

# 省エネルギー運転における補機の影響評価

渡邊 翔一郎\* 古関 隆章 (東京大学)

磯部 栄介 (日本地下鉄協会)

## Evaluation of Effect Calculation of Auxiliary Machines on Energy-Saving Train Operation

Shoichiro WATANABE\*, Takafumi KOSEKI (The University of Tokyo),  
Eisuke ISOBE (Japan Subway Association)

For energy-saving on train operation, generally there are trade-off relationships between energy consumption and running time. However, in last research, that energy consumption contains only running energy without energy consumption of auxiliary machines. In this paper, the authors analyze the effects of energy consumption of auxiliary machines in case of linear metro. Together with total energy consumption, the effects of auxiliary machines will be also appeared.

キーワード：電気鉄道, 省エネルギー, 補機, 走行時分, 回生ブレーキ, リニア地下鉄

(Electric Railway, Energy-Saving, Auxiliary Machines, Running Time, Regenerative Brake, Linear Metro)

### 1. はじめに

現在の日本の鉄道ダイヤは保守的に決められており、乗客の乗車時間が最優先に考慮されている。事業者は省エネルギー問題への取り組みとして鉄道車両や電気設備において電気機器の効率化などの改良を行ってきたが、列車運行の方法の改善によって消費エネルギーを大きく低減できる可能性のあることが既に知られている<sup>(1)</sup>。この方法はソフトウェア的な手法であるため、ハードウェアに大きく手を加えるような設備改造が不要である。したがって、事業者側にとっては安価で取り組みやすい手法である。

ここで重要なのが回生ブレーキで、現在の車両の回生率をソフトウェア的な手法により高めることが目標である。そこで注目したのは回生率向上に寄与する回生負荷の一つである車両の補機である。本稿では、まず車両の補機電力が省エネルギー運転手法にどの程度影響するのかを考察する。

### 2. 車両の補機電力を検討する目的

#### <2.1> 列車の消費エネルギーと走行時分の関係

列車の電動機の消費エネルギーと走行時分は一般的にトレードオフの関係にあることが知られており<sup>(2)</sup>、その関係性を応用した駅間走行時分の配分最適化による省エネルギー化も検討されてきた<sup>(3)</sup>。しかし、補機の消費するエネルギーは走行時分に比例して増加するので電動機と補機の両方を足しあわせた列車の消費エネルギーは単調減少にならない

可能性がある。そこで本稿では補機の消費するエネルギーが実際の基準運転時分を考察する範囲に影響を及ぼすのかについて検証を行った。

#### <2.2> 当増分消費エネルギー則<sup>(3)</sup>

当増分消費エネルギー則とは、文献(3)で提唱されている駅間走行時分の最適化モデルである。駅間  $i$  において、駅間走行時分  $T_i$  に対する消費エネルギー  $W_i$  が単調減少の関数  $W_i(T_i)$  で表されるとき、ラグランジュの未定乗数法を用いるとすべての駅間合計の消費エネルギーを最小にする走行時分が求まり、それは各  $i$  における  $W_i(T_i)$  の傾きが一致するときである。

### 3. 検証方法

#### <3.1> エネルギーの計算条件

本稿ではリニア地下鉄を想定して運転曲線の計算をすることにより消費・回生エネルギーを得た。その際の架線電圧と補機の消費電力は走行中一定とし、回生失効は起こらないものと仮定する。また、走行パターンは力行・惰行・制動とし、乗車人数は定員乗車としている。

#### <3.2> 力学モデルと運転曲線の計算

本稿で扱うモデルは地下鉄道なので、列車の走行抵抗  $R_r$  [N] の計算には下記の式<sup>(4)(5)</sup>を用いて、過去の研究<sup>(6)</sup>とは区別する。

$R_{r1}$  は明かり区間の走行抵抗[N],  $R_{r2}$  はトンネル区間の走行抵抗[N],  $M_M$  は電動車質量[t],  $M_T$  は付随車質量[t],  $n$

は編成両数,  $v$ は速度[km/h],  $M$ は乗客を含めた列車質量[t]である。明かり区間とトンネル区間を走る列車の走行抵抗の違いを図1に示す。ここでは1M1Tの2両編成の車両を想定し, 出発抵抗に係る速度6km/h以下の部分は除外している。なお, 車両数が大きくなると $R_{r1}$ のグラフの傾きは速度が大きくなるに従って顕著に大きくなる。

$$R_{r1} = 9.8[(1.65 + 0.0247v)M_M + (0.78 + 0.0028v)M_T + \{0.028 + 0.0078(n - 1)\}v^2] \quad (1)$$

$$R_{r2} = 9.8(2.088 + 0.0394v + 0.00067v^2)M \quad (2)$$

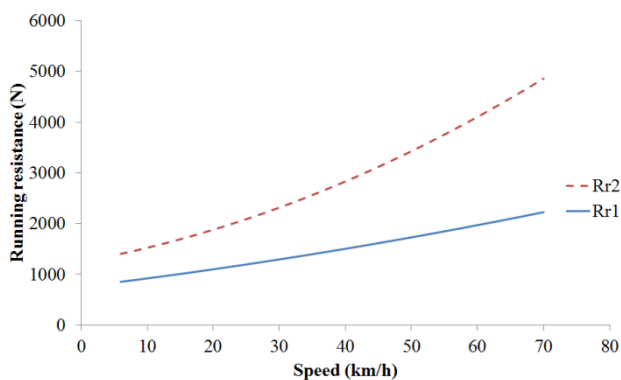


Fig.1. Running resistance of cars in open and tunnel section.

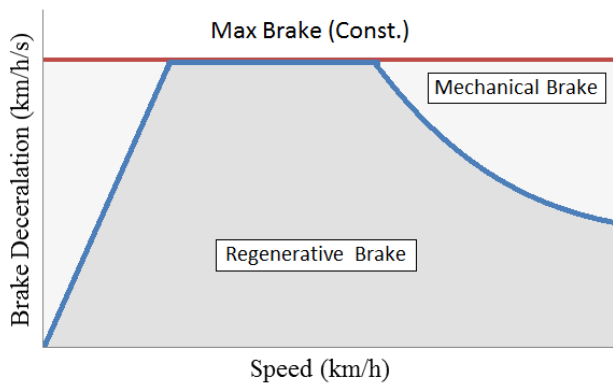


Fig.2. The speed relationship of mechanical and regenerative brakes in cooperative brake with linear motor.

### 〈3・3〉ブレーキのかけ方

本稿では電空協調ブレーキを扱うが, 省エネルギー運転に注目して制動時にできるだけ回生ブレーキに負担させることを考えている。それは走行時分を守って省エネルギー運転を実現する場合には, 既に知られていることとして回生ブレーキをフルに活用した運転手法が良いためである<sup>(6)</sup>。図2にリニアモータの回生性能曲線を示す。したがって速度6km/h以上の場合には図2に回生性能曲線に沿ってブレーキをかけて制動力を得る走行パターンを扱う。6km/h以下

のことについては次節で詳しく述べる。

### 〈3・4〉エネルギーの計算方法

消費電力量  $E_p$  [kWh]と回生電力量  $E_r$  [kWh]の計算には式(1),(2)式を用いた。

$$E_p = \int F_m v \frac{1}{\eta} dt \quad (3)$$

$$E_r = \int F_m v \eta dt \quad (6 \leq v) \quad (4)$$

$F_m$ は引張力[N],  $\eta$ はエネルギーの変換効率で, リニアモータの効率とインバータの効率, 駆動装置の効率を考慮している。 $\eta$ は架線電圧, 電流, 列車速度等を指数にする関数であるが, ここでは簡単のため定数で与えている。

(4)式において, 6km/h以下では回生ブレーキによって得られる電力が小さいため, その領域では $E_p$ は0にしている。

補機の消費するエネルギーは季節によって大きく異なる。そこで本稿では冷房を使う夏季と暖房を使う冬季それぞれにおいて計算した。

### 〈3・5〉リニアモータの特性

ここで, リニアモータの特性について述べる。リニアモータは車両側の電磁コイルによって生ずる磁界と, 地上側に敷かれたリアクションプレートの渦電流によって生ずる磁界によって推進力を得る。そのため多くの電気鉄道車両に用いられている誘導電動機とは引張力特性・回生性能特性が大きくことなり, またモータ効率も異なる。一般的にリニアモータは誘導電動機に比べ効率は劣るが, 車輪駆動推進でないため勾配に強いという特徴を持つ。したがって本稿では次節に述べる勾配走行での検討では比較的大きな勾配を想定してシミュレーションしている。

### 〈3・6〉列車長を考慮したシミュレーション

本稿では仮想的な路線を走行するシミュレーションに加えて, 実路線の勾配, 曲線等の情報を元に列車長を考慮したシミュレーションを行い, 列車抵抗を算出した。

ここで勾配や曲線などの列車抵抗を考慮する理由を述べる。補機の消費するエネルギーは列車の走行時分が長くなるほど大きくなるが, その影響を受けるかどうかを考えるには相対的に電動機の消費エネルギーを考えなければならない。電動機の消費エネルギーの増減は列車抵抗の大きさに左右される。したがって補機の影響を評価するためには様々な路線を想定したシミュレーションが必要であるため, 表1のように4つの路線ケースを検討した。Case 1~3は仮想的な路線で, 補機の影響を一般的に評価するために行った。Case 4はリニア地下鉄の走行する実路線で, 勾配と曲線が距離に応じて変化する要素を含んでいる。ここでは

Table 1. Simulation cases.

Running pattern	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Gradient	0 %	12.5 %	-12.5 %	variability
Distance	1000 m	1000 m	1000 m	670 m

実路線上で補機の影響を調べている。

#### 4. シミュレーション結果

図3～6にCase1～4のシミュレーション結果を示す。各図の(a)(b)はそれぞれ夏季と冬季を指している。

##### 〈4・1〉全体の傾向と補機の影響

図3～6の電動機と補機を合わせた消費電力量と走行時分の関係を見ると、図3(a)の水平区間の115秒以降を除くすべての領域で単調減少となっている。これらの結果から、基準運転時分で走行する範囲では消費エネルギーと走行時分の関係がトレードオフであるという結果に一般性があることがわかり、Case4の図6の結果からも理想より複雑な実路線のケースでもトレードオフ関係が確認された。したがって当増分消費エネルギー則は一般的に有効である。

##### 〈4・2〉単調減少でない場合

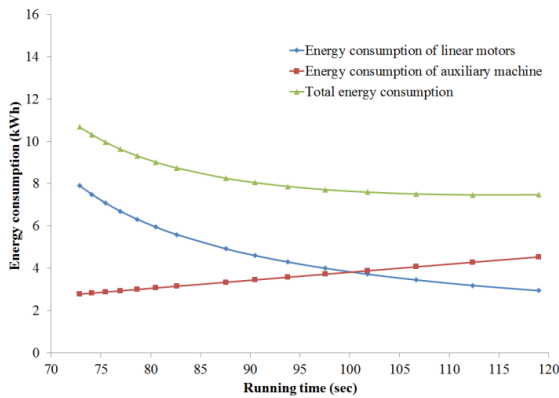
図3(a)の水平区間の115秒以降では単調減少から単調増加に転じる最小点が見られた。この領域を詳しく分析すると、最小点になる時のノッチオフ速度は42km/hのときであることがわかった。

##### 〈4・3〉当増分消費エネルギー則が適用できる場合とできない場合

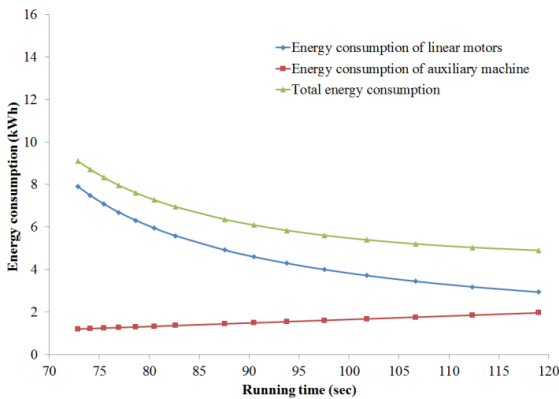
図3(a)では最小点が115秒あたりで見つかったが、図6を見るに、一般的な基準運転時分を考えると当増分消費

エネルギー則の適用には影響なく、これはダイヤ乱れ時であっても影響はないものとする。その理由を考察すると、まず複数駅を含むある駅間を走行するのに要する時間を $T_{Total}$ 、各駅間で電動機が消費するエネルギーの総和を $E_A$ 、各駅間で補機が消費するエネルギーの総和を $E_B$ とすると、 $T_{Total}$ が決まると $E_B$ は一意に決まるため $E_B$ は $T_{Total}$ の関数と考えることができる。一方、 $E_A$ は単調減少であることが図3～6で明らかになったので $E_A$ を最小化するような駅間走行時分の配分最適化を考えれば良い。また、回生失効が起こる場合についても $E_A$ は単調減少であることに変わりないので適用は可能である。また、ダイヤ乱れが生じた場合には $T_{Total}$ が変化するため $E_B$ も変化するが、前述のとおり $E_B$ は $T_{Total}$ の関数で単調増加であるため、最適化問題のモデルを変えることなく解くことが可能である。

しかし、一方でローカルに補機電力が起こる場合には、当増分消費エネルギー則を適用するにあたって再考が必要とされる。この場合にはまず $E_A$ を最小化する解が $T_{Total}$ を最小にする解とは必ずしも一致しない。したがってこの場合には $E_{Total}$ を最小化する最適化問題を考える必要があり、その制約条件の一つに「駅間走行時分が長くなり過ぎないこと」が加わることになる。具体的には駅間ごとに空調の電源をON/OFFする場合や、長い駅間を走行する際に早めにノッチオフして惰行でゆるゆると走る場合である。

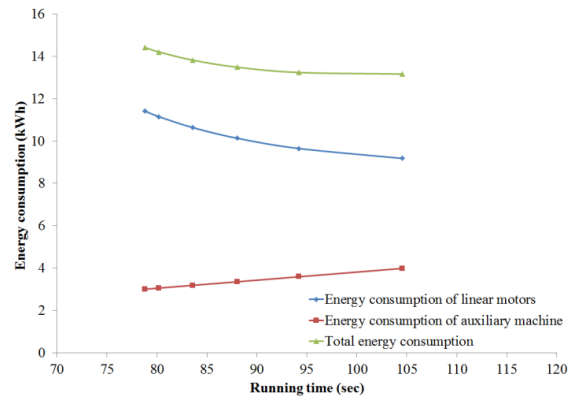


(a) Summer

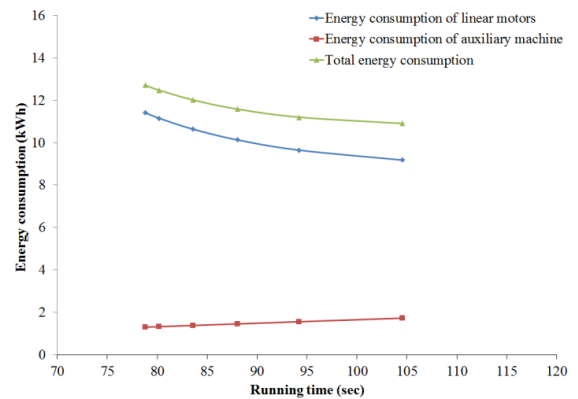


(b) Winter

Fig.3. Relation between running time and energy consumption on 0% of gradient.

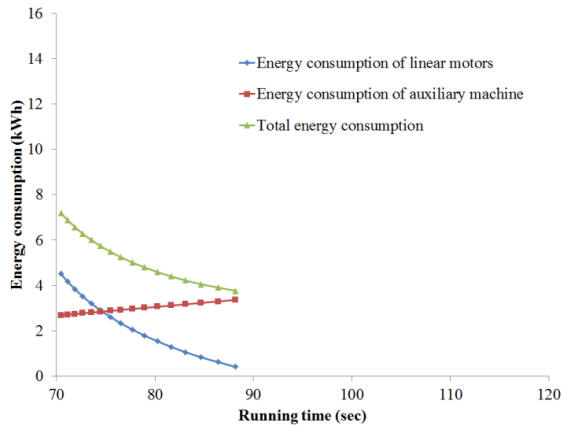


(a) Summer

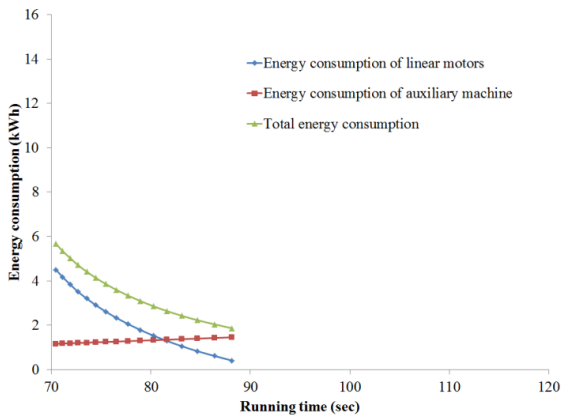


(b) Winter

Fig.4. Relation between running time and energy consumption on 12.5% of gradient.



(a) Summer



(b) Winter

Fig.5. Relation between running time and energy consumption on -12.5% of gradient.

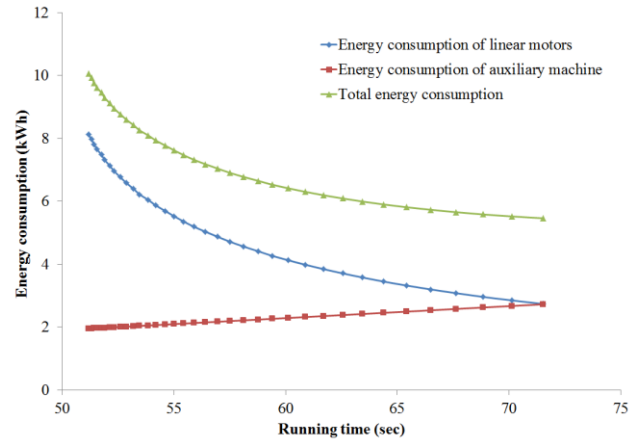
## 5. 結論と今後の課題

### 〈5-1〉結論

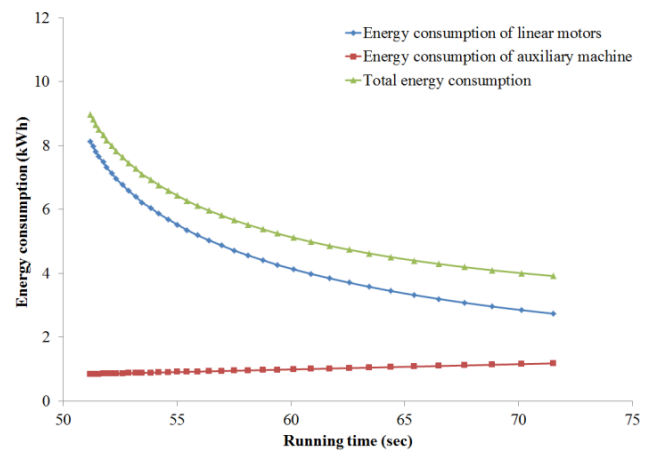
本稿では、補機の電力が一定であれば、その影響を考慮しても一般的な運行管理の中において消費エネルギーと走行時分の関係がトレードオフの関係にあることを明らかにした。そして増分消費エネルギー則の適用に際して補機電力の時間的推移がある場合の問題点を明らかにした。

### 〈5-2〉今後の課題と具体的検討方法

また、リニア地下鉄を対象に走行抵抗の大きいトンネル区間で検証したが、走行抵抗の小さい明かり区間で走行した場合ではグラフの最小点が走行時分の短い点に移動することが推察されるため、今後その傾向を分析する必要がある。また、駅間距離が長い快速列車の走行や、最終的な目標である「補機が回生負荷として回生率の向上にどれほど寄与するのか」についても検討していく。具体的には、饋電回路シミュレータを構築し、各列車が消費する電力と変電所の入力電力を評価する。このとき、1列車を対象にするのではなく列車群を対象とし、互いの電力の融通を分析することが必要である<sup>(7)</sup>。ここでは走行中だけでなく駅停車中や余裕時分に消費される補機電力も考慮したい。



(a) Summer



(b) Winter

Fig.6. Relation between running time and energy consumption on a real railway conditions.

## 文 献

- (1) 濱崎康宏：「新京成電鉄における省電力への取り組み」、鉄道車両と技術、No.196、pp.15 (2013)
- (2) Y.V. Bocharnikov, A. M. Tobias, C. Roberts, "Reduction of Train and Net Energy Consumption Using Genetic Algorithms for Trajectory Optimisation," Railway Traction Systems (RTS 2010), IET Conference, 2010.
- (3) 宮武昌史：“省エネルギーな列車ダイヤ作成のための簡易数理モデル”，電気学会論文誌D, Vol. 131, No. 6, pp. 860-861, 2011
- (4) Takafumi Koseki, Yuto Takahashi, and Zhe Yang, "Energy-Saving Operation of an Electric Train at Multiple Service Section Based on Sensitivity Analysis of Energy Consumption to Running Time", ICEMS2012, October 2012, Sapporo, Japan
- (5) Takafumi KOSEKI and Takashi NODA: "Run-Curve Design for Energy Saving Operation in a Modern DC-Electrification," Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 3 (2010) No. 1, pp.349-357
- (6) 渡邊翔一郎, 森拓哉, 古閑隆章, "省エネルギー運行管理のための運転法の比較分析と列車群電力可視化", 交通・電気鉄道研究会, TER-13-017, 2013年5月, 東京
- (7) 渡邊翔一郎, 楊 哲, 古閑 隆章, 水間 毅, 濱崎 康宏: 「直流電気鉄道の電力制限ブレーキ支援現車試験—省電力効果の実証と問題点の解決法—」平成25年度電気学会産業応用部門全国大会 5-34, 2013年8月