油浸コンデンサ誘電体の直流・インパルスおよび 直流・交流重畳電圧破壊特性

正員 西 松 峯 昭 (日新電機)

正員 井 上 靖 雄 (日新電機)

正員 林 義 記 (日新電機)

正員 菅 沼 紀美夫 (日新電機)

Breakdown Characteristics of Oil-Impregnated Capacitor Dielectric under DC-Impulse and DC-AC Superposed Voltage

Mineaki Nishimatsu, Member, Yasuo Inoue, Member, Yoshinori Hayashi, Member, Kimio Suganuma, Member (Nissin Electric Co., Ltd)

The breakdown test under DC-Impulse and DC-AC superposed voltage, of an oil impregnated capacitor dielectric is carried out to study the influence of a DC superposed voltage on the breakdown characteristics.

The insulation configuration of the dielectric includes three types-oil-impregnated paper, paper-film (polypropylene), and all-film, each of which uses alkyl-naphthalene as the insulating oil in making a sample capacitor. From the DC-Impulse superposition test, it is found that the breakdown of each capacitor is determined by a certain algebraic sum of the DC and Impulse electric fields regardless of the polarity (forward or reverse polarity) and ratio of DC to Impulse.

From repetitive service-life test, it is found that the service life is inversely proportional to approx. the 13th power of the pulse electric field in the reverse-polarity pulse area of a paper capacitor and to approx. 55th power of it in the short-term area and short-time and sustained use areas of the forward-polarity pulse. For all-film and paper-film samples, it is found that the service life is inversely proportional to approx. the 55th power of the pulse electric field in the sustained use area (several thousands of times) or both the forward and reverse polarities.

From the result of the DC-AC superposed voltage test, several facts can be obtained namely that the influence of the DC superposed voltage on the short-term breakdown voltage is large for any dielectric configuration but, is small in the sustained use area.

キーワード：油浸コンデンサ誘電体，重畳電圧，破壊電圧，耐電圧寿命，部分放電開始電圧

1. ま え が き

直流送電系統に直流フィルタとして適用されるコンデンサ誘電体は，基本的には通常の進相コンデンサと同種の誘電体を採用しているが，その絶縁設計にあたっては直流送電系統特有の過渡過電圧⁽¹⁾⁽²⁾や常規使用電圧に重畳される雷撃への配慮が重要である。直流線

路に加わる過電圧から考えて，コンデンサの絶縁性能上重要なのは直流・インパルス，直流・交流の各重畳電圧に対する絶縁耐力である。

本論文は，高電圧用として実用化されている油浸紙，紙・フィルム，オールフィルムの各複合誘電体コンデンサを対象に，直流・インパルスおよび直流・交流重畳電圧破壊試験を実施し，破壊特性に及ぼす重畳

表 1 試料コンデンサ誘電体の絶縁構成
Table 1. Dielectric composition of sample capacitor dielectrics.

誘電体	絶縁構成	合計絶縁厚さ
油浸紙	P18 μ m $\times$ 6枚	108 μ m
紙・フィルム	P18 μ m+F30 μ m+P18 μ m	66 μ m
オールフィルム	F18 μ m $\times$ 3枚	54 μ m

P: 絶縁紙, F: ポリプロピレンフィルム
含浸材: アルキルナフタレン

電圧の影響について検討したものである。

2. 試料コンデンサ

基本となる薄葉誘電体として密度 1.3 g/cc の絶縁紙, あるいはポリプロピレンフィルムを用い, これらを必要に応じて複数枚重ね合わせてアルミ箔電極と共に巻回してコンデンサ素子を形成し, これを十分加熱乾燥した後, 精製, 脱気処理した絶縁油を含浸し試料とした。絶縁油として用いたアルキルナフタレン⁽³⁾⁽⁴⁾は, 芳香族炭化水素油の一種で, 1972 年以降 PCB 代替油として開発され, 電気特性に優れ化学的に極めて安定な絶縁油として, 高電圧大容量コンデンサなどに多くの実績を有している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。誘電体構成は絶縁紙単独(油浸紙), フィルム単独(オールフィルム), および両者の組合せ(紙・フィルム)の 3 種類で, これらの絶縁構成を表 1 に示す。

供試したコンデンサの静電容量はインパルス破壊試験(直流・インパルス重畳)には 2,500~6,000 pF, 交流破壊試験には直流・交流重畳試験も含めて 0.6~3 μ F の範囲とした。

3. 直流・インパルス重畳破壊電圧

(3・1) 実験方法 表 1 の各種誘電体を用いたコンデンサにあらかじめ直流電圧を印加し, 10~10,000 秒経過後, これに波頭長 2 μ s, 波尾長 50 μ s のインパルス電圧を印加した。なお, 破壊値を求めるにあたっては重畳電圧波高値がインパルス単独破壊値の約 80% 相当値より課電し, 1 kV ステップでインパルス電圧を昇圧し, 試料コンデンサが破壊に至った電圧を破壊電圧とした。重畳するインパルス電圧の極性は直流電圧と順極性, 逆極性双方について試験を行った。試験回路ならびに直流・インパルス重畳電圧波形を図 1 に示す。

(3・2) 油浸紙およびオールフィルムコンデンサの破壊電圧特性

(1) 破壊電圧 表 1 に示す油浸紙およびオールフィルムコンデンサにおいて, まず直流電界(E_{dc})を

図 1 試験回路および直流・インパルス重畳電圧波形

Fig. 1. Impulse-on-DC test circuit.

図 2 油浸紙およびオールフィルムコンデンサの破壊電界と直流重畳電界

Fig. 2. Change of breakdown stress of oil-impregnated paper and all-film capacitors with DC bias stress.

加え 10~20 秒後に順極性あるいは逆極性インパルス(E_{imp})を重畳印加し順次昇圧して破壊電界を求めた。その結果を直流, インパルス各成分の極性を考えてベクトル的に加えた合成電界値(E_r)として図 2 に示す。いずれの誘電体においても直流電界の大きさ, インパルス電圧の極性にかかわらず破壊電界は直流電界と重畳インパルス電界の一定の代数和で与えられている。

図 3 は直流電圧(E_{dc})印加からインパルス電圧を加えるまでの時間, つまりプレストレス時間を直後(1~2 秒)から 10,000 秒まで変化させてインパルス破壊電界(E_{imp})を求めた結果である。図 3 に見るように, プレストレス時間のインパルス破壊電界へ及ぼす影響は双方の誘電体とも非常に小さいといえる。

図 2 および図 3 に示すように, 油浸紙, オールフィルムコンデンサ共, 順極性, 逆極性いずれのインパルス電圧印加の場合も直流, インパルスのベクトル合成破壊

図 3 油浸紙およびオールフィルムコンデンサのインパルス破壊電圧に及ぼす直流プレストレス時間の影響

Fig. 3. Effect of length of pre-stressing by DC bias on breakdown impulse value of oil-impregnated paper and all-film capacitors.

電界 ($E_r = E_{dc} + E_{imp}$) はほぼ一定であり、この合成破壊電界へ及ぼす直流のプレストレスの影響は全くといってよいほど認められない。これはコンデンサの場合、誘電体厚さが極端に薄いため (通常 $30 \sim 300 \mu\text{m}$)、内部空間電荷分布が比較的均一で、電界のひずみが発生しにくいと考えられる⁽²⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この現象は、肉厚絶縁体を用いたケーブルとは趣を異にしている。

(2) 繰返しインパルス寿命特性 直流フィルタ用コンデンサ誘電体の絶縁設計をするうえで、系統上の過電圧が繰返し印加されることを考慮すれば、繰返し印加される重畳電圧に対する寿命特性を把握しておくことは極めて重要である。ここでは代表的な重畳電圧としてインパルス電圧を取上げ、所定の直流電圧に対して順・逆両極性のインパルスを繰返し印加し、破壊に至るまでの回数 (寿命) とインパルス電界との関係を求め、その結果を図 4 に示す。同図に示す寿命特性のうち、(a) 図に示す油浸紙コンデンサでは順極性と逆極性インパルスで寿命特性の傾向が異なっている。順極性インパルス寿命 (インパルス印加回数) はいずれもインパルス波高値の約 55 乗に逆比例する比較的単純な形で表されるが、逆極性インパルス寿命特性は二つの領域で成り立っている。その一つは短寿命領域で順極性インパルスの場合と同様に寿命回数がインパルス波高値の約 55 乗に逆比例の関係で表される領域であり、他の一つは特定の寿命点を境にしてそれ以上では寿命がインパルス波高値の約 13 乗に逆比例する領域である。例えば、直流電界 (E_{dc}) が $150 \text{ V}/\mu\text{m}$ の場合を例にとれば、変曲点の現れる寿命点は約 70 回と

(a) 油浸紙コンデンサ

(b) オールフィルムコンデンサ

図 4 油浸紙およびオールフィルムコンデンサの直流重畳電界下での繰返しインパルス寿命特性
Fig. 4. Impulse-on-DC life stress characteristics of oil-impregnated paper and all-film capacitors.

なっている。

試験終了後、すべての試料コンデンサを解体調査した。その結果 13 乗寿命領域では、破壊試料の大部分は電極端部の近傍で破壊を起こしており、破壊点と共に部分放電による劣化痕跡が認められた。

インパルスが重畳して印加されると電極端部の電界は電極平滑部に比べ数倍以上高いため、電極端部の絶縁油の局部破壊が生じ、繰返しによって、絶縁紙の劣化が進行し絶縁破壊が生じたと考えられる⁽¹⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

一方、55 乗寿命領域ではいずれも破壊箇所は電極の特定の場所に限定されず、また破壊点以外の劣化痕跡は極めて少ないことが確認された。この領域においても部分放電は電界の高い電極端部で発生しやすいが、順極性インパルスにおいては、電圧変化が小さい

(a) 直流重畳電界の影響

(b) プレストレス時間の影響

図5 紙・フィルムコンデンサの破壊電圧
Fig.5. Breakdown stress of paper-film capacitor.

放電が発生しにくく、電圧変化の大きい逆極性インパルスの場合は回数が少ないため劣化痕跡が認められるに至っていない。55 乗寿命領域は、電極端の部分放電による劣化には大きく依存せず、端部も含めた絶縁紙全体の中の耐電圧弱点部での破壊が支配的と考えられる。

また、図4(b)に示すオールフィルムコンデンサでは順・逆両極性インパルスいずれの場合も、寿命曲線の傾斜は油浸紙での順極性インパルス寿命および逆極性インパルス短寿命特性と同様な値を示している。電極平滑部(平等電界下)での破壊が多いという破壊点の状況が類似していることを併せると、この場合ポリプロピレンフィルムの耐電圧弱点部での絶縁破壊が支配的と考えることができる⁽¹⁰⁾。

〈3・3〉 紙・フィルムコンデンサの破壊電圧特性

絶縁紙とポリプロピレンフィルムの多数の組合せが考えられるなかから、表1に示す紙・フィルム誘電体

図6 紙・フィルムコンデンサの繰返しインパルス寿命特性

Fig.6. Impulse-on-DC life stress characteristics of paper-film capacitor.

をその代表として取上げ、その直流電圧に重畳されたインパルス破壊電圧特性を記す。

(1) 破壊電圧 図5に紙・フィルムコンデンサの直流電圧に対する重畳インパルス破壊電圧の変化およびその破壊電圧に及ぼすプレストレス時間の影響を示した。図5(a), (b)に示すように紙・フィルムコンデンサの場合も〈3・2〉節で述べた油浸紙、オールフィルムコンデンサの場合と同様、空間電荷の影響はほとんどなく、印加電圧(直流電圧とインパルス電圧)の比率にかかわらず、合成電界($E_r = E_{dc} + E_{imp}$)がほぼ一定の値に達する条件において絶縁破壊が生じている。

(2) 繰返しインパルス寿命特性 直流電圧に繰返し重畳して印加されるインパルス電圧寿命特性を、図6に示す。

図に見るように、この領域では順逆両特性共に紙コンデンサのように寿命が屈曲するようなことがなく、劣化破壊的な様相を示していない。更に、破壊点が電極平滑部に多いことなどから、ここで取上げた紙・フィルム誘電体の絶縁破壊は、部分放電による累積劣化破壊ではなく、弱点部の破壊が支配的と考えられる。

しかし、油浸紙の分担電界を考えると、油浸紙の累積劣化破壊レベルに達しており、更に長寿命領域においては、油浸紙コンデンサ同様の屈曲点が現れるものと推定される。

4. 直流・交流重畳破壊電圧

〈4・1〉 実験方法 直流フィルタ用コンデンサに加えられる振動型過電圧に対する絶縁設計を行ううえで、商用周波交流電圧に対する絶縁耐力は基本的特性の一つとして重要であるが、ここではこれらの特性が

図7 直流・交流重畳試験回路および電圧波形
Fig. 7. AC-on-DC test circuit.

直流電圧下で受ける影響を明らかにすべく検討した。図7は試料コンデンサに直流電圧と交流(60 Hz)電圧を重畳させ印加する回路を示した。この回路により各試料コンデンサの部分放電特性、交流短時間破壊電圧および耐電圧寿命特性($V-t$ 特性)を求めて交流絶縁耐力特性に及ぼす直流電圧重畳の影響ならびに誘電体構成の差につき検討した。なお、部分放電の測定には低周波法(ERA III型使用)を採用した。

〈4・2〉 油浸紙およびオールフィルムコンデンサの破壊電圧特性 交流電界(ピーク値)印加により耐電圧寿命特性($V-t$ 特性)に直流電圧が及ぼす影響について求めた結果を図8(a), (b)に示す。

(1) 短時間破壊電圧 図8に示す各誘電体コンデンサの寿命特性から直流電界に対する交流短時間破壊電界(ピーク値 E_a)と直流電界(E_{dc})の和($E_{dc} + E_a$)の関係として求めたのが図9である。各コンデンサとも直流電界 100 V/μm を境にして、これ以上の電界ではいずれの誘電体においてもほぼ同一の波高値で破壊電界が与えられているが、直流電界が 100 V/μm 以下では交流電界成分比率が多くなるにつれて破壊電界が低下している。すなわち、直流電界 100 V/μm と 0 V/μm (交流成分のみ)を比較すると前者に比べて後者が 12~14% 低くなっている。これは、交流電界成分が多くなるにつれて低い印加電圧($E_{dc} + E_a$)から部分放電が発生し始め、それによる劣化が結果として $E_{dc} = 100$ V/μm 以上の場合よりも絶縁破壊電圧を低下させていると考えられる。

(2) 長時間耐圧値と部分放電特性 図8に示す交流寿命特性の中で長時間特性の代表値として 10^4 秒耐圧値を、更にこれと密接な関係のある部分放電発生電界を交流波高値電界として表し、これらの値の直流

(a) 油浸紙コンデンサ

(b) オールフィルムコンデンサ

図8 油浸紙およびオールフィルムコンデンサの直流・交流重畳電圧寿命特性

Fig. 8. AC-on-DC life stress characteristics of oil-impregnated paper and all-film capacitors for different DC bias stresses.

電界依存性を求め図10に示す。油浸紙コンデンサ〔(a)図〕では、交流 10^4 秒耐電圧は直流電界の増加と共に一様に低下し、これと関連性の高い連続性の部分放電発生電界も同一の傾向にあり 10^4 秒耐圧値の約 90% の関係にある。

これまでの報告では、直流電界下で油浸コンデンサは電極端部の電界緩和現象のため(電極端近傍の表面電位は電極の電位に容易に追従するため)部分放電は発生しないとされており⁽¹¹⁾、従ってこれと密接な関係にある長時間耐電圧特性は交流成分のみで決まると考えてきたが、(a)図に見るように直流電界の増大に対してその値が 50 V/μm 前後を超える時点より連続

図9 油浸紙およびオールフィルムコンデンサの直流・交流重畳短時間破壊電圧

Fig. 9. Change of short-time breakdown stress of oil-impregnated paper and all-film capacitors with DC bias stress.

(a) 油浸紙コンデンサ

(b) オールフィルムコンデンサ

図10 油浸紙およびオールフィルムコンデンサの長時間耐電圧値(10⁴秒耐電圧値)部分放電発生電圧と直流重畳電界

Fig. 10. Partial discharge inception and 10⁴s breakdown characteristics of oil-impregnated paper and all-film capacitors under AC on DC conditions.

性部分放電に先立って間欠的に部分放電の発生が見られ、その発生電界は直流電界の増大と共に低くなることが認められる。

この間欠性部分放電発生は直流・交流重畳合成電界と相関があることは間違いないと思われるが、発生への直流電界の関与の仕方については現在のところ判然としていない。しかし、いずれにしてもこの間欠性部分放電の発生は油が部分的に破壊していることであり、更に長時間においては、この間欠放電は連続放電を引き起こし、10⁴秒耐電圧を引下げていると考えられる。

一方、(b)図に示すオールフィルムコンデンサでは、連続性部分放電発生電界、10⁴秒耐電圧共直流電

(a) 耐電圧寿命特性

(b) 短時間破壊電圧

図11 紙・フィルムコンデンサの直流・交流重畳破壊電圧特性

Fig. 11. AC-on-DC life stress characteristics of paper-film capacitors.

図 12 紙・フィルムコンデンサの長時間耐圧
(10^4 秒耐圧), 部分放電発生電圧と
直流重畳電界

Fig.12. Partial discharge inception and
breakdown characteristics of paper-film
capacitors under AC on DC condition.

界の変化に対してほとんど変化せずほぼ一定となっており, 連続性部分放電発生電界は 10^4 秒耐圧値の 90~96% の関係にある。この場合は先に述べた間欠性の部分放電が観測されていない。この理由は, 油浸紙コンデンサと異なり電極に密着しているのがフィルムであり, このことが現象の違いを引起こしていると考えられる。

4・3 紙・フィルムコンデンサの破壊電圧特性

(1) 短時間破壊電圧 紙・フィルムコンデンサの交流耐電圧寿命特性に及ぼす直流電界の影響を求め, 図 11(a) に示す。同図より, 短時間破壊時の直流電界に対する交流電界波高値と直流電界の和の関係として(b)図に示す。この場合も油浸紙, オールフィルムコンデンサの場合と同様, 直流電界約 $100 \text{ V}/\mu\text{m}$ 以上ではほぼ一定の波高値で破壊電界が与えられるが, それ以下では直流電界の低下と共に破壊電界は低下し, 直流電界 $100 \text{ V}/\mu\text{m}$ と $0 \text{ V}/\mu\text{m}$ (交流電界のみ) を比較すると前者に比して後者は 12% 低くなっている。この場合も先に述べたように, 交流電界の増大に伴う部分放電の影響が大きくなるためと考えられる。

(2) 長時間耐圧と部分放電特性 10^4 秒耐圧値と部分放電発生電界波高値との関係を求め図 12 に示したが, 図 10 に示す油浸紙コンデンサと類似した傾向にあるといえる。紙・フィルムコンデンサ誘電体は厚さ $18 \mu\text{m}$ の絶縁紙 2 枚の中央に厚さ $30 \mu\text{m}$ のフィルム 1 枚を挿入しており電極に密着して油浸紙が存在する。従って, 部分放電が最も電界の高い電極端部で発生し始めることを考えれば, 油浸紙, 紙・フィルム共同様な傾向を示すことは理解できる。

5. む す び

本研究の成果を要約すると次のとおりである。

(1) 直流・インパルス重畳電圧破壊

(i) 油浸紙, 紙・フィルム, オールフィルム各コンデンサは, 直流に対するインパルスの極性(順極性, 逆極性), 比率にかかわらず, 直流電界とインパルス電界の代数和が, 一定の値に達する条件において絶縁破壊が生じる。

(ii) 繰返し電圧印加特性は, 油浸紙コンデンサの逆極性インパルス長寿命領域で印加電界の約 13 乗に逆比例するが, それ以外は約 55 乗に逆比例する特性を示す。

(2) 直流・交流重畳電圧破壊

(i) 短時間破壊領域においては, 直流電界と交流電界波高値の和で示される合成破壊電界は, 直流 $100 \text{ V}/\mu\text{m}$ 以上の場合は, ほぼ一定値を示し, $100 \text{ V}/\mu\text{m}$ 以下では, 交流電界成分比率が多くなるにつれてその値は低下する。

(ii) 油浸紙および紙・フィルムコンデンサでは 10^4 秒耐圧値は直流電界の増大に伴い低下する。これは直流電界の増大に伴い, 間欠放電が生じやすくなるためと考えられる。

(iii) オールフィルムコンデンサでは, 直流電界増大に伴う連続性放電発生電圧の低下や 10^4 秒耐圧の低下はほとんどなく, 更に間欠性放電発生は認められない。(平成 2 年 12 月 13 日受付)

文 献

- (1) 菅沼・米光・板野・井上・西松:「直流フィルタ用誘電体の検討」, 絶材シンボ, V-2 (昭 58)
- (2) 山田:「直流ケーブル絶縁と試験法との問題点」, 電学誌, 95, 78 (昭 50-5)
- (3) 菅沼・井上・西松:「コンデンサの誘電体と絶縁耐力」, 電気学会研資, EIM-86-88 (昭 61)
- (4) 「最近の油浸紙と将来展望」, 電気学会技術報告(II 部), No. 224, 113 (昭 61)
- (5) Y. Yoshida & M. Nishimatsu: "Power Capacitors" *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-21, No. 6, 964 (1986)
- (6) G. Bahder, et al.: *Insulation Co-ordination in High Voltage DC Cables*, CIGRE Report No. 21-03 (1972)
- (7) 「高分子絶縁材料の絶縁破壊現象」, 電気学会技術報告(II 部), No. 304, 20 (平元)
- (8) 菅沼・米光・板野・井上・西松:「直流用フィルムコンデンサの絶縁破壊特性」, 電気学会研資, EIM-82-35 (昭 57)
- (9) 西松・林・井上:「直流高圧用油浸紙コンデンサの絶縁耐力特性」, 日新電機技報, 25, No. 2, 23 (昭 55)
- (10) 西松・井上・板野・菅沼・米光:「高電圧フィルタ用コンデンサ誘電体の絶縁耐力特性」, 同上, 27, No. 2, 94 (昭 57)
- (11) J. R. Nye & W. R. Wilson: "Physical Concepts of Corona in Capacitors", *AIEE Trans.*, 70, 781 (1953)

西 松 肇 昭 (正員)

昭和10年2月11日生。34年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年4月日新電機(株)入社。以来、コンデンサの開発、設計および誘電体に関する研究に従事。現在、第一電力機器事業本部技師長。

林 義 記 (正員)

昭和22年10月14日生。45年3月武蔵工業大学電気工学科卒業。同年4月日新電機(株)入社。主として、高圧コンデンサおよび誘電体の研究開発、予測保全技術開発に従事。現在、研究開発本部 P&E 開発部絶縁システム課長。

井 上 靖 雄 (正員)

昭和13年12月11日生。38年3月慶応義塾大学工学部電気工学科卒業。同年4月日新電機(株)入社。コンデンサ絶縁技術および予測保全技術に関する研究開発に従事。現在、研究開発本部 P&E 開発部長。

菅 沼 紀美夫 (正員)

昭和30年2月11日生。53年3月名古屋大学工学部電気工学科卒業。同年4月日新電機(株)入社。以来、コンデンサ誘電体ならびに予測保全技術に関する研究開発に従事。現在、第一電力機器事業本部設計部主任。