

# マイクロストリップアンテナによるタービン発電機のオンライン部分放電計測

佐古 浩\*  
岡田真一\*\*

On-line Partial Discharge Measurement with Microstrip Antenna for Turbine Generators

Hiroshi Sako, Shinichi Okada

## 要 旨

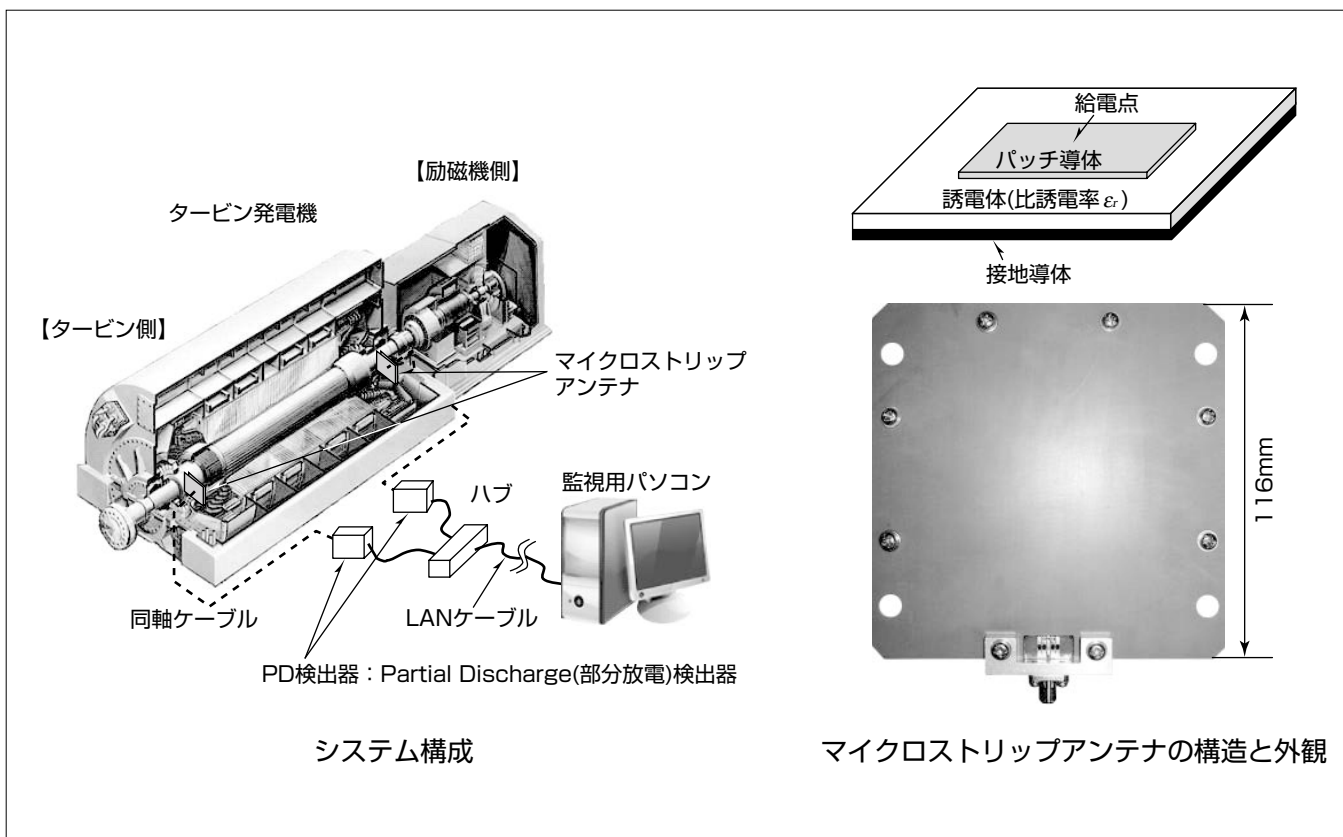
タービン発電機は、蒸気タービン又はガスタービンで駆動する同期発電機であり、電気事業用には電機子を固定子とし、2極又は4極の界磁極を回転子とした回転界磁形が主に使用される。

電力の安定供給の観点からもタービン発電機の予期せぬ不具合による長時間停止は回避すべきであり、昨今では、タービン発電機の運転状態を連続的に監視する装置の需要が高まっている。このような状況のなか、三菱電機は、定格電圧が10～30kV程度の電機子巻線から発生する部分放電をマイクロストリップアンテナによって連続的に監視し、異常の予兆を初期の段階で検出するシステムを開発した。

小型・軽量のマイクロストリップアンテナは、タービン

発電機の回転子を引き抜くことなく短時間で容易に取り付けることができ、高電位部である電機子巻線から離れた場所に設置するため、電機子巻線の主絶縁に悪影響を与えることはない。さらに、信頼性の高い機器でシンプルなシステム構成を実現しており、機器の保守・点検を容易に実施できるように配慮した。

このシステムでは、部分放電が発生した際に生じる電磁波のうち、1.8GHz帯の信号を選択的に受信する。この部分放電信号をもとに生成した“部分放電の位相特性”と“部分放電強度のトレンド”の2つのデータから、タービン発電機を運転したままの状態、電機子巻線の主絶縁の状態を長期間にわたって監視することができる。



## オンライン部分放電計測システムの構成とマイクロストリップアンテナ

タービン発電機の励磁機側及びタービン側に設置したマイクロストリップアンテナによって、電機子巻線(固定子巻線)から発生する部分放電信号を広範囲にわたって連続的に計測し、異常の予兆を初期の段階で検出する。小型・軽量のマイクロストリップアンテナは、回転子を引き抜くことなく短時間で容易に取付けが可能であり、高電位の電機子巻線から離れた場所に設置するので電機子巻線の主絶縁に悪影響を与えることはない。

## 1. ま え が き

タービン発電機は、蒸気タービン又はガスタービンで駆動する同期発電機であり、電気事業用には電機子を固定子とし、2極又は4極の界磁極を回転子とした回転界磁形が主に使用される。電力の安定供給の観点からもタービン発電機の予期せぬ不具合による長時間停止は回避すべきであり、昨今では、タービン発電機の運転状態を連続的に監視する装置の需要が高まっている。このような状況のなか、当社は、電機子巻線から発生する部分放電をマイクロストリップアンテナによって連続的に監視し、異常の予兆を初期の段階で検出するシステムを開発した。

本稿では、このシステムの構成及びデータの評価を中心に述べる。

## 2. 部分放電の種類と計測方法

### 2.1 タービン発電機で発生する部分放電

部分放電とは、誘電体をはさんだ2つの電極間に高電圧を印加したとき、電極間に存在する空隙などで部分的に発生する放電のことをいう。

10～30kV程度の高電圧が発生するタービン発電機の電機子巻線は、一般に複数に重ねたマイカ層と熱硬化性樹脂を主材料とする主絶縁を導体の被覆として用いる。部分放電はこの主絶縁の内部及び外部表面で発生し、新しい電機子巻線であってもある程度は発生する。この主絶縁が、熱、電気、環境及び機械的なストレスを受けることで劣化すると、劣化の進行に対応して部分放電が大きくなる傾向があるため、部分放電を連続的に計測することによって主絶縁の劣化状況を把握することが可能となる。

タービン発電機で発生する部分放電の種類は、表1のように分類できる<sup>(1)</sup>。

### 2.2 部分放電計測の分類

タービン発電機の部分放電計測は、次のように幾つかの視点で分類することができる。

#### 2.2.1 オンライン計測とオフライン計測

タービン発電機の通常運転状態での部分放電計測をオンライン計測と呼ぶ。オンライン計測では、タービン発電機の運転中に部分放電を連続的に計測でき、異常の予兆を初期の段階で検出できることが最大の利点であるが、ノイズの影響を受けやすい<sup>(1)</sup>。一方、タービン発電機を電力系統

表1. タービン発電機で発生する部分放電

部分放電の種類	放電の説明
内部の放電	主絶縁の樹脂内部及びマイカ層の剥離によって生じた空隙で発生する部分放電
スロット放電	電機子巻線と固定子鉄心間の空隙で発生する部分放電
巻線端部の放電	巻線端部での沿面放電や異相巻線間又は接地物との空隙距離不足による部分放電
導電性異物	巻線内の導電性異物によって局所的に発生する部分放電

から切り離して、停止した状態で行う部分放電計測をオフライン計測と呼ぶ。オフライン計測では、任意の相に比較的自由に印加電圧を選定して試験できるという特長があるが、発電機運転中の連続的な計測は行わない。

#### 2.2.2 部分放電信号の検出方法

部分放電の検出は、部分放電発生によって生じる電機子導体内を伝播(でんぱ)するパルス状の信号を、電機子導体にコンデンサを接続して検出する方法と、部分放電発生の際に生じる電磁波をアンテナを用いて検出する方法とに大別できる。

#### 2.2.3 部分放電信号の検出周波数

部分放電発生の際に生じる信号(電機子導体内を伝播する信号や電磁波)は、幅広い周波数成分を持つ<sup>(2)(3)</sup>。部分放電信号を検出する周波数帯は次のように大別できる。

- (1) 長波-短波(約100kHz～30MHz)
- (2) 超短波-極超短波(30MHz～3GHz)

波長が短いと部分放電信号が減衰しやすいが、ノイズの影響を受けにくくなる<sup>(1)</sup>。

## 3. マイクロストリップアンテナの設計

### 3.1 部分放電信号の周波数スペクトル

図1は、2002年に製造された3.0MW、6.6kVの電動機に広帯域のホーンアンテナを設置して、電動機の運転時と停止時の周波数スペクトルを比較したものである。電動機停止中の周波数スペクトル(図1(b))に部分放電の信号が重畳したものが、電動機運転中の周波数スペクトル(図1(a))と考えられ、部分放電信号は幅広い周波数成分を持つことが分かる。電動機停止中にも特定の周波数で高い信号強度が確認できるが、これは通信や放送等の電波によるノイズと思われる<sup>(2)</sup>。

### 3.2 マイクロストリップアンテナの設計

図1(b)から、1.8GHz周辺はノイズが比較的少ないことが分かり、図1(a)から、部分放電信号の周波数成分は1.8GHz周辺を含んでいることが分かる。また、受信する周波数が高くなるほどアンテナの形状を小さくすることが

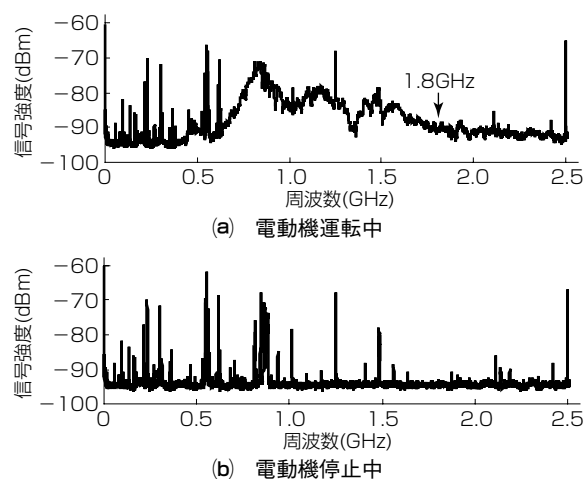


図1. ホーンアンテナによる周波数スペクトル

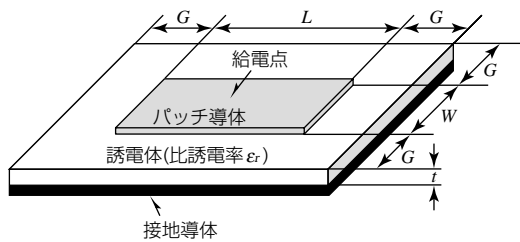


図2. マイクロストリップアンテナの構造

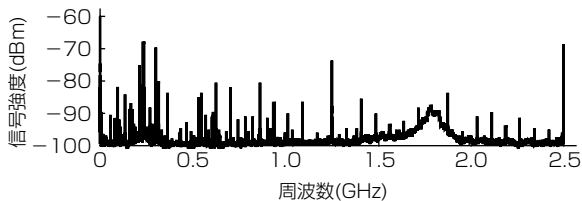


図3. 設計したマイクロストリップアンテナで得た部分放電信号の周波数スペクトル

可能なので、マイクロストリップアンテナの設計では1.8GHzの部分放電信号を選択的に受信するようにした<sup>(2)</sup>。

マイクロストリップアンテナは図2に示すように、接地導体の上に厚さ $t$ (m)、比誘電率 $\epsilon_r$ の誘電体を重ね、さらに、その上に長さ $L$ (m)、幅 $W$ (m)のパッチ導体を重ねて構成している。アンテナの共振周波数 $f_r$ (Hz)は、式(1)で表すことができる。また、アンテナ帯域幅の共振周波数 $f_r$ に対する比 $B_w$ は式(2)となる。図2で $G$ の長さはアンテナのピーク利得に関係する<sup>(4)</sup>。このようにして、共振周波数 $f_r$ が1.8GHzでノイズ除去の観点から狭い受信帯域幅を持たせたマイクロストリップアンテナを設計した。アンテナの寸法は、一辺の長さが116mmの正方形であり、コンパクトな形状となっている。

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots(1)$$

$c$ : 真空中での光速 ( $3.0 \times 10^8$  m/s)

$$B_w = 3.77 \times \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \times \frac{W}{L} \times \frac{t \cdot f_r}{c} \dots\dots\dots(2)$$

### 3.3 周波数スペクトルの確認

3.2節で設計したマイクロストリップアンテナを1980年に製造された1.3MW、6.6kVの電動機内に設置したところ、電動機運転中に図3の周波数スペクトルが得られた。ノイズを除いたときの信号強度のピークは1.8GHzにあり、設計どおりの特性が得られていることを確認した<sup>(2)</sup>。

## 4. 部分放電計測システムの構成

### 4.1 システム構成

マイクロストリップアンテナによるオンライン部分放電計測システムの構成を図4に示す。マイクロストリップアンテナで受信した部分放電信号は、同軸ケーブルによって機外に導かれ、PD検出器で信号処理を行った後に監視用パソコンに伝送される。

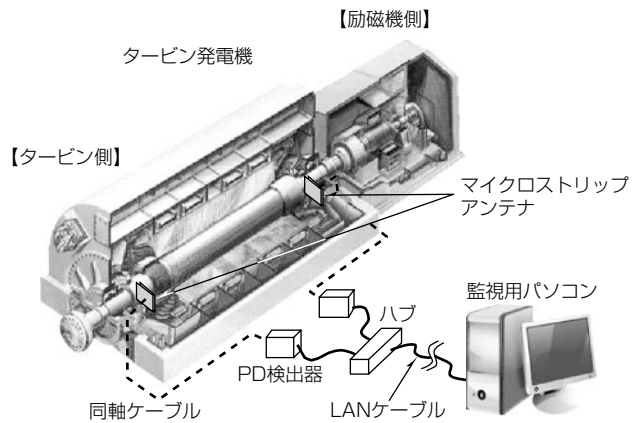


図4. 部分放電計測システムの構成

## 4.2 構成機器

### 4.2.1 マイクロストリップアンテナ

マイクロストリップアンテナはタービン発電機内の電機子巻線端部の近傍に2枚(タービン側1枚、励磁機側1枚)設置することを標準とし、それぞれが電機子巻線から発生する部分放電信号を広範囲にわたって受信する。高電位部である電機子巻線から離れた場所に設置するため、電機子巻線の絶縁に悪影響を与えることはなく、取付けの際に回転子を引き抜く必要もない。マイクロストリップアンテナで受信した部分放電信号は、同軸ケーブルを介して機外に設置したPD検出器に導かれる。信号の減衰を防ぐために、同軸ケーブルの長さは最小化することが好ましい。

### 4.2.2 PD検出器(部分放電検出器)

部分放電信号のノイズ処理やアナログ→デジタル変換(A/D変換)等を行う。

### 4.2.3 監視用パソコン

PD検出器から伝送された部分放電信号の加工・表示・保存等を行う。発電所内での長期使用を考慮して、耐久性に優れた産業用パソコンを使用する。

## 5. 部分放電データの取得と評価

この部分放電計測システムは、 $10^{-9}$ mWから $10^{-3}$ mWまでの幅広い部分放電信号を取り扱う。これらを1mWを基準としたデシベル表示を行うと、-90dBmから-30dBmとなる。このシステムでは、これを0Vから10Vにおおよそ直線的に置き換えたものを部分放電強度として標準的に使用し、部分放電データの評価には“部分放電の位相特性”と“部分放電強度のトレンド”の2つを使用する。

### 5.1 部分放電の位相特性

図5は部分放電の位相特性であり、横軸が任意の相の電圧位相、縦軸が部分放電強度である。アンテナで受信した部分放電信号は強度と位相の情報を持っているので、一定時間(例えば5秒間)の全ての受信信号をプロットすることで、位相特性が得られる。

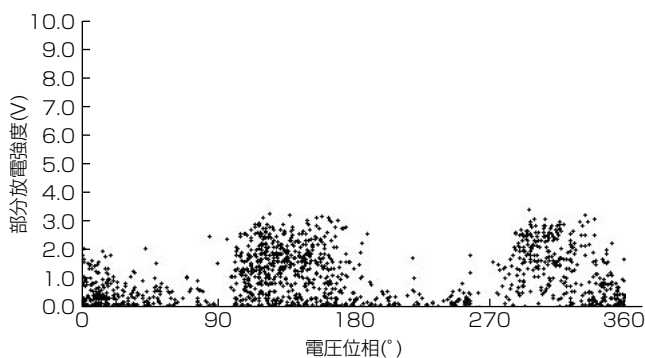


図5. 部分放電の位相特性

参考文献(1), (5)等には, 電機子導体内を伝播する部分放電信号をコンデンサによって検出する方法で, 表1に記載したそれぞれの部分放電が特徴的な位相特性パターンを示すことが述べられている。マイクロストリップアンテナによって部分放電を検出するこのシステムでも, 位相特性から部分放電の種類や発生相を特定することが可能と考えられるため, 意図的に各種の欠陥を与えた模擬巻線で部分放電を発生させ, 位相特性パターンの取得を行っている<sup>(6)</sup>。将来は, 異常予兆の判定基準に位相特性パターンの評価も含める予定である。

### 5.2 部分放電強度のトレンド

部分放電のデータ評価では, 一般的に電圧1サイクルのうちに1個の頻度で発生する部分放電強度を評価の対象とするので, 50Hz機の場合は50個/s(50pps: pulses per second), 60Hz機の場合は60ppsとなる部分放電強度が対象となる。図5のデータを繰り返し取得するたびに, 50pps又は60ppsとなる部分放電強度のデータが得られ, これを時系列に並べると部分放電強度のトレンド図となる。長期間にわたって部分放電強度のトレンドを監視することで, 部分放電が一定レベルにあるのか, 上昇傾向にあるのかといった情報が得られる。

電機子巻線に異常がない場合の部分放電強度は, タービン発電機の運転開始直後などに一時的に平常時より高くなる場合があるが, これを除くとある一定のレベルに落ち着く。このときの部分放電強度を“初期値”とし, トレンド図で部分放電強度が初期値よりも2V(約10倍, 10dB)増加, 又は6か月間で1.2V(約5倍, 7dB)増加した場合を異常の予兆ありと判断する。

図6は, 水素冷却タービン発電機(定格電圧19kV)で, 電機子巻線の巻替前後で部分放電強度のトレンド図を比較したものである。このタービン発電機は, 長期間の使用によって電機子巻線の劣化が認められたため, 全ての電機子巻線の巻替を実施しており, 巻替後は部分放電強度が小さくなっていることが確認できる。

### 5.3 異常の予兆を確認したときの処置

異常の予兆が確認された場合は, タービン発電機の停止

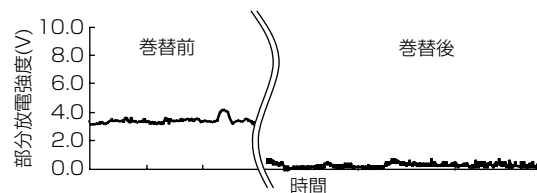


図6.トレンド図による巻替前後の部分放電強度の比較

時に, 電機子巻線端部の目視点検, エアギャップ部のロボット点検及び電気試験による絶縁診断の実施を推奨する。

## 6. む す び

マイクロストリップアンテナによるオンライン部分放電計測システムは, タービン発電機の運転中に発生する部分放電を広範囲かつ連続的に監視し, 異常の兆候を初期の段階で検出することを実現する。

小型・軽量のアンテナは, 回転子を引き抜くことなく短時間で容易に取付けが可能であり, 高電位部である電機子巻線から離れた場所に設置するため, 電機子巻線の主絶縁に悪影響を与えることはない。さらに, 信頼性の高い機器でシンプルなシステム構成を実現しており, 機器の保守・点検を容易に実施できるように配慮した。新設及び既設タービン発電機へのこのシステムの組み込みを推進し, タービン発電機の長期間にわたる安定運転を実現していく。

## 参 考 文 献

- (1) IEC TS 60034-27-2:2012:Rotating electrical machines On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines (2012)
- (2) Muto, H., et al.: On-line PD monitoring system for rotating machines using narrow band detection of EM wave in GHz range, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (2008)
- (3) 岡田真一, ほか: 発電機コイルの絶縁模擬欠陥のPD電磁波特性, 電気学会全国大会講演論文集, No. 2, 83~84 (2012)
- (4) 兼田吉治, ほか: 回転電機の部分放電計測装置及び回転電機の絶縁診断方法, 特開2006-250772 (2006)
- (5) Hudon, C., et al.: Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 12, No. 2, 297~319 (2005)
- (6) Sako, H., et al.: On-line PD Monitoring System with Microstrip Antenna for Synchronous Generators, CIGRE SC A1 Rotating Electrical Machines, A1-110 (2012)