는 기체 밀도(g/cm^3)이고, t 는 시간(초), $|E|$ 는 전기 절대값(kV/cm)이다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 갭 간격이 1 mm(a), 2 mm(b), 3 mm(c)일 때의 전기 분포.

트리가트론은, 특히 트리거 갭에서 절연 파괴가 일어나도록 설계될 때, 접지 전극에 작은 간극을 가지도록 설계된다. 그 작은 트리거 갭은 매우 낮은 전압에서 식 (3)과 (4)를 만족한다는 것을 의미한다. 한편 식 (5)에 의해서 정해지는 절연 파괴 시간은 전기 강도의 함수이다. 빠른 절연 파괴 시간을 위해서는, 식 (3) 또는 (4)를 만족하면서 더 높은 트리거 전압을 가할 수 있도록 트리거 갭 간격이 증가되어야 한다.

3. 결 론

유한요소법을 사용한 시뮬레이션을 통하여, 평균 전기 강도의 변화와 전기 분포를 주 갭 전압과 트리거 갭 전압의 변화에 따라서 확인하였다. (-)-(+) 극성은 평균

전계의 크기를 증가시키고 negative streamer보다 빨리 전파하는 positive streamer를 형성함으로써 시동 특성이 다른 극성에 비해 좋다.

또한 적당한 갭 간격을 식과 시뮬레이션을 통해서도 정할 수 있다.

빠른 절연 파괴 시간을 위해서, 트리거 갭을 증가시켜야 한다는 것이 제안된다.

더 정확한 결과를 위해서는, 과도 해석과 압력, 온도, 전극 재질, 기체 종류, 등과 같은 다른 요인을 고려할 필요가 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Scott J. MacGregor et al., "The Influence of Polarity on Trigratron Switching Performance", *IEEE Trans. Plasma Science*, Vol. 25, No. 2, pp.118-123, April 1997.
- [2] I. H. Mitchell, et al., "Optimization of a high-voltage trigratron switch", *J. Appl. Phys.*, Vol. 78 No. 6, pp.3659-3663, 1995.
- [3] Ihor Vitkovitsky, "High Power Switching", *Van Nostrand Reinhold Company*, 1987.
- [4] Gerhard Schaefer, M. Kristiansen and A. Guenther, "Gas Discharge Closing Switches", *Plenum Press*, 1990.
- [5] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1992.
- [6] M. Khalifa, "High-Voltage Engineering Theory and Practice", *Marcel Dekker Inc.*, 1990.
- [7] 전춘생, "방전·고전압 공학", 동명사, 1991.