ピーク負荷繰返し時における直流機の整流について

正員 仲村 節男 (東芝)
正員 森田 登 (東芝)
非会員 都甲 哲 (新日鐵)

1. ま え が き

直流機は、制御装置と一体になってプラントの各種システムを構成している。金属圧延用では特に直流電動機駆動システムの占める比重が大きく、戦後、プラント技術の飛躍的發展に合せ、直流機もそのつど対応し、変化してきた。

一方、直流機整流の研究と言えば、従来無火花帯に関するものが主として行われてきている。

無火花帯による整流評価は、周知のとおり整流回路内を循環する短絡電流により整流火花が発生するとの認識に立ち、ブラシについては高抵抗ブラシの適用により、短絡電流が抑制され無火花帯が広がるとの概念に基づいている。この概念は、従来直流機的设计上有効な技術基準を提供し、多くの実績に支えられてきた。

しかし、近年の制御装置の進歩と圧延技術の進歩の結果、直流機の負荷はピーク負荷繰返しにおいて格段と厳しいものとなったが、このとき無火花帯による整流評価とは矛盾する事例が現れてきた。

すなわち、無火花帯が狭いという意味で整流性能に劣るとされてきた低抵抗ブラシの適用が(火花は出るが)害害のない整流を実現し、逆に整流性能に優れるとされてきた高抵抗ブラシでは(当初火花は出にくい)が、短時間で致命的な害害を生じやすいという事例が増加してきた。

また、このピーク負荷繰返し時の整流事例は、圧延用電動機の仕様上の特徴でもある過負荷耐量および反復負荷定格での使用と密接にかかわっている。

そこで、これらの事例について解析・検証などの研

究⁽⁶⁾を続けてきたが、本論文はそのまとめとして、直流機の整流に関し、最近の制御・圧延に適合した一概念を提案し、その評価・考察を行うものである。

2. 直流機使用条件の変化と台形波電流での圧延

最近の圧延用直流機に関する使用条件の変化は、

- (i) 制御装置の進歩
- (ii) 圧延技術の進歩

によってもたらされたものである。

制御装置の進歩はサイリスタ変換装置の普及とこれを駆動する制御回路の発達を指す。これにより、制御の速応性と精度の飛躍的向上が図られた結果、電動機トルクを代表する電機子電流を、それ以前のものに比べ高速かつ正確に制御することが可能となった。

これにより、電動機の使い方に変化が生じ、従来は過電流リレーが動作するのを避けるため、圧下量や圧延速度を低めに設定せざるを得なかったのに対し、電動機の過負荷仕様の限度での運転が可能になった。

一方、圧延技術的には以上の電動機制御装置の進歩に加え、圧延プラントに大形計算機が導入されるに至って、理論に基づいた圧延、すなわち、最適ピッチコントロールやサイズ・鋼種の制御が可能になってきた。

具体的には、圧延プラントのコンパクト化や時代のニーズに対応した圧延(省エネのための抽出温度低減化、制御圧延)を指向してきている。

これらの圧延方法は、いずれも設備能力をフルに発揮させる方向で、電動機はいっそうの高応答性、高負荷条件下での使用が要求されてきている。

以上、制御・圧延の二点から最近の圧延用電動機の負荷パターンの特徴を具体的に述べると、以下の四点にまとめられる(図1参照)。

- (1) 過負荷電流ピーク値が増加した(電流制限値いっぱいでの運転が多い)。

DC Machine Commutation, in Case of Repetitive Peak Load.
By Setsuo Nakamura, Member, Noboru Morita, Member
(Keihin Products Operations, Toshiba Corporation) & Satoshi Tokoh, Non-member (Oita Works, Nippon Steel Corporation).
仲村節男: 正員, (株)東芝 京浜事業所 [現在, 防衛大学校]
森田 登: 正員, (株)東芝 京浜事業所
都甲 哲: 非会員, 新日本製鐵(株)大分製鐵所

図 1 最近の圧延用電動機の負荷パターンの特徴

Fig. 1. Feature in load pattern of recent mill motor.

図 2 台形波電流繰返しの例

Fig. 2. An example of repetition of trapezoidal current.

表 1 台形波電流が加わる用途

Table 1. An example of use where trapezoidal current is applied.

運 転	用 途
可逆運転	ホットストリップ粗圧延機、厚板圧延機、分塊圧延機
非可逆運転	シームレスパイプ穿孔機

- (2) 過負荷電流ピークの持続時間が増加した。
- (3) ピーク負荷の繰返し頻度が増加した。
- (4) 電機子電流変化率 (di/dt) が増加した。

この傾向は今後、予測制御理論の実機適用など、制御技術の進歩につれ、いっそう強まっていくと考えられる。

過負荷耐量限度の電流が持続する電流パターンを、ここではその波形から台形波電流と呼ぶことにする。

台形波電流が繰返される例を図 2 に示す。また台形波電流で運転される用途の例を表 1 に示す。

3. 台形波電流繰返し時の整流の特徴

台形波電流が繰返されると次のような特徴的整流現象が観察される。

すなわち、図 3 のように一定のピーク電流値をもつ台形波電流が一定の周期で繰返されると、以下の点が確認された。

(1) 電流ピーク値が小さければ全く問題のない良好な整流を示す (ピーク値 100% の場合)。

(2) 電流ピーク値が増加しても、一定限度内であれば時間と共にある一定の状態に落ち着き、満足すべき整流状態を維持する (ピーク値 150% の場合)。

(3) 電流ピーク値が一定限度を超えると、例えば数時間という短時間のうちに整流が加速度的に悪化し、もはやブラシ・整流子の手入れなしでは以後の運転が難しい状態に至る (ピーク値 200% の場合)。

200% の場合の整流悪化過程をよく観察すると、悪化開始と同時に火花がブラシ接触面出口から奥に入り込み、整流子面は次第に黒化し、つやが失われると同時にブラシしゅう動音が高くなる現象が観察される。

火花が奥に入り込むのはブラシ出口部の焼損、すなわちカーボン粒子の脱落の結果、整流現象上の出口がブラシ中央寄りに移動するためと考えられる。また、整流子面の黒化はカーボン粒子の付着を意味し、整流子面のつやの減少としゅう動音の増加は、カーボン粒子の付着による整流子面の表面粗さの増加を意味している。

整流子面の表面粗さが増加すれば、ブラシ・整流子間の電氣的・機械的な接触特性が悪化し、それが更に整流を悪化させるという状態に至る。

すなわち、整流子面の表面粗さの増加→電氣的・機械的接触状態の悪化→整流悪化→整流子面の表面粗さの増加の悪循環状態に陥り、わずか数時間の間に加速度的な悪化を生じることが観察された。

図 3 台形波電流繰返しにおける火花の進行

Fig. 3. Development of spark under the repetition of trapezoidal current.

無火花帯による従来の整流理論は、文字どおり無火花の範囲によって整流評価を行うものである。従って、ブラシ焼損など実害成否の条件を扱うものではない。

そこで、繰返しピーク負荷時の整流を取扱うにあたり、従来とは異なったアプローチを試みることにした。

4. 解析と実験

(4.1) 接触電圧降下と接触点温度上昇 従来から、運転中の直流機の整流評価にブラシ接触電圧降下の測定が有効であることがいわれてきた⁽¹⁾。今回、測定でその電圧降下が一定値を超えるとブラシ接触面に焼損が現れることが確認された。また、整流子皮膜の生成に伴い、ブラシ接触電圧降下が増加し上記焼損が発生しやすくなることも確認され、接触電圧降下が現象のキーであると判断した。

そこで、Holm による接点理論⁽²⁾に戻り解析を行った。Holm は、 α -spot と呼ばれる接触点の接触電圧降下 ψ と接触点温度上昇 θ について、 ψ - θ 理論を明らかにしている。この理論は、接触点を図 4 に示す円柱にモデル化し、ジュール熱により発生する熱量と円柱を伝わり外部に逃げる熱量との収支から ψ と θ の関係を求めている。この理論をブラシと整流子の接触の場合、すなわち、カーボンと銅の接触の場合に適用して、温度分布を考えると図 4 の下のようなになる⁽²⁾。同図で最高温度部分がカーボン側にあるのは、銅と比べ

カーボンの抵抗が高く熱の発生が大で、かつ熱伝導が悪いためである。

この場合の接触電圧降下 ψ を図中の U, V, Ψ の部分に分けて考えると、 U, V, Ψ の値はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} U &= \sqrt{2\rho_1\kappa_1\theta_{\max}} \\ V &= \sqrt{2\rho_1\kappa_1(\theta_{\max}-\theta_c)} \\ \Psi &= (\rho_2/\rho_1)(U+V) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 ρ_1, κ_1 ：カーボンの抵抗率、熱伝導率、
 ρ_2, κ_2 ：銅の抵抗率、熱伝導率、 $\theta_{\max}$ ：最高温度点の温度上昇値、 θ_c ：カーボンと銅の接触面の温度上昇値

で表される。

また、 $\theta_{\max}$ と θ_c との間に次式が成立する。

$$\sqrt{\theta_{\max}-\theta_c} = \{\kappa_2/(2\kappa_1+\kappa_2)\} \sqrt{\theta_{\max}} \dots (3)$$

接触電圧降下の算出は、まず θ_c を仮定し、(3)式により $\theta_{\max}$ および $(\theta_{\max}-\theta_c)$ を求め、これを(2)式に代入して U, V, Ψ の値を得、それらの和として接触電圧降下 $V_c(=\psi)$ を求めた。

なお、温度上昇に伴う抵抗率変化は Holm の例にならない、

$$\text{カーボンに対し、} \rho_1 = \rho_{10} \exp(-0.001 \theta)$$

$$\text{銅に対し、} \rho_2 = \rho_{20} (1 + 0.004 \theta)$$

の形で扱った。ここで、 ρ_{10}, ρ_{20} は $\theta=0$ (α -spot 局部の温度上昇零) における ρ_1, ρ_2 の値であって、 ρ_{10} は表 2 の値、 ρ_{20} は $1.76 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ とした。

なお、熱伝導率 κ_1 は Wiedemann-Franz の法則に従うものとして ρ_1 より算出し、熱伝導率 κ_2 は $3.8 \text{ W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$ の定数とした。

表 2 に示す高抵抗ブラシ A、低抵抗ブラシ C について接触電圧降下 V_c と最高温度点の温度上昇 $\theta_{\max}$ との関係を算出した結果を図 5 に示す。

この結果から以下の点が考えられる。

(1) 接触電圧降下と最高温度点温度上昇の関係はブラシ抵抗率の大小によらない。

(2) 接触電圧降下は、最高温度点温度上昇を代表している。従って、同一負荷では高抵抗ブラシより低

図 4 ψ - θ 理論における接触点モデルと接触点における温度分布

Fig. 4. Contact point model in ψ - θ relation and thermal distribution at contact point.

表 2 大形直流機の代表的ブラシの特性

Table 2. Characteristics of representative brush grade for large DC machine.

ブラシ材質	高抵抗ブラシ A	高抵抗ブラシ B	低抵抗ブラシ C
抵抗率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	6,400	7,500	1,400
見掛け比重	1.54	1.46	1.48
ショア硬度	50	45	30
曲げ強さ (kg/cm^2)	110	200	100
備考	スート系	スート系	コークス系

図 5 接触電圧降下と最高温度点温度上昇の関係

Fig. 5. Relation between contact drop and temperature rise at maximum temperature point.

抵抗ブラシのほうが最高温度点温度が低いと推定される。

一方、ブラシの焼損は微視的にみれば、接触表面のカーボン粒子の結合が熱的に破壊され、脱落する現象とされている。両ブラシについて熱重量分析を行い、分解開始温度を求めた結果、両者とも 500 度強であった。

その結果は、温度上昇値として図中に付記されているが、これを見たと経験値であるブラシ焼損発生電圧降下 2.5 V は、ちょうど分解開始温度に対応していることがわかる。

〈4.2〉 整流解析 ブラシ接触電圧降下とブラシ焼損の関係が示されたので、ブラシ接触電圧降下に着眼し、既報の方法⁽³⁾で整流解析を行った。

対象とした 5,000 HP-35/90 rpm-750 V の直流機の整流回路を図 6 に、整流回路定数を表 3 に示す。このとき整流方程式は次式となる。

$$L(di/dt) + v_b(i, t/T_k) = -e_c \dots (4)$$

ただし、 L : インダクタンス行列、 i : 整流電

流ベクトル、 $v_b(i, t/T_k)$: ブラシ接触電圧

降下のベクトル、 I : 並列回路電流、 t : 時間、

T_k : 整流子片周期、 e_c : 整流起電力ベクトル

ここで、ブラシ接触 V - I 特性を非線形として扱い、次式の形で表す。

$$v_b = v_{b0} G^n$$

ただし、 v_b : ブラシ接触電圧降下、 v_{b0} : 定格

負荷時の平均ブラシ電流密度に対応する接触

電圧降下、 G : 定格負荷時の平均ブラシ電流

密度との比で表した電流密度

接触 V - I 特性は、実圧延中のブラシ接触電圧降下の実測値より、次式とした。

$$\text{高抵抗 } B \text{ ブラシ: } v_b = 1.40 G^{0.72}$$

$$\text{低抵抗 } C \text{ ブラシ: } v_b = 0.68 G^{0.75}$$

解析結果の例を図 7 に示す。(a) 図は、電機子電流

図 6 整流回路

Fig. 6. Commutation circuit.

表 3 整流回路定数

Table 3. Commutation circuit constants.

巻線方式	一重巻
並列回路電流 I	350 A
ブラシ被覆数 β	5
整流インダクタンス L_0	18 μ H
整流子片周期 T_k	1 ms
平均リアクタンス電圧	6.4 V

(%)を横軸、ブラシ接触電圧降下を縦軸にとったもので、高抵抗ブラシ B と低抵抗ブラシ C の結果を示している。同図で、実線はブラシ出口の電圧降下、破線はブラシ入口・出口間の平均値を示している。また、ブラシ出口の電圧降下は、実測値と比較するため 1 整流子片周期の平均値とした。なお、図中にブラシ焼損発生電圧域を付記した。

ここでは、補極の強さを整流起電力の整流帯内平均値 E_c と平均リアクタンス電圧 E_r との比 E_c/E_r で定義する。図の解析例は、対象とした機械の実測結果に合せ $E_c/E_r = 0.98$ としている。

一般に、ブラシ出口に焼損が発生すると、その分見掛けのブラシ厚みが減少し、整流時間が減少する結果、リアクタンス電圧が増加し、不足整流となる。不足整流の状態から焼損が発生すると、ますます不足整流になるので整流悪化が進行しやすい。過整流の状態から、焼損を発生してもリアクタンス電圧の増加が過整流状態を緩和するので、悪化が進行しにくい。

なおピーク負荷が加わる時点は、圧延材のかみ込みによる急激な電流増加の直後である。急激な電流増加がもたらす補極磁束遅れによる不足整流火花の発生、いったん出た火花のヒステリシスによる残留を考慮すると、実圧延中における整流の実害は不足整流状態で起こると考えられる。そこで、ここでは不足整流の傾

図 7 整理解析の結果

Fig. 7. Results of commutation analysis.

向にある場合のみを取扱うこととした。

図 7 (a) から次の点がわかる。接触電圧降下の平均値に対するブラシ出口の値の比は高抵抗ブラシでは比較的小さく、低抵抗ブラシでは大きい。これは、高抵抗ブラシのほうが短絡電流の抑制効果が大きいと見られる点で従来理論のとおりである。

一方、高抵抗ブラシの出口電圧降下は低抵抗ブラシの 2 倍に近い値を示している。特に、160% を超える電機子電流値では、ブラシ焼損発生の電圧 2.5 V を超えており、 ψ - θ 理論からみても焼損発生の可能性が高い。

これに対し、低抵抗ブラシでは 200% 電流であっても、出口電圧降下は 1.7 V であり焼損発生の可能性は低いと考えられる。

(b) 図は、整流終期の一整流子片周期における接触電圧降下の変化を示したものである。高抵抗ブラシでは一整流子片周期の平均値は高いが整流終期 $\theta=5.0$ における値は低く、低抵抗ブラシではその逆になっている。

周知のように整流終期の接触電圧降下は無火花帯を決定するもので、図の結果は高抵抗ブラシのほうが無火花帯が広いことを意味するものである。すなわち、無火花帯に代表される従来の整流概念とここで検討している整流概念とは、整流回路に生じる現象を扱う点は同一でも、前者は整流終期の現象をみており、後者は一整流子片周期における平均値をみている点が異なっている。

次に、ブラシ火花の負荷による変化を考える。火花号数 s と火花エネルギー E との関係は、技術報告⁽⁴⁾によって、

$$E \propto (s-1)^n \quad (\text{ただし、ここでは } n \text{ を } 2 \text{ とする}) \quad (5)$$

といわれている。ブラシ出口火花は、ブラシ出口と整流子片出口との接点分離現象としてとらえれば、電流遮断の際、コイルのもつ磁気エネルギーが、火花エネルギーになって消費する現象であるとみることができ。いま、遮断開始時の電流を ΔI とすれば、火花エネルギーと ΔI との関係は、

$$E \propto \Delta I^2 \quad (6)$$

となり、(5) 式を (6) 式に代入すれば、

$$s-1 \propto \Delta I \quad (7)$$

を得る。整流解析より整流曲線を求め、整流終期 $t=T_k$ の値から ΔI の値を得ることができる。

いま、対象機の実測無火花帯幅 (片側幅) の分、補極が弱い状態における ΔI の値を解析で求めて、これを ΔI_0 とする。 $\Delta I = \Delta I_0$ での火花、すなわち無火花帯境界での火花が 2 号火花とすれば、(7) 式の比例係数が求まり、次式が得られる。

$$s = \Delta I / \Delta I_0 + 1 \quad (8)$$

以上により、火花号数を算出、電機子電流 (%) に対し示すと (c) 図を得、出口火花の整流は、従来理論どおり高抵抗ブラシのほうが良いことがわかる。

以上の解析結果をまとめると次のようになる。

(1) 高抵抗ブラシは、低抵抗ブラシと比べ整流終期の遮断電流 ΔI が小さく、従って無火花帯を決定するブラシ出口火花を生じにくい。

(2) ピーク負荷時は (実圧延を考え不足整流で扱えば) 電機子電流増加による平均接触電圧降下の増加に伴い、ブラシ出口の電圧降下はいっそう増加する。このとき平均接触電圧降下の高い高抵抗ブラシの場合は、ブラシ焼損を生じやすくなる。

(3) 前記の加速度的悪化の成否は、高抵抗ブラシの結果からみて、ブラシ接触電圧降下がブラシ焼損に対応する値 2.5 V を超えるか否かにかかっている。

(4) すなわち、(3)項はピーク負荷繰返し時における加速度的な整流悪化の開始条件を明らかにしたものと考えられる。

従来、ブラシ出口火花に着目し、無火花帯によって整流能力評価を行ったのに対し、以上の解析が取扱った場合はブラシ接触電圧降下に着目し、ブラシ焼損に対応する電圧降下(以下ブラシ焼損電圧とする)との間の電圧が「ピーク負荷時の整流能力」となっている。

〈4・3〉 機械的な接触安定性の評価 整流では、一般にブラシ・整流子の機械的な接触特性が重要な役割を演じる。特にピーク負荷繰返しの場合には、加速度的な悪化の成否が前述の悪循環を生じるか否かにかかっているとみられ、悪循環を構成する機械的な接触特性の安定性がその意味で重要になる。

ここでは、まず微視的に見た考察を行う。接触電圧降下の考察を行った A, C ブラシについて接触安定性に関連する事項をまとめ、その解説と共に表 4 に示す。

この場合、A ブラシの接触点数は C ブラシの半分である。焼損の進行と共に整流子面が粗れていく状態で、離散的な値をとる接触点数が少ないのは、それだけ電流集中が生じやすい点で不安定と考えられる。

また、ブラシを構成するカーボンの粒径は A ブラシが C ブラシの 4 倍である。

ブラシ組織の粒径は摩耗粉の粒径の大小を間接的に代表し、摩耗粉の大小は整流子面の粗れの進展に関係すると考えられる。従って、粒径の大きい A ブラシは整流子面の粗れの進展も速く、その意味でも接触安定性に欠く点があると判断される。

次に、急激な電流変動に対する接触特性の変化を考

表 4 機械的な接触安定性の検討
Table 4. Consideration of mechanical contact stability.

ブラシ材質	高抵抗ブラシ A	低抵抗ブラシ C	備 考
a-spot の数 N	25	59	$N=A/S$
粒子径 d (cm)	0.01	0.0025	顕微鏡写真より
a-spot 面積 S (cm ²)	7.9×10^{-5}	4.9×10^{-6}	$S=\pi d^2/4$
接触点総面積 A (cm ²)	2.0×10^{-3}	2.9×10^{-4}	$A=\rho \cdot l/R$
接触点円柱高さ l (cm)	0.01	0.0025	$l=d$ とする
ブラシ抵抗率 ρ (Ω・cm)	0.0064	0.0014	
接触点合成抵抗 R (Ω)	0.032	0.012	注)

注) 図 11 において接触電圧降下 1.0V の点 $V-I$ から抵抗 R を $R=V/I$ として求めた。なお、ブラシ 1 個の電流は電機子電流 100% で 50A である。

図 8 急激な電流変動に対する機械的な接触特性の変化の例

Fig. 8. An example of mechanical contact characteristic under abrupt current change.

えてみる。図 8 はその実験例⁽⁵⁾で、高抵抗ブラシと低抵抗ブラシの比較である。これは別のブラシ材質で行われた結果であるが、ちょうど A, B ブラシと C ブラシの関係に対応し、摩擦係数の相対的な変動量と元の値への回復時間に大きな差があることが明らかである。

ブラシの整流子への接触角度(あたり)を決定する一要素として摩擦係数がある。高抵抗ブラシのように摩擦係数が大きく変動すると接触角度が変動し、有効接触面積が変動する。従って、図に見られる摩擦係数の低下は有効接触面積の低下を意味すると思われる。

図 2 の圧延時の波形に見られるように、ピーク負荷の待ち時間は数十秒である。図 9 の高抵抗ブラシでは、有効接触面積が十分に回復しないうちに、次のピーク負荷が加わるので、ブラシ接触電圧降下は未回復分だけ増加し、ブラシ焼損が進行していくと考えられる。

〈4・4〉 工場試験による検証 フィールドテストに先立ち工場試験による実験検証を行った。図 9 は小形直流機を用い、繰返しピーク負荷を 1 時間加えて運転し、その間の整流変化についてブラシ比較の形でまとめたものである。

実験は補極の強さを変えて行い、同図はその中からブラシ摩耗が最小となる補極の強さでの結果を高抵抗・低抵抗ブラシそれぞれについて示した。結果のポイントを以下に記す。

(1) 当初の無火花帯幅は、従来理論のとおり高抵抗ブラシのほうが広い。

(2) ピーク負荷繰返し時においては、高抵抗ブラシでは時間の経過と共に接触電圧降下と火花の増加が著しく、逆に低抵抗ブラシではその増加が少ない。

(3) 高抵抗ブラシではブラシ・整流子に発生した

図9 繰返しピーク負荷での火花試験の結果

Fig. 9. Result of spark test with repetitive peak load.

図10 一定電機子電流での100時間連続火花試験の結果

Fig. 10. Results of 100h continuous spark test with constant armature current.

焼損とブラシ摩耗が顕著であるが、低抵抗ブラシでは極めてわずかである。

これらによって、解析結果のまとめで述べたブラシ焼損発生・成否の条件が高抵抗ブラシと低抵抗ブラシの比較において、検証されたと考えることができる。

また、参考のため行った定格負荷での100時間連続

火花試験の結果を図10に示す。この結果は、ピーク負荷繰返し時の逆で、低抵抗ブラシのほうが悪い結果となっており、従来理論から推定されたとおりにになっている。

このことは、一定負荷連続時の整流とピーク負荷繰返し時の整流は、分けて考えねばならないことを意味している。

5. フィールドテストによる検証と考察

フィールドテストの結果の例を図11、図12に示す。図11は整流解析の対象とした5,000 HP 直流機での結果で、電機子電流ピーク値(横軸)とブラシ接触電圧降下(縦軸)の関係にまとめている。ブラシ接触電圧降下は、図中の円内に検出ブラシをブラシ保持器に挿入

して測定したものである。従って、検出ブラシ⑥によってブラシ出口接触電圧降下を測定し、検出ブラシ①～⑥の平均値によってブラシ接触電圧降下の平均値を求めている。

この電圧降下は測定系の応答から考え、一整流子片周期の時間的変化の平均値を測定したもので、図7(a)の解析結果と対応している。

図11と図7(a)の比較から、フィールドテストと解析結果とはよく一致していることがわかる。これにより、加速度的な整流悪化の開始条件が解析による結論に従うと判断される。

図12は8,000 kW-45/90 rpm-1,200 V 直流機での結果を示したものであり、電流のピーク値は180%である。フィールド事例によると、加減速時のような極短時間のピーク電流ならば、例え前記の悪化開始条件が成立しても加速度的な整流悪化を生じない。

一方、今回の現象は繰返しに一つの特徴があり、台形波電流の加わる圧延の期間を除くと、一周期の他の期間は無負荷または軽負荷である。すなわち、圧延の期間以外はブラシ・整流子の機械的な接触特性の回復期間とみなすことができ、問題は悪化の進行と回復の進行とのどちらが支配的にある。

そこで、本整流における悪化の成否の判定には、現象を「経時変化」ととらえることとした。このとき、

図 11 フィールドテストにおける電機子電流と接触電圧降下との関係

Fig. 11. Relation between armature current and contact drop at field test.

図 12 経時変化による整流能力の検証

Fig. 12. Confirmation test for commutation ability by spark trend.

その良否の判定は結果の値でなく、その傾向が一定値に飽和するのか、発散的に増加するのかによる。

なお、この判定は図に示されたように比較的短時間で行うことができ、一定の負荷パターンの繰返しが明らかであれば、整流確認に特別の測定は不要であり、火花の観察だけで十分である。ただし、火花の観察には従来の火花号数による評価に加え、ブラシ焼損を示唆する射出火花と赤熱火花について、その大小の程度を定義して用いることが必要である。

この意味では、図 12 は単にブラシ抵抗率による差を検証するばかりでなく、最終的な整流能力判定テストとしての意義があると考えられる。

以上、ピーク負荷繰返し時の整流に関し、接触電圧で整流をとらえる点およびその許容限度を経時変化からとらえる点の、二つの重要な概念がフィールドテストによって検証されたと言える。

この結果は、直流機的设计上および仕様決定上に反映する必要がある。設計上では、整流設計およびブラシ適用において、ピーク電流繰返しを考慮し、ブラシ焼損発生電圧に至らぬようにしなければならない。また、仕様決定上では過負荷電流の繰返し許容限度を考慮した定格のあり方を考えなければならない。

圧延用直流機の現行規格 JEM 1157 および NEMA MG 1-23 での過負荷耐量の規定は、30 年以上前の手動運転の時代に作られたものがそのまま使用されている。

今後は本論文の結論を加えて、現状圧延技術に適合した形にみなおしていく必要がある。そのなかでは繰返し過負荷の限度を、前述した負荷ピーク値とその持続時間・繰返し頻度などの観点から規定することが必要となる。また、連続定格と過負荷耐量の二本立てである現行規格の考え方を改め、反復負荷定格を適用する場合は、その定格算定法に本整流現象の考え方を取入れることが必要と考える。

6. あとがき

本論文は、近年金属圧延用で直流機稼働環境の変化によりクローズアップされてきたピーク負荷繰返し時の整流を扱い、環境変化の分析から、解析・検証試験に至る一連の研究結果をまとめたものである。

その結果、従来とは観点の異なる整流概念の導入と、これによるピーク負荷繰返し時の整流評価を提案している。

そのポイントは、ピーク負荷時の整流の特徴現象である加速度的な整流悪化に着目し、その悪化開始条件の解明と、経時的な悪化可否の判定法からなっている。

悪化開始条件の解明の要点は、従来の整流がブラシ出口火花に着目し、無火花帯によってその整流能力を評価したのに対し、ブラシ接触電圧降下に着目し、ブラシ焼損電圧に対する整流能力を評価した点にある。

悪化可否判定法の提案の要点は、整流を経時変化でとらえ、その間の傾向から判定する方法を導入した点にある。なお、この経時変化に影響する機械的接触特性とその回復性についても、新しい技術知見を提供した。

また、直流機定格の考え方についても考察し、今後の規格のあり方についても展望した。

今後、圧延プラントの進歩に伴い、予測制御など、いっそう進んだ技術が適用されていくとき、直流機の使用条件はより過酷になり、今回提案している整流の概念がますますクローズアップされてくると考えられる。(昭和 63 年 1 月 12 日受付、同 63 年 4 月 4 日再受付)

文 献

- (1) G. H. Gunnoe & R. M. Dunaiski: "How to Adjust Commutation Accurately from Brush-potential Measurement", Power Magazine (May 1954)
- (2) R. Holm: Electric Contacts Handbook, p. 87 (1958) Springer-Verlag, Berlin
- (3) 森田・仲村:「直流機のブラシ接触電圧降下分布に及ぼす整流子皮膜の影響の解析」, 昭 60 電気学会全大, No. 832, 1009
- (4) 稲垣:「整流火花の分類法」, 電学誌, 84, 19 (昭 39-1)
- (5) 直流許容過渡電流変化率調査専門委員会:「直流機の許容過渡電流変化率について」, 電気学会技報(I部), No. 144, 43 (昭 62)
- (6) 小菅, 他:「ピーク負荷繰返し時の直流機の整流と過負荷耐力について」, 電気学会回転機研究, RM-84-91 (昭 59)