真空トリガギャップの最小動作電圧特性

正員 板垣 厚一 (新潟大)

学生員 越部 龍宣 (新潟大)

正員 喜多村 博 (新潟大)

Minimum firing voltage characteristics of Triggered Vacuum Gap

Koichi Itagaki, Member, Tatsunori Koshibe, Student Member, Hiroshi Kitamura, Member (Niigata University)

The low voltage switching characteristics of a triggered vacuum gap has been investigated experimentally in the range 50 to 2,500 volts.

Specially, the following items have been examined: (1) effect of minimum firing voltage and switching time on the polarity of the main gap voltage; (2) relation between minimum firing voltage and di/dt of main current; and (3) observation of cathode spots by using high-speed streak camera.

Furthermore, it has been found that the gap could be triggered as low as 50V with switching time $10\mu s$. Minimum firing voltage and switching time are small with a positive main gap voltage than a negative one. Minimum firing voltage and switching time decrease with increasing di/dt of main current. Minimum firing voltage increases when the duration of trigger current is less than $10\mu s$. In the initial stage of discharge, bright cathode spots are observed on the trigger electrode. With the firing on the anode the light emission accompanying the main discharge differs from that for firing on the cathode.

キーワード: 真空トリガギャップ, 最小動作電圧, 始動時間, 電圧極性, 真空アーク

1. まえがき

真空トリガギャップは、気中トリガトロンなどの他のギャップスイッチに比較して、ギャップの長さを調整することなく、数kVから数10kVの広範囲の電極間電圧にわたって始動特性が良い⁽¹⁾ことから、高電圧パルスパワー発生装置の投入用ギャップスイッチとして高電圧工学、電力工学⁽²⁾、高温プラズマ工学などの分野においてよく使用されている。

また、このような用途とは別に、クローバ回路用の真空トリガギャップも開発されている⁽³⁾。クローバ動作時にギャップ間に印加される電圧は1kV程度以下と低いので⁽⁴⁾、ギャップの始動特性は悪くなると推測される。

このような低電圧領域における始動特性について、Farrell⁽⁵⁾氏は主電圧100～1,000Vの範囲で、始動特性に及ぼす電圧極性の影響を明らかにしている。また、Warren⁽⁶⁾やKamakshiah⁽⁷⁾氏等は主電圧70～200Vの低電圧の始動時間を測定している。筆者等も、主電圧が300～700Vにおける始動時間と主電流上昇率の関係を明らかにしている⁽⁸⁾。また、始動時間の測定時に、主電圧が正極性の時には、50V程度の低い電圧でも真空トリガギャップ

が動作することを経験していた。

しかし、真空トリガギャップが、どの程度の低い電圧まで動作するのか、その時の電圧極性の影響などについては、従来の研究では明確にはされていないように思われる。

本論文では、これらの不明の点を明らかにして、クローバ回路のような低電圧領域で真空トリガギャップを始動させるときの始動特性に関する基礎資料を得ることを目的としている。

真空トリガギャップが動作するに必要な最低の電圧すなわち最小動作電圧に及ぼす主電流上昇率、トリガ電流継続時間、トリガ電流上昇率の影響について実験的に検討している。また、最小動作電圧付近においても観測される電圧極性の影響を解明するために、主放電・トリガ放電の発光状態を高速ストリークカメラで撮影して若干の検討を加えた。

その結果、最小動作電圧は主電極極性が正極性のほうが負極性の場合よりも低く、主電流上昇率の増大とともに低下し、正極性で主電流上昇率が $0.5\text{ A}/\mu s$ で50V程度であること。また、トリガ放電のみの場合の放電の発光状態は、トリガ電圧極性によって異なり、トリガ電圧正極性の時は、負極性に比べ、主電極間での発光が多く観測されることな

どを明らかにしている。

2. 実験方法

実験に使用した真空トリガギャップは、内径147 mm・高さ145 mmの硬質ガラス製の円筒内に組込まれている。電極部分の構成を図1に示す。上部の無孔電極は直径70mm・厚さ10mmの無酸素銅板製である。下部の有孔電極は、直径70mm・厚さ10mmの無酸素銅板製で、その中央部にトリガ電極が設けられている。トリガ電極はトリガピン（直径7mmの銅棒）とトリガピン絶縁用のセラミックス管で構成されている。このセラミックス管は外径10mm・内径7mm・長さ45mmで、材質はジルコニア（ ZrO_2 ）である。主電極の中央部分におけるギャップの長さの設定を用意するために、無孔電極は半径210 mmの球面状になっている。ギャップの長さは10mm一定である。

主電極はエミリー紙で研磨後、リグロインとアルコールで清浄にして乾燥後、ギャップに組立て排気を行った。排気系はスパッタイオンポンプ、チタンゲッタポンプ、メカニカルブースタポンプおよび油回転ポンプで構成されている。荒ら引きの間（スパッタイオンポンプが動作可能になるまでの約40分間）、主電極間に交流電圧を印加して、空気中のグロー放電（気圧 10^{-1} Pa、電流0.2 A）によって、電極のコンデショニングを行なった。スパッタイオンポンプを連続運転させ、真空度を約 10^{-5} Paに保って実験を行った。

主として使用した回路の概略を図2に示す。主回路は主インダクタンス L_m と主コンデンサ $C_m = 192 \mu F$ の直列回路である。主電流上昇率は、主回路の主インダクタンス L_m を $37.9 \mu H \sim 8.3 mH$ の範囲で変えることにより、主電流上昇率 di_m/dt を $0 \sim 22 A/\mu s$ の範囲で変化させた。 di_m/dt は、主電圧 V_m と L_m から V_m/L_m として算出した。また、トリガ回路は R_t ・ C_t 直列放電回路を使用し、 $R_t = 26 \Omega$ 、 $C_t = 4 \mu F$ 、 C_t の充電電圧 $V_t = 6 kV$ で、トリガ電流波高値 200 A、時定数 100 μs 、継続時間 600 μs の減衰電流を使用した。

主電圧 V_m とトリガコンデンサ充電電圧 V_t は、100 M Ω

図1 電極部分の構成

Fig. 1. Electrode assembly of triggered gap.

図2 実験回路

Fig. 2. Schematic diagram of experimental circuit.

の高抵抗と直列に接続したマイクロアンペア計で測定した。主電流とトリガ電流の測定には、同軸シャントとデジタルストレージオシロスコープを使用した。

アークのストリーク写真は、ドラム回転形の高速度ストリークカメラで撮影した。高速度ストリークカメラは、ギャップから約90cm離れた位置に置き、絶縁円筒ガラス越しに放電の発光状態を撮影した。ストリーク撮影のスリットのサイズは $23 mm \times 0.5 mm$ である。

3. 実験結果と検討

＜3・1＞ トリガ放電時の主電流波形 真空トリガギャップの動作原理は、あらかじめ主電極間に電圧を印加しておき、トリガ放電によって主電極間にプラズマを供給し、主電極間の絶縁破壊を誘発して主電極間の導電状態を維持するものである⁽⁹⁾。この場合、主電圧と主回路のインピーダンスによってきまる電流が主回路に流れる。しかし、主電圧が10V程度と小さい場合には、この主電流ではなく、暗流が流れる⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾ 場合がある。このような状態は、真空トリガギャップとしては始動失敗である。トリガ放電によって始動成功となる主電圧の最低電圧を最小動作電圧と称することにする。

トリガギャップとして使用できる電圧の上限は絶縁破壊電圧によって決まり、下限は最小動作電圧で決まる。したがって、同程度の絶縁耐圧を持つトリガギャップなら、最小動作電圧が小さい方が広範囲の電圧で使用できることになる。

最小動作電圧付近における主電流波形の一例を図3に示す。図3(a)は、主電圧 $V_m = 725 V$ で、トリガギャップが始動した時の波形で、主回路条件によって定まる主電流波形が観測される。真空トリガギャップでは、プラズマの拡散作用が強いので主電流は半サイクルで遮断されている。図3(b)は、主電圧が零の時の波形で、トリガ放電による主電流への流れこみによる暗流が観測されるが、トリガギャップは始動していない。図3(c)は、最小動作電圧よりやや低い電圧の時の波形で、LC放電の回路定数で決まる主電流波形とほぼ同じ傾きで立ち上がってはいる

が、1/4 周期になる前に減少し始めている。このような波形は、主回路の L_m が小さく、主電流波形の周期がトリガ電流波形の継続時間と同じくらいの時に観測されることが多い。

<3・2> 最小動作電圧 主電圧が最小動作電圧付近の低い値の場合には、いろいろな主電流波形が観測される。そこで、オシロスコープで主電流波形の形、周期等を確認しながら、トリガギャップが始動する最小の主電圧を求めた。

(a) 始動した時の主電流

(b) 始動しない時の主電流

(c) 始動しない時の主電流

横軸: 0.5 ms/div

主電流縦軸: 35 A/div

トリガ電流縦軸: 90 A/div

図3 電流波の一例 (電圧極性: M+T-)

Fig.3. Wave forms of main current and trigger current with positive main gap.

図4 主電流上昇率と最小動作電圧の関係

Fig.4. Minimum firing voltage of the triggered vacuum gap as a function of di_m/dt for different polarity.

この操作を10回繰り返し、その平均値を最小動作電圧 V_m とした。 V_m のばらつきは5~35%程度である。

真空トリガギャップの電圧極性を表示するために、有孔電極を基準にして、無孔電極の正極性をM+, 負極性をM-, トリガ電極の正極性をT+, 負極性をT-で表す。

主電流上昇率 di_m/dt と最小動作電圧 V_m の関係の一例を図4に示す。主電流上昇率の増加とともに、最小動作電圧は減少している。

主電流が確立するためには、トリガ放電電流がある値に減少するまでに、主電流が40 A程度になっている必要がある⁽⁸⁾。主コンデンサ容量一定の条件では、主電流上昇率が小さいことは主回路のインピーダンスが大きく、主電流も小さいことを意味している。したがって、主電流上昇率が小さいほどトリガギャップは始動しにくくなる。

また、最小動作電圧は印加電圧極性による影響が大きい。主電極正極性M+のほうが、主電極負極性M-より最小動作電圧は明らかに低い。

最小動作電圧 V_m とトリガ電流継続時間 T_t との関係の一例を図5に示す。トリガ電流は、LC4段の梯子型回路による方形波電流またはLCR直列回路の減衰電流で、トリガ電流波高値は、300 A一定である。 di_m/dt は、0.4~32 A/μsである。各極性とも T_t が10 μs程度より小さくなると、 V_m が上昇する傾向がある。このことは、トリガ放電によって、主電極間に供給されるプラズマ密度が少なくなると、主電極間の絶縁破壊には大きな電界が必要

なことを示している。

V_m とトリガ電流上昇率 di_i/dt との関係の一例を図6に示す。トリガ電流は、LCR直列回路の減衰電流であり、その上昇率は、 $C=2.96\mu F$ 、 $R=16.7\Omega$ として L を調整し、トリガ電流上昇率を変化させた。トリガ電流波高値は、300A一定である。本実験の範囲内では di_i/dt の影響は少ない。また、トリガ電流波高値を変えても $V_m - di_i/dt$ 特性は、ほとんど変化しないことを確認している。

〈3・3〉 始動時間 トリガ回路に電流が流れてから、主回路に安定した電流が流れ始めるまでの時間を始動時間と

図5 トリガ電流継続時間と最小動作電圧の関係

Fig. 5. Minimum firing voltage of the triggered vacuum gap as a function of trigger current duration for different polarity.

図6 トリガ電流上昇率と最小動作電圧の関係

Fig. 6. Minimum firing voltage of the triggered vacuum gap as a function of di_i/dt for different polarity.

図7 主電流上昇率と始動時間の関係

Fig. 7. Switching time of the triggered vacuum gap as a function of di_m/dt for different polarity.

呼ぶ。始動時間はギャップ装置の信頼性の向上、他の周辺機器との同期制御を行うときには小さいことが望ましい。

主電流とトリガ電流を2現象のデジタルオシロスコープで同時に測定し、その立上り部分の時間差を読み取った。実験は同一条件で15回繰り返して、その算術平均値を始動時間 T_s とした。 T_s のばらつきは15~70%程度である。

結果を図7に示す。主電圧 $V_m = 2,500 V$ 一定である。主電流上昇率が増すにしたがって、始動時間が短くなる。真空アークが確立するためには、主回路に40 A程度の電流を必要とするので⁽⁸⁾、主電流上昇率が小さければ、それだけ真空アークが確立するまでの時間が長くなる。

主電圧 100V~30kVの範囲で、真空トリガギャップには電圧極性効果があり、有孔電極を基準にして、無孔電極正極性のほうが、負極性の場合よりも始動特性が良いことが知られている⁽¹⁾⁽⁵⁾。

本実験でも主電流上昇率が1~50 A/μsの範囲において、主電圧極性正極性M+のほうが、主電圧負極性M-にくらべて始動時間が短くなっている。

図6と同じトリガ電流を使用して、最小動作電圧付近の始動時間を測定した。M+T+極性で $10 \pm 4 \mu s$ 、M+T-極性で $2 \pm 1 \mu s$ 、M-T+極性で $10 \pm 5 \mu s$ 、M-T-極性で $17 \pm 10 \mu s$ 程度である。

クローバ回路のような低電圧領域で真空トリガギャップを始動させるときには、最小電圧付近でも確実に動作し、始動時間が短いことが望ましい。主電流上昇率が10 A/μs

程度以上ならば、主電圧極性が正極性時に動作するように設定し、電流継続時間が $80\mu\text{s}$ 程度のトリガ電流を使用すれば、比較的良好な始動特性が得られるものと判断される。

〈3・4〉放電時の発光状態 最小動作電圧に及ぼす主電極極性の影響を検討するために、放電時の発光状態を高速ストリークカメラで撮影した。その写真の一例を図8と図9に示す。図中のMは無孔電極、Hは有孔電極の位置を示している。

実験条件としては、主電流は周期 5.6ms 、波高値 550A の正弦波の半波で、主電流上昇率 $0.77\text{A}/\mu\text{s}$ である。トリガ電流は、波高値 200A 、時定数 $100\mu\text{s}$ 、継続時間 $600\mu\text{s}$ の減衰電流を使用した。

図8は、トリガ放電のみのストリーク写真で、トリガ電流も同時に示してある。いずれの電圧極性においても、放電が開始してから $400\mu\text{s}$ 程度まで、有孔電極側に明るく発光している陰極点が現れている。

トリガ電極正極性 $T+$ の時は、放電の初期の段階で無孔電極側にも、かなり明るい発光部分が観測される。トリガ電極負極性 $T-$ の時は、有孔電極側だけに、明るい輝点が観測される。

図9は、 $0.02\text{mm}/\mu\text{s}$ の速度で撮影した主放電のストリーク写真である。図9には、主電流とトリガ電流も同時に示してある。

(a) トリガ電極正極性 ($T+$)

(b) トリガ電極負極性 ($T-$)

図8 トリガ放電のみのストリーク写真
Fig. 8. Streak photograph of trigger discharge and corresponding current trace.

(a) Firing on cathode.

(b) Firing on anode.

(a) 主電極正極性 ($M+T-$)

(b) 主電極負極性 ($M-T-$)

図9 主放電のストリーク写真

Fig. 9. Streak photograph of main discharge and corresponding current trace.

(a) Firing on cathode.

(b) Firing on anode.

放電の初期の段階で、トリガ放電の陰極点である明るい輝点が、主電極の極性に関係なく、有孔電極側に発生している。主電極正極性 $M+$ の時は主電極の有孔電極側に、主電極負極性 $M-$ の時は主電極の無孔電極側に、つまり主放電の陰極側に、主放電が継続している間、断続的に明るい輝点が発生している。輝点が断続的に現われるのは、陰極点が移動(カメラのスリット位置から外れると、撮影できない)もしくは発生や消滅を繰り返しているためである。真空アークが維持されるためには、主放電の陰極点が存在していることが必要である⁽¹¹⁾。 $M-$ のときは、トリガ放電と主放電の陰極点が共用できず、陰極点は図9(b)に示すように、トリガ電極と対向している無孔電極側に形成される。このために、より大きな入力エネルギーが必要で、より大きな最小動作電圧を必要とする。

これに対して $M+$ のときは、図9(a)のようにトリガ放電と主放電の陰極点が同じ有孔電極側に形成されるため、 $M-$ と比較して最小動作電圧が低くなるものと考えられる。

4. むすび

真空トリガギャップの最小動作電圧および始動時間に及ぼす主電流上昇率と印加電圧極性の影響について実験的に検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) 始動特性は、主電圧極性に大きく依存しており、

主電極極性が正極性のほうが、負極性よりも最小動作電圧は低く、始動時間も短い。

(2) 主電流上昇率の増大とともに、最小動作電圧は低く、始動時間も短くなる。

(3) トリガ電流継続時間が $10\mu\text{s}$ 程度以下と短いと、最小動作電圧は上昇する傾向がある。また、トリガ電流の上昇率は、最小動作電圧にそれ程影響を与えない。

(4) トリガ放電のみの場合の放電発光の様子は、トリガ電圧極性によって異なり、トリガ電圧正極性の時は、負極性に比べ、主電極間での発光が多く観測される。

以上の結果は、クローバ回路のような低電圧領域で真空トリガギャップを始動させるときの始動条件を検討する際に有益な基礎資料として役立つ。

最後に、日ごろ御指導を賜る東京工業大学名誉教授 林泉博士に感謝の意を表する。また、実験に御協力いただいた本学技官 伊藤 告氏ならびに研究室の諸氏に深謝する。

(平成5年6月28日受付、同5年10月20日再受付)

文 献

- (1) 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, 581 (昭和41-4)
- (2) L. M. J. Vries and G. C. Damstra: "A REIGNITION INSTALLATION WITH TRIGGERED VACUUM GAPS FOR SYNTHETIC FAULT INTERRUPTION TESTING", IEEE Trans. Power System, PWRD-1, p. 75 (1986)
- (3) Ihor Vitkevitsky: High Power Switching, p. 84 (1987) Van Nostrand Reinhold Comp.
- (4) 電気学会大電流応用技術調査専門委員会編: 大電流工学ハンドブック, p. 196 (1992) コロナ社
- (5) G. A. Farrall: "Low Voltage Firing Characteristics of a Triggered Vacuum Gap", IEEE Trans., Electron Devices, ED-13, 432 (1977)
- (6) F. T. Warren, J. M. Wilson, J. E. Thompson, R. L. Boxman, T. S. Sudarshan: "Vacuum switch trigger delay characteristics", IEEE Trans., Plasma Sci., PS-10, 298 (1982)
- (7) S. Kamakshaiah & R. S. N. Rau: "Low-voltage and high-current delay characteristics of a simple triggered vacuum gap", J. Phys. D. (Appl. Phy), 10, 1017 (1977)
- (8) 板垣・喜多村・塚田・丸山:「緩やかな電流立上りにおける真空トリガギャップの始動特性」, 電学論, A, 106, 275 (昭和61-6)
- (9) A. J. Green & C. Christopoulos: "Plasma Build up and Breakdown Delay in a Triggered Vacuum Gap", IEEE Trans., Plasma Sci., PS-7, 111 (1979)
- (10) R. L. Boxman: "Triggering Mechanism in Triggered Vacuum Gaps", IEEE Trans., Electron Devices, ED-24, 122 (1977)
- (11) Edited by J. M. LAFFERTY: VACUUM Arcs Theory and Application, p. 120 (1980), JOHN WILEY and SONS
- (12) Valery A. Vozdvijensky and Vlandimir A. Sidorov: "Initial Stage of Discharge Current Growth in a Triggered Vacuum Gap", IEEE Trans., Plasma Sci., PS-19, 778 (1991)
- (13) B. Mazurek and J. D. Cross: "Fast Cathod processes in vacuum discharge development", J. Appl. Phys., 63, 4899 (1988)

板垣 厚一

(正員) 昭和13年4月7日生まれ。37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。40年1月新潟大学工学部電気工学科助手。52年4月同大学助教授, 60年6月同教授, 現在にいたる。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。

越部 龍宣

(学生員) 昭和44年4月4日生まれ。平成5年3月同大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科修士課程に入学, 現在に至る。主として真空中の放電現象に関する研究に従事。

喜多村 博

(正員) 昭和6年7月23日生まれ。30年3月新潟大学工学部電気工学科卒業。31年4月新潟大学工学部電気工学科助手。37年4月同講師, 39年8月同助教授, 50年4月同教授, 高電圧工学・発電工学を担当し, 現在にいたる。工学博士。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。