

S1-2-1

車載蓄電装置を併用する直流電車の
最小エネルギー運転制御方法の理論的検討

[電] 松田 邦彦*(上智大学) [電] 高 英聖(上智大学) [電] 宮武 昌史(上智大学)

Theoretical Investigation of Train Operation Minimizing Energy Consumption
in DC Electric Railway with on board Energy Storage Device
Kunihiko Matsuda, Ko Hideyoshi, Masafumi Miyatake(Sophia University)

In recent years, it is possible to equip trains with energy storage devices because its energy and power density become higher. The devices are for instance, a secondary battery and electric a double layer capacitor (EDLC). Above all, the EDLC has advantages such as maintenance free, long lifetime, rapid charge/discharge and high efficiency. Therefore, the EDLC is the most suitable to equip trains. The onboard EDLC enables us to compensate voltage drop and prevent regenerative failure. We formulate the optimal control to find the acceleration/deceleration and charge/discharge commands minimizing energy consumption as a mathematical programming problem. We solve the problem by using sequential quadratic programming (SQP) method. In consequence, the EDLC helps the train to increase acceleration/deceleration at high speed under the optimized operation. Energy saving efficiency of the EDLC is estimated to be about 22.5%.

キーワード：電気二重層キャパシタ、運転曲線、最適化、省エネルギー、逐次二次計画法

Keyword: Electric Double Layer Capacitor (EDLC), Running Curve, Optimization, Energy Saving, SQP method

1. はじめに

近年、高性能二次電池、電気二重層キャパシタといった蓄電装置の高エネルギー密度、高出力密度化が進むにつれ、列車への搭載が可能になってきた。なかでも、電気二重層キャパシタは、メンテナンスフリー、長寿命、内部抵抗が小さいため大電流の急速充放電が可能、高効率であるといった特徴がある。そのため、列車の運転用補助電源として適していると考えられる。

蓄電装置の車載によって、力行時には電圧降下の補償により饋電損失の減少などが、制動時には再生電力の有効利用と再生失効の防止などが見込まれる。これまで、列車への蓄電装置の応用に関する検討は様々あるが、省エネルギーという観点から蓄電装置を走行中のどの時点で充放電すべきかという検討は十分でない。筆者らは、最小エネルギーを実現する蓄電装置の充放電法を検討すれば、パンタ点電圧などに基づく現実的な制御法との比較を行い、制御法の改良に生かせると思う。

これまで筆者らは、蓄電装置がない場合について、最小エネルギーを与えるノッチ指令を求める運転曲線最適化に関する研究を行ってきた[1][2]。本研究では、その経験を生かし、電気二重層キャパシタを使用したときのノッチ指令と充放電指令を同時に最適化する手法を検討し、蓄電装置の効果的な使用方法に関する知見を得ることを目的とする。

2. 回路のモデル化

図1のような一列車の回路モデルを用いて、最適化を行った。

変電所からの電力送電方式は、変電所からの送り出し電圧 V_s

を一定値として、列車の両脇から電力を供給することが可能な、並列饋電方式とした。また、キャパシタに充電または放電を行う時は、充電量による電圧変化が大きいためチョップを通して電圧変換が必要である。チョップの、効率を一定として最適化を行った。

また、列車の再生電力は変電所、キャパシタが双方共に吸収できるものとしてシミュレーションを行った。なお、短時間当たりノッチを一定で運転を行う時には、列車の消費電力はほぼ一定であると考えられる。以下の定式化では、時間領域を離散化し、回路方程式を解く必要がある。計算をするにあたり、列車を定電力源として扱う事が望ましいが、今回のモデル化では計算の簡略化のために定電流源として扱った。

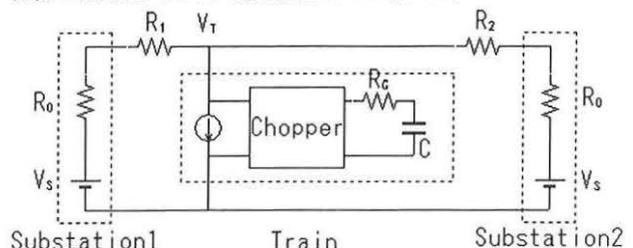


図1 直流回路としての饋電回路

変電所から列車へ流れる電流は、(1)で表される。

$$I_S(x, V_T) = I_{S1}(x, V_T) + I_{S2}(x, V_T) = \left(\frac{V_S - V_T}{R_0 + R_1(x)} + \frac{V_S - V_T}{R_0 + R_2(x)} \right) \dots (1)$$

$R_1(x), R_2(x)$ は列車と変電所間の距離に比例して変化する架線抵抗値、 R_0 は変電所内部抵抗、 R_c はキャパシタ内部抵抗とする。

3. 問題の定式化および最適化法

3.1. 問題の定式化

n, u をそれぞれ列車の引張力、キャパシタからの充放電電流を決定する制御入力、 x, v, V_{cap} を列車の位置、速度、キャパシタの電圧の状態変数とすると列車の最適運転法およびキャパシタの最適充放電パターン²の最適制御問題は以下の数理計画問題として記述される。なお、架線電圧 V_T は、これらの制御入力、状態変数が既知であれば決定する変数と考えられるが、解析的に解くのは困難である。架線電圧が既知でないと微分方程式、回路方程式を解くことが出来ないため最適化を行う上で不具合が生じる。その為、本定式化では V_T を擬似的な制御入力として扱った。

数理計画問題

列車の運動方程式、キャパシタの電圧が以下の微分方程式と初期条件、終端条件で表され、

$$\dot{x} = v \quad \dot{v} = f(n, v, V_T) - r(x, v) \dots (2)$$

$$\dot{V}_{cap} = -I_{cap}(u) / C \dots (3)$$

$$x(0) = 0 \quad v(0) = 0 \quad V_{cap}(0) = V_{c_first} \dots (4)$$

$$x(T) = L \quad v(T) = 0 \quad V_{cap}(T) = V_{c_final} \dots (5)$$

代数方程式の拘束条件を与え、

$$P_T(n, v, V_T) = P_S(x, V_T) + P_{cap}(u, V_{cap}) \dots (6)$$

制御入力および状態変数に

$$-1 \leq n \leq 1 \quad -1 \leq u \leq 1 \dots (7)$$

$$V_{T_min} \leq V_T \leq V_{T_max} \quad V_{c_min} \leq V_{cap} \leq V_{c_max} \dots (8)$$

の拘束を受けるときに評価関数

$$J = \int_0^T \{ P_S(x, V_T) + V_{cap} I_{cap}(u) \} dt \dots (9)$$

を最小とする、制御入力、状態変数を求める問題と定式化することができる。

(2) (3) は列車の微分方程式とし、 r は走行抵抗 [N/kg] とした。キャパシタを定電流源とみなすことで、キャパシタの微分方程式(3)を以上のように簡略化することができる。また、キャパシタの初期電圧(4)は満充電、終端電圧(5)は初期値に戻るよう

に設定した。このように設定することで、走行終了時に他の充電装置などからキャパシタに電力を充電する必要がなくなる。

(6) に関しては、上記で述べた通り、回路方程式を解かずに V_T を制御入力として与えているため、その制約を満たすために付け加えられる拘束条件である。

列車の消費電力 P_T [W] は

$$P_T(n, v, V_T) = \begin{cases} Mvf(n, v, V_T)me & (n \geq 0) \\ Mvf(n, v, V_T)/ge & (n \leq 0) \end{cases} \dots (10)$$

変電所から列車に供給される電力は

$$P_S(x, V_T) = V_S I_S(x, V_T) \dots (11)$$

キャパシタからチョップを通して、供給される電力は

$$P_{cap}(u, V_{cap}) = \begin{cases} V_{cap} I_{cap}(u) ce & (u \geq 0) \\ V_{cap} I_{cap}(u) / ce & (u \leq 0) \end{cases} \dots (12)$$

で、それぞれ表される。

ただし、 me, ge はモータの伝達効率、 M は列車重量[t]、 ce

はチョップの効率とする。

制御入力 n, u による運転方法、充放電モードは表 1, 2 のように定義した。

表 1 n, u による運転モードの比較

n, u	正	0	負
運転モード ²	加速	惰行	減速
充放電モード ²	放電	待機	充電

評価関数(9)に関しては、饋電線抵抗、キャパシタの内部抵抗、チョップの効率などの影響を考え、変電所から送り出される電力消費量とキャパシタから送り出される電力消費量の和とした。

列車の加減速力 $f(n, v, V_T)$ [N/kg] は以下の式で表される。

$$f(n, v, V_T) = \begin{cases} nf_{max}(v, V_T) & (0 \leq n \leq 1) \\ nf_{min} & (-1 \leq n \leq 0) \end{cases} \dots (13)$$

$$f_{max}(v, V_T) = \begin{cases} f_{max} & (0 \leq v \leq v'_A) \\ v'_A f_{max} / v & (v'_A \leq v \leq v'_B) \\ v'_A v'_B f_{max} / v^2 & (v'_B \leq v) \end{cases} \dots (14)$$

$$v'_A = v_A V_T / 1500 \quad v'_B = (v'_A - v_A) + v_B V_T / 1500 \dots (15)$$

v'_A, v'_B (15) はそれぞれ $V_T = 1500$ [V] の時に、引張力の特性が定トルク域から定電力域に変化する速度、定電力域から特性領域に変化する列車の速度である。

ブレーキ時には遅れ込み制御を仮定した減速力特性を想定した。つまり、電動機の減速力によって、所定のブレーキ力が得られない場合には、理想的な機械ブレーキを用いて、その不足分を補って所定のブレーキ力を得られるように設定した。図 2, 3 に最大加減速時の減速力特性を示す。なお、回生絞込み特性は、変電所が回生電力を吸収できるため、回生失効は生じないと考え、モデルには含めていない。

キャパシタからの充放電電流は、キャパシタの定格電流 I_{c_max} として制御入力 u に比例して変化するように定義した。

$$I_{cap}(u) = u I_{c_max} \quad \dots (16)$$

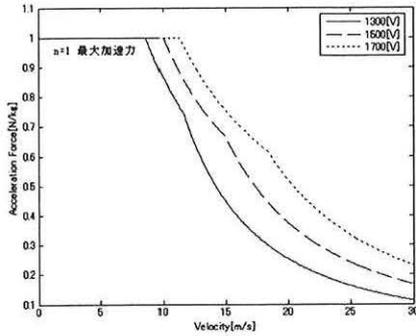


図 2 架線電圧の変動を考慮した加速力特性

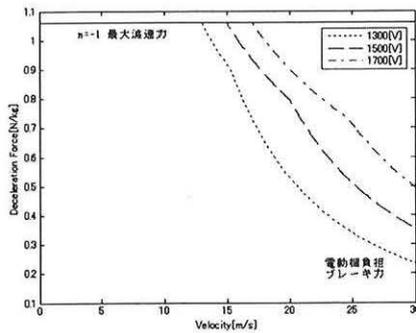


図 3 架線電圧の変動を考慮した減速力特性

3.2. 最適化法

本研究では、この数理計画問題を逐次二次計画法を用いて最適化を行った。逐次二次計画法は、一般的な非線形計画問題を解く有力な最適化法の一つである。

逐次二次計画法は、以下の非線形計画問題(17)

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(\mathbf{x}) \\ & \text{subject to} && \mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0 \\ & && \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned} \quad \dots (17)$$

が与えられた時、最小化を目的とする数理計画問題の評価関数を2次、制約条件を1次近似して、その近似した目的関数と制約条件を用いた二次計画問題(18)

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \nabla f(\mathbf{x}^{(k)})\mathbf{d} + \frac{1}{2}\mathbf{d}^T \mathbf{B}_k \mathbf{d} \\ & \text{subject to} && \mathbf{g}(\mathbf{x}^{(k)}) + \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x}^{(k)})\mathbf{d} = 0 \\ & && \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(k)}) + \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(k)})\mathbf{d} \leq 0 \end{aligned} \quad \dots (18)$$

を解き、その解 $\mathbf{d} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^{(k)}$ を探索方向のベクトルとして、 $f(\mathbf{x}^{(k)}) > f(\mathbf{x}^{(k)} + \alpha \mathbf{d})$ となる α を適当な直線探索法を用いて求め、

次の反復点を $\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \alpha \mathbf{d}$ とする。その点で再び上の二次計画問題(17)を解く事を繰り返すことで、最適解に収束するような点列を生成する反復法である。この問題は、内点法を用いることによって効率的に解けることが知られている[3][4]。

また、微分方程式の拘束条件は、単純な前進差分をとって離散化を行い、時間ごとの制御入力、状態変数を全て変数とみなし、行列の形に直した。

位置の微分方程式(2)を例に取ると、

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v} \Leftrightarrow X(t) = x(t+1) - x(t) - v(t)\Delta t = 0 \text{ より}$$

$$\begin{pmatrix} x(0)-0 \\ X(1) \\ \vdots \\ X(n-1) \\ X(n) \\ x(T)-L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ -1 & 1 & \\ & \ddots & \ddots \\ & & -1 & 1 \\ 0 & \cdots & & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx(1) \\ dx(2) \\ \vdots \\ dx(n-1) \\ dx(n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ -\Delta t & & \\ & \ddots & \\ & & -\Delta t & 0 \\ 0 & \cdots & & -\Delta t & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dv(1) \\ dv(2) \\ \vdots \\ dv(n-1) \\ dv(n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots (19)$$

最上段と最下段の式は、初期条件と終端条件を組み込むために付け加えた。

なお、逐次二次計画法は、関数の微分情報を用いて最適化を行うため、全ての関数が全領域で微分可能である必要があるが、今回の定式化では微分不可能な点を数多く含む。しかしながら、本研究で用いられる関数は、全て近似的に全領域連続で、微分可能であるとみなすことが出来る為、微分不可能な点付近を滑らかにするなどの処理を行わずに元の関数を微分情報を用いて最適化を行った。数学的には厳密性を欠く事になるが工学的に意味を持つ近似解を求める為には実用的な手段であると考えた。

4. 最適化結果

運転時間 $T = 130$ [s]、走行距離 $L = 2000$ [m]、時間の刻み $\Delta t = 5$ [s]、列車重量 $M = 250 \times 10^3$ [kg]、キャパシタ電圧の初期値は 560 [V]、電圧下限値は 280 [V]、定格電流は 200 [A]、静電容量 $C = 32.3$ [F] として最適化を行った。最適化結果を図4に示す。キャパシタが無い時、ある時の最適化結果をそれぞれ、case1, case2 とする。また、図4中の I_{ct} はキャパシタからチョップを通して、列車に供給される電流とする。

case1 では、筆者らが以前の研究[1][2]で、動的計画法を用いて最適化を行った運転方法とほぼ同じ運転方法となった。つまり、運転開始直後の力行時には、最大加速を行い、そこから加速力を弱めながら惰行に移り、減速時においても徐々に減速力を増加させるという運転方法である。このことから、逐次二次計画法を用いて、最適化が正確に行えたことが伺える。

case2 では、運転方法に大きな変化が現れた。つまり、加速時には、case1 と比較して、最大加速を長めに行い、徐々に加速力を弱めている。減速時には、急激に減速を行っている。これは、キャパシタから電力を充放電することで、力行時には電圧降下が抑えられ、回生時にはキャパシタに回生電流を戻すことで、架線側に返る電流が減少するため、饋電損失を減らすことが出来るためである。また、この運転法によって、列車の最高速度を低くして運転しているため、走行抵抗を減らすことが

できる。このことも総消費エネルギーを減らす一つの要因である。

キャパシタの充放電特性は、力行および回生時共に列車負荷が大きい時に最大充放電を行う結果となった。電圧降下および回生失効を最も効果的に補償する手段なので、妥当な最適化結果であると考えられる。また、キャパシタ電圧の下限値は

280[V]に設定したが、キャパシタから下限値まで放電することはなく、440[V]程度で放電を停止した。これは、終端制約でキャパシタ電圧が初期電圧に戻るよう設定したため、放電電力を回生電力で賄える程度でしか使用しないためである。総消費エネルギー量は case1 では、10.66[MJ]、case2 では8.26[MJ]であった。これは、22.5%ほどの省エネルギー効果に値する。

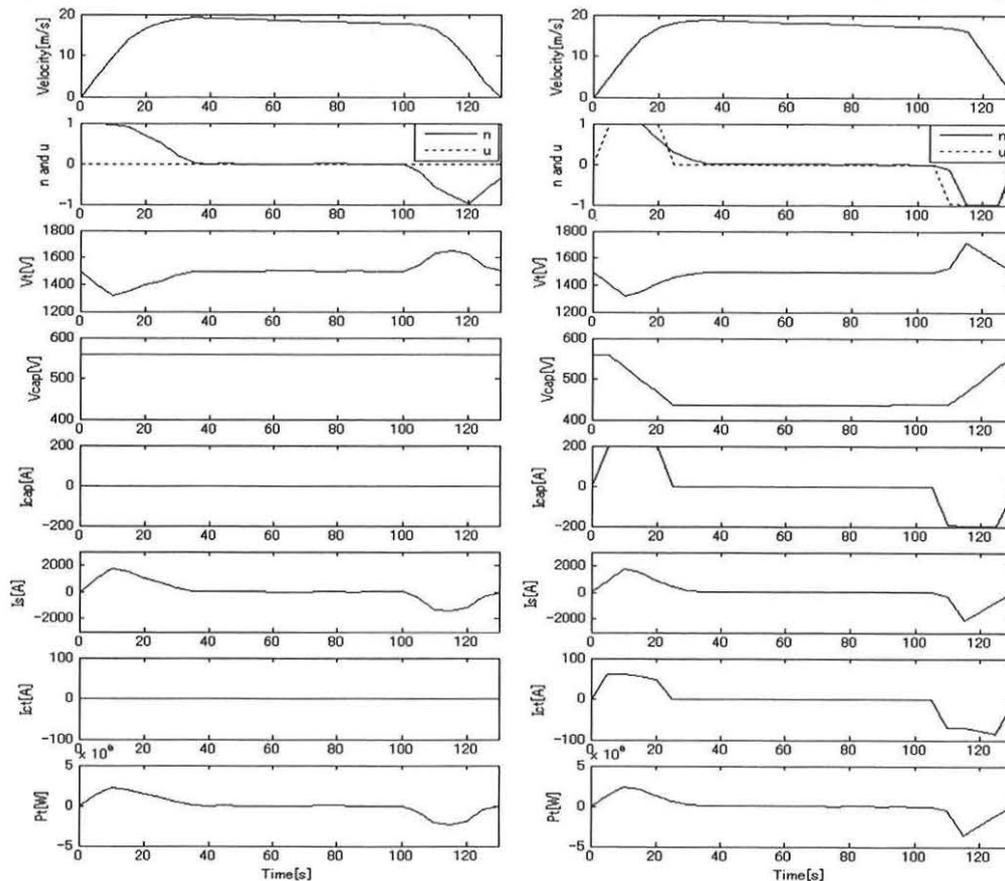


図 4 最適化結果(左:キャパシタなし(case1) 右:キャパシタ搭載(case2))

5. 今後の課題

今後、本研究を行うにあたり課題となるのは以下の点である。

- (1) 勾配、速度制限などを考慮した最適化を行う
- (2) アルゴリズムの改良

(1)に関しては、今回の数値例では、単純な直線距離を持つ路線の運転方法を最適化した。しかしながら、実際の路線条件は、勾配、速度制限などが存在するので、従来の筆者らの検討と同様に、それらを考慮した最適化をする必要がある。(2)に関しては、逐次二次計画法を用いて最適化を行ったが、初期解及びパラメータの影響に敏感であり、それらの選択次第では、解が収束しないといった問題が生じた。また、微分方程式の離散化に単純な前進差分を用いたことや時間の刻み幅が大きいことから、誤差が蓄積していると考えられる。これらを改善する為にアルゴリズムの改良が必要である。

参考文献

- [1]高 英聖、古関 隆章、宮武 昌史:「動的計画法を用いた列車運転曲線最適化問題の求解法」電気学会論文誌 D, Vol.125, No.12 (2005/12 掲載予定)
- [2]松田 邦彦、高 英聖、宮武 昌史, ” 饋電回路を考慮した直列列車の省エネルギー運転法”,平成 17 年電気学会産業界応用部門
- [3]Imad M. Nejdawi, Kevin A. Clements, and Paul W. Davis, “an efficient interior point method for sequential quadratic programming based optimal power flow” IEEE Trans. On Power Systems, vol.15, NO.4,NOVEMBER 2000, pp. 1179-1183.
- [4]G. Irisarri, L. M. Kimball, K. A. Clements, A. Bagchi, P. W. Davis, “Economic Dispatch with Network and Ramping Constraints via Interior Point Methods” IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 13, No. 1, February 1998