液体窒素／積層テープ複合絶縁系の部分放電開始特性に及ぼす バットギャップの影響

学生員 栢 山 盛 幸 (名古屋大学)
正 員 松 尾 公 義 (東京電力)
正 員 増 田 孝 人 (住友電工)
正 員 大久保 仁 (名古屋大学)

正 員 早 川 直 樹 (名古屋大学)
正 員 高 橋 芳 久 (東京電力)
正 員 廣 瀬 正 幸 (住友電工)

Influence of Butt Gap on Partial Discharge Inception Characteristics in Liquid Nitrogen/PPLP Composite Insulation System

Moriyuki Hazeyama, Student Member, Naoki Hayakawa, Member, *Kimiyo Matsuo, Member,
*Yoshihisa Takahashi, Member, †Takato Masuda, Member, †Masayuki Hirose, Member, Hitoshi Okubo, Member
(Nagoya University, *Tokyo Electric Power Company, †Sumitomo Electric Industries Ltd.)

It is important to elucidate partial discharge (PD) inception characteristics in LN_2 /solid composite insulation system for the practical insulation design of high temperature superconducting power cables. Especially, butt gaps between laminated insulating papers for electrical insulation of superconducting power cables may induce PD and deteriorate the insulation performance under high voltage operation.

This paper discusses PD inception characteristics in LN_2 /PPLP composite insulation system with a butt gap. We obtained PD inception electric field strength (PDIE) for different butt gap location and surface pressure on PPLP. V-t characteristics for PD inception were also described in this paper. Experimental results revealed that (1) PD with 2~30pC were detected at inception voltage in the butt gap between PPLP. (2) PD IE with a butt gap in the middle layer was higher than those in the top and bottom layers. (3) PDIE was independent of the surface pressure on PPLP. (4) n value of V-t characteristics for PD inception decreased down to 33.7 at the lower surface pressure on PPLP.

キーワード: 液体窒素, 積層テープ, 複合絶縁系, バットギャップ, 部分放電, V-t特性

1. まえがき

近年, 液体窒素冷却による各種の高温超電導電力機器の開発が活発化し, 一部では実用化段階に移行しつつある^{[1][2]}. 例えば, 国内では東京電力と住友電工において, 長さ100mの66kV三芯一括型高温超電導ケーブルの長期課通電試験が計画されている^[1]. また, フランスではEDFを中心として高温超電導ケーブルのパリ市街導入が計画されており, ここでは225kVという高電圧化が指向されている^[2]. このような超電導電力機器の実用的かつ合理的な設計・開発に対する共通基盤技術として, 極低温環境下における電気絶縁技術が必要不可欠である^{[3][4]}.

高温超電導電力機器における実際の絶縁構成の一つとして, 液体窒素と固体誘電体および積層テープとの複合絶縁系が用いられる. したがって, このような複合絶縁系における絶縁特性, 特に絶縁破壊の前駆現象である部分放電(PD)開始特性の把握が絶縁設計上重要となる. そのため, 複合絶縁系におけるPD開

始特性やPD発生から絶縁破壊に至るメカニズムの解明が求められている. 特に, 高温超電導ケーブルにおいては, 積層テープ間に存在するバットギャップが絶縁上の弱点となり, PDが発生することが考えられる. そこで, バットギャップを含む液体窒素／積層テープ複合絶縁系のPD開始特性について調査する必要がある. さらに, 電力機器としての試験電圧の設定や余寿命推定を行う際には, 長時間課電時の絶縁劣化特性(V-t特性)が重要となる.

このような背景より, 本論文では, 高温超電導ケーブルの絶縁構成を模擬した液体窒素／積層テープ複合絶縁系を用いて, バットギャップ存在時のPD開始特性やPD開始のV-t特性について検討を行った.

2. 実験方法

本実験では, 液体窒素／積層テープ複合絶縁系のPD開始特性に対するバットギャップ位置依存性およびテープ面圧

(a) Setup for different butt gap location

(b) Setup for different surface pressure on PPLP

図1 供試電極系

Fig.1 Electrode configuration

依存性について調査するために、Fig.1(a)および(b)に示す2種類の電極系を構成した。積層テープとしては、厚さ0.125mmのPPLP(Polypropylene Laminated Paper, 比誘電率: 2.2)^[3]を用いた。

< 2. 1 > バットギャップ位置依存性の測定装置

Fig.1(a)の電極系は、PPLPを3枚重ねて平板電極間にはさんだ構成であり、最上層、中央層、最下層のPPLPのいずれかにバットギャップを模擬した直径5mmの円孔を設けた。

図2 部分放電測定回路

Fig.2 PD measuring system

上部電極は $\phi=60$ mmの内部電極、下部電極は内径30mm/外径90mmの外部電極からなる分割電極である。下部電極の内部および外部電極にそれぞれPD検出回路を設置し、上部電極への交流印加電圧の極性と各PD検出回路の出力信号の極性とを比較することにより、内部電極、すなわちバットギャップにおけるPD信号を選択的に測定した。なお、本実験では、種々のバットギャップ位置におけるPD開始特性を同一条件下において効率的に行うために、FRPローラに巻き付けたPPLPサンプルを順次交換することを可能としている。

< 2. 2 > PPLP面圧依存性の測定装置

Fig.1(b)の電極系は、バットギャップを中央層のPPLPに固定して、 $\phi=60$ mmの上部平板電極と $\phi=90$ mmの下部平板電極ではさんだ構成である。上部平板電極は厚さ1mmのエポキシ樹脂(比誘電率: 4.7)でモールドしてあり、電極端部でPDが発生しないようにしている。供試電極系をFig.2に示すステンレス製クライオスタット内に配置し、マイクロメータと下部平板電極直下のパネを用いてPPLPに加わる面圧FをF=9.4N~21.0Nの範囲で変化させた。なお、ステンレス製クライオスタットにはFRP製のコンデンサブッシングが挿入されており、液体窒素浸漬状態において100kV_{rms}の交流高電圧に対してコロナフリーである。

< 2. 3 > 実験方法

上部電極に周波数60Hzの交流高電圧を電圧上昇率0.5kV_{rms}/sで印加した。この際、下部電極からPD検出回路

図3 バットギャップ中の部分放電開始特性
Fig.3 PD inception characteristics in butt gap
(Butt gap : bottom, $V_{ac}=10.2kV_{rms}$)

を介して、PD 信号を 2 台のデジタルオシロスコープに記録した。オシロスコープ 1 の時間軸は 2ms/div であり、PD 信号の発生位相を測定する。オシロスコープ 2 の時間軸は 0.5μs/div であり、PD 信号の単発パルス波形を測定する。本実験における PD 電荷量 Q の検出感度は 2pC である。

以上の測定回路を用いて PD 開始電圧を測定し、液体窒素、PPLP、エポキシ樹脂の比誘電率を用いてバットギャップ内の PD 開始電界(PDIE)に換算した。なお、同一条件下において PDIE を 20 回以上測定し、ワイブルプロットから 50% PD 開始電界(E_{50})およびばらつきの大きさ(m_e 値)を求めた。次に、 $V-t$ 特性の測定方法として、 E_{50} の 115%~85% の印加電界 E_{ac} に対して、PD が開始するまでの時間を 10 回測定した。課電後 1 時間経過しても PD が発生しない場合には測定を打ち切った。

図4 種々のバットギャップ位置における部分放電開始電界のワイブルプロット

Fig.4 Weibull plots of PDIE in different butt gap

表1 種々のバットギャップ位置における50%部分放電開始電界 E_{50} および形状パラメータ m_e 値

Table1 50% PDIE (E_{50}) and shape parameter (m_e) for different butt gap location

Butt gap location	E_{50} [kV _{rms} /mm]	m_e
Top	38.3	8.2
Middle	45.5	24.9
Bottom	36.9	10.0

(E_{50} : PDIE in butt gap)

3. 実験結果および考察

< 3. 1 > 部分放電開始電界

バットギャップが最下層にある場合について、交流印加電圧 $V_{ac}=10.2kV_{rms}$ で検出された PD 開始特性の一例を Fig.3 に示す。同図において、PD が検出された時点を経験原点($t=0ms$)とした。(a)図は交流印加電圧に対する PD の発生位相を示す。同図から、電圧位相 92°において PD が発生していることがわかる。また、同時に高速時間分解測定を行った(b)図より、PD 電荷量は 26pC であることがわかる。

次に、種々のバットギャップ位置における PDIE のワイブルプロットを Fig.4 に示す。同図より、各条件下において PDIE のワイブルプロットが直線上にのっており、PDIE のばらつきがワイブル分布に従うことがわかる。同図より求めた 50%PDIE(E_{50})とばらつき(m_e 値)を Table1 に示す。Fig.4 および Table1 より、バットギャップが中央層にある場合の PDIE が他の場合よりも約 20%大きいことがわかる。これは、バットギャップが

中央層にある場合には、最上層や最下層の場合と比較して電極からの初期電子の注入確率が低く、PDが発生しにくいと考えられる。また、バットギャップが中央層にある場合の m_e 値が他の場合よりも大きいことがわかる。これは、最上層や最下層のバットギャップは電極表面と接しており、バットギャップ内の弱点と電極表面上の弱点が混在することによって PDIE のばらつきが大きくなったためと考えられる。

さらに、バットギャップが中央層にある場合について、PD 開始特性の面圧依存性を Fig.5 および Table2 に示す。両図表より、本実験の範囲内では、 E_{50} は面圧にほとんど依存しないことがわかる。なお、Table2 の E_{50} は Table1 の値(バットギャップ：中央層)よりも 15~24%高い。一方、Table2 の m_e 値は $F=12.3N$ および $21.0N$ の場合で Table1 の値とほぼ等しいが、その他

図5 種々の面圧におけるPD開始電界のワイブルプロット

Fig.5 Weibull plots of PDIE for different surface pressure (Butt gap : middle)

表2 E_{50} および m_e 値の面圧依存性
Table2 50%PDIE (E_{50}) and shape parameter (m_e) for different surface pressure (Butt gap : middle)

Surface pressure[N]	E_{50} [kV _{rms} /mm]	m_e
9.4	53.0	13.7
12.3	56.0	21.6
15.2	52.5	11.4
18.1	53.9	13.1
21.0	56.4	23.3

(E_{50} : PDIE in butt gap)

の面圧では小さい。これらは、Fig.5 および Table2 のデータが上部電極をエポキシモールド処理(Fig.1(b))したことによる効果と考えられる。

<3. 2> 部分放電開始のV-t特性

前節で得られた E_{50} (バットギャップ：中央層)に基づいて、種々の印加電界に対するPD開始時間を測定した。Fig.6に、 $F=9.4N$ におけるPD開始時間のワイブルプロットを示す。同図から、各条件下におけるワイブルプロットが直線上にのっており、PD開始時間のばらつきがワイブル分布に従うことがわかる。また、各図中には、印加電界 E_{ac} 、ワイブルプロットの傾き (m_t 値)および 50%PD開始時間(t_{50})を併記している。各図より、各条件下における m_t 値は1以下であり、PD開始が初期破壊型であると言われている。また、 E_{ac} の低下に伴い t_{50} が増大していることがわかる。

次に、 $F=9.4N$ における E - t_{50} 特性を Fig.7 に示す。同図には、各印加電界におけるPD開始時間の実測値 (○印)と t_{50} (●印)を併記している。なお、各印加電界におけるプロットの左側に記した数字は、印加電界が各設定値に到達する前にPDが発生した回数である。また、右側に示した数字は、課電後1時間経過してもPDが発生しなかった回数である。同図において、 E - t_{50} 特性は両対数グラフ上でほぼ直線的に低下しており、

	E_{ac} [kV _{rms} /mm]	E_{ac}/E_{50} [%]	m_t	t_{50} [s]
○	53.0	100	0.754	1.51
△	50.4	95	0.274	2.90
□	47.6	90	0.507	20.88
◇	45.0	85	0.306	266.77

図6 PD開始時間のワイブルプロット

Fig.6 Weibull plots of PD inception time (Butt gap : middle)

$E \propto t_{50}^{-1/n}$ で近似することができる。ここで、 n は $E-t_{50}$ 特性における直線の傾きの逆数（寿命指数）を示している。

PPLP の面圧を変化させた場合における PD 開始の $E-t_{50}$ 特性およびその近似式を Fig.8 および Table3 に示す。同図より、面圧が大きい場合 ($F=15.2\text{N}$, 21.0N) の n 値が 89~109 であるのに対して、面圧が小さい場合 ($F=9.4\text{N}$) の n 値は 33.7 と小さくなっていることがわかる。このことから、本実験の範囲内では、PD 開始の $V-t$ 特性には面圧依存性が存在すると言うことができる。

以上の結果を液体窒素／エポキシ複合絶縁系の気泡在時

表3 種々の面圧における $V-t$ 特性の近似式
Table3 Approximated $V-t$ equation for different surface pressure (Butt gap : middle)

$F[\text{N}]$	$E-t_{50}$
9.4	$E=52.7t_{50}^{-1/33.7}$
15.2	$E=56.4t_{50}^{-1/88.2}$
21.0	$E=57.7t_{50}^{-1/108.5}$

図7 PD 開始の $V-t$ 特性

Fig.7 $V-t$ characteristics for PD inception
(Surface pressure : $F=9.4\text{N}$, Butt gap : middle)

図8 種々の面圧における PD 開始の $V-t$ 特性

Fig.8 $V-t$ characteristics for PD inception for different surface pressure (Butt gap : middle)

における PD 開始の $V-t$ 特性^[6]と比較すると、面圧が大きい場合は気泡擾乱状態が小さい状態 ($n=86\sim106$) に対応し、面圧が小さい場合は気泡擾乱が大きい状態 ($n=38\sim54$) に対応する。このことから、長期課電中の PPLP に加わる面圧の低下は、気泡擾乱に相当する PD 発生確率の増加を示唆していると考えられる。

4. まとめ

本論文では、高温超電導ケーブルの絶縁構成を模擬した液体窒素／PPLP 複合絶縁系において、PD 開始特性に及ぼすバットギャップの位置や面圧の影響について検討を行った。以下に、本論文で得られた主な知見を示す。

- (1) PPLP 間のバットギャップで発生する PD (2~30pC) を選択的に検出することを可能とし、PDIV を高感度に求めることができた。
- (2) 3 枚の PPLP の中央層にバットギャップがある場合の PDIE は、最上層や最下層にバットギャップがある場合よりも大きくなる。これは、バットギャップが中央層にある場合においては、電極からの初期電子注入確率が低いためと考えられる。
- (3) バットギャップが中央層にある場合の PDIE およびそのばらつきは、本実験の範囲内 (面圧 $F=9.4\text{N}\sim21.0\text{N}$) においては面圧依存性が見られない。
- (4) PD 開始の $V-t$ 特性 (課電時間: 1 時間以内) には面圧依存性が見られた。すなわち、面圧が大きい場合の n 値が 89~109 であるのに対して、面圧が小さい場合の n 値は 33.7 と小さくなった。

(平成 13 年 1 月 31 日受付、再受付)

文献

- [1] 加藤, 渡部, 芦辺, 増田, 廣瀬, 磯嶋, 松尾, 本庄, 三村, 高橋: 「66kV 三芯一括型超電導ケーブルの開発(1)」, 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.614, 2000
- [2] P.L.Ladie, M.Nassi, S.R.Norman, P.Caracino, M.Coevoet, C.Boisseau, P.F.Sirot: "Pirelli-EDF Development on Superconducting Cables", *Proc. of Jicable*, pp.103-108, 1999
- [3] J.Gerhold, M.Hara: "Special Issue on Electrical Insulation in

Superconducting Power Apparatus", *Cryogenics*, Vol.38, No.11, 1998

- [4] N.Hayakawa, H.Maeda, S.Chigusa and H.Okubo: "Partial discharge inception characteristics of LN_2 / epoxy composite insulation system under thermal bubble condition", *Cryogenics*, Vol.40, No.3, pp.167-171, 2000
- [5] H.Suzuki, K.Ishihara, S.Akita: "Dielectric Insulation Characteristics of Liquid-Nitrogen-Impregnated Laminated Paper-Insulated Cable", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.7, No.4, pp.1677-1680, 1992
- [6] 栢山, 早川, 大久保: 「液体窒素／固体複合絶縁系の気泡存在時における部分放電開始のV-t特性」, 電気学会論文誌A, Vol.121, No.4, 2001(掲載予定)

栢山 盛幸

(学生員) 1978年2月9日生まれ。96年4月名古屋大学工学部電気電子情報工学科入学。99年4月同大学大学院工学研究科博士課程前期課程進学。現在に至る。極低温液体絶縁技術に関する研究に従事。

早川 直樹

(正員) 1962年9月9日生まれ。90年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程満了。同年4月同大学助手。96年4月名古屋大学理工学総合研究センター助教授。98年4月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻助教授。現在に至る。工学博士。96年電気学会論文賞受賞。IEEE, 低温工学協会, エネルギー・資源学会会員。

松尾 公義

(正員) 1964年3月18日生まれ。87年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年4月東京電力(株)入社。主として地中電力ケーブルの建設, 管理に従事。現在電力技術研究所にて超電導ケーブルの研究開発を担当。

高橋 芳久

(正員) 1961年3月12日生まれ。85年3月慶応大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。同年4月東京電力(株)入社。主として地中電力ケーブルの建設, 管理に従事。現在電力技術研究所にて超電導機器(ケーブル・限流器)の研究開発を担当。

増田 孝人

(正員) 1962年1月23日生まれ。87年3月大阪府立大学大学院工学専攻修士課程修了。同年4月住友電気工業(株)入社。現在に至る。主に超電導機器, ケーブルの開発に従事。

廣瀬 正幸

(正員) 1955年3月31日生まれ。79年3月岡山大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月住友電気工業(株)入社。現在に至る。超高压電力ケーブル, 直流海底ケーブルの開発, 設計に携わり, 現在, 超電導ケーブルの開発に従事。

大久保 仁

(正員) 1948年10月29日生まれ。73年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年4月(株)東芝入社。高電圧技術開発に従事。76年7月～78年2月ドイツ・アーヘン工科大学高電圧研究所およびミュンヘン工科大学高電圧研究所客員研究員。89年7月名古屋大学工学部電気学科助教授。91年4月同教授。現在に至る。工学博士。IEEE, VDE, CIGRE 会員。