

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：32706

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06317

研究課題名（和文）配電線多相フラッシュオーバー解析手法の高度化と配電線雷事故率低減手法への適用研究

研究課題名（英文）A study on improvement of multiphase flashover analysis in medium-voltage line caused by lightning and its application to the reduction of lightning outage rate

研究代表者

関岡 昇三（Sekioka, Shozo）

湘南工科大学・工学部・教授

研究者番号：60410031

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：日本の高圧配電線における多相フラッシュオーバーについて実験および数値計算シミュレーションにより検討を行った。日本の高圧配電線は非接地系であるため1相地絡のみでは自然消弧し、2相以上の地絡で線路事故になる。本研究では相によって絶縁レベルに差を持たせる相差絶縁方式を提案した。提案手法を適用した高圧配電線では2相以上のフラッシュオーバーを低減できることを明らかにした。絶縁レベルを低くした相で早くフラッシュオーバーさせることにより、他相におけるがいし電圧が低下し、フラッシュオーバーしにくくなることにより2相以上のフラッシュオーバーを低減できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

発電容量が小さな再生可能エネルギーは配電線に連系されることが多く、配電線の電力品質向上が求められている。本研究では雷により配電線における供給支障を生じさせる多相フラッシュオーバーについて、その発生メカニズムを実験および数値計算シミュレーションにより明らかにするとともにコストをかけることなく実施可能な低減対策について提案を行った。実験データは工学的フラッシュオーバーモデルおよび雷事故率計算手法の高精度化に寄与することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The multiphase flashover in medium-voltage line in Japan has been studied based on experiment and numerical simulation. This study simulates a direct lightning strike to the top of concrete pole of the line. The medium-voltage line in Japan is non-grounding system. Most of single-phase flashovers in the lines are naturally recovered due to low fault current. Thus, more than two-phase flashover causes a line fault. This study has proposed an unbalanced insulation method in the medium-voltage line to reduce the multiphase flashover. The insulation levels among phases are different in the proposed method. The first flashover occurs on the lowest insulation insulator, and waveform on the other phases becomes lower and stepwise after the flashover. As a result, the number of more than two-phase flashover becomes smaller.

研究分野：電力工学、高電圧工学、電気回路論

キーワード：雷サージ 配電線 フラッシュオーバー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 電力自由化を推進するにあたり、電力会社は電気料金を低く抑えるために流通設備にかかる費用をできるだけ抑えようとしている。また、地球温暖化対策として期待されている風力発電や太陽光発電といった再生可能エネルギーは、配電線と連系することが多い。従って、配電線の線路事故を少なくするとともに設備にかかる費用を抑える手法の確立が配電線における課題の一つとなっている。雷は配電線における電力品質低下の大きな要因となっており、雷害対策手法の検討は重要な課題である。

(2) 日本の高圧配電線は非接地系となっており、1相地絡ではアークが自然消弧し事故とならない。2相以上で地絡が生じた場合には短絡に移行するため大きな電流が流れることにより線路事故に至る。線路事故低減対策手法の確立のためには、多相フラッシュオーバーに関するメカニズム解明が求められている。

2. 研究の目的

(1) 日本の高圧配電線では2相以上のフラッシュオーバーにおいて線路事故に至る。このことは1相地絡のみであれば線路事故とならず継続して送電が可能であることを示している。配電線耐雷設計に用いられている配電線雷事故率算定により雷害対策手法を評価する方法でも、2相地絡以上が線路事故の対象となっている。多相フラッシュオーバー解明のためには実験的検討が不可欠であるので、本研究ではコンクリート柱塔頂への直撃雷を想定した実験を行い、データを得ることが目的の一つである。

(2) 1相にピン碍子を適用し他相では中実碍子を用いて絶縁レベルに差を持たせた相差絶縁方式を提案し、提案方式の多相フラッシュオーバー低減効果について実験および数値計算シミュレーションにより確かめる。

3. 研究の方法

本研究は大きく分けて「雷インパルス実験および数値計算シミュレーションによる多相フラッシュオーバーの検討」、「相差絶縁方式による高圧配電線雷事故率低減手法の検討」および「各種パラメータが多相フラッシュオーバーに与える影響の検討」の3つに分類して実施した。実験は最大充電電圧 1,050kV の雷インパルス電圧発生装置を用いて直撃雷を想定して腕金に雷インパルス電圧を印加した場合について行った。数値計算シミュレーションは雷サージ解析でよく用いられている電力系統過渡現象解析プログラム EMTP (ElectroMagnetic Transients Program)を使用した。フラッシュオーバーモデルは EMTP で使用可能なものについて検討を行った。

4. 研究成果

(1) 概要

- ・十分に長い電路を模擬した高圧配電線における多相フラッシュオーバーについて、コンクリート柱直撃雷を想定した実験的検討を行った。
- ・EMTPを用いてフラッシュオーバーモデル、商用電圧、雷電流特性、線路配置および接地抵抗が多相フラッシュオーバーに与える影響について検討した。
- ・相差絶縁方式を提案し、多相フラッシュオーバー低減効果を実験および数値シミュレーションにより確認した。

(2) 実験回路

雷インパルス電圧発生装置(IG)を用いて高圧配電線多相フラッシュオーバーについて実験的検討を行った。多相フラッシュオーバーではフラッシュオーバー相の対地電圧を保ちつつ健全相への誘導電圧を考慮しなければならない。そこで、線路末端は

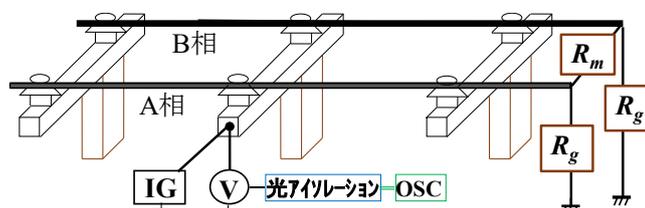


図1 実験回路

線路の特性インピーダンスを Y 型等価回路で模擬し電線間の相互誘導を考慮した。測定は抵抗分圧器および光アイソレーションシステムを用いて波形出力のためのオシロスコープと測定箇所を電氣的に絶縁することにより安全に実施した(図1)。碍子は高圧配電線で用いられている高圧中実碍子およびピン碍子を対象とし、それらの組み合わせや印加電圧波高値などをパラメータとした。コンクリート柱頂部への直撃雷を対象として腕金に雷インパルス電圧を印加し接地側電位が上昇する直撃雷を模擬した。電線は OE 60mm²を使用した。安全側の評価を行う目的で支持部分のみ電線被覆を剥いで裸線の状態とした。避雷器の効果を検討する際の避雷器は 6.6kV 配電線用ギャップレス型を用いた。

(3)50%フラッシュオーバ電圧測定結果

50%フラッシュオーバ電圧 V_{50} は昇降法を用いて測定した。昇降法は機器単体で用いられているが、多相フラッシュオーバにも適用した。多相フラッシュオーバでは1相目のフラッシュオーバが波頭で生じることが多く、測定電圧波高値を多相フラッシュオーバ特性に用いた場合には、フラッシュオーバ電圧を過小評価することになる。そこで、フラッシュオーバしなかったと仮定しIG充電電圧と利用率の積を印加電圧波高値とした。

図2に電線間距離が70cmの場合における碍子単体の50%フラッシュオーバ電圧 V_{50S} および碍子および避雷器を組み合わせた時の50%2相フラッシュオーバ電圧 V_{50M} 測定結果を示す。また、図3に電線間距離を変えた時の V_{50M} 測定結果を示す。ここでは夏季雷に多い負極性における結果のみを示す。

図2よりピン碍子と中実碍子を組み合わせた相差絶縁方式の V_{50M} は、ピン碍子だけを用いた場合の約3倍、中実碍子だけを用いた高平衡絶縁方式の場合の約1.5倍の V_{50M} となっている。中実碍子のみを用いた高平衡絶縁方式により多相フラッシュオーバを低減できるが、相差絶縁方式を採用することで、より大きく多相フラッシュオーバを低減できることが確かめられた。

図3より線間距離が短いほど V_{50M} が高くなっている。これは線間距離が短いほど電線間の電気的結合が大きくなることから、1相目のフラッシュオーバによる碍子電圧低下が大きくなるためである。

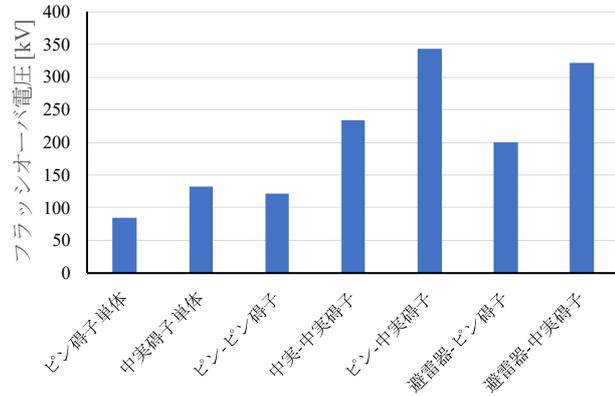


図2 50%フラッシュオーバ電圧測定結果

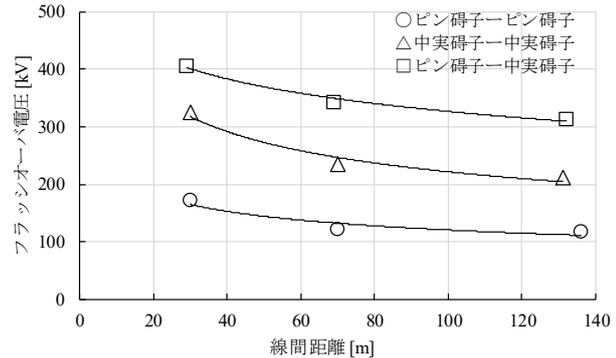
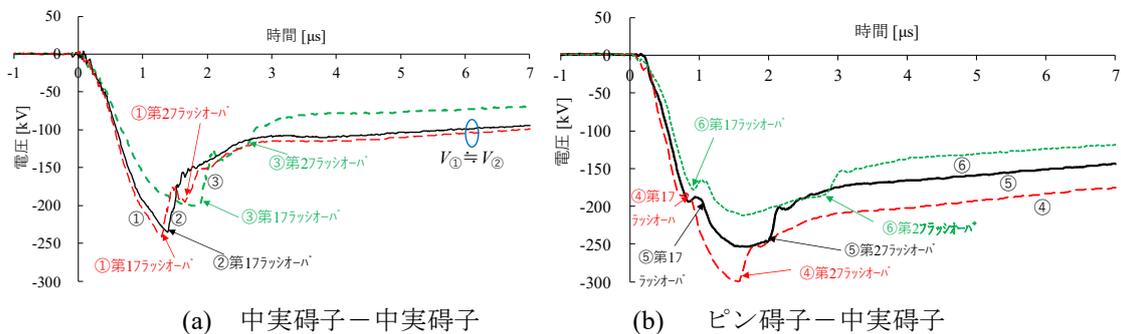


図3 線間距離をパラメータとしたときの50%フラッシュオーバ電圧測定結果

(4)多相フラッシュオーバ電圧波形測定結果

図4(a)に示す中実碍子を使用した高平衡絶縁方式では、波形③のように2相目のフラッシュオーバが遅れることがあるが、波形①および②のようにほぼ同時に2相フラッシュオーバが発生している。図4(b)に示す異なる碍子を使用した相差絶縁方式では、1相目のフラッシュオーバは波頭で生じ、2相目は波尾部で発生している。印加電圧が高いほど2相目のフラッシュオーバ時間の発生が早くなっている。このように1相目のフラッシュオーバにより他相では電圧低下が発生するため、放電進展が遅くなったり停止したりすることにより多相フラッシュオーバが発生しにくくなるのがわかる。



(a) 中実碍子-中実碍子 (b) ピン碍子-中実碍子
図4 2相フラッシュオーバ電圧波形測定結果

(5)フラッシュオーバモデルの比較

表1に配電線雷サージ解析で用いられている工学的フラッシュオーバモデルの比較を示す。積分法は波形の相違を考慮できるため他のモデルより汎用性が高いが扱いが比較的容易なため多相フラッシュオーバ解析に有用である。

シミュレーションで対象とした配電線は線路長1kmで径間長を40mとした。また架空地線が施設されているものとした。雷サージに対してコンクリート柱は接地線および接地極として扱った。雷電流波形は2/70μsの三角波とした。また相により碍子電圧に差ができるように相電圧を考慮した。

表 1 フラッシュオーバーモデルの比較

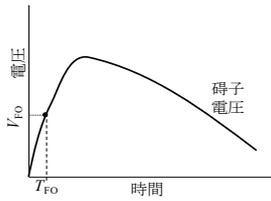
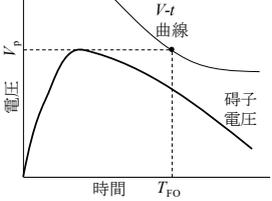
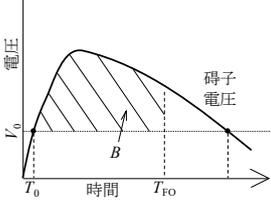
| | 電圧スイッチモデル | V-t モデル | 積分法 |
|-------------|--|---|---|
| シミュレーションモデル | フラッシュオーバーは $V(t)=V_{FO}$ の時刻に発生  | フラッシュオーバーは $V=V_p$ が $V-t$ 曲線と交差時刻に発生  | フラッシュオーバーは $\int [V(t)-V_0]dt=B$ を満たす時刻に発生  |
| 簡便さ | ◎ | △ | ○ |
| 電圧波形 | × | △ | ○ |
| 多相フラッシュオーバー | × | × | ○ |
| 総合評価 | △ | △ | ○ |

図 5 に $V-t$ (電圧-時間) 特性の実験結果および積分法による計算結果の比較を示す。両者は良好に一致している。このように積分法はフラッシュオーバーモデルとして十分な精度を有していることがわかる。

(6)電圧スイッチモデルと積分法の比較

電圧スイッチモデルにおけるフラッシュオーバー電圧 V_{FO} として、中実碍子の 50%フラッシュオーバー電圧とそれを $4/3$ 倍したものおよび積分法について比較した。フラッシュオーバー発生最小雷電流に対するフラッシュオーバー相数の計算結果を図 6 に示す。フラッシュオーバー電圧を高く設定することにより電圧スイッチモデルを用いてもおおまかな多相フラッシュオーバーの検討が可能であることがわかる。

(7)相差絶縁方式

図 7 に接地抵抗をパラメータとしたときの相差絶縁方式および中実碍子のみを用いた高平衡絶縁方式によるフラッシュオーバー相数計算結果を示す。図 6 より相差絶縁方式の方が高平衡絶縁方式より多相フラッシュオーバーが生じるのにより大きな雷電流が必要となることがわかる。すなわち相差絶縁方式を用いることにより、線路事故になりにくくなることが確かめられた。

避雷器を 2 相のみ設置 (避雷器 1 相省略) することで線路事故防止およびコストダウンを行っている電路がある [1]。本研究で提案した相差絶縁方式を用いると避雷器を 1 相に設置し、2 相目をフラッシュオーバー電圧が低いピン碍子、3 相目をフラッシュオーバー電圧が高い高圧中実碍子とすることにより、避雷器 2 相省略するが多相フラッシュオーバーが生じにくくすることも可能である。

<引用文献>

[1] 谷口, 他:「配電線 1 相の避雷器省略時の耐雷効果の検討」, 電気学会論文誌, 電力・エネルギー部門, Vol. 114, No. 11, pp. 1150-1159 (1994)

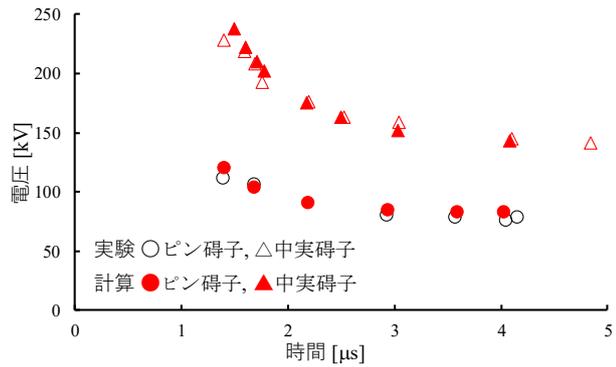


図 5 比較 calculated results with experimental results for applied voltage with negative polarity.

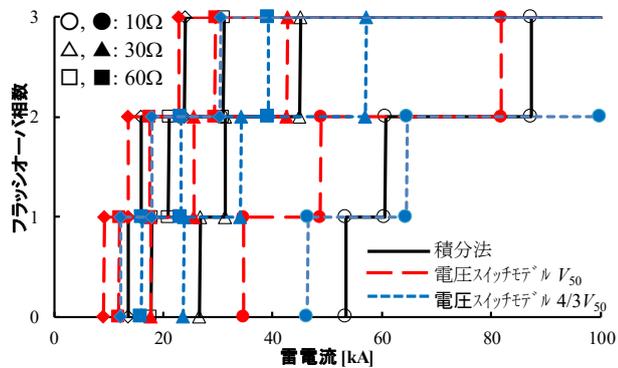


図 6 高平衡絶縁におけるモデル別フラッシュオーバー相数計算結果

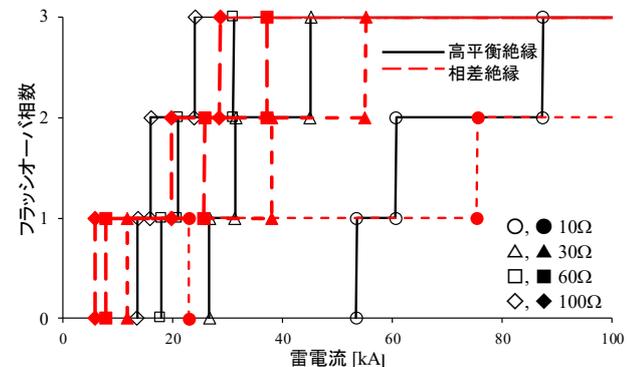


図 7 相差絶縁方式と高平衡絶縁方式によるフラッシュオーバー相数計算結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 関岡昇三、岸海甫 | 4. 巻 139 |
| 2. 論文標題 雷による高圧配電線多相フラッシュオーバーの実験的検討 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 電気学会論文誌 | 6. 最初と最後の頁 487-493 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.139.487 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 関岡 昇三 | 4. 巻 137 |
| 2. 論文標題 高圧配電線多相フラッシュオーバーに関する検討 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 電気学会論文誌. B | 6. 最初と最後の頁 784 - 790 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.137.784 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shozo Sekioka |
| 2. 発表標題 A study on influence of a surge arrester on multiphase flashover in medium-voltage line |
| 3. 学会等名 Asia-Pacific International Conference on Lightning (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shozo Sekioka |
| 2. 発表標題 An application of up-and-down method to 50% multiphase flashover for lightning overvoltages |
| 3. 学会等名 International Symposium on High Voltage Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 S. Sekioka |
| 2. 発表標題 Discussion of a simple model for multiphase flashover analysis in medium voltage line |
| 3. 学会等名 電気学会高電圧研究会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 S. Sekioka |
| 2. 発表標題 for multiphase flashover study in medium-voltage line due to direct lightning hit |
| 3. 学会等名 International Conference on Lightning Protection, Rzeszow, Poland (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 岸 海甫, 浅野義史, 関岡昇三, 三宅久仁彦 |
| 2. 発表標題 高压配電線多相フラッシュオーバーに関する実験的検討 |
| 3. 学会等名 電気学会高電圧研究会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 S. Sekioka |
| 2. 発表標題 Measurement results of flashover voltage on medium-voltage insulators to develop flashover model |
| 3. 学会等名 CIGRE Kyoto Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|