

大容量キャパシタを用いたEVの効率的充放電制御の検討

藤井 毅 内田 利之 堀 洋一（東京大学）

A review for Effective Charge / Discharge Control of Super Capacitor on EV

Fujii Takeshi, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori (Tokyo University)

Abstract

Because the super capacitors vary the output voltage according to their energy condition, it is difficult to charge the energy regenerated by electric brake on EV driven by super capacitor. Then A review and some solutions are shown on this paper.

キーワード：キャパシタ，モータ，回生，直並列，電流ポンプ

(Keywords; Capacitor, Motor, Regeneration, Series/Parallel, Electric current pump)

1. 概要

電気二重層キャパシタの大容量化、高出力化に伴い、電気二重層キャパシタを電気自動車やハイブリッド車の駆動電源として用いることが可能となった。しかし、キャパシタというストレージデバイスは、その本質的に、エネルギーを放出して低エネルギー状態になってしまうと電圧が低下してしまうという特性をもつため、電気自動車の駆動電源としてキャパシタを使用すると、加速要求を達成するために電源系の電圧作動範囲を広くかつ高くとる必要があり、結果として要求されるキャパシタやパワー変換装置の体積が大きくなってしまいう問題があった。そのため、キャパシタのみで駆動する電気自動車というものは、その利用範囲が限られてきた。

しかしながら、一方でキャパシタの端子間電圧はその残存エネルギーを直接的に表すよい指標でもあり、電池とは異なる大きな特徴でもある。減速時にどれだけ回生エネルギーを回収できるかということも推定するのに有用であるし、故障検知の面からも有用である。

そこで、これらの特性を活かしつつ要求仕様を満たす必要最小限の電源系を設計することが、キャパシタEVの設計における要点となる。本研究では、スイッチング素子を用いた効率的なキャパシタの効率的な充放電方法について、その検討を行う。

2. 序論

EVを含めたほとんどすべての車両において、加速してから目標の車速に到達するために必要なエネルギーが最も大

きいのは、車速が0km/h、すなわち停車中である。一方で、停車するまでに回生することができるエネルギー量は、車速が高いほど大きい。したがってそのエネルギーをできる限りストレージに回収し、再加速に備えて蓄えるためには、車速が高い領域ではなるべくストレージを「カラ」にしておく必要がある。つまり、大容量キャパシタを駆動電源として用いた電気自動車において、できる限りコンパクトにエネルギーストレージデバイスをまとめるためには、Fig. 1の実線で示すように、停車時に満充電、最高速において空充電になるように充電状態を制御することが望ましい。

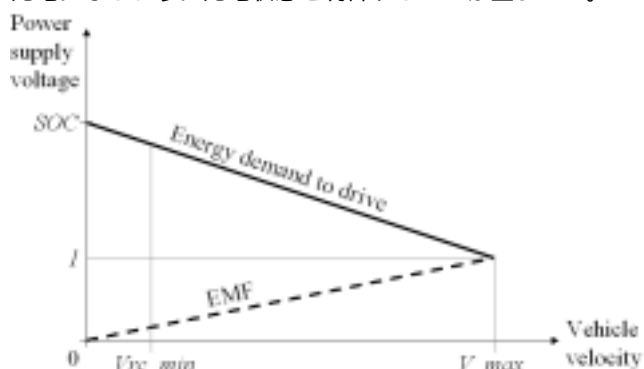


図1 車速に対する要求電圧変化

Fig. 1 Voltage demand for vehicle velocity .

しかし逆に、永久磁石同期モータの起電力は、Fig. 1の破線で示すように回転速度に比例して上昇する。

モータから電源側への電力変換にDCコンバータを使うものと仮定し、設計上の最高車速における電源系の系統電圧とモータの逆起電圧を1と規格化し、回生が行えなくな

る設計車速を Vrc_min とおく。このとき Vrc_min における DC-DC コンバータの電圧増幅率 h は

$$h = 1 + \left(\frac{V_max}{Vrc_min} - 1 \right) SOC \quad (1)$$

より大きくする必要がある。したがって、端子間電圧が充電状態にあまり依存せずほぼ SOC 1 とみなせる二次電池と比較して、同一の車速まで電力回生を行うためには、電圧増幅率のレンジを大きくするか、キャパシタの搭載量を増やして SOC を 1 に近づけなければならない。これらはいずれも電気機器の大型化を導く。

3. 直並列切り替え回路

電気機器の大型化を防ぐため、直並列切り替え回路を検討する。Fig. 2 に検討するシステムの模式図を示す。SW_{S1}、SW_{S2}、SW_{S3} はそれぞれ直並列切り替え回路であり、SW_{S1} を ON、SW_{S2} と SW_{S3} を OFF にするとキャパシタ Cs1 と Cs2 が直列に、逆に SW_{S1} を OFF、SW_{S2} と SW_{S3} を ON にするとキャパシタ Cs1 と Cs2 が並列に DC-DC コンバータの駆動電源として接続される。r_{C1} をおよび r_{C1}ON はそれぞれキャパシタ Cs1 と Cs2 の内部抵抗である。

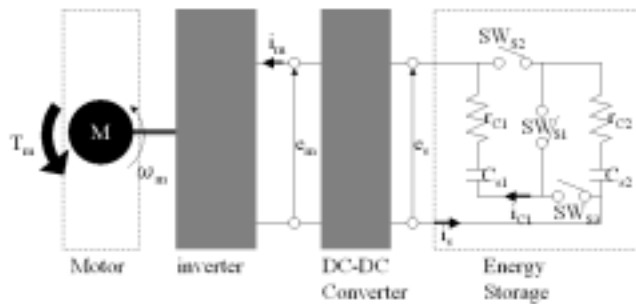


図2 キャパシタ直並列切り替え回路構成図

Fig. 2 Circuit diagram of series/parallel capacitor bank.

本システムに対して、モータの回転速度を初期速度 ω_0 から回生終了速度 ω_{rc_min} まで回生ブレーキを用いて減速度一定で減速し、キャパシタにエネルギーを回収することを考える。まず、同期モータの回路方程式から、以下の式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r/L & -\omega_m \\ \omega_m & -r/L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} e_d \\ e_q - \omega_m \Phi_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし、 i_d, i_q : d,q 軸方向電流
 e_d, e_q : d,q 軸方向電圧
 r : 電気子巻線抵抗
 L : 巻線インダクタンス
 Φ_0 : 永久磁石磁束

また、モータトルクは q 軸方向電流を用いて、式(3)のように表される。

$$T_m = P \Phi_0 i_q \quad (3)$$

P : 同期モータ極数

インバータおよび DC-DC コンバータのエネルギー変換効率は十分高く、1 であるとみなせるとすると、電力保存則より以下の式が成立する。

$$e_m i_m = P(e_d i_d + e_q i_q) \quad (4)$$

$$e_m = \sqrt{e_d^2 + e_q^2} \quad (5)$$

$$e_s = h e_m \quad (6)$$

$$i_s = i_m / h \quad (7)$$

エネルギーストレージ回路においては、以下の 3 パターンの状態が考えられる。

(i) SW_{S1}=ON、SW_{S2}=OFF、SW_{S3}=OFF (直列つなぎ)

$$i_{C1} = i_s \quad (8)$$

$$e_s = -(r_{C1} + r_{C2})i_{C1} - \left(\frac{1}{C_{s1}} + \frac{1}{C_{s2}} \right) \int i_{C1} dt \quad (9)$$

(ii) SW_{S1}=OFF、SW_{S2}=OFF、SW_{S3}=ON(C1 単セルつなぎ)

$$i_{C1} = i_s \quad (10)$$

$$e_s = -r_{C1} i_{C1} - \frac{1}{C_{s1}} \int i_{C1} dt \quad (11)$$

(iii) SW_{S1}=OFF、SW_{S2}=ON、SW_{S3}=OFF(C2 単セルつなぎ)

$$i_{C1} = 0 \quad (12)$$

$$e_s = -r_{C2} i_s - \frac{1}{C_{s2}} \int i_s dt \quad (13)$$

(iv) SW_{S1}=OFF、SW_{S2}=ON、SW_{S3}=ON (並列つなぎ)

$$e_s = -r_{C1} i_{C1} - \frac{1}{C_{s1}} \int i_{C1} dt \quad (14)$$

$$e_s = -r_{C1} (i_s - i_{C1}) - \frac{1}{C_{s1}} \int (i_s - i_{C1}) dt \quad (15)$$

さらに、運動方程式より、以下の式が成り立つ。

$$I_b \dot{\omega}_m = T_m \tag{16}$$

本考察では一定加速度での減速を仮定しているの、 T_m =一定であるとき、式(2)~(15)を連立することで、最終的に未知数であるDC-DCコンバータの電圧増幅率 h を計算することが可能になる。そこで、計算機によるシミュレーションモデルを構築し、直並列切り替え回路の効果について検討を行った。<3.1>および<3.2>の検討に用いた諸元を Table 1 に示す。

表 1 シミュレーション条件
Table 1. Simulation condition.

T_m	-120[Nm]	P	4
I_b	5[kgm ²]	r	0.003[]
r_{C1}	0.01[]	L	40[mH]
r_{C2}	0.01[]	ϕ	0.04[Wb]
C_{s1}	100[F]	0	120
C_{s2}	100[F]	rc_min	20

3.1 単純直列つなぎの場合 直並列切り替えを用いず、単純に回生を行ったことを仮定した場合の端子間電圧の時間推移を Fig. 3 に示す。

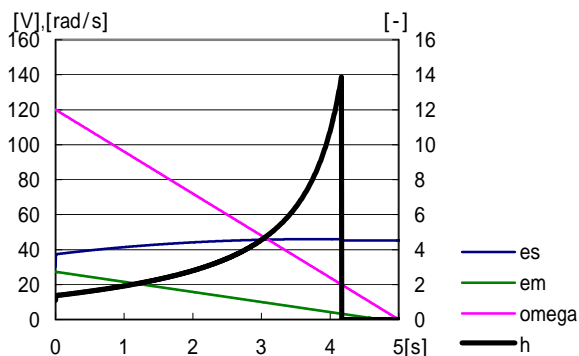


図 3 直列時電圧各端子電圧推移

Fig. 3 Timechart of each terminal voltage (only series)

図に示すように、電源であるモータの逆起電圧 e_m が車速に比例して低下していくのに対し、キャパシタの電圧 e_s はエネルギーを蓄えるにつれ $t^{1/2}$ に比例して増加していくので、おおむね $t^{1/2}$ の形状に相似して増幅率 h が増加する。したがって、回生終了車速近傍では増幅率が極端に上昇するため、このことが回生終了車速の低車速化を妨げる要因となることが考えられる。

3.2 直並列切り替えを行う場合 直並列切り替えを用いて電源側の電圧を変化させたことを仮定した場合の端子間電圧の時間推移を Fig. 4 に示す。

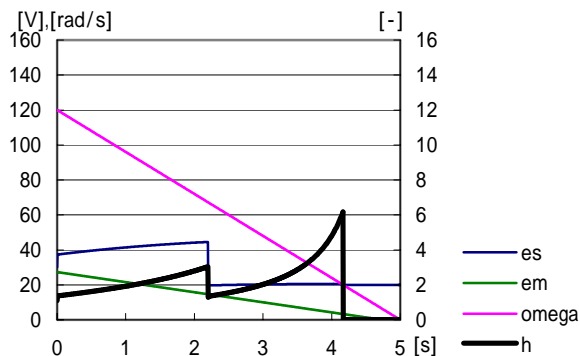


図 4 直列時電圧各端子電圧推移

Fig. 4 Timechart of each terminal voltage (series & parallel)

適切な点で直並列回路を切り替えることにより、車速の低い領域でも電圧増幅率 h を大きく上げることなく、エネルギーを回収できることが可能であるということがわかる。

4. 電流ポンプ

電荷を大容量キャパシタに効率的に蓄える方法として、もうひとつの方法を検討する。考察する電流ポンプの模式図を Fig. 5 に示す。

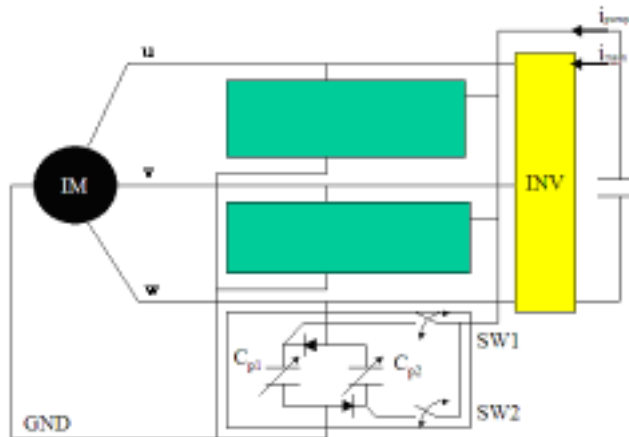


図 5 電流ポンプ回路図

Fig. 5 Circuit diagram of Current pump

Fig. 5 において、 w 相の逆起電力が中性点よりも高いときには、SW1 を OFF、SW2 を ON にして、 C_{p1} に電気を蓄える。位相が進み、 w 層の逆起電力が中性点よりも低くなったときには、SW2 を OFF にして C_{p2} に電気を蓄え、SW1 を ON にして、 C_{p1} の電気エネルギーを駆動用電源に流し込む。このようなシーケンスを半周期ごとに繰り返すことにより、インバータの素子に負荷を掛けることなく、電源側のキャパシタに効率的に電力を回生することが可能である。

ここで、Cp1 および Cp2 の容量について検討する。簡単のため、運転手からのブレーキ要求が一定で、モータの減速トルクが一定の場合を考える。このときモータに流れる有効電流の大きさは常に一定で、逆起電力は車輪の回転速度に比例するので、ブレーキにより回生されるエネルギーは車輪速度に比例して大きくなる。一方、モータ回転あたりの時間、いわゆる周期は回転速度に比例して小さくなる。したがって、一周あたり回生することが可能なエネルギー量は、減速トルクが決まれば車速によらずば一定になる。つまり、このキャパシタを用いた電流ポンプの Cp1 および Cp2 の容量は最大ブレーキ力のみによって設計することが可能であり、電気角半周期ぶんのブレーキ回生エネルギー量を吸収できる程度の小さなもので十分であるといえる。

さらに、Cp1 および Cp2 それぞれを<3.2>で検討したような直並列切り替え回路で繋いだキャパシタを利用することを考える。このとき、車速が低い領域では Fig. 6 に示すように並列つなぎでブランチを構成しておき、直列繋ぎに切り替えてから駆動電源にエネルギーを返すように制御すれば、逆起電力の低いところから高い電圧を持つ駆動電源に DC コンバータを用いることなくエネルギーを回生することができる。

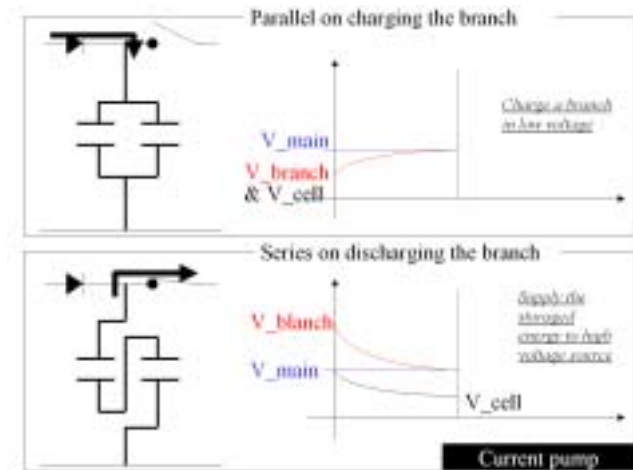


図6 キャパシタブランチの直並列切り替え（低車速）

Fig. 6 Series/parallel converting in capacitor branch (low speed)

逆に車速が高い領域では、Fig. 7 に示すように、直列つなぎでブランチを構成しておき、並列繋ぎに切り替えてから駆動電源にエネルギーを返すように制御すれば、セル一個にかかる逆起電力が 1/2 になるため、キャパシタセル一個あたりの耐電圧を小さく設計することができ、システムの小型化に有効となる。

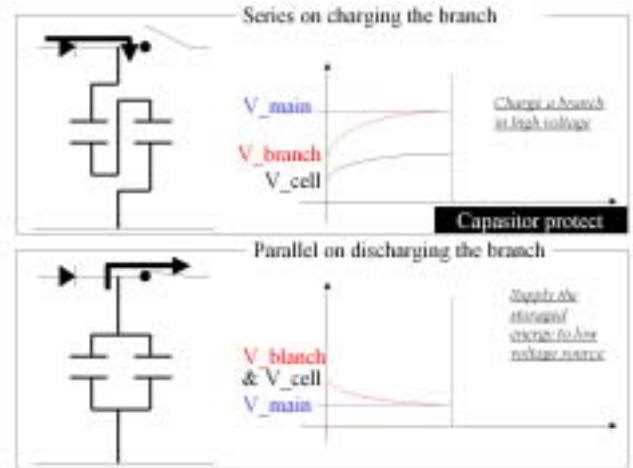


図7 キャパシタブランチの直並列切り替え（高車速）

Fig. 7 Series/parallel converting in capacitor branch (high speed)

5. 結論

キャパシタを駆動電源として使用する自動車に対して、回生エネルギーの効率的な回収の難しさを指摘した。それに対して、スイッチング回路を用いて回路構成に工夫をすることで、逆にキャパシタの特徴を活かしながら効率的にエネルギーを回収する方法があるということを提示した。

今後はこれらの結果を元に、キャパシタで駆動する実車両に提案する回路を組み付け、実際どの程度の効果が得られるのかを評価したいと考えている。

文献

- (1) Sasaki: "Development of Capacitor Hybrid System for Urban Buses (Second Report) : Characteristics and Possibility of Capacitor Hybrid System", Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.33, No.3 (20020715) pp. 179-184
佐々木:「キャパシタハイブリッドバスシステムの開発(第2報): キャパシタハイブリッドシステムの特徴・改善・可能性」, 自動車技術会論文集, Vol.33, No.3 (20020715) pp. 179-184
- (2) WATARIGUCHI: "Operation Analysis of a Boost Type Switched Capacitor Converter", IEICE Technical Report, EE2005-29 (2004-07) pp. 97-102
渡口:「昇圧形スイッチトキャパシタコンバータの動作特性」, 信学技報, EE2005-29 (2004-07) pp. 97-102
- (3) 松瀬:「電動機制御工学」, 電気学会 (2007.2)
- (4) 河村:「現代パワーエレクトロニクス」, 数理工学社 (2005.4)