

전계 최적화에 의한 전극 및 절연체 형상설계

조연옥, 최병주, 김광수
한국전기연구소 고전압연구소

Design of Electrode and Insulator Contour Using Field Optimization

Yun-Ok Cho, Byoung-Joo Choi, Kwang-Soo Kim
Korea Electrotechnology Research Institute, High Voltage Lab.

This paper presents the algorithm of a new optimization method for axially symmetric electrode and insulator. The initial surface contour is divided into circular arc elements. The radii of the elements are determined so that the surface field distribution becomes uniform keeping the minimum gap distance and the direction of correction.

By means of two examples, one for an electrode and the other for a spacer, the convergence behaviour and several restrictions of optimization are discussed.

1. 서론

고전압기기의 사용전압은 높아지면서 그 규모는 작아지는 추세이므로 절연물의 우수한 절연내력이 요구되고 있다.

절연물의 절연내력은 크게 절연물내부의 절연내력과 절연물표면의 절연내력으로 나누어 생각할 수 있다. 그러나 현재 절연물은 주로 에폭시 수지를 진공주형하여 제작하기 때문에 내부절연내력보다는 표면의 절연내력이 문제가 되고, 이것이 고전압기기의 크기뿐 아니라 신뢰성에 크게 영향을 미친다. 절연물 표면의 절연내력은 절연물 표면의 전계강도에 크게 의존하기 때문에 절연물의 절연내력을 높이기 위해서 절연물 표면의 형상설계가 중요한 요인이 된다. 또한 SF6가스의 경우 절연내력의 최대전계 의존도가 대단히 크므로 주변도체부의 최대 전계를 가능한 줄여주는 도체형상이 설계되어져야 한다.

그러므로 기기의 경제성 및 신뢰성면에서 볼때 무엇보다 먼저 절연물과 인접도체부가 전계에 대해 최적형상을 갖도록 설계되어져야 하므로 전계최적화기법의 개발이 현실적인 시급한 문제로 등장한다.

전계최적화라 함은, 코로나 방전이 시작되는 최소전계강도 E_t 가 존재하며 이 값을 알고 있다는 전제하에서, 인가전압에 대한 시스템의 최대전계를 E_m 이라 했

을때, 이 두전계의 비 E_m/E_t 를 최소화 하는 것이다. 따라서 전계최적화는 전계해석, (식1)의 최적조건 검토, 형상수정의 3중류 과정을 최적형상이 결정될때까지 반복하는 것이라 볼 수 있다.

$$E_m/E_t = \gamma \text{ (constant)} \quad \text{----- (1)}$$

단 $\gamma < 1.0$

전계최적화에 대한 연구는 1970년대 중반 독일의 H.Singer와 D.Metz가 시작한 이래 지금까지 많은 연구가 진행되고 있지만 여러가지 제약조건으로 인하여 현재까지 범용성있는 알고리즘은 제시되지 않고 있다.

전계최적화기법은 최적화 기준변수에 의해 전계의 범선성분을 이용하는 전극형상최적화와 전계의 연면성분을 이용하는 절연물형상 최적화로 크게 나눌 수 있으며, 그외 적용모델 또는 수치전계해석법에 따라 여러가지 방법으로 파생된다.

본 연구에서는 여러가지 수치전계 해석법중 해의 정밀성이나 계산시간면에서 보다 우수한 전하중첩법을 이용하여 전극형상최적화 및 절연물형상최적화 알고리즘을 개발하였으며, 각각 동대평판 전극과 동축 원통용 스페이스에 적용하여 만족할만한 결과를 얻었다.

1. 전극형상 최적화

라플라스 장을 전하중첩법으로 해석할 때 시스템방정식은 (식2)와 같이 주어진다.

$$[P] \cdot [Q] = [V] \quad \text{----- (2)}$$

여기서, [P]는 전위계수행렬, [Q]는 전하량, [V]는 경계조건 이다. 일반적으로 전극전체를 최적화해야 하는 경우는 거의 없으므로 불필요한 계산을 피하기 위해 전극을 고정부와 최적화부로 나누면 (식2)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} [P_{ff}] & [P_{fo}] \\ [P_{of}] & [P_{oo}] \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} [Q_f] \\ [Q_o] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [V_f] \\ [V_o] \end{Bmatrix} \quad \text{----- (3)}$$

여기에서 첨자 f는 고정부, o는 최적화부를 의미한다. 고정부는 전극의 윤곽과 전하위치가 고정되며 극간거리에 따라 상대좌표만 바뀌는 부분이고, 최적화부는

전극의 윤곽이 수정되는 부분이다. 따라서 상대좌표 원점을 고정시켰을 경우 (식3)에서 변하지 않는 부분은 [Pff], [Vf], [Vo]이다. 최적화 과정은 형상이 수정됨에 따라 계속전하량이 새로이 결정되어야 하므로 이 수정전하량을 되도록 간단하게 구할 수 있어야 한다. 만약, 최적화부의 수정윤곽과 전하량이 어떤 방법으로 결정될 수 있다고 한다면 [Pfo]와 [Qo]가 결정될 수 있고, 고정부의 전하량은 (식3)으로 부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[Pff] \cdot [Qf] + [Pfo] \cdot [Qo] = [Vf]$$

$$[Qf] = [Pff]^{-1} \cdot \{[Vf] - [Pfo] \cdot [Qo]\} \quad (4)$$

여기에서, [Pff]⁻¹는 한번 결정되고 나면 상대원점이 바뀔때까지 불변이므로 고정부의 전하량 [Qf]는 간단한 행렬 연산만으로 구해진다.

다음은 미정으로 두었던 최적화부 윤곽수정과 전하량 결정에 대해 기술하겠다.

최적화부 윤곽은 전단계의 총 전하에 의해 결정되는 등전위면으로 근사시키고 이 등전위면을 이용하여 새로운 최적화 전하위치와 계산점을 결정한다. 이때 전하위치가 변경되었기 때문에 전단계의 최적화 전하량 [Qo]는 새로운 전하량 [Qo]'로 수정되어야 하는데, 이 수정 전하량 [Qo]'를 구하기 위해 전계 계수 행렬 [F]를 다음과 같이 정의한다. NT개의 전하에 의한 M개의 계산점에 대해 다음식이 성립한다.

$$[F] [Q] = [E] \quad (5)$$

여기에서, [F]는 M x NT의 전위계수행렬, [Q]는 NT x 1의 전하량행렬, [E]는 M x 1의 계산점전계행렬이다. 만약 M개의 계산점이 수정된 윤곽선상에 존재한다면 다음식으로 쓸 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} [Fof] & [Foo] \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} [Qf] \\ [Qo] \end{Bmatrix} = [Eo] \quad (6)$$

여기에서,

- [Fof] : (MxN), 고정부 전하에 의한 최적화부 전계계수 행렬
- [Foo] : (MxM), 최적화부 전하에 의한 최적화부 전계계수 행렬
- [Eo] : (Mx1), 최적화부 전계행렬

이다.

수정 전하량 [Qo]'에 의한 전계가 기준전계 [Eref]를 만족한다면 (식6)과 동일한 계산점에 대해 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\begin{Bmatrix} [Fof] & [Foo] \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} [Qf] \\ [Qo]' \end{Bmatrix} = [Eref] \quad (7)$$

또한 [Eo]와 [Qo]'는 각각 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$[Eo] = [Eref] + [dE] \quad (8)$$

$$[Qo]' = [Qo] + [dQo] \quad (9)$$

(식6) - (식9)로 부터 (식10)이 유도되며, 이 식에서 [Fof]와 [dE]가 결정되어 있으므로 [dQo]를 구할 수 있다.

$$[Fof] \{ [Qo] - [Qo]' \} = [Eo] - [Eref] - [Fof] \cdot [dQo]$$

$$= [dE] \quad (10)$$

따라서, 수정전하량 [Qo]'는 (식9)에 의해 구해지고, (식4)에 의해 고정부 수정 전하량 [Qf]'가 구해지면 전체 전하량이 결정되므로 새로운 전하에 의한 전계 계산이 가능해 진다.

그림 1은 상기 과정을 Flow-Chart로 나타낸 것으로, Eref는 초기형상의 평균전계 또는 코로니개시전계로 주어진다.

전계최적화는 최적화기준변수인 전계의 정밀성과 윤곽의 곡률에 크게 좌우되므로, 가상전하량을 정확하게 구할 수 있어야 할 뿐 아니라, 곡률이 연속성을 지녀야 한다. 이런 관점에서 볼 때, Singer의 방법은 곡률의 연속성은 보장해 줄 수 있지만 곡률을 결정하기 위해 전계의 법선방향 중론을 이용하므로 보다 높은 전계의 정밀도를 요하고 시간이 많이 걸린다는 결점이 있고, Metz의 방법은 1회 반복시간이 Singer보다 적고 비교적 수렴도 빠르지만 전계의 정밀성 및 곡률의 연속성이 보장되지 않아 윤곽이 진동할 가능성이 크다.

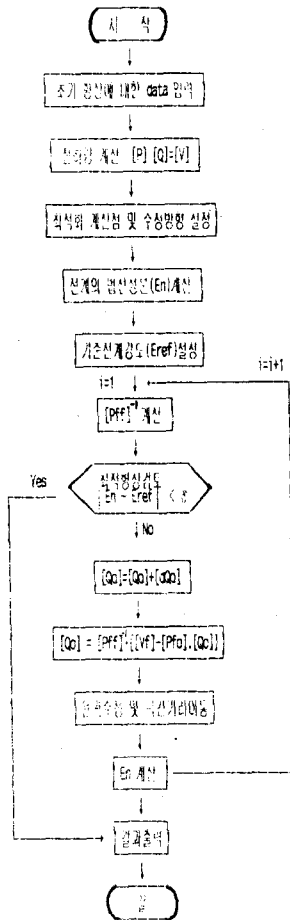


그림 1. 전극형상최적화 흐름도

본 연구에서는 기본적으로 Metz의 방법을 따르되, 온곽수정 과정을 2단계로 나누어, 먼저 초기에 결정된 법선방향으로, 전계의 편이 정도에 따라 온곽을 수정한 후, 곡률이 연속이 되도록 온곽을 구간근사시킴으로써 새로운 온곽이 진동하지 않도록 하였다.

(그림 2)와 (그림 3)은 동일한 초기조건, 최적화조건 하에서 계산된 것으로, (그림 2)는 Metz의 방법에 의한 14회 반복결과이며, (그림 3)은 2단계 온곽수정에 의한 6회 반복결과이다.

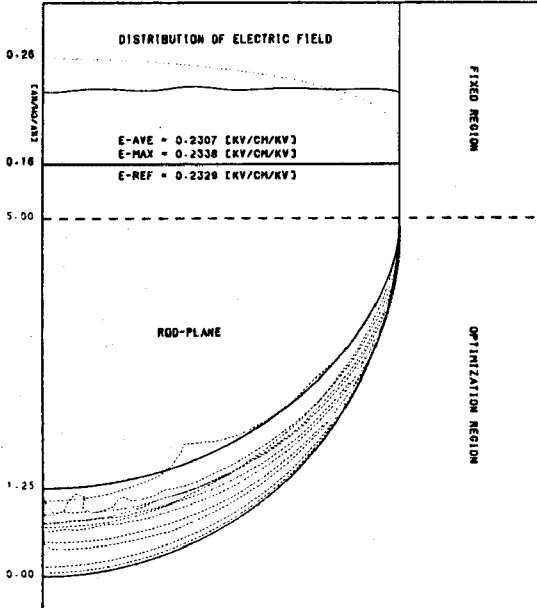


그림 2. Metz방법에 의한 전극최적화 결과

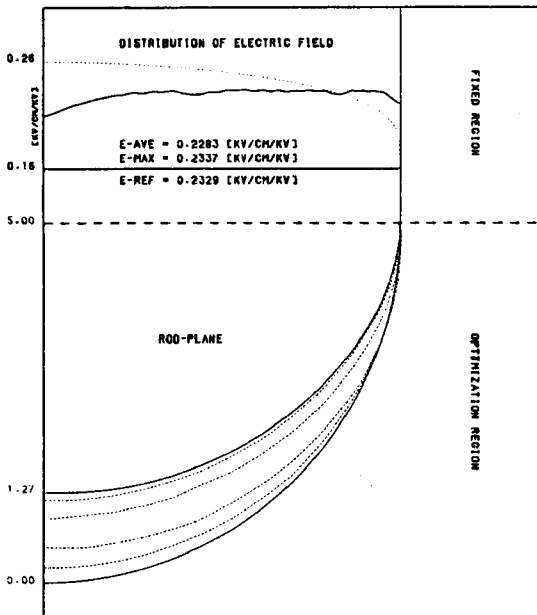


그림 3. 2단계 온곽수정에 의한 전극최적화 결과

3. 절연체 형상최적화

절연체 형상 최적화 과정은 기본적으로 전극 최적화와 동일하나 온곽수정 과정이 다르다. 절연체의 연면전계를 E_t , 기준전계를 E_{ref} 라 할때 Taylor급수의 1차 근사에 의해 전위 ϕ 와 연면거리로 부터 다음의 관계식이 성립한다.

$$E_t = -\frac{\partial\phi}{\partial l} \approx \frac{\phi_1 - \phi_2}{\delta l} \quad (11)$$

$$\phi_2 = \phi_1 + \delta\phi$$

전위가 ϕ_1 인 점을 P1, ϕ_2 인 점을 P2라 하고 P1을 고정점, P2를 수정점이라 두고, P2를 수정하는 과정을 기술하면 다음과 같다. (식 11)에서 E_t 가 E_{ref} 와 다를 때 $\delta\phi$ 를 수정하는 것과, δl 을 수정하는 두가지 경우를 생각해 볼 수 있지만, 사실상 거의 동일한 기법이므로 후자의 경우, 즉 $\delta\phi$ 를 고정시키고 δ 를 수정하는 경우에 대해서만 기술하겠다.

먼저 (식 11)로 부터 $E_t = E_{ref}$ 라 가정 했을때의 연면거리 $\delta l'$ 를 구한다. 이때 수정폭이 커지면 수정점이 진동할 우려가 있으므로 완화계수 α 를 이용한 (식 12)를 사용하는 것이 좋다.

$$\delta l' = \delta l \cdot \alpha \frac{E_t}{E_{ref}} \quad (12)$$

여기서, 완화계수 α 의 값은 0.1-0.01의 범위 내로 결정하는 것이 좋으며, 이 값은 여러가지 변수가 많이 작용되기 때문에 특정값으로 고정시키기 어렵다.

그 다음 $\phi = \phi_2$ 를 만족하는 등전위선 상에 $m(P1P2) = \delta l'$ 를 만족하는 새로운 수정점 P2를 결정해야 하는데, 이 P2를 정확하게 구하는 것은 많은 계산시간을 요하기 때문에 다음과 같이 근사적으로 결정한다.

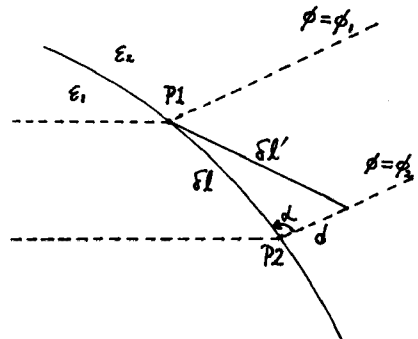


그림 4. 절연체 계면의 온곽수정

(그림 4)에서, P1, P2의 좌표와 P2에서의 전계방향을 이용하여 절연체 연면과 등전위선이 이루는 각 α 를 구하고, $\delta l, \delta l', \alpha$ 를 이용하여 등전위선 상의 이동거리 d 를 구하여 새로운 수정점 P2'를 결정한다.

(그림 5)는 등축원통용 스페이서를 Flat-Disc형으로 부터 출발하여 스페이서 연면의 전계가 균일하도록 최적화한 결과이다.

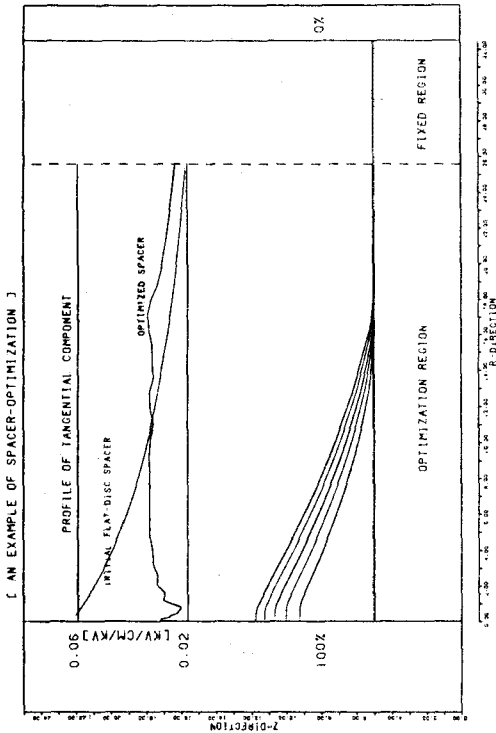


그림 5. 등전위면용 스페이스최적화 결과

4. 결론

전계최적화는 근본적으로 전계를 정밀하게 구할 수 있어야 하며, 곡률의 연속성이 보장되어야 한다. Metz의 방법은 알고리즘상 전계편이를 정확히 보상해 줄 가상전하량을 구할 수 없을 뿐 아니라, 곡률의 연속성이 보장되지 않으므로 최적화 윤곽이 (그림2)에서 나타난 것 처럼 진동하여, 반복횟수가 불필요하게 증가될 가능성이 높다. 곡률의 연속성을 주기 위해 윤곽수정을 직접 등전위선에 근사시키는 대신, 2단계로 나누어 근사시키면 (그림3)처럼 수렴과정이 안정될 뿐 아니라 수렴 속도도 빨라진다.

- 참고 문헌 -

- (1) M.Abdel-Salam et al: Optimizing Field Stress on High Voltage Insulators: IEEE Trans. EI-22, pp 47-56 (1987)
- (2) H.Singer,P.Grafoner : Optimization of Electrode and Insulator Contours : ISH Zurich, pp 111-116 (1975.9)
- (3) H.Singer:Computation of Optimized Electrode Geometries : ISH Milan, No.11-06 (1979.8)
- (4) D.Metz : Optimierung von Elektrodenformen über bildung und Verformung von Aquipotentialflächen mit Hilfe von Ersatzladungen:

- ETZ-A Bd.97, pp 121-123 (1976.2)
- (5) D.Metz : Optimization of High Voltage Fields :ISH Milan, No. 11-12 (1979.8)
- (6) H.Okubo et al : Borda's Profile and Electric Field Optimization by Using Charge Simulation Method: ISH Milan, No.11.16 (1979.8)
- (7) H.Gronewald : CAD of HV Insulators : ISH Athens No. 11.0 (1983.9)
- (8) K.Moller,F.Youssef : Verfahren zur Feldoptimierung auf der Basis optimaler Ersatzladungssysteme: ETZ-A Bd. 6 pp 143-147 (1984)
- (9) T.Misaki et al: Optimization of Three Dimensional Electrode Contour based on Surface charge Method and its Application to Insulation Design : IEEE Trans. PAS-102, pp 1687-1692 (1983)
- (10) P.Girdinio et al : Electrode and Dielectric Profile Option by FEM or FDM : ISH Athens No. 11.14 (1983)
- (11) K.J.Murtz,P.Weiss : The Practical Importance of the Effect of Embedding an Electrode in a Dielectric Medium : Proc.7th Int.Conf. Gas Discharge, pp 478-481 (1982)