鉄鋼圧延ラインにおける複数電動機群を駆動する 速度センサレスベクトル制御の開発

正員 川上 和人 (東芝)

正員 原川 哲美 (新日本製鐵)

Development of Speed Sensorless Control System for Multimotor Drive in Steel Plant

Kazuto Kawakami, Member
(Toshiba Corporation)

Tetsumi Harakawa, Member
(Nippon Steel Corporation)

In industrial plants such as those for iron and steel process, paper machine process and others, multimotor drive system are very popular. Speed sensorless vector control is most suitable for those system with high performance, high reliability, low cost and less maintenance. Very few papers about multimotor drive system, however, have been reported. This paper describes such a drive system.

In case of unbalanced load among the motors, the phase differences between their vectors cause insufficient performance, especially during regenerating at low speed. In this paper, we propose an advanced sensorless control for multimotor drives. The proposed control system estimates the axis of the motors with heavy load and follows it.

The proposed drive system are now operating with good performance in steel and other plants.

キーワード：センサレス, 誘導電動機, 群制御, 不平衡負荷, 産業プラント

1. まえがき

鉄鋼プロセスの代表である製鐵所では、各工場間で半製品の圧延材などを搬送するテーブルのロール駆動電動機の台数がもっとも多く、このための群制御が広く使用されている。

この群制御として二つの方式が主流となっている。一つはラインシャフトで機械的に連結して一群のロールを駆動するものである。もう一つは個別駆動の電動機によって電氣的に揃速性をもたせながら回す方法である。機械式では厳しい応答に追従できないことなどから、最近では性能向上の要求とともに電気式が採用されつつある。

さらに、この電気方式は速度センサの有無によって分類できる。もっとも標準的なのは、1台の電動機ごとにインバータを設置して、同一速度指令を与えることで揃速性を実現するものである(個別電動機駆動)。これは確実な方式ではあるが、コスト的には高価となる。次によく知られている方法は、複数台の電動機を1台のインバータに接続し、簡単な構成で揃速性を実現するものである。この方式を使って厳密な速度パターンへ追従するには、複数台の中の代表的な電動機に速度センサを取付けて、その信号を基に速度制御することになる(代表速度制御)。この場合には、速度センサを取付けた電動機に負荷が加わったとき、インバータに接続された電動機全てが大きく変動を生じることになる。この方式は簡単かつ安価であり、負荷変動が問題とならないラインで使用されている。

これらの問題は、近年実用化が進んでいるセンサレスベ

図1 電動機群制御の分類

Fig. 1 Classification of Multimotor Drive

クトル制御によって解決されようとしている。すなわち、前述のようにセンサ付電動機の負荷変動が全体に影響を及ぼすことはなくなり、速度センサがなくなることによって信頼性が大幅に向上することが期待できる。

1台のセンサレス制御インバータで1台の電動機を駆動する単一電動機駆動システムは既に実用領域に達しているが、センサレスベクトル制御を本格的な群制御に適用したという報告例は少ない。

ここでは、速度センサレスベクトル制御による複数台電動機駆動システムを、代表的アプリケーションの一つである鉄鋼圧延ラインに適用したときの問題点とその一解決策について述べる。

2. 鉄鋼圧延ラインへの適用

鉄鋼熱延工場ホットランテーブル(以下、HRT)では急加減速の必要性から直流電動機の群制御が採用されてきた。この場合、群(セクション)の代表となる電動機に速度センサを設置して代表速度制御していた。しかし、HRTでは

表 1 HRT ロール駆動装置の必要性能例

Table 1 Example of Requirement for HRT Roll Drive

項目	必要性能
加速率	1.33 m/s ² 以下
減速率	2.50 m/s ² 以下
過負荷率	400% 以下
速度制御応答	5 rad/s 以上

圧延材冷却用に多量の水が使用されるために電動機、速度センサの腐食が進みやすく、300 台以上の電動機で構成されていることから、安価かつ高信頼の誘導電動機速度センサレス群制御の適用を考える必要がある。

この適用での重要な課題は、主に以下の 3 点である。

1. 無負荷時に 2% 以内の揃速性があること。
2. 急加減速においても揃速性があること。
3. 負荷によって特性に変化がないこと。

一般的に製鐵所の中で熱延工場は最も生産量が多く、ここで生産性上のポイントとなる工程の一つが HRT である。熱延工場仕上圧延機での圧延材の初期速度は約 10 m/s であり、その先端が HRT の下流側にあるコイルで巻取りを開始してから通常の圧延速度である約 25 m/s まで加速される。そして、圧延材の尾端が仕上圧延機を離れる直前に、コイルで安定して巻取るために、先端通板速度よりもはるかに低い尾端通板速度まで減速する。この HRT 速度パターンで考えると、いかに短時間で尾端通板速度から先端通板速度まで復帰するかが生産性上の課題となる。これが所定の時間内に完了しないと、圧延材の速度差によるインパクトが HRT ロールに加わってさらに速度復帰が困難となり、最終的には圧延材の表面傷が発生する場合もある。

表 1 に操作パターンに基づく HRT の速度応答必要性能の例を示す。

3. 複数台駆動の問題点

〈3・1〉 システム構成

図 2 に制御システムを示す。基本構成としては、電圧指令 V_d^* 、 V_q^* を基にして速度 ω_r を推定演算している以外はセンサ付ベクトル制御と同様である。ただし、複数台電動機駆動として 2 次電圧 E_2 を制御するループを追加している。これは運転中に過負荷などで保護回路(図示省略)によって電動機の一部が切離された場合、あるいはこれらが復帰して再投入されたとき、電動機 1 台当りの励磁電流を一定にして過励磁または不足励磁を防止するためである。また、電流は電動機電流の合計 (= インバータ出力電流) だけを検出し、個々の電動機電流は一切取込んでいない。

なお、影付の制御ブロックは 4 章で後述する不平衡負荷のための改善部である。

〈3・2〉 問題点

単一インバータによって複数台の電動機を駆動する場合、以下の要因による問題が想定される。

1. 電動機の特長差
2. 揃速性
3. 各電動機負荷の不均一
4. 負荷慣性モーメントの不均一
5. 加減速時の挙動
6. 運転中の電動機台数増減
7. 上記の複合

この中で、同一形式であれば電動機の個体特性差は無視でき、揃速性も各電動機のケーブル長、負荷などの条件が同等であれば問題にならない。また、複数台駆動のほとんどの応用では、電動機の負荷装置もほぼ条件が等しいので、慣性モーメントの差も問題になることは少ない。したがって、負荷の不均一(不平衡負荷)とそれに関連した項目が複数台駆動での問題として残る。特に誘導電動機の場合、従

図 2 システム構成

Fig. 2 System Configuration

Fig. 3 Examples of Unbalanced Load

図4 負荷不平衡実測例
Fig. 4 Example of Actual Waveforms on Unbalanced Load

来から低速トルクの問題があり、この領域での不平衡負荷を検討する必要がある。

ここで実際のプラントでの適用を考える。不平衡負荷が発生するのは、例えば図3(a)に示すように圧延材が複数のセクションに渡って停止している状態から起動する場合、あるいは図3(b)のようにテーブルロールに高低差(またはロール径差)があり圧延材が一部のロールにしか接触していない場合などである。ただし、複数台電動機駆動システムでは、特に不平衡負荷で厳しい速度精度が要求されることは少ない。これは、単一電源で駆動する場合、誘導電動機のすべり分は速度差が発生することを前提にシステムが構築されているからである。例えば、図3では圧延材を搬送しているロールの速度が重要であって、圧延材に接触していない無負荷のロールは搬送に寄与せず、その速度差はあまり大きな問題にはならない。

一方、厚い圧延材は大きな搬送トルクが必要となる上、たわみにくいのでロールの高低になじみにくく、不平衡負荷が発生しやすい。これに加えて、一般に圧延材が厚いほど搬送速度が低いので、不平衡負荷による影響がさらに大きくなる。

圧延材搬送中のHRTにおいて同一セクション内から抽出した7台の電動機1次電流(スカラー量)の実測例を図4に示す。この例では、ロールの高低差によって大きな不平衡負荷が生じ、ほぼ無負荷の電動機と200%以上の負荷がかかっている電動機が存在している。

HRT以外でも、速度指令が+数%~数%の間で圧延材を往復させるオシレーションモード、圧延材を数十mm移動させる寸動運転、あるいは圧延材の停止位置精度(±数十mm以内)が必要な用途もある。これらは全て低速での特性が重要となる。

一方、連続的な不平衡負荷あるいはロール側の機械的異常などによって過熱保護が動作し、一部の電動機が切離されることがある。この場合、復旧すれば再度投入することになる。このとき、突入電流を抑えるために比較的低速で再投入することになり、停止している電動機と回転している電動機が過渡的に存在する。これが不平衡負荷と等価な状態になる。

〈3・3〉 不平衡負荷

全電動機にほぼ均等な負荷がかかっているとき(平衡負荷)、各電動機の内部状態も等しくなるので、制御系としては1台の電動機を駆動していると等価になる。したがって、この場合は単一電動機駆動と同様の特性が得られる。

次に不平衡負荷のときを考える。不平衡負荷の場合の等価回路を図5(a)に示す。ここでは簡単のため、電動機 N 台中の n 台にだけ等しい負荷がかかり、残りの $N-n$ 台は無負荷とし、機械損とインバータから電動機までの配線インピーダンスは無視する。

本システムでは個々の電動機電流を検出していないので、複数台電動機駆動であっても制御系としては電動機の不平衡情報を直接取込むことができない。したがって、この場合も単一電動機駆動あるいは平衡負荷状態と同一の

図 5 制御対象回路
Fig. 5 Controlled System

制御対象回路である図 5(b)になる。

この制御対象回路からインバータ周波数 ω_0 を一定として、 n 台の電動機の負荷トルク T_m とその速度 ω_H 、制御系によって演算した推定速度 ω_r との関係について、図 6 の手順でシミュレーションした結果を図 7 に示す。計算条件は、電動機定格 10kW-330V-53Hz-4P-1550min⁻¹、全電動機 $N=20$ 台、重負荷電動機 $n=2$ 台、インバータ周波数 $\omega_0=5\%$ とした。各電動機定数は、 $L_1=2.2\text{mH}$ 、 $L_m=56\text{mH}$ 、 $R_1=159\text{m}\Omega$ 、 $R_2=99\text{m}\Omega$ である。実際の制御は多重フィードバック系なので動作は複雑であるが、問題の挙動を明確にするために図 6 の手順とした。すなわち、一般に系の応答速度は電流制御>電圧制御なので、負荷が変化すると、まず応答の速い電流制御系によって界磁電流 I_d が一定に制御される。この後に、外側のループである電圧制御系によって E_2 が制御されるようにモードが移行する。

図 6 計算手順
Fig. 6 Calculation Flow

したがって、過渡状態である前者の電流制御モードと定常状態である後者の電圧制御モードに分けて計算する。

図 7 で注目するのは、電流制御モードにおいて負荷トルク T_m が再生側に増加すると、重負荷電動機は速度 ω_H が上昇するにもかかわらず、推定速度 ω_r が低下することである。このとき、インバータ周波数 ω_0 を一定と仮定しているので他の無負荷電動機は同期速度で回転している。

これは以下のような問題を意味している。すなわち、低速において一部の電動機に大きな再生負荷が急激に加わると、電流制御系によって推定速度 ω_r が低下し、これによってインバータ 1 次周波数 ω_0 が下るので、さらに負荷が重くなる。そして、また推定速度 ω_r が低下するので結果的に正帰還動作になって、実際の電動機は回転しているのにインバータ 1 次周波数 ω_0 、推定速度 ω_r だけが零まで低下してしまう。この現象は、特定の条件下ではあるが、

図 7 低速での不平衡負荷特性(電動機 10kW, $N=20$ 台, $n=2$ 台, $\omega_0=5\%$)

Fig. 7 Characteristics on Unbalanced Load at 5% Speed

図8 正帰還波形例

Fig. 8 Example of Abnormal Waveforms

制御系の中でもっとも応答の速い電流制御系によって生じるので、表面に出てくる現象はゆっくりでも、現象自体は堅固である。回生負荷が小さいか、またはその変化が電圧制御系の応答に対して十分遅ければ、図7(b)の電圧制御モードで追従しながら動作するので、推定速度が低下することはない。不平衡負荷の場合でも、力行側では図7からわかるように、この傾向(力行側の場合は負荷が大きくなると推定速度が上昇する正帰還現象)はなく、また、平衡負荷では単一電動機と全く等価なので本現象はない。したがって、これは不平衡回生負荷に固有の現象で、表面的には過渡回生トルク低下という形で表れてくる。なお、定常的には電圧制御によってトルクは確保される。

この回生負荷での正帰還現象は、 n 台の重負荷電動機の座標と $N-n$ 台の無負荷電動機の座標に位相差が発生し、インバータ制御系はこれらの加重平均の位相に追従するので、重負荷電動機のトルク電流成分 I_{qH} が総合励磁電流成分 I_d に射影されることに起因している。つまり、この位相差によって I_{qH} が d 軸に射影された成分だけ I_d の検出値が大きくなり、見かけ上の励磁電流増加分を電流制御系によって減少させるよう動作する。そして、結果的に $E2q$ ($=\omega\theta \cdot L_m \cdot I_d$) が減少し、これと連動する推定速度 ω_r ($=\omega\theta - \omega_s$) が低下する。なお、本現象は電動機数にほとんど依存しないことを確認している。

この現象は HRT 模擬試験装置でも図8のように観測できる。ロール高低差とコイラ動作を模擬した不平衡負荷により推定速度が急激に低下しているのがわかる。

4. 改善対策

上記問題を解決するために図2の影付ブロック部を追加変更した。以下にその動作を説明する。

〈4・1〉座標軸補償

不平衡負荷での問題点は、各電動機の電流ベクトル座標の位相が負荷によって異なることである。すなわち、イン

バータ制御系の座標軸は全電動機の平均ベクトル座標に追従し、特に負荷のかかっている電動機の数が少ない場合、無負荷の電動機の座標軸とほぼ一致していることである。このとき、本来制御すべき重負荷電動機に対してはオープン制御に近い状態になってしまう。

この場合、不平衡負荷によってベクトル座標が異なる全電動機に、制御系の座標軸を一致させることは不可能である。したがって、解決策としては制御系の座標軸をいかに重負荷電動機に合わせるよう制御し、正帰還動作を防止するかということになる。しかし、このために全電動機の個々の電流を検出して制御系に取込んだのでは“センサレス”の意義が半減し、信頼性およびコスト面でも大きなデメリットとなる。そこで、低速で回生負荷になったとき、これが不平衡負荷であることを前提にして、制御系の座標軸を重負荷電動機に合わせるように補償すれば検出器を追加することなく改善できる。具体的には、図2のように低速領域で I_q に応じて制御系の座標軸を回転させた。今回の現象は低速領域で発生するので、所定速度以下でだけ動作するような速度関数付補償ゲイン特性としている。

この補償を追加したときの図7(a)に相当する特性が図9である。この補償により低速回生負荷における推定速度 ω_r の低下はなくなる。

なお、この補償は等価的に重負荷電動機を推定制御するようになるので、力行側の低速トルク改善にも有効である。この場合、平均電動機電流に対する重負荷電動機電流の位相進み遅れの極性は I_q の極性に依拠して一意的に決るので、補償極性切換などは不要である。

〈4・2〉推定速度変化率制限

一方、物理的にみれば、電動機最大発生トルクと負荷慣性モーメントで決る加速度以上で実際の電動機速度が変化することはない。しかし、推定速度 ω_r の演算ではこの制約がなく、計算上は任意の変化ができることになる。

したがって、速度推定演算において、この変化率でのリミット(推定速度変化率制限)を導入することにより、正帰還ループのゲインを下げて推定速度 ω_r の急変を抑制防止することができる。

図9 改善後の電流制御モード不平衡負荷特性

Fig. 9 Improved Characteristics in Current Control Mode

5. 検証試験

〈5・1〉 模擬負荷検証

上記対策の効果を図 10 に示す供試装置で確認した。6 台の電動機に、それぞれローンを模擬した電動機を接続し、この模擬負荷電動機の 1 台だけを別のセンサ付ベクトル制御インバータによって駆動することで不平衡負荷状態にする。試験手順は、センサレス制御側の速度基準を 15%→5%に急変させるのと同時に、1 台の電動機の回生負荷をステップ的に上昇させる。これは HRT とコイラとの関係によって起こり得るパターンである。問題の現象が表面上はトルク不足という形で表れてくることから、評価指標は負荷トルクの脱調限界とした。電動機の定格は 2.2kW-200V-60Hz-4P-1710min⁻¹、最大トルク 296%である。

図 11 に測定結果を示す。これは 100%速度での力行最大トルク(停動トルク)を 1.0 として、各補償を活かしたときの最大回生トルクを相対値で示したものである。座標軸補償を追加することにより補償前の約 2.3 倍のトルクが得られるようになり、これに推定速度変化率制限を設けること

図 10 模擬試験回路

Fig. 10 Experimental System

図 11 過渡回生トルク特性

Fig. 11 Experimental Results of Dynamic Torque Output

によって補償前の 3 倍以上のトルクが得られるようになった。なお、試験装置の制約で負荷トルクは上記程度までしか印加できないため限界は確認できなかったが、力行停動トルクの 2 倍以上の実用上十分なトルクが得られている。

〈5・2〉 実機検証

HRT において、厚い圧延材を搬送したときの波形を図 12 に示す。本補償を追加することにより、低速での厚板搬送においても良好な特性が得られている。

また、18 台システムにおいて、電動機 9 台を 5%速度で運転中に、残りの停止している 9 台を追加投入したときの応答を図 13 に示す。補償前は再投入により推定速度が急激に低下し、図 8 と同様の現象が発生している。この場合でも、本補償によって応答が大幅に改善し、スムーズに再投入できているのがわかる。

なお、本補償は平衡負荷に対して不要補償になるが、この場合は有意差のある現象はない。これは、計測用レゾルバを設置して実速度を測定し、推定速度と比較することで、平衡負荷状態が多い通常操業運転パターンでも問題ないことを確認している。

図 12 実機運転波形

Fig. 12 Waveforms of Actual HRT

(a) 補償なし (b) 補償あり

図 13 電動機再投入波形

Fig. 13 Waveforms at Connecting Motors

6. あとがき

センサ付ベクトル制御と同等の性能が要求される鉄鋼圧延ラインにおいて、初めて速度センサレスベクトル制御による複数台駆動システムを適用し実用化した。これにより、速度センサの設置が適していないような環境でも、ベクトル制御による高性能と速度センサレスによる高信頼を実現した。

鉄鋼あるいは紙パルプなどの産業プラントの中で、複数台電動機駆動システムは大きなニーズがあり、重要な位置にありながら、従来は論文などで議論されることがほとんどなかった。今回の開発で、その課題を改めて明らかにし、センサレス制御の特長を活かしながら、検出器を追加することなく簡単な構成で解決した。

提案したシステムは圧延ラインの本操業においても順調に運転しており、良好な結果が得られている。

(平成8年6月3日受付, 平成8年12月2日再受付)

参考文献

- [1] 小玉 他:「鉄, 非鉄プラントへのACドライブの適用」, 東芝レビュー1992, Vol.47, No.8.
- [2] 金:「誘導機のセンサレスベクトル制御」, 電気学会誌, Vol.112, No.3, 平成4年.
- [3] 橋爪, 梓沢:「鉄鋼における最新技術」, 平成6年電気学会産業応用部門全国大会, S.9-2.
- [4] 田中, 高橋:「製紙における最新技術」, 平成6年電気学会産業応用部門全国大会, S.9-3.
- [5] 川上 他:「速度センサレスベクトル制御による多数台誘導電動機駆動」, 平成6年電気学会全国大会, No.658.
- [6] 森崎, 川上:「IGBT インバータの適用実績と技術動向」, 平成7年電気学会全国大会シンポジウム, S17-4.
- [7] 川上:「速度センサレスベクトル制御による瞬停再始動」, 平成7年電気学会全国大会, No.830.
- [8] 服部:「将来の産業分野におけるパワーエレクトロニクス」, 平成8年電気学会全国大会シンポジウム, S15-4.

川上 和人

(正員) 1983年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年東芝に入社。以来、主としてUPS, ACドライブなどのパワーエレクトロニクス装置の開発, 設計に従事。

原川 哲美

(正員) 1978年九州大学工学研究科情報工学修士課程修了。同年新日本製鐵に入社, 君津製鉄所にて圧延分野の設備建設, 制御システムの研究開発に従事。94年から技術開発本部設備技術センターにて現代制御理論の鉄鋼プロセスへの適用などの研究に従事。計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEEなどの会員。