

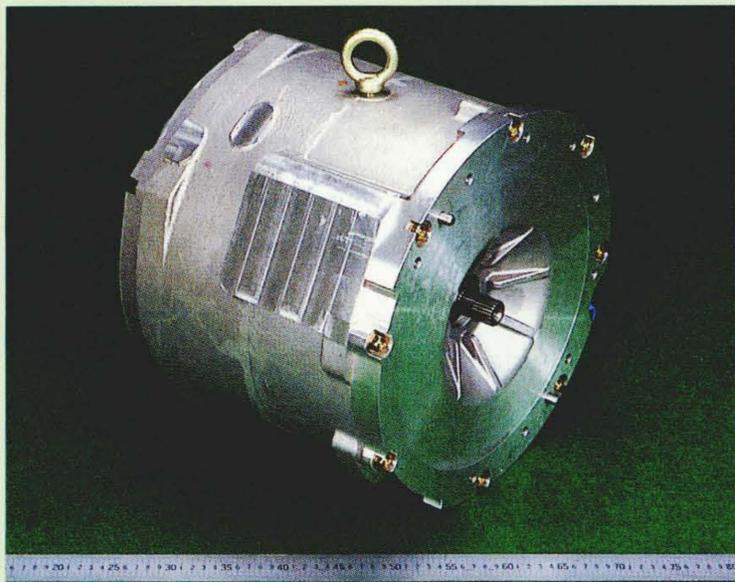
電気自動車の性能向上を実現した交流駆動システム

AC Drive System for Electric Vehicles

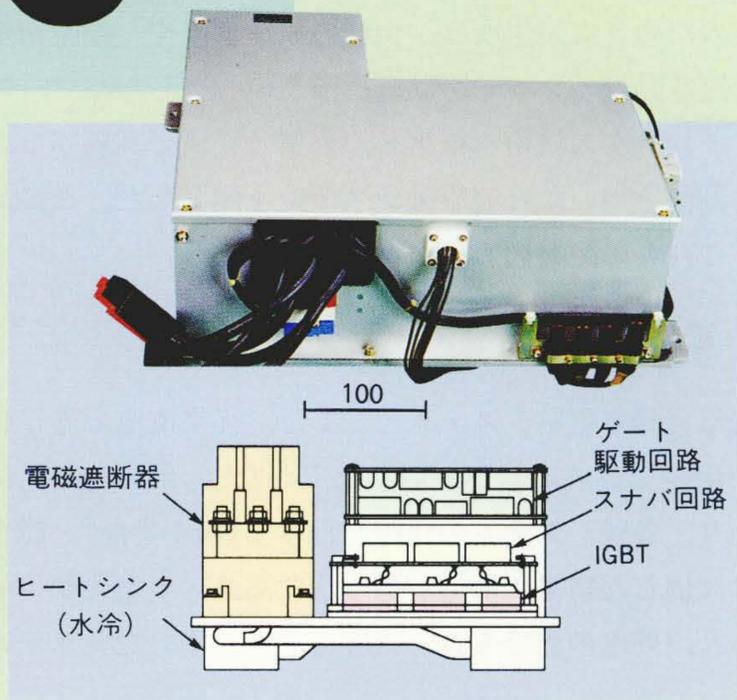
内藤祥太郎* *Shōtarō Naitō* 高木武夫*** *Takeo Takagi*
武藤信義** *Nobuyoshi Mutō* 河内芳信**** *Yoshinobu Kōchi*



(a) セドリックEV



(b) 誘導電動機



(c) IGBTインバータ

セドリックEVに搭載された交流駆動システムの電動機およびインバータ

日立製作所は、誘導電動機をIGBTインバータで駆動する小型・軽量・高効率で実用性の高い電気自動車用交流駆動システムを開発した。このシステムは、排気ガスを出さないセドリックEV(Electric Vehicle)で適用されている。

自動車の排気ガス公害が大きな社会問題となっており、米国カリフォルニア州では、1998年からZEV (Zero Emission Vehicle)の販売を義務づける法案が可決されている。現状でZEVを満足する自動車は、電気自動車だけである。そのため日立製作所は、誘導電動機をIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) インバータで駆動する小型・軽量で高効率な交流駆動システムを開発した。

誘導電動機は、一般産業用をベースにフレーム構

造をアルミ化し、インバータは、高速・低損失IGBTを使って、熱抵抗の低いフィンを用いた水冷方式とし小型・軽量化を図った。制御には、高機能マイコン(マイクロコンピュータ)を用いたベクトル制御アルゴリズムを考案し、車両の負荷に応じて電動機を最適点で運転する最高効率追従型ベクトル制御方式を開発した。以上の開発により、小型・軽量・高効率化が可能になり、実用性の高い電気自動車用交流駆動システムを実現した。

*日立製作所 自動車機器事業部 **日立製作所 日立研究所 工学博士 ***日立製作所 機械研究所 工学博士
****日立製作所 産業機器事業部

1 はじめに

米国カリフォルニア州ZEV規制¹⁾に端を発し、世界中の関連メーカーによって開発が行われている^{2),3)}電気自動車は、従来のガソリン車に比べて排出ガスの面では優れている一方、一充電走行距離が短いという欠点がある。これを解決するためには、エネルギー密度の高いバッテリーの開発が必須(す)であるが、他方限られたエネルギーをできるだけ有効に使用するためには、駆動系の効率向上が大きな課題である。それと同時に、自動車の限られたスペースの有効利用、および車両質量の低減には搭載部品の小型・軽量化が一方の大きな課題である。

このため日立製作所は、全社の鉄道車両や一般産業用の交流電動機インバータ制御技術を中心としたパワーエレクトロニクス技術を結集し、小型・軽量で高効率な誘導電動機を用いた交流駆動システムを開発した。ここでは、これらの開発内容について述べる。

2 電気自動車用交流駆動システム

電気自動車駆動システムとしては、従来直流分巻電動機を用いたシステムが使用されていた⁴⁾。今回の開発にあたり、各種システムの比較を行った(表1参照)。総合的に評価した結果、構造が堅ろうで高速・小型化が可能であり、効率の点でも良い誘導電動機を用いたシステム

を採用することにした⁵⁾。

インバータに用いるパワー素子の比較を表2に示す。駆動電流、オン電圧、動作速度などを総合的に評価し、IGBTを電気自動車用インバータに最適素子と考えて採用した。

駆動システム構成および仕様をセドリックEVを実用例として図1に示す。通常ガソリン車と同じようにキースイッチを投入し、アクセルを踏むとアクセル踏み角度に応じて、電動機のトルクまたは回転を制御するようにしている。アクセルを戻したときには、エンジンプレーキに相当する回生ブレーキを動作させ、ブレーキ踏み込み時には回生ブレーキ力をさらに増加させている。シフトレバー信号では車の前進・後進切換を行い、変速比は常に一定としている。制御方式としては、誘導電動機を用いたIGBTベクトル制御インバータ方式を採用し、電源電圧はIGBT耐電圧から336Vとした。このセドリックEVでは、出力を自動車としての動力性能(加速・登坂性能)から最大出力45kW、最大トルク176N・mとし、最高速度仕様から定格出力を30kWとした。主要制御項目としては、車の前進・後進制御、回生制御のほかに、フェイルセーフ制御を行うようにしている。

3 小型・軽量誘導電動機

電気自動車用電動機は取付スペースに絶対的な制約が

表1 電気自動車用駆動システムの比較

誘導電動機を用いたシステムは、同一出力仕様では最も小型・軽量化が図れ、制御性も安定していることにより、総合評価が高い。

項目	システム	誘導電動機	永久磁石型同期電動機	直流分巻電動機
制御方式		ベクトル制御インバータ	ベクトル制御インバータ	チョップパ制御
システム構成				
主要制御パラメータ		電動機電流, 回転数	電動機電流, 回転数, 位相	電動機電流, 回転数, 界磁電流
電動機	寸法・質量	◎	◎	△
	高回転化	◎	○	△
	寿命・保守性	◎	○	△ ブラシ・コンミテータ寿命短
	効率	○	◎ 永久磁石によって界磁損失小	△
制御装置	寸法・質量	○	○	◎
	制御性	◎	◎	△
	部品点数	○ インバータ用パワー素子6個	○ インバータ用パワー素子6個	◎ チョップパ用パワー素子1~2個
総合評価	◎ (電動機が小型軽量で堅ろう)	○ (高性能永久磁石を使用)	△ (高速・小型化の点で劣る。)	

注：略語説明ほか

INV (Inverter; インバータ), IM (Induction Motor; 誘導電動機), E (Encoder; エンコーダ), SM (Synchronous Motor; 同期電動機), PS (Position Sensor; 位置検出器)

PWM (Pulse Width Modulation; パルス幅変調), DCM (DC Motor; 直流電動機), CH (Chopper; チョップパ), N* (速度指令), T* (トルク指令)

◎ (優れている), ○ (普通), △ (劣る)

表2 パワー素子の比較

IGBT が総合評価として電気自動車用インバータに最も適する。

項目	IGBT	MOSFET	Bipolar Transistor
駆動電流	◎ 小	◎ 小	△ 大
オン電圧	○ 中	△ 大	◎ 小
動作速度	○ 普通	◎ 速い	△ 遅い
安全動作領域	○ 大	○ 大	△ 小
並列接続	◎ 易	◎ 易	△ 難
価格	○ 中	△ 高	◎ 安
総合評価	◎ 優れている	△ 劣る	○ 普通

注：◎(優れている), ○(普通), △(劣る)

あるため小型・軽量であることが必要条件である。さらに、一般産業用電動機に比べて、(1) 低電圧で大電流であること、(2) 広範囲な回転速度で使われること、(3) 加速時に大きな出力が要求されることが特徴である。このため、電気・磁気回路的に高出力点では電流、磁束密度を大きくした限界設計とし、使用頻度が多い出力領域では各種損失を最小限に抑えた高効率設計とする必要がある。また、効率的な冷却を行うため熱伝導率の大きな材料の選定、熱放散効率の良い構造とすることが要求される。

今回日立製作所が開発した電気自動車用電動機の仕様および構造を表3に示す。この電動機は、一般産業と比較して同一出力で体積・質量ともに $\frac{1}{3}$ 程度に小型・軽量

化している。以下、電気自動車用電動機の開発内容について述べる。

3.1 筐体の小型・軽量化

電動機の筐(きょう)体は車両搭載部品であることから耐振動性、耐水性、耐熱性などに優れた材料、形状にする必要がある。このため電動機本体を覆うフレーム、ブラケットは一般産業用では鉄製が一般的であるが、今回電気自動車用としてアルミニウム製を採用し、しかも必要最小限の肉厚、空隙(げき)にすることによって筐体を小型・軽量にした。

3.2 電動機の水冷却

電動機の小型・軽量化によって熱密度が大きくなるので、効率の良い冷却構造とすることが重要になる。一般的な空冷式では電動機の温度上昇が高くなるので、今回一般のエンジンと同じように水冷式にした。冷却水路は、電動機本体を覆うアルミニウム製フレーム内に設け、温度上昇シミュレーションによって最適な形状とした。冷却水はフレームの水路の給水口から流入し、電動機本体の熱を吸収したのち排出され、循環経路中のラジエータによって冷却される。このような水冷構造とすることにより、冷却性能を空冷に対し3倍程度向上することができた。

3.3 電動機本体の小型・軽量化

電動機本体の小型・軽量化は、電流密度、磁束密度を

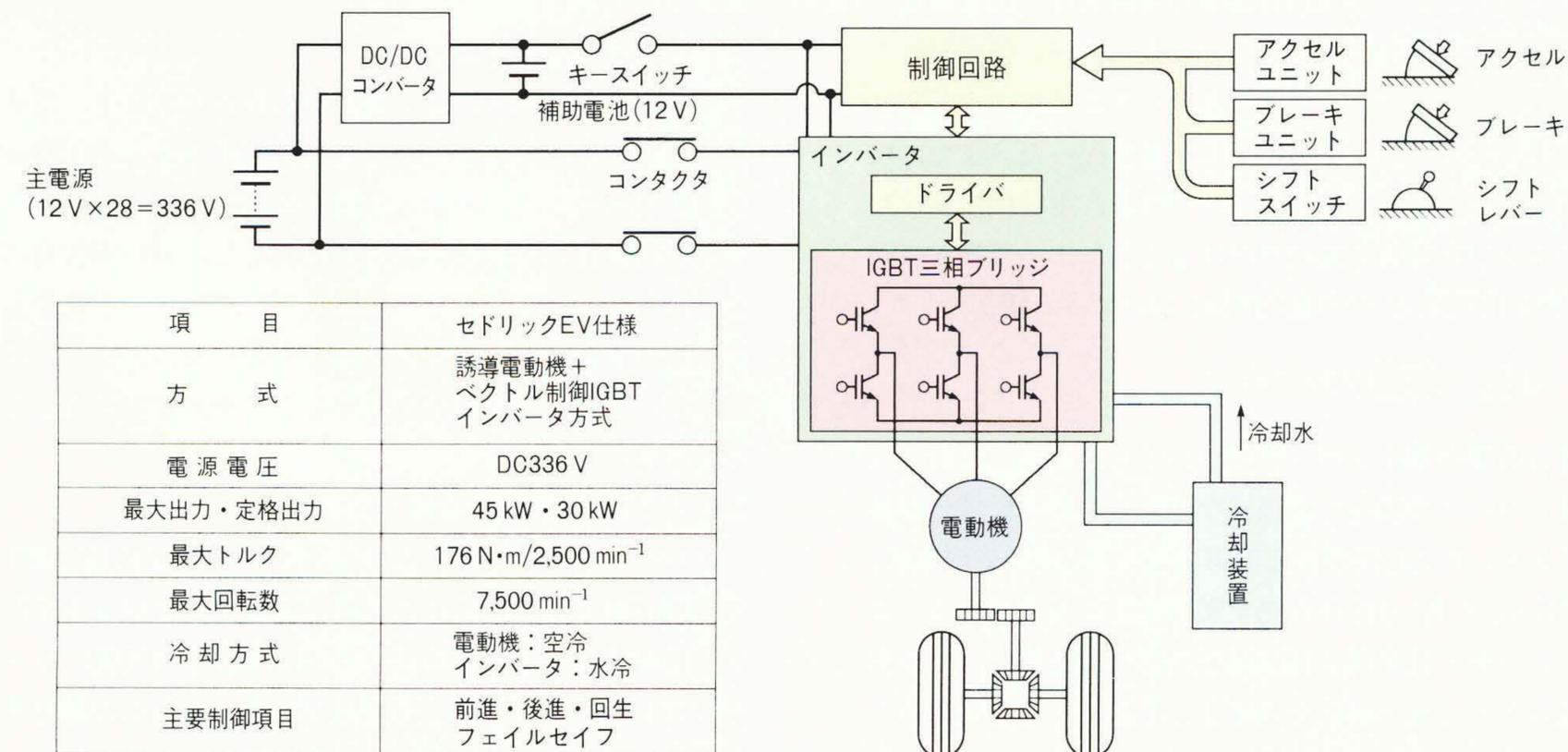


図1 セドリックEV用駆動システム構成と仕様

通常のガソリン車と同様な操作で走行できるように、アクセル、ブレーキ、シフトレバー信号を制御回路に取り込み、一定変速比で低速から高速まで安定した制御を行っている。

表3 電気自動車用電動機

電気自動車用電動機は、小型・軽量化のため冷却は水冷式とし、フレームおよびブラケットにはアルミニウムを採用している。

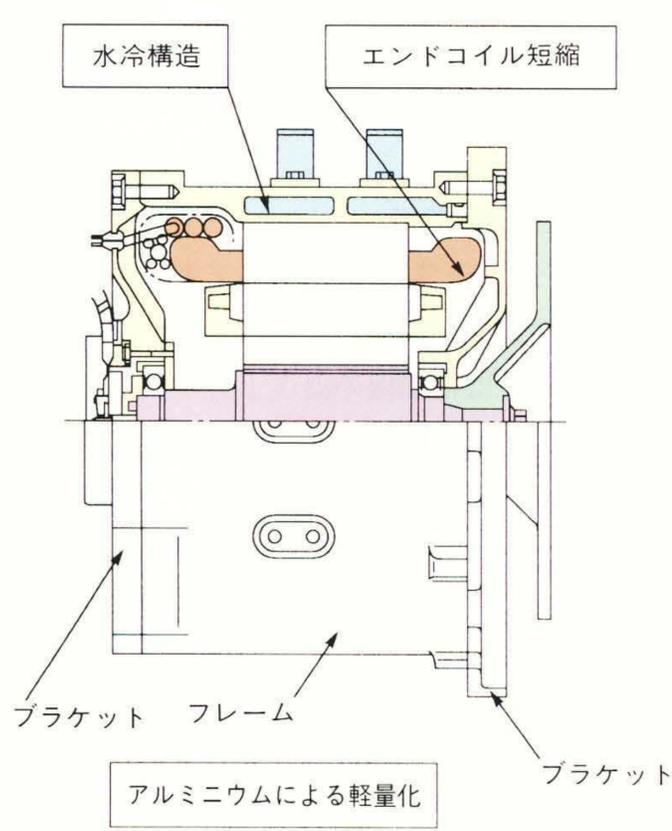
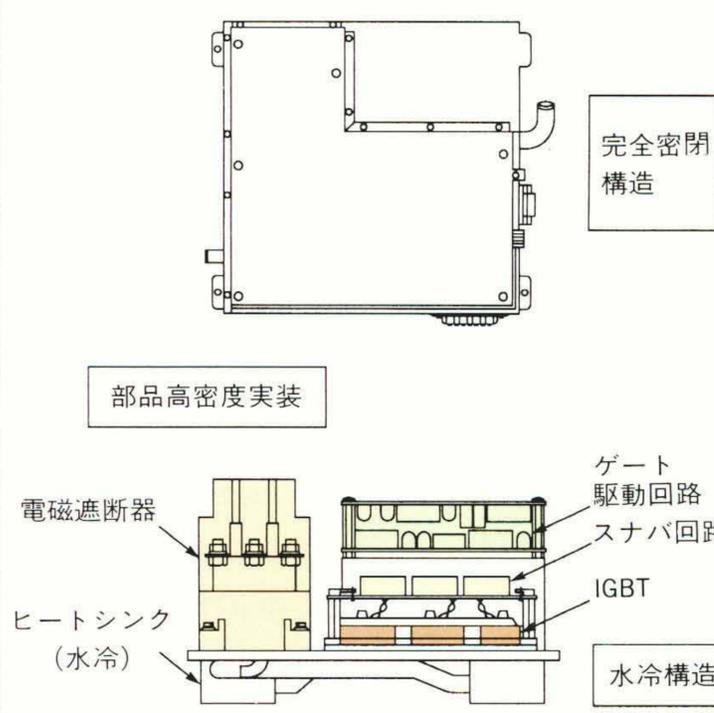
仕様	<ul style="list-style-type: none"> ●出力：30 kW(連続), 60 kW(30 s) ●最大トルク：251 N・m ●冷却：水冷式
構造	

表4 電気自動車用インバータ

電気自動車用インバータは小型・軽量・耐環境性向上のため完全密閉水冷構造を採用している。

仕様	<ul style="list-style-type: none"> ●容量：45 kVA(連続), 90 kVA(30 s) ●冷却：水冷式 ●構造：完全密閉
構造	

いかに設定するかにある。磁束の流れ、温度分布をシミュレーションし、電動機各部分の電流密度、磁束密度が最適値になるように設定した。一方、電線、絶縁材料など構成材料の適正化を図り、ステータコイルの実装密度の向上、エンドコイルの短縮化などを図った。また、反出力軸端に回転検出器(エンコーダ)を、電動機内部にサーモセンサをそれぞれ取り付けることによって種々の回転、温度制御などの電動機制御に対応できる構造とした。

4 小型・軽量インバータ

電気自動車用インバータについても、電動機と同様に取付スペースの制限、取扱性などから小型・軽量化が必須であり、また自動車の使用環境を考えた場合、耐水性、耐塵埃(じんあい)性から完全密閉構造が要求される。このため小型・軽量化には部品を高密度に実装し、かつ密閉構造として発熱部品を効率よく冷却することが要求される。

今回、日立製作所が開発した電気自動車用インバータの仕様および構造を表4に示す。冷却は水冷式で完全密

閉構造としており、一般産業用と比較して同一容量で容積が $\frac{1}{2}$ 以下に小型化されている。

4.1 完全密閉構造

インバータは内部に電子部品が搭載されており、電子部品は水・塵埃を嫌うため、完全密閉構造とする必要がある。33ページの写真および表4に示すように、アルミニウム製筐体に部品を収納する構造とし、筐体部材間はシール剤でシールし、リード線はゴムグロメットを介して引き出す構造として完全密閉化を図った。これにより、耐水性、耐塵性が自動車用機器として満足する構造となっている。

4.2 強制水冷方式の採用

インバータは、上述したようにパワー素子にはIGBTが使用されており、最高出力時は最大数キロワット程度の発熱がある。このほかにもサージ吸収用の抵抗、フィルタコンデンサなどからも発熱があり、これらの部品を許容温度以下に抑え、効率よく冷却することが必要である。特にIGBTの冷却が問題であり、冷却方式としては、空冷、水冷、油冷などが考えられる。ここでは、取り扱

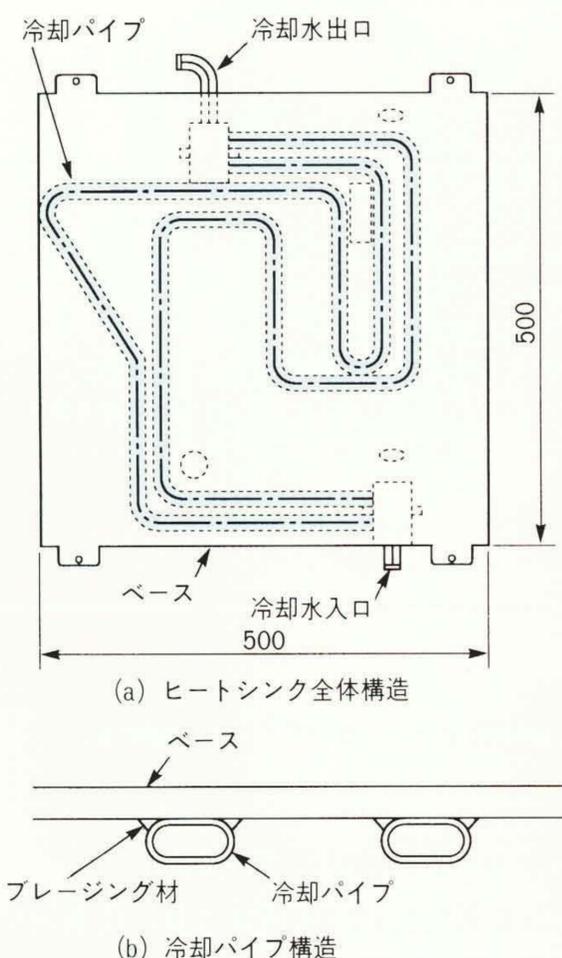


図2 ヒートシンク構造
ヒートシンクはアルミベースに冷却パイプを2パスで設ける構造とし、圧力損失および熱抵抗の低減を図った。

いが容易で最も素子を効率よく冷却できる強制水冷方式を採用することにした。

水冷ヒートシンクの構造を図2に示す。長円形冷却パイプをブレイジング材で接合した構造を持ち、圧力損失低減のため2パスとし、冷却水流量を確保してヒートシンクのベースと冷却水間の熱抵抗の低減を図った。このような強制水冷方式の採用により、冷却性能を大幅に向上できるため、加速、上り坂など過酷な走行条件でも、IGBTのジャンクション温度を許容値以下に抑えることができた。

5 高効率・高信頼性制御システム

今回開発した制御仕様の概要を表5に示す。駆動系制

表5 駆動系制御内容

駆動系の制御は大別して走行制御、電気制動を行う回生制御、およびシステム異常時に保護処理を行うフェイルセーフ制御で構成する。

分類	機能	内容
走行制御	(1) システム起動・停止	キースイッチ、アクセルスイッチ、シフトスイッチなどの信号によるインバータ起動・停止
	(2) 目標トルク演算	アクセル開度、モータ回転数、バッテリー残量、保護回路からの制御信号によって目標トルクを決定
	(3) 高効率ベクトル制御	目標トルクに従って最適励磁電流、トルク電流を決定し、PWMでインバータ制御を行う。
(4) 回生制御		目標制動トルクに従って誘導電動機を発電機として制御する。
(5) フェイルセーフ制御		システム異常時の保護処理 アクセル、ブレーキ、エンコーダ、電流センサなどの主要センサおよびコンタクタなどの自己診断

御の項目は、走行制御、制動関連の回生制御、フェイルセーフ制御に大別される。以下、駆動システムの総合効率向上を図った高効率制御、システムの信頼性を向上した高信頼性制御について述べる。

5.1 高効率制御システム

バッテリーに蓄えられている電気エネルギーの大部分は、自動車の駆動エネルギーに使用されるため、駆動系の効率向上が必須である。このためには、駆動力を発生させる誘導電動機をインバータでいかに効率よく制御するかが重要である。そのため、今回各種走行条件で、電動機を最適点で運転する最高効率追従型ベクトル制御方式を開発した。この方式の原理を図3に示す。

誘導電動機のトルク T_r は、励磁電流 I_m とトルク電流 I_t の積に比例するため、 $I_m \times I_t$ が一定ならばトルクは一定である。したがって、図3に示すように与えられた負荷点の電動機回転数、および電動機トルクで効率が最高となる I_m 、 I_t を選択すれば、駆動系の効率の最も良い制御が可能となる。このような最高効率追従型ベクトル制御の開発により、各負荷点で、従来制御に対して3~5%の効率向上が可能となった。

5.2 高信頼性制御システム

電気自動車も、ガソリン車と同様に信頼性の高いシステムが要求される。表5の(5)にフェイルセーフの基本的な仕様を示す。アクセル、ブレーキ、エンコーダ、電流センサなどの主要センサおよびコンタクタなどの自己診断を行って常に異常を検知するとともに、過電流、過電圧等の異常が発生したときには、IGBTの動作停止および主回路遮断などの保護処理を行うようにして、系の信頼性を向上させている。

6 交流駆動システムの評価

この駆動システムの試験結果を図4に示す。同図からスムーズな加減速が行われていることがわかる。また減速時には、バッテリーへエネルギーを回生する制御を行い、

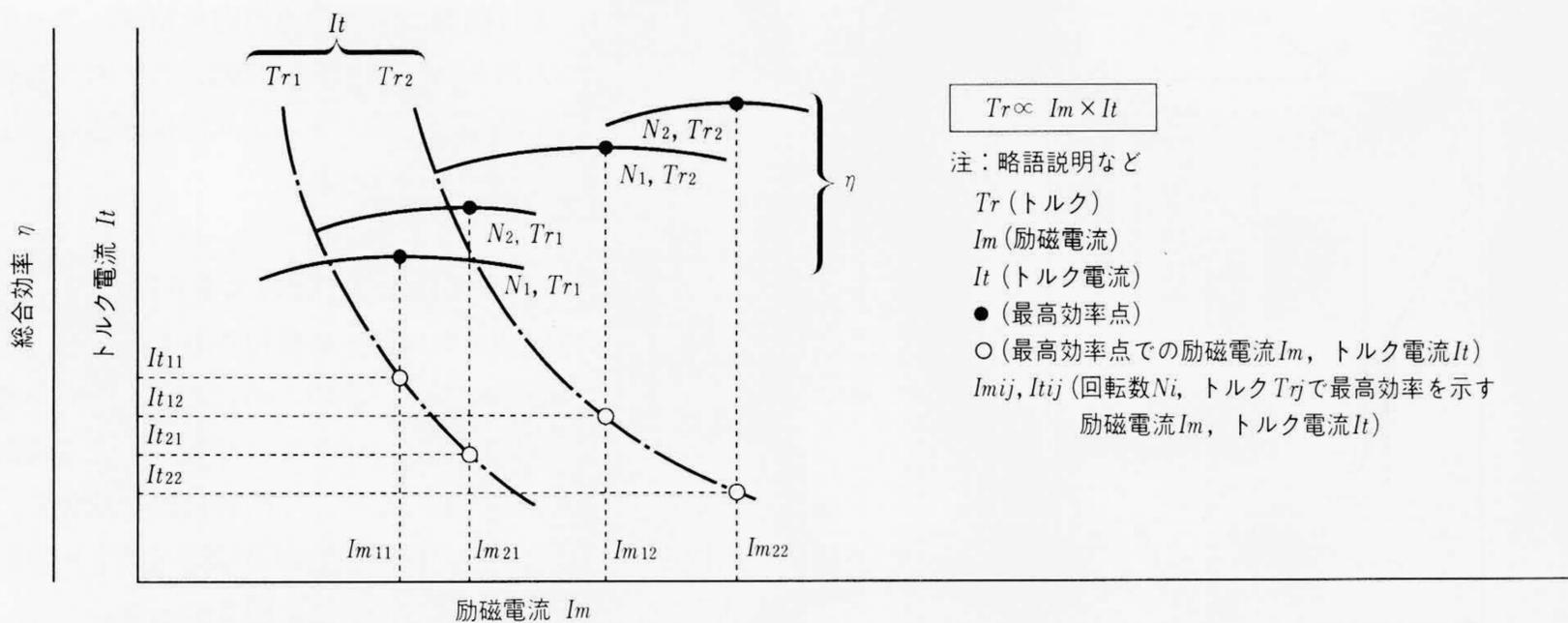


図3 最高効率追従型ベクトル制御方式
与えられた負荷点，回転数 N (r/min)，トルク Tr ($N \cdot m$)で最高効率となるように励磁電流 Im ，トルク電流 It を制御する。

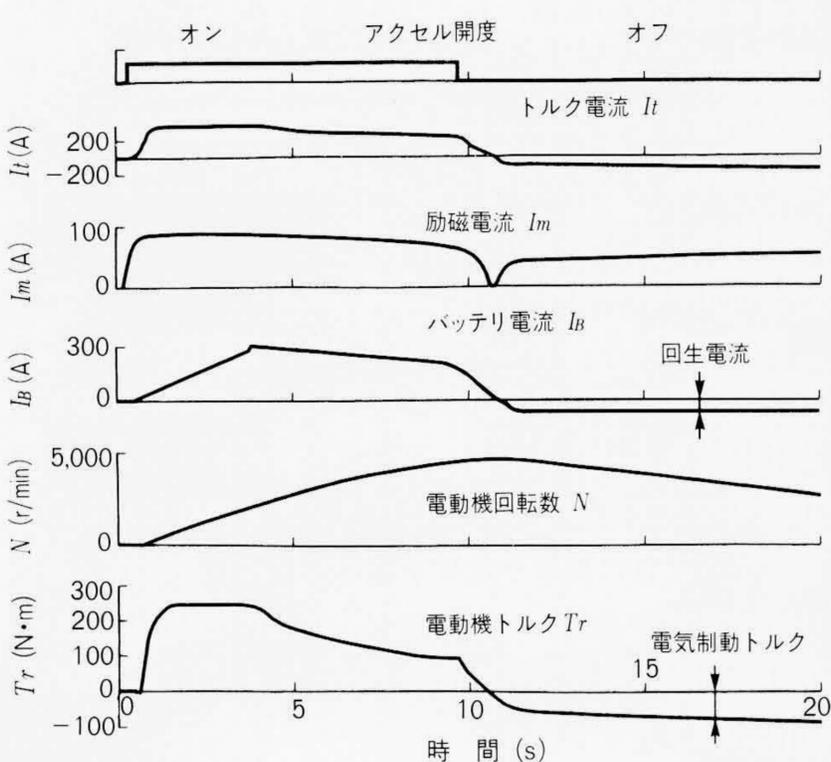


図4 駆動システムの評価結果
電動機トルク，電動機回転数の波形からスムーズな加減速が行われていることがわかる。

電気制動トルクを発生させている。

このような制御方式の採用により，代表的な都市走行パターン(SAE J277aDモード)で，モータ，インバータ組合せ効率(回生付き)92%を達成した。

7 おわりに

ここでは，日立製作所が開発した電気自動車用交流駆動システムについて述べた。

米国のカリフォルニア州で1990年に全米一厳しいと言われる大気汚染防止規制が制定され，1998年からは州内で販売される車の2%を，2003年には10%をZEVにすることが義務づけられている。日立製作所は長年培われたパワーエレクトロニクス技術を結集し，より高性能で信頼性の高い電気自動車用駆動システムの実現へ向けて技術開発を進めていく考えである。

参考文献

- 1) California Air Resources Board: LEV & ZEV Program Review (1994年版)
- 2) 日本電動車両協会: 低公害車将来技術動向調査報告書 (1994-6)
- 3) 日本電動車両協会: EV PLAZAパンフレット (1993年版)
- 4) A. F. Burke: Electric Vehicle Propulsion and Battery Technology 1975~1995, Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (USA) 25th [6] pp. 119~135 (1990)
- 5) L. Chang: Comparison of AC Drives for Electric Vehicles - A Report on Experts' Opinion Survey, IEEE AES Systems Magazine, pp.7~11 (1994-8)