

実走行条件を反映した路線バス用駆動モータシステムの性能評価

環境研究領域 明 光在 成澤 和幸 室岡 絢司 交通システム研究領域 林田 守正
 群馬大学 紙屋 雄史 澤藤電機(株) 田中 裕弥

1. まえがき

近年、乗用車に続いて、大型自動車にもハイブリッドシステム等の電気動力方式を導入する動きが強まっている。特に都市路線バスは、旅客輸送の集約によるメリットが大きい一方で、加減速の頻度が極めて高く、立席乗車もある。そのため専らモータで車両を駆動する電気動力方式を採用することが、一層の省エネルギー、加速性能、乗り心地等の様々な点から最適であると考えられる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。しかしモータはエンジンと全く異なる特性を有するため、その動力性能やエネルギー効率の的確な評価手法を検討し、公式試験方法等に反映して、電気動力方式の普及を促進する必要がある。本報では電動バスを想定し、その駆動モータシステムを単体実験装置上に架装して都市路線バスの運転パターンに即した模擬運転を行い、加減速性能やエネルギー変換効率、回生効果の評価方法を考察した。

2. 実験条件および実験方法

2.1. 想定車両

表1に、想定車両の諸元と台上実験装置における設定を示す。想定車両は車輪内蔵方式の電気モータ2基を搭載した中型および大型の電動バスで、主電源は車載発電機、電池等の蓄電装置、または外部集電のいずれかであると仮定した。モータはインバータ制御の永久磁石式同期型であり、減速機（減速比固定）を介して後輪を駆動することとした⁽¹⁾。検討は主に中型バスで行った。（特記ない限り、車両は中型バスとする）

2.2. 台上実験装置

台上実験においては、この想定車両のモータシステム1基を単体台上運転装置に架装し、負荷として設定する慣性質量や走行抵抗を車両1台の半分に設定することにより、実車走行の1/2相当の規模で模擬運転を行うこととした。図1に、単体台上運転装置の構成を示す。一端に供試モータを架装し、トルク/回転計等を介して、車両質量に相当する電気慣性、および

回転速度に応じた負荷トルクを発生することが可能なエンジンダイナモメータに接続した。

表1 想定したバス車両の諸元

Item	Middle Size Bus	Full Size Bus
Length (mm)	9,000	10,955
Width (mm)	2,300	2,490
High (mm)	3,000	3,095
Passenger (person)	59 + 1 Driver	67 + 1 Driver
Vehicle Mass (kg)	7,800	11,000
Vehicle Mass with 50% Passengers (kg)	9,450	12,870
Traction Motor System	Type	PM Synchronous
	Rated Power (kW)	128 (64 × 2)
	Max. Power (kW)	192 (96 × 2)
	Max. Torque (Nm)	640 (320 × 2)
	Max. Speed (rpm)	12,000
Reduction Gear Ratio	15	20
Wheel Diameter (m)	0.82	0.94
Coefficiency of Rolling Resistance (N/N)	0.010	0.010
Air Drag Force (N/(km/h) ²)	0.162	0.171

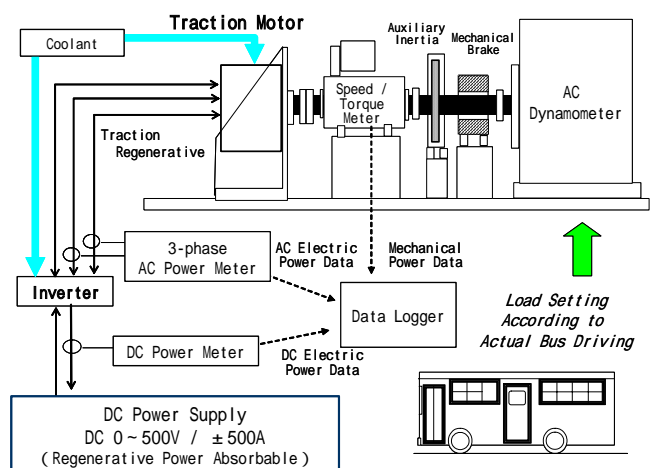


図1 単体台上運転装置の構成

表2に、台上運転パターンとして用いたバス車速パターンを示す。これらは大型車の代表的走行パターンとされる M15 モード、および都市部のバス実車走行車

速データから得た4種類の運転パターンである。測定に使用した車両は機械式変速機装備の一般的な都市路線用大型バスである。路線Aは駅と住宅団地、路線Bは2つの鉄道駅を結ぶ近郊路線である⁽³⁾。路線Cは地下鉄駅と臨海副都心地区を結ぶ、比較的車速が高い路線で、全バス停に停車する場合(C-1)と、一つおきに停車する場合(C-2)を設定した。台上運転においては、それらのパターンをCRT画面に表示させながらインバータ操作卓の加減速ハンドルを操作した。回生制動だけでは制動力が不足する場合は、摩擦制動を併用した。モータの機械出力はトルクと回転速度の測定値から演算した。またインバータの直流電力と、モータ本体の三相交流電力を、図1に示す位置で、それぞれクランプ式の電力計で連続測定した。

表2 都市路線バス車速パターン

Driving Pattern	Location	Maximum Speed (km/h)	All Time Average Speed (km/h)	Running Time Average Speed (km/h)
M15-mode	(Urban)	40	15.6	23.5
Line-A	Suburban Station - Housing Complex	35	17.7	20.8
Line-B	Suburban Station - Another Station	40	16.2	22.1
Line-C-1	Subway Station - Coastal Region	56	19.3	24.4
Line-C-2	Coastal Region - Subway Station	57	14.3	24.9

3. 中型バス設定における実験結果および考察

3.1. 路線バス実走行パターン運転による評価

表1で想定したバスが表2のパターンを運転した場合の1km当たりの走行に要求される仕事量の内訳と、計算上の回生仕事量を図2に示す。路線バスは加減速が特に頻繁であるため、走行仕事量の7~8割が慣性加速抵抗によるものであり、特に路線Cではその相当分が多い。これらの要求走行仕事量に対し、計算上回生が可能な仕事量は60%前後である。

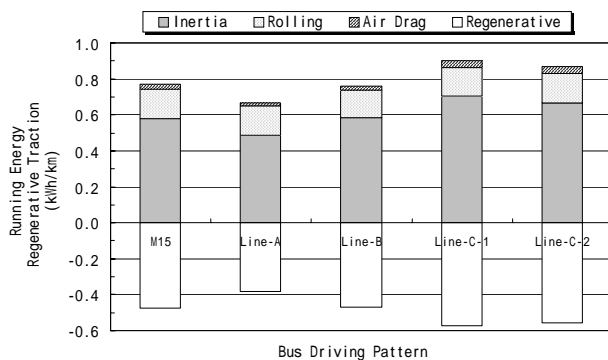


図2 走行仕事量と回生仕事量(計算値)

車両を想定した図1の台上運転装置により各種パターン運転を行って計測したモータシステムの1km当たりの駆動要求エネルギー(kWh/km)を車両1台分の換算値として図3に示す。モータの駆動仕事量に対し、モータの交流有効電力量(以後、「交流電力量」という)は6~12%、インバータ電源側の直流電力量(以後、「直流電力量」という)は10~18%多い値を示す。

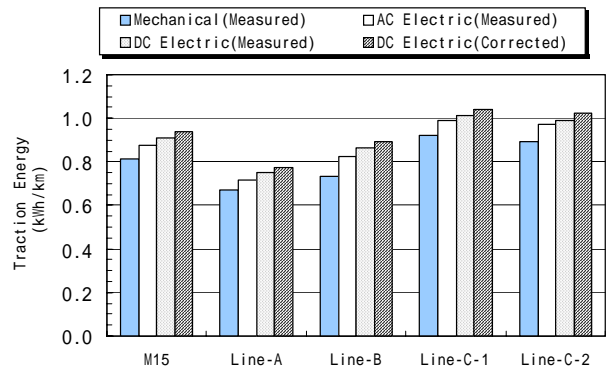


図3 都市内パターン運転時における要求電力量

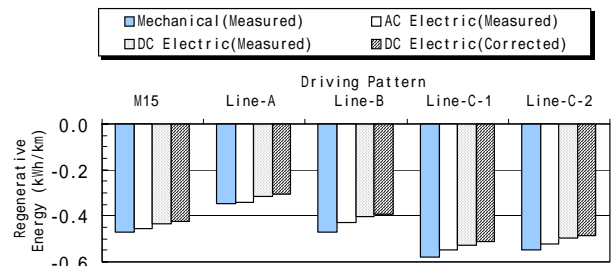


図4 都市内パターン運転時における回生電力量

交流電力量と、直流電力量や機械仕事量の値は非常に近接している。そのため、それらの差分として求められるインバータ損失やモータ損失を厳密に評価するためには、交流電力、直流電力、機械出力の各々の測定について十分に高い精度を確保する必要がある。さらに図中には、直流電力量に、減速機の機械損失と制御機器自体の消費電力を加算した修正値(以後、「修正直流電力量」という)を併記した。この直流電力量の修正値は、測定値に対して3%増となり、また機械仕事量を14~21%上回る値となる。同様に、各種パターン運転における制動時のモータシステムの回生エネルギーを図4に示す。この場合は駆動時とは逆に、モータの回生仕事量に対し、交流電力量は2~9%、直流電力量は8~15%、修正直流電力量は10~16%下回

る値を示す。なお各種パターン運転における要求エネルギーに対する回生エネルギーの比率は、機械仕事量ベースでは60%前後であるのに対し、交流電力量ベースでは50%前後、直流電力量ベースでは40~50%である。また実走行において実際に回生が期待できる修正直流電力量ベースでは40~45%と評価され、路線バスの電動車両化による省エネルギーの可能性の高さが明らかになるとともに、そのために回生電力を的確に回収し再利用する技術の重要性がうかがえる。

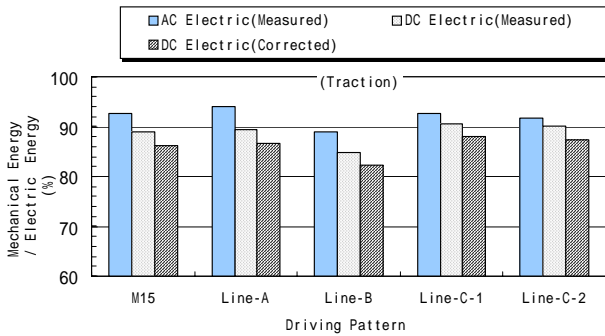


図5 パターン運転時の力行におけるモータ効率

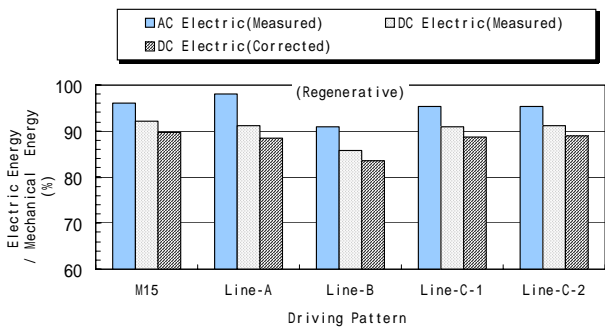


図6 パターン運転の回生制動におけるモータ効率

これらの結果から、各種パターン運転におけるモータシステムの駆動時および回生時の平均的な電気-機械エネルギー変換効率を図5、図6にそれぞれ示す。駆動時の効率を、要求電力量に対するモータ仕事量の比率として評価すると、交流電力量では89~94%、直流電力量では85~90%、修正直流電力量では82~88%である。一方、回生時の効率を、モータ仕事量に対する回生電力量の比率として評価すると、駆動時よりも若干高い値を示す。各種パターンの中では、渋滞を伴う路線Bのパターン運転ではやや効率が低下する。これらの値は、同一の車両を誘導モータシステムによって駆動した場合より10ポイント以上高く⁽³⁾、加減速を伴うパターン運転においても、界磁の励磁が不要な永久磁石式モータの優位性を示すものと考えられる。

3.2. 単純な発進加速、減速停止パターンによる考察

(1) 車両およびモータシステムの機械的・電氣的な挙動

上記の実験では、本報で設定したモータ駆動システムを複雑なバスの実走行パターンにしたがって台上運転を行ったが、それらの運転パターンは多数のショートトリップ(車両が発進し加減速を経て停止に至るまでの走行の最少単位、以後「トリップ」という)の集合である。そこで、次に単純なトリップ、およびそれを構成する単純な加速、減速のパターンに沿ってモータシステムの評価手法を考察することとした。その加速、減速のパターンを表3に示す。車速変化率は±2km/h/sec(本報では緩加速、緩減速とする)または±4km/h/sec(本報では急加速、急減速とする)の一定値とした。

表3 単純な加速・減速のパターン

Condition	Vehicle Speed (km/h)	Time (sec)	Acc. or Dec. Rate (km/h/sec)
Slow Acceleration	0 30	15	2
	0 50	25	2
Steep Acceleration	0 30	7.5	4
	0 50	12.5	4
Slow Deceleration	30 0	15	2
	50 0	25	2
Steep Deceleration	30 0	7.5	4
	50 0	12.5	4

加速時のモータの観察例として、発進から急加速で50km/hに達するまでの機械的および電氣的な挙動(1基分)をそれぞれ図7、図8に示す。本報で想定した電動バスは、変速操作が不要で、発進から50km/hまで4km/h/sでの連続加速が可能であるため、都市内の混合交通の中での加速能力は従来のバスより大幅に向上する。一方、乗客(特に立席客)にとっては乗り心地の向上、運行面では所要時間の短縮が期待できるため、動力性能面の改善度は高いと判断される⁽³⁾。

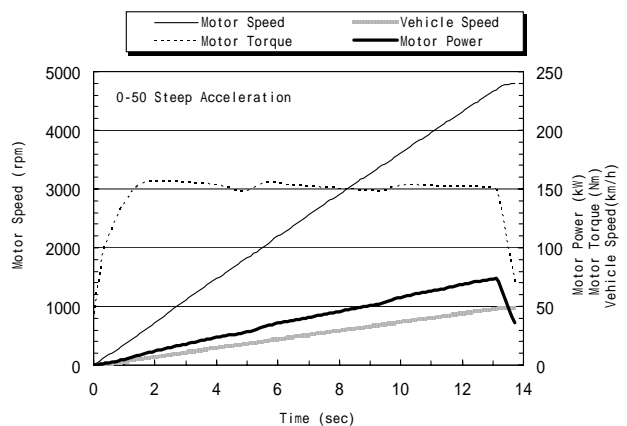


図7 発進加速時の機械的な挙動(急加速)

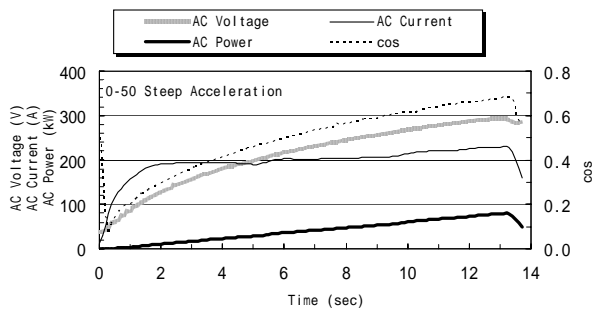


図8 発進加速時の電氣的な挙動（急加速）

車両およびモータの加速に対してトルクはほぼ一定値をし、機械出力はおおむね車速に比例して上昇する。この間、交流電圧と力率（cos）は車速、モータ回転と共に上昇するが、交流電流はほぼ一定で、交流電力は車速およびモータ回転速度にほぼ比例する。

一方、減速時は、モータの制動トルクは減速開始と同時に立ち上がりその後停車までほぼ一定であり、回生制動仕事率（パワー）は制動初期にピークに達した後に漸減する。その際の電氣的な挙動例として、50km/h から回生制動・急減速で停車するまでの状況を図9に示す。交流回生電力は上昇から減少に転じ、交流電流は制動トルクと同様に停止直前までほぼ一定値を示す。これらの結果から、永久磁石式同期モータにおいては、トルクをクランプ測定による交流電流値から推定することにより、トルク計を使用しなくてもモータの軸出力を把握することが可能と考えられる。

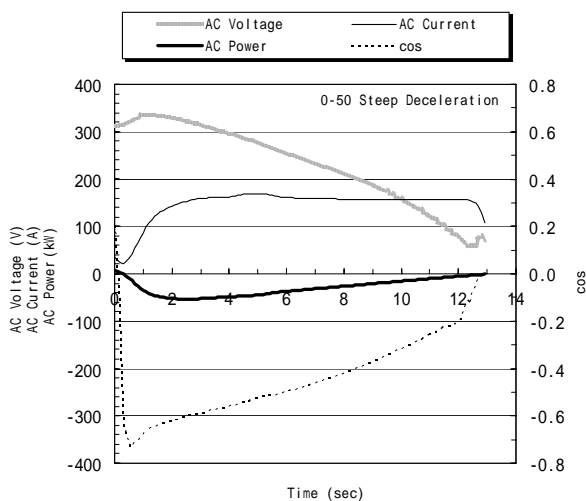


図9 減速停止時の電氣的な挙動（急減速）

(2) 入出電力量の評価

表2のパターンにしたがって想定車両の台上運転を

行った場合の、加速または減速1回当たりの駆動要求電力量または回生電力量（kWh/test）を修正直流電力量として図10に示す。50km/hまでの加速には、30km/hまでの加速の場合の約3倍の電力量を要す。また50km/hからの減速では、30km/hからの減速の場合の2倍強の回生電力量が得られる。しかし加速・減速の緩急の違いによる電力量の差は比較的小さく、50km/hまでの加速においてむしろ緩加速の場合の要求電力量が急加速の場合より約10%多い程度である。

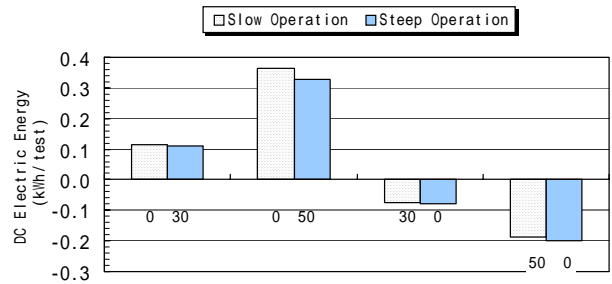


図10 発進加速 / 減速停止1回当たりの電力量

しかし、上記のような加速または減速の緩急の違いは、その前後に続く走行状態の持続時間や距離に影響を与えるため、加速、減速に伴う入出電力量は、それら前後の走行条件を含めた等しい走行距離を対象として評価することが妥当であると考えられる。その一例として、0-50km/hの緩急の加速の直後、または減速の直前に50km/hの定速走行部分を加えて合計200mの走行距離を採り、その間における要求電力量または回生電力量を図11に示す。

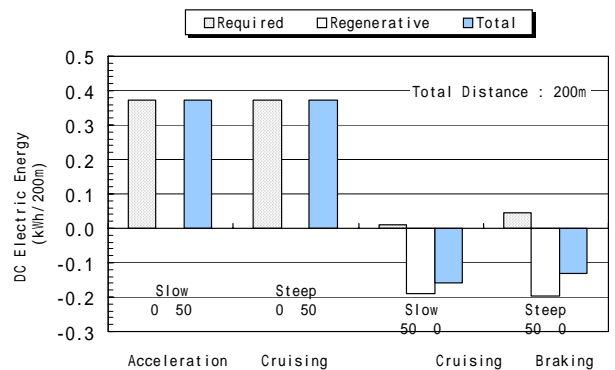


図11 発進加速 / 減速停止時の、前後の定速走行部分を含む1回（200m）当たりの電力量

加速の場合は緩急の違いによる差はみられない。減速の場合は直前の定速走行時の要求電力量、減速時の回生電力量、およびその合算値を示す。減速時のみの

回生電力量は急減速の方が若干多い。しかし緩減速の場合は急減速の場合より定速走行部分が短かくその部分の要求電力量が少ないため、合算値として求めた回生電力量は、急減速の場合よりもやや多いという結果が得られた。

これらの単純な緩急の加減速、および定速運転におけるモータの電気 - 機械エネルギー変換効率(直流電力量ベース)を図12に示す。加速、減速の場合は90%を超え、また加速時は定速走行時を数ポイント上回っており、図5および図6に示したバスの実走行パターン運転全体にわたる高い平均効率が裏付けられた。

一般的なエンジン自動車の加減速運転においては、制動時は運動エネルギーが全て摩擦熱として廃棄されたため、定速走行時よりも燃費が悪化する。しかし供試モータは加速時、減速時に高いエネルギー変換効率を示し、その結果、要求エネルギーの低減と回生効果の向上が図られている。

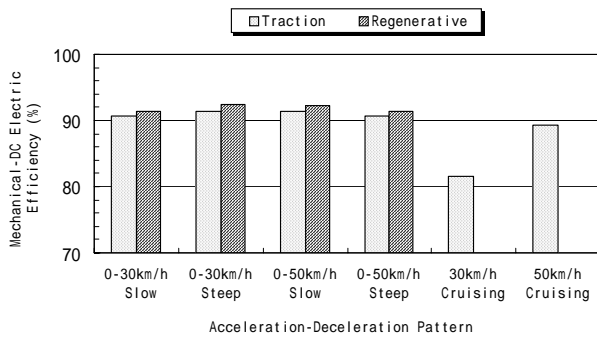


図12 発進加速・減速停止時のモータ効率

4. 大型バス設定の実験結果および中型バスとの比較

4.1. 車両の大型化に伴うモータ負荷の増大

想定車両を表1の大型バスとした場合の、駆動モータの回転速度とトルクの分布を、路線C-1を例にとり、中型バスと比較して図13に示す。図2によれば車速が比較的低い路線バスの走行抵抗のほとんどは車両質量に比例する慣性加速抵抗と転がり抵抗が占め、空気抵抗の比率は非常に小さいため、走行抵抗自体もほぼ車両質量に比例するといえる。大型バスは中型バスと比較して、乗員を含めた車両質量は1.36倍であり、実質的な減速比も大きく採ったため、回転速度、トルクとも増大している。特に中・高速回転域でのトルクの増加が顕著である。

この路線C-1のパターンを運転した場合の、大型バスのモータの機械出力の連続データを、中型バスと比較して図14に示す。中型バスの場合はほぼ全般にわ

たりモータ出力は定格値以下に留まっているが、大型バスの場合は、加速時等に定格値を超える箇所がいくつか見られる。エンジンと異なり、モータは温度上昇が許容される短時間内であれば定格値を大幅に上回る出力を発揮できるため、前項で中型バス用として検討したモータシステムを、大型バスで使用することも可能であると判断される。

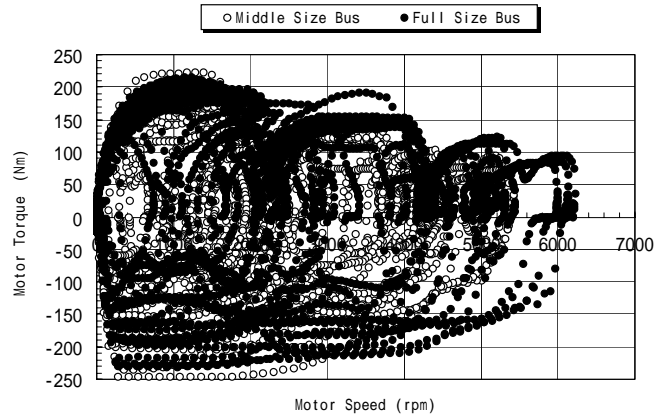


図13 中型/大型バスのモータ回転速度とトルク (路線C-1)

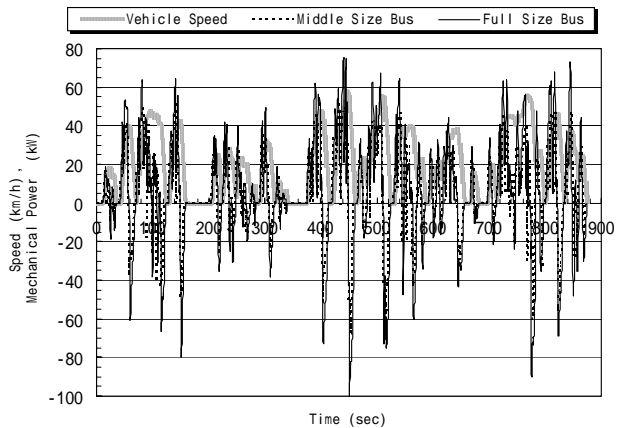


図14 中型/大型バスの機械出力 (路線C-1)

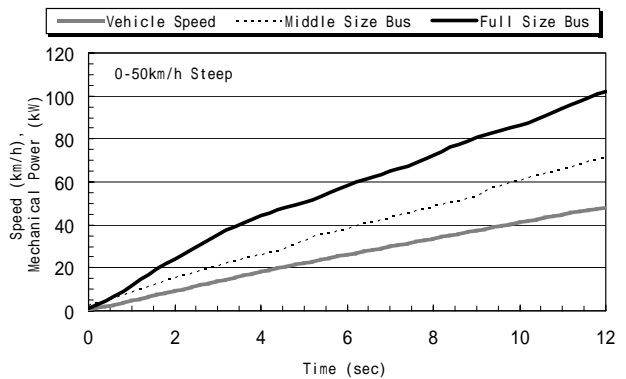


図15 中型/大型バスの発進加速時の機械出力(急加速)

表3の急な発進加速を行った場合の、大型バスのモ

ータ出力を、中型バスと比較して図 15 に示す。車両質量の増加を反映して、大型バスは中型バスを約 40% 上回っているが、特に車速が 50km/h に達する直前では、短時間最大出力である約 100kW を示している。

4.2. 直流電力量の比較と効率の評価

表 2 のパターン運転を行った場合の、大型バスの 1km 当たりの直流電力量（計測値）を、中型バスと比較して図 16 に示す。力行時の要求電力量は中型バスを 40~50% 程度上回り、また制動時の回生電力量は中型バスを 20~30% 上回っている。中型バスに対する車両質量の増加の割に要求電力量の増分が大きいのは、力行時のモータの使用領域が効率のやや低い側へシフトしたためであると考えられる。

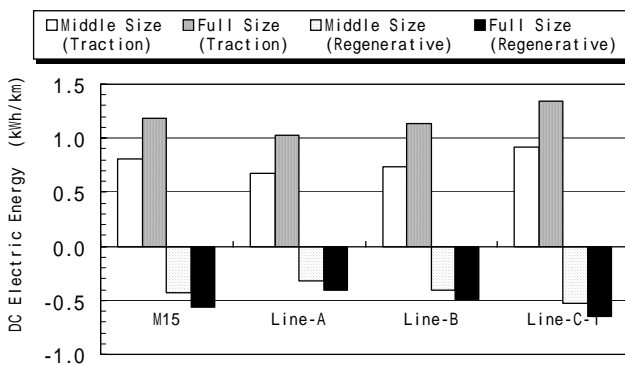


図 16 中型 / 大型バスのパターン運転時の直流電力量

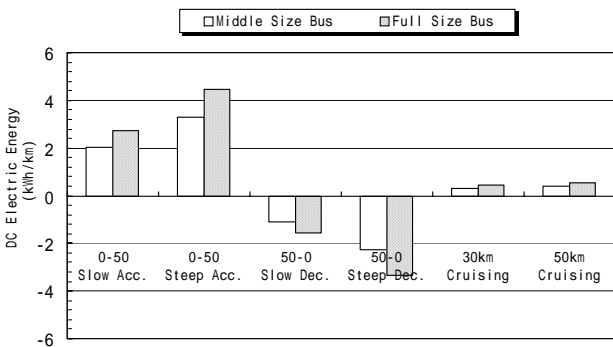


図 17 中型 / 大型バスの単純加速 / 減速時の直流電力量

表 3 の単純な発進加速・減速停止、および定速運転を行った場合の、大型バスの 1km 当たりの直流電力量を、中型バスと比較して図 17 に示す。力行時の要求電力量は中型バスを 35~40% 上回り、また制動時の回生電力量は中型バスを 40% 前後上回っている。

大型バスの各種運転における、モータの電気 - 機械エネルギー変換効率を図 18 に示す。力行時においては 90% 前後で、図 5 の中型バスの結果とほぼ同等である。一方、回生制動時は 93~95% であり、図 6 の中型

バスの結果を若干上回る効率を示した。

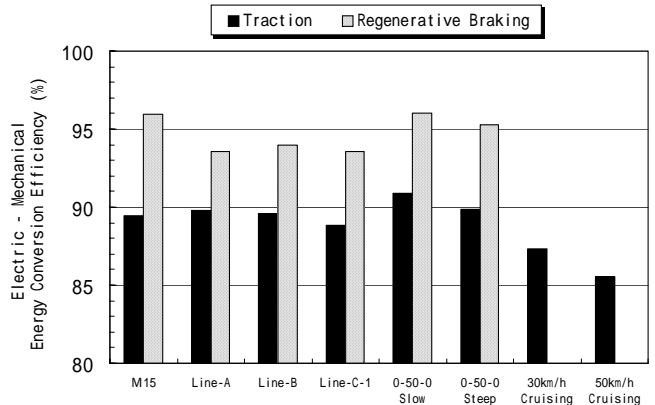


図 18 大型バスの各種運転条件におけるモータ効率

5. まとめ

- (1) 永久磁石式同期モータ 2 基を搭載した電動路線バス車両を想定して、そのモータを単体運転装置上に架装し、実車の 1/2 規模の台上模擬運転を行った。
- (2) 実走行パターン運転におけるモータ仕事率、電力量等の計測により、モータの変換効率は 90% 前後、回生電力量は要求電力量の 40% 以上と評価した。
- (3) 加速・減速の緩急の違いが、前後の定速走行を含めた走行距離当たりの入出電力量に与える影響は小さいこと、また加減速時のモータ効率は定速走行時を上回ることを明らかにした。
- (4) 想定車両を大型バスとした場合、中型バスと比較して、電力や電力量はより 35~50% 増大するが、モータの効率はほぼ同等の高い値が得られた。
- (5) 本報のモータシステムを路線バス車両に適用すれば、加速能力と快適性の向上が図られ、かつ加減速運転時のモータ自体のエネルギー変換効率が高いことが確認された。各種電源の発電効率を考慮する必要があるが、動力性能と省エネルギーの点で、都市路線バス用として十分な実用性を有するものと評価した。また、この結果により、モータシステムの特性を踏まえた試験手法を策定するための手がかりを得た。

参考文献

- (1) 加部 他：都市交通車両用モータドライブシステムの開発、自動車技術会 2003 年春季大会学術講演会
- (2) 緒方 他：HEV ノーステップバスの開発、自動車技術会 2001 年春季大会学術講演会
- (3) 林田 他：都市バスの実走行解析に基づくシフト・ブレーキ方式の活用、2002 年秋季大会学術講演会