6 高電圧絶縁系における電界・絶縁裕度分布の可視化

東海大・院 大島 浩嗣[○] 向井 栄治
東海大・工 大山龍一郎 金古喜代治

Visualizations of Electric Field Distribution and Tolerance for Insulation Strength of High Voltage Insulators

Hirotsugu OHSHIMA*, Eiji MUKAI*, Ryu-ichiro OHYAMA* & Kiyoji KANEKO*

This paper presents the visualizations of electric field distribution and tolerance for insulation strength of a high voltage insulator in order to build a support system for its insulation design. The system has four parts, pre-processing, electric field analysis, post-processing and data base of insulating materials. The solution method for electric field problems is based on the finite element method using personal computers. The part of post-processing enables us to easily understand the electric field distribution and the tolerance for insulation strength by means of the computer graphics. The visualization of the electric field distribution and the tolerance for insulation strength is useful as an aid in designing high voltage insulators.

1. まえがき

高電圧機器の絶縁設計においては、従来から有限要素法をはじめとする各種の数値電界計算法が利用され、絶縁部の電界解析が行われている。高電圧機器の絶縁設計に必要な情報としては、絶縁部における正確な電界分布と絶縁裕度分布の状態を把握することが要求される。すなわち、絶縁設計においては、電界強度の最高値が絶縁物の許容電界値以下になるように、電界分布ならびに絶縁裕度分布の解析結果を考慮しながら、高電圧導体部分の形状設計や絶縁材料の適切な選定を行うことが重要であるとする。

著者らは、高電圧機器の絶縁設計を行うための支援システムの構築を目的として、各種の絶縁材料についての絶縁特性に関するデータを収録し、絶縁部の電界分布および絶縁裕度分布をパーソナルコンピュータ (NEC PC-9801RA)を用いて有限要素法により数値解析するソフトウェアの開発を進めている。本システムは絶縁材料データベース部、解析領域における境界条件の定義およびメッシュの自動分割などを行うプリ処理部、有限要素法によって電界解析を行う解析部、電界分布および絶縁裕度の分布図を表示するポスト処理部により構成されている。そこで本報においては、このポスト処理部において電界分布および絶縁裕度の分布をコンピュータグラフィックスにより可視化したので、その結果の概要について報告する。

2. 本システムの概要

著者らが構築した絶縁設計支援システムの概略を Fig.1に示す。前述したように、本システムはデータベース部、プリ処理部、解析部、ポスト処理部などの4つの機構から構成されている。絶縁材料

* Faculty of Engineering, Tokai University, 1117, Kitakaname, Hiratsuka, 259-12 Japan

のデータベース部については、現在83種類の気体・液体・固体の絶縁材料に関する電気的な特性のデータを収録している。本システムにおける数値計算の過程では、まずプリ処理部において解析領域の形状とメッシュの自動作成を行うとともに、絶縁材料の設定と境界条件の入力が行われる。絶縁材料の設定については、データベース部から検索することにより適切な材料の選定を行うことができる。また解析部においては、プリ処理部で設定された条件に基づいて有限要素法により二次元場の数値電界解析が実行される。さらに、ポスト処理部では電界の数値計算結果を用いて電界分布の表示および絶縁裕度分布の表示を行っている。

一般に絶縁裕度は選定した絶縁体において、その許容電界値に対する電界の分担割合を示す指標である。任意の点 i における絶縁裕度 A_i は次式により求められる⁽¹⁾。

$$A_i = \{1 - (E_i / E_{ti})\} \times 100 [\%]$$

ここで、 E_i は点 i における電界の値であり、 E_{ti} は点 i における絶縁材料の許容電界の値を表している。また、本システムのプログラムは実行処理速度を向上させるために、パソコンのMS-DOS上でC言語(Turbo-C, Ver2.0)を用いて記述されており、プリ処理部とポスト処理部は対話形式になっている。

3. 電界分布および絶縁裕度分布の可視化

3.1 解析モデル Fig. 2(a), (b) は本報において取り上げた解析モデルを示す。同図(a) は空気中で平板電極の一方に針状の突起を有する平行平板の電極系であり、導体部分の形状的な影響によって局所的な高電界が発生する場合を想定した解析モデルである。また、同図(b) は高電圧の導体部を支えるために用いられている円錐台形状の固体絶縁支持物(スペーサ)を模擬している^{(2), (3)}。Table 1には、各モデルにおいて設定した境界条件を示している。要素の分割ならびに境界条件の入力データはプリ処理部において自動作成を行った。

有限要素法による電界計算の要素分割は、針状突起を有する平行平板電極モデルにおいて要素数が808であり、絶縁スペーサモデルの場合で要

Fig. 1: System outline.

(a) parallel plate electrodes with needle form projection on one side of them.

(b) insulation spacer.

Fig. 2 Analysis models.

Table 1 Explanation of analysis models.

Models	Applied Voltage	Boundary Conditions	Insulating materials
Fig. 2(a)	upper electrode : 300 kV lower electrode : 0 V	$\partial\phi/\partial n _{AB} = 0$ $\partial\phi/\partial n _{EF} = 0$	air
Fig. 2(b)	upper-electrode : 200 kV lower electrode : 0 V	$\partial\phi/\partial n _{BC} = 0$ $\partial\phi/\partial n _{DA} = 0$	D1 : air or SF ₆ gas D2 : epoxy

ϕ and n represent potential function and normal of boundary surfaces.

素数が368であった。

3.2 電界分布の可視化 Fig. 3(a), (b)は各モデルの電界分布をグラフィック画像に可視化した出力結果の例である。それぞれの電界分布図における電界強度の変化は、CRTによりカラーグレイドを用いて表示させている。すなわち、電界の最大値と最小値の間の電界変化を13色のカラーを使用して表示した。同図(a)に示したように、針状の突起を有している平行平板電極モデルでは、針の先端部で最大の電界が生じており、その値は下部平板電極の境界付近における電界の値に対して約1.5倍に達している。また、同図(b)に示した絶縁スペーサモデルの電界分布はスペーサ部分の絶縁材料としてエポキシ樹脂が用いられており、その周囲の媒質は空気である。本システムによる電界分布の可視化結果により、空気-エポキシ-上部平板電極の接合部(triple-junction)付近において、電界の集中が起きているという事実^{(3),(4)}が確認された。すなわち、電界分布を可視化することによって絶縁体部分の最大電界値とその場所を直観的に把握することが可能になった。しかしながら、その最大電界の位置において絶縁破壊が生ずるかどうかについては、本システムによる可視化結果から直ちに判断することができない。したがって、絶縁破壊について検討する場合には、後述するように選定した絶縁材料の許容電界値に対する絶縁裕度分布を求める必要がある。

3.3 絶縁裕度分布の可視化 Fig. 4(a), (b)は各解析モデルにおける絶縁裕度の分布を可視化した例である。この場合、絶縁裕度分布の変化については13色のカラーを用いてCRTに出力させている。同図(a)に示すように、針状の突起を有する平行平板電極の解析モデルでは、最大電界の値が発生した先端部において絶縁裕度が最小値(-23.2%)になっている。すなわち、絶縁裕度の分布図から絶縁性能について検討した場合、最大電界の

(a) parallel plate electrodes with needle form projection on one side of them.

(b) insulation spacer in air.

Fig. 3 Electric field distribution.

(a) parallel plate electrodes with needle form projection on one side of them.

位置で絶縁物の許容電界値よりも高い電界が発生しており、絶縁破壊現象を生ずる可能性がきわめて高いことが推察される。また、同図(b)は絶縁スペーサモデルに対する絶縁裕度の分布図を表示している。この絶縁裕度の分布をFig.3(b)に示した電界分布と比較すると、必ずしも最大電界が発生している部分で絶縁裕度が最小値をとるとは限らない。このことは絶縁破壊を生起する許容電界の値が比較的低い空気中において、その絶縁裕度が著しく低下することが原因であると考えられる。また、この場合の絶縁裕度の最小値は-37.2%であった。Fig.5は絶縁材料の選択を変更した場合の解析例であり、空気の代わりにSF₆ガスを用いたときの絶縁裕度分布を示す。絶縁材料を変更することによって、絶縁裕度の最小値が+54.3%に向上していることがわかる。これらの結果から、絶縁裕度分布の表示は複合絶縁構造に対する絶縁性能の改善を図る上で十分に役立つことが確かめられた。

4. むすび

本報告においては、平板電極の一方に針状の突起を有する平行平板電極および絶縁スペーサを解析例として、その電界分布ならびに絶縁裕度の分布をコンピュータグラフィックスにより可視化した。その結果、絶縁設計を行う上で重要な要素となる最大電界の値とその発生場所を視覚的に把握することができた。

また、絶縁材料を選定する過程では、絶縁裕度分布を可視化することが有効な手段であることがわかった。

最後に、本システムの構築に協力をされた本学大学院生菅野泰君(現、アイティ・エレクトロニクス)ならびに電気工学科の卒研究生であった関口公三(現、日本ビクター)、穴田修(現、日立電線)の両君に謝意を表す。

参考文献

- (1)大西・山下・中前:「境界要素法・有限要素法併用による高精度電界分布計算」電学論 B, 109, 439(平1-6)
- (2)金古・大山:「Fluid Mapperによる直線状複合誘電体界面における電界の可視化」流れの可視化, Vol. 7, No. 26(1987-7)
- (3) K. KANEKO, R. OHYAMA: "Visualization of Electric Fields by Fluid Flow Mappers" FLUCOME'88, Sheffield, 503(1988)
- (4) 宅間・河野・松葉・渡辺・河本:「直線状の誘電体界面(境界面)における電界について」電力中央研究所研究報告, No. 176002(1976)

(b) insulation spacer in air.

Fig.4 Tolerance for insulation strength.

Fig.5 Tolerance for insulation strength of insulation spacer in SF₆ gas.