

鋼帯連続焼鈍炉ハースロールの交流可変速制御 VVVF Control System for Hearth Roll Drive in Continuous Annealing Line

山本博正*
Hiromasa Yamamoto

坂本軍司*
Gunji Sakamoto

島田雅照**
Masateru Shimada

柳島章也***
Fumiya Yanagishima

下山雄二****
Yuji Shimoyama

Synopsis:

Strip tension control is one of the key factors for the CAL control system. In the conventional CAL, however, the strip tension is not controlled directly. So troubles frequently occurs such as heat buckling and instability of tracking.

In order to prevent these troubles, the VVVF control system was adopted to KM-CAL's hearth roll driving. This system allows control of strip tension directly and precisely, and consequently, high speed operation (600m/min which is the world record) has been realized.

1. 緒言

連続焼鈍設備 (CAL: Continuous Annealing Line) は鋼板の熱処理を行なうプロセスラインであり、ハースロールの揃速性や炉内の鋼板張力の制御性如何により品質および操業の安定性が大きく左右される。従来のCALではハースロールの制御方式として直流電動機によるAVR(電圧制御)方式を採用しているが、この方式では界磁電流の変動や電圧と回転数の関係の非直線性などにより制御系に外乱を受けやすいことが欠点となっている。したがって良好な揃速性や操業の安定性を確

保するためには、界磁電流の微調整など制御系を最良の状態に維持するよう細心の注意を払う必要がある。また、CALではハースロールの本数が多く、それらを駆動する直流電動機の保守に多大の経費と労力を要することも大きな問題点となっている。

千葉製鉄所において一昨年稼動したKM-CAL (Kawasaki Steel Multipurpose CAL) では従来方式の問題点を解決するためハースロールの駆動にVVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 制御方式を採用した。この方式は交流電動機を用いた可変速制御方式であり、個々の電動機をそれぞれ独立に制御するために制御回路およ

* 千葉製鉄所設備部設備技術室主任(掛長)
** 千葉製鉄所冷延部冷延技術室主任(課長)
*** 千葉製鉄所冷延部冷延技術室主任(課長)
**** 千葉製鉄所冷延部第1冷厚課掛長
〔昭和57年1月18日原稿受付〕

** 千葉製鉄所設備部設備技術室主任(課長)
**** 千葉製鉄所冷延部第1冷厚課掛長

び電源装置（インバータ）を個々の電動機ごとに設置することとした。この方式によれば、従来技術の直流電動機制御方式に比べブラシレスにより著しく安全性が向上するのは勿論のこと、炉内張力の安定化に大きく寄与することが期待できる。

ポンプやブローの省エネルギーを目的としたV VVF 制御は既に数多くの実績があり確立された技術である。しかし、ライン駆動用電動機への適用例としては熱間圧延機のホットランテーブルロールや横型焼鈍炉のハースロールなどに若干の実績があるだけで、縦型焼鈍炉のような張力が連続してかかっている高速プロセスラインへの適用は今回が初めての試みである。

本稿では KM-CAL の VVVF 制御システムとそれをを用いた炉内張力制御方式について概説する。

2. 従来の制御方式とその問題点

従来の CAL では炉内のハースロールをいくつかのセクションに分割し、各セクションごとにそれぞれ1台ずつの共通直流電源装置を設置するいわゆるグループ制御方式が採用されている。その制御系は Fig. 1 に示すように AVR（電圧制御）系であり、各ロールの揃速性については直流電動機の界磁電流を調整することにより得ている。

一方、CAL では炉内を通過する鋼板の張力が製品の品質に直接影響を及ぼす。たとえば張力が高すぎるとヒートバックル（鋼板の幅方向の不均

一な応力によって鋼板に縦じわのはいる連続焼鈍工程特有の品質欠陥）が発生し、また逆に低すぎるとロールがスリップして疵がはいったり、あるいは鋼板が蛇行することになる。

しかし、従来の制御方式では張力を直接制御しているわけではなく、次のような制御上の問題点を有している。

- (1) 各セクションごとの共通電源方式であるため個々のロールの制御が難しい。
- (2) 炉温の変動やカーボンのロールへの付着などに起因する摩擦係数の変化、あるいは機械損の変化などによりロールの回転数が変化する。
- (3) モータの電源電圧と回転数の関係が直線的ではなく、また個々のモータのばらつきや温度ドリフトによる界磁電流の変化により安定した揃速性を得るのが難しい。

特に KM-CAL では処理材の板厚や焼鈍温度条件が広範囲にわたるため¹⁾、速度制御範囲と張力制御範囲が従来の設備に比べ著しく広がる（ライン速度 1 : 12, 鋼板張力 1 : 10）。したがって従来の制御方式ではすべての操業状態において安定した制御性を確保することは非常に難しくなる。

これらの問題点を解決するためには、各電動機を1台ずつ単独の電源を用いて速度制御すればよいが、従来の直流駆動方式では経済的な理由により採用された例はない。

一方、VVVF 制御方式では電源を各々独立に設けることは容易であり、しかも誘導電動機によ

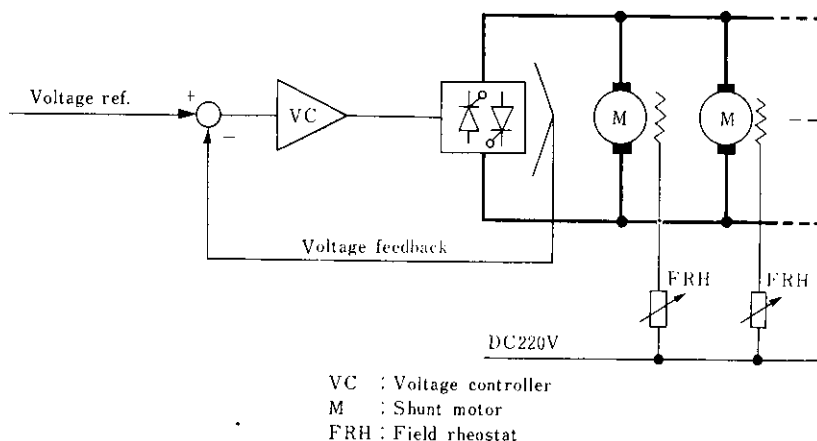


Fig. 1 Schematic diagram of hearth roll drive by conventional system

る速度制御であるから上記の AVR 制御の問題点は解消され安定した揃速性を得ることができ、また整流子回りのメンテナンスも不要となる。したがって制御性および安全性が著しく向上し、設備費についても直流電動機単独制御方式に比較して安価となるため、VVVF 制御方式は問題解決のための有力な手段であると考えられる。

3. VVVF 制御システム

3.1 VVVF 制御系の構成

KM-CAL 炉部の構成を Fig. 2 に示す。炉部は 5 セクション（加熱、均熱、第 1、第 2、第 3 冷却帯）に分割され、それぞれ十数本ずつのハースロールが設置されている。

Fig. 3 にハースロール駆動システムの概略を示す。各々の電動機はそれぞれ別個のインバータ（DC-AC 変換器）によって駆動され、各インバータは炉セクションごとに 1 台のコンバータ（AC-DC 変換器）に接続されている。

コンバータおよびインバータの制御ブロック図を Fig. 4 に示す。コンバータは定電圧（AVR）制御され DC 270 V をインバータに供給する。各インバータはそれぞれ独立に速度制御され、V/F 一定の関係を保ちながら出力周波数が速度指令に応じて変化する。

Table 1 にコンバータおよびインバータの仕様を示す。

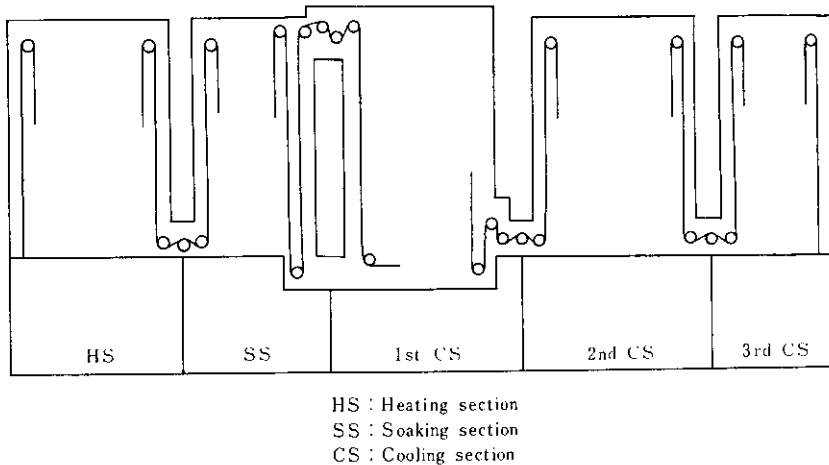


Fig. 2 Structure of KM-CAL furnace section

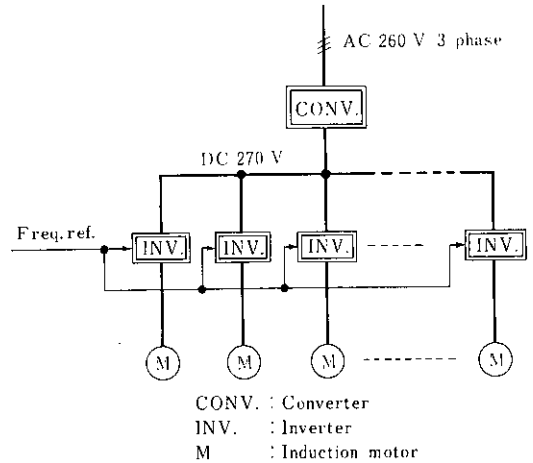


Fig. 3 Skeleton diagram of KM-CAL hearth roll drive

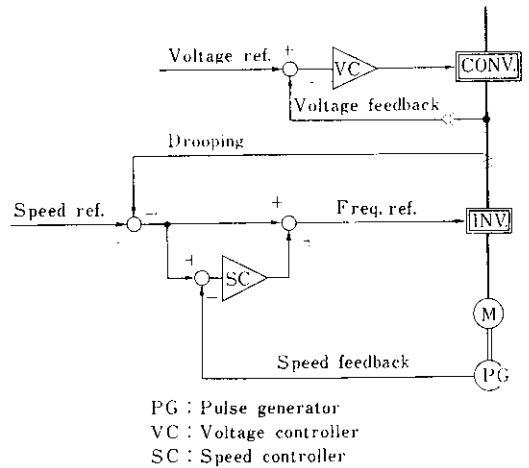


Fig. 4 Block diagram of VVVF control system

Table 1 Specification of VVVF control equipment

	Converter	Inverter
Input	AC 260 V 3 phase	DC 270 V
Output	DC 270 V	VVVF $V_{max} = AC 200 V$ $F_{max} = 120Hz$
Capacity & Quantity	60kVA×1 80kVA×1 90kVA×1 140kVA×2	10kVA×81
Control	AVR (Automatic voltage regulation)	PWM (Pulse width modulation)

3-2 VVVF化のための問題点²⁾

制御性および保全性の向上や設備費の削減のためにはVVVF制御は有望な手段ではあるが、その採用にあたり事前に検討すべき事項について概説する。

3-2-1 機械系の共振対策

インバータによって駆動されるモータは高周波トルクリップルを含み、電源周波数の6倍の周波数成分が最も優勢に含まれる。通常、機械系の固有周波数は数10Hzもしくはそれ以下であるため、低周波領域での共振が問題となる。

一般に振動系に正弦波外力が作用するとき、この強制振動の振幅比 A は、

$$A = \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}}$$

ξ : 減衰係数比

λ : ω/ω_0

ω : 外力周波数

ω_0 : 固有周波数

で表わされる。一方負荷トルク T_C は、

$$T_C = \alpha T_{100}$$

T_{100} : モータ定格トルク

α : 負荷数

で表わされるため、トルクリップル T_R は、

$$T_R = \alpha\beta T_{100}$$

β : トルクリップル含有率

で表わされる。したがってこの系に作用する外力 T は、 $T = T_C + T_R \sin \omega t$

となり、共振の影響により系に発生する最大トル

ク T_{Max} は、

$$T_{Max} = T_C + AT_R$$

となる。つまり減速機、継手などの機械的強度が上記 T_{Max} に十分耐えられるものでなければならない。

振幅比 A を小さくするためには $\lambda (= \omega/\omega_0)$ を大きく、すなわち ω_0 を小さくすればよいが、そのためには系のねじり剛性を小さくするのが最も効果的である。KM-CAL では共振の可能性のある一部のロールについて継手をフレキシブルなものとすることにより、 ω_0 を当初設計値の1/3程度に下げ共振を避けている。

3-2-2 鋼板の張力変動に対する影響²⁾

前項で求めたトルクリップル AT_R が鋼板張力に与える影響について検討するために Fig. 5 のモデルを考える。

Fig. 5 において T_{a1} (モータの発生するトルク) の変動が T_2 (鋼板張力) にどの程度の変動を与えるかを検討する。 T_{a1} と T_2 に着目して Fig. 5 のブロック図を変形すると Fig. 6 のブロック図が得られる。この系は2次遅れ系であり伝達関数 $G(s)$ は、

$$G(s) = \frac{K}{1 + 2\xi sT + s^2T^2}$$

の形で表わすことができる。

Fig. 6 のブロック図の中では B (鋼板断面積) のみを変数であり、 B の増大に伴って系のゲイン $|G(j\omega)|$ は増加する。対象となる周波数範囲におけるゲインの最大値を K 、6倍の高調波のリップル含有率を β 、振動系の振幅比を A とすれば、張力変動率は βAK となる。 A および K は機械定数によって定まるものであり設備の稼動後に変更することは難しいので、計画時に十分な検討を行わない必要ならば機械定数を変更して張力変動率が実操業に影響のない程度であることを確認しなければならない。

3-3 VVVF 制御の利点

VVVF制御システムは、従来の直流電動機制御システムと比較した場合制御性は実用上ほぼ同等であり、かつ保全性や価格の面では優るものと考えられる。その他にもVVVF制御固有の利点として次のようなものを挙げることができる。

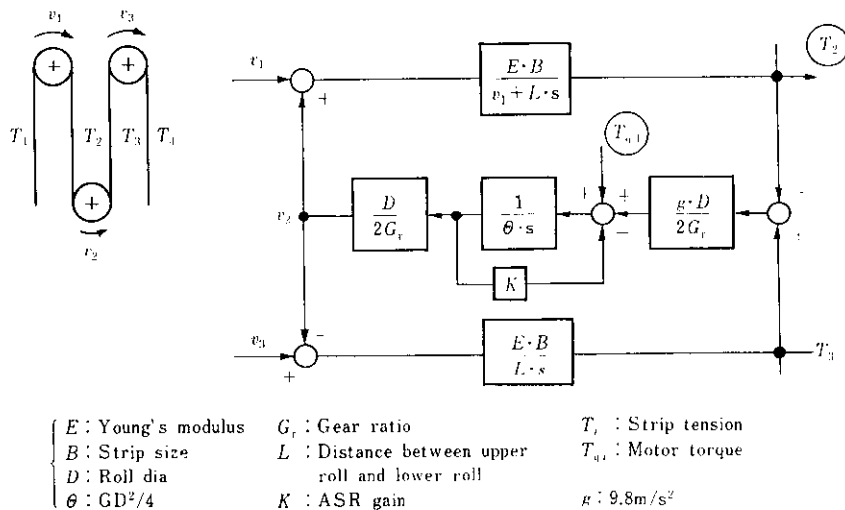


Fig. 5 Simulation model for strip tension analysis and its block diagram

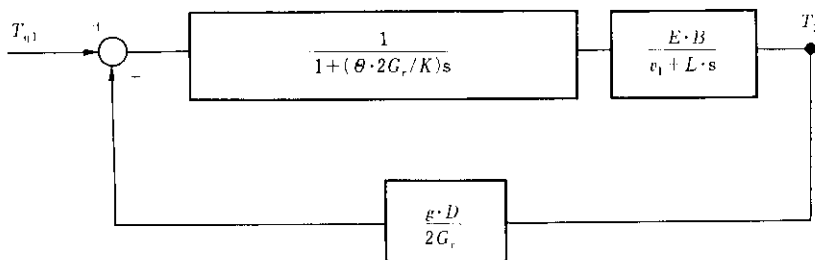


Fig. 6 Relation between motor torque and strip tension

3-3-1 相対的な drooping 特性

Fig. 4 に示すように drooping(垂下特性)のための電流検出は DC 側から取る。モータ出力と発生トルクの関係は、

$$P = V_{DC} \cdot I_{DC} \propto T_q \cdot N$$

で与えられる。VVVF 制御の場合には $V_{DC} = \text{const.}$ であるため、

$I_{DC} \propto T_q \cdot N$ となり、DC 側電流による drooping は速度に対して相対的に効くことになる。

3-3-2 トルク制御の直線性

従来の直流電動機制御システムは、通常 Fig. 1 に示すような構成となっており、界磁電流を調整してモータの発生トルクを調整している。トルク T_q 、電機子電流 I_a 、モータ回転数 N の間には、

$$T_q = \zeta \phi I_a$$

$$I_a = \frac{V - \zeta \phi N}{R_a}$$

- $\zeta \phi$: トルク定数
- V : モータ端子電圧
- N : モータ回転数
- R_a : 電機子抵抗

のような関係があるが、この 2 式よりトルク T_q と界磁 $\zeta \phi$ の関係を求めると次のようになる。

$$T_q = \zeta \phi (V - \zeta \phi N) / R_a \dots\dots\dots (1)$$

鋼板とロールの摩擦力によりモータ回転数が拘束されている場合には (1) 式中の N は定数となり、(1) 式の関係を図示すると Fig. 7 のようになる。

界磁電流とモータの発生するトルクの関係が図に示すように直線的でなく最大値を有する 2 次曲線で表わされるため、界磁電流を調整することによりモータの発生トルクを制御することは難しい。

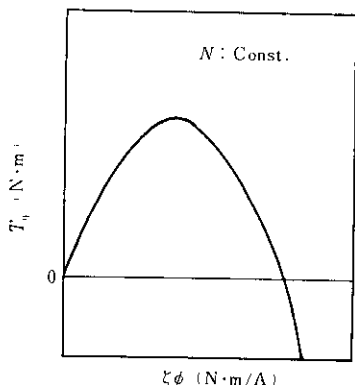


Fig. 7 Relation between flux ϕ and motor torque T_q

一方、VVVF 制御の場合には主回路の電源周波数を制御するため、モータの発生トルクをほぼ直線的に制御することができ直流電動機のような不具合は解消される。

4. 張力制御システム

2章に述べたように CAL では炉内の鋼板張力が製品の品質に大きく影響を及ぼすにもかかわらず、従来の設備では張力を積極的に制御することはせず炉内ハースロールの制御は AVR 方式としている。張力制御を難しくしている原因としては、

(1) 炉内では板温が常温から約 900℃ まで変化し、それに伴って Young 率やロールと鋼板の摩擦係数が大きく変化する

(2) 1 箇所での張力変動は短時間のうちにその前後に伝播する

などが考えられる。

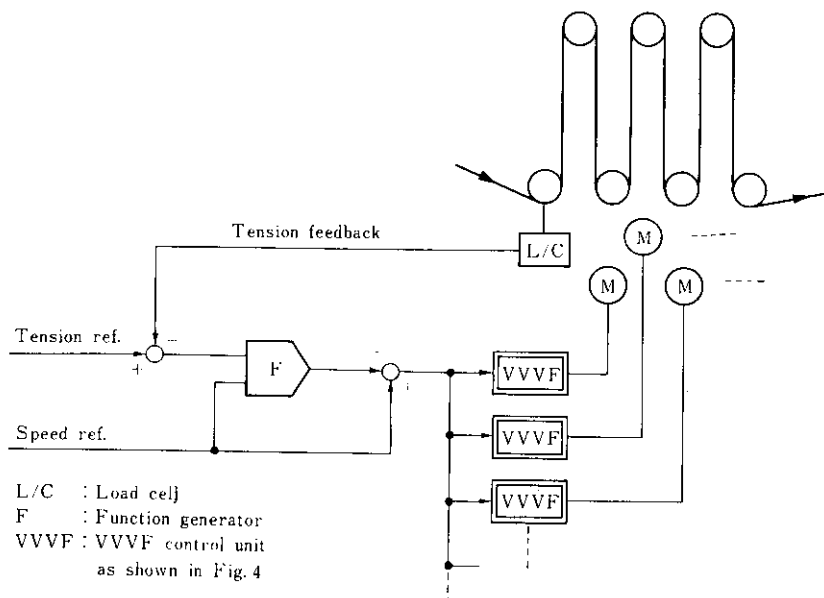
しかし、KM-CAL は全ラインタイトの高速ラインであり、また、処理材の寸法や材質も広範囲にわたるため高精度の張力制御が必要とされる。

これを実現するための手段として、炉内に設置された張力計の検出信号をフィードバックする実張力制御方式について検討を行なった。

4.1 張力制御系の構成

KM-CAL 各セクションの張力制御ブロック図を Fig. 8 に示す。各セクションには鋼板の実張力を検出するための張力計が 1 台ずつ設置され、その検出値をフィードバックする制御系を構成している。

Fig. 8 に示すように、張力偏差（設定張力－実張力）に基づく速度補正信号が速度設定に重畳され各電動機速度指令となり、3章に述べた VVV F 制御によりインバータの出力周波数が制御される。したがって電動機の発生するトルクを調整する



L/C : Load cell
 F : Function generator
 VVVF : VVVF control unit
 as shown in Fig. 4

Fig. 8 Block diagram of tension controller

ことができ、鋼板張力を任意に制御することが可能となる。

また、KM-CAL では第1冷却帯の入口部と出口部に炉内ブライドル装置を設け、他帯と独立した低い鋼板張力に制御できるようにするとともに、前者をライン速度の基準となるマスターロールとした。この方式によれば、鋼板が加熱されて膨張するセクションと冷却されて収縮するセクションがマスターロールを境にして分離されるため、鋼板張力を高精度かつ適切に制御できる。

さらに張力制御系の安定化をはかるため、上記マスターロールを中心にした張力サクセシブ制御を

行なう。Fig. 9 は系全体の構成を示すが、図中に示すように張力偏差信号（張力制御装置の出力）はマスターロールを境にしてその前後に分配される。

以上のような制御系について事前に計算機シミュレーションを行ない、炉内の張力変動幅が10%以下であり実操業上問題がないことを確認した上で実機に適用した。

4.2 実機における張力変動

Fig. 10 に実機における張力変動のデータを示す。加熱帯またはテンションデバイスの張力を10%変更した場合でもその影響はほとんど他セクション

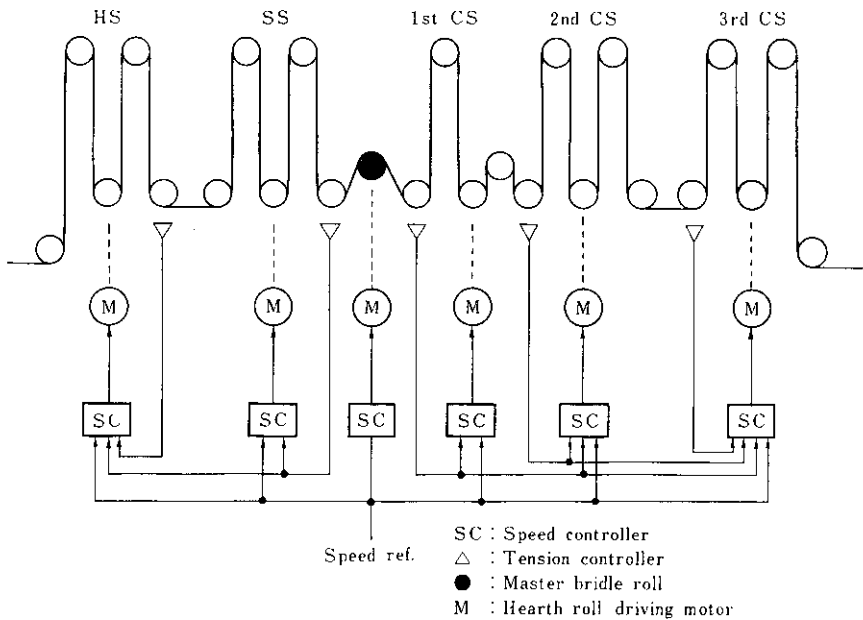


Fig. 9 Schematic diagram of KM-CAL driving system

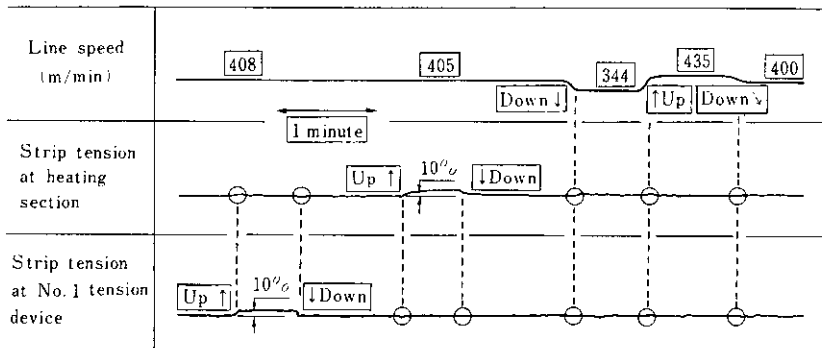


Fig. 10 Fluctuation of strip tension when strip tension or line speed is changed

に伝播せず最大5%程度であることがわかる。

また、ライン速度を変更した場合の張力変動も同様に5%程度である(実操業においてはFig. 10に示すような急激なライン速度の変更は行なわないので、実用上ライン速度の変更に伴う張力変動はないものと考えてよい)。

各帯の張力を任意に設定できること、およびいかなる場合にも張力変動は10%以下であること、の2点が当初の目標であったが、以上述べたようにKM-CALの実張力制御系は有効に機能しており十分満足のいく結果を得ることができた。

5. まとめ

KM-CALではVVVF制御と炉内ブライドルロールの併用により高精度で安定した炉内張力制御が可能となった。これにより600m/minの世界最

高速の操業が可能となったばかりでなく、ヒートバックルやすり疵の防止などにも大きな効果を発揮している。

また、ハースロール駆動電動機を交流化したことにより、従来の直流電動機のような整流子回りの保守や界磁調整などが不要となり、著しく保全性が向上した。

高速のプロセスラインにおけるVVVF制御の適用はKM-CALが世界で初めての試みであったが、計算機シミュレーションやモデル機での実験など事前に十分検討を加えた上で採用に踏み切った。

VVVF制は以上に述べたように、制御性、保全性に優れているため、その適用範囲はますます拡大されていくものと思われる。近い将来に実現されるであろう全交流化ラインの前段階として、KM-CALにおけるハースロールのVVVF制御技術の確立は大きな意義を持つものである。

参考文献

- 1) 柳島ほか：多目的連続焼鈍炉の建設と操業，川崎製鉄技報，13(1981)2、1
- 2) 山本ほか：プロセスラインにおける可変速交流モータの適用上の問題点について，鉄鋼協会第10回電気設備分科会資料，(1981)電設(分)10-4-3