

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-126999
(P2016-126999A)

(43) 公開日 平成28年7月11日(2016.7.11)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 M 10/48 (2006.01)	HO 1 M 10/48	P 2 G 2 1 6
GO 1 R 31/36 (2006.01)	GO 1 R 31/36	A 5 G 5 0 3
HO 2 J 7/00 (2006.01)	HO 1 M 10/48	3 O 1 5 H O 3 O
	HO 2 J 7/00	Q

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2015-181049 (P2015-181049)
 (22) 出願日 平成27年9月14日 (2015.9.14)
 (31) 優先権主張番号 特願2014-266239 (P2014-266239)
 (32) 優先日 平成26年12月26日 (2014.12.26)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 000004260
 株式会社デンソー
 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地
 (74) 代理人 100121821
 弁理士 山田 強
 (74) 代理人 100139480
 弁理士 日野 京子
 (74) 代理人 100125575
 弁理士 松田 洋
 (74) 代理人 100175134
 弁理士 北 裕介
 (72) 発明者 河合 利幸
 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会社デンソー内

最終頁に続く

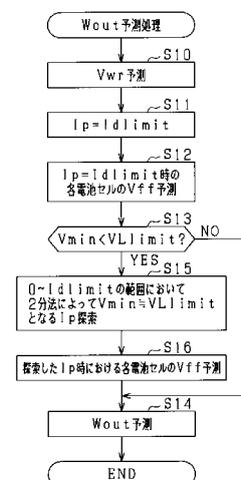
(54) 【発明の名称】 電池電力予測装置

(57) 【要約】

【課題】 電池セルの低温時においても、電池セルの許容入出力電力を高精度に予測できる電池電力予測装置を提供する。

【解決手段】 電池 ECU は、電池セルの電池モデルに基づいて、現在から放電側規定時間経過後の許容出力電力を予測する。電池モデルは、直流抵抗モデルと、反応抵抗モデルと、拡散抵抗モデルとから構成されている。反応抵抗モデルは、バトラーボルマー式から導かれ、交換電流密度と相関のある反応抵抗パラメータを含む。電池 ECU は、現在から放電側規定時間経過後に拡散抵抗モデルに残る残電圧を連続時間式に基づいて予測する。電池 ECU は、現在から放電側規定時間経過後に新たに生じる拡散抵抗モデルの将来の分極電圧を連続時間式に基づいて予測する。電池 ECU は、残電圧及び将来の分極電圧の合計値、直流抵抗モデルにおける電位差、並びに反応抵抗モデルにおける電位差に基づいて上記許容出力電力を予測する。

【選択図】 図 1 3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

2次電池(20a)の出力可能電力及び入力可能電力のうち少なくとも一方を予測対象値とし、前記2次電池の電池モデルに基づいて、現在から規定時間経過後の前記予測対象値を予測する電池電力予測装置において、

前記電池モデルは、

前記2次電池の直流抵抗(R_s)を表す直流抵抗モデルと、

前記2次電池の反応抵抗を表すモデルであって、パトラーボルマー式から導かれ、交換電流密度と相関のある反応抵抗パラメータ()を含む反応抵抗モデルと、

抵抗とキャパシタとの並列接続体を含むRC等価回路モデルであって、前記2次電池の拡散抵抗を表す拡散抵抗モデルとから構成され、

前記RC等価回路モデルの回路定数を含む式であって、前記拡散抵抗モデルの現在の分極電圧を算出する離散式に基づいて、前記現在の分極電圧を算出する第1分極電圧演算手段と、

前記回路定数を含む式であって、前記現在の分極電圧が時間経過とともに減少して現在から前記規定時間経過後に残る前記分極電圧である残電圧を予測する連続時間式に、前記現在の分極電圧を入力することにより前記残電圧を予測する残電圧予測手段と、

現在から前記規定時間経過後に新たに生じる前記拡散抵抗モデルの将来の分極電圧を予測する連続時間式に基づいて、前記将来の分極電圧を予測する第2分極電圧演算手段と、

前記残電圧と前記将来の分極電圧との合計値、前記直流抵抗モデルにおける電位差、及び前記反応抵抗モデルにおける電位差に基づいて、現在から前記規定時間経過後の前記予測対象値を予測する電力予測手段とを備えることを特徴とする電池電力予測装置。

【請求項 2】

前記反応抵抗パラメータは、定数を α 、 β 、前記2次電池に流れる電流を I 、前記2次電池の温度を T 、前記反応抵抗における電位差を V と定義すると、

【数 1】

$$\Delta V = \frac{\alpha}{\gamma} T \cdot \sinh^{-1}(\beta \cdot \gamma \cdot I)$$

を満たすパラメータである請求項1記載の電池電力予測装置。

【請求項 3】

前記2次電池は、直列接続された複数の電池セルのそれぞれであり、

前記電力予測手段は、

前記規定時間を放電側規定時間とし、前記2次電池のそれぞれについて、現在から前記放電側規定時間経過するまでの期間に渡って前記2次電池の放電電流をその許容上限放電電流にしたと仮定した場合における現在から前記放電側規定時間経過後の前記2次電池の端子間電圧を予測する第1放電時予測手段と、

前記第1放電時予測手段によって予測された前記2次電池のそれぞれの端子間電圧の最小値がその許容下限電圧以上となる場合、前記第1放電時予測手段によって予測された前記2次電池のそれぞれの端子間電圧の総和と、前記許容上限放電電流とに基づいて、現在から前記放電側規定時間経過後の前記出力可能電力を予測する第1出力電力予測手段と、

前記第1放電時予測手段によって予測された前記2次電池のそれぞれの端子間電圧の最小値が前記許容下限電圧未満となる場合、現在から前記放電側規定時間経過後の前記2次電池のそれぞれの端子間電圧の最小値を前記許容下限電圧とする前記2次電池の放電電流であって、前記許容上限放電電流以下の放電電流である最大放電電流を所定の探索法に従って探索する放電電流探索手段と、

前記2次電池のそれぞれについて、現在から前記放電側規定時間経過するまでの期間に渡って前記2次電池の放電電流を前記最大放電電流にしたと仮定した場合における現在から前記放電側規定時間経過後の前記2次電池の端子間電圧を予測する第2放電時予測手段と、

10

20

30

40

50

前記第 2 放電時予測手段によって予測された前記 2 次電池のそれぞれの端子間電圧の総和と、前記最大放電電流とに基づいて、現在から前記放電側規定時間経過後の前記出力可能電力を予測する第 2 出力電力予測手段とを含む請求項 1 又は 2 記載の電池電力予測装置。

【請求項 4】

前記放電電流探索手段は、0 から前記許容上限放電電流までの範囲を探索範囲として前記最大放電電流を探索する請求項 3 記載の電池電力予測装置。

【請求項 5】

前記 2 次電池は、直列接続された複数の電池セルのそれぞれであり、
前記電力予測手段は、

10

前記規定時間を当該電池電力予測装置の 1 処理周期とし、前記 2 次電池のそれぞれについて、現在から前記 1 処理周期経過するまでの期間に渡って前記 2 次電池の充電電流をその許容上限充電電流にしたと仮定した場合における現在から前記 1 処理周期後の前記 2 次電池の端子間電圧を予測する第 1 充電時予測手段と、

前記第 1 充電時予測手段によって予測された前記 2 次電池のそれぞれの端子間電圧の最大値がその許容上限電圧以下となる場合、前記第 1 充電時予測手段によって予測された前記 2 次電池のそれぞれの端子間電圧の総和と、前記許容上限充電電流とに基づいて、現在から前記 1 処理周期後の前記入力可能電力を予測する第 1 入力電力予測手段と、

前記第 1 充電時予測手段によって予測された前記 2 次電池のそれぞれの端子間電圧の最大値が前記許容上限電圧を超える場合、前記規定時間を前記 1 処理周期よりも長い所定時間とし、現在から前記所定時間経過後の前記 2 次電池のそれぞれの端子間電圧の最大値を前記許容上限電圧とする前記 2 次電池の充電電流であって、前記許容上限充電電流以下の充電電流である最大充電電流を所定の探索法に従って探索する充電電流探索手段と、

20

前記 2 次電池のそれぞれについて、現在から前記所定時間経過するまでの期間に渡って前記 2 次電池の充電電流を前記最大充電電流にしたと仮定した場合における現在から前記所定時間経過後の前記 2 次電池の端子間電圧を予測する第 2 充電時予測手段と、

前記第 2 充電時予測手段によって予測された前記 2 次電池のそれぞれの端子間電圧の総和と、前記最大充電電流とに基づいて、現在から前記所定時間経過後の前記入力可能電力を予測する第 2 入力電力予測手段とを含む請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の電池電力予測装置。

30

【請求項 6】

前記充電電流探索手段は、0 から前記許容上限充電電流までの範囲を探索範囲として前記最大充電電流を探索する請求項 5 記載の電池電力予測装置。

【請求項 7】

前記 RC 等価回路モデルは、N 個 (N は 1 以上の整数) の前記並列接続体にて構成されたモデルであり、

前記拡散抵抗モデルにおいて、前記 RC 等価回路モデルを構成する m 番目 (m は正の整数) の前記並列接続体の前記抵抗の抵抗値を R_{wm} 、前記キャパシタの容量を C_{wm} と定義し、

前記残電圧予測手段は、前記規定時間を T_{ff} 、前記現在の分極電圧を V_{wm} と定義すると、前記残電圧 V_{wr} を

40

【数 2】

$$V_{wr} = \sum_{m=1}^N \left[V_{wm} \cdot \exp \left(- \frac{T_{ff}}{C_{wm} \cdot R_{wm}} \right) \right]$$

に基づいて予測し、

前記第 2 分極電圧演算手段は、現在から前記規定時間経過するまでの期間に渡って前記 2 次電池に流す電流を I_p と定義すると、前記将来の分極電圧 V_{ws} を

【数 3】

$$V_{ws} = \sum_{m=1}^N (I_p \times R_{wm}) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T_{ff}}{C_{wm} \times R_{wm}}\right) \right\}$$

に基づいて予測する請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の電池電力予測装置。

【請求項 8】

前記 2 次電池のそれぞれについて、現在から前記規定時間経過するまでの期間における前記 2 次電池の開放端電圧の変化量を予測する OCV 変化予測手段をさらに備え、

前記電力予測手段は、前記開放端電圧の変化量をさらに用いて、現在から前記規定時間経過後の前記予測対象値を予測する請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の電池電力予測装置。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、2 次電池の出力可能電力及び入力可能電力のうち少なくとも一方を予測対象値とし、前記 2 次電池の電池モデルに基づいて、現在から規定時間経過後の前記予測対象値を予測する電池電力予測装置に関する。

【背景技術】

【0002】

この種の装置としては、例えば下記特許文献 1 に見られるように、1 つの直流抵抗と R C 等価回路とで構成された電池モデル（以降、1 R C 等価回路モデルと記載）に基づいて、現在から所定時間持続できる最大入出力可能電力を予測するものが知られている。この装置について、2 次電池の放電時を例にして説明すると、まず、1 R C 等価回路モデルの各パラメータを、適用デジタルフィルタを用いて一括推定する。そして、推定された各パラメータに基づいて、所定時間放電した後の 2 次電池の端子間電圧を推定し、推定された端子間電圧がその最小可能電圧となる場合の最大出力電流を算出する。そして、最大出力電流と最小可能電圧との乗算値として、最大出力可能電力を予測する。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

30

【特許文献 1】特許第 4 7 8 8 3 0 7 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

上記 1 R C 等価回路モデルでは、時定数が小さいため電解液抵抗と電荷移動抵抗及び電気 2 重容量とを 1 つの直流抵抗で模擬し、拡散抵抗を抵抗体 R 及びキャパシタ C の並列回路で表現する構成としている。ここで、この電池モデルは、2 次電池の電流 - 電圧の非線形領域の特性を表現できる構成にはなっていない。これは、2 次電池の電流 - 電圧の非線形特性が、2 次電池が低温になるほど支配的になっていくためであり、特に 0 以下の領域では、非線形特性が無視できないためである。したがって、1 R C 等価回路モデルを用いた上記特許文献 1 に記載の装置では、2 次電池の低温時において最大入出力可能電力の予測精度が低下するおそれがある。

40

【0005】

本発明は、2 次電池の低温時においても、2 次電池の出力可能電力及び入力可能電力のうち少なくとも一方を高精度に予測できる電池電力予測装置を提供することを主たる目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

以下、上記課題を解決するための手段、及びその作用効果について記載する。

【0007】

50

本発明は、2次電池(20a)の出力可能電力及び入力可能電力のうち少なくとも一方を予測対象値とし、前記2次電池の電池モデルに基づいて、現在から規定時間経過後の前記予測対象値を予測する電池電力予測装置において、前記電池モデルは、前記2次電池の直流抵抗(R_s)を表す直流抵抗モデルと、前記2次電池の反応抵抗を表すモデルであって、バトラーボルマー式から導かれ、交換電流密度と相関のある反応抵抗パラメータ()を含む反応抵抗モデルと、抵抗とキャパシタとの並列接続体を含むRC等価回路モデルであって、前記2次電池の拡散抵抗を表す拡散抵抗モデルとから構成され、前記RC等価回路モデルの回路定数を含む式であって、前記拡散抵抗モデルの現在の分極電圧を算出する離散式に基づいて、前記現在の分極電圧を算出する第1分極電圧演算手段と、前記回路定数を含む式であって、前記現在の分極電圧が時間経過とともに減少して現在から前記規定時間経過後に残る前記分極電圧である残電圧を予測する連続時間式に、前記現在の分極電圧を入力することにより前記残電圧を予測する残電圧予測手段と、現在から前記規定時間経過後に新たに生じる前記拡散抵抗モデルの将来の分極電圧を予測する連続時間式に基づいて、前記将来の分極電圧を予測する第2分極電圧演算手段と、前記残電圧と前記将来の分極電圧との合計値、前記直流抵抗モデルにおける電位差、及び前記反応抵抗モデルにおける電位差に基づいて、現在から前記規定時間経過後の前記予測対象値を予測する電力予測手段とを備えることを特徴とする。

10

20

30

40

50

【0008】

2次電池の内部抵抗は、直流抵抗、反応抵抗、及び拡散抵抗に大きく分けられる。このため、上記発明では、電池モデルを、直流抵抗モデル、反応抵抗モデル、及び拡散抵抗モデルから構成している。

【0009】

ここで、2次電池の低温時には、反応抵抗に起因する電流-電圧の非線形特性が支配的となる。このため、上記発明では、反応抵抗モデルを、電気化学におけるバトラーボルマー式から導かれ、2次電池の非線形特性を表現するモデルとする。詳しくは、このモデルは、バトラーボルマー式の交換電流密度に相当するパラメータであって、2次電池の温度と相関を持たせた反応抵抗パラメータを含む。反応抵抗パラメータが2次電池の温度に依存することから、電池モデルに反応抵抗パラメータを含む反応抵抗モデルを含むことにより、例えば上記特許文献1に記載された技術では表現できなかった低温時における電流-電圧の非線形特性を精度よく表すことができる。そして、上記発明では、反応抵抗モデルにおける電位差を現在から規定時間経過後の上記予測対象値の予測に用いるため、予測対象値を低温時においても高精度に予測することができる。

【0010】

さらに上記発明では、現在の分極電圧を入力として、連続時間式に基づいて残電圧を算出する。また、連続時間式に基づいて将来の分極電圧を算出する。連続時間式による算出手法によれば、予測対象値の予測に用いる残電圧及び将来の分極電圧のそれぞれの演算負荷を大きく低減でき、ひいては予測対象値を予測する場合の演算負荷を低減することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】一実施形態にかかる電池パックの構成図。

【図2】電池ECUの処理を示すブロック図。

【図3】電池モデルを示す図。

【図4】直流抵抗電位差算出部の処理を示すブロック図。

【図5】反応抵抗電位差算出部の処理を示すブロック図。

【図6】反応抵抗パラメータと電池温度との関係を示す図。

【図7】反応抵抗における電流-電圧特性の温度依存性を示す図。

【図8】分極電圧算出部の処理を示すブロック図。

【図9】関連技術にかかる電圧推定結果を示すタイムチャート。

【図10】一実施形態にかかる電圧推定結果を示すタイムチャート。

【図 1 1】電力予測手法の概要を示すタイムチャート。

【図 1 2】電力予測手法の概要を示す図。

【図 1 3】許容出力電力予測処理の手順を示すフローチャート。

【図 1 4】電流推定態様の一例を示す図。

【図 1 5】電流推定態様の一例を示す図。

【図 1 6】許容出力電力予測処理の手順を示すフローチャート。

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下、本発明にかかる電池電力予測装置を具体化した一実施形態について、図面を参照しつつ説明する。本実施形態では、上記装置を、例えば、車載主機としての回転電機（モータジェネレータ）を備える車両や、アイドリングストップシステムなど車載補機電池を活用する車両に適用する。

10

【0013】

図 1 に示すように、電池パック 10 は、組電池 20 と、電池 ECU 30 とを備えている。組電池 20 は、複数の電池セル 20 a の直列接続体から構成され、図示しないモータジェネレータ等と電力の授受を行う。電池セル 20 a は、2 次電池であり、本実施形態では、リチウムイオン 2 次電池を用いている。

【0014】

電池パック 10 は、電圧センサ 21、温度センサ 22、及び電流センサ 23 を備えている。電圧センサ 21 は、各電池セル 20 a の端子間電圧を検出する電圧検出手段である。温度センサ 22 は、組電池 20（各電池セル 20 a）の温度を検出する温度検出手段である。電流センサ 23 は、組電池 20（各電池セル 20 a）に流れる充放電電流を検出する電流検出手段である。

20

【0015】

電池 ECU 30 は、CPU、メモリ 31（記憶装置）、及び図示しない I/O 等を備えるコンピュータとして構成されている。CPU は、複数の電池セル 20 a のそれぞれに対応した単セル演算部 32 と、電力予測部 33 とを含む。本実施形態では、CPU（単セル演算部 32、電力予測部 33）の 1 処理周期が 0.1 秒に設定されている。電池 ECU 30 には、電圧センサ 21、温度センサ 22 及び電流センサ 23 の検出値が入力される。

【0016】

電池 ECU 30 は、組電池 20 の許容出力電力及び許容入力電力のそれぞれを予測する処理を行う。以下、この予測処理について、単セル演算部 32 及び電力予測部 33 の順に説明する。

30

【0017】

< 1. 単セル演算部 32 の処理 >

図 2 を用いて、各単セル演算部 32（CPU）のそれぞれが行う処理の概要について説明する。単セル演算部 32 は、直流抵抗電位差算出部 34、反応抵抗電位差算出部 35、分極電圧算出部 36、及び SOC 変換部 37 等を備えている。

【0018】

各算出部 34 ~ 36 は、図 3 に示す電池セル 20 a の各パラメータを推定する。ここで、図 3 は、内部インピーダンス等を表現する電池モデルを示す。本実施形態において、電池モデルは、直流抵抗モデル、反応抵抗モデル、及び拡散抵抗モデルの直列接続体として表されている。図 3 において、「 R_s 」は、溶液中や電極の通電抵抗を表す直流抵抗を示し、「 V_s 」は直流抵抗 R_s における電位差（以下、直流抵抗電位差）を示す。「 V 」は、正極及び負極における電極界面反応を表す反応抵抗における電位差（以下、反応抵抗電位差）を示す。「 R_{w1} , R_{w2} , R_{w4} , R_{w4} 」は、活物質中や溶液中のイオン拡散を表す拡散抵抗における抵抗成分項を示し、「 C_{w1} , C_{w2} , C_{w3} , C_{w4} 」は、経過時間とともに抵抗が変化することを表現するための容量成分項を示し、「 V_{w1} , V_{w2} , V_{w3} , V_{w4} 」は、各拡散抵抗における分極電圧を示す。本実施形態において、拡散抵抗は、抵抗成分及び容量成分の並列接続体が複数個（本実施形態では 4 個）直列に接

40

50

続された構成とする。抵抗成分と容量成分の並列接続による等価回路は、フォスター型等価回路と呼ばれる。

【0019】

なお、本実施形態において、図3に示す反応抵抗モデルは、便宜的に直流抵抗のみで表され、モデルにおける時定数が無視されている。これは、本実施形態において、単セル演算部32(CPU)の1処理周期が、反応抵抗における時定数よりも十分長く設定されているためである。

【0020】

まず、図4を用いて、直流抵抗電位差算出部34について説明する。

【0021】

直流抵抗電位差算出部34において、Rs算出部34aは、温度センサ22によって検出された電池温度Tsに基づいて、直流抵抗Rsを算出する。直流抵抗Rsの算出に電池温度Tsを用いるのは、直流抵抗Rsが電池セル20aの温度に依存するためである。本実施形態では、直流抵抗Rs及び電池温度Tsが予め関係付けられたRsマップを用いて、直流抵抗Rsを算出する。本実施形態では、電池温度Tsが高いほど、直流抵抗Rsが低くなるようにRsマップが適合されている。本実施形態において、Rsマップは、メモリ31に記憶されている。

【0022】

第1乗算部34bは、Rs算出部34aによって算出された直流抵抗Rsと、電流センサ23によって検出された電流(以下、検出電流Is)との乗算値として、直流抵抗電位差Vsを算出する。ちなみに本実施形態では、電池セル20aの放電電流を負の値で表し、充電電流を正の値で表すこととする。このため本実施形態において、直流抵抗電位差Vsは、電池セル20aの放電時において負の値となり、充電時において正の値となる。

【0023】

続いて、図5を用いて、反応抵抗電位差算出部35について説明する。

【0024】

反応抵抗電位差算出部35において、算出部35aは、電池温度Tsに基づいて、反応抵抗に係るパラメータである反応抵抗パラメータを算出する。反応抵抗パラメータの算出に電池温度Tsを用いるのは、反応抵抗パラメータが電池セル20aの温度に依存するためである。本実施形態では、反応抵抗パラメータの自然対数「ln」と電池温度Ts(絶対温度)とが予め関係付けられたマップを用いて、反応抵抗パラメータを算出する。以下、反応抵抗パラメータについて説明する。

【0025】

電気化学におけるバトラーボルマー式は、下式(eq1)で表される。

【0026】

【数1】

$$i = i_0 \left\{ \exp\left(\frac{\alpha_s n F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-(1-\alpha_s) n F \eta}{RT}\right) \right\} \dots \text{(eq1)}$$

上式(eq1)において、「i」は電流密度を示し、「i0」は交換電流密度を示し、「s」は電極反応の移動係数(酸化反応)を示し、「n」は電荷数を示し、「F」はファラデー定数を示し、「η」は過電圧を示し、「R」は気体定数を示し、「T」は絶対温度を示す。

【0027】

上式(eq1)において、簡素化のために正負極を等価(すなわち、充放電効率が同一)として「a = s = 1 - s」とすると、上式(eq1)は下式(eq2)となる。

【0028】

10

20

30

40

【数 2】

$$i = i_0 \left\{ \exp\left(\frac{anF\eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-anF\eta}{RT}\right) \right\} \dots (eq2)$$

双曲線正弦関数と指数関数との関係を用いて、上式 (eq 2) を下式 (eq 3) のように変形する。

【0029】

【数 3】

$$i = 2 \cdot i_0 \cdot \sinh\left(\frac{anF\eta}{RT}\right) \dots (eq3)$$

10

上式 (eq 3) を過電圧 η について解くと、下式 (eq 4) となる。

【0030】

【数 4】

$$\eta = \frac{RT}{anF} \sinh^{-1}\left(\frac{1}{2 \cdot i_0} i\right) \dots (eq4)$$

一方、過電圧 η と反応抵抗における電位差 V との関係、比例定数 γ を用いて下式 (eq 5) で表す。また、電流密度 i と電池セルに流れる電流 I との関係、比例定数 β を用いて下式 (eq 6) で表す。

20

【0031】

【数 5】

$$\eta = \gamma \cdot \Delta V \dots (eq5)$$

【0032】

【数 6】

$$i = \gamma \cdot I \dots (eq6)$$

上式 (eq 4) に上式 (eq 5) , (eq 6) を代入すると、下式 (eq 7) が導かれる。

30

【0033】

【数 7】

$$\gamma \cdot \Delta V = \frac{RT}{anF} \sinh^{-1}\left(\frac{1}{2 \cdot i_0} \gamma \cdot I\right) \dots (eq7)$$

ここで、上式 (eq 7) を下式 (eq 8) のように整理する。

【0034】

【数 8】

$$\Delta V = \frac{\alpha}{\gamma} T \cdot \sinh^{-1}(\beta \cdot \gamma \cdot I) \dots (eq8)$$

40

$$\text{ただし、} \quad \alpha = \frac{R}{anF}, \quad \beta = \frac{1}{2 \cdot i_0}$$

上式 (eq 8) において、「 α 」は上記反応抵抗パラメータを示し、「 T 」は定数を示し、「 β 」は適合定数を示し、電池セルに流れる充放電電流 I と反応抵抗電位差 V とを反応抵抗パラメータによって関係付けることが可能なことを示している。上式 (eq 8) からわかるように、パトラーボルマー式から導かれる反応抵抗パラメータは、電池セルに流れる電流を独立変数とし、反応抵抗電位差 V を従属変数とする逆双曲線正弦関数において、逆双曲線正弦関数と反応抵抗電位差 V との関係を決める係数となる。

【0035】

50

ここで、交換電流密度 i_0 が電池温度 T に依存することから、反応抵抗パラメータも電池温度 T に依存する。このため、本実施形態では、アレニウスプロットに従って、反応抵抗パラメータの自然対数を、電池温度 T_s の逆数、又は電池温度 T_s に対する 1 次式となる形で適合したマップをメモリ 31 に記憶させている。ここで、図 6 には、反応抵抗パラメータの自然対数を、電池温度 T_s の逆数に対する 1 次式となる形で適合したマップを例示した。

【0036】

算出部 35 a によって算出された反応抵抗パラメータは、電位差算出部 35 b に入力される。電位差算出部 35 b は、反応抵抗パラメータと検出電流 I_s とを入力として、上式 (eq 8) に基づいて、反応抵抗電位差 V を算出する。上式 (eq 8) は、図 7 に示すように、低温になると電流に対して反応抵抗電位差 V が非線形になる式である。電池セルの温度が低い場合には、反応抵抗パラメータを用いることにより、電流 - 電圧の非線形特性を精度よく表現した反応抵抗電位差 V を算出することができる。

10

【0037】

続いて、図 8 を用いて、分極電圧算出部 36 について説明する。分極電圧算出部 36 は、拡散抵抗に係るパラメータを算出する。以下、拡散抵抗に係るパラメータについて説明した後、分極電圧の算出手法について説明する。

【0038】

電気化学における拡散方程式に基づいて、拡散抵抗に係るワールブルグインピーダンス Z を導出する。ここで、インピーダンス Z を下式 (eq 9) によって表す。

20

【0039】

【数 9】

$$Z = \frac{\Delta v}{\Delta i} = \frac{\frac{RT}{nF} \cdot \frac{\Delta C|_{x=0}}{C_0}}{-nFD \frac{\partial \Delta C}{\partial x} \Big|_{x=0}} \dots (eq9)$$

上式 (eq 9) において、分子は、起電圧が物質の表面濃度の自然対数に比例することを示すネルンストの式に基づくものである。分子において、「 C_0 」は平均濃度を示し、「 C 」は平均濃度 C_0 に対する濃度変化を示し、「 x 」は電極からの位置を示す。分母は、単位時間に単位面積を通過する物質質量が濃度勾配に比例することを示すフィックの第 1 法則に基づくものである。分母において、「 D 」は拡散係数を示す。

30

【0040】

上式 (eq 9) を整理すると、下式 (eq 10) が導かれる。

【0041】

【数 10】

$$Z = \frac{RT}{n^2 F^2 D C_0} \cdot \frac{\Delta C|_{x=0}}{-\frac{\partial \Delta C}{\partial x} \Big|_{x=0}} \dots (eq10)$$

40

ここで、電極に交流電圧を印加した場合において、電圧が正弦波で変化すると、濃度も正弦波で変化すると仮定する。このとき、濃度変化 C を虚数 j と角速度 ω を用いて下式 (eq 11) で表すこととする。

【0042】

【数 11】

$$\Delta v = |\Delta v| \exp(j\omega t), \quad \Delta C = |\Delta C| \exp(j\omega t) \dots (eq11)$$

上式 (eq 11) において、 $|\Delta v|$, $|\Delta C|$ は複素振幅を示す。ここで、フィックの第 2 法則は下式 (eq 12) で表される。

【0043】

50

【数 1 2】

$$\frac{\partial \Delta C}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Delta C}{\partial x^2} \quad \dots \quad (eq12)$$

上式 (eq 1 2) の左辺は、上式 (eq 1 1) の時間微分値であるので「 $j \omega C$ 」となる。このため、上式 (eq 1 2) の一般解は、定数 k_1 , k_2 を用いて下式 (eq 1 3) で表わされる。

【0 0 4 4】

【数 1 3】

$$\Delta C = k_1 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}x\right) + k_2 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{j\omega}{D}}x\right) \quad \dots \quad (eq13)$$

10

ここで、「 L 」を拡散長として定義する。「 $x = L$ 」となる場合に濃度変化 C が 0 になるとの条件を課すと、上式 (eq 1 3) は下式 (eq 1 4) となる。

【0 0 4 5】

【数 1 4】

$$\begin{aligned} 0 &= k_1 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}L\right) + k_2 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{j\omega}{D}}L\right) \\ \rightarrow k_2 &= -k_1 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}2L\right) \quad \dots \quad (eq14) \end{aligned}$$

20

したがって、濃度変化 C は、下式 (eq 1 5) で表される。

【0 0 4 6】

【数 1 5】

$$\begin{aligned} \Delta C &= k_1 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}x\right) - k_1 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}2L\right) \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{j\omega}{D}}x\right) \\ &= k_1 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}L\right) \left\{ \exp\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}(x-L)\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{j\omega}{D}}(x-L)\right) \right\} \\ &= 2 \cdot k_1 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}L\right) \cdot \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}(x-L)\right) = k \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}L\right) \cdot \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}(x-L)\right) \quad \dots \quad (eq15) \end{aligned}$$

30

上式 (eq 1 5) を x で偏微分すると、下式 (eq 1 6) となる。

【0 0 4 7】

【数 1 6】

$$\frac{\partial \Delta C}{\partial x} = \sqrt{\frac{j\omega}{D}} \cdot k \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}L\right) \cdot \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}(x-L)\right) \quad \dots \quad (eq16)$$

40

上式 (eq 1 5) , (eq 1 6) を上式 (eq 1 0) に代入すると、上式 (eq 1 0) の一部が下式 (eq 1 7) のように表される。

【0 0 4 8】

【数 1 7】

$$\frac{\Delta C|_{x=0}}{-\frac{\partial \Delta C}{\partial x}|_{x=0}} = \frac{k \cdot \sinh\left(-\sqrt{\frac{j\omega}{D}}L\right)}{-\sqrt{\frac{j\omega}{D}} \cdot k \cdot \cosh\left(-\sqrt{\frac{j\omega}{D}}L\right)} = \sqrt{\frac{D}{j\omega}} \cdot \tanh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}}L\right) \quad \dots \quad (eq17)$$

50

したがって、上式 (eq 10) のワールブルグインピーダンス Z は、ラプラス演算子 s ($= j \times$) を用いて、下式 (eq 18) で表すことができる。

【0049】

【数18】

$$Z = \frac{RT}{n^2 F^2 D C_0} \cdot \sqrt{\frac{D}{j\omega}} \tanh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{D}} L\right) = \frac{RTL}{n^2 F^2 D C_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{L^2}{D}} s} \tanh\left(\sqrt{\frac{L^2}{D}} s\right)$$

$$= \frac{Rd}{\sqrt{\tau d} \cdot s} \tanh(\sqrt{\tau d} \cdot s) \quad \dots \quad (eq18)$$

10

$$\text{ただし、} Rd = \frac{RTL}{n^2 F^2 D C_0}, \quad \tau d = \frac{L^2}{D}$$

本実施形態では、「 Rd 」を第1パラメータと称し、「 d 」を第2パラメータと称することとする。ここで、拡散係数 D は下式 (eq 19) で表される。

【0050】

【数19】

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad \dots \quad (eq19)$$

20

上式 (eq 19) において、「 D_0 」は温度に依存しない定数を示し、「 E 」は活性化エネルギーを示す。上式 (eq 19) を用いると、第1, 第2パラメータ Rd , d は、下式 (eq 20) で表される。

【0051】

【数20】

$$Rd = \frac{RTL}{n^2 F^2 C_0} \cdot \frac{1}{D_0} \exp\left(\frac{E}{RT}\right), \quad \tau d = \frac{L^2}{D_0} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad \dots \quad (eq20)$$

上式 (eq 20) は、第1, 第2パラメータ Rd , d が電池温度 T に依存することを示している。上式 (eq 20) の自然対数をとると、下式 (eq 21) が導かれる。

30

【0052】

【数21】

$$\ln(Rd) = \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln\left(\frac{RTL}{n^2 F^2 C_0} \cdot \frac{1}{D_0}\right), \quad \ln(\tau d) = \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln\left(\frac{L^2}{D_0}\right) \quad \dots \quad (eq21)$$

本実施形態では、アレニウスプロットに従って、第1, 第2パラメータ Rd , d の自然対数を、電池温度 T の逆数、又は電池温度 Ts に対する1次式となる形で適合した Rd マップ, d マップをメモリ 31 に記憶させている。

【0053】

分極電圧算出部 36 において、 Rd 算出部 36 a は、上述した Rd マップと電池温度 Ts とを用いて、第1パラメータ Rd を算出する。 d 算出部 36 b は、上述した d マップと電池温度 Ts とを用いて、第2パラメータ d を算出する。

40

【0054】

抵抗成分算出部 36 c は、第1パラメータ Rd に基づいて、拡散抵抗を構成する第1~第4抵抗の各抵抗値 $Rw1 \sim Rw4$ を下式 (eq 22) によって算出する。

【0055】

【数22】

$$Rwm = \frac{8 \cdot Rd}{(2m-1)^2 \pi^2} \quad \dots \quad (eq22)$$

50

上式 (eq 22) において、「m」は正の整数 (本実施形態では、 $m = 1, 2, 3, 4$) を示す。容量成分算出部 36d は、第 1, 第 2 パラメータ R_d , d に基づいて、拡散抵抗を構成する第 1 ~ 第 4 キャパシタの各容量 $C_{w1} \sim C_{w4}$ を下式 (eq 23) によって算出する。

【0056】

【数23】

$$C_{wm} = \frac{\tau d}{2 \cdot R_d} \dots (eq23)$$

上式 (eq 22), (eq 23) によって第 m 抵抗の抵抗値 R_{wm} , 第 m キャパシタの容量 C_{wm} を算出できるのは、上式 (eq 18) によって表されるワールブルグインピーダンスに合致する等価回路と、ワールブルグインピーダンスと等価になる級数化された等価回路の定数の法則性とを、本発明者らが文献等によって調べた結果に基づくものである。なお、上記文献としては、例えば、「Modelling Ni-mH battery using Cauer and Foster structures. E. Kuhn et al. JOURNAL of Power Sources 158 (2006)」がある。

10

【0057】

第 1 電圧算出部 36e は、検出電流 I_s と、抵抗成分算出部 36c によって算出された第 1 抵抗値 R_{w1} と、容量成分算出部 36d によって算出された第 1 容量 C_{w1} とに基づいて、拡散抵抗における第 1 分極電圧 V_{w1} を算出する。本実施形態では、拡散抵抗モデルを構成する抵抗とキャパシタとの並列回路を表す伝達関数を離散化した式に基づいて、第 1 分極電圧 V_{w1} を逐次算出する。具体的には、本実施形態では、前回の処理周期で算出された第 1 分極電圧 V_{w1} , 検出電流 I_s と、現在 (今回の処理周期) の検出電流 I_s とを入力として、下式 (eq 24) を用いて、第 1 分極電圧 V_{w1} を算出する。

20

【0058】

【数24】

$$V_{w1}(t) = -a1 \cdot V_{w1}(t-1) + b1 \cdot I_s(t) + b1 \cdot I_s(t-1) \dots (eq24)$$

$$\text{ただし、} a1 = \frac{\Delta T - 2 \cdot R_{w1} \cdot C_{w1}}{\Delta T + 2 \cdot R_{w1} \cdot C_{w1}}, \quad b1 = \frac{\Delta T \cdot R_{w1}}{\Delta T + 2 \cdot R_{w1} \cdot C_{w1}}$$

30

上式 (eq 24) において、「T」は 1 処理周期を示す。なお、第 2, 第 3, 第 4 電圧算出部 36f, 36g, 36h も、第 1 電圧算出部 36e と同様に、抵抗値 R_{w2}, R_{w3}, R_{w4} と、容量 C_{w2}, C_{w3}, C_{w4} と、検出電流 I_s とに基づいて、第 2, 第 3, 第 4 分極電圧 V_{w2}, V_{w3}, V_{w4} を算出する。

【0059】

先の図 2 の説明に戻り、第 1 加算部 38 は、各電圧算出部 36e ~ 36h によって算出された各分極電圧 $V_{w1} \sim V_{w4}$ の加算値として、合計分極電圧 V_{w0} を算出する。第 2 加算部 39 は、直流抵抗電位差 V_s 、反応抵抗電位差 V 、及び合計分極電圧 V_{w0} の加算値を算出する。開放端電圧算出部 40 は、電圧センサ 21 によって検出された電池セル 20a の端子間電圧 CCV から第 2 加算部 39 の出力値を減算することで、電池セル 20a の開放端電圧 OCV を算出する。

40

【0060】

SOC 変換部 37 は、第 2 加算部 40 によって算出された開放端電圧 OCV に基づいて、電池セル 20a の充電率 (SOC) を算出する。本実施形態では、開放端電圧 OCV 及び SOC が予め関係付けられた SOC マップを用いて、SOC を算出する。本実施形態において、SOC マップは、メモリ 31 に記憶されている。

【0061】

続いて、上述した電池モデルによる電池セル 20a の電圧推定精度を関連技術と比較しつつ説明する。関連技術とは、1 つの直流抵抗及び 1 RC 等価回路の直列接続体からなる

50

電池モデルのことである。図9は関連技術にかかる電池セルの端子間電圧の推定結果を示し、図10は本実施形態にかかる電池セルの端子間電圧の推定結果を示す。ここで図中、推定値とは、第2加算値39の出力値に開放端電圧を加えた値に相当する。この開放端電圧は、例えば、SOC変換部37によって算出されたSOCに基づいて算出される。また、図9及び図10は、電流-電圧特性に非線形が現れる低温度(例えば-15)における試験結果である。

【0062】

図9に示すように、関連技術では、電池セル20aの充放電電流の大きさによって電圧実測値と電圧推定値とにずれが生じる。これに対し、本実施形態では、図10に示すように、電圧実測値と電圧推定値とのずれが大きく低減されている。これは、反応抵抗モデルにおいて、電池セルに流れる電流に対して非線形な式が含まれていることにより、非線形特性を精度よく表現できているためである。したがって、本実施形態にかかる反応抵抗モデルを含む電池モデルによれば、許容出力電力及び許容入力電力の予測精度を向上させることができる。

10

【0063】

<2.電力予測部33の処理>

続いて、電力予測部33が行う許容出力電力 W_{out} 及び許容入力電力 W_{in} の予測処理について説明する。

【0064】

まず、許容出力電力 W_{out} の予測処理について説明する。この処理は、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するまでの期間に渡って、組電池20が継続して放電可能な最大電力を許容出力電力 W_{out} として予測する処理である。本実施形態において、放電側規定時間 T_{dff} は、10秒に設定されている。許容出力電力予測処理は、例えば、車両の加速時において車載主機としてのモータジェネレータに電力を供給する組電池の出力性能が十分であるか、又はアイドルストップシステムにおいて、エンジン再始動用のスタータに電力を供給する補機電池の出力性能が十分であることを予測するために用いられる。

20

【0065】

図11及び図12を用いて、予測処理の概要について説明する。この処理では、図11に示すように、まず、各電池セル20aのそれぞれについて、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するまでの期間に渡って電池セル20aに所定の放電電流 I_p を流すと仮定した場合における現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するタイミングの電池セル20aの端子間電圧 V_{ff} を予測する。このとき、各電池セル20aの端子間電圧 V_{ff} の最小値が、電池セル20aの許容下限電圧 V_{LLimit} と一致する場合は、予測された各電池セル20aのそれぞれの端子間電圧 V_{ff} の総和と、所定の放電電流 I_p との乗算値を上記許容出力電力 W_{out} として予測することができる。ここで、端子間電圧 V_{ff} の予測には、図12に示すように、合計残電圧 V_{wr} が用いられる。合計残電圧 V_{wr} は、拡散抵抗における現在の分極電圧が時間経過とともに減少し、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するタイミングに残る分極電圧のことである。つまり、拡散抵抗モデルを構成する第 m キャパシタに現在電荷が蓄積されている場合、拡散抵抗における現在の分極電圧の影響は、放電側規定時間 T_{dff} 経過後においても残る。このため、合計残電圧 V_{wr} を算出しておくことで、第 m キャパシタの蓄積電荷量の影響を加味することができ、許容出力電力 W_{out} の予測精度の向上を図ることができる。

30

40

【0066】

図13に、本実施形態にかかる許容出力電力 W_{out} の予測処理の手順を示す。この処理は、電力予測部33(CPU)によって例えば所定の処理周期で繰り返し実行される。

【0067】

この一連の処理では、まずステップS10において、各電池セル20aのそれぞれについて、下式(eq25)にて表される連続時間式に基づいて、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するタイミングにおける合計残電圧 V_{wr} を予測する。

【0068】

50

【数 2 5】

$$V_{wr} = \sum_{m=1}^4 \left[V_{wm} \cdot \exp\left(-\frac{T_{dff}}{C_{wm} \cdot R_{wm}}\right) \right] \dots \quad (eq25)$$

上式 (eq 2 5) において、現在の第 1, 第 2, 第 3, 第 4 分極電圧 V_{w1} , V_{w2} , V_{w3} , V_{w4} は、第 1, 第 2, 第 3, 第 4 電圧算出部 3 6 f, 3 6 g, 3 6 h によって算出されたものである。本ステップでは、各分極電圧 $V_{w1} \sim V_{w4}$ のそれぞれについて残電圧を予測し、予測した各残電圧の合計値として、合計残電圧 V_{wr} を算出する。合計残電圧 V_{wr} は、上式 (eq 2 5) からわかるように、時間とともに減少する。

【0069】

続くステップ S 1 1 では、電池セル 2 0 a の仮想動作電流 I_p をその許容上限放電電流 $I_{dlimit} (< 0)$ に設定する。続くステップ S 1 2 では、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するまでの期間に渡って仮想動作電流 I_p (許容上限放電電流 I_{dlimit}) を流すと仮定した場合において、各電池セル 2 0 a のそれぞれについて、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するタイミングにおける電池セル 2 0 a の端子間電圧 V_{ff} を下式 (eq 2 6) に基づいて予測する。

【0070】

【数 2 6】

$$V_{ff} = OCV + V_s + \Delta V + V_{ws} + V_{wr} + \Delta OCV \dots \quad (eq26)$$

上式 (eq 2 6) において、直流抵抗電位差 V_s は、先の図 4 の直流抵抗電位差算出部 3 4 において、第 1 乗算部 3 4 b に入力する電流を、検出電流 I_s に代えて仮想動作電流 I_p とすることで算出された値を用いる。反応抵抗電位差 V は、先の図 5 の反応抵抗電位差算出部 3 5 において、電位差算出部 3 5 b に入力する電流を、検出電流 I_s に代えて仮想動作電流 I_p とすることで算出された値を用いる。合計残電圧 V_{wr} は、ステップ S 1 0 で算出された値を用いる。

【0071】

また、上式 (eq 2 6) において、「 V_{ws} 」は、拡散抵抗モデルを構成する各キャパシタ C_{wm} に電荷の蓄積がないと仮定した場合において、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するタイミングにおいて新たに生じる将来の分極電圧 (以下、将来分極電圧) を示す。将来分極電圧 V_{ws} は、下式 (eq 2 7) にて表される連続時間式に基づいて予測する。

【0072】

【数 2 7】

$$V_{ws} = \sum_{m=1}^4 (I_p \times R_{wm}) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T_{dff}}{C_{wm} \times R_{wm}}\right) \right\} \dots \quad (eq27)$$

上式 (eq 2 6) に基づいて予測される合計残電圧 V_{wr} と、上式 (eq 2 7) に基づいて予測される将来分極電圧 V_{ws} との合計値が、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するタイミングの拡散抵抗における電位差を表す。

【0073】

さらに、上式 (eq 2 6) において、 OCV は、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するまでの期間に渡って電池セル 2 0 a に仮想動作電流 I_p を流すと仮定した場合における開放端電圧 OCV の変化量 (以下、開放端電圧変化量) を示す。開放端電圧変化量 OCV は、例えば、開放端電圧算出部 4 0 によって算出された現在の開放端電圧 OCV に基づいて算出すればよい。具体的には例えば、まず、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するまでの期間に渡って仮想動作電流 I_p を流すと仮定した場合において、各電池セル 2 0 a のそれぞれについて、現在から放電側規定時間 T_{dff} 経過するまでの期間における SOC の変化分を算出する。上記 SOC の変化分は、放電時において負の値となる。そして、SOC 変換部 3 7 によって算出された現在の SOC に上記 SOC の変化分を加算し

10

20

30

40

50

、この加算値をSOCマップを用いて開放端電圧に変換する。そして、変換された開放端電圧から現在の開放端電圧OCVを減算することで、開放端電圧変化量OCVを算出する。

【0074】

ちなみに、ステップS12で算出された端子間電圧Vffに対する開放端電圧変化量OCVの割合は、本実施形態では放電側規定時間Tdffを10秒に設定したため小さい。このため、上式(eq26)の右辺から開放端電圧変化量OCVの項を除去してもよい。

【0075】

続くステップS13では、ステップS12において算出された各電池セル20aの端子間電圧Vffの最小値Vminを選択し、選択された最小値Vminが電池セル20aの許容下限電圧VLLimit未満であるか否かを判断する。ここで、図14には、本ステップにおいて否定判断される状況の一例を示した。なお、図14では、便宜上、電池セルの数を3つとしている。

10

【0076】

ステップS13において否定判断した場合には、各電池セル20aのそれぞれの端子間電圧Vff全てが許容下限電圧VLLimit以下であると判断し、ステップS14に進む。ステップS14では、ステップS12において予測した各電池セル20aの端子間電圧Vffの総和と、許容上限放電電流Idlimitとの乗算値を、現在から放電側規定時間Tdff経過後における許容出力電力Woutとして予測する。

20

【0077】

一方、ステップS13において肯定判断した場合には、ステップS15に進み、現在から放電側規定時間Tdff経過後の各電池セル20aのそれぞれの端子間電圧の最小値Vminを許容下限電圧VLLimitとする放電電流を、最大放電電流として算出する。最大放電電流の大きさは、許容上限放電電流Idlimitの大きさ以下の値であり、最大放電電流の算出には、所定の探索法が用いられる。本実施形態では、所定の探索法として、2分法が用いられる。最大放電電流は、電流制限範囲及び電圧制限範囲の双方を満足する放電電流の最大値である。そして、探索した最大放電電流を仮想動作電流Ipとして設定する。本実施形態では、2分法による探索範囲を、0から許容上限放電電流Idlimitまでの範囲としている。ここで、図15には、電池セル20aの放電時において設定される仮想動作電流Ipの一例を示した。なお、図15では、便宜上、電池セルの数を2つとしている。

30

【0078】

続くステップS16では、各電池セル20aのそれぞれについて、現在から放電側規定時間Tdff経過するまでの期間に渡って電池セル20aの放電電流が仮想動作電流Ip(最大放電電流)であると仮定した場合における現在から放電側規定時間Tdff経過するタイミングの電池セル20aの端子間電圧Vffを予測する。続くステップS14では、ステップS16において予測された各電池セル20aのそれぞれの端子間電圧Vffの総和と、ステップS15において探索された最大放電電流との乗算値を、現在から放電側規定時間Tdff経過後における許容出力電力Woutとして予測する。

40

【0079】

続いて、許容入力電力Winの予測処理について説明する。この処理は、現在から充電側規定時間Tcff経過するタイミングまでの期間において、組電池20に継続して充電可能な最大電力を予測するための処理である。本実施形態において、充電側規定時間Tcffは、基本的には、電力予測部33(CPU)の1処理周期(0.1秒)に設定されている。

【0080】

図16に、許容入力電力Winの予測処理の手順を示す。この処理は、電力予測部33(CPU)によって例えば所定の処理周期で繰り返し実行される。

【0081】

50

この一連の処理では、まずステップS20において、現在から充電側規定時間 $T_{c f f}$ 経過するタイミングにおける合計残電圧 $V_{w r}$ を予測する。ここでは、上式(e q 2 5)の放電側規定時間 $T_{d f f}$ を充電側規定時間 $T_{c f f}$ に変更して合計残電圧 $V_{w r}$ を算出すればよい。

【0082】

続くステップS21では、電池セル20aの仮想動作電流 I_p をその許容上限充電電流 $I_{c l i m i t} (> 0)$ に設定する。続くステップS22では、現在から充電側規定時間 $T_{c f f}$ 経過するまでの期間に渡って仮想動作電流 I_p (許容上限充電電流 $I_{c l i m i t}$)を流すと仮定した場合において、各電池セル20aのそれぞれについて、現在から充電側規定時間 $T_{c f f}$ 経過するタイミングにおける電池セル20aの端子間電圧 $V_{f f}$ を予測する。ここでは、上式(e q 2 6), (e q 2 7)の放電側規定時間 $T_{d f f}$ を充電側規定時間 $T_{c f f}$ に変更して端子間電圧 $V_{f f}$ を予測すればよい。

10

【0083】

続くステップS23では、ステップS22において予測された各電池セル20aの端子間電圧 $V_{f f}$ の最大値 $V_{m a x}$ を選択し、選択された最大値 $V_{m a x}$ が電池セル20aの許容上限電圧 $V_{H l i m i t}$ を超えているか否かを判断する。ここで、先の図14には、本ステップにおいて否定判断される状況の一例を示した。

【0084】

ステップS23において否定判断した場合には、ステップS24に進み、ステップS22において予測した各電池セル20aの端子間電圧 $V_{f f}$ の総和と、許容上限充電電流 $I_{c l i m i t}$ との乗算値を、現在から充電側規定時間 $T_{c f f}$ 経過後における許容入力電力 $W_{i n}$ として予測する。

20

【0085】

一方、ステップS23において肯定判断した場合には、ステップS25に進み、まず、充電側規定時間 $T_{c f f}$ を、0.1秒から放電側規定時間 $T_{d f f}$ と同じ10秒に変更する。そして、現在から充電側規定時間 $T_{c f f}$ 経過するタイミングの各電池セル20aのそれぞれの端子間電圧の最大値 $V_{m a x}$ を許容上限電圧 $V_{H l i m i t}$ とする充電電流を、最大充電電流として算出する。最大充電電流の大きさは、許容上限充電電流 $I_{c l i m i t}$ の大きさ以下の値であり、最大充電電流の算出には、所定の探索法が用いられる。本実施形態では、2分法が用いられる。最大充電電流は、電流制限範囲及び電圧制限範囲の双方を満足する充電電流の最大値である。そして、探索した最大充電電流を仮想動作電流 I_p として設定する。本実施形態では、2分法による探索範囲を、0から許容上限充電電流 $I_{c l i m i t}$ までの範囲としている。ここで、先の図15には、充電時において設定される仮想動作電流 I_p の一例を示した。

30

【0086】

続くステップS26では、各電池セル20aのそれぞれについて、現在から充電側規定時間 $T_{c f f}$ 経過するまでの期間に渡って電池セル20aの充電電流が仮想動作電流 I_p (最大充電電流)であると仮定した場合における現在から充電側規定時間 $T_{c f f}$ 経過するタイミングの電池セル20aの端子間電圧 $V_{f f}$ を予測する。続くステップS24では、ステップS26において予測された各電池セル20aのそれぞれの端子間電圧 $V_{f f}$ の総和と、ステップS25において探索された最大充電電流との乗算値を、現在から充電側規定時間 $T_{c f f}$ 経過するタイミングにおける許容入力電力 $W_{i n}$ として予測する。

40

【0087】

ここで、先のステップS23における判断結果に応じて充電側規定時間 $T_{c f f}$ の長さを変更する理由を、放電時の許容出力電力 $W_{o u t}$ の予測と比較しつつ以下に説明する。まず、組電池20の放電時について説明する。ここでは、端子間電圧及び充放電電流にて電池セル20aの動作点が定められる図14に示す図をI V図と称することとする。先の図14に示したように、許容出力電力 $W_{o u t}$ の予測に用いる放電電流が許容上限放電電流 $I_{d l i m i t}$ である場合、時間が経過するごとに電池セル20aの端子間電圧は刻々と低下して放電電力は小さくなる。このため、放電側規定時間 $T_{d f f}$ 経過後の動作点から

50

許容出力電力 W_{out} を演算し、現在の動作点から演算した許容出力電力 W_{out} で放電側規定時間 T_{dff} 放電し続けても、放電電流が許容上限放電電流 I_{dlimit} を超えることはない。

【0088】

続いて、組電池 20 の充電時について説明する。図 14 に示したように、許容入力電力 W_{in} の予測に用いる充電電流が許容上限充電電流 I_{climit} である場合、許容上限充電電流 I_{climit} で充電を継続すると、各電池セル 20 a のそれぞれの電圧は上昇して充電電力値は大きくなる。すなわち、許容上限充電電流 I_{climit} 到達時の充電電力より充電側規定時間 T_{cff} 後の充電電力が大きいため、充電側規定時間 T_{cff} 経過後の動作点から求めた許容充電電力 W_{in} で動作させた場合、許容上限充電電流 I_{climit} を超える動作点を經由した後、予測された許容入力電力 W_{in} に対応する動作点に移行し得る。これは、充電時においては、将来分極電圧 V_{ws} が時々刻々と収束値「 $I_p \times R_{wm}$ 」に向かって上昇することにより、電池セル 20 a の端子間電圧が時々刻々と上昇するためである。特に、充電側規定時間 T_{cff} が長くなると、充電電流が許容上限充電電流 I_{climit} を超える懸念が大きくなる。このため、許容入力電力 W_{in} の予測に用いる充電電流が許容上限充電電流 I_{climit} である場合には、充電側規定時間 T_{cff} を 1 処理周期である 0.1 秒に設定する。

10

【0089】

一方、図 15 に示したように、許容入力電力 W_{in} の予測に用いる充電電流が許容上限充電電流 I_{climit} 以下である場合、 $I-V$ 図において、予測に用いる充電電流と許容上限充電電流 I_{climit} とが離れる傾向にある。このため、 $I-V$ 図において、各電池セル 20 a のそれぞれについて、現在の動作点から、予測された許容入力電力 W_{in} に対応する動作点に移行するまでの途中において、充電電流が許容上限充電電流 I_{climit} を超える懸念が小さい。したがって、許容入力電力 W_{in} の予測に用いる充電電流が許容上限充電電流 I_{climit} 以下である場合、充電電流が許容上限充電電流 I_{climit} を超える事態を回避するために充電側規定時間 T_{cff} を短く設定することを要しない。よって、充電側規定時間 T_{cff} を 0.1 秒から 10 秒に変更する。

20

【0090】

以上説明したように、本実施形態では、直流抵抗モデル及び拡散抵抗モデルに加えて、反応抵抗パラメータを用いた反応抵抗モデルによって電池モデルを構成した。電池モデルに反応抵抗パラメータを含む反応抵抗モデルを含むことにより、上記特許文献 1 に記載された技術では表現できなかった低温時における電流 - 電圧の非線形特性を精度よく表すことができる。このため、本実施形態によれば、低温時においても、組電池 20 の許容入出力電力 W_{in} , W_{out} を高精度に予測することができる。

30

【0091】

さらに本実施形態では、上式 (eq 25) にて表される連続時間式に基づいて合計残電圧 V_{wr} を算出し、上式 (eq 27) にて表される連続時間式に基づいて将来分極電圧 V_{ws} を予測した。連続時間式による演算手法によれば、許容入出力電力 W_{in} , W_{out} の予測に用いる合計残電圧 V_{wr} 及び将来分極電圧 V_{ws} のそれぞれを 1 回の演算で算出することができる。このため、許容入出力電力 W_{in} , W_{out} を予測する場合の演算負荷を好適に低減することもできる。

40

【0092】

(その他の実施形態)

なお、上記実施形態は、以下のように変更して実施してもよい。

【0093】

・所定の探索法としては、2 分法に限らず、黄金分割法等、他の探索法であってもよい。

【0094】

・放電側規定時間 T_{dff} としては、10 秒に限らず、例えば 2 秒, 5 秒, 30 秒等、数秒 ~ 数十秒に設定してもよい。なお、先の図 16 のステップ S25 において、変更され

50

た後の充電側規定時間 $T_{c f f}$ についても同様である。

【0095】

・拡散抵抗モデルとしては、抵抗とキャパシタとの並列接続体が4つ直列接続されたRC等価回路モデルに限らず、上記並列接続体が複数(4つ以外)接続されたRC等価回路モデルであってもよい。また、拡散抵抗モデルとしては、抵抗とキャパシタとの並列接続体が複数接続されたRC等価回路に限らず、簡素化のために上記並列接続体が1つのRC等価回路であってもよい。

【0096】

・2次電池としては、リチウムイオン2次電池に限らず、ニッケル水素電池等、他の2次電池であってもよい。

【0097】

・上記各実施形態において、各処理に用いる電池温度としては、温度センサ22の検出値に限らず、何らかの手法によって推定された電池温度であってもよい。

【0098】

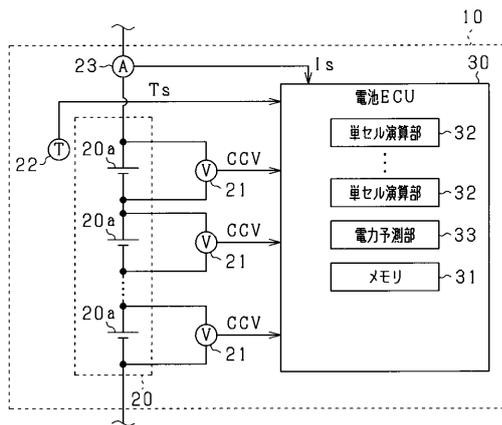
・本発明の適用対象としては、車両に限らない。

【符号の説明】

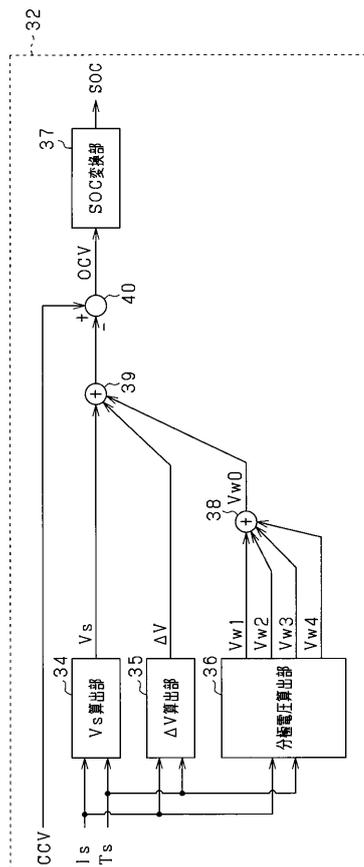
【0099】

20 a ... 電池セル、30 ... 電池ECU。

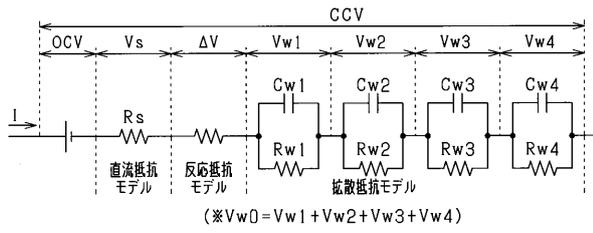
【図1】



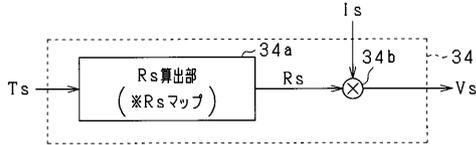
【図2】



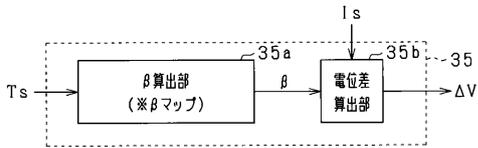
【 図 3 】



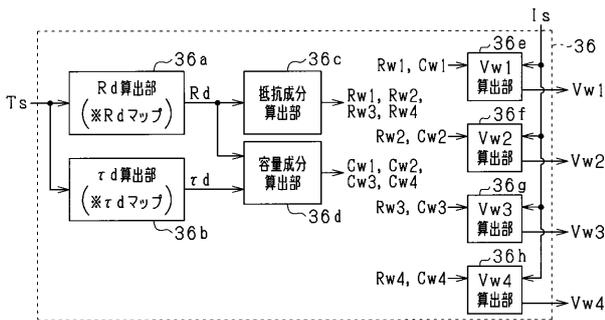
【 図 4 】



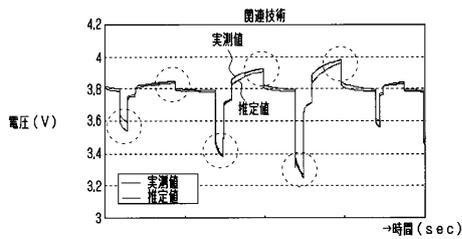
【 図 5 】



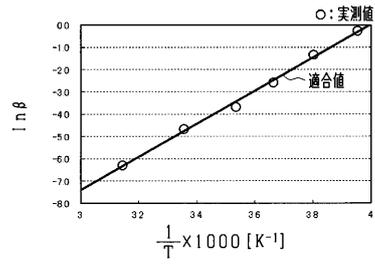
【 図 8 】



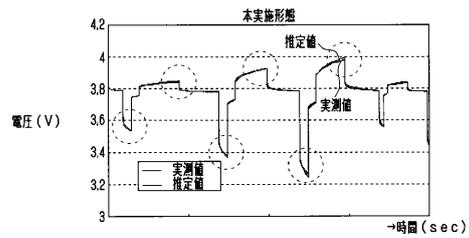
【 図 9 】



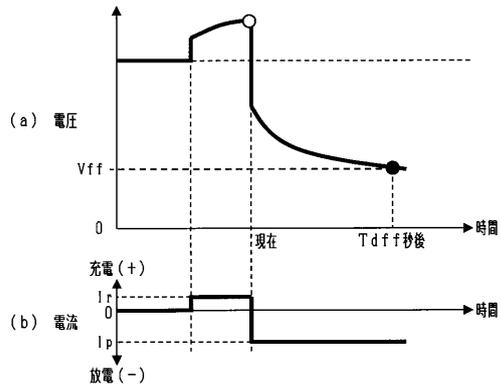
【 図 6 】



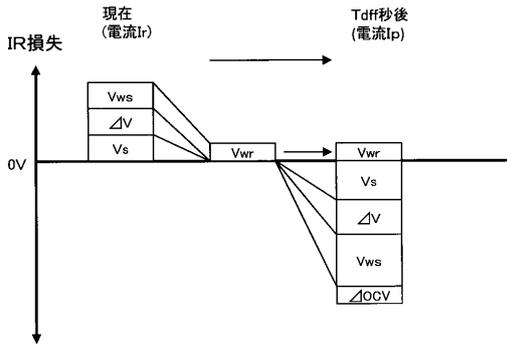
【 図 10 】



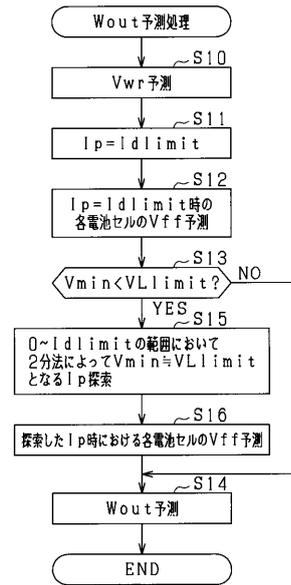
【 図 11 】



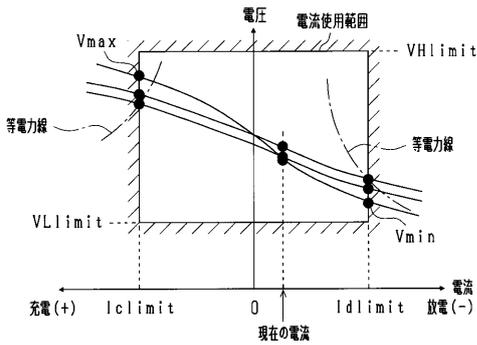
【 図 1 2 】



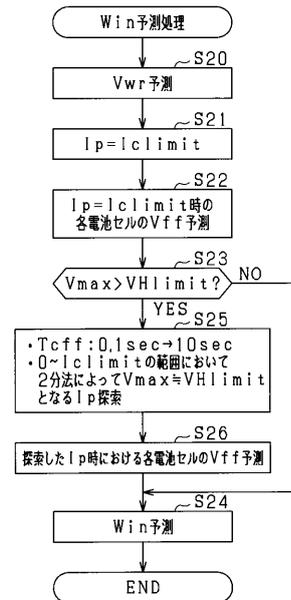
【 図 1 3 】



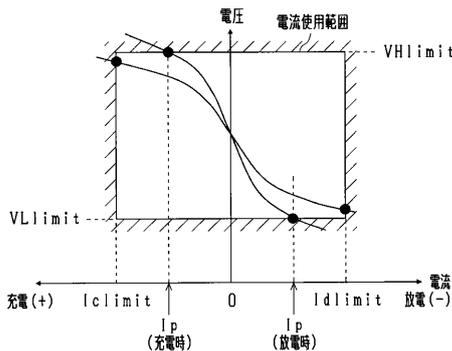
【 図 1 4 】



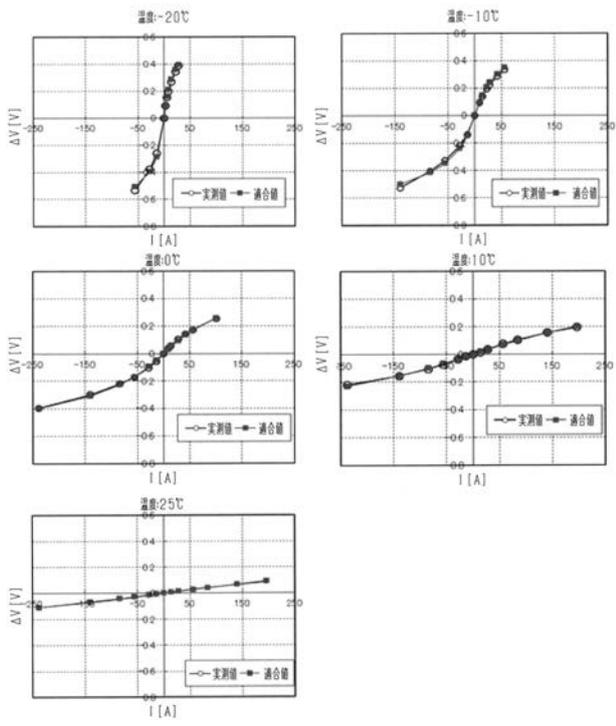
【 図 1 6 】



【 図 1 5 】



【 図 7 】



フロントページの続き

(72)発明者 小池 佑治

愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会社デンソー内

(72)発明者 加藤 恵一

愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会社デンソー内

Fターム(参考) 2G216 AB01 BA41 BA54 BA57 BA71 CB12 CB13 CB51

5G503 BA01 BB01 EA05 EA09 GD03 GD06

5H030 AA10 AS08 FF22 FF42 FF43 FF44