

# 大形回転機コイルの寿命診断技術

## Insulation Diagnosis of Large Rotating Machine Windings

大形回転機コイルの絶縁システムに、合成レジンが適用されて二十数年を経過している。合成レジンはその以前のアスファルトコンパウンド絶縁に比較して、電気的特性、熱的特性及び機械的特性の点で格段に優れている。しかし、発電機の大容量化とともに使用条件も厳しくなり、両者のつり合い条件により絶縁寿命が決まることになる。この寿命を的確に把握し、事故に至る前に絶縁更新してゆくことが電力の安定供給の面から大切である。

絶縁寿命の推定法として、絶縁システムの開発時の性能データの検討と、実機の固定子コイルを数本サンプリングし、破壊電圧値まで求め、発電機の起動・停止回数と運転時間から寿命を推定するNYマップ法を開発し、実機の寿命とよく合致することを確認したので報告する。

谷口正俊\* Masatoshi Taniguchi

松延謙次\*\* Kenji Matsunobu

実松俊弘\* Toshihiro Sanematsu

### 1 緒言

これまでに日立製作所の発電機に採用してきた絶縁システムは、アスファルトコンパウンド絶縁システム、不飽和ポリエステル絶縁システム、エポキシ絶縁システムと変遷してきており、その実機への適用経過を図1に示す。

アスファルト絶縁システムについては、ほとんど絶縁更新が実施されている。現在絶縁診断による寿命推定が重要視されているのは、合成レジンである不飽和ポリエステル、エポキシ絶縁システムである。特に、不飽和ポリエステル絶縁システムは運開後20年以上を経過しており、寿命期にさしかかった発電機も増加していると考えられる。各電力会社の協力の下にタービン発電機の固定子コイルをサンプリングさせてもらい、非破壊試験による絶縁劣化状況の把握、破壊試験による残存絶縁破壊電圧値の測定を行なった。先の報告<sup>1)</sup>では少数の実測データから実験的に導いたNYマップを紹介したが、本論文では更にその後の実測データを積み上げ不飽和ポリエステル絶縁システム開発時のデータとの比較検討を行ない、タービン発電機の運転履歴(起動・停止回数 $N$ 、運転時間 $Y$ )と残存破壊電圧の推定カーブを作成し、更に絶縁破壊電圧の平均値から発電機の信頼性を決める最低破壊電圧を推定して今後の絶縁更新基準を明確にした。

### 2 調査発電機の仕様及び経歴

各電力会社の協力の下に発電機の運転時間、起動・停止回数に注目し、起動・停止回数は多いが運転時間は短いもの、起動・停止回数は少ないが運転時間は長いものなどを考慮し、発電機の固定子コイルから数本サンプリングし、非破壊試験、破壊試験を実施した。その調査発電機の仕様及び経歴を表1に示す。

### 3 絶縁特性試験結果

実機からサンプリングした固定子コイルについて、絶縁劣化状況を把握するために、非破壊試験として、絶縁抵抗、誘電正接 $\tan\delta$ 、交流電流、直流吸収、部分放電試験などを実施し、更に破壊試験として絶縁破壊電圧の測定を行なった。その結果を表2に示す。これらの結果から絶縁劣化の状況を判

断すると、

(1) 4,200回の起動・停止回数を行なっているA発電機で、図2の $\tan\delta$ 電圧特性に見られるように、 $\Delta_2$ の増加及び $\tan\delta$ 値の増加する電圧が低いということから、絶縁層内のボイド(空隙)が多く発生している。また位置的には導線近傍、すなわち導線と絶縁層のはく離が生じていると考えられる。このことは、部分放電試験でのコロナ開始電圧 $V_i$ が低いことから推定できる。すなわちヒートサイクルによる劣化が大きいこ

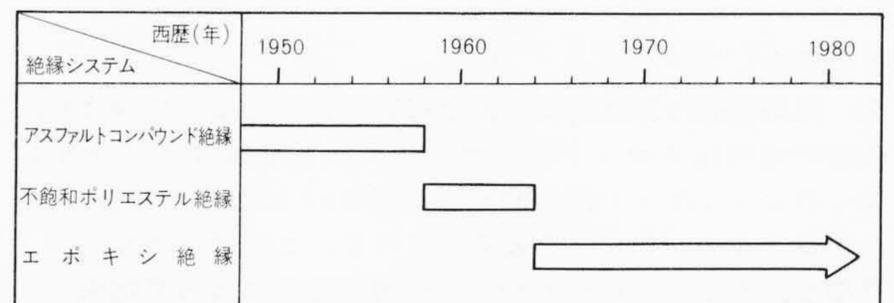


図1 絶縁システムの変遷 日立製作所で、これまで発電機に適用してきた絶縁システムの変遷を示すもので、当初のアスファルトコンパウンドから合成レジンへと絶縁性能が向上してきている。

表1 発電機仕様及び経歴 15年以上運転した発電機の固定子コイルをサンプリングし、非破壊試験、破壊試験を実施したもので、運転時間、起動・停止回数の長短を考えて調査機を選択した。

項目 調査発電機	容量 (MVA)	定格電圧 (kV)	回転数 (rpm)	運転時間 (h)	起動・停止 (回)
A発電機	92	13.2	3,000	95,482	4,214
B発電機	160	15	3,000	106,416	1,011
C発電機	224	12	3,000	112,559	240
D発電機	192	18	3,600	約100,000	230
E発電機	92	13.2	3,000	129,836	1,505
F発電機	160	15	3,000	125,372	319
G発電機	224	12	3,000	144,160	198
H発電機	160	15	3,000	154,610	437
I発電機	224	12	3,000	144,806	202
J発電機	160	15	3,600	150,065	866

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所日立工場 工学博士

表2 絶縁特性試験結果 実機からサンプリングした固定子コイルの非破壊試験、破壊試験の結果の一覧を示す。

調査発電機		A発電機	B発電機	C発電機	D発電機	E発電機	F発電機	G発電機	H発電機	I発電機	J発電機
試験項目											
絶縁抵抗試験	1,000Vメガー I分値 (MΩ)	2,000以上	2,000以上	2,000以上	2,000以上	2,000以上	2,000以上	2,000以上	2,000以上	2,000以上	2,000以上
誘電正接試験*	$\tan \delta_0$ (%)	1.49~1.88	1.69~1.80	2.02~2.14	0.86~0.91	1.59~1.79	1.12~1.58	1.52~1.62	1.91~2.34	1.56~1.82	1.31~1.53
	$\tan \delta_E$ (%)	4.09~5.40	3.43~3.58	3.26~3.87	2.22~2.61	3.40~4.40	1.97~2.84	3.93~5.45	4.06~4.87	1.85~3.77	4.31~5.65
	$\Delta_2$ (%)	2.60~3.58	1.70~1.89	1.23~1.85	1.33~1.75	1.74~2.79	0.80~1.35	2.39~3.84	2.15~2.60	1.03~2.04	3.00~4.16
交流電流試験**	$P_{i1}$ (kV)	12	7	13~14	18以上	14.1~18	22.5以上	9.7~13.6	8.4~11.6	7.6~9.3	7.9~9.7
	$P_{i2}$ (kV)	27以上	15以上	24以上	18以上	20以上	22.5以上	17以上	22.5以上	17以上	15以上
直流吸収試験	PI	4.1~5.4	3.9~4.0	1.07~1.5	3.59~5.58	3.3~7.2	3.62~4.69	3.3~3.5	3.1~6.8	4.17~5.00	6.2~7.2
部分放電試験***	$V_i$	6	5.8	5.6~8.8	7.0~14.4	5.0~6.5	6.5~7.75	4.5~7.5	5.3~7.0	5.0~8.8	5.4~5.7
	$V_i$ (kV)	7.6~9.0	18以上	14.5~15.2	19.5~21.0	7.5~20以上	8.8~22.5以上	7.25~18以上	7.8~11.0	9.2~16.0	7.4~8.7
絶縁破壊試験	1kV/s昇圧(%)	53.7~62.4	68.9~87.7	67.2~100	88.9~94.0	50~93	76.2~95.2	66.2~92.4	60.0~85.7	65.0~94.9	63.7~90.1
	平均値(%)	58.3	77.4	88.0	91.7	75.5	89.8	80.4	76.1	78.7	76.5

注：\*  $\tan \delta_0 = \tan \delta$  at 2kV,  $\tan \delta_E = \tan \delta$  at E,  $\Delta_2 = \tan \delta_E - \tan \delta_0$       \*\*\*  $V_i = 1 \times 10^{-9} \text{C}$ /個の放電電荷量のコロナ開始電圧  
 \*\*  $P_{i1}$  = 第一次電流急増電圧,  $P_{i2}$  = 第二次電流急増電圧       $V_i = 5 \times 10^{-9} \text{C}$ /個の放電電荷量のコロナ開始電圧

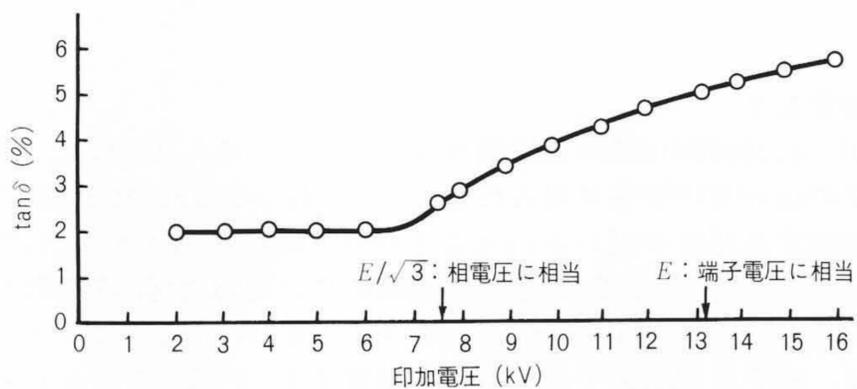


図2 A発電機tanδ-電圧特性例 起動・停止回数の多いA発電機のtanδ特性であるが、常規電圧近傍からの立上りが見られ、導線と絶縁層とのはく離が推定される。

とを意味している。

(2) 絶縁性能は究極的には、絶縁破壊電圧によって決まり、破壊の場所はスロット部とコイルエンドR部(スロット出口すぐのコイルエンド部の曲がった部分)とに分けた場合、ほとんどコイルエンドR部で破壊している。これはコイルエンド端部が、固定子フレームからの糸縛りなどによって拘束された状態でヒートサイクルによる熱伸びを受けると、スロットの出口部、コイルエンドR部への曲げモーメントによる応力により劣化してくるものと考えられる。

(3) このほかコイルの外観としては絶縁層の膨らみ、テストハンマによる打音不良が見られた。また、絶縁層しゃく熱減量試験によるレジン量測定、絶縁層の赤外線吸収スペクトル測定による不飽和ポリエステルレジンの結合基OH, CH, CO基の吸収も明確に出ており、これらの測定では異常は見られなかった。

#### 4 絶縁劣化の要因と寿命推定

##### 4.1 固定子コイル絶縁の劣化要因

高電圧が印加される固定子コイル絶縁の劣化要因としては、一般に次の点が挙げられる。

###### (1) 電気的な劣化(課電劣化)

一般的には、V-t特性に代表されるもので、絶縁層内のボイド放電、更に電界強度の高い領域では、トリニングなどによる劣化である。

###### (2) ヒートサイクルによる劣化

発電機の起動・停止もしくは負荷変動によるもので、導線と絶縁層の線膨脹係数が異なるため、境界部にせん断力が発生

し、導線と絶縁層とのはく離、もしくは絶縁層内のボイドの拡大などに影響を及ぼす。またコイル自体が熱伸びすることにより、コイルエンド部に曲げモーメントが発生し、スロット出口部及びコイルR部の絶縁層に低サイクル領域での曲げ疲労を生じさせる。

###### (3) 機械的な劣化

定常運転時及び突発短絡などの異常運転時の電磁力、コア振動などによる高サイクル疲労による絶縁層の劣化である。

###### (4) 熱的な劣化

絶縁レジンの収縮、熱分解などによるボイド発生及びはく離などによる劣化である。

###### (5) 化学的な劣化

雰囲気の影響で酸、アルカリ、水分などによる絶縁層の膨潤侵食などによる劣化であり、水車発電機、誘導電動機では考慮する必要があるが、一般的にはタービン発電機のように、水素雰囲気での運転では特に考慮の必要はない。

#### 4.2 各劣化要因に対する絶縁特性

不飽和ポリエステル絶縁システムの開発では、種々の電氣的、機械的、熱的な過酷試験を実施し、実機への適用を行なっている。ここに寿命推定の観点から検討し、今回の固定子コイルのサンプリング試験から得られた絶縁破壊電圧値との照合を行ない、寿命曲線を作成した。

##### 4.2.1 課電劣化特性

###### (1) V-t特性

V-t特性は一定電圧を長時間印加したとき、その電圧で破壊するまでの時間を求めるもので、この結果を図3に示す。

###### (2) 残存破壊電圧-t特性

残存破壊電圧-t特性は、一定電圧を長時間印加したときの破壊電圧の経時変化を求めるものであり、寿命推定では、この特性が必要となる。

残存破壊電圧-t特性はV-t特性が逆n乗則( $t = kV^{-n}$ )に従うとして、累積損傷モデルを用い次式が導かれる<sup>2)</sup>。

$$V_E = V_0 \left(1 - \frac{t_x}{t_a}\right)^{\frac{1}{n+1}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに  $V_E$ : 課電時間 $t_x$ で求めた残存破壊電圧(kV)

$V_0$ : 課電前の初期破壊電圧(kV)

$t_a$ : 長期課電したときの寿命時間(h)

$n$ : V-t特性( $t = kV^{-n}$ )でのn値

以上から(1)式を具体的に求めた残存破壊電圧-t特性を図4に示す。

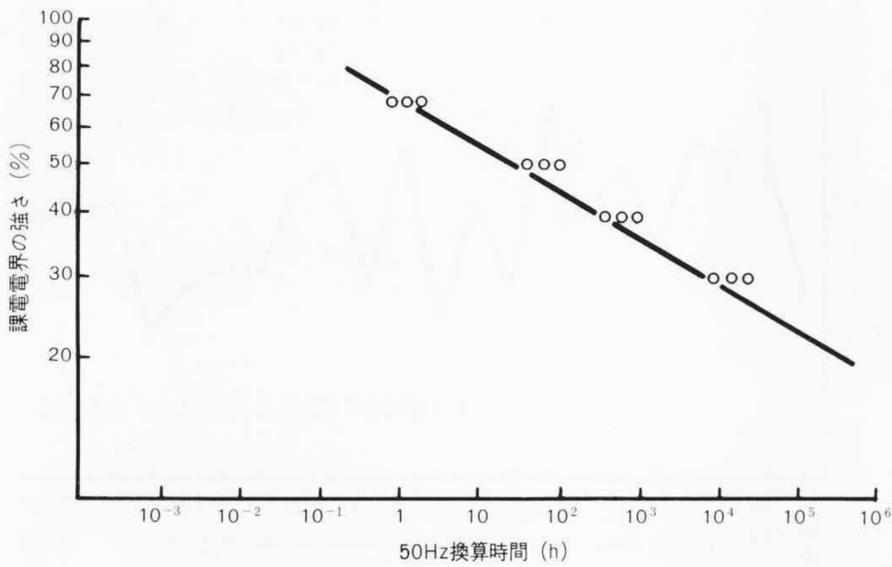


図3 モデルコイルの課電劣化特性 印加電圧時間特性でV-t特性と呼ばれるもので、横軸は1,500Hzでの加速試験を行ない50Hzに換算したものである。

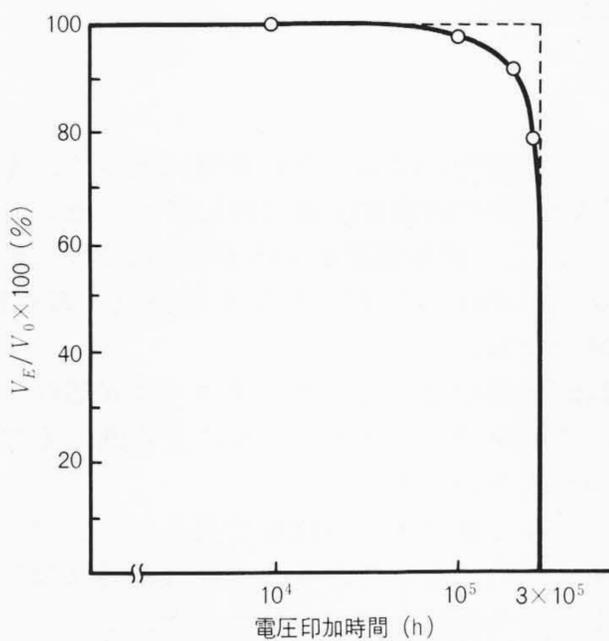


図4 残存破壊電圧-t特性 初期の絶縁破壊電圧を100%としたときの運転時間による破壊電圧の低下度を示す。

#### 4.2.2 ヒートサイクル劣化特性

モデルスロットを製作し、固定子コイルを挿入した状態で加熱冷却のヒートサイクルによる絶縁劣化特性を調べたもので、試験条件及び結果を図5に示す。

#### 4.2.3 機械的劣化特性

絶縁層の機械的劣化試験として、コイルを片持ちばりとし、先端に両振りの繰返し力を印加してコイル絶縁表面の最大応力がコイル絶縁層の曲げ破壊強度の約1/3になるようにして、10<sup>5</sup>回、10<sup>6</sup>回、10<sup>7</sup>回の繰返し疲労を加えて、その後の絶縁破壊電圧を測定した。その結果を図6に示す。

発電機の起動時でのコイル絶縁層の応力は、機械的破壊強度の約1/10程度以下に設計されており特に問題ないと考えられ、機械的劣化はヒートサイクル劣化に含めて考慮する。

#### 4.2.4 熱劣化特性

一般的には絶縁物の熱劣化特性は、アレニウスの反応則に従う場合が多く、ほぼ10°C半減則(熱的な劣化だけを考慮した場合には、10°C温度が上昇すると絶縁寿命は半分に減るという考え方が適用される。ここでは180°Cの過酷熱劣化試験により絶縁破壊電圧の低下を測定し、運転温度100°Cを想定した場合の絶縁破壊電圧特性を図7に示す。

#### 4.3 総合劣化による残存寿命推定

以上述べてきた各劣化要因と絶縁破壊電圧特性の関係か

ら、残存寿命を推定する。

絶縁寿命に大きく影響する要因として課電劣化 $\frac{V_E}{V_0}$ 、ヒートサイクル劣化 $\frac{V_H}{V_0}$ 、熱劣化 $\frac{V_T}{V_0}$ の三つを考え次のように総合劣化による残存破壊電圧 $\frac{V_R}{V_0}$ を推定する。

$$\frac{V_R}{V_0} = \frac{V_E}{V_0} \times \frac{V_H}{V_0} \times \frac{V_T}{V_0} \dots\dots\dots(2)$$

発電機の運転時間と起動・停止回数が決まれば、(2)式から残

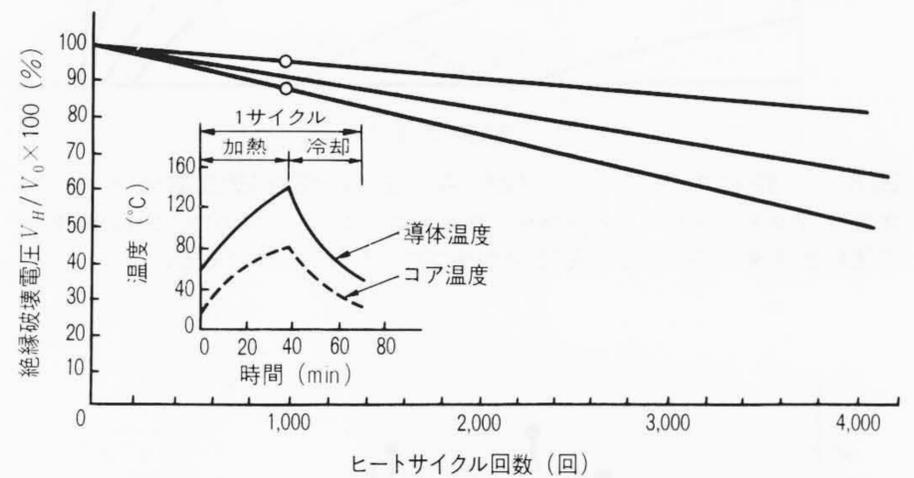


図5 モデルコイルのヒートサイクル劣化特性 発電機の起動・停止によるヒートサイクルと絶縁破壊電圧の低下度を示す。熱的、機械的な劣化が主となって低下する。

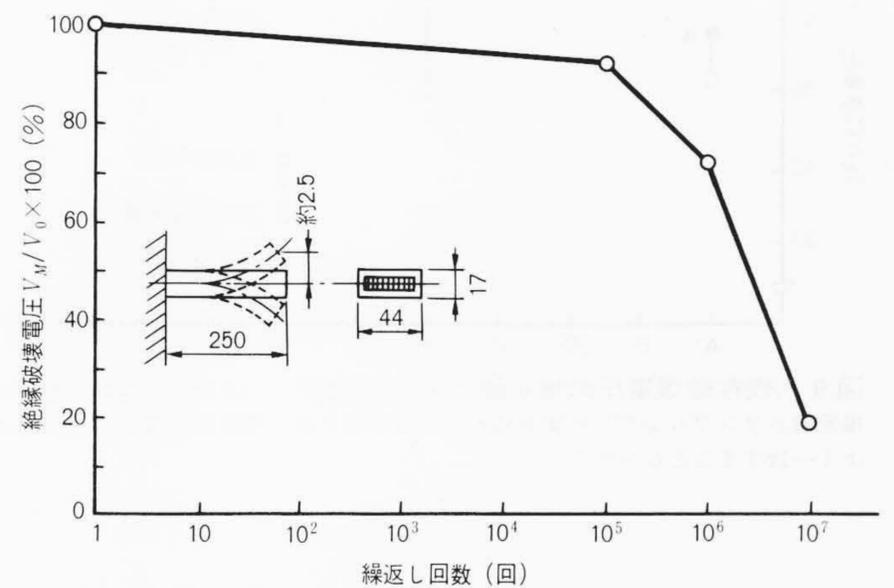


図6 コイル絶縁層の繰返し疲労特性 モデルコイルにより片持ちばりとして両振りの繰返し曲げ疲労を与え、絶縁破壊電圧の低下度を試験したものである。

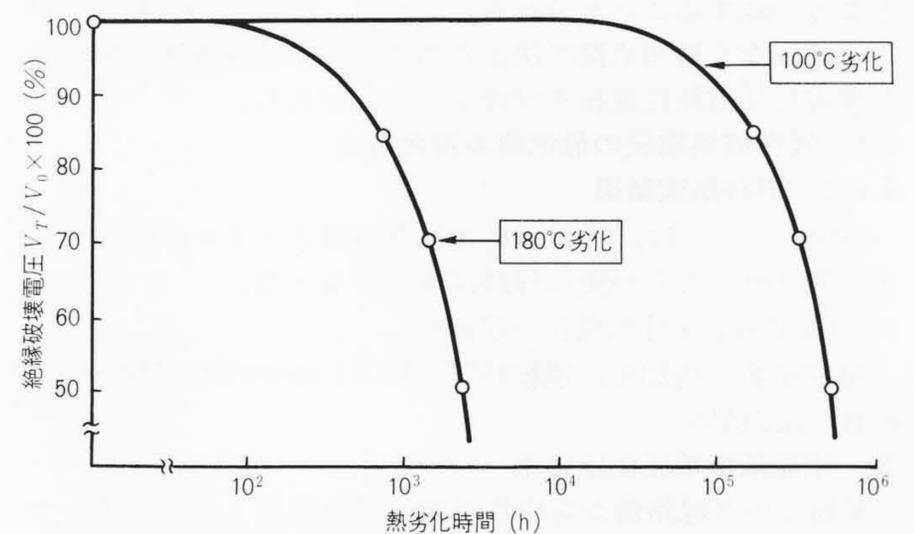


図7 熱劣化と絶縁破壊電圧特性 モデルコイル絶縁に対して180°Cの熱劣化を加え、アレニウス則により100°C劣化に換算したものである。

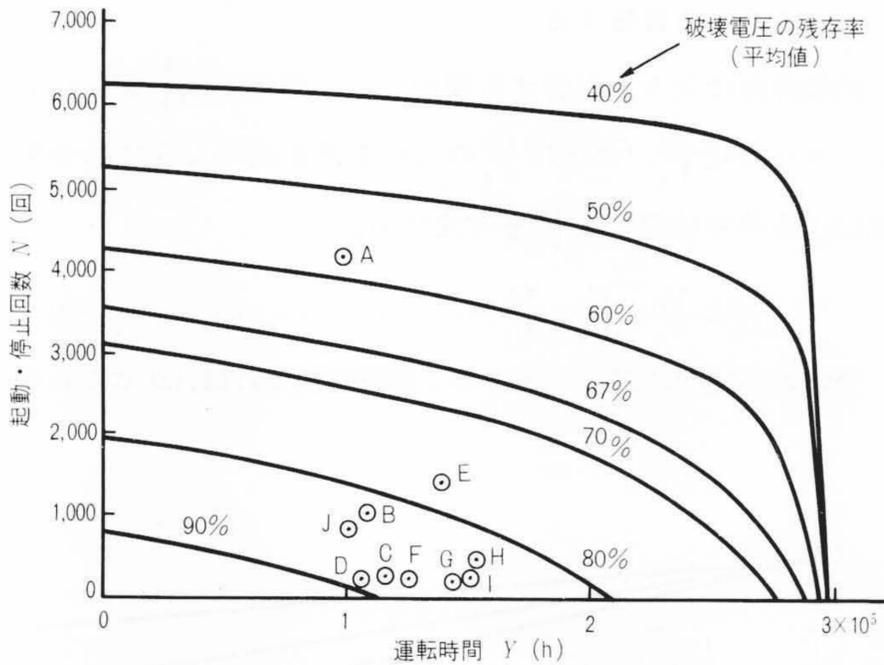


図8 不飽和ポリエステル絶縁寿命曲線(残存破壊電圧平均値)  
本文(2)式の総合劣化による残存破壊電圧をグラフにしたもので、これに発電機の運転歴(起動・停止回数、運転時間)をプロットしたものである。

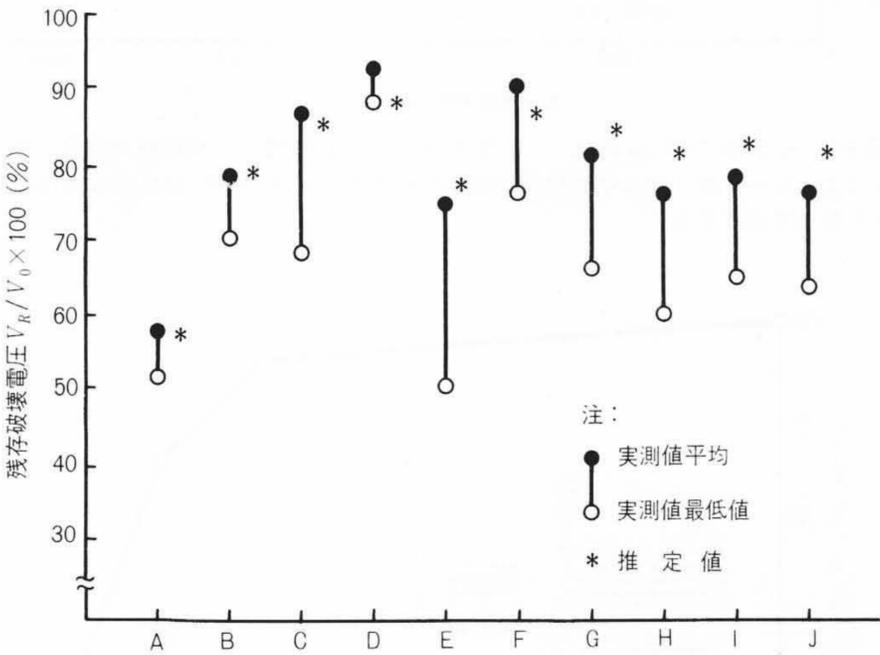


図9 残存破壊電圧の推定値と実測値比較 (2)式の残存破壊電圧の推定値とサンプリングした実測値との比較を示すが、残存破壊電圧の平均値とよく一致することが分かる。

存破壊電圧値が求まることになり、この関係を図8に示す。

更に、サンプリングしたコイルの残存破壊電圧の実測値平均と実測値最低値及び図8による推定値の関係を図9に示す。

この結果から図8の残存破壊電圧の推定値は実測の平均値とよく一致することが分かる。しかし、発電機の信頼性は平均値ではなく最弱点部で決まるので、残存破壊電圧の最低値を推定して信頼性運転を管理する必要がある。

#### 4.4 残存破壊電圧の最低値の寿命推定

##### 4.4.1 追跡調査結果

A機については、昭和56年3月全固定子コイルの絶縁更新を実施させてもらい更に追跡調査を行なった。

(1) 昭和56年3月の現在の運転歴

運転年数：約23年、運転時間：10万7,984時間、起動・停止回数：5,211回

(2) 絶縁破壊電圧測定結果

V相につき線路側から中性点側まで並列数2のうちの一つにつき上底コイル25本を抜き取り、絶縁破壊電圧を測定した。その結果を図10に示す。

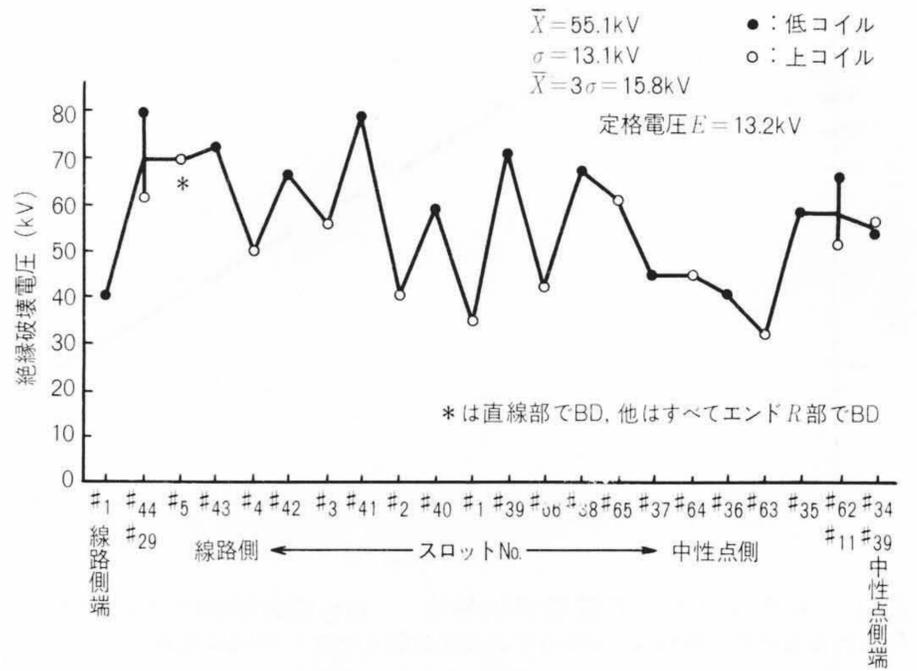


図10 抜き取りコイル(25本)の絶縁破壊電圧特性 25本のサンプリングコイルの絶縁破壊電圧値は非常にばらつきが大きく、上コイルの低下が特に大きいことが分かる。

(a) 絶縁破壊電圧のばらつきが非常に大きく、平均で $\bar{X} = 55.1\text{kV}$ (新品時の破壊電圧値に対してパーセント表示すると60%となる。),標準偏差 $\sigma = 13.1\text{kV}$ (14.3%),最低値推定 $\bar{X} - 3\sigma = 15.8\text{kV}$ (17.3%)となり定格電圧 $E = 13.2\text{kV}$ と同等の値となる。

(b) 絶縁破壊部がほとんどエンドコイルR部近傍に集中しており、運転時のヒートサイクルによる曲げ応力による劣化の影響が大きいと考える。

(c) 上コイルと底コイルの比較で見ると、上コイルの絶縁破壊電圧が低めになっており、これは糸縛り及び電磁力の関係で上コイルが動きやすいためと考える。

##### 4.4.2 平均絶縁劣化度と標準偏差の関係

一般的に絶縁劣化の度合いが進むに従って、絶縁破壊電圧のばらつきも大きくなる傾向にある。実機からサンプリングしたコイルについて、平均残存破壊電圧と標準偏差の関係をまとめたものを図11に示す。これは個々のデータの最小二乗法による平均値を求め、更にその平均値の90%信頼区間、個々のデータの90%信頼区間を統計的に求めた。

##### 4.4.3 残存破壊電圧の最低値の推定

残存破壊電圧値の分布は正規分布に従うと考えられる。一般的に最低値の管理法としてJISなどに $3\sigma$ (サンシグマ)管

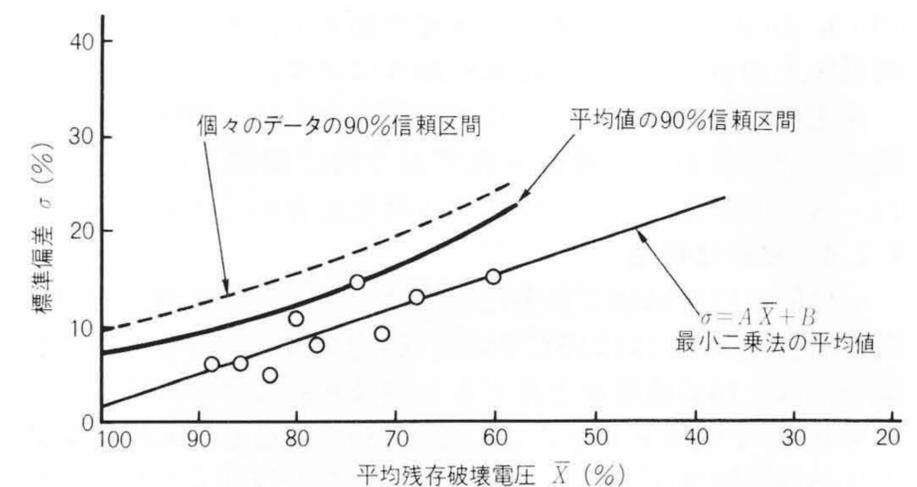


図11 平均残存破壊電圧と標準偏差の関係 平均残存破壊電圧が小さくなるに従い、標準偏差値が大きくなることから、劣化が進むに従い破壊電圧のばらつきも大きくなっていくことを意味する。

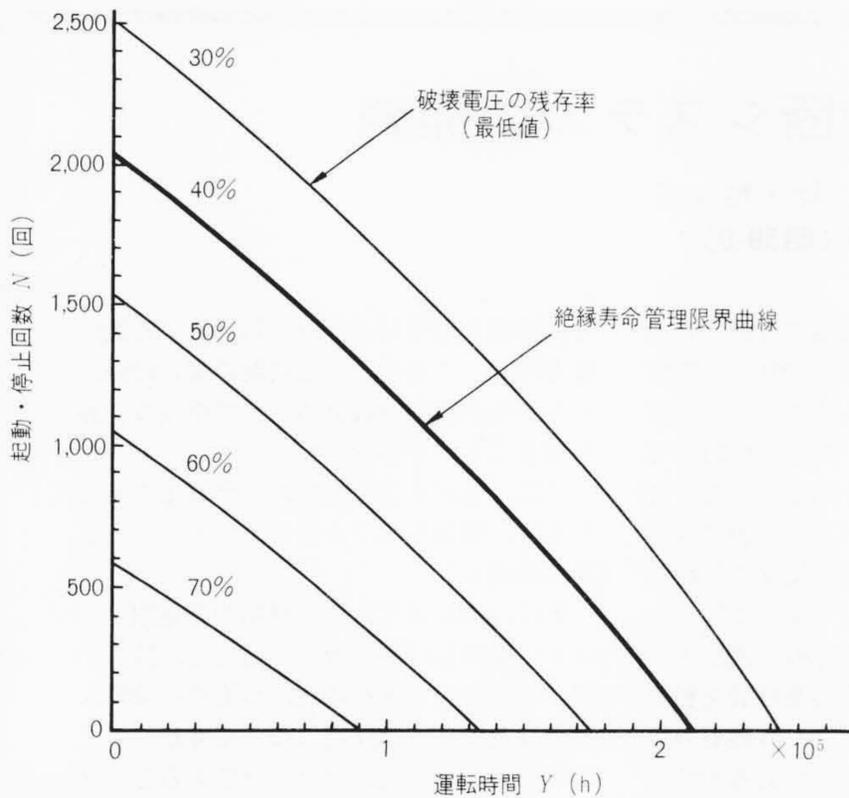


図12 不飽和ポリエステル絶縁寿命曲線(残存破壊電圧最低値)  
 発電機固定子コイルの信頼性は最低破壊電圧で決まり、 $\bar{X} - 3\sigma$ に基づき最低値の寿命曲線を求めたもので、これで寿命を40%にして管理する。

理法が提案されている。3 $\sigma$ 管理では全分布の99.7%を包含できる形となる。これを適用して残存破壊電圧の最低値を $\bar{X} - 3\sigma$ で推定する。具体的には、残存破壊電圧の平均値 $\bar{X}$ とよく一致することが確認された図8の絶縁寿命曲線から、平均残存破壊電圧と標準偏差との関係を示した図11の最小二乗法の平均値の90%信頼区間を用いた標準偏差 $\sigma$ を用いて $\bar{X} - 3\sigma$ の曲線を求めると残存破壊電圧の最低値の寿命曲線が得られ、それを図12に示す。

### 5 固定子コイルの絶縁更新の考え方

実際の運転での信頼性は全固定子コイルの破壊電圧の最低値で決定される。一般に用いられている3 $\sigma$ 管理で最低値を推定するが、この値が初期値の何パーセントに低下した時点が寿命と考えるべきかが問題となる。

絶縁物の判定基準としてIEC(International Electrotechnical Commission)では、絶縁破壊電圧で初期値の50%低下点を寿命点(End Point)と定義しており<sup>3)</sup>、これは一般的に材料の劣化は図13の信頼性バスタブ曲線に見られるように初期値の50%低下は寿命期に入り、この段階からの劣化進行度は急速に進み予測が難しいという考え方に基づくものである。

一方、電力中央研究所では試験電圧相当の(2E+1)kV程度の残存破壊電圧をもつことを推奨しており<sup>4)</sup>、初期値の破壊電圧は4~5E程度の設計となっており、パーセント表示では約40%相当の破壊電圧となる。

また発電機の受ける最大電圧としては、雷サージが大きく、この値は発電機、系統のインピーダンスに関係するが、一般には2E~2.4E程度と考えられる。これらの値を考慮して日立製作所は寿命点として $\bar{X} - 3\sigma$ 値が初期値の40%に到達する時点までに絶縁更新を実施してもらうことが妥当と考える。

C. V. Maughanらは、長期間運転した発電機で絶縁破壊事故が発生した場合、一点地絡の形になるが、これにより過渡的に他相の電位も上昇し、多点接地の形に発展し、コアを通して循環電流が流れ、コアまで損傷する例が55%と報告している<sup>5)</sup>。コアまで損傷した場合の復旧工程及びその費用は多

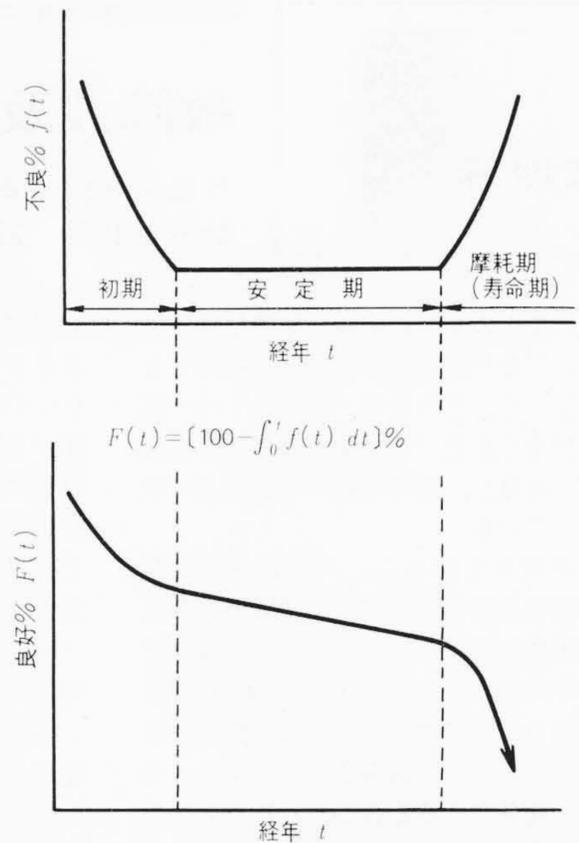


図13 信頼性バスタブ曲線 一般的な劣化の傾向を示すが、寿命期に入ると急激に劣化が進む。初期値の50%低下付近が寿命期と考える。

額に上ると考えられ、発電機固定子コイルの余寿命をより精度の高い形でとらえ、事故に至る前に対策してゆくことが大切である。

### 6 結 言

発電機固定子コイルの寿命推定法として絶縁システムの開発時のデータ及び実機からの数本の固定子コイルのサンプリング試験により、発電機の運転履歴(起動・停止回数、運転時間)から不飽和ポリエステル絶縁システムの残存破壊電圧を求める手法を確立した。更に、タービン発電機の全固定子コイルの残存破壊電圧の最低値の推定として、3 $\sigma$ 法を用いその値が40%になる時点で絶縁更新を実施するのが妥当である旨の結論を得た。

今後更に同様の方法で、エポキシ絶縁システムに対する寿命評価を検討してゆく考えである。

今回の研究開発に対して、発電機から固定子コイルをサンプリング調査するに当たり、御協力をいただいた電力会社の各位に対して厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 松延：大形回転電機絶縁の複合劣化と寿命予知，日立評論，66，6，441~445(昭59-6)
- 2) 加子：マイカ絶縁高圧コイルの複合ストレス劣化，電気学会論文誌A，102，9(昭57-9)
- 3) Guide for the Determination of Thermal Endurance Properties of Electrical Insulating Materials. International Electrotechnical Commission Publication 216-2(1974)
- 4) 発電機巻線絶縁劣化判定基準技術研究報告No.67001，1967年4月財団法人電力中央研究所技術研究所
- 5) C. V. Maughan(GE社)，et al.：High Potential Testing of Large Turbine Generator Stator Insulation Institute of Electrical and Electronics Engineers Winter Power Meeting January 25-30(1970)



## 故障波及予測・診断システムの開発

日立製作所 古河雅澄・宮崎 聡・他1名  
計測と制御 23—8, 672～684 (昭59-8)

近年、都市の発展に伴い、住宅地域と化学プラントなど各種プラントとが隣接するようになった。このため、プラントの一部に故障が生じると、その影響は様々な経路を伝搬・波及し、周辺社会へも広がる可能性をもっている。

故障の波及を防止し、プラントの安全性・信頼性を確保するには系統切換えなど運用段階での対策だけでなく、設計段階でも対策を講じておく必要がある。筆者らは、設計段階で、(1)プラントで異常が検知された場合、真の原因を設置されているセンサ情報から発見できるか否か、(2)故障の影響が波及するとすれば、それは時間経過とともにどの範囲まで及ぶか、(3)その際に維持できる機能は何か、(4)故障の波及による危険性はどの程度か、をシミュレートできるシステムを開発した。

システム開発に当たっては、まず上記4課題を解決するための方法をそれぞれ確立した。これらの方法は、故障の因果関係と

故障波及の時間遅れを、故障波及網というネットワークで表現する点に特長と一貫性をもっている。ネットワークアプローチの採用により、従来のツリーアプローチに比べ、対象プラントの記述能力が向上しただけでなく、プラントがフィードバック経路をもっている場合にも、故障源推定や故障波及範囲予測をダイナミックに行なえるようになった。

四つの方法のうち、故障源推定法は正常情報、故障波及確率、故障波及時間を利用して故障源の候補を絞れる点、各機器の故障率、故障波及確率を利用して故障源である可能性の順位づけを行なえる点が従来法にはない特長である。

故障波及範囲予測法の特長は、故障の波及方向、波及確率、波及時間を利用して、故障波及過程を定量的、構造的、動的にとらえられる点である。

機能生存経路探索法は、従来法ではできなかった「経路」を求めることができる。

危険度評価法は、各機器の危険度評価値

と故障波及確率により線形和評価する簡単な方法で、これにより危険度の高い経路、すなわち予防保全設計のうえで重要な経路を知ることができる。

次に、上記4方法をプログラム化するとともに、統合しソフトウェアシステムとして体系化した。

更に、本システムを3種類の発電用プラントへ適用し、故障源の可同定性、故障の波及範囲や対策余裕時間、機能維持設備、故障波及に伴う危険度について考察した。この結果、設置センサは十分であるとの確認とともに、ガス流量発信器の作動不良など予防保全設計に当たっての留意点を明らかにできた。

以上示したように、方法の考案、そのソフトウェア化、実プラントへの適用という一連の研究により、大規模プラントの予防保全設計を行なう際に、有効な手段となる故障波及予測・診断システムを完成させた。

## Fuzzy制御の列車自動運転システムへの応用

日立製作所 安信誠二・宮本捷二  
電気学会雑誌 104—10, 867～874 (昭59-10)

近年、従来人間が行なってきた制御(運転)をマイクロコンピュータなどで自動化しようという試みが盛んである。しかし、プラントや交通システムなどで人間が行なっている運転を自動化しようとした場合、コンピュータによる制御は速度・量で人間に勝るが、質では熟練者による制御に劣る場合が多くある。この問題を解決するため、人間の知的行動をアルゴリズム化し、人間と同等の制御を実現しようという試みの一つがFuzzy(あいまい)制御である。

Fuzzy制御では、ある量が「大きい」とか「小さい」といった、人間の言葉に含まれる主観的なあいまいさ(Fuzziness)を0から1までの値に対応させることにより定義するFuzzy論理を用いて、人間の知的活動を計算機化する。これまで、人間の運転を過去の操作経験に基づく状況の総合判断としてアルゴリズム化する多次元評価Fuzzy制御方式が提案されている。

筆者らは、人間の制御活動を、制御目的

を考えた勘に基づく代替案の選択としてアルゴリズム化する予見Fuzzy制御方式を提案するとともに、列車自動運転システムに応用し人間と同等の運転を実現した。

列車自動運転システムとは、運転士に代わり列車の出発、走行、停止の制御を行なう制御システムであり、我が国でも既に多数のシステムが実用されている。これらの実用システムでは、目標速度パターンを発生し、それに列車速度をPID制御を基本とした制御方式で追従させる方式により、目標速度パターンに一致した平均的で正確な運転を実現している。しかし、最近の新しいニーズとして、熟練運転士と同等に、乗り心地、停止精度、あるいは消費電力量といった複数の評価指標を総合的に満足させる、うまい運転を実現できる一歩進んだ制御方式の開発が要求されてきた。そこで、これまでの列車自動運転システムの開発経験から、(1)安全性、(2)乗り心地、(3)走行速度、(4)省エネルギー、(5)走行時間、(6)停

止精度、の六つを評価指標とする運転士の制御を経験則化し、これを予見Fuzzy制御の制御則とすることにより列車自動運転プログラムを開発した。

シミュレーションの結果、従来実用化しているPID制御方式と比較して、停止誤差の標準偏差を、制御指令の変化回数とした正確で乗り心地の良い制御が実現できるとともに、力行時の消費電力量を10%以上節約した熟練者と同等な運転が可能であることが分かった。また、実際の車両を用いた走行でも同様の結果を得ている。

このFuzzy制御の、人間の知的活動を定量化して計算機化するという特長は、これまで制御理論が先行し制御系を作りやすいモデルを作り、精密な制御を行なうことの多かった計算機制御に、本当の制御目的に基づくアプローチを可能にしたものであり、実用面から見た応用範囲は大きい。