運転中水車発電機の部分放電電荷の校正

正 員 関 紀明 (東京電力)

正 員 角田 美伯 (三菱電線工業)

非会員 美納 智次 (三菱電線工業)

非会員 青木 勝 (三菱電線工業)

Calibration of Partial Discharge Magnitude
for In-service Hydro-power Generator

Toshiaki Seki, Member (Tokyo Electric Power Company)

Minori Kakuta, Member Tomoji Minou, Non-member Masaru Aoki, Non-Member
(Mitsubishi Cable Industries, LTD.)

Hydro-power Generator have many Resistive Thermal Detectors (RTD) which is used to detect over heating of insulation materials for generator stator windings.

By using RTD as the coupling capacitors, In-service Partial Discharge Detection for the insulation diagnosis was studied. For the quantitative treatment of the detected partial discharge, calibration method was developed to utilize calibration data obtained at the periodical insulation diagnosis under off-service condition.

キーワード：水車発電機、運転中絶縁診断、部分放電、温度測定サーチコイル、電荷校正

1. ま え が き

運転停止中の発電機固定子巻線の絶縁診断は古くから検討されている⁽¹⁾。測定項目は直流絶縁抵抗、誘電正接および部分放電などである。筆者らは、これらを自動化した発電機固定子巻線の絶縁診断車を開発し⁽²⁾、現場で使用実績を重ねている。

診断には、発電機を定期的に停止し、試験のため固定子巻線を切り離す準備作業が必要だが、結果は異常のない場合が大半である。そこで、省力化のため、運転中に絶縁診断⁽³⁾を行い、劣化傾向が得られた場合、従来の停止試験を行うことを目標に開発に着手した。

発電機運転中の測定は、操作が簡易で、安全作業が不可欠とされる。さらに、発電機の加工が少なく、絶縁診断車に対応するデータが得られる方法が望まれる。固定子巻線の絶縁寿命は部分放電特性と強い関連性があるため^{(4) (5)}、運転中発電機の部分放電検出を検討対象とした。

部分放電検出は結合コンデンサによる方法などがあるが、運転中の場合、安全性の面から避けることが望ましい。そこで、固定子巻線の絶縁に接してスロット内に設置されている温度測定サーチコイルを放電検出センサ^{(6) (7)}として選定した。

部分放電はパルス現象として検出される場合が多く、検出信号は、供試体の静電容量に反比例し、放電現象の大き

さを直接表さない。部分放電の定量評価には検出信号を電荷で表す必要がある。また、サーチコイルによる運転中の部分放電検出は実機で確認⁽⁸⁾しており、定量評価に電荷校正が重要な意味を持つことが判っている。

既設サーチコイルを利用した運転中の放電電荷校正として、サーチコイル設置位置に応じて校正値を補正する方法が報告されている⁽⁹⁾。だが、補正が困難な場合があると考えられ、筆者らは、部分放電を運転中に定量評価する新しい電荷校正法を検討した。

本論文では、水車発電機運転中に固定子巻線の部分放電を電荷で評価し、さらに、絶縁診断車と連係した測定結果を得ることを目的に行った、サーチコイルを利用した電荷校正方法について報告する。

2. 実験方法

工場試験などで利用される部分放電測定器には低周波法や同調法の装置⁽¹⁰⁾がある。今回使用する装置は、さらに高い周波数成分の同調増幅および周波数掃引の機能のある、周波数解析器⁽¹¹⁾である。測定データは光ファイバで伝送し、コンピュータで測定制御および検出データの処理を行う。測定装置を発電機のサーチコイル(センサ)中継端子に接続して、運転中または停止中に、部分放電ないし校正電荷の応答を測定する。図1に測定装置のブロック構成を示す。

PG: パルス発生器、PC: コンピュータ

図1 実験回路の概要

Fig. 1 Experimental Circuit

3. 実験結果

〈3.1〉 運転中発電機の放電検出

1) 供試発電機および測定方法 定格電圧11kV、12MWの発電機(運転中)の予備サーチコイルの中継端子に、図2のように、測定器を接続し信号を測定した⁽⁸⁾。誘導電圧による端子での感電を避けるため、端子を固定子フレームに接地し、CTで誘導電流を検出した。次に、端子を開放後、誘導電圧値を確認して、電圧検出回路で測定した。サーチコイルのリード(3本)は一括してフレーム間で測定した。運転停止後、中継端子から見たf-Z特性⁽¹²⁾を測定し、配線中の信号の伝わり方を検討した。

図2 測定回路

Fig. 2 Measurement Circuit Diagram

2) 結果 検出信号は、図3に例を示すように、低域から数10 MHz程度の周波数成分を含み、検出箇所ごとにレベル差が認められた。時間掃引(10 MHz)の場合、商用周波数の1周期に数個の放電性のパルス現象を検出した⁽⁸⁾。サーチコイルリードのf-Z特性はインピーダンス極小の特性を示し⁽⁸⁾、信号伝送路長が1/4波長に相当することから、信号が同軸ケーブルと同様に伝搬する状態であり、これは、部分放電信号が検出されていることを裏付けるものである。

〈3.2〉 運転中発電機の電荷校正予備検討

1) 供試発電機および測定方法 定格電圧11kV、14.5MWの発電機(運転中)の予備サーチコイルの中継端子で誘導電圧を確認後、検出信号を測定した⁽¹³⁾。その後、各端子から校正パルスを入力し、特定のサーチコイルで応答を測定した。

上: 運転時 下: 停止時

図3 検出信号の例⁽⁸⁾

Fig. 3 Examples of Detection Signals⁽⁸⁾

2) 結果 サーチコイルとフレーム間の誘導電圧は各場合とも0.2V未満(フルスケール10V)であった。また、各サーチコイルの検出信号の大きさは周波数(500kHz、2MHz)で異なり⁽¹³⁾、それぞれ異なる現象を測定していると考えられる。

図4に検出用のサーチコイル(No. 4) および他のサーチコイル端子からパルスを入力した場合の応答を示す。信号検出用端子以外のどの端子から注入した場合も大差ない応答である。サーチコイルは高周波信号に対する配慮がなく、配線(シールドなし)を束ねた場合、配線間で結合してしまう事が十分に予想出来る。

このように、既存のサーチコイルおよび配線を電荷校正に利用する場合、配線に余分な結合が生じ易いと見られるため、別の方法が必要となる。また、これが既設発電機の現状と考えられる。

図4 注入電荷の応答⁽¹³⁾

Fig. 4 Response of Injected Calibration Pulse Signals

〈3.3〉 スロット内電極他による電荷校正

1) 供試発電機および測定方法 定格電圧11kV、15MWの発電機(停止中)の固定子巻線(巻替前)およびスロット部を加工し、校正電荷の注入法を検討した^{(14) (15)}。具体的手法として、コイル導体に直接注入する方法およびスロット内のくさび下ライナーを金属電極に置換えて静電結合を利用する電荷注入法を検討した。スロットに設置した金属電極の例を図5に示す。直接注入は引出口での注入の他に、スロット外部の巻線絶縁の上から金属針を差込んで注入する方法も利用した。これら4種類の注入法を表1に示す。

図5 電極注入⁽¹⁵⁾

Fig. 5 Metal Electrode Pulse Injection⁽¹⁵⁾

表1 電荷注入方法

Table 1 Calibration Pulse Injection

方式	方法の概要
直接注入	・コイル導体に電荷を直接注入(基準方式) ・運転中には実施出来ない ・金属針の場合は巻換え機に限られる
電極注入	・スロット内部の電極の静電結合利用 ・同軸ケーブル配線の場合他への結合小 ・スロットの加工が可能な場合に限定
隣接注入	・隣接するサーチコイルから注入 ・同軸ケーブル配線の場合他への結合小 ・配線変更により既設機でも可能性あり
端子注入	・中継端子から校正電荷を注入 ・大きさの評価は別途必要 ・既設発電機では加工が不要

2) 結果 注入法および検出周波数をパラメータとした応答の例を図6に示す。注入方式間の傾向として、端子、隣接、電極、直接の順に応答は大きい。さらに特定の注入電荷に対する応答(dB値)は各方式間で比例関係にあることが判る。この結果(校正比率)を利用して、各方式での電荷表示が可能である。

4種類の電荷校正方法の特性比較を表2に示す。発電機

の加工を考慮すると、隣接注入法は配線の変更だけで既設機に適用可能と見られる。実用に際し、1)電荷の評価の精度、2)発電機の加工の難易度、3)運転支障に関わる制限、4)保守の容易さなどから校正法を選定する必要がある。

図6 電荷の注入結果と校正⁽¹⁵⁾

Fig. 6 Charge Injection & Calibration⁽¹⁵⁾

表2 運転中の電荷校正の比較

Table 2 In-service Discharge Calibration

注入方法	特徴	校正比率	備考
隣接注入	配線改良必要	小	実用性高い (加工小)
電極注入	スロットに電極 加工必要	小	加工の機会 限定
端子注入	常時可能 特殊加工不要	大	校正比率大 精度不良
直接注入	(校正の基本)	1 (基準)	電荷注入の機会 限定

〈3.4〉 隣接サーチコイルによる電荷校正

1) 供試発電機および測定方法 定格電圧13.8kV、85MWの発電機(停止中)の固定子巻線(巻替前)を利用して、校正電荷注入法を検討した⁽¹⁶⁾。電荷校正と電荷信号検出は、図7のように、逆動作と考えられる。信号検出の場合、サーチコイルに接した巻線絶縁は結合コンデンサC_kと見なせる。また、校正の場合、巻線絶縁は校正器の標準コンデンサC_oと見なせる。C_oは校正器の一部となり校正電荷値を決める素子となる。

固定子巻線の引出口付近に隣接して設置された2個のサーチコイルの一方を放電検出用に、他の一個を電荷校正用とした。図7の絶縁C_kおよびC_oを異なるサーチコイルで表した等価回路を図8に示す。巻線絶縁に接する、サーチコイル1(検出用)の静電容量が結合コンデンサC_kになる。同様に、サーチコイル2(校正用)の静電容量C₂が校正器の一部のコンデンサのC_oに相当する。また、固定子引出口に、直接校正用のパルス発生器PG1を接続した。

その注入電荷は $q_1 = V_1 \times C_0$ で表される。サーチコイル2による注入電荷は、パルス発生器PG2のパルス電圧を V_2 とすると、 $q_2 = V_2 \times C_2$ で表される。この回路で測定器の検出信号のレベルを比較した。 C_2 の値の実用的評価方法があれば、直接校正に代わり、注入パルス V_2 および C_2 から、サーチコイルによる電荷校正が可能である。

図7 サーチコイルの静電容量

Fig. 7 Equivalent Circuit of Search Coil Detection

図8 隣接サーチコイルによる電荷校正⁽¹⁶⁾

Fig. 8 Discharge Calibration by two RTD Sensor⁽¹⁶⁾

2)結果 直接校正による5,000pCおよび10,000pCの電荷の応答を図9(丸印)に示す。校正には、500pFの静電容量と10Vおよび20Vのパルス電圧を使用した。校正結果およびサーチコイルからの注入値に基づき、校正用サーチコイルの結合静電容量 C_2 を求めている。

まず、図8でPG2から50Vおよび100Vの校正パルスを注入した場合の測定器の検出曲線を求める。この結果に基づき、20Vのパルス入力に対応する測定器の検出レベルとして-45.5dBを得た⁽¹⁶⁾。図9で対応する電荷は13,000pCと読みとれる。検出レベル(-45.5dB)は20Vのパルスをベースとし電荷を表している。ゆえに、 $13,000/20=650\text{pF}$ が固定子巻線およびサーチコイル間の静電容量 C_2 として得られる。静電容量 C_2 にパルス発生器の出力 V_2 を乗じた値を校正電荷値として、運転電圧の有無に関わらず、サーチコイルからの注入で電荷校正が可能である。

図9 直接校正の応答⁽¹⁶⁾

Fig. 9 Response of Direct Injection⁽¹⁶⁾

<3.5> 既設サーチコイルでの検出および電荷校正

1)供試発電機および測定方法 定格電圧6.6kV、7MWの発電機(停止中)の絶縁診断時に絶縁診断車の電荷校正と同時にサーチコイルの電荷校正法⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾を検討した。絶縁診断車による測定と組合せた測定回路を図10に示す。

図10 サーチコイルと絶縁診断車の組合せ測定⁽¹⁷⁾

Fig. 10 Comparative Measurement RTD and Testing Van

2)結果 サーチコイルによる検出動作を絶縁診断車の測定結果と比較し、同程度の測定結果が得られサーチコイルの設置位置についての知見を得ることができた⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。この最大の成果は、絶縁診断車の測定結果と関連した値が得られるような、運転中の電荷校正についての新しい知見が得られたことである。

図10で、絶縁診断車の電荷校正のためにPGから校正パルスを入力する。この応答は、サーチコイルを経由して、本測定器でも検出されるため、サーチコイルの信号検出系も、絶縁診断車の測定装置と同時に電荷校正される。図11に、校正パルスの応答および絶縁診断時の試験電圧による応答の例を示す。サーチコイルの検出信号は、絶縁診断時の校正電荷の応答で校正されている。固定子巻線の竣工試験は必ず行われ、竣工時に校正データを得れば、運転時の電荷校正に利用できる。つまり、停止試験時のサーチコイルの校正データを利用して、運転時の検出信号を図11の如く電圧dBから電荷pCに変換できる。

図11 電荷校正と測定例(定期絶縁診断時)
Fig. 11 Calibration Data of Insulation Diagnosis

〈3.6〉 新設サーチコイルでの検出および電荷校正

1) 供試発電機および測定方法 定格電圧11kV、28MWの発電機(運転中)のサーチコイルについて、停止測定時の校正結果を利用して、運転中に電荷校正を行った⁽¹⁹⁾。なお、このサーチコイルは、部分放電測定用として引出口の直近のスロットに、巻替えの機会に設置した。図12に運転中の電荷校正の様子を示す。

図12 運転中の電荷校正⁽¹⁹⁾

Fig.12 Discharge Calibration at In-service Generator

2) 結果 運転中に電荷校正した部分放電の検出例を図13に示す。(a)は商用周波数の25サイクル分の検出信号を、右の部分は、2サイクルの検出信号の発生状況を、さらに(b)は10分前から現在時刻までの検出信号の大きさの経時変化(q-t)を電荷pCで表す。なお、q-tは絶縁診断車と同様に頻度50PPS 相当の大きさで表した。この発電機の絶縁診断時の試験電圧 $E/\sqrt{3}$ (E : 定格電圧)に於ける検出レベルは、約3,000pC 程度であり、放電現象のバラツキおよび測定が同時でないことから考え、十分に実用性のある、同等の値と判断出来る。

(a) 運転中検出電荷の変化(左: 0.5秒, 右: 2サイクル)

(b) 10分間の電荷(pC)の変化(頻度:50PPS)

図13 運転中の測定結果⁽¹⁹⁾

Fig. 13 Experimental Result of in-service Generator

4. 考察

〈4.1〉 部分放電検出センサとしてのサーチコイル サーチコイルは、図7および図8のように、固定子巻線と静電結合して結合コンデンサとなり、放電を検出をする事が判った。配線間の不要な結合を避けるため、サーチコイルの信号の流れを検出方向だけの単方向とする方法が最も望ましい。また、サーチコイルのリードはフレームに沿って固定子から引き出され、同軸ケーブルと同等の信号伝送路に

なる。これらの周波数特性などを考慮して、検出周波数は1～2MHzとした。

＜4.2＞ 発電機運転中の電荷校正 運転中の発電機の電荷校正法の必要条件をまとめて表3に示す。図13に示した停止絶縁診断時のデータを利用する校正方法は、この要件を満たしている。校正手順は、1)事前の電荷校正データ採取、2)運転時の電荷評価となる。また、この方法では、発電機の運転に支障無く、校正が常時可能である。

表3 運転中の電荷校正の必要条件
Table 3 Necessity for In-service Calibration

No.	内 容
①	発電機の運転に支障を生じない
②	必要な時にいつでも安全に校正出来る ・ 発電電圧の影響を受けない ・ 不用意に循環電流を生じない ・ 回転部分へ接近しない
③	充分な定量性を有する校正である ・ 再現性が良い ・ 絶縁診断車の結果と連係している ・ トレンドの管理が容易
④	発電機への加工が少ない
⑤	現有設備の活用範囲が広い
⑥	保守が容易

＜4.3＞ 校正パルスの減衰 固定子巻線を伝わるパルスは減衰する。ゆえに、サーチコイルが引出口から離れて設置されている場合、校正パルスは減衰の影響を受ける。従来の部分放電測定器（今回より低い検出周波数）に於けるパルスの減衰の場合、引出口から数ターン離れると減衰が激しい⁽²⁰⁾。したがって、サーチコイルを可能な限り引出口近くに設置した。その結果、校正データの扱いは容易になり、測定精度も向上すると考えられる。

なお、サーチコイルは幾何学的配置を考慮して複数のスロットに設置され、引出口に設置されている可能性は低い。そこで、巻替および新設の場合に引出口にも設置した。

＜4.4＞ 校正パルスの不要結合 サーチコイルの配線および中継端子から他の部分への信号の結合は、多くの既設の発電機では避けられない。したがって、この浮遊結合の影響が生じない方法として、本方式が利用できる。

＜4.5＞ 運転時のサーチコイル誘導電圧 サーチコイルはスロット内の上コイルと下コイルに挟まれる。温度測定用のサーチコイルは、これらが同相になるスロットに設置される。したがって、サーチコイルの電位は図14に示すように、上コイルおよび下コイルが接する固定子巻線の対地電圧を静電容量分圧した平均値と考えられる。しかし、実機での測定の結果、誘導電圧の検出は希であった。これは、サーチコイルの配線の静電容量 C_c と固定子に対する静電容量 C_1 、 C_2 が図14の様に C_1 、 $C_2 \ll C_c$ となり、サーチコイルの電位は大地に近くなるためと考えられる。

多くの場合、配線は数m程度以上で、シールド付きの配線であるため、誘導電圧 V_i は無視出来る。その結果、サーチコイルを利用して運転中に安全な測定作業が可能と考えられる。

C_1 、 C_2 ：サーチコイルと固定子の静電容量

図14 サーチコイルの誘導電圧

Fig. 14 Induced Voltage of Search Coil

＜4.6＞ 測定結果の管理および運用への展開 図13に示した10分間の電荷は安定している。数度の測定結果を利用してトレンド管理は容易に行える。また、電荷表示の周波数特性は絶縁診断車と同一のため、絶縁診断車の測定結果を推定できる部分放電測定が可能と考えられる。

5. まとめ

発電機運転中に、固定子巻線の部分放電を温度測定用サーチコイルで検出し、電荷で評価する方法の検討を行い、次のことが明らかになった。

- 1) 運転中の部分放電の検出に、温度測定用のサーチコイルが利用できる。
- 2) サーチコイルは、可能な限り、引出口に近く設置する必要がある。
- 3) 検出した信号の定量評価のための電荷校正には、絶縁診断時の校正データを利用できることを確認した。この校正は、運転中に随時可能である。
- 4) 校正電荷の信号の流れを検出と同一方向としたので、端子・配線などは既設のまま、発電機に格別の加工を必要としない場合もある。
- 5) 10台以上の実機で運転中の電荷校正による部分放電測定を検証した。その結果、定量性の良い部分放電測定が運転中に可能になり、保守の省力化が期待できる。今後、現場への導入検討を行う予定である。

(平成11年6月24日受付、同11年9月3日再受付)

文 献

- (1) 発電機巻線絶縁劣化判定基準委員会、「発電機巻線絶縁劣化判定基準」、電中研報告、No. 67001、(1967-4)
- (2) 熊倉、芦沢、三浦、阿戸、角田、「発電機巻線自動絶縁試験装置の開発(第2報)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-88-75、1988-10

- (3) 「電力設備の運転中絶縁診断技術」、電気学会技術報告 (Ⅱ部) 第402号、1992年1月
- (4) 篠原、中沢、「水車発電機の寿命予測精度の向上」、電気現場技術、1994-6
- (5) 芦沢、中沢、吉田、梅本、「水車発電機固定子巻線の寿命評価」、電気学会誘電・絶縁材料研究会資料、DEI-94-59、1994-9
- (6) 小寺、佐々木、川畑、「高圧回転機絶縁モニター (常時絶縁監視装置) の開発」、昭和60年電気学会全国大会 No. 297
- (7) 伊藤、兼田、林、十倉、「タービン発電機のスロット内センサによる部分放電検出法の検討」、平成5年電気学会全国大会 No. 837
- (8) 内河、芦沢、角田、三上、吉田、阿戸、「水車発電機運転中の部分放電測定の基礎検討 (f-Z特性による信号伝送路解析)」平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会No. 521
- (9) 金神、加藤、佐渡、矢嶋、坂田、阿部、「水車発電機コイル用測温センサを用いた活線絶縁診断法の検討」平成10年電気学会電力・エネルギー部門大会 No. 37
- (10) 例えば、電気学会編、「絶縁試験法ハンドブック」、昭和46年11月
- (11) 美納、諸岡、吉田、角田、安藤、「超高圧CVケーブル線路の部分放電測定システムの開発」、電気学会電線・ケーブル研究会資料、EC-94-28
- (12) 角田、「部分放電測定における検出周波数の選定、インピーダンスの周波数特性 (f-Z特性) の評価およびその適用」、三菱電線工業時報、No. 94、平成10年11月
- (13) 内河、角田、三上、吉田、阿戸、「水車発電機運転中部分放電測定の基礎検討 (2) 電荷校正の予備検討」、平成8年電気学会全国大会 No. 322
- (14) 内河、芦沢、角田、三上、吉田、阿戸、「水車発電機運転中の部分放電測定の基礎検討 (3) (直接注入による電荷校正の検討)」、平成8年電気学会電力・エネルギー部門大会No. 630
- (15) 内河、角田、三上、吉田、阿戸、「水車発電機運転中部分放電測定の基礎検討 (4) 電荷校正方式の比較検討」、平成9年電気学会全国大会 No. 438
- (16) 関、角田、三上、吉田、阿戸、「水車発電機運転中部分放電測定の基礎検討 (6) 隣接サーチコイルを用いた電荷校正方式の予備検討」、平成10年電気学会全国大会 No. 411
- (17) 内河、芦沢、角田、三上、吉田、阿戸、「水車発電機運転中の部分放電測定の基礎検討 (5) サーチコイルと絶縁診断車の比較測定」、平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会No. 663
- (18) 関、角田、吉田、阿戸、「水車発電機運転中の部分放電測定の基礎検討 (7) サーチコイル設置位置と部分放電の検出特性」、平成10年電気学会電力・エネルギー部門大会No. 505

(19) 関、角田、青木、阿戸、「水車発電機運転中部分放電測定の基礎検討 (8) 実機での検出および評価」、平成11年電気学会全国大会 No. 322

(20) S. Furuya, K. Ashizawa, "Application of a Triband Partial Discharge Detector to on-site Measurement" 3rd ICPADM p.1221-1224, July 1991

関 紀 明 (正員) 1969年4月11日生。1993年3月宇都宮大学工学部電気電子工学科卒業。1993年4月東京電力入社。現在、工務部水力発電グループ勤務。主として、水力発電設備の計画、建設、保守業務に従事。

角 田 美 伯 (正員) 1943年1月13日生。1966年3月電気通信大学電気通信学部電波工学科卒業。1968年三菱電線工業 (大日本電線) 入社。電力・電線事業部研究開発部にて、電力ケーブルおよび水車発電機を主とした保守技術の開発に従事。1981年渋沢賞受賞。電子情報通信学会会員。

美 納 智 次 (非会員) 1960年12月2日生。1983年3月神戸大学工学部電気工学科卒業。1983年4月三菱電線工業入社。現在、電力・電線事業部電力情報システム部にて、電力ケーブルを主とした保守技術の開発に従事。

青 木 勝 (非会員) 1969年1月22日生。1994年3月東京電機大学大学院理工学研究科応用電子工学専攻修士課程修了。1994年4月三菱電線工業入社。現在、電力・電線事業部電力情報システム部にて、電力ケーブルを主とした保守技術の開発に従事。