
電動機絶縁診断技術の開発

Development of Insulation Diagnosis Technique for Electric Rotating Machine

田部井 邦夫(Kunio Tabei) 山本 博正(Hiromasa Yamamoto) 有光 博(Hiroshi Arimitsu)

要旨：

直流機や特高・高圧交流機の寿命は20～30年といわれており、現在使用中のものの中にも寿命域に近づいているものが相当量含まれている。当社では設備の安定操業を図るために、1980年より電動機の診断技術の開発を進めてきた。特高・高圧交流機に関しては、(1)直流や交流の高電圧を印可して吸湿状況やボイド劣化を診断する精密絶縁診断技術、(2)コロナ測定による絶縁劣化診断技術、(3)絶縁診断エキスパートシステム、を開発した。また直流機に関しては、(1)オンライン絶縁監視技術、(2)吸湿度評価技術、(3)電機子巻線断線診断技術、(4)直流機診断監視システム、(5)寿命予測技術、を開発、確立した。これにより定量的、効果的な電動機の保全が可能となった。

Synopsis：

More than 25 years have passed since major facilities came into operation at Chiba works. Most of the electrical equipment has gradually deteriorated with the lapse of time, and above all, insulation performance of DC and high voltage AC motors has fallen down remarkably. Under such conditions, it has become a pressing need to establish the insulation diagnosis technique for electrical rotating machines. The authors started to develop these techniques in 1980, and have obtained some good results. New diagnostic methods and instruments developed by them are as follows. For high voltage AC motors, (1)precise diagnosis technique, (2)corona discharge measuring apparatus to find out the deteriorated part of insulation, and (3)expert system for insulation diagnosis; and for DC motors, (1)live wire insulation monitor, (2)armature broken-wire detector, (3)condition monitoring system, (4)evaluation method of hygroscopic performance, and (5)lifetime prediction.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Development of Insulation Diagnosis Technique for Electric Rotating Machine



田部井 邦夫
Kunio Tabei

千葉製鉄所 保全部 熱延整備課 主任部員(掛長)



山本 博正
Hiromasa Yamamoto

千葉製鉄所 保全部 保全技術室 主査(課長)



有光 博
Hiroshi Arimitsu

水島製鉄所 電気計装部 電気課 主任部員(掛長)

1 緒 言

直流機や高圧交流機などの電動機の寿命は、一般的に20~30年程度といわれている。現在当社において稼働している電動機は膨大な数にのぼるが、このうちには20年以上使用されて寿命域に近づいているものが相当数含まれている。このことは、電動機の突発故障の発生確率が高まっているわけで、設備の安定化のためには、異常予知や限界寿命の把握など、診断技術の確立が急務となっている。

このニーズに対応すべく、当社では1980年頃より回転機の絶縁劣化を主とした診断技術の開発や普及をすすめてきた。その結果、1982年には、高圧交流機の精密絶縁診断技術を確立し、自社での診断活動を展開させた。1985年には、直流機のオンライン絶縁監視装置を開発、さらには診断監視システムの構築や寿命予測技術の確立などをはかり、圧延機用大型電動機を対象に適用拡大中である。

最近では、診断精度の向上や作業の効率化を目的にパソコンによる自動診断システムを開発し、特に、評価解析にはファジィ推論を適用して、専門家の知識やノウハウを有効に活用し成果をあげている。

本論文では、高圧交流機と直流機の絶縁診断に関する技術開発内容について述べる。

2 高圧交流機に関する診断技術

1982年に高圧交流機の予知保全として、直流試験や交流試験による精密絶縁診断技術を確立するとともに診断活動を展開しており、現在までに診断結果にもとづいた多くの劣化対策を実施している。

一方、診断作業の効率化や簡易診断技術の開発もすすめており、それら各種技術について以下に示す。

要旨

直流機や特高・高圧交流機の寿命は20~30年といわれており、現在使用中のものの中にも寿命域に近づいているものが相当量含まれている。当社では設備の安定操業を図るために、1980年より電動機の診断技術の開発を進めてきた。特高・高圧交流機に関しては、(1)直流や交流の高電圧を印加して吸湿状況やボイド劣化を診断する精密絶縁診断技術、(2)コロナ測定による絶縁劣化診断技術、(3)絶縁診断エキスパートシステム、を開発した。また直流機に関しては、(1)オンライン絶縁監視技術、(2)吸湿度評価技術、(3)電機子巻線断線診断技術、(4)直流機診断監視システム、(5)寿命予測技術、を開発、確立した。これにより定量的、効果的な電動機の保全が可能となった。

Synopsis :

More than 25 years have passed since major facilities came into operation at Chiba works. Most of the electrical equipment has gradually deteriorated with the lapse of time, and above all, insulation performance of DC and high voltage AC motors has fallen down remarkably. Under such conditions, it has become a pressing need to establish the insulation diagnosis technique for electrical rotating machines.

The authors started to develop these techniques in 1980, and have obtained some good results. New diagnostic methods and instruments developed by them are as follows. For high voltage AC motors, ① precise diagnosis technique, ② corona discharge measuring apparatus to find out the deteriorated part of insulation, and ③ expert system for insulation diagnosis; and for DC motors, ① live wire insulation monitor, ② armature broken-wire detector, ③ condition monitoring system, ④ evaluation method of hygroscopic performance, and ⑤ lifetime prediction.

2.1 精密絶縁診断技術

高圧交流機の絶縁劣化診断を非破壊で行うもので、直流や交流の高電圧を被診断機に印加し、諸データを採取して、絶縁物の吸湿状況やボイド劣化を診断するものである。

2.1.1 各種試験法と判定基準

精密絶縁診断の試験方法と判定基準をTable 1に示す。それぞれの試験内容は以下のとおりである。

(1) 直流試験

1~6 kVまで段階的に印加し、PI値や電圧特性、キックの有無などを測定する。

(2) 交流電流試験

相電圧または定格電圧まで段階的に印加し、接地電流の急上昇点(P_i)や上昇率(dI)を測定する。

* 平成2年2月8日原稿受付

Table 1 Precise diagnosis of insulation performance of AC high voltage motor

	Item	Permissible range
DC test	Insulation resistance (MΩ)	>E+1
	PI	>1.5
	Kick (1~6 kV)	None
AC test	P_{i1} (kV)	>4
	ΔI (%)	<8.5
tan δ test	$\tan \delta_0$ (1 kV) (%)	2~10
	$\Delta \tan \delta$ (%)	<6.5
Corona test	$Q_{max1}(E)^{*1}$ (pC)	<10 000
	$Q_{max2}(E/\sqrt{2})^{*1}$ (pC)	<5000

*1 E: Specific voltage (kV)

Table 2 Diagnostic result of 6 000-kW synchronous motor

Diagnostic item			Diagnostic result	Judge-ment
Electric test	DC test	Insulation resistance (MΩ)	3 300	○
		PI	4.55	○
	AC test	ΔI (%)	5.8	△
		P_{i1} (kV)	3.8	×
		P_{i2} (kV)	6.6	○
	tan δ test	$\tan \delta_0$ (%)	4.75	○
		$\Delta \tan \delta$ (%)	1.35	○
	Corona test	Q_{max2} (pC)	3 550	○
		Q_{max1}		
		U (pC)	1 000	○
		V (pC)	6 000	△
		W (pC)	1 000	○
Looseness check	Wedge (%)		15	△
	Coil and winding		None	○

(3) tan δ 試験

相電圧または定格電圧まで段階的に印加し、tan δ 値の 1 kV 値 ($\tan \delta_0$) や上昇量 ($\Delta \tan \delta$) を測定する。

(4) 部分放電試験

相電圧または定格電圧印加時のコロナ量 (Q_{max}) の測定

2.1.2 適用基準と診断周期

稼働後 18 年以上を経過したものを診断対象とする。次回診断時期は、診断結果や稼働年数、設備重要度などから決定する。

2.1.3 診断事例

Table 2 に、20 年稼働した熟延粗ミル用 6 000 kW 同期電動機の精密絶縁診断結果を示す。交流試験の ΔI と部分放電試験の V 相 Q_{max1} の値が要注意レベルにあり、 P_{i1} の値が不良レベルであった。総合判定としては「要注意」であるが、交流試験において 3 kV 印加時から全体的にコロナ音が発生したことでウェッジ弛み 15% 発生していることから、経年劣化による絶縁物の枯れが進行していると判断し、ウェッジの交換を実施した。

2.2 コロナ測定による絶縁劣化診断技術

コイルの絶縁劣化は、熱的ストレスや化学反応等により起こる寿

命劣化以外に、電磁振動による絶縁物の摩損がある。この現象は、一般的な電動機寿命期において発生するばかりではなく、比較的初期の段階においてもみられる。いずれにしても、絶縁物の内部にボイド(空隙)が発生したり絶縁物とコア(コイルを収納する鉄心)との間隙が変化すると、電界分布に変化がおきてコロナ放電を起こし絶縁物を破壊し、ついには電動機の絶縁不良現象を引き起こし運転不能となる。この現象は、初期においては、tan δ 試験や直流試験等では発見できない。部分放電試験によるコロナ放電量を測定し、その値で評価する方法がとられる。特に高電圧機器において、この方法が電動機の絶縁物の異常発見に有効であることは各種の文献に報告されている。電磁力はコイルに流れる電流によって変わるから、絶縁物が摩損等により変形していると運転中と静止中とでコロナ放電量に差がでる。水島製鉄所熟延工場の圧延機駆動用電動機において実測した結果、これが実証された。すなわち高電圧電動機においては、運転中のコロナ放電量を測定することが絶縁診断上有効であるといえる。

また一方、数多いコイルの中でどのコイルが異常かを判定することも大切である。目視やコイルのくさびを打音で検査する方法もあるが、いずれも間接的な方法でありコロナ放電量を直接測定するものではない。今回、サーチコイルを用いて部位の判定を試みて有効性が実証された。

2.2.1 運転中のコロナ測定

Fig. 1 に測定回路を示す。運転中にコロナ放電量を測定しようとすると、電源装置等の外部雑音を遮断する必要がある。そのための結合コンデンサが図中の C であり適宜に選定しなければならない。Table 3 に示すように、停止中のコロナ放電量は測定するごとに上下しているが、運転中のコロナは増加傾向を示している。同時に行った直流試験や交流電流試験等の結果からは異常の兆候は見られない。しかし、くさびの緩み検査では進行がみとめられている。すなわち、コイルがスロット内で電磁振動により振動し、絶縁物の表面の摩損が進行していることを意味している。

2.2.2 ピークパルス測定

Fig. 2 に測定回路を示す。数 kV の高電圧を静止状態で印加し、各固定子コイルから発生するコロナ放電に伴う電磁波のピーク値からコイルの劣化部位を特定するものである。Table 4 に 11 kV、9 000 kW 同期電動機 2 台の測定結果を示す。表から分かるように、被診断機 B はコロナの発生するスロット数に経年的な変化はあまりないが、被診断機 A は 1 年経過後に著しく増加しており、この点からも絶縁物の劣化が進行していることが推定される。なお、コイルの固定力を判定するくさびの緩み検査とは強い相関があり、部位の特定に有効であることが分かった。

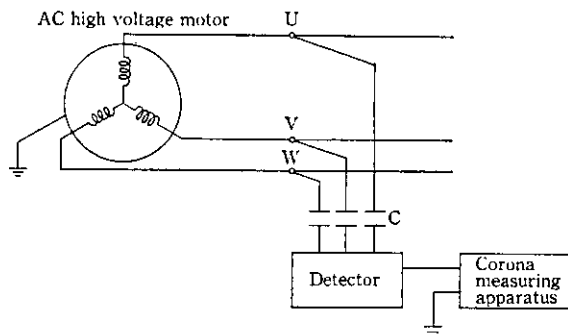


Fig. 1 Corona discharge measuring apparatus

Table 3 Corona partial discharge test on 9 000 kW synchronous motor

Measuring data	Partial discharge at 6.5 kV				DC test P.I.			AC test at 6.5 kV I_c (mA)			Tan δ test $\Delta \tan \delta$ (%)		
	$Q_{\max}$ (pC) at running	$Q_{\max}$ (pC) at standstill											
		U	V	W	U	V	W	U	V	W	U	V	W
Mar. '84	2 220	320	360	470	4.87	4.87	4.96	402	398	402	1.60	1.83	1.70
Jan. '85	2 650	2 550	320	1 300	4.81	4.82	4.81	387	382	387	1.85	1.95	2.05
Jun. '86	2 800	1 050	900	1 800	3.70	3.70	3.70	404	402	404	2.20	2.30	2.30

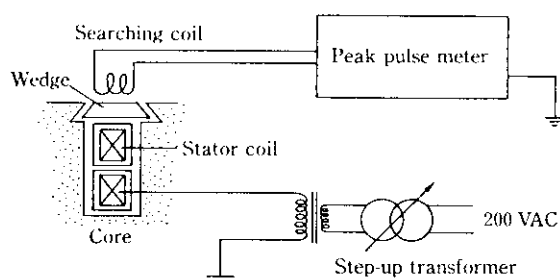


Fig. 2 Peak pulse measuring apparatus

Table 4 Yearly change in the number of slots over which corona is observed during peak pulse measurement of 9 000-kW AC high voltage motors (two examples of A and B)

AC motor	A (9 000 kW)		B (9 000 kW)	
Measurement	1984	1985	1984	1985
Corona				
10 000 pC <	4	10	0	0
3 000 ~ 10 000 pC	13	30	0	0
< 3 000 pC	55	89	24	43

2.3 絶縁診断エキスパートシステム

絶縁劣化現象には多くの要因が複雑にからみ合い、その機構も複雑であるため、絶縁診断は一般に高度な専門知識を持った技術者によって行われている。しかし、専門技術者の養成は簡単ではなく、その確保は困難となってきた。一方、最近の AI 技術の発展により、絶縁診断の分野でもエキスパートシステムの研究が進められており、当社もその適用を検討してきた。

その結果、これまでの経験と技術をコンピュータに移植し、診断データを入力するだけで、専門的な診断結果を得ることができる絶縁診断エキスパートシステムを開発した。

Fig. 3 に本システムの処理フローを示す。これまで専門技術者によって行われていた診断データの整理や解析、劣化判定、劣化対策、次回診断予定の提示まですべてをパソコン処理で自動化している。

特に、劣化判定ではファジィ推論を適用し、4つの試験法により得られた10種類のデータを総合的に評価し、吸湿劣化と絶縁劣化

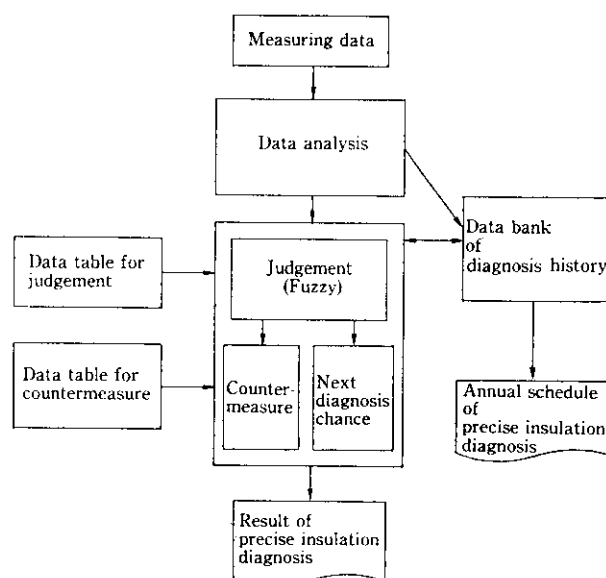
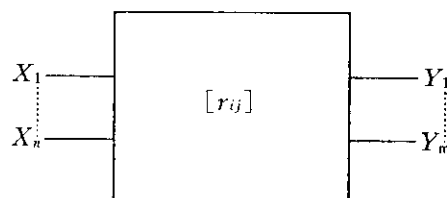


Fig. 3 Process of expert system for insulation diagnosis



$$Y_i = \bigvee_{j=1}^n (r_{ij} \wedge X_j) \quad i=1 \sim m$$

X_j : Measuring data

Y_i : Deterioration

Fig. 4 Fuzzy relation

について、その度合いと範囲を特定している。Fig. 4 にファジィ関係式を示す。複数の測定データと劣化程度との関係を Min-Max 処理するものであり、ある程度のあいまいさを含みながら専門技術者と同等の判定精度が得られている。Fig. 5 に絶縁診断結果の出力例を示す。

1. 診断見解

(1) 構造上今回はウェッジ点検未実施です。早めに点検を計画して下さい。

(2) 電気特性上吸湿劣化していません。

(3) 絶縁劣化していません。

(4) 1年後診断を計画して下さい。

Fig. 5 Diagnostic result which is printed out from expert system

3 直流機に関する絶縁診断技術

直流機の絶縁不良原因の多くは、悪質ダストや過負荷使用による絶縁性能の低下であり、最悪の場合、地絡電流や短絡電流により絶縁物やコイルの焼損に至る。これを防止するためには、使用環境を整備することが第一であるが、同時に、絶縁状態を監視し異常を早期に発見する診断技術の確立が不可欠である。

従来から絶縁管理として、停止中の対地絶縁抵抗を測定する方法がとられているが、診断範囲や判定精度などの面で問題があった。

当社では、1985年から直流機絶縁診断技術の開発に着手し、診断精度の向上による絶縁劣化事故の防止と限界保全の追究をすすめている。以下に、これまでに開発または確立した装置や技術について述べる。

3.1 絶縁劣化メカニズム

Fig. 6に絶縁物が劣化していく過程を示す。すなわち、悪質ダストや湿気、オイルミストなどの環境ストレスや振動・衝撃などの機

Fig. 6 Progress of insulation deterioration

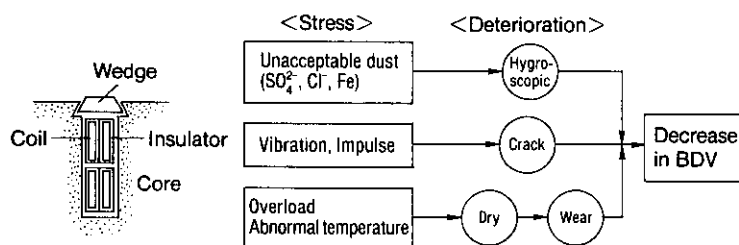
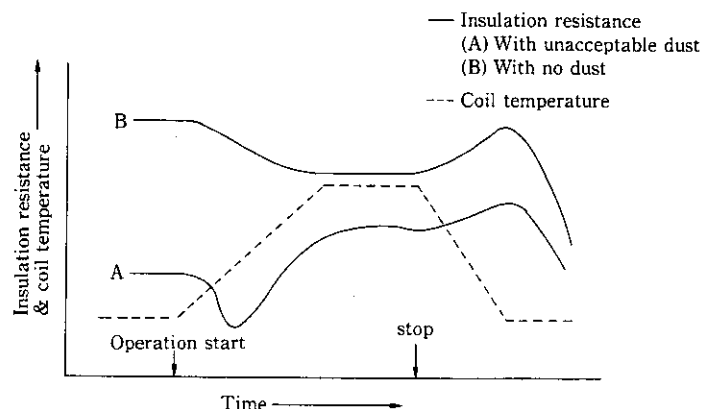


Fig. 7 Change of insulation resistance during operation



械的ストレス、過負荷による熱ストレスを受けながら、絶縁物に吸湿、枯れ、亀裂および摩耗を生じ、最終的に絶縁耐力が低下して沿面短絡や巻線の焼損を生じていく。

3.2 絶縁診断技術の必要性と開発技術

現状での絶縁診断としては、停止時の絶縁抵抗測定が一般化しているが、異常検出や予知、寿命予測などの点で、次に示すような問題がある。

- (1) 吸湿の程度で測定値が変化するため、寿命予測が困難。
- (2) JEC, JIS で規定されている絶縁管理基準は、目安であり絶縁破壊電圧(BDV)との相関が不明確。
- (3) 対地絶縁の測定であり、層間絶縁は測定不能。
- (4) 絶縁物の枯れ・摩耗・亀裂などの診断は、目視点検が主体で定量化が難しい。

以上のような状況から、次に示すような新たな絶縁診断技術の開発ニーズが生まれた。

- (1) 絶縁劣化メカニズムで示された劣化要因を定量的に検出できる異常検出技術の開発。具体的には、吸湿劣化に対してはオンライン絶縁監視装置や吸湿度評価法の開発、枯れに対しては音響法やインパルスハンマリング法の確立、摩耗に対しては層間絶縁測定法、亀裂に対しては電流分析法やドロップテスト法などが開発対象である。
- (2) 劣化程度や異常の有無、運転履歴などから総合的に残存寿命を把握する寿命予測技術の開発。

上記のニーズにもとづき当社において開発された各種診断技術について紹介する。

3.3 オンライン絶縁監視¹⁾

絶縁抵抗は運転中に Fig. 7 に示すような変化をすることが知られている。すなわち、運転を開始するとともに次第に低下し、数分～数十分経過したところで最低値となり、その後再び上昇するという傾向を示す。これは絶縁物の吸湿劣化と大いに関係があり、吸

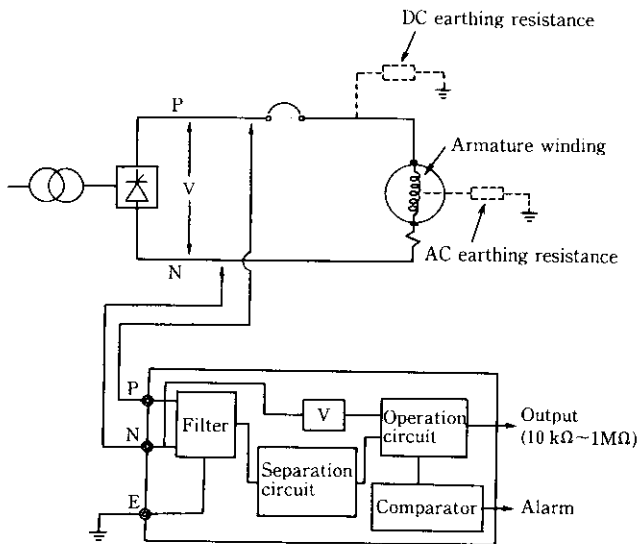


Fig. 8 Configuration of insulation measuring system

湿の程度が大きいほど、その傾向が強い。

本技術は、従来の停止時のメガリングにかわり、運転中の絶縁抵抗を測定するために開発されたものであり、これにより絶縁抵抗の最低値や吸湿劣化の程度などが把握可能となった。

Fig. 8に絶縁測定回路と装置の構成を示す。運転中に回路に流れる接地電流を検出して、その時の主回路電圧から絶縁抵抗値を算出する実接地電流検出方式を採用しており、次のような特徴がある。

- (1) 運転中に絶縁抵抗のモニタができる。
- (2) 絶縁状態を電機子巻線部、直流回路のP側および直流回路のN側の3部位に分けて測定できる。また、3部位の合成絶縁抵抗値も測定できる。
- (3) 絶縁管理値の設定ができ、警報出力および表示機能がある。
- (4) 既設の接地継電器による感度低下を防止する「64補正回路」がある。

すでに、当社においてタンデムミルを中心に35台が設置されており、効果を上げている。

3.4 オンライン吸湿度評価法²⁾

3.3で述べたように、運転中の絶縁抵抗の変化は吸湿劣化の程度と強い相関があることから、その定量化を行い吸湿度として指標化した。

すなわち、運転中の電機子巻線温度の変化に対する絶縁抵抗の変化量から吸湿度を評価する方式であり、次に考え方を説明する。すなわち、絶縁抵抗と温度の関係には10°C温度が上昇すると絶縁抵抗が半減する「10°C半減説」の関係があることを基本としており、10分前の絶縁抵抗 M_1 と巻線温度 T_1 、現時点の巻線温度 T_2 から現時点で予測される絶縁抵抗を算出する。その値に対する実際の絶縁抵抗 M_2 の比から吸湿度評価指数を求めるものである。

$$\text{吸湿度評価指数} = \frac{M_2}{2^{-\Delta T/10} \cdot M_1}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

なお、オンライン吸湿度評価と停止時に測定した吸湿度とは相関があり、有意であることを検証した。

3.5 電機子巻線の断線検出³⁾

電機子巻線が断線すると回転数に比例した周波数の電流成分が発

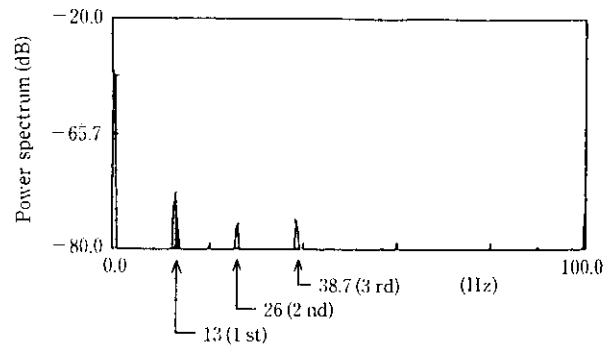


Fig. 9 Frequency analysis for armature current

生するという原理にもとづき、ローパスフィルタを基本とした検出装置を開発した。

Fig. 9は、11 kW 4 P 770 rpmの直流機のコイルを1本断線させた時の電機子電流を周波数分析した結果を示しており、リップル基本周波数の n 次の電流成分が発生しているのわかる。

$$\text{リップル基本周波数} = \frac{770}{60} \times 1 = 12.8 \text{ (Hz)}$$

すなわち、断線すると電機子電流に数10 Hzのリップルが発生することに着目し、低周波成分のレベルから巻線の断線の有無を検出する簡易診断装置である。

3.6 直流機診断監視システム

圧延機用大型直流機の信頼性を保証することは、生産保全の面から重要なことである。そのため、従来から定期点検や整備作業を実施しているが、目視中心の点検であることから異常の発見や予知の面で必ずしも有効でないという問題があった。

本システムは、常時オンラインで過負荷、整流、絶縁などの状態を監視するとともに、異常予知や寿命予測などの診断機能を有しており、設備の信頼性を保証する上からも有用なツールとなる。

Fig. 10は本システムの適用事例であり、主な診断・監視機能について以下に示す。

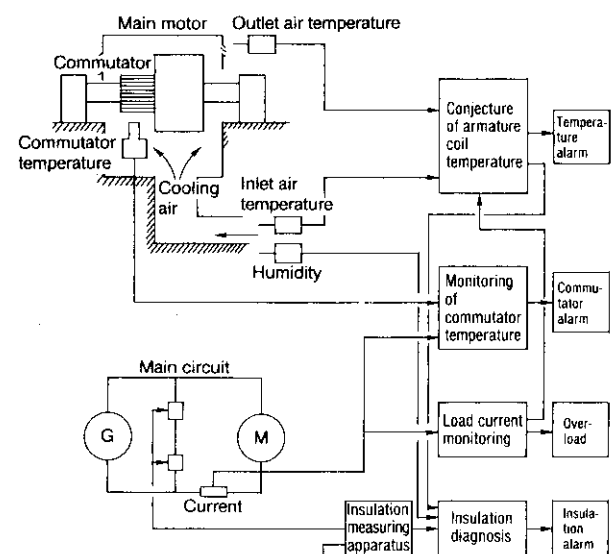


Fig. 10 Diagnostic and monitoring system for DC motor

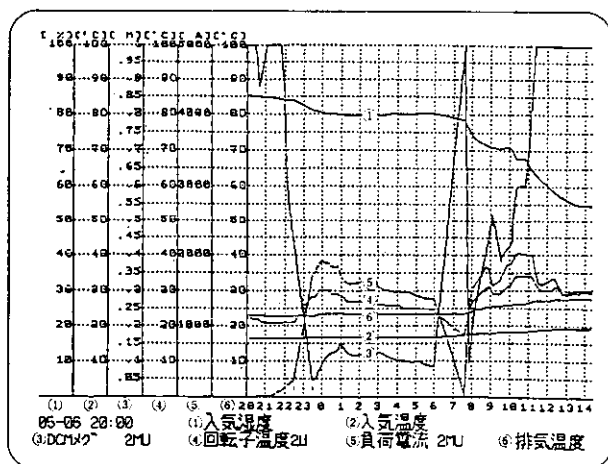


Fig. 11 A sample of CRT picture in which some diagnostic trend data are displayed

3.6.1 電機子巻線の温度監視

巻線の熱ストレスによる絶縁寿命の短縮防止を目的としている。回転している電機子の巻線温度を入気温度と負荷電流、被診断機の温度上昇特性から次式にもとづき推定し、管理範囲内にあるかを監視する。

$$\text{推定巻線温度} = \text{入気温度} + \frac{\text{温度上昇特性}}{\text{冷却風量}} \times (\text{負荷損失} + \text{固定損失})$$

3.6.2 整流子の温度監視

整流火花やフラッシュオーバーなど整流異常を早期発見することを

目的としている。

監視機能として整流子温度の上下限チェック、診断機能として整流子温度変動による整流異常の予知を行う。

3.6.3 負荷(電流)の状態監視

過負荷の監視を目的としており、過電流チェックやRMSチェックを行う。

3.6.4 絶縁監視

絶縁異常の早期発見と寿命予知を目的としている。監視機能としてはオンライン絶縁監視装置による絶縁抵抗のモニターと下限チェック、診断機能としては吸湿度や劣化度の評価を行う。Fig. 11に、本システムの出力例の一つを示す。6種類の測定データを約1日分トレースバックしたものである。

4 結 言

1980年から高圧交流機や大型直流機に関する絶縁劣化を主とした診断技術の開発を行い、下記の成果を得た。

高圧・特高交流機に関しては、

- (1) 精密絶縁診断による絶縁劣化の総合的な判定技術の確立。
- (2) コロナ放電測定によるくさびの弛み診断方法の確立。
- (3) ファジ理論を適用した絶縁診断エキスパートシステムの開発。

直流機に関しては、

- (1) オンライン絶縁抵抗測定装置の開発。
- (2) 吸湿度評価方式の開発。
- (3) オンライン診断監視システムの開発。

参 考 文 献

- 1) 川崎製鉄(株): 特開昭 61-258645
- 2) 川崎製鉄(株): 特開昭 63-059748
- 3) 川崎製鉄(株): 特開昭 63-233380