

大型電動機・発電機のオンライン診断技術

On-line Diagnosis Technology of Large-sized Motor and Generator

末長 清佳 SUENAGA Kiyoka JFE スチール 西日本製鉄所(倉敷地区) エネルギー部エネルギー技術室 主任部員(課長)

要旨

大型電動機・発電機の診断技術に関し、JFE スチールが開発した4つのオンライン診断技術について紹介する。固定子のオンライン診断技術は、固定子巻線で生じる部分放電を静電カップラで検出することで絶縁の異常や、くさびの緩み診断を実現した。部分放電の可視化技術は、部分放電で生じる紫外線のうち 300 nm 以下の波長を可視化することで白昼での放電の可視化を達成した。回転子のオンライン診断技術は、運転中の軸電圧波形を理論波形と比較することで回転子(磁気回路系)の異常検出を実現した。起動電流プロフィール診断技術は、起動電流の形を正常時と比較することで起動装置や軸トルクの異常検出を実現した。これらの技術を駆使することで突発故障の防止に努めている。

Abstract:

This paper introduces four kinds of diagnosis technologies which have been developed by JFE Steel for a large-sized motors and a generators. On-line diagnosis technology of stators made it possible to diagnose a condition of the insulation and wedge tightness through the measurement of partial discharge from the stator windings using a capacitive coupler. Monitoring of partial discharges under daylight has been achieved by applying partial discharge visualization technology by filtering under 300 nm wavelength of the ultra violet radiation. On-line diagnosis technology of rotors was applied to diagnose aberrance in the magnetic circuit by comparing calculated shaft voltage to measured shaft voltage. Diagnosis technology of starting current profile detects the defect in starting devices and abnormal rotor torque by comparing the normal starting current profile. We have succeeded in preventing unexpected accidents by using these technologies.

1. はじめに

製鉄所で使用される電気機器の中でも大型電動機や発電機は、予備機を持たない場合が多く、突発故障が生じると長期的な停止を余儀なくされる。一般にこれらの機器は高電圧の下で強い機械的・熱的ストレスを受けながら稼働するため、変圧器や遮断器など他の電気設備に比較して劣化の進行が早く、適切なメンテナンスやタイムリーな更新を行うことが重要となる。一方で、これらの機器の劣化には個体差があるため従来型の TBM (time based maintenance) では過剰保全・早期更新に陥りがちであった。そこで安定供給と保全費用の削減とを両立させる CBM (condition based maintenance) の実現を目指し、運転中に実施可能な診断技術の研究開発を重ねてきた。ここでは、2000 年以降、成果を上げた研究開発の内容について紹介する。

2. 電動機・発電機の劣化と開発の位置づけ

電動機は、大きく分けて電力を磁力に変換する固定子(stator)と、磁力を機械力に変換する回転子(rotor)の2つの要素で構成される。固定子は、長期間の運転で巻線の絶縁体内部にボイドと呼ばれる空隙が生じ、ボイドの内部で部分放電が生じて劣化していく。また、巻線を固定するくさびが緩み、巻線が電磁力で振動・摩耗しスロット内部で大きな放電が生じて、早期に絶縁破壊する場合もある。回転子は巻線に加わる電圧が低いいため固定子のような部分放電による劣化は生じにくい。遠心力で磁極を構成する部品が緩んだり、磁極巻線の一部が短絡(レヤショート)するなどの機械的な要因で劣化が生じる場合が多い。

電気学会が工場電気設備を対象に行った故障率の調査結果¹⁾を機器別に比較すると、図1に示すように、電動機の劣化速度は変圧器や遮断器に比較して非常に早いことが分かる。

また、米国 EPRI (Electric Power Research Institute) の調査²⁾によると、電動機の故障原因の 41%が軸受、37%が

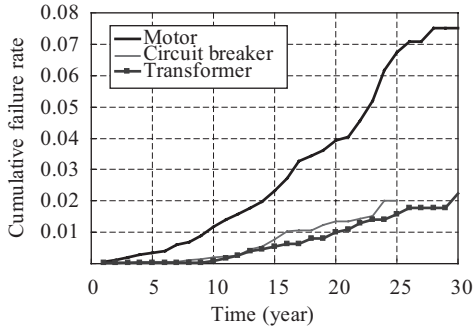


図1 工場電気設備の故障率

Fig. 1 Failure rate of industrial electric facilities

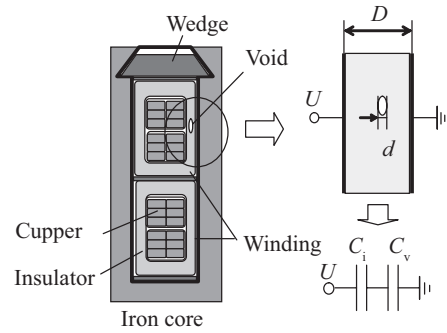


図2 固定子巻線の断面とボイドの等価回路

Fig. 2 Cross section of stator winding and Equivalent circuit of void in the insulator

表1 回転機の故障要因と開発した診断技術
Table 1 Factor of failure and developed diagnosis technology

Part	Factor of failure	Conventional technology	Developed technology
Stator	Heat defect	Resistive temperature detector	On-line partial discharge diagnosis
	Partial discharge	—	
	Wedge looseness	—	Partial discharge Visualize
Rotor	Bearing trouble	Vibration instruments	Starting current profile diagnosis
	Windings fault	—	Rotor on-line diagnosis

固定子, 10%が回転子, その他が12%となっている。

従来, 電動機の運転中管理は, 軸受の異常に対しては軸振動計を, 固定子の異常に対しては巻線温度計を適用してきたが, 劣化形態や劣化速度から考えると固定子や回転子の電氣的な診断が十分とはいえなかった。そこで, 我々は固定子に対して運転中の部分放電測定技術を, 回転子に対して軸電圧や起動電流の監視技術を中心に技術開発を行ってきた。今回これらの技術が完成したことで, 表1に示すように運転中の電動機・発電機の異常診断が, ほぼ網羅できたと考えている。

3. 診断技術

3.1 固定子のオンライン診断技術

3.1.1 診断原理

固定子巻線の絶縁体にボイドが生じた場合の等価回路を図2に示す。この等価回路でボイドを挟む絶縁体のインピーダンス Z_i , およびボイドのインピーダンス Z_v は各々次式で表される。

$$Z_i = \frac{1}{\omega C_i} = \frac{D}{\omega \epsilon_0 \epsilon_c A} \dots\dots\dots (1)$$

$$Z_v = \frac{1}{\omega C_v} = \frac{d}{\omega \epsilon_0 A} \dots\dots\dots (2)$$

絶縁体およびボイドに加わる電位 E_i および E_v は, 対地間電位 U がインピーダンスの比で分圧されるため, 次式で表される。

$$E_i = \frac{Z_i \cdot U}{Z_i + Z_v} = \frac{\frac{D}{\omega \epsilon_0 \epsilon_c A} \cdot U}{\frac{D}{\omega \epsilon_0 \epsilon_c A} + \frac{d}{\omega \epsilon_0 A}} = \frac{D \cdot U}{D + \epsilon_c d} \dots\dots\dots (3)$$

$$E_v = \frac{Z_v \cdot U}{Z_i + Z_v} = \frac{\frac{d}{\omega \epsilon_0 A} \cdot U}{\frac{D}{\omega \epsilon_0 \epsilon_c A} + \frac{d}{\omega \epsilon_0 A}} = \frac{\epsilon_c d U}{D + \epsilon_c d} \dots\dots\dots (4)$$

また, 電位傾度 ΔE_i および ΔE_v は, 次式で示される。

$$\Delta E_i = \frac{E_i}{D} = \frac{U}{D + \epsilon_c d} \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta E_v = \frac{E_v}{d} = \frac{\epsilon_c U}{D + \epsilon_c d} = \epsilon_c \Delta E_i \dots\dots\dots (6)$$

ここで,

- ϵ_0 : 真空中の誘電率
- ϵ_c : 主絶縁体の比誘電率
- A : ボイドの断面積
- D : 主絶縁体の厚さ
- d : ボイドの厚さ

一般に, 回転機の絶縁体として使用されるエポキシマイカの比誘電率 ϵ_c は約4であり, (6)式から絶縁体中のボイドの電位傾度は絶縁体の電位傾度の約4倍に達することが分かる。このボイドの電位傾度が空気の放電開始電圧: DIV (discharge inception voltage) より大きくなると, ボイドの内部で部分放電が発生する。具体的な事例として, 回路電圧13.8 kV (対地間電位 $U = 8.0$ kV) の空気冷却式の回転機で主絶縁体厚み4 mm, 比誘電率4の内部にボイドが生じた場合の計算例を図3に示す。この図から, ボイドの厚みが0.1 mmを越えるとボイドの電位傾度は空気の放電開始電圧を超えて部分放電が発生することが分かる。オンライン診

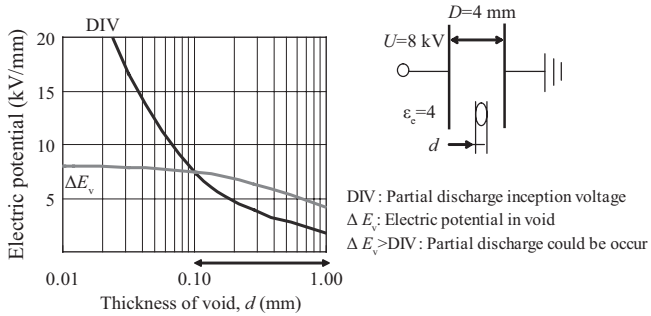


図3 ボイドで生じる部分放電の計算例

Fig. 3 Case study of partial discharge inception voltage in several void thicknesses

断は、このようにして生じた部分放電を運転状態で測定し、補修や更新のタイミングを見極めるための技術である^{3,4)}。

3.1.2 部分放電の測定

図4に部分放電の測定回路を示す。運転中の部分放電の測定は、主回路に設けた静電カプラを通じて行う。オンラインでの測定はノイズが重畳するためフィルタおよびデジタル処理によってS/N比(Signal-Noise ratio)の向上を図っている。

3.1.3 診断事例

図5に105.7 MVA 空気冷却式同期発電機での診断事例を

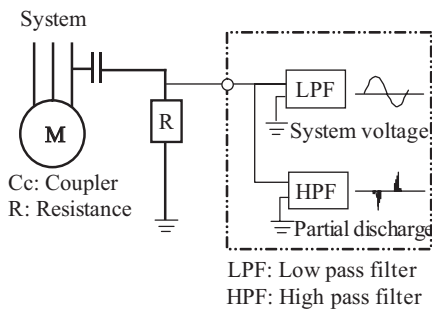


図4 オンライン部分放電の測定回路

Fig. 4 Diagram of on-line partial discharge measuring system

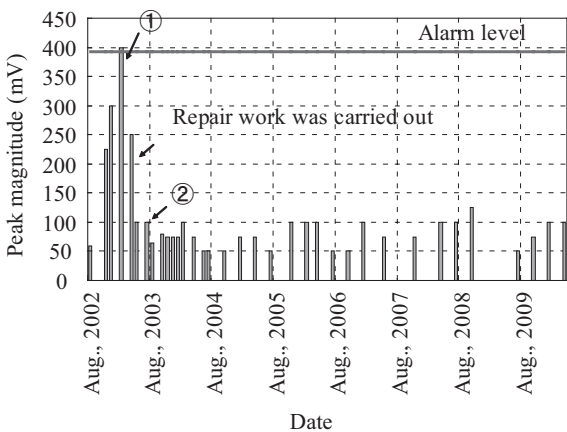
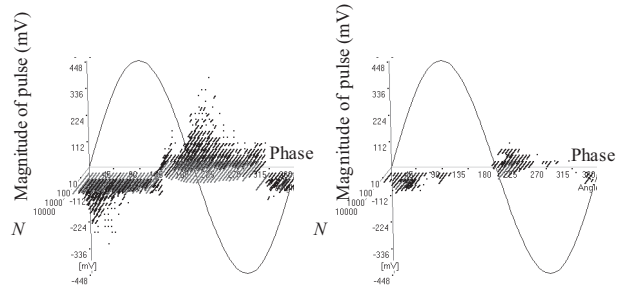


図5 発電機の部分放電推移事例

Fig. 5 Example of partial discharge trend on generator



① Distribution graph at Dec., 2002 Positive pulses were predominance. ② Distribution graph at May, 2003 Discharge activity was decreased.

図6 位相解析の例

Fig. 6 Example of phase analysis

示す。本発電機は、1999年8月に稼働後、約3年半経過した2002年12月に部分放電が急増しアラームレベルを超過した。図6①に示す部分放電の位相解析からコイルが鉄心に対してマイナス電位の時に生じる正パルスの増加が認められ、放電は巻線と鉄心間で生じていることが予想された。本発電機の固定子は、マイカテープを巻いた巻線を鉄心に挿入した後エポキシレジン溶液槽に漬けてエポキシを含浸させる「真空全含浸処理」で製造されており、導体と鉄心の熱膨張率の違いから鉄心と巻線の間の半導電性材料が剥がれ、部分放電が発生している可能性が疑われた。そこで巻線と鉄心の間に半導電性樹脂を注入して補修を試みたところ、②に示すように放電は減少し、その後は安定な状態を保っている。

3.2 部分放電の可視化技術

3.2.1 原理

放電が生じると電磁波や超音波のほかに紫外線が放出されることが知られている⁵⁾。放電は電界の影響を受けて励起状態になった気体の原子が自由電子を放出しイオン化されることによって引き起こされるが、この時、図7に示すようにイオン化された原子が自由電子を受け取って励起状態から基底状態に戻る過程で光が放射される。

ここで、電子の軌道が $n=i$ から $n=j$ に遷移した場合に放射される光の波長は次式で与えられる⁵⁾。

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{j^2} - \frac{1}{i^2} \right) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 λ は放射される光の波長、 m は電子の運動質量、 e は電子の電荷 ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)、 ϵ_0 は真空の誘電率 ($8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$)、 h はプランクの定数 ($6.624 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$)、 c は光速 ($3 \times 10^8 \text{m/s}$) である。

また、各原子のイオン化電圧は、次式で与えられる⁵⁾。

$$W = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \dots\dots\dots (8)$$

量子スピンの影響などを無視すると、イオン化電圧が既

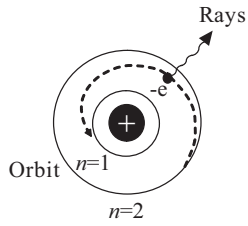


図7 光の放射

Fig. 7 Schematic diagram of radiation

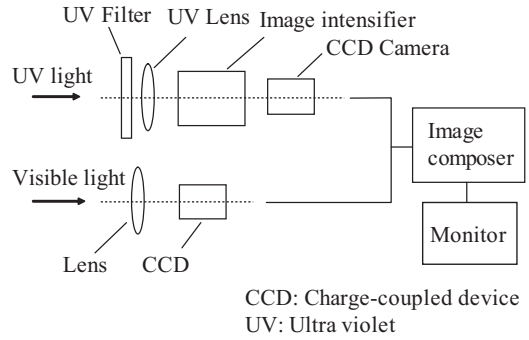


図9 部分放電可視化装置の構成図⁶⁾

Fig. 9 Diagram of partial discharge visualization system

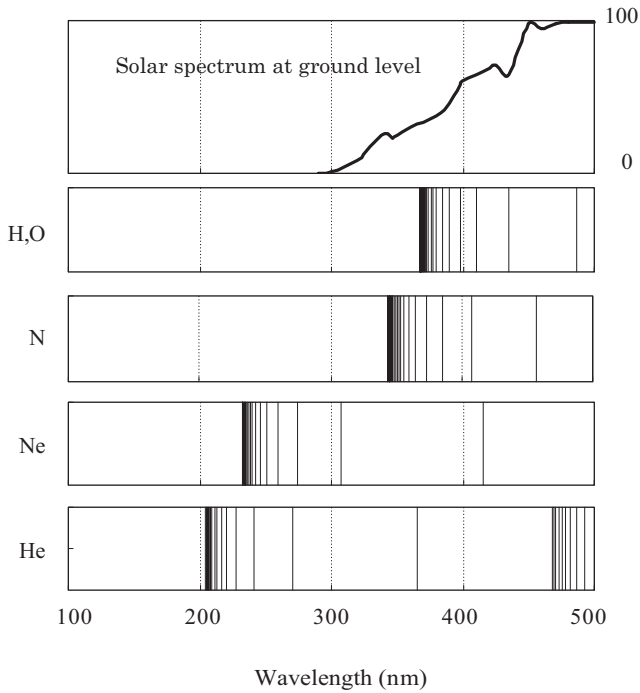


図8 気体の発光スペクトルと太陽光のスペクトル
Fig. 8 Spectrum of aerial radiation and solar spectrum

知の気体の発光波長は (7), (8) 式から次式で算出することができる。

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{W}{hc} \left(\frac{1}{j^2} - \frac{1}{i^2} \right) \dots\dots\dots(9)$$

図8に上式で求めた代表的な気体の発光スペクトルと地表面での太陽光のスペクトルを示す。

太陽光のうち 300 nm 以下の波長の光はオゾン層で吸収され地表にはほとんど到達しないが、放電光は離散的に広く分布するため、300 nm 以下の波長領域に絞って放電光を観測すれば暗室で放電を観測するのと同じように白昼でも太陽光に影響されず放電を可視化することができる。

3.2.2 部分放電の可視化装置

図9に部分放電可視化装置の構成図を示す。装置は紫外光撮像部と可視光撮像部、さらにそれらを合成する画像合成装置の3つの要素で構成される。紫外光撮像部では光学フィルターを用いて 300 nm 以上の波長を遮断して太陽光の影響を排除したのちイメージインテンシファイアで入射した



写真1 電動機固定子巻線の放電
Photo 1 Discharge at stator coil of motor

微小な放電光を 10⁶ 倍に増幅する。画像合成装置では増幅した紫外光と可視光を合成してモニタに表示し放電光の可視化を達成している。

3.2.3 部分放電の可視化事例

部分放電の可視化事例として電動機固定子の部分放電の事例を写真1に示す。この事例では電動機の回転子を抜いた状態で電圧を印加して固定子巻線に生じる部分放電を撮影している。一般に、大型の電動機や発電機は定期的に回転子を抜いて固定子巻線の点検・補修やくさびの打ち替えを行い、延命化を図る。

この定期補修作業の際に部分放電の可視化装置を利用して事前に放電の可視化を行って補修すべき部位を確認しておき、補修後に再び放電の可視化を行い放電が消滅したことの確認を行えば、保守の品質を向上させることができる。

3.3 回転子のオンライン診断技術

3.3.1 原理

電動機は固定子巻線で回転磁界を作り、励磁器で電磁石となった回転子を磁束で回転磁界に拘束することで、機械力を得る。発電機は、この逆で励磁器で電磁石となった回転子を回転させることで固定子に電力を生じさせる。いずれも回転子は磁気回路を構成する重要な役割を持つ。これらの磁気回路には主磁束のほかに、固定子鉄心の継目やセグメントの合わせ部分で生じる不平衡磁束：軸磁束 B₀ が存在し、回転子軸を中心に継鉄部を循環して軸電圧や軸電流

を誘起している。ここで、固定子鉄心の継目部分の磁束 Θ_s およびセグメント部分の磁束 Θ_l は以下で与えられる⁷⁾。

$$\Theta_s = \sum_{i=1}^n 0.8\delta_s [B_0 + B_{jm} \cos p(\theta_{si} + \alpha)] f_k \dots\dots\dots (10)$$

$$\Theta_l = \sum_{j=1}^l G [B_0 + B_{jm} \cos p(\theta_{lj} + \alpha)] \dots\dots\dots (11)$$

- p : 極対数
- f_k : 鉄心占積率
- θ : 磁極の位置 (機械角)
- G : セグメント部の B - H 特性
- α : 継鉄の位置 (機械角)
- B_0 : 軸磁束
- δ_s : 継目のエアギャップ
- B_{jm} : 主磁束最大磁束密度
- θ_{si} : 固定子分割箇所的位置 (機械角)
- θ_{lj} : セグメント合わせ目の位置 (機械角)

さらに、継鉄の普通部分の磁束 Θ_j は電磁鋼板の磁化特性で決まる関数を F とすると次式で示される⁷⁾。

$$\Theta_j = \int_0^{2\pi} F [B_0 + B_{jm} \cos p(\theta + \alpha)] d\theta \dots\dots\dots (12)$$

全周にわたる磁束は $\Theta_s + \Theta_l + \Theta_j = 0$ となるため、これを利用して α を 0° から 360° に変化させながら B_0 を解き、時間微分することで軸電圧の時間推移すなわち軸電圧波形を求めることができる。このように計算で求めた軸電圧波形と実際の軸電圧波形を比較することで回転子と磁気回路系の異常を簡易に診断するのがオンライン回転子診断の考え方である。

3.3.2 軸電圧の測定

図10にオンライン回転子診断で行う軸電圧の測定回路を示す。一般に回転子軸は、機械側からの静電気を大地に逃がすため DE (drive end) 側を接地し、軸電流が流れるのを

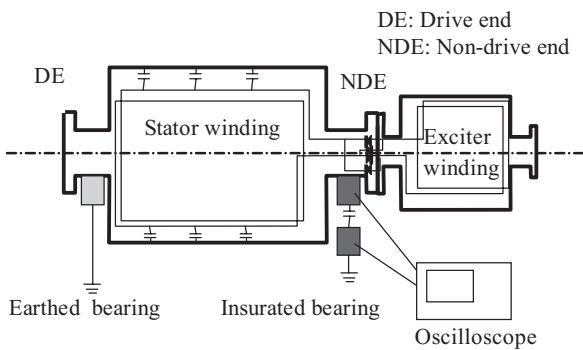


図10 軸電圧の測定回路
Fig. 10 Shaft voltage measuring circuit

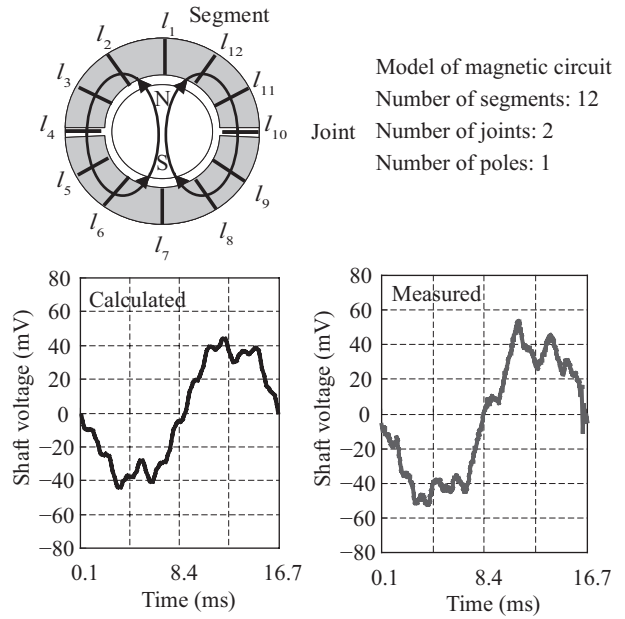


図11 軸電圧の計算および測定例

Fig. 11 Example of calculated and measured shaft voltage

防止するため NDE (non-drive end) 側を非接地とし NDE 側の軸受には絶縁軸受が適用される。そこで NDE 側絶縁軸受の絶縁プレートの両端に高インピーダンスのオシロスコープを接続すれば軸電圧の波形を測定することができる。

測定は軸が1回転する時間分の波形を測定すればよいが、実際の軸電圧にはタービン翼と蒸気の摩擦による静電気などが重畳しノイズを含んだものになるため⁸⁻¹⁰⁾、数回転分の波形を測定し回転に同期して加算平均処理を行うことでノイズの影響を緩和する。

3.3.3 計算ならびに実測事例

前述の105.7 MVA 空気冷却式同期発電機の軸電圧測定例を図11に示す。ここに示すように、計算による軸電圧の波形は実測値によく一致する。回転子巻線のレアショートなど磁気回路に関わる異常は軸電圧波形の乱れとなって現れるため、軸電圧を定期的に測定し健全時と比較することで早期に異常を発見することができる。

3.4 起動電流プロフィール診断技術

3.4.1 原理

電動機が負荷を持って起動する時、回転数 n_1 (rpm) から n_2 (rpm) までの昇速時間 t (s) は以下の式で求めることができる¹¹⁾。ここで T_α は電動機のトルク T_M (Nm) と負荷のトルク T_L (Nm) の差、 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) は負荷と電動機を合わせた慣性モーメントを表す。

$$t = \frac{J}{9.55} \int_{n_1}^{n_2} \frac{1}{T_\alpha(n)} dn \dots\dots\dots (13)$$

仮に電動機あるいは負荷に異常が生じ T_M や T_L の特性が

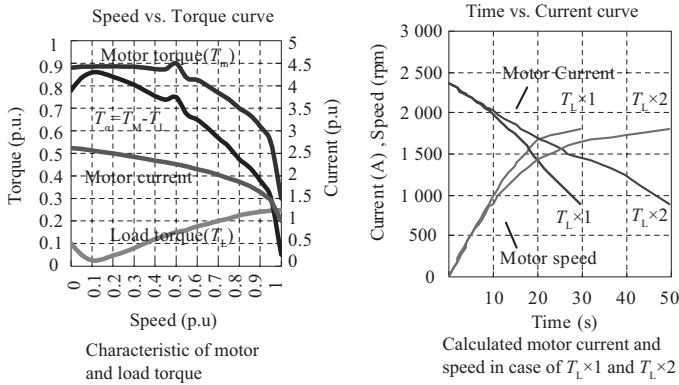


図 12 起動電流の計算事例

Fig. 12 Example of motor current profile

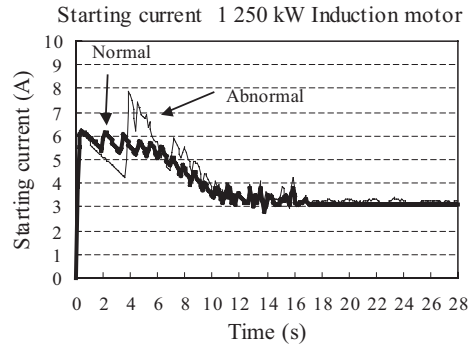


図 14 起動電流プロフィールの測定事例

Fig. 14 Example of the starting current profiles

変わると、 T_a が変化し起動電流の時間特性が変化する。図 12 に起動電流の計算例として 11 kV 14 400 kW の同期電動機の起動特性計算事例を示すが、仮に負荷トルクが 2 倍に増加した場合、起動電流の最大値は変わることなく起動時間特性のみが変化することが分かる。このように電流のピーク値だけでは電動機や負荷のトルクの異常を検出することが難しいため、通常の電流測定に代えて電動機の起動時に起動電流のプロフィール（時間推移）を測定し正常時と比較することで電動機トルクや負荷トルクあるいは起動装置の異常を検出するのが起動電流プロフィール診断技術である。

3.4.2 起動電流プロフィール測定装置

図 13 に起動電流プロフィール測定装置を示す。電流は貫通型 CT（計器用変流器）で検出し、起動のたびにサーバに送信される。サーバには対象電動機の標準となる起動電流プロフィールが記憶されており、送信されたプロフィールとの偏差を演算し異常を判定する。

3.4.3 起動電流プロフィール診断事例

図 14 に起動電流プロフィール測定装置で検出した異常事例を示す。この電動機は 1966 年製、3.3 kV、1250 kW の巻線型誘導電動機で、起動方式は抵抗起動方式である。図のようにプロフィールに偏差が認められたため、起動装置を点検したところ、写真 2、3 に示すように起動抵抗器の接点の

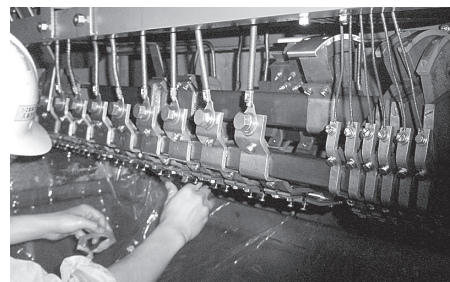


写真 2 起動抵抗器

Photo 2 Starting device

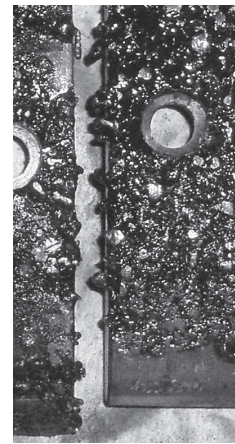


写真 3 溶損した接点

photo 3 Damaged contactor

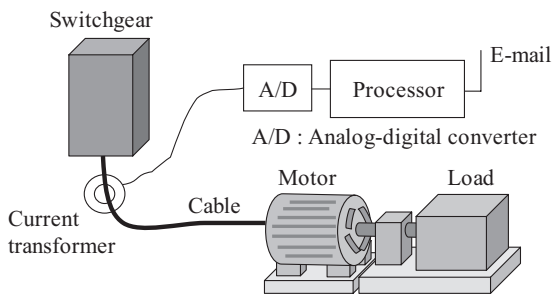


図 13 起動電流プロフィール測定システム

Fig. 13 Motor current profile measuring system

一部に溶損が認められた。この時点では、この起動装置で電動機は正常に起動できていたが、仮に継続使用していたら起動装置の焼損だけでなく電動機本体のダメージに発展した可能性があった。起動電流プロフィール診断は従来の管理レベルでは検出できなかった異常を早い段階で検出できる特長をもっている。

4. おわりに

2000 年以降に研究開発し実機適用した大型電動機や発電機の診断技術について紹介した。固定子のオンライン診断

技術は、固定子巻線で生じる部分放電を静電カップラで検出することで絶縁の異常や、くさびの緩み診断を実現した。部分放電の可視化技術は、部分放電で生じる紫外線のうち 300 nm 以下の波長を可視化することで白昼での放電の可視化を達成した。回転子のオンライン診断技術は、運転中の軸電圧波形を理論波形と比較することで回転子（磁気回路系）の異常検出を実現した。起動電流プロフィール診断技術は、起動電流の形を正常時と比較することで起動装置や軸トルクの異常検出を実現した。これらの技術により運転中の電動機・発電機の異常診断が、ほぼ網羅できたと考えている。なお、固定子のオンライン診断技術は、関係会社に技術供与して近隣のコンビナート会社の診断も展開している。また、部分放電可視化技術は 2006 年に山陽技術賞を受賞した。

参考文献

- 1) 電気学会技術報告（Ⅱ部）第 230 号. 工場電気設備の寿命予知技術に関する調査報告. 1986.
- 2) EPRI. "Improved Motors for Utility Applications." Publication EL-2678, vol. 1, 1763-1, final report, 1982-10.
- 3) 末長清佳. 電動機・発電機のオンライン絶縁診断技術. 検査技術. 2004, vol. 9, no. 2.

- 4) 末長清佳. Comparison of the capacitive coupler and RTD as the online PD sensor on rotating machines. ICEMS2006 DS2F2-08.
- 5) 犬石嘉雄, 下村武. 電子物性の基礎とその応用. 1978, コロナ社.
- 6) 末長清佳ほか. 部分放電可視化技術の開発. 山陽技術雑誌. 2007, vol. 54, p. 16-19.
- 7) 倉持竜一. 回転電機の軸電流. 富士時報. 1965, vol. 38, no. 8.
- 8) Posedel, Zlatimir F. Shaft Voltage in Electric Machines 1995.
- 9) Nippes, Paul I. Understanding Shaft Voltage and Grounding Currents of Turbine Generators.
- 10) Drommi, Jean-Louis. Experience Feedback on Insulated Bearing of Large Turbo Generators IRMC 2003.
- 11) 電気設備技術計算ハンドブック. 電気書院. 1996.



末長 清佳