

高圧電動機の運転中部分放電測定による絶縁診断の実機適用

Application to the system of insulated diagnosis in High-Voltage Motors by Partial Discharge

(株)原子力安全システム研究所 三上 雅生 Masao MIKAMI Non Member

For the purpose of early detection of deterioration of insulators in high-voltage motors which are widely utilized in nuclear power stations, a new type on-line partial discharge monitor developed at INSS was applied to test the degradation of about 150 sets of high-voltage motors running in nuclear power stations practically. From the results, it is shown that (1)tendency of the degradation can be obtained by this method in general, (2)the magnitude of the on-line partial discharge hardly correlates that of off-line measurement, but depends on temperature and other environmental conditions. (3)By observing phase characteristics of partial discharge, it is demonstrated to make a diagnosis of phase-to-phase tracking in end-winding coils of a stator. eddy current evaluation

Keywords: High-Voltage Motor, Deterioration of Insulators, Partial Discharge, On-Line Monitor

1. 緒言

高圧電動機は大型の回転機器の駆動源として使用されており、運転中の故障によりプラント運転に甚大な支障を生じさせるため、運転中の振動測定や定期検査中の絶縁診断など予防保全策がとられている。特に固定子コイルは軸受や冷却器などと異なり取替が容易でなく、絶縁診断・余寿命推定 [1] [2] がおこなわれている。この絶縁診断は電動機の分解点検に合わせて実施している外観目視点検と電気的特性評価試験がある。この試験のために給電線より切り離す準備作業等が必要であること、また停止中に限られていることもあり、省力化やタイムリーな測定の観点から運転中に診断を行う技術の確立が期待されている。運転中の部分放電(PD)測定は、熱的、電気的、環境的、機械的ストレスの影響を受けた状態で絶縁を診断するため固定子の状態をより正確に把握でき、北米を中心とした水車発電機での結合コンデンサ設置方式や国内でも種々の研究報告 [2] [3] がなされている。当社では電動機の既設の測温抵抗体(RTD)を部分放電センサーとするオンライン PD モニターを開発しており [4]、このオンライン PD モニターにて実際に原子力発電所で使用されている多数の高圧電動機を使用期間(等価運転年数)や使用温度などに着目して測定をおこな

ったのでその結果と考察を報告する。

2. オンライン PD モニターの概要

当社にて開発した携帯型 PD モニターは、ピークホールドとデジタル変換等の信号処理部とデジタルデータを処理・表示をするノートパソコンから構成されており、測定時はモニターと電動機の RTD 外部端子間をケーブルで接続している (Fig. 1)。固定子コイル絶縁部で PD が発生すると高周波パルスが固定子コイル間に設置されている RTD に伝わり電動機外部端子まで到達する。この信号をモニターに取り込み PD の大きさに対応した信号を測定する仕組みとしている。測定結果はノートパソコンにてノイズ除去や、電圧位相と PD 強度との関係(発生位相角分布特性)、PD 発生頻度特性表示を行い、電気的特性評価試験での最大放

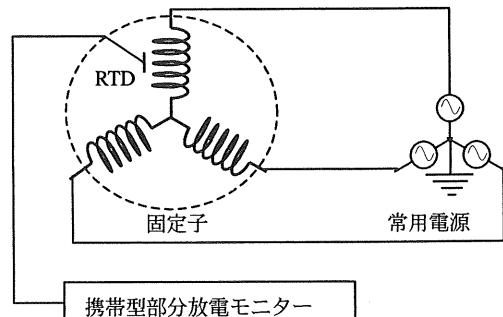


Fig. 1 オンライン PD 測定回路

連絡先:三上 雅生、〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田 64、(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所、電話: 0770-37-9110、e-mail:mikami@inss.co.jp

電電荷(Q_{max})に相当する PD レベル (mV 表示) を求めている。この PD レベルが大きくなったり、PD 発生数が多くなれば絶縁体内部の剥離やボイド等の欠陥が大きくなかったか、または欠陥が増えた絶縁性能が低下したと判断出来る。

また、本モニターは PD 発生位相角特性により PD 発生部位の推定を行なっている。絶縁層内ボイドでの部分放電は電源電圧位相に対して正負同等に発生するが、コイルとの境界または鉄心との境界部の放電は、電子の供給から正または負の放電となることが知られており (Fig.2, Fig.3)、発生位相角分布の評価は重要となっている。補足すると、コイル側のボイドではコイルが正でかつ鉄心が負の電位の時、放電電子がコイル側に移動しやすく負極性パルスが優勢となる。また、鉄心側ボイドでは鉄心が正でかつコイルが負の電位の時、正極性パルスが優勢となる。

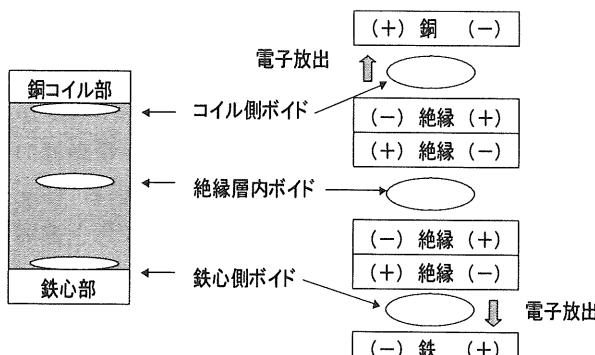


Fig.2 絶縁層内ボイドでの部分放電モデル

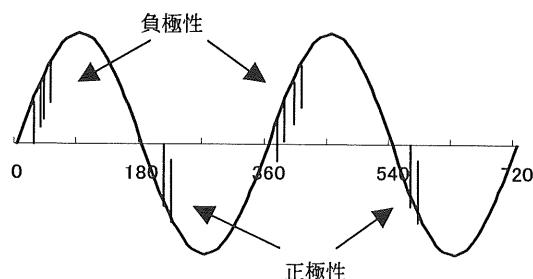


Fig.3 放電パルスの正負極

3. 実機での測定

3.1 実機測定対象

対象とした高圧電動機は関西電力㈱の原子力発電所（美浜、高浜、大飯発電所）の電動機であり、全て三菱電機㈱製の 6.6kV 三相誘導電動機で内訳を Table 1 に示す。これらは、逐次予防保全の観点から固定子コイルの巻替えを実施または計画中であり、巻替え前と巻替え後の両時点で測定を行った電動機も含んでいる。

Table 1 対象とした高圧電動機台数

	台数	出力 [kW]
美浜発電所	36	350～3760
高浜発電所	44	580～4300
大飯発電所	36	360～6000

3.2 等価運転年数と部分放電レベル

等価運転年数を横軸に PD レベルをプロットしたもののが Fig.4 である。等価運転年数は電動機が停止中も劣化するものと推定して運転時間と停止時間の 1/3 を加算している。等価運転年数で 10 年前後から PD レベルが 100[mV] を超えるものがかなりあり、一般的にいって PD レベルが劣化傾向を示す指標となりうることを示している。

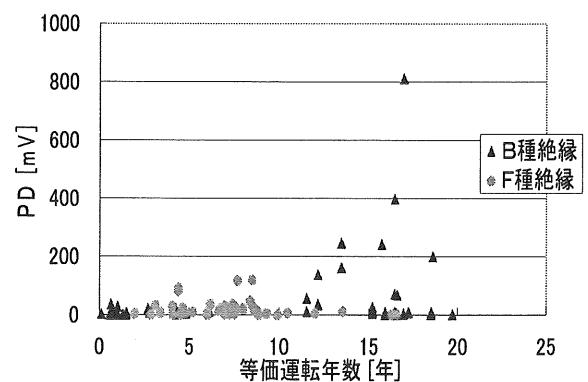


Fig.4 等価運転年数と部分放電レベル

ここで 20 年近い等価運転年数でも PD レベルが 10 [mV] 以下と低い電動機は、Table 2 に絶縁破壊試験の結果を示すとおり固定子巻替え前において絶縁破壊電圧 (BDV) は 60 [%] から 70 [%] の間を示しており、劣化はしているものの Q_{max} は 10000 [pC] 以下であり健全な電動機であった。これらは年数は経過しているが、設計負荷に対して実負荷が少

ない電動機で、過度の劣化進行がなかったものと考えている。

Table 2 絶縁破壊試験を実施した電動機の例

	等価運転年数 [年]	PD レベル [mV]	B D V [%]	Q_{max} [pC]	製造年
A 機	18.5	3.25	62.5	5,400	1974
B 機	18.5	1.25	64	8,200	1974
C 機	18.5	6.61	67	7,200	1970
D 機	19.7	0.82	65.6	1,400	1972

3.3 PD レベルと経時変動

本モニター開発中の試験において、PD レベルが時間的に変動している電動機が認められた。この変動が外気温の影響によるものかどうか確認するため、複数の電動機について 3 ケ月ごとの測定を 30 ケ月間実施し、PD 変化を確認するとともに一部の電動機は 2 ケ月にわたり 2 回／日の頻度で測定を実施した。Fig.5 は代表機による測定結果の一部である。

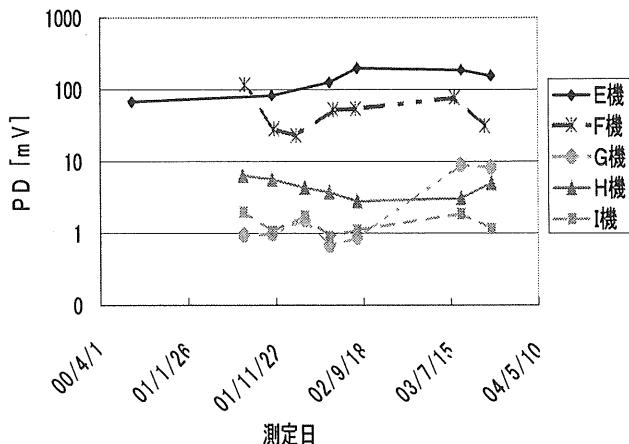


Fig.5 PD レベルの経時変動（代表 5 例）

E 機は 01 年 8 月に 82[mV]、02 年 5 月に 127[mV]、02 年 8 月に 199[mV]、03 年 8 月に 188[mV]、また、F 機は 01 年 8 月に 116[mV]、11 月に 28[mV]、02 年 1 月に 22[mV]、6 月に 52[mV] と 3 ケ月毎の測定では変動が認められる。G, H, I 機については 10[mV] 以下でそれぞれ変動している。これらの電動機については、電気的特性評価試験を実施したが、異常は認められなかった。このうち F 機の 3 ケ月毎の測定と週 2 回の測定結果を RTD 毎のデータ

タとコイル温度と共に Fig.6、Fig.7 に示す。

PD レベルは従来からコイル温度や発生ボイドの大きさ、ボイド形状やボイド内圧等の影響により変動している [5] と知られており、これ以外にも変動はコイル温度ばかりでなく表面汚損や雨天後の湿度上昇による影響が認められる電動機の例もあり、傾向管理上、ある程度の変動は許容する必要があると考えている。

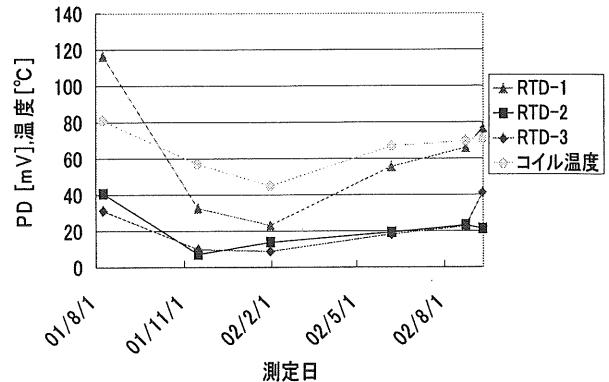


Fig.6 PD レベルの経時変化例 1

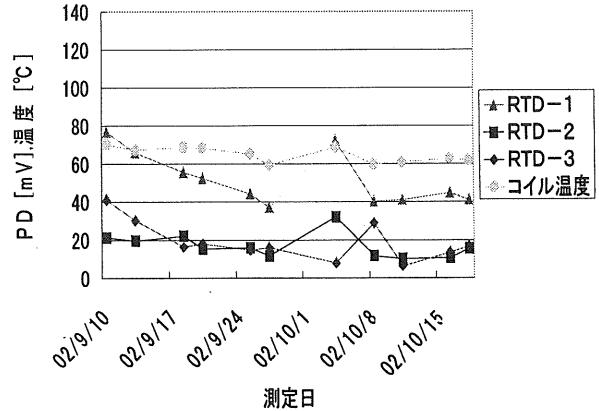


Fig.7 PD レベルの経時変化例 2

3.4 高 PD レベル電動機の診断事例

（事例 1）；PD レベルが 811[mV] であった J 機（A 発電所 1C 給水ブースタポンプ）の PD 発生位相角分布特性と発生頻度特性は Fig.8 に示すとおり位相特性は 180° 每（正負毎）に均等ではなく正負非対称の位相特性を示しており、絶縁体外部での PD であることを示唆していた。J 機を点検したところ、従来の絶縁診断では Table 3 に示すように異常は認められなかったが、U1-1 と W2-1 のコイルエンド間で絶縁破壊の前兆である異相間放電によるトラッキング（放電痕）を認めた。（Fig.9）

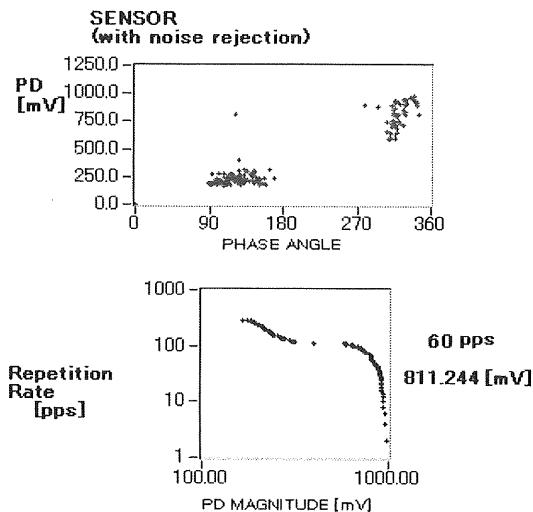


Table 3 J機の絶縁診断結果

・製造年／等価運転年数	1971 / 19.7年
・出力	1000 [kW]
・絶縁抵抗 (40°C)	1457 [MΩ]
・成極指数	6.02
・誘電正接	9.66
・ Q_{max}	25,500 [pC]

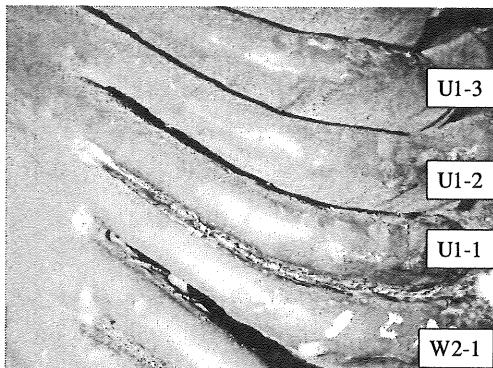


Fig.9 J機のコイルエンド部写真

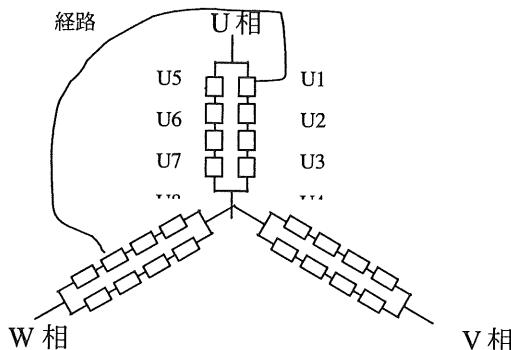


Fig.10 J機のトラッキング経路

トラッキングがあった U1-1 と W2-1 コイルは両方とも口出し線に近く、相間電位は定格電圧の 90% と高い部位で、付着粉塵の影響で放電を起こしていたものと推定される。コイルエンドの拡大写真を Fig.9 に示すが、付着粉塵で写真では認識できない小さなトラッキングであった。このトラッキングは、放置すればいずれはバス（放電路）となり絶縁破壊へと進展するところであった。トラッキングの経路を Fig.10 に示す。これは従来診断法の対地間に規定電圧を印加する試験では検出不可能な異相間放電を運転中測定にて診断可能にした事例である。

(事例 2) ; PD レベルが 200[mV] の E 機 (B 発電所 1C 給水ポンプ) の PD 発生位相角分布特性と発生頻度特性を Fig.11 に示す。E 機は初期の原子力機で製造後 36 年経過しており、運転等価年数でも 20.3 年であり 04 年固定子コイルを更新計画中のものであった。PD 発生位相角分布特性は J 機と異なり 100° 、 160° 、 280° 、 340° のピークを持つ正負対称（位相差 120° の 2 波）であり絶縁内部での PD を示唆している。当該機は 02 年 8 月から 200[mV] で推移し、04 年 1 月まで運転を継続して 04 年 2 月に固定子巻替えのため絶縁破壊試験を実施した。従来の絶縁診断結果は Table 4 に示すが、製造から 36 年経過し、BDV は 70[%] 弱と劣化は進んでいるものの Q_{max} は 4000[pC] 弱と従来絶縁診断の管理目標値 50000[pC] を十分下回っておりその他、絶縁抵抗、正極指数、誘電正接も管理目標値内で、まだ健全な状態であった。

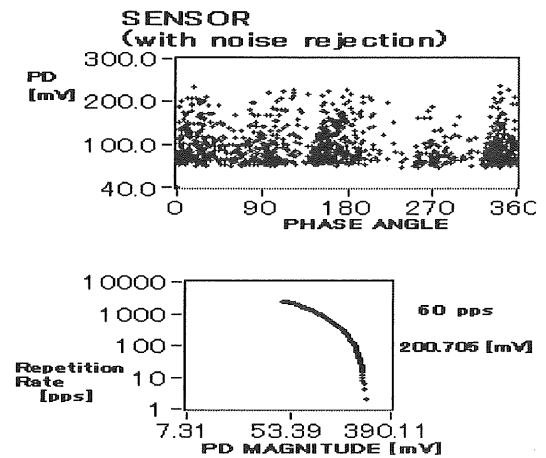


Fig.11 E機の発生位相角特性と発生頻度特性

Table 4 E 機の絶縁診断結果

・製造年／等価運転年数	1968 / 20.3 年
・出力	2810 [kW]
・絶縁抵抗 (40°C)	838 [MΩ]
・成極指数	5.55
・誘電正接	5.16
・ Q_{max}	3,800 [pC]
・BDV	69 [%]

4. 運転中 PD 測定の運用方法

運転中 PD 測定による絶縁診断は 4 年から 6 年毎に行なっていた電気的特性評価試験の補完を行なうものと位置付け、PD レベルが管理目標値に接近、もしくは大きく変化した場合に、従来の絶縁診断を行なうこととしている。具体的には等価運転年数で 20.3 年の E 機の絶縁診断結果から管理目標値を 200[mV] として、運転中 PD 測定結果が管理目標値を上回れば、次回点検等に従来の絶縁診断を実施することとした。また、PD レベルが管理目標値を下回っている場合でも前回測定から大幅な変動 (5 倍以上) でかつ PD 発生位相角分布特性が内部放電と判定されれば測定周期を短くして監視を強化することとしている。この管理目標値は先の E 機の診断結果から決定したものであるが、発電所での運転中 PD 測定結果のうち 250 から 811[mV] の発生位相角分布特性は外部放電または、異相間放電と判定されるため内部放電で最大のものとの位置付けから目標値としている。変動についても実機測定結果から種々要因にて測定値は変動するため、5 倍内の変動は許容している。運転中診断運用フローを Fig.12 に示す。

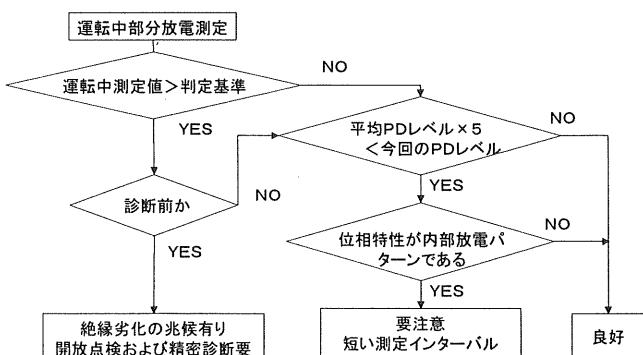


Fig.12 運転中診断運用フロー

5. 結言

原子力発電所で稼動中の高圧電動機運転中の PD 測定、特に既設 RTD をセンサーとする 3 年間の測定により、絶縁劣化診断を試みた。

(1) 経年的な劣化傾向を運転等価年数から把握することが可能なことを示した。

(2) 固定子コイル温度と関係があることを確認し、傾向管理するうえで変動を許容した運用が必要であることを示した。

(3) PD 発生位相角特性により PD 発生箇所が診断可能であること示し、停止中測定では診断し得なかった異相間放電の検知が可能であることを示した。

(4) 高 PD レベル電動機の診断事例から運転中診断運用フローにまとめた。

今後は、本測定結果を基として、別途市販された運転中簡易診断の導入による更なる設備信頼度の向上等に取り組む予定である。

参考文献

- (1) 電気学会，“絶縁寿命限界と推定”，電気学会技術報告第 882 号,2002-4.
- (2) 電気学会，“絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定の実態”，電気学会技術報告第 752 号, 2001-1.
- (3) 電気学会，“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,1992-1.
- (4) 栗尾 篤, 兼田 吉治, 浦川 伸夫, “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ーによる実機試験の結果－”，INSS JOURNAL, Vol.7, pp.231-238, 2000-9.
- (5) 電気学会，“放電ハンドブック”, pp.221, オーム社, 2000.

