サイリスタを用いた放電回路の不規則点弧 におけるコンデンサ性能の影響

正員 宮入 圭一 正員 伊東 栄次 学生員 森光 紀匡 (信州大学)
正員 石川 真 正員 萩原 勝夫 (新電元工業株式会社)

Influence of Capacitor Properties on the Irregular Ignition of Discharge Circuit Using Thyristor

Keiichi Miyairi, Member, Eiji Itoh, Member,
Norimasa Morimitsu, Student Member (Shinshu University)
Makoto Ishikawa, Member, Katsuo Hagiwara, Member (Shindengen Kogyo Co.Ltd)

A misfire phenomenon taking place in a discharge circuit composed of a capacitor and a thyristor has been investigated. This circuit was operated at a frequency up to 198Hz. A misfire was observed in a circuit with a PET capacitor at low temperatures, while no misfire was observed with a PP capacitor at any conditions. Transient currents in the range of 40A-1mA were measured with a digital oscilloscope. In case of a PET capacitor, the current decreases exponentially at a given time constant initially, however it shows a slow decay which causes the misfire. This current is associated with residual charges trapped in the bulk of PET film.

キーワード：コンデンサ、サイリスタ、残留電荷、放電電流、失火

1. まえがき

コンデンサの充放電を利用した電気回路はスイッチングレギュレータとして DC-DC コンバータに、またインダクタンスと併用して得られる高電圧による火花を利用した点火装置に応用されている。このくりかえしの充放電の制御にはトランジスタあるいはサイリスタが用いられている。サイリスタ方式は簡便であり、コストの低下、機器の小型化になり、大きなメリットがある。しかしながら、サイリスタの遮断は保持電流以下になって初めて可能であり、放電電流の時間特性が設計上重要な因子となる。コンデンサの放電特性は誘電材料の特性が微妙に影響し、単に回路定数としての CR 放電回路では正確には説明できないことが指摘されている^{(1), (2)}。本研究では、サイリスタを用いたコンデンサ放電回路の不安定性について詳細に調査し、そ

の原因を明らかにしたものである。

2. 実験方法

本研究では、実用状態のことも念頭に置き、二輪車用点火装置として用いられている回路を基本とした図1のような回路を作製した。この放電回路には $1\mu\text{F}$ のコンデンサとして、フィルムコンデンサの中からポリエチレンテレフタレート (PET) コンデンサとポリプロピレン (PP) コンデンサを選択した。PET コンデンサは PET の誘電率が PP のものより大きいので小形となり、実用上は実装体積が減少しメリットがある。この回路を用いたサイリスタ 3P4 MH (NEC 製) の諸特性を表1に示した。表に示されているようにサイリスタの保持電流は約 1mA であり、放電電流がこの電流値より減少すればサイリスタが遮断される。

また、転流ターンオフ時間は $80\mu\text{s}$ である。市販の電流プローブでは電流検出感度が不十分であり、ここでは、放電回路の電流は直列に挿入した 1Ω の抵抗 $R1$ の電圧降下をデジタルオシロスコープ HP54610B にて測定した電圧から求めた。

図1 測定回路図 (CDI)

Fig.1. Electrical circuit for the measurement of current in a circuit composed of a thyristor and a capacitor.

表1 サイリスタ 3P4MH(NEC 製)の諸特性

Table 1. Electrical characteristics of thyristor 3P4MH(NEC-made).

項目	規格			単位
	MIN.	TYP.	MAX.	
オン電圧	—	—	1.6	V
ゲートトリガ電流	—	—	50	μA
ゲートトリガ電圧	—	—	0.8	V
保持電流	0.9	—	1.3	mA
転流ターンオフ時間	—	80	—	μs

3. 実験結果

3.1 正常な動作時の充放電電圧波形

後に述べる異常な場合との比較を明確にするために、正常な場合の回路動作を確認しておく。発振器から周波数 185Hz の駆動パルスを入力し、図1のX点でコンデンサの充電電圧を、またZ点でサイリスタのゲートに入力されるトリガーパルス波形を観測した。その結果を図2に示した。この図から、トリガーパルスが入力されるとサイリスタが導通となりコンデンサのX点の電位が接地電位となること明らかである。放電が終了し、サイリスタが遮断されると、再び充電が開始されコンデンサの充電端子 (X点) の電位が上昇する。このくりかえし波形は駆動パルスの周波数に応じて変化し、しかも室温においては PET コンデンサおよび PP コンデンサいずれの場合も全く同様であった。

図2 常温におけるコンデンサの充電電圧とトリガーパルス

Fig.2. Voltage profiles of a capacitor and trigger pulses.

3.2 異常な動作時の充放電電圧波形

コンデンサのみを冷却し、図1の場合と同様に、駆動パルスを入力し、回路動作を調べた。図3(a)にはPPコ

(a) PP Al 電極

(b) PET Al 電極

図3 低温におけるコンデンサの充電電圧とゲートパルス(-77°C)

Fig.3. Voltage profiles with a PET capacitor and a PP capacitor at low temperature (-77°C).

ンデンサを用いた場合を示した。低温においても室温の場合と全く同様に正常に働いている。ところが、PETコンデンサでは、図3(b)に示したように0.005-0.01sの間にコンデンサの充電が行われていない。このため、0.01sにゲートにパルスが入力されても放電電流を流すことができない。すなわち、点火プラグに火花を発生させることができない。本論文ではこの状態を“失火”と呼んでいる。図3(b)に示したのは、この失火が不規則に行われる場合の一部を示したものであり、失火と点火が必ずしも交互に行われるとは限らない。

3.3 放電電流波形

サイリスタが点弧した際に回路に流れる電流波形を図4に示した。電流の立ち上がり部分が正弦波の一部のようにみえるのは、放電回路の構成がコンデンサとインダクタンスからなる共振回路にながれる電流のためである。電流のピーク以降は、ダイオードDの働きにより、インダクタンスの電位上昇が抑えられ電流が急激に低下する。さらに電流が負の値を示しているのは、サイリスタの転流ターンオフ時間が $80\mu\text{s}$ であり、これ以下の時間ではサイリスタが

図4 主放電電流波形

Fig.4. Waveform of a discharge current.

図5 放電電流波形

Fig.5. Small discharge currents observed after main discharge current.

遮断されず逆方向電流も流れてしまうためである。

前述の失火が発生するのはコンデンサに充電されないためであり、図1でサイリスタが点弧中であることがその原因である。サイリスタの順方向電流が遮断されるのは保持電流より小さくなって、即ち放電電流が約1mA以下になった時である。図4の大きな放電電流（主放電電流と呼ぶ）が低下した後の電流を拡大すると、図5のような数10mAのくり返しパルス電流（副放電電流と呼ぶ）が流れていることが認められる。この副放電電流には100mAのピークをもつ長い周期の振動も含まれる。また、図4に比べ長時間のレンジで観測したため、うまく観測されていないが、副放電電流の直前のパルス電流は主放電電流である。すなわち、主放電の大きなピークがオシロのトレースに見られていないのは、時間軸を圧縮して観測しているためである。PPコンデンサおよびPETコンデンサをもちいて、温度を 20°C から -77°C まで変化させてもこの電流波形に変化は認められず、失火の生じないPPコンデンサの場合も見られるので、失火に影響を及ぼすものではないと考えられる。この副放電電流は、ダイオード、サイリスタの働きにより抑えられた回路の振動電流の一部であると考えられる。

3.4 失火時に観測される放電電流パルス列

失火時の電流波形を詳細に調査したところ、失火が生じている時には必ず図6に示すようなパルス状の電流が流れていることが見出された。ここで図中の $t=3.0\text{ms}$ と $t=17.0\text{ms}$ 付近に見られる振動電流波形は副放電電流の一部である。このパルス列はゲート入力パルスの1周期以上にわたっていることもあり、その長さは必ずしも一定していない。また、パルスの大きさ自身もやや不規則で、一定ではなく $0.3\sim 0.5\text{A}$ 程度である。図7には、この電流パルスを拡大したものを示した。回路の基本構成がCとLであるから、振動波形を想像し易いが、この波形はその可能性を否定し、コンデンサと抵抗からなる放電回路に生ずる電

図6 失火時の放電電流波形

(PET Al電極 142Hz -77°C)

Fig.6. A pulse train observed on misfire

(PET Al electrode 142Hz -77°C).

流波形に極めて類似している。また、このパルスのくりかえし周波数はおよそ 3kHz であり、CDI 回路の駆動に用いている周波数は約 200Hz であり、この信号の周波数とは無関係である。上記の放電パルス列の電流が流れ続けるために、サイリスタが遮断されず、結果としてコンデンサへの充電が行われないのか、たまたま、失火したためにこの波形が観測されたのか明確にする必要がある。そこで、サイリスタのアノードとカソードを短絡し、その短絡線に流れる電流波形を観測した。その結果は、図 8 に示したように、図 7 に示した波形と極めて良く似た波形であり、その周波数もほとんど一致している。この波形の源は、充電回路側に用いられている回路内に常時発生している信号波形である。また、この信号波形は、観測する放電電流がサイリスタの保持電流以上を保つと同時に、その値を観測できるレンジを使用した場合に観測されるものであり、PET コンデンサのときのように、数 ms に渡って上記のような状態が続くときにはトランスを介して二次側に誘導され、高感度で観測する際にみられるものと解釈される。一方、PP

図7 図6の拡大図

Fig.7. Enlarged current waves of a pulse train in fig.6.

図8 Anode-Cathode 間に流れる電流波形

Fig.8. Current waves observed on short-circuiting the thyristor.

コンデンサの場合は、この状態を短時間のうちに通過し速やかにサイリスタが遮断されるため、放電回路がオープンとなり、この波形は観測されない。この波形は、電圧増幅部で発生しているものであり、回路上 PP コンデンサの場合も同様に効いているはずであり、これが失火への直接的原因とは考え難い。

4. 検討

失火が PET コンデンサで発生し PP コンデンサでは発生しないことから、C、L、R を線形部品として、またサイリスタ、ダイオード等を単純な回路要素として考えたのではこの現象は説明することはできない。そこで、(1) 温度の影響、(2) 保持電流との関係および (3) コンデンサの性能との関係の 3 点から検討する。

4.1 温度の影響

ここではコンデンサの温度のみ変化させて実験を行った。駆動パルスの周波数が高いほど失火が起り易く、低温になれば、失火する周波数が低下する。この温度に依存することはコンデンサに使われている PET の電気物性と何らかの関連があることを意味している。

4.2 保持電流値との関係

図 1 に示したサイリスタのゲート入力回路の抵抗 R2 を大きくすると等価的に保持電流を低下させることができる⁽³⁾ことが知られている。そこで、R2 の抵抗を 2KΩ から 20KΩ に増加させて回路動作を調査した。この抵抗が 2KΩ のときは -20℃ 以下でないと失火が生じなかったが 20KΩ では -5℃ でも失火が発生した。

4.3 コンデンサの性能との関係

図 1 のような実用の回路では、インダクタンスが加えられていることと、失火状態が不規則に発生するので、コンデンサの放電電流を測る目的の場合、この回路のままで電流を観測するのは実験として非能率的である。そこで、コンデンサ、サイリスタ及び放電抵抗によって構成されたモデル回路を作成し、コンデンサの性能を評価した。このモデル回路を用いた単発の放電電流を解析するには、放電直後からある時間範囲にわたって電流の時間変化を測定しなければならない。今回のように、放電電流が放電直後の数十アンペアからミリアンペアの広い範囲にわたってマイクロ秒のオーダーで変化する過渡電流であり、しかも不規則的に発生する現象である場合には、その電流を測定するのは容易ではない。ここでは、デジタルオシロスコープ (HP54610B : 500MHz) をオーバースケールの状態で使用した。何回か現象が起っているときに、よいタイミングで捉えられた場合の波形を図 9 に示した。不規則な現象なので分解能を高めて測定することは難しく、図 9 のよう

に粗い曲線となった。特に、図 9 (a) では $60 \mu\text{s}$ 以上の時間領域の電流が測定されていないが、PET コンデンサと PP コンデンサ間の違いは明白である。この測定結果が材料の本質を示している現象として正しいか否かを確認するために検出抵抗を 5Ω から 200Ω にかえた場合の測定波形も図 9 (b) に示した。これらの図から分かるように、PET の場合は、 -77°C の電流は 20°C の場合より大きく、数十 mA 以上の電流が $60 \mu\text{s}$ においても流れている。この電流はサイリスタの保持電流 1 mA をはるかに超えており、サイリスタを遮断できない原因になっていると考えられる。これは、PET のような、有極性コンデンサでは放電時に電荷が完全に放電せず残留し⁽⁴⁾、この残留電荷が電流を流し続けて、ゲートパルスとは無関係にサイリスタを消弧させないためであると考えられる。

図 9 コンデンサの短時間放電電流特性、充電電圧 230V
Fig.9. Short time discharge currents in PP capacitor and PET capacitor at various temperature, capacitors are charged with dc 230V.

上記のようなモデル回路の場合、スイッチとしてサイリスタを用いているため、オフ状態電流などのサイリスタの諸特性を考慮する必要があり、詳細な放電電流を評価するのが困難である。そこで、コンデンサの短時間放電電流を

図 10 コンデンサの短時間放電電流特性、充電電圧 230V
Fig.10. Short time discharge current in a PET capacitor charged with dc 230V.
Series resistance: 200Ω

詳細に観測するために、上記のモデル回路のサイリスタを単純なスイッチに変更し、電流を測定した。また、微少な放電電流を観測するためにオペアンプによる増幅回路を用いて測定を行った。コンデンサの温度を -77°C から 50°C までの範囲で測定した結果を図 10 に示した。これらの特性は、 1.5 ms を境にして急激に低下する温度に依存しない短時間領域と温度によって傾斜が異なる長時間領域に分けられる。この短時間領域は、コンデンサの容量 $1 \mu\text{F}$ と放電抵抗 200Ω の積で決まる時定数に応じて低下している。長時間側では、低温ほど減少が緩やかであり、コンデンサに蓄積された電荷は、低温では短絡しても放出に時間が必要であることを示している。このような非線形な現象は、コンデンサを単純に C のみとして考えたのでは説明できない。そこで、図 11 に示すような、コンデンサの等価回路を用いて放電を 2 つの領域に分けて考察する。通常のコンデンサは、漏れ抵抗が十分大きいので、ここでは無視している。また、時定数 $C_1 R_1$ はコンデンサの容量 $1 \mu\text{F}$ と放電抵抗 200Ω の積で決まる時定数より大きく、 R_1 は 200Ω の放電抵抗

図 11 コンデンサの等価回路図
Fig.11. Equivalent circuit of capacitor.

より十分大きいと考えられる。すなわち、放電が時定数 CR よりも長時間化する領域では放電抵抗の影響を無視することができる。まず、1.5ms までの線形な領域では、幾何容量 C_0 と 200 Ω の放電抵抗によって決まる放電電流が支配的であり、この時点では、 C_1R_1 の放電電流は微小であるため埋もれている。しかしながら、1.5ms 以降の非線形な領域では、時定数の長い C_1R_1 の放電電流が支配的となることが、この等価回路から推察される。このように考えると図 10 の実験結果が説明できる。なお、このことは、数十 ms 領域で測定した前報の結果⁽¹⁾とも同じである。実測値長時間領域の電流は、詳細には、 C_1R_1 の時定数をもつ単一の緩和で表現し切れず、複数の緩和時間をもつ特性を示している。PET では主鎖にケトン基 ($-C=O$) をもち、双極子の起源となっていることが知られているが、実際には双極子の大きさが高分子物質では分布しており、緩和時間も分布している。また、このような双極子の周辺には電荷もトラップされやすいことも考えられ、これらの反映が放電電流の緩和時間の分布と密接に関係していると考えられる。

5. あとがき

サイリスタとコンデンサからなる放電回路において、ゲートにトリガーパルスを入力しても正しく点弧しない現象が認められた。この現象は PP のような無極性コンデンサを用いた場合に発生せず、PET のように有極性コンデンサを用いた場合に起る。供試回路においては、回路自身の回り込みノイズの影響を避けられないが、PP コンデンサ使用時にはそれが誤動作に結びつくことはない。これに対し、PET コンデンサ使用時には低温で放電時定数が等価的に増加することにより、このことが回り込みノイズによる誤動作を誘発する原因となることを示した。しかしながら、本研究の結果は、サイリスタ放電回路のみならず、コンデンサを回路素子として用いる際には、材料物性が微妙に反映する電気的特性をも十分考慮した上で設計すべきであることを示している。

(平成 11 年 7 月 23 日受付, 同 12 年 2 月 23 日再受付)

文 献

- (1) 宮入、小林、石川、萩原 電子情報通信学会 J78-C-II 387-389 (1995)
- (2) N. Hagiwara and T. Saegusa IEEE. Trans. EI Instr&Meas IM-32 315-321 (1983)
- (3) サイリスタハンドブック (丸善)
- (4) 宮入、矢沢 電子情報通信学会 J68-C 117-123 (1985)

宮入 圭一

(正員) 1943 年 5 月 22 日生まれ。72 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。94 年 4 月信州大学工学部教授、現在に至る。固体誘電体の電気物性、特に薄膜の高電界現象に関する研究に従事。70 年電気学会論文賞。応用物理学会、高分子学会、電子情報通信学会。

伊東 栄次

(正員) 1969 年 7 月 7 日 生まれ。98 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。現在、信州大学電気電子工学科助手。工学博士。主として、有機超薄膜の界面電子物性に関する研究に従事。電気学会、応用物理学会会員。

森光 紀匡

(学生員) 1975 年 11 月 12 日 生まれ。98 年 3 月信州大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月信州大学大学院工学系研究科博士前期課程入学。現在に至る。

石川 真

(正員) 1962 年 10 月 1 日 生まれ。86 年 3 月。東洋大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月新電元工業 (株) 入社。主として自動車用電装品の回路設計に従事。現在、電装事業部設計部主事。

萩原 勝夫

(正員) 1944 年 2 月 28 日 生まれ。65 年 3 月。信州大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月新電元工業 (株) 入社。主として自動車用電装品の品質保証業務に従事。現在、電装事業部品質保証部部長。工学博士。