

3차원 유한요소법을 이용한 대전력 트리가트론의 특성 해석

지원 영, 박정호, 주홍진, 최승길*, 고광철**, 강형부**
 한양대학교 전기공학과, 안산공대 전기과*, 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부**

A 3-D Finite Element Analysis on the Characteristics of High Power Trigatron

Won-Young Jee, Jeong-Ho Park, Heung-Jin Ju, Seung-Gil Choi*, kwang-Cheol Ko**, Hyeong-Bu Kang**
 Dept. of E. E. Hanyang Univ., Dept. of E. E. Ansan College of Tech.*, Division of E.&C. E. Hanyang Univ.**

Abstract - This study is characteristic analysis to optimize triggering of a high-power trigatron by FEM which is used to analyse electric field distribution in the trigatron. Triggering characteristics of a trigatron depends on arrangement of voltage polarity applied on electrodes and configuration of electrodes. This study is the preliminary stage for an experiment and make it possible to experiment effectively by finding optimal triggering characteristics though 3-dimensional node-based FEM which can practically model the complex structured electrode system.

수평으로 설치된다. 본 논문에서 사용한 Trigatron은 실험에서 사용될 펄스 충전 모드에서 작동한다고 가정하였으며, 구조는 그림 1과 같다. 트리거 핀과 접지전극 사이의 절연물은 테프론으로 가정하였다. 그림 2에서 (a), (b)는 각각 시뮬레이션 해석을 위한 축대칭 3차원 및 3차원 요소분할도이다. 그림 2. (a)의 좌측 사각형 영역은 주된 관심영역으로 전계 분포는 이 영역을 확대하여 나타내었다.

1. 서론

펄스 파워 시스템에서는 고전압, 대전류 스위칭을 필요로 하는 고압 기체 스위치가 사용되며, 이런 스위치는 절연 물질로서 압축된 기체를 사용하고, 여러가지 형태, 예를 들어 레이저, 자외선, 공기작용, 전기등에 의해 트리거되면서 작동한다. 전기적으로 트리거 되는 스위치에는 Mid-plan형 구조와 Trigatron형 두 가지 종류가 있다. [1] 본 논문은 배기 가스를 처리하는 실험에서 양방향 펄스 전원을 인가할 때 사용되는 Trigatron에 의한 펄스 파형이 이상적인 것에 가깝도록 효율이 가장 좋은 최적의 구조를 찾는 것이다.

대전력 스위치 개발의 기본이 되는 주요 인자는, 출력 펄스를 형성하고, 시간을 조절하면서, 펄스 발생기에서 부하로의 에너지 전달의 효율이다. 부하에 전달되는 에너지는 보통 주어진 상승시간과 지속 시간의 펄스로서 전달되어야 한다. 또한 펄스의 전달 시간도 정확히 조절되어야 한다. 스위치가 대전력 시스템에 영향을 주어 중요한 역할을 하기 때문에, 각 시스템에서 스위치의 최적의 조건을 찾는 것이 중요하다. 일반적으로 기체, 액체 및 고체에 의해 절연되는 전력기기의 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.

이에, 본 연구는 유한요소법을 이용하여 전위 및 전계 분포를 해석하고, 시동특성에 맞는 최적의 구조를 찾아 효과적으로 실험을 할 수 있도록 하는데 목적이 있다.

2. 본론

2.1 해석 모델

Trigatron은 일반적으로 두 개의 마주보는 전극과 트리거 핀으로 구성된다. 이 전극을 각각 주전극과 접지전극이라 명한다. 트리거 핀은 보통 접지전극의 중앙에 설치되며 접지전극으로부터 기체, 자기 또는 유리 등과 같은 절연물로 절연된다. 트리거 핀은 접지전극의 표면과

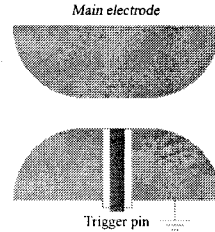


그림 1 기본적인 Trigatron 구조
 Fig. 1 Basic configuration of trigatron

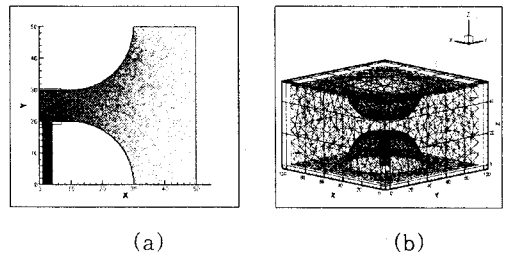


그림 2 요소분할도
 Fig. 2 Finite element mesh

2.2 지배방정식 및 유한요소 정식화

본 논문에서는 축대칭 3차원 및 3차원 절점 유한요소법을 사용하였다. [2] 각각의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \epsilon \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = -\rho \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = -\rho \quad (2)$$

Galerkin법을 이용하여 유한요소 정식화를 하였다.

식 (3)과 (4)는 각각 축대칭 3차원장에서의 r방향과 z 방향의 전계의 세기이며, 식 (5), (6) 및 (7)은 3차원장에

의 x, y 및 z방향의 전계의 세기이다.

$$E_r^{(+)} = -\frac{\partial\phi^{(+)}}{\partial r} = -\frac{1}{2A^{(+)}}(c_{ie}\phi_{ie} + c_{je}\phi_{je} + c_{ke}\phi_{ke}) \quad (3)$$

$$E_z^{(+)} = -\frac{\partial\phi^{(+)}}{\partial z} = -\frac{1}{2A^{(+)}}(d_{ie}\phi_{ie} + d_{je}\phi_{je} + d_{ke}\phi_{ke}) \quad (4)$$

$$E_x^{(+)} = -\frac{\partial\phi^{(+)}}{\partial x} = -\frac{1}{6V^{(+)}}(b_{ie}\phi_{ie} + b_{je}\phi_{je} + b_{ke}\phi_{ke} + b_{ie}\phi_{ie}) \quad (5)$$

$$E_y^{(+)} = -\frac{\partial\phi^{(+)}}{\partial y} = -\frac{1}{6V^{(+)}}(c_{ie}\phi_{ie} + c_{je}\phi_{je} + c_{ke}\phi_{ke} + c_{ie}\phi_{ie}) \quad (6)$$

$$E_z^{(+)} = -\frac{\partial\phi^{(+)}}{\partial z} = -\frac{1}{6V^{(+)}}(d_{ie}\phi_{ie} + d_{je}\phi_{je} + d_{ke}\phi_{ke} + d_{ie}\phi_{ie}) \quad (7)$$

3. 수치해석 결과

본 연구는 주 갭과 트리거 갭에서 동시에 절연 파괴가 일어날 때 Trigratron이 최적으로 동작한다는 연구 결과를 바탕으로 대전력용 Trigratron의 전극 전압의 극성 배치와 전극 구조의 변화에 따른 전계 분포를 해석하였다. [3]

3.1 각 전극 전압의 극성 조합에 따른 전계 해석

주 갭의 거리는 10mm, 트리거 갭의 거리는 3mm이며, 주 전극에 인가된 전압은 $\pm 25kV$, 트리거 전극에 인가된 전압은 $\pm 10kV$ 이다. 괄호안의 +, -는 인가 전압의 극성으로 주 전극, 트리거 전극 순이다. 그림의 진한 회색표로 이어진 곡선은 최대 전계의 스트림선을 나타낸다.

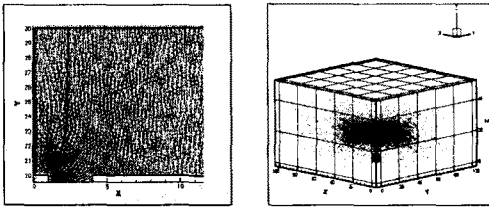


그림 3 (+)-(-) 극성 배치에서의 전계분포
Fig. 3 Field distribution on (+)-(-) arrangement

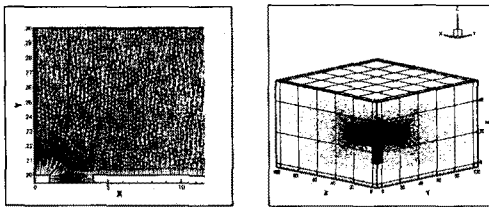


그림 4 (-)-(+ 극성 배치에서의 전계분포
Fig. 4 Field distribution on (-)-(+ arrangement

그림에서 보는 바와 같이, (-)-(+ 극성에서 절연 파괴는 트리거 전극 주위의 강한 전계에 의한 공간 전하에 의해 트리거 핀과 주 전극 사이에서 먼저 일어난다. 반면에 (+)-(-) 극성은 트리거 전극 근처의 전계 방출에 의해 접지 전극으로 먼저 절연 파괴가 일어난다. (-)-(+ 극성에서는 positive streamer에 의해, (+)-(-) 극성에서는 negative streamer에 의해 절연 파괴가 개시된다. positive streamer가 negative streamer보다 20배

빠르므로 [4], (+)-(-)극성에서 보다 (-)-(+극성에서 절연파괴가 빨리 개시되며, 시동특성이 더 좋다는 것을 알 수 있다.

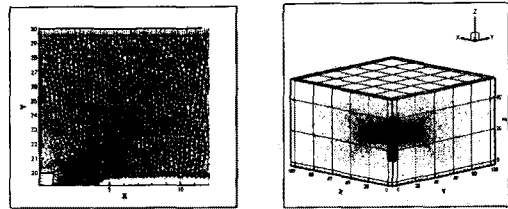


그림 5 (+)-(+ 극성 배치에서의 전계분포
Fig. 6 Field distribution on (+)-(+ arrangement

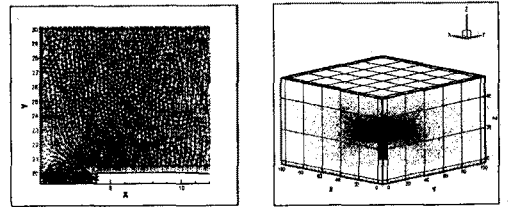


그림 6 (-)-(- 극성 배치에서의 전계분포
Fig. 6 Field distribution on (-)-(- arrangement

동일 극성의 배치에서는 축방향 평균 전계의 크기가 트리거 전압이 가해지면서 줄어들어 절연 파괴가 어렵게 된다. 각각의 극성 배치에 따른 평균전계값의 크기를 표 1에 나타내었다.

표 1 평균전계의 크기 비교

		단위 [V/mm]		
		트리거 전압 비인가	트리거 전압 인가	
			(+) 극성	(-) 극성
반대 주전극 극성	(+) 극성	2467.81	2421.43	2769.67
	(-) 극성	2467.81	2769.67	2421.43

(a) 축대칭 3차원에서의 전극 전압의 극성에 따른 평균 전계의 크기
(a) E_{av} according to the electrodes polarity in axis symmetric 3-D

		단위 [V/mm]		
		트리거 전압 비인가	트리거 전압 인가	
			(+) 극성	(-) 극성
반대 주전극 극성	(+) 극성	2502.97	2462.25	2545.33
	(-) 극성	2502.97	2545.33	2462.25

(b) 3차원에서의 전극 전압의 극성에 따른 평균 전계의 크기
(b) E_{av} according to the electrodes polarity in 3-D

표 1의 (a)와 (b)를 보면 축대칭 3차원 해석의 결과값과 3차원 해석의 결과값이 약간의 차이를 가짐을 알 수 있다. 이는 3차원 해석의 경우에는 비대칭 전극 형상을 정확하게 모델링하여 해석함으로써 전극의 요철 부분이 전계에 미치는 영향이 고려된 반면, 축대칭 3차원 해석을 경우 원주 방향의 전위 변화가 고려되지 않아 해석 오차를 수반하였기 때문으로 생각된다.

3.2 인가 전압과 갭 간격에 따른 스위치 최적화

일단 주 갭과 트리거 갭 거리가 결정되면, 최적의 시동 특성을 위한 트리거 전압은 다음 식을 통하여 계산될 수 있다. 각각은 동일 극성 배치와 혼합 극성 배치에서의 식이다.[3]

$$\frac{V_t}{V_g} = \frac{d_t}{(d_g + d_t)} \quad (8)$$

$$\frac{V_t}{V_g} = - \frac{d_t}{(d_g - d_t)} \quad (9)$$

그러나, 위의 식들만으로 전압을 정하는 것은 실제에 맞지 않는 결과를 낳을 수도 있다. 따라서 시뮬레이션에 의한 확인이 필요하며, 전압이 주어질 경우에도 위의 식들과 시뮬레이션에 의해 적절한 거리를 결정할 수 있다.

그림(7)은 트리거 갭 거리의 변화에 따른 전계 분포를 나타낸다. 주 갭 거리는 7mm, 주 전극 전압은 -22kV이며, 트리거 전극 전압은 10kV이다.

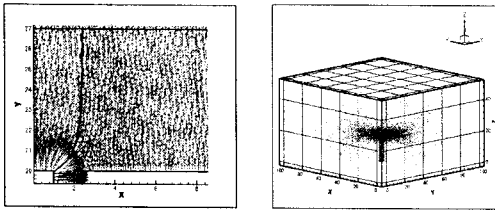


그림 7 트리거 갭 길이 1mm일 경우의 전계 분포
Fig. 7 The field distribution in 1mm trigger gap

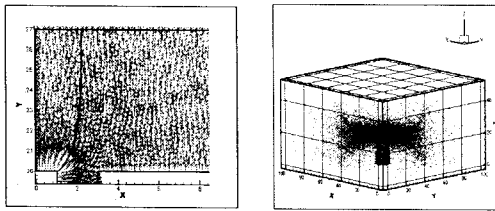


그림 8 트리거 갭 길이 2mm일 경우의 전계 분포
Fig. 8 The field distribution in 2mm trigger gap

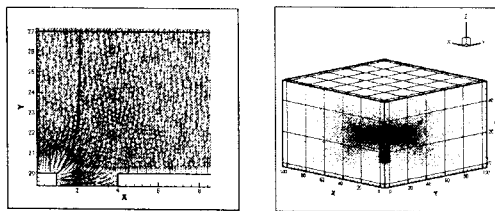


그림 9 트리거 갭 길이 3mm일 경우의 전계 분포
Fig. 9 The field distribution in 3mm trigger gap

그림에서 알 수 있듯이, 최적의 동작을 나타내는 거리는 그림 8의 2mm에서라고 할 수 있으며, 그림 10에서와 같이 트리거 갭 길이가 2mm일 때 최대 평균 전계가 나타남을 확인하였다. 이는 식(9)에 의해 계산된 결과인 2.1875mm와도 근접하다. Trigatron은, 특히 트리거 갭서 절연 파괴가 일어나도록 설계될 때, 접지 전극에 작은 간극을 가지도록 설계된다. 이 작은 트리거 갭은 매우 낮은 전압에서 식 (8)과 (9)를 만족한다는 것을 의미한다. 빠른 절연 파괴 시간을 위해서는 위의 두 식을 만족하면서 더 높은 트리거 전압을 인가 할 수 있도록 트

리거 갭 길이가 조절되어야 한다.

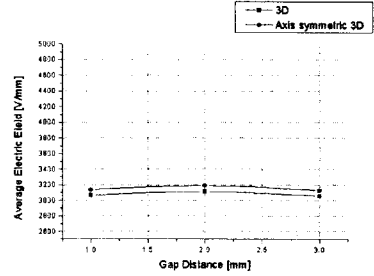


그림 10 트리거 갭 길이에 따른 평균 전계 변화
Fig. 10 Average electric field variation with gap distance

4. 결 론

본 연구에서는 스칼라 변수와 관련한 전자계 현상의 해석에 유용한 축대칭 3차원 및 3차원 절점 유한 요소법을 이용하여 대전력용 Trigatron의 시동 특성에 대한 전계 특성을 해석하였다. 여러 연구에서 해의 신뢰도가 확인된 축대칭 3차원 해석과 비교하므로써 3차원 해석의 정확성을 확인할 수 있었다. 본 연구결과 (-)(+)극성 배치에서 최적의 시동 특성이 나타남을 확인하였고, 최적의 갭 길이를 식과 비교하여 유추할 수 있었다. 더 정확한 결과를 위해서는 시간적 변화, 압력, 온도, 전극의 재료 및 기체의 종류와 같은 요인을 고려한 수치해석이 요구되며, 본 연구에서 수행한 결과는 전계 특성 해석을 통한 전력 기기의 설계 및 성능 향상에 유용한 자료가 될 것으로 생각된다. 절점 유한요소법을 통한 3차원 전계 해석 기법은 실제 3차원적으로 주어지는 전계 현상 연구에 대한 기초 자료로 활용 가능하며 전자 계산기의 성능향상과 더불어 유용성 및 필요성이 고조될 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Scott J. MacGregor et al., "The Influence of Polarity on Trigatron Switching Performance", IEEE Trans. Plasma Science., Vol. 25, No. 2, pp.118-123, April 1997.
- [2] 임달호, "전기계의 유한 요소법", 동명사, 1992.
- [3] I.H. Mitchell, et al., "Optimization of a high-trigatron switch", J. Appl. Phys., Vol. 78 N p.3659-3663, 1995
- [4] T.H. Martin, "Pulse charged gas breakdown", in 5th IEEE Pulsed Power Conf. Arlington, VA, p.74

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 연구비 지원에 의해 기초 전력공동연구소 주관으로 수행된 과제 결과의 일부임 (관리번호 : 00-중-01)