

複数回間欠給電を行うキャパシタ・バッテリー ハイブリッド蓄電装置の容量比設計法

学生員 平松 敏幸* 非会員 黄 孝亮**
正員 加藤 昌樹** フェロー 堀 洋一**

Capacity Design of Supercapacitor-Battery Hybrid Energy System with Repetitive Charging

Toshiyuki Hiramatsu*, Student Member, Xiaoliang Huang**, Non-member, Masaki Kato**, Member, Yoichi Hori**, Fellow

Battery systems, widely used as energy storage devices for electric vehicles (EVs), suffer from issues such as short lifetimes and low power density. In this paper, a hybrid energy storage system (HESS), which is a combination of a supercapacitor (SC) and a battery, that can be charged using wireless power transfer (WPT) technology, is presented. This combination can achieve the desired energy capacity and power density. Moreover, it offers an acceptable energy storage size for applications such as EVs and machines. In order to optimize the system for the energy and power requirements of a power train system, an optimal design principle for the HESS is proposed. The battery charge degree, Q , is defined and calculated to minimize the entire weight of the HESS. The optimal SC ratio can be obtained on the basis of the defined operation constraints. This optimal combination can reduce the weight of the storage system by 30% for the given operation pattern. Furthermore, under some conditions with optimized charge times, the SC can serve as the sole operated energy storage device and charge power can be increased using WPT.

キーワード : スーパーキャパシタ, バッテリー, ハイブリッド蓄電装置, 複数回間欠給電, ワイヤレス給電, 容量比設計

Keywords: Supercapacitor, Battery, Hybrid Energy System, Repetitive Charging, Wireless Power Transfer, Capacity Design

1. はじめに

近年, 内燃機関を動力とするものに対する電動化が注目されている。これら電動機器の蓄電装置として主にリチウムイオンバッテリー, ニッケル水素バッテリーなどのバッテリーが用いられている。しかし, これらのバッテリーは3つの問題点がある。1つ目は, 化学変化を伴うため応答速度が遅いことである。2つ目は, 内燃機関と比較してエネルギー密度が低いため, 過大な二次電池を電動機器に搭載しなければならないことである。3つ目は, 充放電などによる劣化が大きく, サイクル寿命が短いことである。

これらの問題の解決策の1つとしてバッテリーとスーパーキャパシタ (SC) のハイブリッド化が注目されている^{(1)~(3)}。SCは, 化学変化を伴わないため応答速度が速い, 充放電などによる劣化が少ない, バッテリーと比較してもエネルギー密度が小さいという特徴を有している。そのためバッテリーとSCの両者を用いることによる加速性能と回生ブレーキの効率向上, SCで急峻なパワーを回収することによるバッテリーの高寿命化, 低コスト化や省スペース化などの利点を有することが明らかにされている^{(4)~(6)}。このような特性は, ピークパワーを多く必要とする電動化された農業機械や加減速の多い電気自動車に特に適している。

このようなハイブリッド蓄電装置 (Hybrid Energy Storage System : HESS) を用いることで, 蓄電装置のパワー密度を向上させることが可能であるが, 蓄電装置のよりいっそうの小型/軽量化のためには, 低エネルギー密度を補う必要がある。そのためには, 高頻度な給電によりエネルギーを頻繁に供給する必要があり, これにより, 限られた搭載容量をより効率的に活用できる。しかし, 電動機器や電気自動車への有線での給電は, 雨天時や夜間時などの悪条件下が予想されるため安全性に問題がある。さらには, 走行中の車両への給電が難しいなどの問題がある。このような問題点の解

* 東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻
〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
4-6-1, Kashiwanoha, Kashiwa, Tokyo 277-8561
** 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻
〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
Department of Advanced Energy, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo
4-6-1, Kashiwanoha, Kashiwa, Tokyo 277-8561

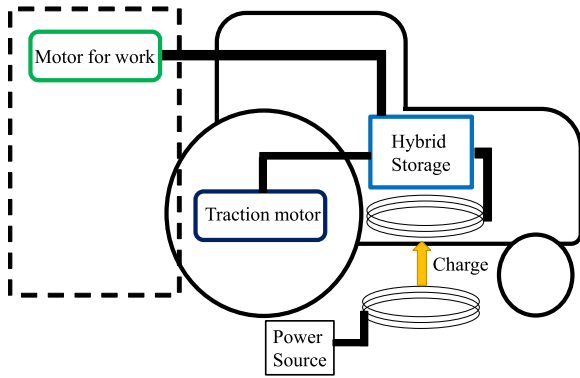


Fig. 1. The electric operating machine with HESS repetitive charging using WPT.

決手法としてワイヤレス電力伝送 (Wireless Power Transfer : WPT) を用いた頻度の高い給電が考えられる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。WPT は近年注目されており、位置ずれに強く、高効率での伝送可能な磁界共振結合方式が盛んに研究が行われている⁽⁸⁾。また、WPT の応用により作業機器の全自動化や車両の走行中給電が可能となる。そのため、本論文では、複数回間欠給電の手法として WPT を用いる。

以上のように、バッテリーと SC の HESS による蓄電装置の高パワー密度化と WPT による複数回間欠給電での蓄電装置の搭載重量の削減を考える。このとき、3 要素それぞれの利点から電動機器の要求仕様に最適な HESS の容量比が存在する。この最適な HESS の設計法を電動機器の要求仕様を用いて理論的に明らかにする。電動機器の要求仕様は、電動機器を設計する際に必要な要求性能から求めるため、本検討では農作業機械などを参考にした数値を仮定して検討を行う。理論的に HESS の設計法が明らかになることで、車両に搭載する蓄電装置の容量を適切に設計することが容易となる。これまでの研究で、シミュレーションによる考察ベースでの HESS の容量設計に関する論文はあるが、複数回給電を考慮して設計したものはいまだ見当たらない⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、複数回給電を考慮することで、給電時の損失や給電ポイントへの移動による損失、蓄電装置のパワー密度の変化など考慮すべきパラメータは膨大となり試行錯誤的に最適設計をすることはより困難となる。電気機器の要求仕様から支配的なパラメータを用いて理論的により簡素に容量比を設計できれば、大変有益である。

本論文では、HESS を搭載した電動機器へ WPT による停車中複数回間欠給電を応用するエネルギーシステムを提案し、このエネルギーシステムにおける電動機器の要求仕様に基づく条件式を導出する。この条件式から、HESS の容量比設計法を提案し、それぞれのパラメータの変動によるエネルギーシステムの評価を行う。

2. 電動機器への HESS と WPT の適用

HESS をもつ電動機器へワイヤレス給電システムを応用した場合の模式図を Fig. 1 に示す。本検討では、Fig. 1 の

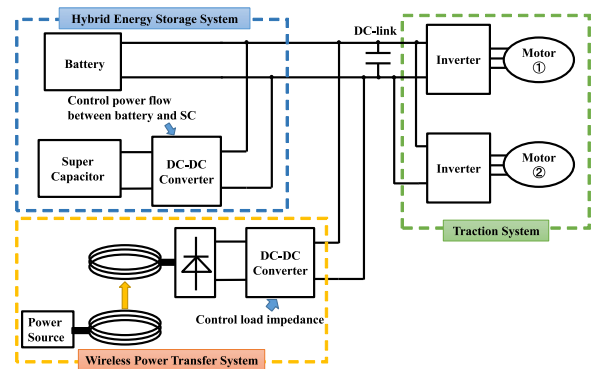


Fig. 2. The scheme of system applied WPT to HESS.

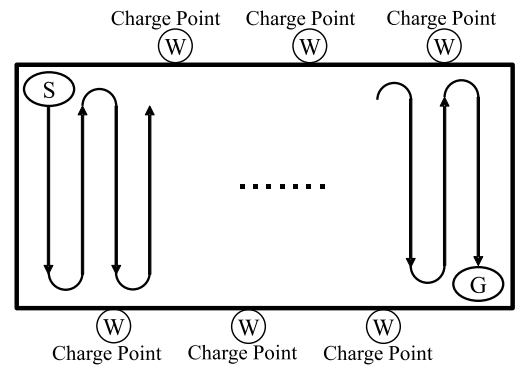


Fig. 3. An example of the operation pattern.

ように WPT による給電エネルギーを HESS に充電し、走行や作業に用いるエネルギーシステムを考える。

電動機器に HESS を搭載し、WPT による給電を応用したエネルギーシステムを Fig. 2 に示す。この回路構成では DC-link 電圧は、バッテリー電圧に固定される。SC に接続されている DC-DC コンバータは SC から DC-link に供給する電流制御を行い、SC とバッテリーそれぞれから供給するパワーを制御する。パワーフロー制御の指針として、バッテリーは比較的高エネルギー密度である特徴を活かしてベース電力を、SC は高パワー密度の特徴を活かしてピーク電力を供給するように制御を行う⁽¹¹⁾。WPT 整流後の DC-DC コンバータは伝送側から見た受電側の負荷抵抗値を制御することを目的に挿入する。整流後に DC-DC コンバータを接続することで、最高伝送効率の実現や給電電力制御を実現することができる。HESS に WPT による給電を応用するシステムでは様々な回路構成が考えられるが本稿では、Fig. 2 の回路構成を対象とする。また、本論文ではバッテリー電圧による電動機特性の変化については簡単のため考慮しない。

3. HESS 容量の計算式

以上のようなエネルギーシステムをもつ電動機器の HESS の各要素を、電動機器の要求仕様から設計する。本章では、要求仕様を用いて容量設計を行うための条件式を導出する。本検討では、Fig. 3 のように、作業開始地点から終了地点までにある WPT による給電ポイントで停車中給電を行い

Table 1. Definition of the constant parameters for HESS and WPT.

E_D [Wh]	Total energy for operation
E_0 [Wh]	Initial energy of HESS
E_{chref} [Wh]	Demanded Energy per one charge
P_D [W]	Maximum power
P_{Bdis} [W/kg]	Discharge power density of battery
P_{Bch} [W/kg]	Charge power density of battery
e_{Bat} [Wh/kg]	Energy density of battery
E_{Bat} [Wh/kg]	Energy of battery
P_{Bdis} [W/kg]	Discharge power of battery
P_{Bch} [W/kg]	Charge power of battery
P_{Bchref} [W]	Demanded charge power of battery
p_{SC} [W/kg]	Power density of SC
e_{SC} [Wh/kg]	Energy density of SC
P_{SC} [W]	Power of SC
P_{SCref} [W]	Demanded charge power of SC
E_{SC} [Wh]	Energy of SC
P_{dis} [W]	Discharge power of HESS
P_{charge} [W]	Charge power of HESS
E_{charge} [Wh]	Charge energy of HESS

Table 2. Definition of the variable parameters for HESS and WPT.

α	Weight ratio of SC
n	The number of charge
Q	Charge degree
P_{WPT} [W]	Charge power from WPT
M_{HESS} [kg]	Weight of HESS
T_{charge} [h]	The total of the charge time

つつ作業することを考える。また、簡単のため等間隔に給電ポイントを設置すると仮定する。蓄電装置の容量設計を考える際には、想定されるどのような状況でも運用できるよう走行のワーストケースを考える必要がある。SC はバッテリーに比べ高頻度な充放電に強く、空充電にしても劣化しない。そのため、想定されるワーストケースの場合に SC が各給電ポイントにおいてほぼ空充電になるようにエネルギーマネジメントを行い、SC から放電すると仮定する。このように仮定することで、給電ポイント間で SC がバッテリーをアシストすることが可能で HESS の利点を活かすことができる。また、SC やバッテリーの使用範囲は電圧低下による電流増加の抑制もしくは劣化を防止するためなどにより使用範囲が制限され、空充電は使用範囲における貯蔵エネルギーの下限値とする。なお、今回の検討では、簡単化のため DC-DC コンバータでの損失や蓄電装置での損失、給電ポイントへ移動するためのエネルギーなどは考慮しない。

本稿で容量比設計に用いるパラメータの定数を Table. 1 に、変数を Table. 2 に示す。バッテリーは充電する際と放電する際の最大パワーが異なるという性質をもつと想定した。そのためバッテリーの充電時と放電時の最大パワーは別の値とし、SC は充電時と放電時で最大パワーは同じ値と想定した。

〈3・1〉 バッテリーの充電度 Q HESS に WPT を用いて給電する場合、HESS は SC とバッテリーの 2 つの要素を持

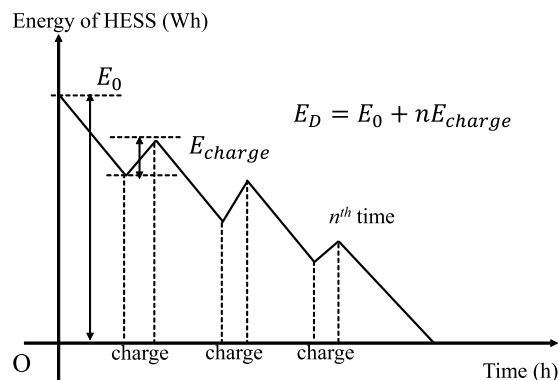


Fig. 4. Energy variation of HESS.

つため、給電ポイントでそれぞれにどの程度充電するかは 1 つの変数となりうる。今回の検討では、SC が高パワー密度であり高頻度な充放電に対しても適しているため、SC は WPT による充電ポイントにおいて毎回満充電とすることとする。バッテリーについては、充電度 Q を定義する。 Q は、全容量に対してどの程度バッテリーを充電するのかを表す。 $Q = 0$ の場合は、各給電ポイントにおいて SC のみに充電することを表しており、 $Q = 1$ の場合は、バッテリーにも満充電まで充電することを表している。 $Q = 0.5$ であれば、各給電ポイントで SC に満充電しつつ、バッテリーには全容量の半分のエネルギーを充電することを表す。つまり、 Q は各給電ポイントでのバッテリーの貯蔵エネルギーの変化量 $Q = \Delta SOC$ と定義できる。この Q によって必要とされる HESS の容量は大きく左右されるため、 Q の値を変数の 1 つと考え検討を行った。

〈3・2〉 エネルギーの面から求められる条件 Fig. 3 のような作業を行った場合の電動機器の HESS が保有するエネルギー変化のイメージ図を Fig. 4 に示す。

各給電ポイントで同じ量のエネルギーを充電すると仮定すると、電動機器が 1 回で充電されるべきエネルギー E_{chref} は、式 (1) のように表される。

$$E_{chref} = \frac{E_D - E_0}{n} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、作業を開始する前には、充電時間が十分にあると考え、蓄電装置が満充電の状態から作業を開始すると仮定すると、HESS の初期エネルギー E_0 は、式 (2) のように表される。

$$E_0 = \{(1 - \alpha)e_{Bat} + \alpha e_{SC}\}M_{HESS} \dots \dots \dots (2)$$

また、HESS が 1 回の給電で充電するエネルギー E_{ch} は、 Q を用いて式 (3) のように表される。

$$E_{ch} = \{Q(1 - \alpha)e_{Bat} + \alpha e_{SC}\}M_{HESS} \dots \dots \dots (3)$$

よって、HESS が給電ポイントで充電するエネルギーが充電すべきエネルギー以上であれば作業に必要なエネルギーを得られるので、式 (1)~(3) より蓄電装置が所持すべきエ

エネルギー容量の面から求められる条件は $E_{chref} \leq E_{ch}$ から、式 (4) のように求められる。

$$\frac{E_D}{n\{(1-\alpha)e_{Bat}(Q + \frac{1}{n}) + (1 + \frac{1}{n})\alpha e_{SC}\}} \leq M_{HESS} \cdots (4)$$

〈3・3〉 出力パワーの面から求められる条件 HESS が出力可能な最大パワー P_{dis} は、バッテリーと SC の出力パワーの合計であるので、式 (5) のように表される。

$$P_{dis} = \{(1-\alpha)p_{Bdis} + \alpha p_{SC}\}M_{HESS} \cdots (5)$$

よって、蓄電装置の出力パワー面から求められる条件は $P_D \leq P_{dis}$ より、式 (6) のように表される。

$$\frac{P_D}{(1-\alpha)p_{Bdis} + \alpha p_{SC}} \leq M_{HESS} \cdots (6)$$

〈3・4〉 充電パワーの面から求められる条件 電動機器が WPT により充電する際の条件を、以下のように定める。

- WPT を最大出力で使用する
 - SC の充電とバッテリーの充電の終了時間を同じにする
- WPT の最大出力での使用を仮定することで、設置する WPT の設備を適切なものにできる。また、SC もしくはバッテリーの片方のみを充電する場合が生じると、それぞれのみで充電パワーを吸収しなければならず蓄電装置が大型化する。そのため、SC とバッテリーの充電時間を同じとし、片方だけ充電している場合が生じないと仮定した。これにより、与えられた条件での蓄電装置の重量と充電時間を最小化できる。これら 2 つの条件を満たすためには、SC とバッテリーに充電したいエネルギーの比で充電電力 $P_{charge} = P_{WPT}$ を配分すればよい。ここで、充電電力は HESS が WPT より受電する電力である。つまり、SC とバッテリーの充電パワーの配分比は、式 (7) のように表される。

$$P_{Bchref} : P_{SCref} = Q(1-\alpha)e_{Bat} : \alpha e_{SC} \cdots (7)$$

また、バッテリーの充電パワー P_{Bch} と SC の充電パワー P_{SC} は充電パワー密度 p_{Bch} と p_{SC} を用いてそれぞれ式 (8), (9) のように表される。

$$P_{Bch} = (1-\alpha)M_{HESS}p_{Bch} \cdots (8)$$

$$P_{SC} = \alpha M_{HESS}p_{SC} \cdots (9)$$

充電するエネルギー比で充電パワーを配分するためには、SC とバッテリーそれぞれが、配分される充電パワーを受け入れられる必要がある。そのため、式 (7) ~ (9) より充電パワーの面から得られる条件は $P_{Bchref} \leq P_{Bch}$, $P_{SCref} \leq P_{SC}$ から、それぞれ式 (10), (11) で表される。

$$\frac{Qe_{Bat}}{p_{Bch}\{Q(1-\alpha)e_{Bat} + \alpha e_{SC}\}} P_{charge} \leq M_{HESS} \cdots (10)$$

$$\frac{e_{SC}}{p_{SC}\{Q(1-\alpha)e_{Bat} + \alpha e_{SC}\}} P_{charge} \leq M_{HESS} \cdots (11)$$

これらの条件を満たす場合、充電時間の合計 T_{charge} は式 (12) で表される。

Table 3. Requirement specifications and energy storage devices parameters.

E_D	4000 Wh
P_D	20000 W
e_{Bat}	80 Wh/kg
e_{SC}	3.6 Wh/kg
p_{Bdis}	300 W/kg
p_{Bch}	100 W/kg
p_{SC}	1000 W/kg
P_{WPT}	3000 W

$$T_{charge} = \frac{E_D - \{(1-\alpha)e_{Bat} + \alpha e_{SC}\}M_{HESS}}{P_{WPT}} \cdots (12)$$

以上の式 (4), (6), (10), (11) からなる 4 つの条件を満たす M_{HESS} から最小のものを決定すれば、最小の容量で要求仕様を満たすことができる。

4. HESS 容量比設計

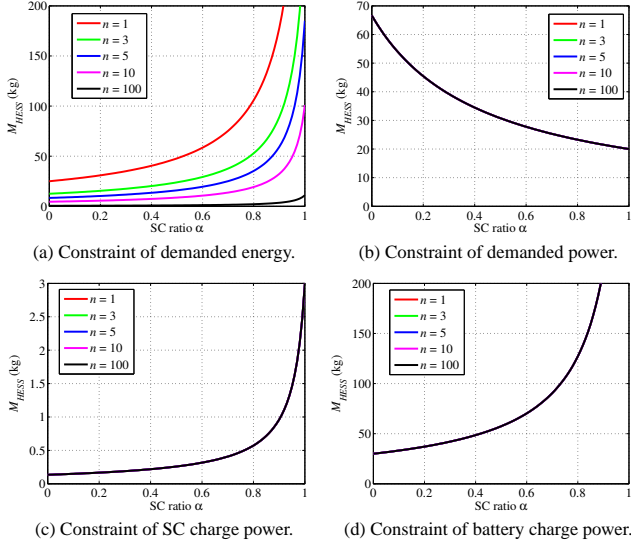
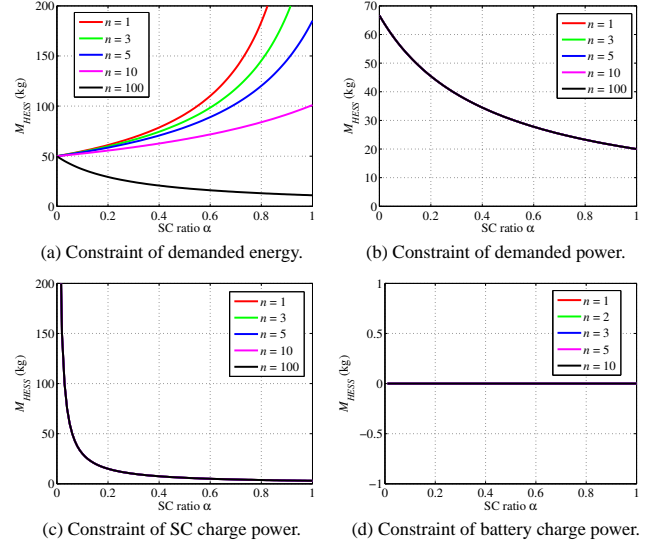
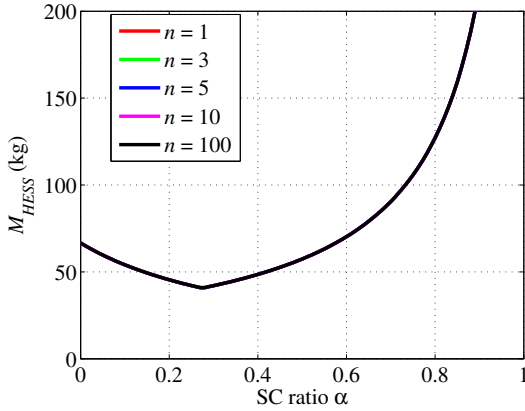
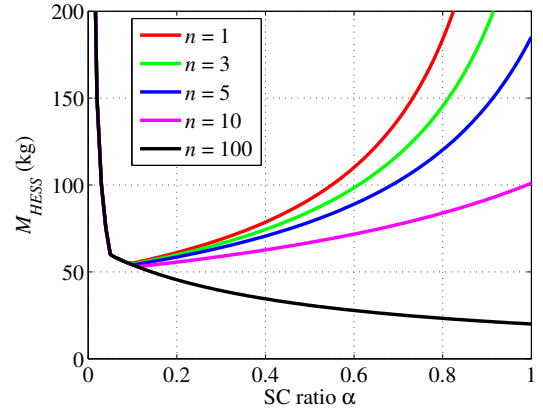
前述に示した HESS の容量比設計を求めた条件式を用いて行う。今回の検討で想定した電動機器の諸元を Table. 3 に示す。ここで、SC とバッテリーの充放電のパワー密度を一定と仮定した。

〈4・1〉 Q を固定した場合 まず、設計パラメータのうちバッテリーの充電度 $Q = 1, 0, 0.1$ に固定し、横軸を SC の重量比 α とした場合のそれぞれの条件式と HESS の重量 M_{HESS} について考察する。また、給電回数は 1, 3, 5, 10, 100 回の場合を示す。

〈4・1・1〉 $Q = 1$ の場合 $Q = 1$ における導出した 4 つの条件式 (4), (6), (10), (11) の計算結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 (b), (c), (d) より、これらの条件は給電回数に影響されないため、すべての給電回数で同じ曲線を描くことがわかる。また、Fig. 5 (c) より、SC の充電パワー条件は、SC が高パワー密度であるため、HESS の重量が他の条件に比べ非常に小さいことがわかる。

搭載すべき蓄電装置は、Fig. 5 の条件をすべて満たす必要がある。そのため、Fig. 5 の結果を比較し、それぞれの α において最大となる重量の蓄電装置を搭載しなければならない。Fig. 5 の結果から求めた M_{HESS} を Fig. 6 に示す。Fig. 5, 6 より、 α が 0.27 より小さい場合には、出力パワーから求められる条件式 (6) により M_{HESS} が決定される。SC のパワー密度はバッテリーよりも大きいため、 α が 0.27 より小さい場合には、 α の増加に応じて M_{HESS} が減少する。Fig. 5, 6 より、 α が 0.27 より大きい場合には、バッテリーの充電パワーの面から求められる条件式 (10) により M_{HESS} が決定される。これは $Q = 1$ の場合、バッテリーに給電ポイントで満充電まで充電する充電パワーが必要になるためである。 α が 0.27 より大きい場合には、条件式 (10) を満たすために α の増加に応じて M_{HESS} が増加する。これらの条件は、給電回数 n に影響されないため、すべての給電回数で同じ曲線を描く。

これらの結果から、 $Q = 1$ の場合、 M_{HESS} は式 (6), (10)


 Fig. 5. The case of $Q = 1$.

 Fig. 7. The case of $Q = 0$.

 Fig. 6. HESS weight in the case of $Q = 1$.

 Fig. 8. HESS weight in the case of $Q = 0$.

の等号が成り立つとき最小値となる。式 (6), (10) は給電回数によらない条件であるため、 M_{HESS} の最小値は給電回数によらない。

〈4・1・2〉 $Q = 0$ の場合 $Q = 0$ における導出した 4 つの条件式 (4), (6), (10), (11) の計算結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 (b), (c), (d) より、これらの条件は給電回数に影響されないため、すべての給電回数で同じ曲線を描くことがわかる。 $Q = 0$ の場合、給電ポイントでバッテリーに充電しないため Fig. 7 (d) のバッテリーの充電パワー条件は 0 となる。

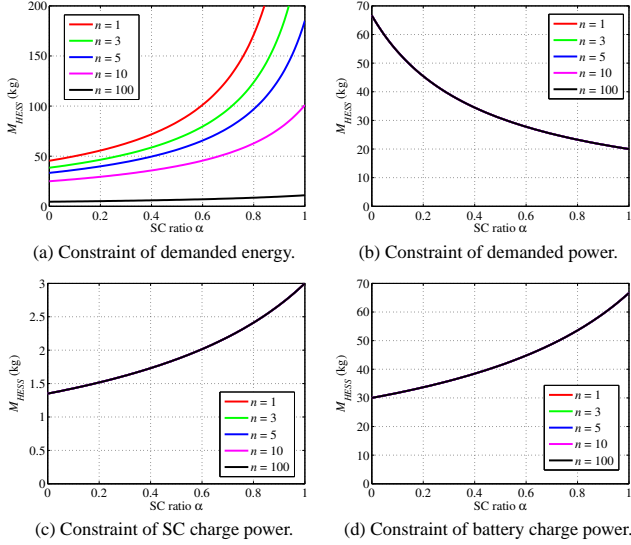
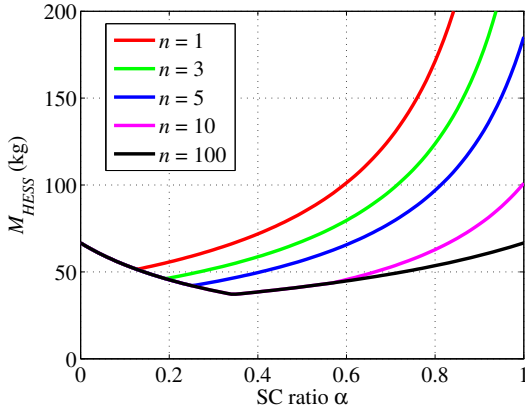
Fig. 7 の結果から求めた HESS の重量 M_{HESS} を Fig. 8 に示す。 α の増加につれて M_{HESS} が減少する範囲では、SC の充電パワー条件式 (11) により M_{HESS} が決定される。 $Q = 0$ の場合、SC が充電パワーをすべて吸収するため、 α の増加に応じて M_{HESS} は減少する。 α の増加につれて M_{HESS} が増加する範囲では、エネルギー条件式 (4) により M_{HESS} が決定される。この範囲で給電回数 n が少ない場合には、 α の増加により M_{HESS} のエネルギー密度が減少するため、 M_{HESS} が増加する。また、Fig. 8 より給電回数 n が十分にある場合には、 M_{HESS} が大きなエネルギー密度を持つ必要

がないため、 α の増加に応じて M_{HESS} は減少する。

これらの結果から、 $Q = 0$ の場合、給電回数を十分にとれる場合には SC のみを蓄電装置として搭載すればよい。また、給電回数に限りがある場合には、 M_{HESS} は最小値を持ち、式 (4), (11) の等号が成り立つとき最小値となる。

〈4・1・3〉 $Q = 0.1$ の場合 $Q = 0.1$ における導出した 4 つの条件式 (4), (6), (10), (11) の計算結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 (b), (c), (d) より、これらの条件は給電回数に影響されないため、すべての給電回数で同じ曲線を描くことがわかる。Fig. 9 の結果から求めた HESS の重量 M_{HESS} を Fig. 10 に示す。 α の増加に応じて M_{HESS} が減少する範囲では、出力パワーの条件式 (6) により M_{HESS} が決定する。 α が大きく給電回数 n が少ない場合には、エネルギーの条件式 (4) により M_{HESS} が決定する。 α が大きく、給電回数 n が多い場合には、バッテリーの充電パワーの条件式により M_{HESS} が決定する。 $Q = 0.1$ の場合には、エネルギー、出力パワー、バッテリーの充電パワーの 3 つの条件式により M_{HESS} が決定される。

これらの Q を固定した場合の検討から、それぞれの Q と


 Fig. 9. The case of $Q = 0.1$.

 Fig. 10. HESS weight in the case of $Q = 0.1$.

給電回数 n に応じて M_{HESS} を最小化する α があることがわかる。

〈4・2〉 充電度 Q の最適値 Fig. 11 に Q を変化させた場合の HESS 重量 M_{HESS} のそれぞれの Q における最小値をプロットした図を示す。ただし、SC の比率 α はそれぞれの Q で M_{HESS} を最小とする値である。Fig. 11 よりそれぞれの給電回数において、ある Q で最小値があることがわかる。さらに、給電回数が多い場合ほど Q の値が小さいところで最小値となる。これは、給電回数が増えると、各給電ポイントでバッテリーに充電するエネルギーが小さくて良いことを示す。給電回数を十分に多くできる場合には、SC のみを蓄電装置として搭載すれば蓄電装置を最小化できる。この場合、SC のパワー密度は大きいので WPT による充電電力は大きくできる。また、最小値となるとき条件は、式 (4), (6), (10) の等号が成り立つときである。これは SC のパワー密度が大きいため、今回の条件において、SC の充電パワーの条件式 (11) が Q の値が非常に小さい場合のみ M_{HESS} の最小値決定に影響を与えるからである。

Fig. 11 より、給電回数が多いほうがより M_{HESS} を小さく

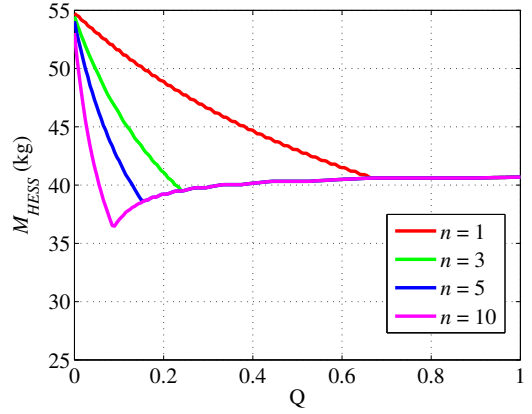


Fig. 11. HESS weight in the case of charging 3.0 kW.

くできることがわかる。そのため、蓄電装置の小型化のためには、給電回数を十分に設ける方がよい。しかし、実際に給電回数を多くするには、給電ポイントの設置や給電ポイントへの移動がより多く必要となるため、実際に適用できる給電回数には限りがある。

〈4・3〉 WPT による充電電力の影響 WPT による充電電力を 1.5kW, 4.5kW とした場合の Fig. 11 のような図を Fig. 12, 13 に示す。この結果から、充電電力を大きくすると各給電回数における HESS 重量の最小値が大きくなる。これは、バッテリーの充電パワー条件を満たすためにより大きな HESS が必要となるためである。この結果から、蓄電装置の小型化には WPT による充電電力を可能な限り小さくするのがよいが、WPT による充電電力を小さくすると、充電時間がより長くなる。そのため、充電時間を考慮して WPT による充電電力を決定すれば、その条件における HESS 重量の最小値を求めることができる。

また、充電電力を大きくするほど最適な Q の値が小さくなる。これは、大きな充電パワーを吸収するのにキャパシタが適していることを示す。

5. HESS の容量設計指針

以上のように、最適な容量比は式 (13), (14), (15) を満たすときに得られる。

$$\frac{E_D}{n\{(1-\alpha)e_{Bat}(Q + \frac{1}{n}) + (1 + \frac{1}{n})\alpha e_{SC}\}} = M_{HESS} \dots \dots \dots (13)$$

$$\frac{P_D}{(1-\alpha)p_{Bdis} + \alpha p_{SC}} = M_{HESS} \dots \dots \dots (14)$$

$$\frac{Qe_{Bat}}{p_{Bch}\{Q(1-\alpha)e_{Bat} + \alpha e_{SC}\}} P_{charge} = M_{HESS} \dots \dots (15)$$

WPT による充電電力が一定であると仮定すると、変数は M_{HESS} , n , Q , α の 4 つである。そのため、今回の検討のように 1 つのパラメータを決定することにより、最小となる M_{HESS} を求めることが可能である。

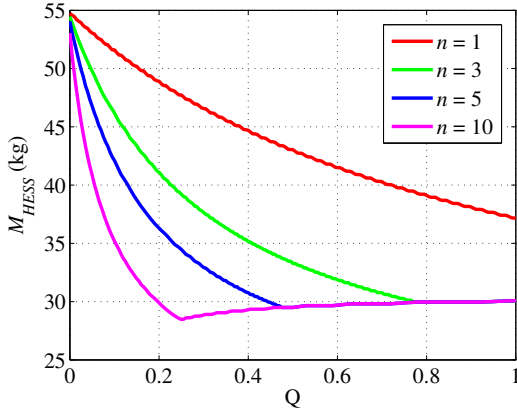


Fig. 12. HESS weight in the case of charging 1.5 kW.

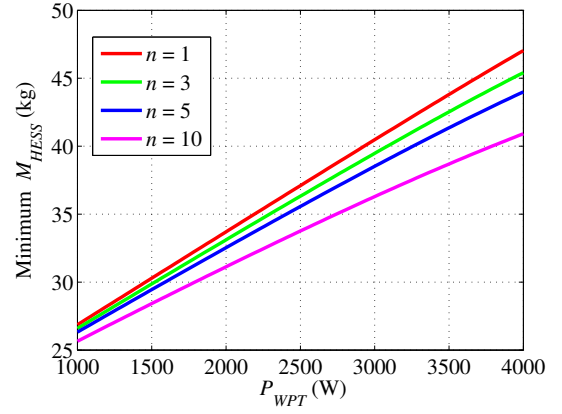
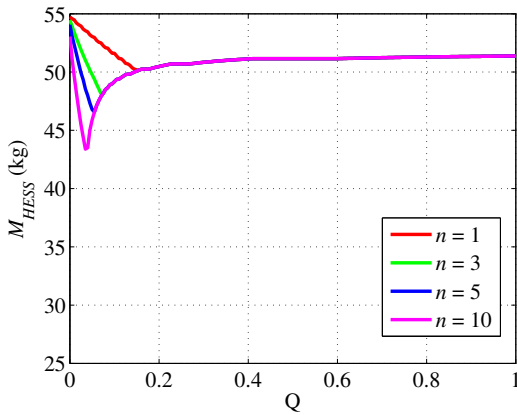
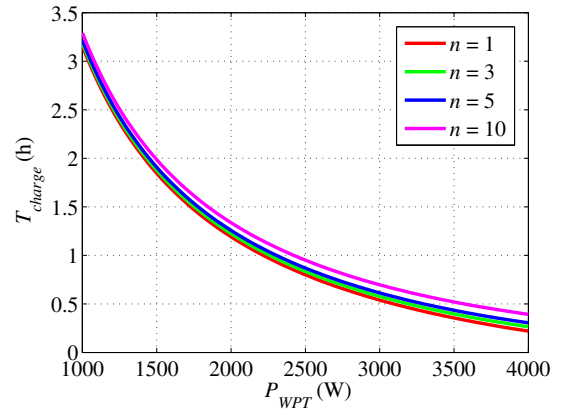

 Fig. 14. P_{WPT} VS minimum M_{HESS} .


Fig. 13. HESS weight in the case of charging 4.5 kW.


 Fig. 15. P_{WPT} VS T_{charge} .

これらの式を用いて、それぞれの充電電力における M_{HESS} と充電時間の合計 T_{charge} は Fig. 14, 15 のように求められる。今回の要求仕様では、従来のバッテリーのみの搭載を考えると車載の蓄電装置は 55 kg 必要である。それに対し、Fig. 14, 15 の結果から提案するシステムでは、例えば $n = 5$, $P_{charge} = 3\text{kW}$ とすると $T_{charge} = 0.7\text{h}$, $M_{HESS} = 38\text{kg}$ に最適に設計でき、蓄電装置の重量をおよそ 30% 低減できる。また、 $n = 5$, $P_{charge} = 1.5\text{kW}$ とした場合には、 $T_{charge} = 2\text{h}$, $M_{HESS} = 30\text{kg}$ に最適設計でき蓄電装置の重量はおよそ 45% 低減できる。本論文で提案するエネルギーシステムは、受電コイルや電力変換機器を搭載する必要があるため車両重量の増加が懸念される。しかし、上記のように蓄電装置の最適設計が可能であり大幅に蓄電装置を低減できるため、車体重量も低減できると考える。また、本論文では重量に注目して検討を行ったが、容積も重要な評価関数となりえる。容積については、それぞれの蓄電媒体の容積密度を用いれば、本提案手法と同じ手法を用いることが可能である。

これらの結果から、 P_{charge} を大きくすれば T_{charge} を小さくできるが M_{HESS} が大きくなる。つまり、 T_{charge} と M_{HESS} にはトレードオフの関係があり、電動機器の求める要求仕様と Fig. 14, 15 から容量比設計が可能である。

6. まとめ

電動機器や電気自動車に HESS を搭載し、WPT による複数回給電を行うエネルギーシステムを提案した。このエネルギーシステムにおいて電動機器の要求仕様に基づいた HESS の設計指針を提案した。バッテリーの充電度 Q を定義し、それを固定し考察することでそれぞれの充電度 Q において、HESS の重量を最小化する SC とバッテリーの配分比 α が存在することを示した。さらに HESS を最小化する Q が存在することを述べ、その条件について述べた。これらの結果から、充電度 Q を定義することで HESS に対する複数回給電を想定した場合の HESS の設計指針を明らかにした。この設計指針を用いて設計を行うと、要求仕様に対して最適な蓄電装置の容量比を導出することが可能で、今回仮定した要求仕様では、 $n = 5$, $P_{charge} = 3\text{kW}$ の場合、バッテリーのみの従来システムより車載の蓄電装置の重量を 30% 程度低減できる可能性があることを示した。提案したエネルギーシステムは、受電コイルや電力変換機器が必要であるが、蓄電装置を大幅に低減できるため車両の軽量化が可能であると考えられる。また、給電回数が十分に多くとれる場合には、蓄電装置としてキャパシタのみを搭載することが最適であり、その場合、WPT の充電電力も大きくできること

を明らかにした。

今後は、電力変換機器の損失を考慮した検討や実験による動作確認、容量設計法の妥当性を確認する予定である。

文 献

- (1) J.Cao and A. Emadi, "A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles," IEEE Transactions On Power Electronics, Vol.27 No.1 January 2012.
- (2) B. Hredzak, V.G. Agelidis, and M. Jang, "A Model Predictive Control System for a Hybrid Battery-Ultracapacitor Power Source," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 3, pp. 1469-1479, Mar. 2014.
- (3) R. Carter, A. Cruden, and P. J. Hall, "Optimizing for Efficiency or Battery Life in a Battery/Supercapacitor Electric Vehicle," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 4, pp. 1526-1533, May, 2012.
- (4) Z. Yicheng, L. Haiquan, X. Haitao, and W. Lulu, "Analysis of the Time-Domain and Frequency-Domain Models of Supercapacitor," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference 2008, PSB9-5, Sep. 2008.
- (5) K.Kawashima, T. Uchida, and Y. Hori, "Development of a Novel Ultracapacitor Electric Vehicle and Methods to Cope with Voltage Variatio," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009 VPPC '09.
- (6) S. Ahn, N.P. Suh, and D.-H. Cho, "Charging up the road if electric vehicles could draw power from the streets, there's no telling how far they could go" IEEE Spectrum, vol. 50, pp.48-54 Apr, 2013.
- (7) S. Li and C.C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. PP, pp. 1, Apr. 2014.
- (8) T. Imura, H. Okabe, T. Uchida, Y. Hori, "Wireless Power Transfer during Displacement Using Electromagnetic Coupling in Resonance," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 130 no. 1 pp. 76-83 2010 (in Japanese).
居村岳広・岡部浩之・内田利之・堀洋一:「共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送-磁界型アンテナと電界型アンテナ-」, 電学論 D, vol. 132 no. 2 pp. 133-139 2012
- (9) N. Shiraki and K. Kondo "Evaluation of Design Method for Engine Output and Battery Capacity for Lithium Ion-Battery Hybrid Diesel Railway Vehicle," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 132 no. 2 pp. 178-184 2012 (in Japanese).
白木直樹・近藤圭一郎:「ディーゼルエンジン-リチウムイオン電池ハイブリッド気動車のエンジン・電池容量設計法とその評価」, 電学論 D, vol. 132 no. 2 pp. 178-184 2012
- (10) K. Takizawa, K. Kondo "Study of Method for Designing the Power and the Capacitance of Fuel Cells and Electric Double-Layer Capacitors of Hybrid Railway Vehicle", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 132 no. 2 pp. 133-139 2012 (in Japanese).
瀧澤建治・近藤圭一郎:「燃料電池・EDLC ハイブリッド鉄道車両の電池容量設計法」, 電学論 D, vol. 132 no. 2 pp. 178-184 2012
- (11) X. Huang, T. Hiramatsu, and Y. Hori, "Energy Management Strategy Based on Frequency-Varying Filter for the Battery Supercapacitor Hybrid System of Electric Vehicles," in Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), pp.1-6 2013

平 松 敏 幸 (学生員) 1991 年 3 月 4 日生。2013 年 3 月千葉



大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻博士前期課程(修士課程)入学。現在、キャパシタとバッテリーハイブリッド蓄電装置とワイヤレス電力伝送の電気自動車への応用の研究に従事。

黄 孝 亮 (非会員) 1985 年 10 月 3 日生。2011 年 10 月東京大学新領域創成科学研究科先端エネルギー工学博士課程後期課程入学。電気自動車のエネルギーシステム, DC-DC コンバータ制御, スーパーキャパシタの研究に従事。



加 藤 昌 樹 (正員) 1973 年 10 月 23 日生。1998 年芝浦工業大学工学部電気工学科卒業, 同年 4 月電子計測機器製造会社に入社, 2003 年 8 月自動車用制御ユニット製造会社に入社。2011 年 3 月東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻修士課程修了, 2014 年同専攻博士課程修了。現在同研究科客員共同研究員。磁界共振結合によるワイヤレス給電の研究に従事。



堀 洋 一 (フェロー) 1955 年 7 月 14 日生。1978 年東京大学工学部電気工学科卒業, 1983 年同大学院博士課程修了。助手, 講師, 助教授を経て, 2000 年 2 月電気工学科教授。2008 年 4 月より東京大学大学院新領域創成科学研究科教授。この間, 1991 年～1992 年, カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。専門は制御工学とその産業応用, 特に, モーションコントロール, メカトロニクス, 電気自動車などの分野への応用研究。電気学会産業応用部門元部門長, 自動車技術会技術担当理事, 日本能率協会モータ技術シンポジウム委員長, キャパシタフォーラム会長などを勤めている。IEEE Fellow, 自動車技術会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会, パワーエレクトロニクス学会などの会員。1993 年, 2001 年および 2013 年, IEEE Trans. on Industrial Electronics 最優秀論文賞, 2010 年産業応用部門高憲章, 2011 年電気学会業績賞などを受賞。

