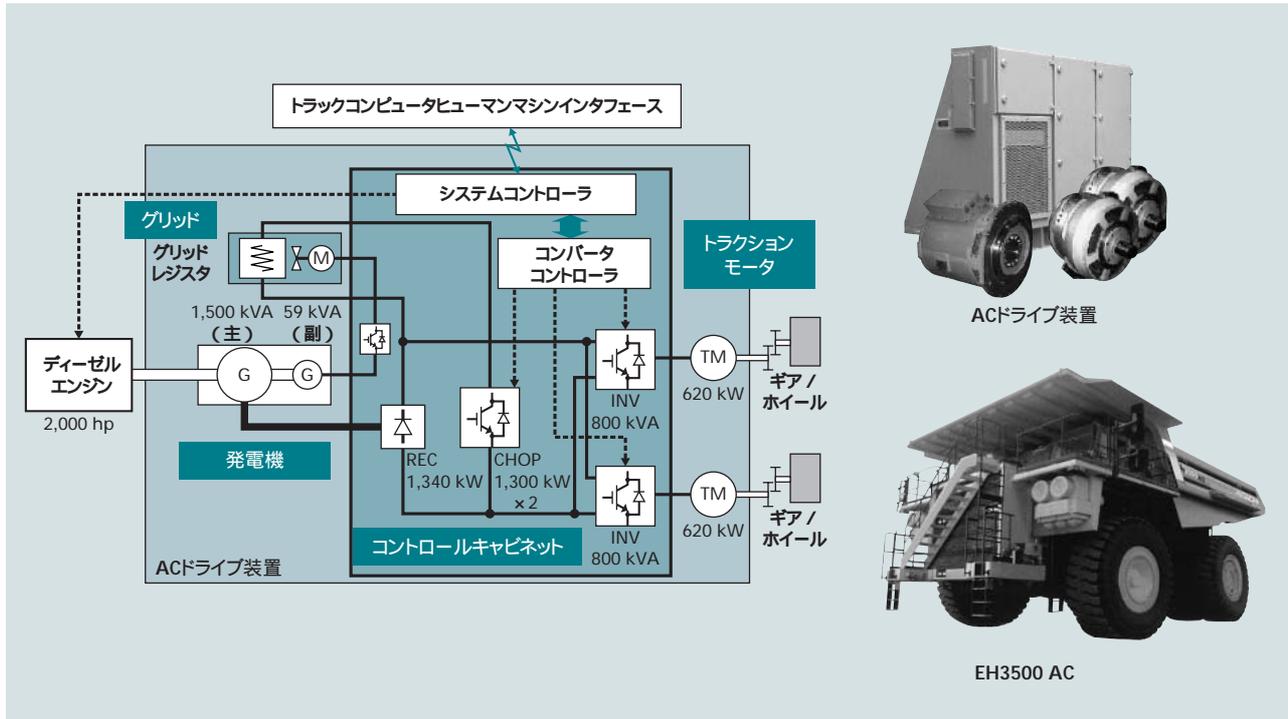


鉱山用ダンプトラック向けACドライブ装置の開発

Development of AC Drive Systems for Mining Dump Trucks

今家 和宏 Kazuhiro Imaie
 菊池 輝 Akira Kikuchi

菅原 直志 Naoshi Sugawara
 安田 知彦 Tomohiko Yasuda



注:略語説明 hp(英馬力, 1 hp 0.7457 kW), M(Motor), G(Generator), REC(Rectifier), CHOP(Chopper), INV(Inverter), TM(Traction Motor)

図1 鉱山用ダンプトラック向けACドライブ装置構成とシステム外観

ディーゼルエンジンの回転エネルギーを発電機によって電気エネルギーに変換する。その電気エネルギーをインバータによって任意の周波数、電圧に変換し、トラック後輪のモータに電力を供給することで、高効率の動力システムを構成する。

マイニングビジネスでは、生産効率の向上を図るために、機械の大型化、大容量化が進められている。従来のディーゼルエンジンとトランスミッションによる機械システムの高効率化技術は成熟しており、さらなる効率を追求するには、発電機、インバータ、モータによって構成される電気システムの適用が不可欠となっている。

日立製作所は、マイニングビジネス分野で日立製4.5 kV IGBTを世界で初めて適用し、小型・軽量のACドライブシステムを構成することによって、鉱山用のダンプトラックにも搭載可能なシステムを構築した。これにより、従来、機械式ドライブでは不可能だった高効率化が達成できることに加え、大容量電気ブレーキの搭載によって、高速走行が可能になり、運搬量の増大も実現している。

1.はじめに

日立製作所は、グループ内の優位技術を生かし、日立建機株式会社とともに鉱山用ダンプトラックシステムのトータルシステム効率の向上、トータルライフコストの低減、生産量の拡大を推進している。

従来用いられているディーゼルエンジンとトランスミッションによる機械式ドライブで構成されるシステムでは、大型化する機器の製造上の問題、メンテナンス性、パワーの伝達効率などの課題があり、その機器効率・運用効率に限界があった。しかし、パワーエレクトロニクスに用いられるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)などのキーコンポーネントの大容量化・高圧化によって、鉱山用機器に適用可能な大型システムが構築できるようになった。ドライブシステムを発電機、インバータ、モータを用いて電気化することによって、パワー伝達系の大幅な高効率化、メンテナンス性の向上などを実現することが

可能である。

ここでは、鉱山用ダンプトラックに必要な制御方法について述べる。

2. 鉱山用ダンプトラックのニーズとシステム構成

鉱山用ダンプトラックのドライブシステムには、ディーゼル機関車のドライブシステムの変遷と同様に、機械式ドライブ、電気式DC (Direct Current) ドライブ、電気式AC (Alternating Current) ドライブが投入され、特に積載量150 tを超えるシステムでは、早くから電気ドライブが導入されてきた。市場では、製品の信頼性・実績を重視するため、各システムは現在も稼働しているが、近年の材料高騰、燃料高騰の影響を受け、鉱山の運用コストを低減するために、(1) 高速化・大型化による産出量増大、(2) AC化によるメンテナンス性の向上、(3) 高圧化による機器効率の向上・小型化などが求められている。電気ドライブによる鉱山用ダンプトラックには、積載量190 t級、220 t級、260 t級のカテゴリーがあり、それぞれ2,000 hp (1 hp = 0.7457 kW)、2,500 hp、2,700 hpのディーゼルエンジンが用いられているが、上述の目的のため、市場にはさらなる大型化の要求がある。

一方、パワーエレクトロニクスの分野では、1990年後半にパワー半導体の大容量化・高圧化が進み、GTO (Gate Turn-off Thyristor)、高圧IGBTなどの大容量パワーエレクトロニクス機器の構築が可能となった。2000年初期になると、4.5 kV級IGBTが使用できるようになり、マイニングに適したインバータ開発が可能となった。そこで、日立製作所は4.5 kV-900 A IGBT (日立製) を採用し、鉱山用ダンプトラック向けのACドライブ装置を構築した。また、信頼性確保のため、制御装置を含むインバータシステムには、IGBTの冷却に水冷式冷却シ

テムを採用することによって、密閉型キュービクルに構成し、鉱山での温度、湿度、粉塵 (じん) などの悪環境にも耐える構造を実現した。

今回開発した鉱山用ダンプトラック向けのACドライブ装置の構成と外観を図1に示す。エンジンと直結する発電機には、主発電機と副発電機を搭載し、独立して利用可能な補機システムを構築した。これにより、ブレーキ抵抗、モータ、発電機の冷却を、独立したAC機器によって構築し、メンテナンス性をそれぞれ向上させている。ブレーキ抵抗は、4分割することによって、冷却性能の向上を図った。また、車体のパフォーマンスを決定する制御性については、電気システムを導入することによって、従来の機械式ドライブシステムでは構築できなかった制御性を実現することが可能となった (図2参照)。

鉱山では、機器のトラブルが人命にかかわるトラブルに発展する可能性があり、坂道発進性能はトラックが渋滞する場合など重要な機能の一つとなっている。鉱山用ダンプトラックのパフォーマンスを向上させ、安全性を確保する手段である、坂道発進性能について次に述べる。

3. 鉱山用ダンプトラック向けドライブ制御

3.1 システム動作

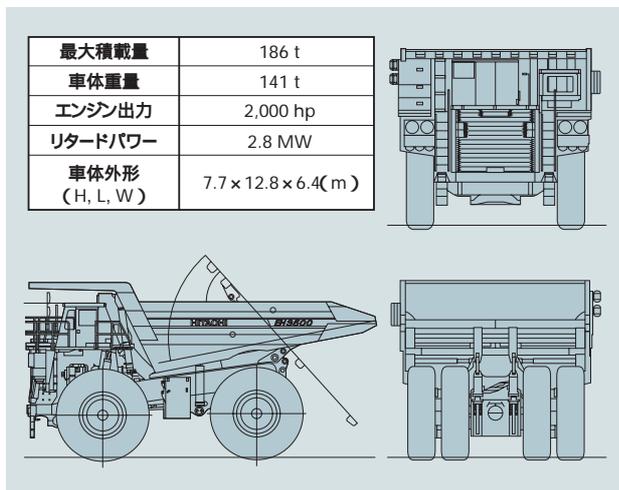
このシステムはディーゼルエンジンで発電機を駆動し、発電した電力によってインバータで誘導モータを駆動する方式である。

加速時はディーゼルエンジンで発電機を駆動することで三相交流電力を発生させ、その交流電力を整流器によって直流電力に変換し、直流回路に並列に2台接続されたインバータにその直流電力を供給する。それぞれのインバータは誘導モータに接続し、誘導モータはギアを介して車輪に接続して、インバータで誘導モータを駆動することで左右後輪の車輪を回転させ、車体を前進あるいは後進させる。

一方、減速時は誘導モータを発電機として動作させることで、車体の運動エネルギーを電気エネルギーに変換する。直流回路にはチョッパを介してグリッド抵抗器を接続し、直流電圧が規定値を超えた場合にはチョッパを動作させることによって、グリッド抵抗器でこの電気エネルギーを熱として消費し、減速する。

3.2 エンジン - インバータ出力協調制御方式

このシステムはエンジン低燃費化のためにアクセルペダル開度に応じてエンジン回転数の可変制御を行っている。すなわち、運転者がアクセルペダルを踏んでいないときはエンジンが低回転になるように、アクセルペダルを踏んでいるときは高回転になるように制御している。したがって、運転者がアクセルペダルを踏み込むような発進時には車体速度が上昇すると



注:略語説明ほか リタードパワー(電気ブレーキ制動力), H (Height), L (Length), W (Width)

図2 鉱山用ダンプトラックプロフィール

ACドライブを搭載した日立建機株式会社の鉱山用ダンプトラック「EH3500AC II」の仕様概要を示す。

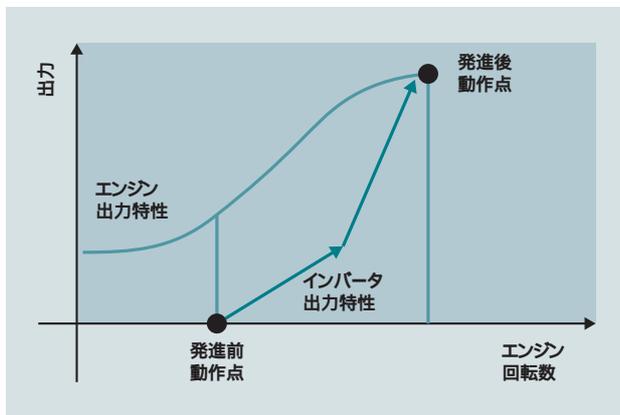


図3 エンジンとインバータの出力特性
エンジン加速中はエンジン出力に対してインバータ出力を抑制することでエンジン回転数の上昇を促す。

もにエンジン回転数も上昇する。

しかし、エンジンの能力以上の出力をインバータが要求すると、エンジン回転数が上昇しなかったり、場合によってはエンジンがストールしたりするので、エンジン回転数が上昇するまでは、エンジン出力に対してインバータ出力を抑制することでエンジン回転数の上昇を促し、エンジン回転数上昇後にインバータ出力を上昇させている。

エンジンとインバータそれぞれの出力特性を図3に示す。

3.3 誘導モータ制御方式

誘導モータのベクトル制御方式は、すべり周波数形であり、誘導モータに設置された速度エンコーダが出力する信号から演算した速度検出値にすべり周波数指令を加算した値をインバータの周波数指令としている。

一方、鉱山用ダンプトラックは悪環境を走行するため、信頼性の観点から速度エンコーダには無給電方式を採用している。低速域においては速度エンコーダが出力する信号の振幅が小さくなることから速度検出が困難となる。その結果、低速域においては速度検出値に誤差が含まれ、すべり周波数形のベクトル制御方式では低速域においてトルク制御の精度が低下し、目標トルクを出力することが困難となる。

このシステムでは高効率化のために定格すべりの小さい誘導モータを採用しており、特に速度検出誤差の影響を受けやすい。ダンプトラックは坂道発進時において高トルクを出力することが要求されるので、低速域でトルク制御の精度が低下すると発進が不可能になるなどの問題が発生する。そこで、誘導モータの速度検出ができない低速域ではインバータ周波数指令を外部から与えるオープンループの制御方式を適用し、誘導モータの速度検出が可能な速度領域においてベクトル制御方式へ切り替えている。このような制御方式を切り替えることで、誘導モータの速度検出ができない低速域でも高トルクの出力が可能となり、坂道発進をスムーズに行うことができる。

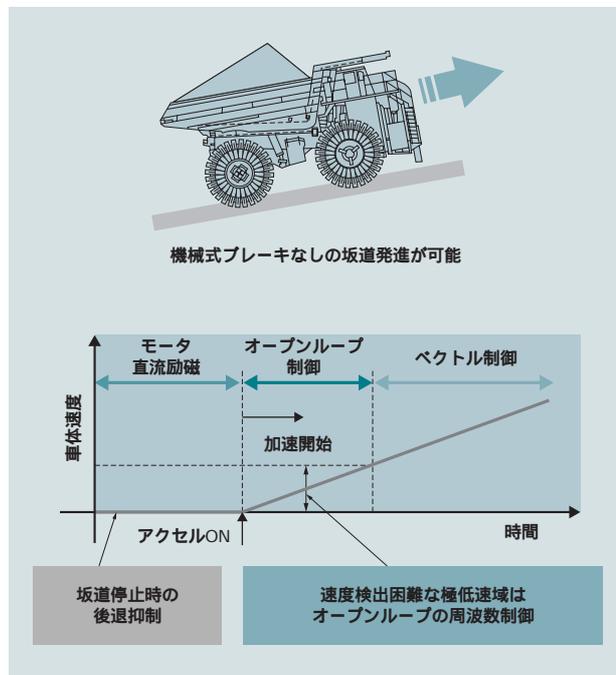


図4 誘導モータ制御方式
誘導モータ制御の切り替え方式を示す。直流励磁、オープンループの周波数制御、ベクトル制御の順に切り替えを行っている。

また、車体の停止中は誘導モータを直流励磁しており、坂道で車体が車重の影響によって後退することを防止している。これにより、機械式ブレーキを使用せずに、後退することのない坂道発進が可能である。このときの車体速度と制御方式の切り替えを図4に示す。

3.4 実車試験波形

上り10%の坂道で満積載の車体が坂道発進を行ったときの実車試験波形を図5に示す。

この方式を適用することで、エンジンはスムーズに加速し、また車体は後退することなく坂道発進を実現できることが同図の車体速度から確認できる。

3.5 実車効率

実車においては、効率向上は単に伝達系の効率向上だけでなく、運転方法にも影響される。伝達系の効率向上は、数パーセント程度だが、車体が十分速度を上昇させ一定速度に達したとき、滑走状態になる。電気式ドライブでは、機械式ドライブと異なり、滑走時にはエンジン回転を低下させ、最小限の燃料で運行できる。このような運用によって、実運転では10%程度の燃料消費を低減することができる。

4. 今後の展開

4.1 大容量化

この開発では、電気ドライブによる鉱山用ダンプトラックのカテゴリーとしては、最も小さい190 t級システムのACドライブシ

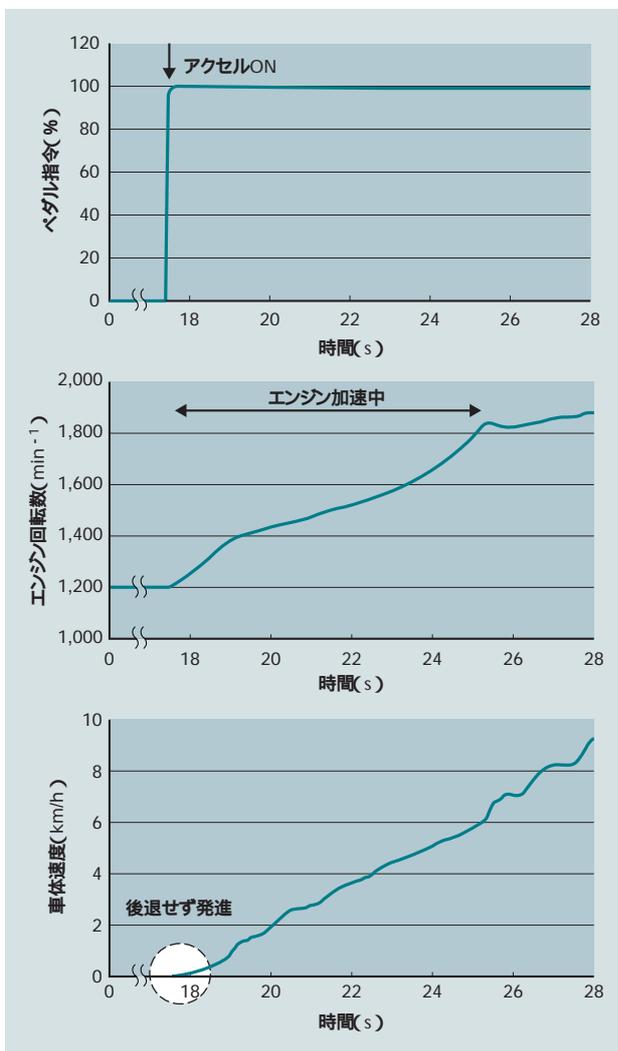


図5 実車試験波形
上り10%の坂道において満積載の車体の坂道発進波形を示す。

システムを開発し、基本性能を確認することができた。220 t級の開発にはすでに着手しており、実証試験による確認が急務である。また、260 t級では、190 t級システムの2並列化など構成上の課題も克服していく必要がある。

4.2 高機能化

鉱山での運用上、以下のような高機能化が望まれている。

- (1) 雨天時の車体のスリップ・スライドを抑制する制御
- (2) 車体のピッチングを抑制し、安定走行を可能にする制御
- (3) トロリーを利用したシステム
- (4) 車体コントローラ内データの分析による予防メンテナンス

5. おわりに

ここでは、鉱山用ダンプトラックに必要な制御方法について述べた。

この開発では、鉱山用ダンプトラックのACドライブシステムを構築し、基本機能である坂道発進性能を確認することができた。また、高効率化についても確認できた。さらに高機能化を進めることで運用効率を向上させ、運搬量の増大を図り、鉱山のエネルギー消費効率を改善していきたい。今後は、鉱山用機器に限らず、建設機械、船舶など、従来は機械式ドライブシステムで構築されたシステムの電氣化を進め、社会全体のエネルギー消費の削減に貢献していきたいと考えている。

参考文献など

- 1) 菊池, 外: 鉱山用電氣駆動ダンプトラック向け低速域高トルク制御方式の検討, 電氣学会産業応用部門大会(2007.8)
- 2) Hitachi Construction Machinery Rigid Dump Trucks, <http://www.hitachi-c-m.com/global/products/rigid/>

執筆者紹介



今家 和宏
1990年日立製作所入社, 電力グループ 電機システム事業部 発電機システム技術部 所属
現在, 建設機械向けACドライブシステム, 風力発電システムのシステム開発・事業計画作成, 遂行に従事
工学博士



菅原 直志
1997年日立製作所入社, 情報・通信グループ 情報制御システム事業部 電機制御システム設計部 ドライブシステムセンター 所属
現在, 建設機械向けACドライブシステムの開発に従事



菊池 輝
1997年日立製作所入社, 日立研究所 インバーティンバージョンセンター 所属
現在, 建設機械向けACドライブシステムの開発に従事
電氣学会会員



安田 知彦
1981年日立建機株式会社入社, 資源開発システム事業部 開発設計センター 所属
現在, ダンプトラックの開発に従事