空気ギャップの放電を介したポリエチレンフィルムの絶縁破壊 —— 繰り返し放電周期の影響 ——

正員 村本 裕二* 学生員 橋本 真一*
正員 穂積 直裕* 正員 長尾 雅行*

Breakdown of Polyethylene Film Subjected to Partial Discharge in Air Gap —— Effect of Repetition Rate of Partial Discharge ——

Yuji Muramoto*, Member, Sin'ichi Hashimoto*, Student Member, Naohiro Hozumi*, Member, Masayuki Nagao*, Member

We have been studying the breakdown characteristics of the low-density polyethylene films (LDPE) caused by the partial discharge in the air gap. The purpose of this study is to clarify the effect of the sample temperature rise on breakdown mechanism of LDPE films under the repetition rectangle wave pulses. The large change appears in the pulse number up to breakdown (N_{BD}) near 250Hz (4ms) in the N_{BD} dependence of frequency. From these thermograph results, the temperature rises at the diameter 1mm under the electrode needle show in high frequency region. The sample temperature rise shows a correlation to the decrease of N_{BD} at a frequency. The surface and center temperature of sample are estimated using the heat equivalent circuit. The sample temperature increases by the heat pulses due to the discharge and it decreases by the heat constant (4ms) of this insulation system. If the repetition period of applied voltage is shorter than the heat constant (4ms), the sample temperature increases and the insulation system leads to breakdown at a few numbers of the applied pulses. From these results of the heat image, there are good agreements between the measured sample temperature rise and the estimation value by the heat equivalent circuit.

キーワード : 気体-固体複合絶縁系, ポリエチレンフィルム, 絶縁破壊, 繰り返し方形波パルス, 繰り返し周期, 温度分布

Keywords : gas-solid composite insulation system, polyethylene, breakdown, repetition rectangle wave pulse, repetition rate of partial discharge, temperature distribution

1. まえがき

気体-固体複合絶縁系では、放電による固体絶縁体の帯電や劣化を介して系の寿命が決定する。しかし、絶縁系の評価は電極を直接絶縁体に接した実験によるものが多く、気体や真空放電を介した帯電による系の破壊については不明な点が多い⁽¹⁾。一方、高電圧・高周波で使用される一部の電力機器においては、絶縁構成上、気体-固体絶縁系となるものが存在する。従って、このような電力機器の絶縁設計を行なう場合、放電を介した絶縁系の破壊について解明しておく必要がある。著者らは、これまでに気体-固体複合絶縁系の放電による固体絶縁体の絶縁破壊特性を解明するために、針-平板電極系において空気ギャップを介して低密度ポリエチレン (LDPE) フィルムを置き、針電極側に

交流ランプ電圧を印加した場合の気中放電を介した LDPE の交流絶縁破壊特性から、この系における交流絶縁破壊機構の推定を行なった。その結果、気体-固体複合絶縁系における交流絶縁破壊には印加した交流ランプ電圧の周波数領域によって、その機構が異なることがわかり、交流の繰り返し周期が系の破壊に大きく影響することが示唆された⁽²⁾。また空気ギャップにおける部分放電特性の測定より交流ランプ電圧を用いた場合、1 サイクル当たりの放電の大きさ、および放電回数が一定にならず、また、交流電圧波形自体がもつ時間変化と、包絡線の時間変化の両方が破壊に影響し、系の破壊特性と寿命特性を分離して検討することが困難であることもわかった⁽³⁾⁽⁴⁾。そこで本研究では、解析が容易となるように繰り返し方形波パルスを用いて、印加電圧 1 サイクル当たりの放電回数、および放電の大きさを揃えた実験を行った。その結果、繰り返し周波数に依存したフィルムの温度上昇が示唆されたため、熱像 (サーモグラフ) によって試料温度分布を観測し、絶縁破壊までのパルス数の周波数依存性を試料温度上昇の数値解析をもとに

* 豊橋技術科学大学 電気・電子工学系
〒441-8580 豊橋市天伯町字雲雀丘 1-1
Department of Electrical & Electronic Engineering,
Toyohashi University of Technology
Hibarigaoka 1-1, Tempaku-cho, Toyohashi 441-8580

図 1 電極形状

Fig. 1. Configuration of electrode system.

説明した。

2. 試料及び実験方法

実験で用いた試料は、厚さ $20\mu\text{m}$ の低密度ポリエチレン (LDPE) フィルムを、平板電極側のみに金を蒸着することで構成した。電極系は針—平板電極系とし、針電極と LDPE フィルムの間に 0.5mm の空気ギャップを設けた。針電極先端の曲率半径は約 $10\mu\text{m}$ である。電極系の形状を図 1 に示す。図 1 において構成された絶縁系 (気体—固体複合絶縁系) を、密閉された容器内で乾燥空気に真空置換した後、ファンクションジェネレータと高速高電圧アンプを用いて針電極側に周波数を 10Hz ~ 1kHz まで変化させた繰返し方形波パルス (所定の一定電圧, duty 比 1:1) を印加し、各々の周波数, およびパルス電圧における破壊までのパルス数 (N_{BD}) の測定を行った。また, N_{BD} の測定と同時に試料の熱像観測を行なった。全ての測定は室温 (約 20°C) で行なった。

3. 実験結果および考察

〈3・1〉 繰返し方形波パルスによる寿命特性の周波数依存性 図 2 に印加した繰返し方形波パルスの周波数を 10Hz および 1kHz とした場合におけるパルス電圧 (V) と破壊までのパルス数 (N_{BD}) の特性を示す。周波数 10Hz , 1kHz とともに, 印加する方形波パルスの電圧低下に伴い, N_{BD} が増加している。また, 印加電圧 10kV 以下の場合 (例えば 8kV の場合), 周波数 10Hz 印加時の N_{BD} より, 1kHz 印加時の N_{BD} の方が非常に小さくなっている。これらより, 同じ大きさの部分放電でも, 印加する方形波パルスの繰返し周期が短くなると, 1 周期当たりの気中放電による LDPE フィルム表面の劣化度が大きくなることが示唆される。

図 3 に印加した方形波パルスの電圧を 8kV 一定とした場合の N_{BD} の周波数依存性を示す。周波数 250Hz 付近 (周期 4ms) で N_{BD} に約 3 桁ほどの低下が見られる。従って, 何らかの影響がこの周波数領域で絶縁系の破壊に大きく関与してくるものと考えられる。

〈3・2〉 部分放電特性の周波数依存性 図 4 は, 印加する繰返し方形波パルス (電圧 8kV) の周波数を変化させた場合の各周波数における 1 サイクル当たりの放電電荷量

図 2 パルス電圧の破壊までのパルス数 (N_{BD}) 依存性
Fig. 2. Pulse number up to breakdown (N_{BD}) dependence of Pulse voltage (V) as parameter of frequency.

図 3 電圧一定 (8kV) 時の N_{BD} の周波数依存性
Fig. 3. Frequency dependence of N_{BD} at 8kV .

図 4 放電電荷量の周波数依存性
Fig. 4. Frequency dependence of PD magnitude (Q).

を示している。これより, 周波数を増加させても空気ギャップにおける部分放電 (正, 負) の放電電荷量は変化せず, むしろ減少する傾向を示していることがわかる。また, 同時に測定した放電波形より, 1 サイクル当たりに空気ギャップで生じる放電は, 正負各々 1 発ずつ発生しており, 周波数や duty 比の変化にも影響されなかった。従って, 図 3 で示した周波数増加に伴う N_{BD} の低下の要因として, 空気ギャップにおける部分放電特性の変化が関与している可能性は低いと考えられる。

〈3・3〉 試料温度の観測 図 3 より, この絶縁系における寿命特性は, 印加する繰返し方形波パルスの電圧を 8kV 一定とした場合, 周波数 250Hz 付近 (周期 4ms) の領

域で急激に低下することがわかった。しかしながら、図 4 に示すように、周波数増加に伴う N_{BD} の低下の要因として、空気ギャップにおける部分放電特性の変化は考えにくい。そこで、繰り返し周期がこの絶縁系の破壊に影響する要因として試料の温度上昇が関与しているものと考えた。このことを確認するため各周波数における試料の温度分布を熱像を用いて観測を行った。印加する繰り返し方形波パルス（電圧 8kV）の周波数を 400Hz とした場合の試料熱像を図 5 に示す。周波数が高い領域（約 100Hz 以上）では、図 5 に示すように、針電極直下、直径約 1mm の範囲で試料温度上昇が見られた。この結果の場合、試料温度の最も高い領域における指示値は、約 49.8℃ となった。なお、ここで示す温度はポリエチレン（PE）の放射率 0.1 で校正された温度である。

図 6 に各周波数における試料熱像観測から求めた試料温度上昇を示す。周波数 200Hz 付近から試料温度上昇が顕著となっていることがわかる。また、図 6 には、印加した方形波パルスの電圧を 8kV 一定とした場合の N_{BD} の周波数依存性をも併記する。これより、試料温度上昇が顕著となる周波数領域と、 N_{BD} に約 3 桁ほどの低下が見られる周波数領域がほぼ一致していることがわかる。従って、この絶縁系における寿命特性には、高周波電圧が印加される場合、部分放電による試料温度上昇が影響していると考えられる。

〈3・4〉 熱像の解析^{(5)~(8)(10)(11)} 図 6 より、試料温度上昇が顕著となる周波数領域と、 N_{BD} に約 3 桁ほどの低下が見られる周波数領域がほぼ一致していることから、この絶縁系における寿命特性には、高周波電圧が印加される場合、部分放電による試料温度上昇が影響していると考えられた。そこで、この熱影響の解析を行なった。電圧印加中に熱像を観測したところ、図 5 に示すように針電極直下直径約 1mm の範囲に温度上昇が見られた。この値はフィルム厚さより十分大きいので、フィルム中央部の温度上昇の解析に用いる熱的条件は 1 次元で近似しても問題がないと考えた。空気ギャップの部分放電は文献⁽⁹⁾をもとに幅 50ns とし、放電電荷量の実測値 13,000pC および印加電圧 8kV より、1 発当たり約 100μJ のエネルギーがフィルム表面に与えられるとした。また温度分布を勘案し、このエネルギーが直

径 0.6mm の領域に集中すると仮定した。フィルムの熱抵抗率は 4.0m・K/W、比熱 1.3J/g・K、常温常圧の空気に対する表面放散熱抵抗率 2.9×10^{10} K/W・m²、ポリエチレンの放射率 0.1、蒸着金属の放射率 1 とし、試料厚さ方向の各部分の温度解析を行った。下部電極の熱拡散率はポリエチレンのそれに比較して十分大きいので、下部電極は常時常温に保たれているものとした。解析に用いた熱等価回路を図 7 に示す。試料温度分布を得るために、熱等価回路を試料厚さ方向に 10 分割し、各部の温度の経時変化を数値計算により求めた。

印加した繰り返し方形波パルスの周波数を 100Hz（周期 10ms）、500Hz（周期 2ms）とした場合における、試料表面温度および試料中心部温度の経時変化の解析結果を図 8 に示す。図 8 より、試料表面温度および試料中心部温度は空気ギャップにおける部分放電が与える熱パルスにより上昇し、この絶縁系の熱時定数（熱等価回路を用いた計算により約 4ms（熱容量×熱抵抗）と計算される）に従って減衰することがわかる。従って、印加電圧の繰り返し周期が絶縁系の熱時定数に比べて短くなると、蓄積的に試料温度が上昇し、少ないパルス印加回数でこの絶縁系全体の破壊に至ると示唆される。

図 6 周波数における試料熱像観測から求めた試料の温度上昇特性

Fig. 6. Sample temperature rise properties from thermograph in various frequencies.

図 5 400Hz 印加時の熱像
Fig. 5. Thermograph at 400Hz.

図 7 熱等価回路
Fig. 7. Thermal equivalent circuit.

図 8 試料表面温度および試料中心部温度の経時変化の解析結果（繰り返し方形波パルスの周波数 100Hz, 500Hz）

Fig. 8. Time dependence of estimated results of surface and center temperature of sample (frequencies of repetition wave pulses: 100Hz & 500Hz)

一方、前項で示した熱像が示す温度（図 5 および図 6）は系からの放射エネルギーの総和の関数で与えられる。微小厚さ dx を有する PE からの放射を $\eta'k_B(T(x)^4 - T_0^4)dx$ 、測定波長域（8～13 μ m）での PE の吸光係数 $\alpha = 0.095[1/\text{mm}]^{(6)}$ とすると、背面に金を蒸着した温度分布 $T(x)$ を有する厚さ d の PE からの放射強度 I は以下の式で求められる。

$$I = \int_0^d \eta'k_B(T(x)^4 - T_0^4)\exp(-\alpha x)dx + \eta''k_B(T(d)^4 - T_0^4) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、上式の右辺第 2 項は金面での放射エネルギーであり、これは実験結果より無視できることがわかっている。熱像は均一温度場に置かれた半無限厚の PE における見かけの放射率 $\eta = 0.1^{(6)}$ で校正されている。従って、完全黒体の放射強度を I_0 とすると、この放射率 η は次式で表される。

$$\eta = \frac{I}{I_0} = \frac{\int_0^\infty \eta'k_B(T^4 - T_0^4)\exp(-\alpha x)dx}{k_B(T^4 - T_0^4)} \dots\dots\dots (2)$$

上式において、 η' だけが未知数となっており、これを求めることができる。 η' を式 (1) に代入し、各時刻における試料温度分布から求められる放射エネルギーの総和から熱像の原理に従って温度に変換すると、計算された試料温度分布において、熱像が示すべき見かけの表面温度を算出することができる⁽⁶⁾。このようにして求めた試料温度上昇の解析結果を図 9 に示す。図 9 は各周波数における試料熱像観測から求めた試料温度上昇および印加した方形波パルスの電圧を 8kV 一定とした場合の N_{BD} の周波数依存性を合わせて併記する。図 9 より解析によって求めた試料温度上昇と各周波数における試料熱像観測により求めた試料温度上昇はほぼ一致することがわかる。従って、この解析によって求められた試料温度分布は妥当であることが示された。

図 9 周波数における試料熱像観測から求めた試料温度上昇特性

Fig. 9. Sample temperature rise properties from thermograph in various frequencies.

以上より、気体—固体複合絶縁系において、印加された繰り返し方形波パルスの繰り返し周期と PE の熱時定数の大小関係により、絶縁系への熱影響の有無が決定されることから、印加電圧の繰り返し周期がこの絶縁系の寿命特性に影響を与えると示唆された。

4. まとめ

本報告では、空気ギャップの放電を介した LDPE フィルムにおける絶縁破壊特性の解明を目的とし、1 サイクル当たりの放電回数および放電の大きさを揃えた繰り返し方形波パルスを印加した実験を行なった。さらに交流の繰り返し周期が絶縁系の破壊に及ぼす影響が試料の温度上昇と関連していると考え、試料温度分布の熱像観測により試料温度上昇の数値解析における結果の妥当性を熱像観測結果との一致をもとに証明した。主な結果を以下にまとめる。

- (1) 繰り返し方形波パルスを印加した実験を行なった結果、この絶縁系における絶縁破壊特性は、印加する方形波パルスの電圧および周波数に影響されることがわかった。
- (2) 空気ギャップにおける部分放電特性および試料熱像の観測結果より、寿命特性が変化する周波数領域において、部分放電特性は変化せず、試料温度上昇が生じていたことから、この絶縁系の破壊に影響する要因として気中放電による蓄積的な試料温度の上昇が考えられる。
- (3) 試料を近似した熱等価回路を用いて、気中放電による熱影響の解析を行なった結果、熱像観測より得られた試料温度上昇とはほぼ一致した。解析で求めた試料温度分布は試料表面に与える熱パルスにより上昇し、絶縁系の熱時定数に従って減衰していることから、上記 (2) の結果を支持しているものとなった。

尚、本研究の一部は、文部科学省科学研究補助費および中部電力基礎技術研究所研究助成の援助によって行われた。

（平成 14 年 7 月 2 日受付，平成 14 年 11 月 21 日再受付）

文 献

- (1) M.Nagao, M.Nakahara, M.Sugio, Mt. Daniel, N. Zainuddin, and M.Kosaki : "Dielectric Breakdown of Low Density Polyethylene Film Subjected to Partial Discharge in Air Gap", Proc. of 1998 ISEIM, C1-2, pp.425-428 (1998)
- (2) 橋本真一・松村弘美・村上義信・穂積直裕・長尾雅行 : 「LDPE フィルムの絶縁破壊と空間電荷形成に及ぼす部分放電劣化の影響」, 平成 12 年度電気関係学会東海支部連合大会, No.232, p.116 (2000-9)
- (3) S.Hashimoto, K.Tada, N.Hozumi, and M.Nagao : "Effect of Frequency on Breakdown of Low-Polyethylene Film with a Air-Polyethylene Composite Insulation System", National Convention Record, IEE Japan, No.2-120, p.574 (2001) (in Japanese)
橋本真一・多田勝也・穂積直裕・長尾雅行 : 「気体 - 固体複合絶縁系における LDPE フィルムの交流絶縁破壊に及ぼす周波数の影響」, 平成 13 年電気学会全国大会, No.2-120, p.574 (2001-3)
- (4) 橋本真一・多田勝也・村本裕二・穂積直裕・長尾雅行 : 「繰り返し方形波パルスによる気体 - 固体複合絶縁系の絶縁破壊機構」, 平成 13 年度電気関係学会東海支部連合大会, No.251, p.126 (2001-9)
- (5) 栗野誠一 : 伝熱工学, pp.156-189, 山海堂 (1964)
- (6) 高分子分析ハンドブック, 朝倉書店 (1985)
- (7) 架谷 : 最新伝熱計測技術, ㈱テクノシステム (1986)
- (8) 飯野 : 赤外法による計測技術, オーム社 (1973)
- (9) Choong-Sik Kim, Y.Tani, and T.Mizutani : "Investigation of Aging Process with New PD Pulse Patameters", Proc. of 2001 ISEIM, P1-11, pp.123-126 (2001)
- (10) 西川兼安・藤田恭伸 : 機械工学基礎講座 伝熱学, 理工学社 (1989)
- (11) 文部科学省国立天文台編 : 理科年表 2002, 丸善 (2002)

村 本 裕 二

(正員) 1967 年 10 月 2 日生まれ。1995 年 3 月豊橋技術科学大学博士後期課程修了。博士(工学)。1995 年 4 月豊橋技術科学大学・電気電子工学系助手, 現在に至る。主として高分子の高電界電気特性および部分放電劣化現象に関する研究に従事。IEEE 会員。

橋 本 真 一

(学生員) 1977 年 11 月 23 日生まれ。2002 年 3 月豊橋技術科学大学大学院修士課程(電気・電子工学専攻)修了。主として高分子の高電界電気特性および部分放電劣化現象に関する研究に従事。現在, 日本特殊陶業㈱に従事。

穂 積 直 裕

(正員) 1957 年 4 月 2 日生まれ。1983 年 3 月早稲田大学大学院工学研究科博士課程前期修了。工学博士。同 4 月(財)電力中央研究所入所。1999 年 4 月豊橋技術科学大学電気・電子工学系助教授, 現在に至る。主として高分子のトリッキング現象ならびに部分放電劣化現象に関する研究に従事。1989 年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。

長 尾 雅 行

(正員) 1950 年 4 月 16 日生まれ。1978 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期修了。工学博士。同 4 月名古屋大学助手を経て, 1980 年 4 月豊橋技術科学大学電気・電子工学系講師, 1985 年 4 月助教授, 1998 年 4 月教授, 現在に至る。この間 1980 年 11 月から 1982 年 7 月, 西ドイツ・アレキサンダー・フォン・フンボルト財団の援助によりブランシュバイク工科大学にて在外研究(高分子の部分放電劣化現象)。主として高分子の高電界電気物性・絶縁劣化現象に関する研究に従事。1991 年電気学会論文賞受賞。応用物理学会, IEEE, CIGRE, 低温工学協会会員。