逆極性並列接続した真空トリガギャップの始動特性

正員 板垣 厚一 (新潟大学)

非会員 ハザイリン サマウラ (新潟大学)

正員 駒津 貴 (新潟大学)

正員 菅原 晃 (新潟大学)

正員 喜多村 博 (新潟大学)

Switching Characteristics of Parallel Connected Triggered Vacuum Gaps
with Reverse Polarity in Each GapKouichi Itagaki, Member, Hazairin Samaulah, Non-Member, Takashi Komatsu, Member,
Akira Sugawara, Member, Hiroshi Kitamura, Member (Niigata University)

The switching characteristics of parallel triggered vacuum gaps (TVGs) were investigated experimentally. Since the switching characteristics of a single TVG were strongly influenced by main voltage polarity in which (P) mode (the trigger was put in the cathode of main electrodes) gave short switching time and (Q) mode (the trigger was put in the anode of main electrodes) gave long switching time, we arranged two TVGs in parallel in which the trigger was located in the anode and the cathode of each gap for nullifying or reducing main voltage polarity effect.

The switching time of parallel TVGs was similar in case of a single TVG of (P) mode. The switching probabilities of parallel TVGs were strongly influenced by variations of gap length and trigger current when either of TVGs did not fire in the case that main gap length was longer than 3 mm and trigger current was less than 10.7 A.

キーワード：逆極性並列接続，真空トリガギャップ，始動時間，極性効果

1. まえがき

高電圧工学，電力工学，高温プラズマ工学等多くの分野において，コンデンサ放電によるインパルス電圧・電流がよく用いられている。この場合，インパルス電圧・電流制御用ギャップスイッチが重要な役割をはたしている。

例えば，気中トリガギャップ^{(1), (2)}は，絶縁破壊電圧に近い主電圧に対しては，非常にすぐれた始動特性を示す。しかし，主電圧が低下するに従ってその始動特性は急速に悪くなり，絶縁破壊電圧の30%程度の主電圧ではギャップの始動が不可能になる。

真空トリガギャップ⁽³⁾は，気中トリガギャップと比較して，次の利点がある。(1) 始動特性がよい。すなわち，1～数10kVの広範囲の主電圧で始動時間が0.5μs程度以下の一定値に保たれる。(2) 真空アーク電圧は20V程度と低いので，通電時の損失が少ない。(3) 電流零点後の主電極間の絶縁回復が速いので，繰り返し頻度の大きい用途^{(4), (5)}にも適している。(4) 主電極間で大電流放電

を行うと轟音を発生するが，真空トリガギャップは，静かである。(5) 主電極間距離が1mmでも10kV程度の絶縁耐圧をもつので，小形化できる。

短所としては，主電極間に印加する電圧極性によって，始動時間が著しく異なることである^{(6)～(11)}。陰極側からトリガする方が，陽極側からトリガするよりも始動時間は短い。これを，始動時間の極性効果と称することにする。

真空トリガギャップの始動は，次のように考えられる。トリガ放電によってプラズマが主電極間に生成され，主電極間電界や密度勾配による拡散により荷電粒子が移動する。このとき電子やイオンが中性ガス分子や電極に衝突し電極間プラズマ密度を増大させ，主電極間の絶縁破壊を引き起こし，主放電を誘発し，真空トリガギャップが始動すると思われる。

陽極側からトリガした場合，トリガ電極から放出された電子は陰極への進展を抑えられてしまう。つまり，正イオンは陰極側へ移動するが，質量の軽い電子は負のポテンシャル障壁で押し返されることになる。そこで，イオンは両

極性拡散ではなくドリフト速度程度のゆっくりした速さで移動することになる。このため主電極間の放電チャンネルの形成が遅くなり、その結果として始動時間が遅くなり、始動しにくくなると考えられる。

陰極側からトリガした場合には、主電極によるポテンシャル障壁はなく、トリガ放電により生じたカソードスポットがそのまま主放電のカソードスポットになるなどの理由から、始動時間が速く、始動が容易になるものと思われる。

真空トリガギャップを回路に組み込んで使用する場合、印加電圧極性が分かっている場合には、始動時間が短くなる電圧極性を選択しておけば問題はない。しかし、印加電圧極性が不明の保護ギャップ装置などに応用しようとする、始動時間が長くなる可能性もあり具合が悪い。この点を改善するために、著者らは、

(1) 2個の真空トリガギャップを直列接続する。

(2) 陰極と陽極の両電極にトリガ電極を取り付ける。の2つの方法について検討してきた。(1)は、極性効果ができるだけ少なくなるように2個の真空トリガギャップを接続するものである。著者らの実験⁽¹²⁾では、始動時間は長くなるが極性効果のある程度軽減できることを示した。

(2)では、極性効果が無く、始動時間が0.5 μ s程度の値が得られた⁽¹³⁾。しかし、電極構造が複雑で、主電極間距離を変えることには、困難を伴う。

(1)、(2)とは別の方法として、真空トリガギャップを逆極性並列接続することが考えられる。この場合、主電極間の印加電圧極性にかかわらず、始動特性のよい陰極側からトリガするギャップが先に始動するので、始動時間の極性効果が減少することが期待される。

真空トリガギャップを同極性で並列接続したときの始動特性については、著者らはすでに検討した。この場合には、単体ギャップと同様の特性を示す。また、陰極側からトリガした始動しやすい電圧極性の場合の各ギャップを流れる電流は、平等に分流されるをすでに明らかにした⁽¹⁴⁾。しかし、逆極性並列接続した真空トリガギャップの始動時間、各ギャップを流れる電流などについては、ほとんど不明である。

本研究では、逆極性並列接続した真空トリガギャップの始動特性について実験的に検討した。その結果、逆極性並列接続した真空トリガギャップの始動時間は、主電圧10~20kV、トリガ電流59Aで、約0.4 μ s一定値を示した。この値は、始動特性が良好な陰極側からトリガした単体ギャップの始動時間に近いことを明らかにした。

2. 実験回路と実験方法

真空トリガギャップ(以下、TVGと略記する)を陰極あるいは陽極側からトリガする場合に、トリガ電極の電圧印加極性により、4通りのモードがある。しかし、陰極あるいは陽極側からトリガする場合の始動特性に比較して、トリガ電極印加電圧が正あるいは負極性であっても、始動特

図1 単体真空トリガギャップの接続方式

Fig. 1. Four mechanical connection modes of a TVG with positive trigger pulse.

性には大きな影響を及ぼさないことが知られている⁽²⁾。そこで、本研究では、トリガ電極印加電圧を正極性にして

いる。トリガ電極に正極性の電圧を印加した時の、TVGの接続方式を図1に示す。(P)と(S)モードは陰極側からトリガするもので、始動特性は(Q)、(R)モードの場合よりは良い。(P)と(S)モードは、ほぼ同程度の始動特性をもつ。(Q)、(R)モードは、陽極側からトリガするもので、始動特性は悪く、(Q)、(R)モードは、ほぼ同程度の始動特性をもつ⁽¹³⁾。ここでは、(P)と(Q)モードを並列接続する。

実験に使用した真空トリガギャップの概略を図2に示す。以前に使用したものと同形の封じ切り形⁽¹²⁾のものである。絶縁容器は外径83mm、長さ200mmの円筒状のアルミナで構成。図4(a)は、トリガコンデンサ $C_t = 0.003 \mu F$ を、トリガコンデンサ充電電圧 $V_t = 15kV$ にして、トリガ抵抗 $R_t = 270 \Omega$ とパルストランスを介して、放電させたときのTVG1のトリガ電流波形である。図4(b)は、トリガコンデンサ $C_t = 0.5 \mu F$ を、トリガコンデンサ充電電圧 $V_t = 20kV$ にして、トリガ抵抗 $R_t = 350 \Omega$ を介して、放電させたときのTVG1のトリガ電流である。

図2 真空トリガギャップの概略図

Fig. 2. Schematic diagram of triggered vacuum gap.

図3 実験回路

Fig. 3. Experimental circuit of parallel TVGs.

(a) 継続時間の短いトリガ電流

(b) 継続時間の長いトリガ電流

図4 トリガ電流波形の一例

Fig. 4. Typical examples of trigger current.

筆者らの実験によると、トリガ電流の継続時間が長く、電流値の大きいトリガほどTVGの始動特性が良好である。主電流波形の観測と始動確率の測定には、TVGが動作しない場合も必要なので、図4(a)のトリガ電流を使用した。また、始動時間の測定では、TVGが始動していることが必要なので、図4(b)のトリガ電流を使用した。

主コンデンサCmの充電電圧は4.0～30kVの範囲であり、トリガコンデンサCt充電電圧は15～20kVの範囲である。TVG1とTVG2の各々を流れる電流 I_1 、 I_2 と主電流 I_3

はシャント抵抗 R_{SH1} 、 R_{SH2} と R_{SH3} で、トリガ電流波形はロブスキーコイルで検出し、積分回路を通しオシロスコープで観測した。

各コンデンサの充電時間、トリガ投入のタイミングなどを制御して、20秒に1回の割合で繰り返し放電を行った。

3. 実験結果と考察

<3.1> 主電流波形 主電圧を変化させたときの主電流波形の一例を図5に示す。図5(a)は主電圧 V_m が4.3kVと低い場合で、陰極側からトリガするTVG1のみが動作して、陽極側からトリガするTVG2は始動していない。TVG1の電流 I_1 と主電流 I_3 は半波である。図5(b)は、TVG1とTVG2を流れる電流 i_1 と i_2 が半サイクル毎に流れている。 I_3 は、減衰振動電流で、10サイクル継続している。図5(c)では、TVG1とTVG2の電流が途中で、同方向に流れている例である。この場合も、 I_3 としては、減衰振動電流である。

トリガ電流を変化させたときの主電流波形の一例を図6に示す。図6(a)では、トリガ電流 I_t が10.3Aと少ないので、TVG1のみが始動しTVG2は動作していない。図6(b)では、 I_t が36.6Aと大きいので、TVG1とTVG2の両方が始動している。

逆極性並列接続した各真空トリガギャップの電流が図5(b)や図6(b)に示すように、半サイクル毎に交互に流れる現象は、真空トリガギャップの絶縁回復と始動時間の極性効果に原因があると考えられる。真空トリガギャップの絶縁は、数 μ s以下で回復する^{(15)~(17)}。図5(a)のTVG1の電流 i_1 は、主電圧が4.3kVと低いので、最初の電流零点で絶縁回復し、電流は最初の半サイクルしか流れない。

主電圧が高い図5(b)の電流 i_1 は、最初の半サイクル後に零になっている。この時点で、TVG1の電極極性が始動しにくい(R)モードとなることと、TVG2が始動してギャップ間電圧が減少するためである。

TVG2はトリガ時に始動しないで、TVG1に電流が流れてから半サイクル後に始動している。トリガ時には、始動しにくい(Q)モードであるので、始動しない。TVG1の電流半サイクル後のTVG2の電極極性は、(S)モードになるので始動する。

トリガ電流は2 μ s程度しか継続しないので、(S)モード時にはトリガ電流は流れていない。しかし、トリガ放電による主電極表面の加熱状態が維持され、これが原因で(S)モード時に始動すると思われる。実際に、TVG2のトリガ回路を取り去ると、TVG2の主電流は流れず、図6(a)のような電流波形が観測される。また、図4(b)の継続時間の長いトリガ電流の場合には、図5(b)、図6(b)の電流波形がよく観測された。

このように、逆極性並列接続した真空トリガギャップの主電流は減衰振動電流となっても、TVG1とTVG2に流れ

(a) $V_m = 4.3 \text{ kV}$

(b) $V_m = 8.9 \text{ kV}$

(c) $V_m = 21.4 \text{ kV}$

図5 主電圧を変えた時の主電流波形の一例
Fig.5. The typical examples of main current with varying main voltages.

る電流は、半波毎に交互に流れていることが多い。

<3.2>始動確率 トリガしたときに、真空トリガギャップが始動して、主電流が流れるかどうかは、確率的にきまる。そこで、同一条件で、10回の実験を繰り返して、始動確率を測定した。

(a) $I_t = 10.3 \text{ A}$

(b) $I_t = 36.6 \text{ A}$

図6 トリガ電流を変えた時の主電流波形の一例
Fig.6. The typical examples of main current with varying trigger current.

逆極性並列接続したTVGの始動確率としては、電流を平等に分担する意味から、TVG1とTVG2の始動確率は、ある程度バランスしていることが望ましい。

始動確率に及ぼす主電極ギャップ長の影響を図7(a)に示す。逆極性並列接続時のTVG1の始動確率は、ギャップ長1~10mmの範囲で100%である。しかし、TVG2の始動確率は、ギャップ長3mm以上では0%である。

逆極性並列接続したTVGの始動確率は、図6(a)からも予想されるように、始動確率の高いTVGの特性に支配される。図7(a)における逆極性並列接続したTVGの始動確率は、TVG1の始動確率と同じで、100%である。

TVGの始動特性としては、トリガ電圧を印加してから、トリガ電流が流れるまでの特性も重要である。本実験条件では、逆極性並列接続した2個のTVGにトリガ電圧を印加したとき、トリガ電流がほぼ同時に流れることを確認している。

TVGの始動確率に及ぼすトリガ電流の影響を図7(b)に示す。トリガ電流10.3~36.6Aの範囲で、TVG1の始動確率は100%である。TVG2の始動確率は、トリガ電流とともに増加する。逆極性並列接続したTVG1とTVG2をあわせた始

(a) 始動確率と主電極ギャップ長の関係

(b) 始動確率とトリガ電流の関係

図7 逆極性並列接続時の真空トリガギャップの始動確率

Fig. 7. Switching probability of a TVG as a function of main voltage and trigger current.

動確率は、TVG1の始動確率は同じで、100 %である。

これらのことから、始動しにくい電極極性のTVGの始動確率を大きくするためには主電極のギャップ長を短くして、トリガ電流を大きくする必要がある。

<3.3> 始動時間 真空トリガギャップの始動時間は、装置の信頼性の向上や他の周辺機器との同期を考えると、極力小さいことが望ましい。

図8にTVG始動時のトリガ電流と主電流波形の一例を示す。トリガ電流波形は図4(b)の場合より、テイル部の減衰が大きくなっている。図4(b)のトリガ電流は、主

図8 始動時間の定義

Fig. 8. Switching time between the initiation of the trigger current and the initiation of the main current.

電流なしの場合である。図8のトリガ電流には、ギャップを介して、主電流が流れ込むために、図4(b)とは異なったトリガ電流波形になっている。

トリガ電流が流れ始める時刻から、主電流が正方向に立ち上がる時間1 μs程度の直線部分(図8中の点線)を外挿し、電流が零になる時刻(図8中の矢印)までの間を始動時間Tsと定義した。トリガ電流が流れ始める時刻としては、オシロスコープ上のトリガ電流波形を観測して、トリガ電流が零ラインから離れ始める時刻とした。この方法は簡便であり、かつ読みとり誤差を少なくできるものと考えている。同一条件で10回測定し、その算術平均値を始動時間とした。

始動時間は、主電圧、主電流上昇率、トリガ電流などの回路条件によって変化する。主回路インダクタンスを変える場合には、主電圧と主電流上昇率の効果を分離する必要がある。ここでは、主回路インダクタンスを571 μH一定にして実験した。

主電圧と始動時間の関係を図9(a)に示す。単体ギャップの(P)モード(陰極側からトリガ)では、主電圧5~20 kVの範囲で、約0.4 μs一定の始動時間を保っている。このときの始動時間のバラツキ⁽¹³⁾は、47~98%である。

(Q)モード(陽極側からトリガ)では、主電圧の増加とともに、始動時間は減少する。しかも、(P)モードの場合よりも、始動時間は長く、主電圧15 kV以下では始動しない。この傾向は、他の実験結果⁽⁶⁾とも一致している。すなわち、始動時間の極性効果が顕著に現れている。

(P)と(Q)モードを並列接続した(P)+(Q)モードの始動時間は、(P)モードの場合にほぼ一致している。しかし、この場合の始動時間のバラツキは、89~228%で、単体ギャップの(P)モードより増加している。この理由は、いまのところ不明である。

トリガ電流と始動時間の関係を図9(b)に示す。単体ギャップの(P)と(Q)モードでは、トリガ電流の増加

(a) 始動時間と主電圧の関係

(b) 始動時間とトリガ電流の関係

図9 始動時間と主電圧、トリガ電流の関係
Fig.9. Switching time of a TVG as a function of main voltage and trigger current.

とともに、始動時間は短くなる。(P)+(Q)モードの場合にも、類似の傾向が見られる。

以上の結果は、図1の(P)と(Q)モードの並列接続の場合の結果である。(R)と(S)モードの並列接続の場合にも、(P)と(Q)モードの並列接続の場合と類似の結果を得ている。

4. まとめ

以上の結果を要約すると、次のようになる。

(1) 逆極性並列接続した各真空トリガギャップを流れる電流は、半波毎に交互に流れる場合が多く観測された。し

かし、全電流は減衰振動電流となった。

(2) 逆極性並列接続した真空トリガギャップの始動確率は、陰極側からトリガした真空トリガギャップの始動確率に一致した。陰極側トリガの始動確率は、本実験の範囲内で、トリガ電流、主電極ギャップ長に関係なく、100%を示した。陽極側からトリガした真空トリガギャップの始動確率は、トリガ電流が大きく、主電極ギャップ長が短いほど、高い。トリガ電流10.3A以下、または主電極ギャップ長3mm以上では、逆極性並列接続した陰極側トリガのギャップのみしか始動しない。

(3) 逆極性並列接続した真空トリガギャップの始動時間は、主電圧10~20kV、トリガ電流59Aで、約0.4μs一定値を示した。この始動時間は、始動時間の短い陰極側からトリガした単体ギャップの始動時間に近い。

終りに、本実験に協力された本学技官伊藤 告氏ならびに修士2年の渡辺圭一君に感謝する。

(平成10年5月25日受付、平成10年11月30日再受付)

文 献

- (1) E. Kuffel and M. M. Bera: "Breakdown in Triggered Spark Gaps in Air", IEEE Trans. Pow. App. and Syst. PAS-87, 1628(1968).
- (2) 林, 妹尾: 「気中ギャップスイッチと真空スイッチの始動特性」, 電学誌, 86, 4, 581-590(1966).
- (3) J. M. Lafferty: "Triggered Vacuum Gaps", Proc. IEEE, 54, 23-32(1966).
- (4) H. Arita, K. Suzuki and Y. Kurosawa: "Switching Characteristics of the Triggered Vacuum Gap for a High-Repetition-Rate Pulse-Power Source", IEEE Trans. on Plasma Sci., 20, 76-79(1992).
- (5) R. A. Dougal, G. Morris and G. D. Volakakis: "Low-Loss, High-Repetition-Rate Vacuum Switching", IEEE Trans., Plasma Sci., PS-19, 976-988(1982).
- (6) F. T. Warren et al.: "Vacuum Switch Trigger Delay Characteristics", IEEE Trans., Plasma Sci., PS-10, 298-301(1982).
- (7) P. P. Gervadis and R. S. N. Rau: "Firing Characteristics of a Simple Coaxial Triggered Vacuum Gap", J. Phys. D: Appl. Phys., 14, 867(1981).
- (8) L. M. J. Vries and G. C. Damstra: "A Reignition Installation with Triggered Vacuum Gaps for Synthetic Fault Interruption Testing", IEEE Trans. Pow. Syst., PWRD-1, 75-80(1986).
- (9) G. A. Farral: "Low Voltage Firing Characteristic of Triggered Vacuum Gap", IEEE Trans. Elect. Devices, ED-13, 432-438(1966).
- (10) G. R. Govinda Raju, R. Hackam and F. A. Benson: "Breakdown Mechanism and Electrical Proper-

ties of Triggered Vacuum Gaps", J. Appl. Phys., 47, 1310-1317(1976).

- (11) A. J. Green and C. Christopoulos: "Plasma Build up and Breakdown Delay in a Triggered Vacuum Gap", IEEE Trans., Plasma Sci., PS-7, 111-115(1979).
- (12) H. Samaulah, K. Itagaki, H. Kitamura and A. Sugawara: "Switching Characteristics of Two Series-Connected Triggered Vacuum Gaps", 電学論, 115-A, 8, 719-725(1995).
- (13) 菅原, ハザイリン, 板垣, 喜多村: 「両主電極にトリガ電極をもつ真空トリガギャップの始動特性」, 電学論, 116-B, 1, 87-92(1996).
- (14) H. Samaulah, K. Itagaki, A. Sugawara, T. Maruyama and H. Kitamura: "Switching Characteristics of Two Parallel-Connected Triggered Vacuum Gaps", 電学論, 117-B, 3, 346-353(1997).
- (15) G. Frind, J. J. Carroll and C. P. Goody: "Recovery Time of Vacuum Interrupters", IEEE Trans., Pow. App. and Syst., PAS-101, 775-781(1982).
- (16) G. A. Farall: "Recovery of Dielectric Strength After Current Interruption in Vacuum", IEEE Trans., Plasma Sci., PS-6, 360-369(1978).
- (17) J. D. Cobine and L. E. Lee: "Recovery Characteristics of a Triggered-Vacuum Gap at High Current", J. Appl. Phys., 42, 4865-4869(1971).

板垣 厚一 (正員) 1938年4月7日生まれ。62年3月新潟大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)津上製作所入社。長岡工場に勤務。65年1月新潟大学工学部電気工学科助手, 77年4月同大助教授, 85年6月同教授, 現在に至る。工学博士。主として, 真空放電および風力発電の研究に従事。日本風力エネルギー協会, 日本雪工学会会員。

ハザイリン サマウラ (非会員) 1958年7月22日生まれ。84年3月 Brawijaya大学(インドネシア)電気工学科卒業。94年3月新潟大学大学院工学研究科修士課程修了。97年3月新潟大学自然科学研究科博士課程修了。主として, 真空トリガギャップの始動特性の研究に従事。現在, Tridinanti大学勤務。博士(工学)。

駒津 貴 (正員) 1974年3月16日生まれ。96年3月新潟大学工学部電気電子工学科卒業。98年3月新潟大学大学院自然科学研究科修士課程修了。主として真空トリガギャップの研究に従事。現在, (株)トーエネック勤務。

菅原 晃 (正員) 1964年11月11日生まれ。89年3月新潟大学工学部電気工学科卒業。91年3月新潟大学大学院工学研究科修士課程修了。94年3月新潟大学大学院自然科学研究科博士課程修了。同年4月新潟大学工学部電気電子工学科助手, 97年4月同講師, 98年11月同助教授, 現在に至る。博士(工学)。主として真空中の放電現象に関する研究に従事。日本物理学会, プラズマ・核融合学会会員。

喜多村 博 (正員) 1931年7月23日生まれ。55年3月新潟大学工学部電気工学科卒業。56年4月新潟大学工学部電気工学科助手, 62年4月同講師, 64年8月同助教授, 75年4月同教授。高電圧工学を担当し, 主として, 気中および真空中の放電現象に関する研究に従事。現在, 新潟工科大学教授。工学博士。