《論文》

論 18-5

33

電界最適化シミュレーションおよび 電界最適化電極の絶縁破壊特性の実験的検証[†]

加藤克 巳*・早川 直樹*・大久保 仁*

ABSTRACT In this paper, we developed an electric field optimization technique to calculate an optimum electrode contour on which a uniform field distribution and a reduced maximum field strength can be obtained. In order to confirm to what extent the electric field optimization can improve the insulation performance under various kinds of conditions, experimental investigation was carried out; several measurements of breakdown voltage in air and SF₆ gas with the optimized electrode were made. Experimental results revealed the difference in insulation characteristics of the optimized electrode in air and SF₆ gas. We discussed these results from the viewpoint of the physical mechanisms of breakdown. Consequently, we pointed out that combining these experimental investigation with the electric field optimization would lead to a new and a useful technique for the practical optimum insulation design of power apparatus.

1. まえがき

ガス絶縁開閉装置(GIS)や変圧器などの高電圧電 力用機器の絶縁設計にとって, 電界解析技術は必要不 可欠なものとなっている.特に,GIS などにおいて絶 縁ガスとして広く用いられている SF₆ ガスは,その絶 縁特性がガス空間中の最大電界に強く依存している. そのため、GIS の設計においては、電界解析を用い て、機器内部のガス空間における電界分布を高精度に 求めることが必須であるといえる.このような背景の もと、筆者らはこれまで、パーソナルコンピュータ (パソコン)のもとで、CADと電界解析を結合したシ ステム "CADEF" (CAD with Electric Field analysis) を開発し,高精度自動電界解析を可能としてきた¹⁾. さらに、電界空間の有効利用といった観点から、パソ コンを用いて最低かつ一様な電界分布の求解を可能と する「電界最適化」自動計算技術の開発を行い、これ を "CADEF" システムへ導入してきた^{2,3)}. また, 我 々は現在、上述の電界最適化技術を発展させ、絶縁媒 質や印加電圧波形の種類,面積効果・体積効果など, 実機器の絶縁特性を決定する様々なファクタを総合的

Simulation of Electric Field Optimization and Experimental Investigation of Breakdown Characteristics with the Optimized Electrodes. By Katsumi Kato, Naoki Hayakawa and Hitoshi Okubo (Dept. of Electrical Engineering, Nagoya University). *名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻 †1998年8月31日受付 1998年10月28日再受付 に考慮することによって,最大の絶縁性能を有する機器形状の求解を可能とするための,「絶縁最適化」自動計算技術を開発しつつある^{4~6)}.

このような自動電界解析・電界最適化・絶縁最適化 といった計算技術の発展によって、より優れた絶縁性 能を有する電力用機器を机上で容易にシミュレートす ることが可能となりつつある.一方、より精密な最適 設計のためには、このように机上の計算で得られた電 極形状について、その絶縁性能を実験的に検証するこ とが必要である.

このような観点から筆者らは、第一段階として、電 界最適化シミュレーションを行い、本シミュレーショ ンにより得られた形状を有する電極(電界最適化電極) を実際に製作した.さらに、この最適電極の絶縁破壊 特性を調べることにより、電界最適化電極の絶縁破壊 特性を調べることにより、電界最適化電極の絶縁性能 に関する実験的検証を行っている.今回、空気及び SF₆ ガスを絶縁媒質として用い、交流および標準電イ ンパルス電圧を印加した場合における電界最適化電極 の絶縁特性について実験的に検証を行ったのでその結 果を報告する.

2. "CADEF" における電界最適化

2.1 "CADEF"の開発

--- 33 -----

図1に,筆者らが開発を進めている"CADEF"システムの概要を示す. "CADEF"システムにおいては,高精度および高効率計算という観点から,電界解

平成11年3月

NII-Electronic Library Service

34



図1 "CADEF"の基本構成

析手法として電荷重畳法を使用している. CAD デー タを電界解析データとして利用可能とし,併せて電界 解析・電界最適化結果を CAD 中で表示可能とするた め,以下のアルゴリズム・プログラムを開発した.

(1) CAD と電界解析を結合するデータ変換プログラム

CAD の有する機器形状データを電界解析の入力デ ータとして利用するために, CAD のデータから電界 解析用入力データを生成するデータ変換プログラムを 開発した.また,電界解析で得られた結果を CAD で 表示可能とするために,電界解析結果のデータを CAD で読み込み可能とするデータ変換プログラムを 開発した¹⁾.

(2)領域自動認識アルゴリズム

CAD の有する境界データから領域に関するデータ を自動的に生成するための,領域自動認識アルゴリズ ムを開発した¹⁾.

(3)仮想電荷配置に関する専門家知識・経験的要素の導入

仮想電荷の配置に必要となる電界解析の専門家知識 ・経験的要素をルールの形でまとめ、CADEFに導入 した.これによって、専門家が行う場合と同等の精度 で自動電界解析を可能としている¹⁾.

(4)最適化技術の開発・適用

主に計算効率・計算精度の観点から,電荷重畳法に 基づいて電界最適化を行うアルゴリズムを開発し た^{2~6)}.その概略を,次節に示す.

2.2 "CADEF"における電界最適化自動計算

電界最適化計算においては、まずはじめに、最適な 電界分布とはどのようなものであるかを定義する必要 がある.しかし、これを一意に決定することは難し い.一般的に、電界空間全体にわたり電界レベルを低 減し、かつ一様とすることは、空間の有効利用という 観点から有用である.したがってここでは、電極表面 上において最大電界を可能な限り抑制し、かつ電界分 布を一様化するような電極形状を求解することを電界 最適化と定義する.

このような定義に基づいた最適電極形状を求解する ため、筆者らは電荷重畳法に基づいた電界最適化自動 計算技術の開発を行い、"CADEF" システムへ導入 している^{2,3)}.特に,最適化対象領域にわたり,正・ 負両極性電荷を電極内部に同時に追加するアルゴリズ ムの開発により,高効率・高精度の電界最適化自動計 算を実現している²⁾.詳細なアルゴリズムは文献2) に既述であるので,本論文では,電荷重畳法に基づい た電極形状修正アルゴリズムの概略を,図2を用いて 以下に示す²⁾.

(1)図2において、形状修正対象領域中の電極面上に点 (C₁, …, C_i, …, C_n)を決定する.点(C₁, …, C_i, …, C_n)として、電界の極大・極小点を選択するこ とにより、局部的な修正を、領域全体にわたり選択 することにより、大域的な修正が可能である.本電 界最適化では、その両者を1回の電極形状修正で同時に行うため、最適化計算の高効率化を可能とし た.点(C₁, …, C_i, …, C_n)における電極面上の電 界を(E₁, …, E_i, …, E_n)とする.

(2)一方,点(C₁,…,C_n,…,C_n)と1対1に,最適化



図2 電界最適化計算における最適化電荷の追加

シミュレーション 第18巻第1号

電荷と呼ばれる仮想電荷を電極内部に n 個追加配置 する.ここでは、j番目の追加最適化電荷 Q_i を例 として考える.この追加電荷により新たに誘起され る電界は, $F_{ii}Q_i$ となる.ここで, F_{ii} は, 点 C_i と電 荷Q;の電界係数である.また,誘起電界方向と電 極面に垂直な方向とのなす角を X_{ii}とすると,点 C_i における実効的な誘起電界値は、 $F_{ij}Q_j \cos X_{ij}$ とな る.全ての追加電荷の重ね合わせにより得られる電 界が, 電界目標値 E_iと現在の電界(E₁,…, E_i,…, En)との差になるように、すなわち、以下の連立 方程式を解くことにより、追加電荷Q;の大きさを 決定する.

 $[E_i] + [F_{ij} \cos X_{ij}] [Q_j] = [E_t] \ (i=1, \dots, n)$ (1)

(3)追加電荷 Q, により、電界最適電極領域の電位分布 が変化し、これを電極形状の変化とみなすことによ り、電極形状の修正を実現することができる.

(1)~(3)の電極形状修正を,所望の電界分布が得られる まで繰り返し行うことにより、最終的に最適電極形状 を求解することができる.

3. 電界最適化電極形状の求解および最適化 電極の製作

筆者らは実験で用いる電界最適化電極の形状を得る ために,次のような計算を行った.

(1)電界最適化電極形状および電極面上の電界分布の求 解

"CADEF" を用いて電界最適化計算を行い、最適 電極形状およびその電極面上の電界分布を得た.得ら れた電極形状を図3に示す.図3は、回転対称電極系 であり、図中CからC'に至る領域が電界最適化領域 である.なお、この最適化電極は、直径70 mm、ギャ ップ長が10 mm のものを示している.

この電界最適化電極に100 kVの電圧を加えたとき の電極面上の電界分布を図4に示す.この図からわか るように、電界最適化領域全体にわたって電界の変動 幅は2%以内であり、一様な電界が得られていること がわかる.

(2) 電界最適化電極の製作

まず、電極製造加工を容易に行うために、計算で得 られた複雑な形状を8種類の曲率半径をもつ円弧で近 似した.この円弧近似の前後で電極面上の電界分布の 変化は最大で1%程度であり、円弧近似が妥当なもの であることを確認している.

次に,互いに相似形で,サイズの異なる4つの電極

Electric field line LB φ70mm Electric field line LA 10mm 図3 電界最適化電極の形状(回転対称系) 12 10 Electric field (kV/mm) 6 4 0 20 30

Grounded electrode

High voltage electrode

¥///

図4 電極面上の電界分布 (印加電圧100 kV, ギャップ長10 mm)

Distanced from point A along electrode contour (mm)

10

を製作した. すなわち図5に示すように、ギャップ長 3, 5, 7, 10 mm に対応して, 直径が21, 35, 49, 70 mm となるように電極の製作を行った.この場合,電界最 適化領域の電極面積は、約300~3000 mm² である.ま た, 電極面の粗さは, 絶縁特性に重要な要素である. 本実験においては、バフ研磨により電極面の粗さを1 µm 以下としている.なお、本実験で用いた電極は、 全てステンレス製である.実際に製作した電極のう ち, 直径70 mm の電極の写真を図6に示す.

4. 実験方法

- 35 -

実験に用いた回路を図7に示す.空気中および大気

平成11年3月

40

Electric field line Lc



図5 互いに相似でサイズの異なる4つの電界最適化電極の模式図

 (a) ギャップ長3mm
 (b) ギャップ長5mm

(b) キャップ長 3 mm
 (c) ギャップ長 7 mm
 (d) ギャップ長10 mm



図6 電界最適化電極の写真(直径70 mm)

圧 SF₆ ガス中において, 電界最適化電極に交流(60 Hz) および正・負極性の標準電インパルス電圧 (1.2/50 μs) を印加し, 絶縁破壊電圧を測定した. 交 流電圧印加時は上昇法⁷⁾(電圧上昇率1 kV/s), 雷イン パルス電圧印加時は昇降法⁷⁾(電圧昇降幅1 kV)を用 い, それぞれの条件について電圧印加回数を50回とし た. 50回の電圧印加後, 電極表面上の放電痕を観測し た. また, 上記実験中の気温・圧力を測定した.

5. 実験結果

はじめに、実験中の気温・圧力値より、測定された すべての破壊電圧値を標準状態(20°C, 0.1013 MPa) でのそれに換算した⁷⁾. さらに絶縁破壊電圧を電界値 (波高値)に換算し、それを理論値で規格化したもの を、電界最適化電極系のギャップ長に対してプロット した. これを図8に示す. ただし、破壊電界の理論値 としては、電離係数 α (cm⁻¹) および電子付着係数 η (cm⁻¹) を用いて、次式

$$\int_{x} (\alpha - \eta) \, dx = K \tag{2}$$

から得られる値を用いている.ただし、xは電気力線 方向の局所座標系、Kは定数である.Kの値として、 ここでは一般的によく用いられるK=18を採用した⁰. また、 α および η は、電界E(V/cm)およびガス圧力



図8 各種印加電圧波形に対する空気中及び SF₆ ガス中に おける電界最適化電極の絶縁破壊電界

- 36 -----

シミュレーション 第18巻第1号

P(Pa) を用いて次式で与えられるとする^{9,10)}. SF₆ ガス中

$$\frac{\alpha - \eta}{P} = 0.026 \left(\frac{E}{P} - 0.88\right) \left(0.88 < \frac{E}{P} < 1.19\right)$$
(3)

空気中

$$\frac{\alpha - \eta}{P} = 0.018 \left(\frac{E}{P} - 0.24\right)^2 \left(0.24 < \frac{E}{P} < 0.5\right)$$
(4)

なお、空気中および SF₆ ガス中においては、大気圧付 近の平等・準平等電界下での破壊電界が上式(2)~ (4)で実用上十分な精度で求められることが、宅間¹¹⁾、 *Malik* $6^{8)$ によって示されている.

図8より,SF₆ガス中の電界最適化電極において は、破壊電界の電極サイズ依存性が顕著であることが わかる.これに対して空気中においては、本実験条件 下では絶縁破壊電界のサイズ依存性は非常に小さい.

次に, 交流および負極性インパルス電圧印加時の, 空気中および SF₆ ガス中における放電痕分布を図9に 示す. この図は, 図3において最適化電極を右方から 見たものである. この図から,空気中の放電痕は電極 面の中央付近に集中している. これに対して, SF₆ ガ ス中の放電痕は一様電界範囲のほぼ全体に広がってい ることがわかる. また,電圧波形による放電痕分布の 違いはほとんど見られず,絶縁ガスの種類による分布 の違いが顕著であることがわかる.

6.考察

前章のように、同一の電界最適化電極を用いた場合でも、空気中と SF₆ ガス中の絶縁破壊特性に違いが見



(電極直径35 mm, ギャップ長5 mm)

🖝 2. ko 1. ko

- 37 -----

平成11年3月

表1は、今回得られた実験結果および空間中の電界



図10 電界最適化電極から接地電極まで 電気力線に沿って得られる電界分布



表1 実験で得られた絶縁特性および絶縁破壊に寄与する 空間中の領域

37

のうちどの部分が絶縁破壊に大きく貢献しているかを 模式的に示したものである.すなわち,SF₆ガス中の 絶縁破壊の発生は,電極表面電界に強く依存してい る.このため,電極表面電界が一様である範囲全体, すなわち電界最適化領域全体にわたり破壊が発生して いると考えることができる.一方,空気中において は,電極表面電界のみならず,ギャップ間の電界分布 にも強く依存している.このため,空気中では電極面 の中央付近に放電痕が集中していると考えられる.

また、図8に示したような電極のサイズの変化によ る破壊電界の変化も同様に考えることができる.すな わち、SF₆ガス中においては、破壊の発生しうる電極 面のサイズは電界最適化領域のサイズと等しく、破壊 の発生し得る領域が大きい.従って、電極のサイズが 大きくなるほど破壊電界は低下する.一方,空気中に おいては、電極の中央部でのみ破壊が発生し得る定 め、電極サイズが大きくなっても破壊の発生し得る電 極面上の領域は変化しない.したがって、空気中では 電極サイズによる破壊電界の変化が非常に小さいと解 釈できる.

このように、計算で得られる同一の電界最適化電極 を用いた場合でも、空気中とSF₆ガス中とでは、その 絶縁破壊特性に違いが見られることを実験的に明らか にすることができた、特に、ある形状を有する電極の 絶縁特性を記述するためには、単に電極表面に沿った 電界の一様性のみならず、絶縁媒質などの各種条件に 応じて、電気力線に沿った電界分布も重要であること を明らかにした。

7. あとがき

高電圧電力用機器に対するより厳密な最適絶縁設計 のためには、電界最適化計算で得られた電極形状につ いて、その絶縁性能を実験的に検証することが必要で ある.そこで筆者らは今回、高精度自動電界解析シス テム"CADEF"によって電界最適化シミュレーショ ンを行い、得られた電界最適化電極を実際に製作し た.そして空気中および SF₆ガス中において電界最適 化電極の絶縁破壊特性を調べることにより、絶縁最適 性の実験的検証を行った.その結果、同一の電界最適 化電極を用いた場合でも、空気中と SF₆ガス中とで は、絶縁破壊特性に違いがみられることを実験的に確 かめることができた.特に,SF₆ガス中においては, 絶縁破壊が電極表面電界によって決定されるのに対 し,空気中においては空間の電界分布が寄与するな ど,絶縁媒質によって最適化電極の有する絶縁特性が 異なることを明らかにした.今後,今回明らかにした ような絶縁破壊特性の違いを従来の計算技術と融合す ることによって,より厳密かつ総合的な最適化技術の 構築を目指していく.

参考文献

- H. Okubo, H. Maehara, K. Kato, M. Hikita and Y. Kito: Electric Field Calculation Combined with a CAD System for the Personal Computer, European Trans. on Electrical Power Engineering, 3-3, 227/233 (1993)
- K. Kato, M. Hikita, N. Hayakawa, Y. Kito and H. Okubo: The Development of Personal Computer Based High Efficient Technique for Electric Field Optimization, European Trans. on Electrical Power Engineering, 5-6, 401/407 (1995)
- K. Kato, M. Hikita, N. Hayakawa, Y. Kito and H. Okubo: A Highly Efficient Method for Optimum Electrode Contour Determination, European Trans. on Electrical Power Engineering, 7-1, 13/18 (1997)
- K. Kato and H. Okubo: Optimization of HV Electrode Contour with the Highest Gaseous Insulation Performance, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 4-6, 816/821 (1997)
- K. Kato and H. Okubo: CAD System with Electric Field Analysis Aiming Optimum Insulation Design of Electric Power Apparatus, 4th World Congress on Computational Mechanics Abstracts Vol. II, 1033 (1998)
- 6) K. Kato, X. Han and H. Okubo: Optimization Technique for Improvement of Dielectric Insulation Performance of Electric Power Apparatus, 4th World Congress on Computational Mechanics Abstracts Vol. II, 1034 (1998)
- 7) 電気学会:高電圧試験ハンドブック,269,オーム社 (1983)
- N. H. Malik and A. H. Qureshi: Breakdown Mechanisms in Sulphur-Hexafluoride, IEEE Trans. on Electrical Insulation, 13-3, 135/145 (1978)
- M. S. Bhalla and J. D. Craggs: Measurement of Ionization and Attachment Coefficient in Sulphur Hexafluoride in Uniform Fields, Proc. Phys, Soc. 80, 151/160 (1962)
- M. A. Harrison and R. Geballe: Simultaneous Measurement of Ionization and Attachment Coefficients, Phys. Rev., 91, 1/7 (1953)
- 11) 宅間:気体の放電機構の考察と大気圧空気中球ギャッ プフラッシオーバ電圧の計算への応用,電気学会雑誌, 91-7,148/156 (1971)

---- 38 -----

シミュレーション 第18巻第1号