

高圧電動機の絶縁劣化兆候検知手法の開発(2) - オンライン部分放電モニタによる実機試験の結果 -

Development of Method for Detecting Signs Deterioration in Insulator
of High-Voltage Motors(2)

- Test Results of a New On-line Partial Discharge Monitor for High-
Voltage Motors in Nuclear Power Stations -

栃尾 篤(Atsushi Tochio)*

兼田 吉治(Yoshiharu Kaneda)[†] 浦川 伸夫(Nobuo Urakawa)^{††}

要約 原子力発電所で数多く用いられている高圧電動機の絶縁劣化を早期に検出するため、運転中に絶縁物中の部分放電(PD)を測定するオンライン部分放電モニタを新たに開発し、実際の原子力発電所の16台の高圧電動機で試験を行った。この実機試験の結果から、ノイズ除去の周波数帯域の設定方法を明確にし、高圧電動機に内蔵されている測温センサ(RTD)を電磁アンテナとして検出するRTD直接検出はPDに対して十分な感度を有することを確認した。RTDが温度計測に使われている場合やRTDを内蔵していない場合に用いる高周波変流器(RFCT)検出では、感度は約1/10となるがPDの簡易診断に使える可能性があることが分かった。

更に、従来のオフライン試験結果と今回のオンライン試験結果の関係に相関性が認められ、これまでのオフライン試験で確立されてきた管理方法がオンライン試験にも適用できる可能性があることを示した。

キーワード 高圧電動機, 絶縁劣化, 部分放電, オンライン部分放電モニタ

Abstract For the purpose of early detection of deterioration of insulators in high-voltage motors which are widely utilized in nuclear power stations, a new on-line partial discharge(PD) monitor was developed and was tested for sixteen motors which were practically running in nuclear power stations. From the test results, it is seen that (1)good signal to noise ratio is obtained by adopting a two frequency correlation method, (2)a resistance temperature detector(RTD) in a motor has sufficient sensitivity to detect PD, (3)when RTD is not installed or is unable to use for this purpose, a radio frequency current transformer(RFCT) can be utilized, although its sensitivity is about 1/10 of that of the RTD monitor.

Finally we found a good correlation between the results of this on-line method and the conventional off-line method in which the insulator resistance of a concerned motor was measured during its shut-down, and thereby we demonstrated that this method could be applicable to the on-line test of high-voltage motors in nuclear power stations.

Keywords High-voltage motor, deterioration of insulators, partial discharge, on-line partial discharge monitor.

1. はじめに

原子力発電所には、1次冷却材ポンプモータをはじめ主要な回転機用として数十台の高圧電動機が用

いられている。高圧電動機は定期点検中にオフラインで絶縁抵抗測定などの絶縁試験を実施しているが、運転中に絶縁破壊すると発電所の運転に支障を来す恐れがあるため、故障の主要因である固定子巻

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

† 三菱電機(株)先端技術総合研究所

†† 三菱電機(株)電力・産業システム事業所

線の絶縁劣化度，残存耐電圧などを非破壊的にオンライン診断を行う技術開発が期待されている．高圧電動機の固定子巻線に絶縁劣化が生じた場合に，最も多く発生する現象は，マイカ/エポキシ絶縁体が熱的，機械的，電気的またはそれらの複合要因によって起こる部分放電(PD:Partial Discharge)である．そこで，オンライン絶縁診断技術として，運転中のPDを測定する方法が世界的に研究されている．しかしながら，PDと類似のノイズが問題となり国内では実用化が進んでいない現状にある．

本研究は，原子力発電所の安全性と信頼性を向上するための研究の一環として，運転中の高圧電動機のPD測定について簡易にオンライン診断が可能な可搬型システムの構築を目指している．

前報では，3種類のオンライン絶縁劣化兆候検知手法(部分放電モニタ)の比較試験を実施し，運転中の高圧電動機でPDを検知できることを確認した⁽¹⁾．

本報は，得られた成果を実機試験に応用し，最適な絶縁診断システムとして設定する条件について検討を行った．

2. 試験の方法

2.1 検出の原理

運転中の高圧電動機の内部で発生しているPDとノイズの概念を図1に示す．高圧電動機の機内で発生するPDは，高周波信号の減衰割合が小さく，高圧電動機の外部(電源，接地線)から侵入するノイズは，伝搬経路が長くなり高周波信号の減衰割合が

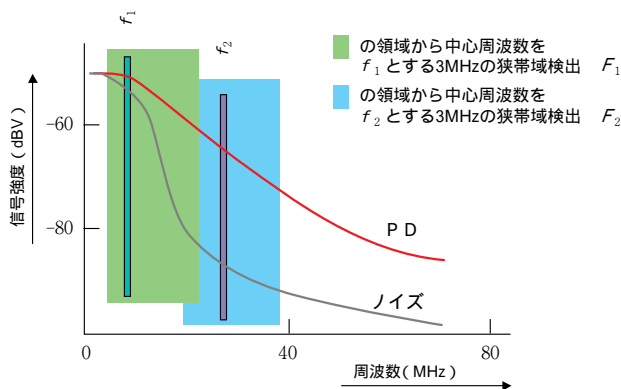


図1 2周波相関によるノイズ除去の概念図

大きい．この特性から観測する高周波領域を低い領域(ここでは緑の領域と称し，約5~20MHz)および高い領域(ここでは青の領域と称し，約15~40MHz)に分け，各領域でそれぞれ中心周波数 f_1 および f_2 ，帯域幅はいずれも3 MHz(狭帯域)として，出力信号を取り出した．なお， f_1 はあまり小さくすると感度が下がることにも注意した．このようにして得た緑の領域からの信号 F_1 と青の領域からの信号 F_2 を比較すると，PD群では F_2 は F_1 からあまり低下せず，すなわち， F_2/F_1 は1に近いのに対し，ノイズ群では F_2/F_1 は1よりずっと小さくなる．そこでこの比によりPDとノイズが識別できる．本研究ではこのようにしてノイズを除去する2周波相関法を採用した⁽²⁾．実際には高圧電動機によって，この高周波信号の周波数分布が異なるため，部分放電モニタを用いそれぞれの場合について最適な f_1 と f_2 の組み合わせを探索した⁽³⁾．

2.2 検出の方法

PD検出は，高圧電動機の温度測定のために固定子スロットに内蔵されている測温センサ(RTD:Resistance Temperature Detector)を電磁アンテナとして利用し，機外のRTD端子箱にて直接結線して信号を取り出すRTD直接検出，RTDリード線に高周波変流器(RFCT:Radio Frequency Current Transformer)を取り付けるRTDRFCT検出および接地線にRFCTを取り付ける接地線電流RFCT検出である．各々の検出方法を図2と図3に示す．

実機試験に用いた部分放電モニタは，新たに開発した高圧電動機用オンライン部分放電モニタである⁽⁴⁾．その外観を図4に，回路図を図5に示す．この部分放電モニタは，RTD直接検出，RTDRFCT検出，接地線電流RFCT検出および結合コンデンサ検出(今回は実施していない)を選択して使い分けができ，測定データからPDのトレンド管理や絶縁劣化状態監視を可能とするものである．

2.3 供試体

供試体は，関西電力(株)の美浜，高浜および大飯

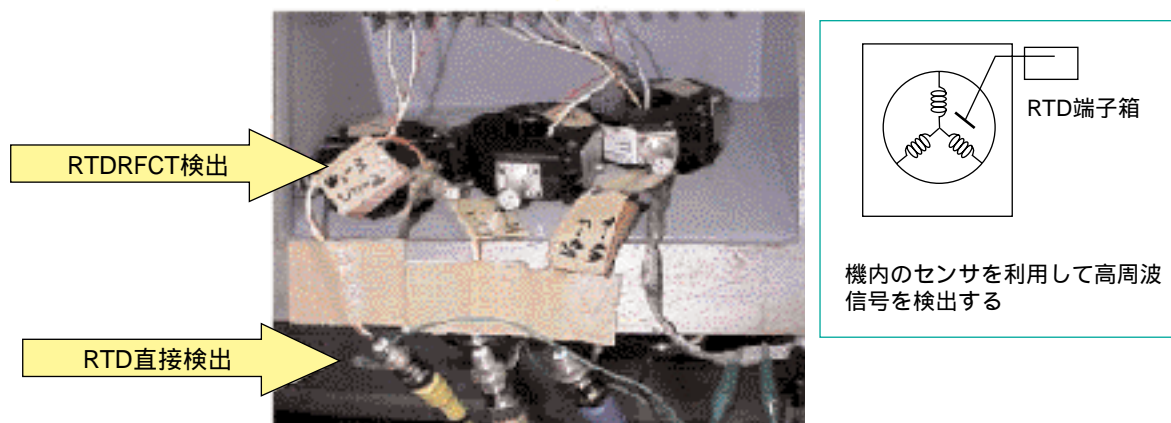


図2 RTD直接検出およびRTDRFCT検出



図3 接地線電流RFCT検出

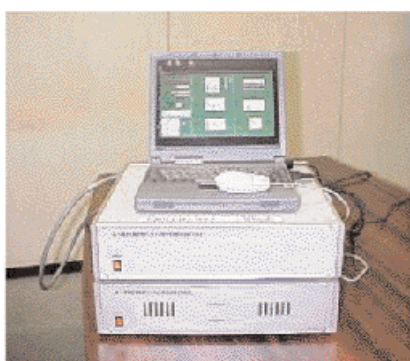


図4 高圧電動機用オンライン部分放電モニタの外観

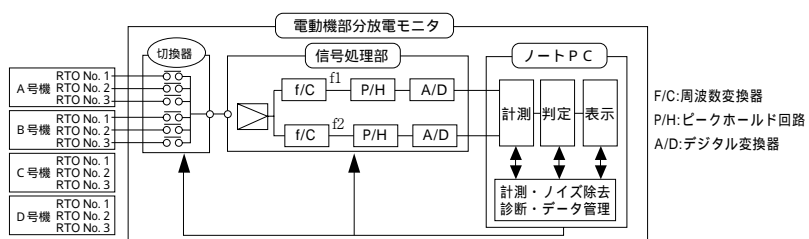


図5 高圧電動機用オンライン部分放電モニタの回路図

表1 供試体

発電所	高圧電動機名称	容量	台数	RTD 内蔵
美 浜 2号機	給水ポンプ (FWP) モータ	3,760kW	3	有
	給水ブースタポンプ (FWBP) モータ	740kW	2	無
	海水ポンプ (SWP) モータ	350kW	1	有
	復水ポンプ (CP) モータ	800kW	1	無
高 浜 2号機	給水ポンプ (FWP) モータ	3,800kW	4	有
	海水ポンプ (SWP) モータ	580kW	1	有
大 飯 1/2号機	復水ポンプ (CP) モータ	4,100kW	2	有
	海水ポンプ (SWP) モータ	850kW	2	有

発電所で稼働中の3相誘導電動機より表1の通り選定した。対象機は全て三菱電機株式会社製の6.6kV、B種絶縁(D F:エポキシ全含浸絶縁)のものである。

2.4 試験の項目

それぞれの供試体の高圧電動機について試験し、下記のを求めた。

- (1) RTD直接検出等3手法の感度比
- (2) PD測定帯域とノイズ除去帯域の最適条件
- (3) オフライン試験とオンライン試験の相関性
- (4) オンライン試験と絶縁破壊値の相関性

3. 試験の結果と考察

3.1 RTD直接検出等3手法の感度比

関西電力(株)の原子力発電所で稼働している高圧電動機の約半数はRTDを内蔵しているため、RTD直接検出、RTDRFCT検出により運転中の高圧電動機についてオンライン部分放電測定を実施した。また、

RTDを内蔵していない残り約半数の高圧電動機については、接地線電流RFCT検出での測定を実施した。

この3手法によるPDデータを一元管理するためには、3手法間の感度比を求める必要があり、RTDを内蔵している高圧電動機についても接地線電流RFCT検出による測定を実施した。ここで、図6に示すようにオンライン試験の評価で使用される60PPS (Pulses Per Second) とは、60Hzの場合、1サイクルに1回安定的にPDが発生しているレベルを最大放電電圧値60PPSと定義して用いており、オフライン試験において管理されている最大放電電荷量 Q_{max} に相当する。

実機試験の結果を、RTD直接検出とRTDRFCT検出の関係として図7にまとめて示す。両者を別々に測定し、高圧電動機ごとに相関を求めたためバラツキはあるものの、RTDRFCT検出の検出感度はRTD直接検出のほぼ1/10となった。同様に、RTD直接検出と接地線電流RFCT検出の関係を図8に示す。データのバラツキが大きいですが、両者間には相関性が認められる。接地線電流RFCT検出の検出感度は、この場合もRTD直接検出のほぼ1/10となった。

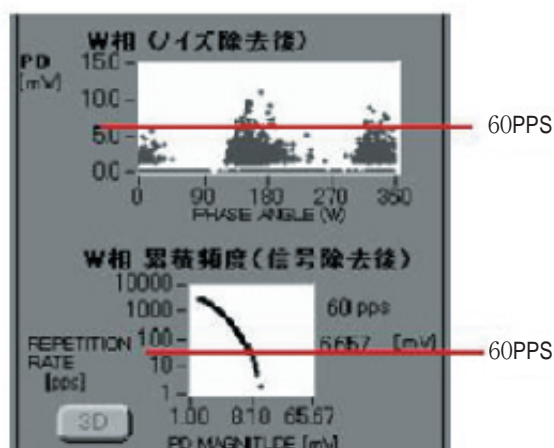


図6 オンライン60PPSレベルの例
(上：位相とPD強度の関係)
(下：PD強度とパルス個数の関係)

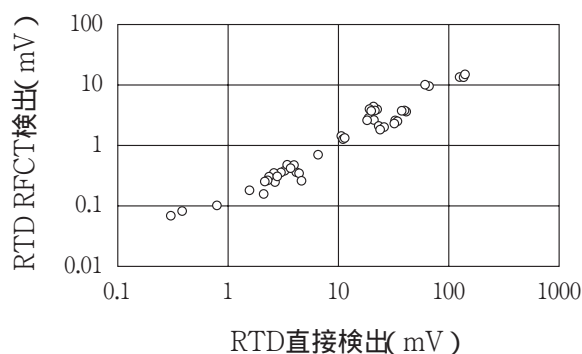


図7 RTD直接検出とRTDRFCT検出の関係

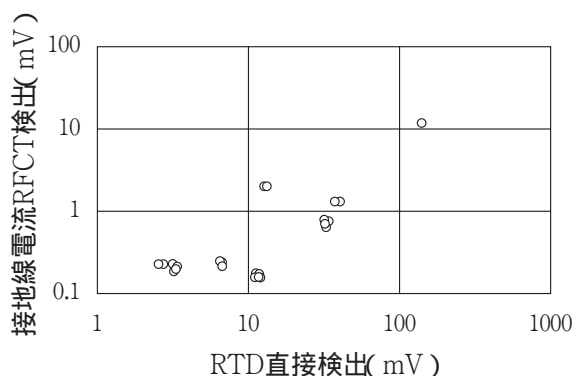


図8 RTD直接検出と接地線電流RFCT検出の関係

RTD直接検出は感度良くPDを検出できるので、RTDRFCT検出と接地線電流RFCT検出の測定データを10倍することで、RTD直接検出を基準としたPDの一元的な管理が可能であると考えられる。よって、本報の研究結果としての3手法の感度比は、RTD直接検出：RTDRFCT検出：接地線電流RFCT検出=10:1:1が妥当と考えられる。

3.2 PD測定帯域(f_1)とノイズ除去帯域(f_2)の最適条件

図9に美浜2号機-B-海水ポンプモータの試験結果を示す。表示は前述の3手法の感度比に基づき、RTD直接検出に対してRTDRFCT検出と接地線電流RFCT検出は各々10倍している。実機試験のPD測定で基準とするRTD直接検出の信号強度は、 $f_1=10\text{MHz}$ とした方が $f_1=20\text{MHz}$ とした場合より2倍以上大きく検出できる。

図10に高浜2号機-A1-給水ポンプモータの試験結果を示す。この高圧電動機はPDレベルが低かったため、 $f_1=20\text{MHz}$ では接地線電流RFCT検出ができなかった。この結果でもRTD直接検出の信号強度は、 $f_1=10\text{MHz}$ とした方が $f_1=20\text{MHz}$ とした場合より2倍程度大きく検出できる。

図11に高浜2号機-A1-給水ポンプモータの内部で発生しているRTD直接検出によるPDの周波数特性(FFT)を示す。緑で示す信号がトリガ相の検出信号であり、同期して検出しているのは他の2つのRTDからの信号である。図から40MHz近辺からPDの信号強度が減衰傾向にあることが分かる。高圧電動機によっては40MHz手前で減衰するものもあり、40MHz近辺は2周波相関による信号強度比較ではPDがノイズと判断される可能性のある領域である。このことから、 $f_2=40\text{MHz}$ より $f_2=20\text{MHz}$ または30MHzの方が望ましいと言える。

図12に大飯1号機-C-復水ポンプモータの試験結果を示す。こちらも図10と同様に $f_1=20\text{MHz}$ では接地線電流RFCT検出ができなかった。よって、本報の研究結果として最適な $f_1:f_2$ の組み合わせ条件は、ほぼ同レベルでPD検出が可能な、10MHz:20MHzまたは10MHz:30MHzであると言える。

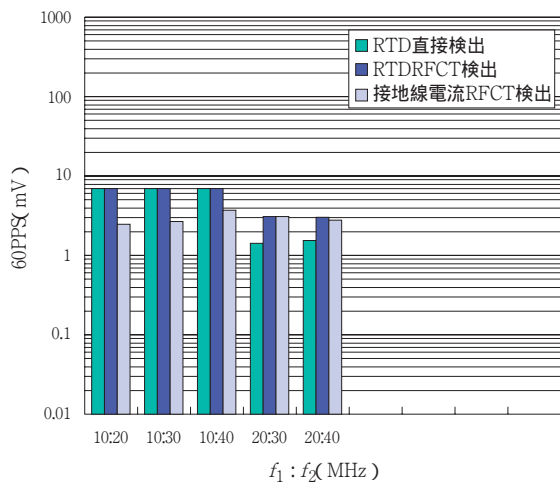


図9 美浜2号機-B-海水ポンプモータの $f_1:f_2$ と60PPSの関係

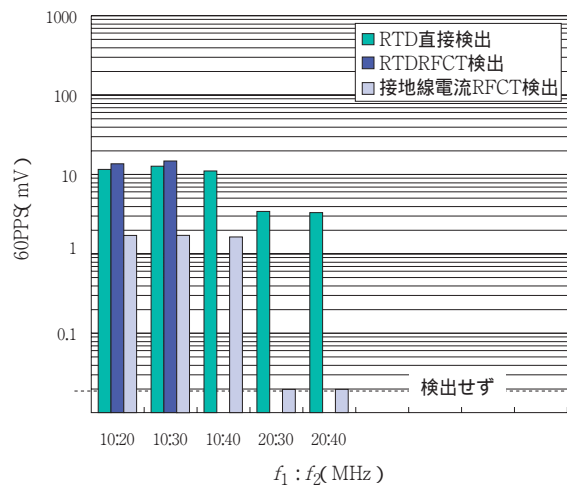


図12 大飯1号機-C-復水ポンプモータの $f_1:f_2$ と60PPSの関係

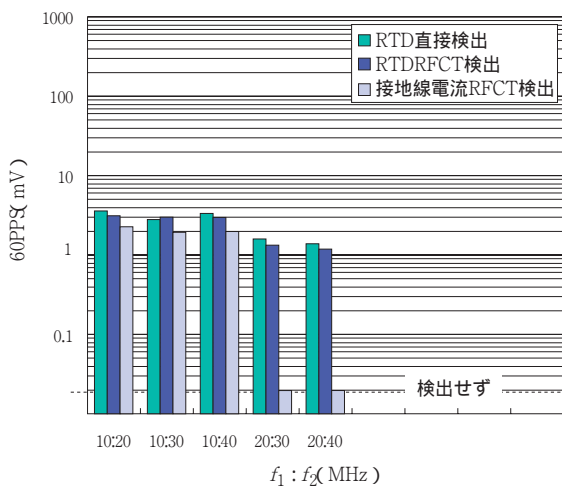


図10 高浜2号機-A1-給水ポンプモータの $f_1:f_2$ と60PPSの関係

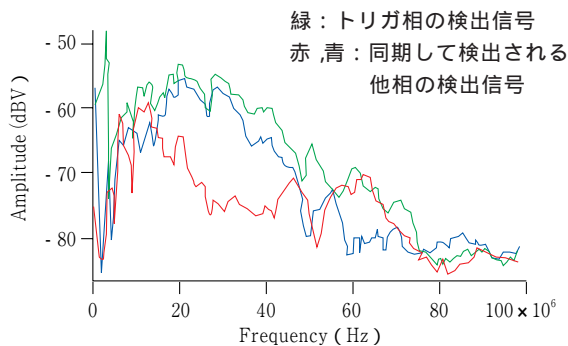


図11 高浜2号機-A1-給水ポンプモータの周波数特性

3.3 オフライン試験とオンライン試験の相関性

図13に、オフラインQmaxと今回のオンライン60PPS (RTD直接検出換算) の関係を示す。データはオフラインQmax測定直後を青丸、1年以内を黒丸で示し、2~5年経過した白丸で示したデータは今回のオンライン測定時にはQmaxが上昇している可能性のあるものである。この図から60PPSを直ちにQmaxに変換できるほどではないが、両者間で相関性が認められる。これは、これまでのオフライン試験で確立されてきた管理方法がオンライン試験にも適用できる可能性のあることを示している。

本研究においては当初オフラインQmaxとオンライ

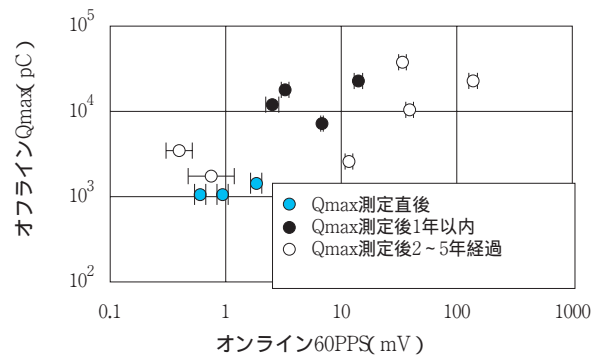


図13 オフラインQmaxとオンライン60PPSの関係

ン60PPSの相関性を得るのは難しいと考え、オンライン60PPSと絶縁破壊値(BDV:Break Down Voltage)の関係を求め、判断・管理基準を確立することが必要な問題であった。ここで、オンライン試験にオフライン試験で確立されてきた管理方法が使えるということは、相互補完による高圧電動機の絶縁診断精度の向上が期待できる。この相関性からオフラインQmaxの許容値である100,000pCに相当するオンライン60PPSのレベルとして約100mVを目安として検討を進める。

ただし、高圧電動機の運転中は絶縁体に加わる電氣的・機械的・熱的・電磁的ストレスが停止中と比較して異なる。そのため、たとえ同じセンサ、同じ測定器を用いた場合でも運転中と停止中では検出されるPDレベルは異なり、そのPDレベル差は劣化の種類や程度に依存すると考えられる。

3.4 オンライン試験と絶縁破壊値の相関性

まず、図14に平成11年度の絶縁更新機(固定子巻線巻き換え)を対象に定期点検時のオフラインQmaxと絶縁破壊値(BDV)の関係を示す。図中の回帰曲線および90%信頼区間は、従来のオフライン試験で確立されてきた管理方法のものをそのまま使用した。プロットのバラツキは、これまでに蓄積されたオフラインQmaxのプロットと同傾向を示した。これは、オフラインQmaxのレベルが高くなると絶縁破壊値は低いレベルに収束する傾向にあり、安全運転下限に対する許容値をオフラインQmax=100,000pCとして管理するものである。

ここで、前述のオフラインQmax(100,000pC)とオンライン60PPS(100mV)に相関性が認められたことから、図15にオフライン試験の回帰曲線上に実機試験で得られたオンライン60PPSと絶縁破壊値(BDV)の関係を求めるためのプロットを試みた。その結果、プロットのバラツキは、同様にオンライン60PPSのレベルが高くなると絶縁破壊値は低いレベルに収束する傾向にあり、オフライン試験で確立されてきた管理方法がオンライン試験にも適用できる可能性のあることを示している。

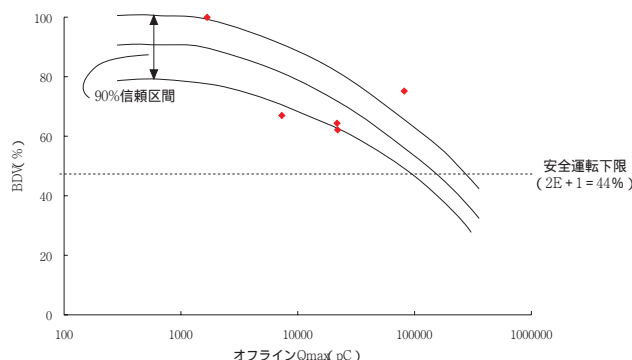


図14 オフラインQmaxと絶縁破壊値(BDV)の関係

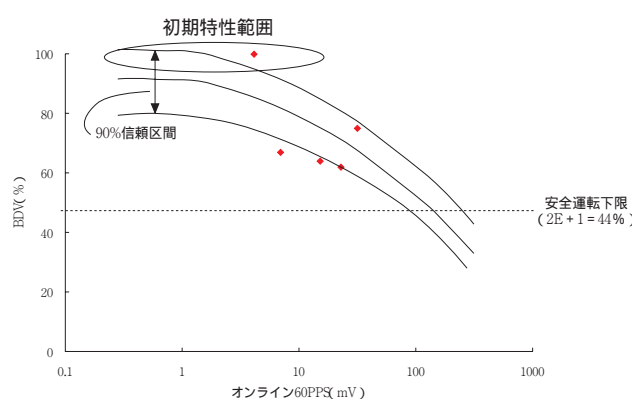


図15 オンライン60PPSと絶縁破壊値(BDV)の関係
(オフライン回帰曲線使用)

4. おわりに

原子力発電所で用いられている高圧電動機の絶縁劣化を運転中に診断する方法の開発を目指し、実機試験を通して最適な絶縁診断システムの設定を行った。その結果、PD測定とノイズ除去のための周波数条件の設定、RTD直接検出など3手法の感度比の設定に目途が着いた。また、従来のオフライン手法と今回のオンライン手法の関係およびオンライン手法と絶縁破壊値の関係に相関性が見えてきたことは、相互補完による高圧電動機の絶縁診断の精度向上が期待できる。今後も実機試験によるデータを蓄積し、各種設定の検証、各種相関性の明確化からオンライン試験における判断・管理基準の確立を進める予定である。

5. 謝辞

本研究の遂行に当たり、助言と発電所での試験に多大な御協力を頂きました関西電力(株)原子力事業本部の関係者の方々に深く謝意を表します。

文献

- (1) 栃尾篤：「高圧電動機の絶縁劣化兆候検知手法の開発(1)」，- オンライン部分放電計測手法の比較検討 - ，INSS JOURNAL, No.6, pp.135 - 142 (1999)
- (2) 栃尾篤，兼田吉治，釣本崇夫，浦川伸夫：「高圧電動機のオンライン部分放電計測技術の開発(1)」，- 狭帯域2周波相関によるノイズ識別方法 - ，平成11年電気学会基礎・材料・共通部門大会, pp.450 (1999)
- (3) 栃尾篤，兼田吉治，釣本崇夫，浦川伸夫，竹野正宏：「高圧電動機のオンライン部分放電測定技術の開発(2)」，- 原子力発電所でのオンラインPD計測結果 - ，平成12年電気学会全国大会, 2-085 (2000)
- (4) 兼田吉治，釣本崇夫，浦川伸夫，竹野正宏，栃尾篤：「高圧電動機のオンライン部分放電測定技術の開発(3)」，- 電動機オンライン部分放電モニタの開発 - ，平成12年電気学会全国大会, 2-086 (2000)