電気自動車用電動機と駆動システムの現状

Ⅲ. 電気自動車用電動機の特徴と実用例

— 直流機および誘導機を利用した例 —

解説

正 員 坪井 和 男

中 部 大 学 工 学 部 電 気 工 学 科

正 員 伊 藤 雄 三

北 海 道 大 学 工 学 部 シ ス テ ム 情 報 工 学 専 攻

キーワード

電気自動車、電動機、直流機、誘導機、構造、高効率、実用化

1. はじめに

本解説では電気自動車用電動機として近年やや利用が少なくなっている直流機と、技術の発達とともに利用が増えてきている誘導機について、特徴的構造と備えるべき特性そしてエネルギーの有効利用の観点より電気自動車向けの制御法や電気自動車への実用例についてそれぞれ分けて述べる。

2. 直 流 機

直流機はトルク制御や駆動装置も簡単のため電気自動車の開発とともにいち早く採用され^{1) 2)}。日本では1940年代に実用例がある。小容量のものでは永久磁石界磁形モータを低速で利用する搬送装置に採用され、三輪・四輪電動車椅子、車椅子用パワーアシスト装置やゴルフカートなどに実用化されている。これらには小形・軽量、低損失性が強く要求され、界磁には希土類マグネットが採用される。また電動機定格出力は200W~1kW程度のものが多い。

中容量では永久磁石界磁式、他励式、分巻、直巻また和動複巻モータが用いられ、その電動機定格出力は10~50kW程度で、軽乗用車、ライトバン、EVリポート車そして電気配送車などへ実用例^{1) 3)}がある。

しかし、電気自動車用電動機としてはブラシ・整流子構造を有するため維持保守の問題と高速回転に不向きなどの理由から徐々にPMモータや誘導機など交流機にとって代わられつつある。

2. 1. 構造および特性

電気自動車用直流機の構造は一般産業向け直流機と大差ないが駆動部分の小形化のために、(1)速度検出用パルスジェネレータを予め組み込む(2)減速機をモータの本体と一体構造とする、などの工夫がなされることが多い。電気自動車用直流機では他のモータと同様、定格の与え方に特徴があり一般高速走行の場合の定格出力に加え、頻繁な始

動・停止や加速減速を繰り返す市街地走行に対応する短時間(30秒や3分など)最大出力で設計、使用される。通例、定格出力と最大出力の比は1:2程度となっている。そのため冷却方式には強制風冷や水冷方式が採用される。直流機は高回転数では整流子部の機械的ストレスや整流条件などが厳しく、駆動部に2段の変速機を設けて対応することがある。

電気自動車用直流機は一般産業向けに比べ、低損失、軽量・小形化、省保守・低騒音などに考慮すべきである。

一充電当たりの走行距離を延ばし、温度上昇問題からも出来るだけ損失が少なく効率の良いことが電気自動車用モータには重要な特性である。このため電機子に用いる電気鉄板は鉄損の少ないものを選定し、界磁を永久磁石にして界磁銅損をなくするなどして低損失化を図る。その他制御方式によって高効率化を実現する特性改善法がある。

小形・軽量化については限られた車載スペースや重量の軽減のためにも重要な項目で、高価になるが高透磁率の鉄心材料を採用して磁気装荷分の軽量化を図ることが出来る。

ブラシおよび整流子片間の保守が必要とされるため省保守化が望まれる。ブラシは負荷条件や運転速度などの使用条件によって交換時期が変化する。対応策としては整流子片を傷めない材質のブラシの採用を図り、点検・交換が容易なように点検口を大きくし保守がやり易い構造に努める。

2. 2. 効率および制御

電気自動車用直流機の効率の求め方は通常と変わらないが、電気自動車はモータ単体の効率の他に冷却用補機損や駆動システムの損失などを考慮し、総合効率で評価をすることは言うまでもない。制御用駆動装置については、低損

図1 トルク-速度特性の比較

失で回生運転や逆転が行われるためにDCチョップ、PWMチョップがその基本となる。図1に定格出力を同一に設計した直巻モータと誘導機の数値特性を示す²⁾。

Present Technologies on Motors and Drive Systems for Electric Vehicle.

Ⅲ. The Characteristics and Practical Use of Electric Vehicle Motor. - Examples for DC Motor and Induction Motor -.

By Kazuo Tsuboi, Member (Chubu University) and Yuzo Itoh, Member (Hokkaido University).

直流機は始動・低速時のトルクが大きい、高速時には誘導機の方が駆動トルクが大きく、高速域での加速性能は誘導機の方が優れている。

電気自動車用直流モータはアクセルペダルからの運転指令によって回転速度が調節されるが、この時損失が少ない条件で運転されることが望まれる。その方法に効率最適化制御法⁴⁾がある。それは電機子電流の大きさに応じて $\kappa \equiv I_a / I_f$ の関係を満足するように界磁電流の制御目標を与えればよいことを示している。図2にその結果⁴⁾を示す。

図2 効率の比較

2. 3. 実用例と略図

図3は電動4輪車への実施例である。電動機容量は永久磁石DCモータ（電磁ブレーキ付き）24V190W2台でそれぞれ後輪を減速機を通じて駆動する。12V鉛蓄電池を2個搭載して連続走行時間は4.3時間（6km/h走行時）のタイプやその他、充電装置を車体に予め装着してあるタイプがある。

図4に配送用に作られた電気自動車用モータシステム（最大出力100kW）のレイアウトを示す。

図3 電動車椅子（電動4輪車）実用例
SUZUKI（株）

図4 配送車用電気自動車レイアウト

3. 誘導機

電気自動車駆動システムに要求される性能などは基本的にはエンジン自動車に対するそれと同様である。使用する電動機と制御装置とを含めた種々の比較検討結果^{5~12)}によ

れば、誘導電動機（以下、IMと略記）を用いた駆動システムは、1) 小型軽量化が可能、2) 高速回転が容易、3) 比較的高効率、4) 高信頼性、5) 比較的低価格、6) 変速装置の簡素化が可能、などの理由から総合評価が高い。第29~31回の東京モータショー出展の資料^{13~15)}から第30回以降IMの使用例が最も多く現在最も多く用いられている。以下、普通乗用車を対象にしてIMを使用する場合の構造、特性、制御および実用例について解説する。

3. 1. 構造上の特徴と特性改善策

電気自動車用電動機は、厳しい環境下で使用される、設置条件の制約がある、低速域で高トルクを必要とする、広範囲な速度で定出力特性が必要であること、などから一般産業用とは異った設計上の工夫を必要とされる。特に通常走行時は最大出力の1/5以下で運転する場合が多く¹⁾、配慮が必要である。ここでは、IMの構造上の特徴と特性改善策についてまとめる。

・保護冷却方式など：

全閉型構造¹⁶⁾を採用する場合が多く、フレーム、ブラケットなどは軽量化のためアルミダイカスト製造や^{9, 17)}、固定子をフレームレス構造^{18, 19)}とする例もある。冷却方式は高出力密度のIMでは水冷式が殆どで、固定子のみでなく、回転子を冷却するデ

図4 水冷式誘導機の構造概略図

案し、有効な冷却効果が得られたとの報告がある¹⁸⁾。フレームレス構造では固定子鉄心内に冷却パイプを配置する構造¹⁹⁾を採用している。

図4は水冷式誘導機の構造概略図⁹⁾で、保護冷却方式が工夫されている。

・鉄心材料および形状： 高速運転時の周波数の増大に伴う鉄損の増大に配慮するため、2極機又は4極機が望まれるが⁵⁾、コイルエンドが短くなる4極機が採用される場合が多い^{16~18)}。鉄損低減のため特殊電磁鋼帯を使用する

図5 ギャップ磁束密度と最大トルクの関係

17, 20, 21)。図5はギャップ磁束密度 B_g が最大トルクに及ぼす影響を検討した例²¹⁾で、スロット寸法を制限して歯部を太くし、ギャップ磁束密度 B_g を1.0T以上としている。

・固定子巻線および回転子導体： 固定子巻線は平角導線を使用して占積率を増大させ、H種絶縁を上回る絶縁方式²⁰⁾とするなど工夫している。回転子導体は特殊アルミダイカスト工法²⁰⁾、銅ダイカスト工法¹⁹⁾などを採用した例が報告されている。

図6は水冷方式の誘導機の外観図¹⁶⁾で、最大出力60kW、最大回転数12,000rpm、最大出力密度1.15kW/kgで、制御装置は水冷式で、出力密度6.0kVA/kgを達成している。

図6 水冷方式の誘導機の外観図

3. 2. 制御装置と制御による特性改善策

・制御方法と特性改善策： 電気自動車をエンジン自動車と同等な感覚で運転するためには、アクセルペダルの踏み込み量に比例したトルク制御が望ましいこと²²⁾から、IMの制御にベクトル制御が適用される。一般的なベクトル制御においては、運転状態に関係なく励磁分電流を常に一定に制御しているため、頻度の多い軽負荷時には鉄損の割合が大きく、効率向上策が種々提案されている^{9, 22, 23)}。ここでは文献[22]の方法による特性改善結果の一例を示す。

図7 総合効率特性 (4000rpm)

図8 総合効率マップ (効率最大制御時)

図7は、ベクトル制御時と効率最大制御時の効率の比較を示している。軽負荷時において総合効率が著しく改善され、実験結果とシミュレーション結果とは良好な一致を示している。図8は鉄損を考慮したシミュレーションによる総合効率マップを示す。中低速領域で効率の改善が見られる。

3. 3. 実用例と主な諸元の特徴

表1に第31回東京モーターショーに出展されたIMを用いた電気自動車の主要諸元¹⁵⁾を示す。表2は海外のIMを用いた電気自動車の例^{1, 5)}である。フォルクスワーゲン社

表1 '95東京モーターショーに出展されたIMを用いた電気自動車の主要諸元

車名・形式 会社名	トヨタEV 日産自動車	アパッチEV 日産自動車	アトミックEV 日産自動車	ハイデEV 三菱自動車工業	タウナスEV トヨタ自動車	ロッドEV マツダ	九電EV 九州電力	東京R&D Z.R.O.-1 東京アパッチEV	コスターEV トヨタ自動車	キャッチEV 三菱自動車工業
主 要 寸 法										
全長 (m)	4.690	4.460	4.545	4.270	4.395	3.970	3.295	3.935	6.990	4.690
全幅 (m)	1.695	1.695	1.690	1.680	1.685	1.675	1.395	1.870	2.070	1.880
全高 (m)	1.425	1.490	1.665	1.460	1.940	1.210	1.475	1.000	2.580	2.800
質量										
空車質量 (kg)	1,730	1,700	1,700	1,710	2,060	1,410	900	1,000	4,150	(鉛)2,900 (有機系)2,600
最大積載量 (kg)	—	100	—	—	350(200)	—	—	—	—	2,000
乗車定員 (人)	4	2	4	4	2(5)	2	2	1	15 (内1人は車いす)	3
自動車総質量 (kg)	1,950	1,910	1,920	1,930	2,520(2,535)	1,520	1,010	1,055	4,975	5,065
性能										
最高速度 (1km区間) km/h	100	115	120	130	110	130	128.5	210	80	100
登坂能力 (急坂路) $\tan \theta$	0.3	0.27	0.34	0.38	0.35	0.4	0.37	—	0.3	0.23
最小旋回半径 (m)	5.5	5.4	5.3	5.1	4.5	4.6	4.2	9.0	6.5	5.1
一充電走行距離 (km) (10・15・10モード) (40km/h定速)	120 (40km/h定速)	80 (10・15モード)	200以上 (エアコンオフ)	75 (10モード)	100 (都市内走行)	180 (40km/h定速)	175 (40km/h定速)	35 (150km/h定速)	—	200
電動機										
最大出力/回転数 kW/min ⁻¹	45	55	55	39/2,100 ~3,600	43/3,050	50/3,300	30/8,950	95/8,000~10,000	70/1,650	80/3,700~10,000
最大トルク/回転数 N・m(kgf・m)/min ⁻¹	18	24	17	179/0	134/3,050	147/3,300	122.5/2,335	149/0~5,000	405/1,650	260/2,900
制御装置	PWM	PWM	PWM	Tr.INV ベクトル	Tr.INV	IGBT INV	PWM	PWM	Tr.INV	IGBT INV ベクトル
駆動方式	後輪駆動	前輪駆動	前輪駆動	FF	後輪駆動	後輪駆動	前輪駆動	後輪駆動	後輪駆動	後輪駆動
主変速機	前進1段	前進1段	前進1段	手動4段	前進4段	手動5速	無変速 (常時噛合1段固定)	無変速 (常時噛合1段固定)	1速	固定 (1段減速)
主電池										
種類・形式	鉛	シール形鉛	リチウムイオン	鉛	鉛	ニッケル・ カドミウム	ニッケル形 ニッケル-亜鉛	シール形鉛	シール形鉛	有機系
容量・電圧 Ah(HR)・V	40(5)・12	60(3)・12	100(3)・28.8	75(5)・12	150(5)・12	100(5)・12	50(5)・13.6	38(20)・12	63(3)・12	60(3)・12
搭載個数 (個)	28	24	12	20	16	16	22	28	24	30
総電圧 (V)	336	288	345	240	192	192	299.2	336	288	336

の例はエンジンの駆動力の一部を分担するハイブリッド方式である。

表1, 2および関連文献に基づき, I Mの主な諸元の特徴をまとめると以下になる。

駆動方式では信頼性と価格の面から1モータ駆動方式が多く, 減速ギアとして1段固定ギア方式を採用する傾向にある。

最大出力については国内の例では40~60kW程度, 海外の例では60~80kW程度である。重量に対する最大出力密度は1.0kW/kg程度と著しく小形軽量化されている。最大回転数は小形軽量化のため, 国内外とも10,000rpm以上と高速化されており, ギアによって減速させる傾向にある。冷却方式は冷却効果の向上のため, 水冷又は油冷方式が採用されている。

表2 海外の誘導機を用いた電気自動車の例

車名	用途	出力	製造年	備考
Ford エコスター	バン	56kW	1993	固定子水冷 最高13500rpm
GM インパクト	乗用車	2×43kW	1993 (原形)	固定子空冷 最高16000rpm
GM インパクト	乗用車	1×75kW	1996	固定子水冷 最高1500rpm
GM オペル	乗用車	2×43kW	1991 (原形)	—
Iveco 100シート	バス	128/ 143kW	—	—
VW チコ ハイブリッド	乗用車	6kW	—	エンジンフライ ホイールモータ
VW ゴルフ ハイブリッド	乗用車	7kW	—	同上
Chrysler	ミニバン	75kW	原形	固定子巻線 平角巻線
Dodge	小型 トラック	75kW	原形	同上

4. あとがき

電気自動車用電動機として直流機および誘導機を用いた場合の構造, 特性, 制御および実用例についてまとめた。

直流機は電気自動車用として大型なものは開発利用される機会は少ないと思われるが, 小容量のものは制御装置も簡単なことから軽自動車, 電動車椅子やゴルフカート等の限られた用途に今後とも利用されるものと思われる。

誘導機は乗用車としてシリーズハイブリッド方式も提案²⁴⁾されており, また新しい誘導電動機も提案されている^{25~28)}。今後, それぞれの電動機が制御方法の改善とともに特徴を生かしながら, 用途によっていわゆる”住み分け”をしつつ発展するものと考えられ, またそのように期待される。

最後に本解説記事に有益な資料の提供並びに討論をして戴いた「電気学会電気自動車用回転機」調査専門委員の方々に深甚なる感謝の意を表わす次第であります。

(平成8年9月11日受付)

参 考 文 献

- 1) 北田:「電気自動車の適用例: 誘導機」, 平8電気学会産業応用部門全国大会, S.3-6 (平8)
- 2) 山田:「電気自動車の実用例(直流機)」, H8年電気学会産業応用部門

全国大会講演論文集

- 3) いすゞ(株)ELF ELECTRIC VEHICLEパンフレット
- 4) 江上, 土谷: 他励直流電動機の効率最適化制御法, 計測自動制御学会論文集, 20-5, 466/468(1984)
- 5) John G.W. West: "DC, induction, reluctance and PM motors for electric vehicles", POWER ENGINEERING JOURNAL, p77 (1994-4)
- 6) 中島・野坂・城戸・小玉:「地球にやさしい電気自動車用電気品」, 明電時報, 242号, p.22 (平7-6)
- 7) 藤原:「電気自動車の新しい展開」, OHM, p.38 (平4-12)
- 8) 永山・森・水野・足利・杉井・古賀:「駆動モータの違いによる電気自動車の走行性能比較」, 電気学会回転機研究会資料, RM-95-93 (平7)
- 9) 内藤・武藤・高木・河内:「電気自動車の性能向上を実現した交流駆動システム」, 日立評論, 77, 2, P.33 (平7)
- 10) 高橋:「電気自動車用電動機とその駆動システム」 総論, 平8電気学会産業応用部門全国大会, S.3-1 (平8)
- 11) 三木・永山:「電気自動車に適した電動機の特性」, 平8電気学会産業応用部門全国大会, S.3-3 (平8)
- 12) 電気学会調査専門委員会:「電気自動車用パワエレクトロニクス現状と動向」, 電気学会技術報告, 第589号, P.6 (平8)
- 13) 日本電動車両協会:「EV LIVE '91」, (平3)
- 14) 日本電動車両協会:「EV PLAZA '93」, (平5)
- 15) 日本電動車両協会:「EV LAND '95」, (平7)
- 16) 渡邊・森・掛林・足利・松田・小林:「電気自動車駆動システムの開発」, 平7電気学会産業応用部門全国大会, No.119 (平7)
- 17) UK-D. Choi, Jin-s. Kim & Soon-c. Hong: "DEVELOPMENT OF A HIGH EFFICIENCY POWER TRAIN FOR ELECTRIC VEHICLES", 1995 International Conf. on Power Electronics, p.616 (Oct.1995)
- 18) 川又・田島・松延・工藤・沢川:「電気自動車用誘導電動機の冷却技術の基礎検討」, 平8電気学会産業応用部門全国大会, No.11 (平8)
- 19) 田島・川又・松延・小林・沢川・水泉:「電気自動車用誘導電動機の開発」, 平8電気学会産業応用部門全国大会, No.12 (平8)
- 20) 田島・小幡:「ハイブリッド低公害車」, 電気学会論文誌D, vol.113-D, 8, p.661 (平5)
- 21) S. Tange, A. Ito: "Motor and controller systems for EVs", Proc. of convergence (Oct.1994)
- 22) 足利・森・水野・永山・野坂・杉井:「電気自動車駆動用誘導電動機の最大効率制御方式」, 電気学会論文誌D, 116-D, 3, p.310 (平8)
- 23) 黄・田所・塚越・松瀬:「直接形ベクトル制御誘導電動機の磁束レベル有限定応答制御」, 電気学会論文誌D, 115-D, 1, p.39 (平7)
- 24) 吉田・岩本:「ハイブリッド電気自動車の開発」, 平7機械学会全大, No.3313
- 25) 河村・横山・久米:「電気自動車用相反モータの駆動特性」, 電気学会論文誌D, vol.115-D, 1, p.31 (平7)
- 26) F. Carichi, F. Crescimbeni, E. Santini: "AXIAL-FLUX ELECTRO-MAGNETIC DIFFERENTIAL INDUCTION MOTOR", Electrical machines and Drives, No.412 (Sep.1995)
- 27) 柴田・土田・今井:「回転マグネットを内蔵する高トルク誘導電動機」, 電気学会論文誌D, vol.115-D, 11, p.1341 (平8)
- 28) 水野・坪井・廣塚・鈴木・松田・小林:「電気自動車用六相極数切替誘導電動機の基本原理と最大トルク特性」, 電気学会論文誌D, vol.116-D, 3, p.256 (平8)

坪井 和男 (正員) 1944年4月11日生。1973年3月中部工業大学(現、中部大学)大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同大学講師、助教授を経て、1984年4月中部大学教授、現在に至る。主として、誘導電動機および同期電動機の解析と特性改善に関する研究に従事。工学博士。1981年電気学会論文賞受賞。IEEE会員。

伊藤 雄三 (正員) 1942年4月24日生。1964年3月北海道大学工業教員養成所電気工学科卒業。1964年4月同養成所電気工学科助手、1965年4月北海道大学工学部電気工学科(現、システム情報工学専攻)助手、現在に至る。主として無整流子電動機、PMモータおよび直流機の制御に関する研究に従事。博士(工学)。計測自動制御学会、パワーエレクトロニクス研究会会員。