

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7638559号
(P7638559)

(45)発行日 令和7年3月4日(2025.3.4)

(24)登録日 令和7年2月21日(2025.2.21)

(51)国際特許分類	F I			
H 0 2 J	1/14 (2006.01)	H 0 2 J	1/14	
H 0 2 J	1/00 (2006.01)	H 0 2 J	1/00	3 0 4 H
H 0 2 J	1/10 (2006.01)	H 0 2 J	1/10	
H 0 2 J	7/34 (2006.01)	H 0 2 J	7/34	B

請求項の数 6 (全20頁)

(21)出願番号	特願2023-546638(P2023-546638)	(73)特許権者	504157024 国立大学法人東北大学 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号
(86)(22)出願日	令和3年9月8日(2021.9.8)	(74)代理人	110001243 弁理士法人谷・阿部特許事務所
(86)国際出願番号	PCT/JP2021/033056	(72)発明者	山田 博仁 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内
(87)国際公開番号	WO2023/037459	(72)発明者	八島 政史 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内
(87)国際公開日	令和5年3月16日(2023.3.16)	(72)発明者	尾辻 泰一 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内
審査請求日	令和5年10月5日(2023.10.5)	(72)発明者	岩月 勝美
(出願人による申告) 令和3年度 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究成果展開事業 共創の場形成支援 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(OPERA)「自律分散協調型直流マイクログリッドの全体最適化を実現する電力・通信融合ネットワーク基盤技術の創出に関する国立大学法人東北大学による研究開発」委託研究、産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願		最終頁に続く	

(54)【発明の名称】 自律協調制御システム、及び自律協調制御方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

自律協調制御システムであって、

電力負荷及び発電機が接続されたDC(Direct Current)バスであって、前記DCバスは、前記DCバスの基準電圧を中心とする第1の電圧範囲内から、前記第1の電圧範囲の上限又は下限に達したときに、電力系統又は他の電力システムからなるローカルグリッドに接続されて、前記ローカルグリッドによるアシストを得て動作する、DCバスと、

前記DCバスに直接的に接続された複数のバッテリーユニットであって、前記複数のバッテリーユニットは、前記DCバス上に分散装荷され、各バッテリーユニットの端子電圧は、前記DCバスの基準電圧に一致又は近似する、複数のバッテリーユニットと

10

を備え、

前記自律協調制御システム内の前記DCバスの全長を、前記DCバスを形成する電力線の断面積に比例して長くするように設定することによって、前記DCバスの電圧が前記ローカルグリッドで許容される第3の電圧範囲を逸脱せず、かつ所定時間以内に前記第1の電圧範囲内に戻る安定領域の状態が維持される、自律協調制御システム。

【請求項2】

前記DCバスの電圧が、前記基準電圧を中心とする第1の電圧範囲内から、前記第1の電圧範囲の上限又は下限に達したとき、前記DCバスは、電力系統又は他の電力システムからなるローカルグリッドに接続されて、前記ローカルグリッドによるアシストを得て動

20

作するアシスト運転状態に切り替わり、

前記アシスト運転状態で、前記DCバスの電圧が、前記第1の電圧範囲内の第2の電圧範囲の境界に達したとき、前記DCバスは前記ローカルグリッドから切断されて、前記ローカルグリッドからのアシストなしに動作する自律運転動作に切り替わり、

前記自律運転動作では、前記DCバスに接続された発電機の少なくとも一部は、前記DCバスの電圧を監視し、事前設定された上限レベルを超える場合に発電又は前記DCバスへの電力供給を停止する自律動作を行う、

請求項1に記載の自律協調制御システム。

【請求項3】

前記複数のバッテリーユニットは、前記DCバスに直接的に接続されることによって、前記DCバス上の電力負荷による消費電力及び発電機による発電量が急増したときに前記DCバスの急激な電圧変化を抑制するように機能する、

請求項2に記載の自律協調制御システム。

【請求項4】

前記第1の電圧範囲は、前記第3の電圧範囲内に設定され、前記自律協調制御システムは、前記消費電力及び前記発電量が急増して前記DCバスの電圧が前記第1の電圧範囲を逸脱したとしても、前記複数のバッテリーユニットによって前記DCバスの急激な電圧変化を抑制する機能及び前記ローカルグリッドによるアシストによって、前記DCバスの電圧が前記第3の電圧範囲を逸脱せず、かつ所定時間以内に前記第1の電圧範囲内に戻るように機能する、

請求項3に記載の自律協調制御システム。

【請求項5】

前記DCバスに直接的に接続される各バッテリーユニットの容量を、前記DCバスに接続される電力負荷のスケールに比例して増加するように設定することによって、前記DCバスの電圧が前記第3の電圧範囲を逸脱せず、かつ前記所定時間以内に前記第1の電圧範囲内に戻る安定領域の状態が維持される、

請求項4に記載の自律協調制御システム。

【請求項6】

電力負荷、発電機、及び複数のバッテリーユニットが接続されたDC(Direct Current)バスの電圧を電圧計によって計測するステップであって、前記複数のバッテリーユニットは、前記DCバスに直接的に接続される形態で前記DCバス上に分散装荷され、各バッテリーユニットの端子電圧は、前記DCバスの基準電圧に一致又は近似する、ステップと、

前記DCバスの電圧が、前記基準電圧を中心とする第1の電圧範囲内から、前記第1の電圧範囲の上限又は下限に達したとき、制御回路によって、前記DCバスを、電力系統又は他の電力システムからなるローカルグリッドに接続して、前記ローカルグリッドによるアシストを得て動作するアシスト運転状態に切り替えるステップと、

前記アシスト運転状態で、前記DCバスの電圧が、前記第1の電圧範囲内の第2の電圧範囲の境界に達したとき、前記制御回路によって、前記DCバスを前記ローカルグリッドから切断して、前記ローカルグリッドからのアシストなしに動作する自律運転動作に切り替えるステップと、を含み、

前記DCバスと前記複数のバッテリーユニットとを備える自律協調制御システム内の前記DCバスの全長を、前記DCバスを形成する電力線の断面積に比例して長くするように設定することによって、前記DCバスの電圧が前記ローカルグリッドで許容される第3の電圧範囲を逸脱せず、かつ所定時間以内に前記第1の電圧範囲内に戻る安定領域の状態が維持され、

前記自律運転動作では、前記DCバスに接続された発電機の少なくとも一部は、前記DCバスの電圧を監視し、事前設定された上限レベルを超える場合に発電又は前記DCバスへの電力供給を停止する自律動作を行う、

自律協調制御方法。

10

20

30

40

50

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、自律協調制御システム、及び自律協調制御方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、世界中の多くの国々でマイクログリッドに対する関心が高まっている。マイクログリッドは、再生可能エネルギー発電機（例えば、太陽光発電機、風力発電機、及び地熱発電機）、バッテリー、及び電力負荷（例えば、一般家庭、工場、商業施設、EV（Electric Vehicle）の充電スタンド）などを含むスマートな電力システムである。

10

【0003】

再生可能エネルギー発電機は、主にDC（Direct Current）電力を出力する。そのため、AC（Alternative current）バスを利用して発電機、バッテリー、及び電力負荷を接続するACグリッドでは、DCからACへ変換する際にエネルギー変換ロスが発生する上、ACバスの電圧位相と同期をとる必要がある。そのため、多くのマイクログリッドは、DCバスを利用して発電機、バッテリー、及び電力負荷を接続するDCグリッドを採用している（特許文献1及び非特許文献1を参照）。

【0004】

再生可能エネルギー発電機からの電力供給は不安定であるため、多くのマイクログリッドは、コントローラによる中央制御、分散制御、又はそれらの組み合わせによって、DCバスに接続される発電機、バッテリー、及び電力負荷を制御し、DCバスの電圧を安定させようとする。また、コントローラは、電力負荷の消費電力が急増してDCバスの電圧が、ある下限レベルまで低下したときにDCバスを電力系統に接続する（非特許文献1を参照）。また、特許文献1には、DCバスと蓄電池との間に電圧変換部を設け、電圧変換部を制御して、DCバスの電圧が上昇して閾値以上になると充電動作を開始させ、閾値以下になると充電動作を停止させる方法が開示されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【文献】特開2014-128047号公報

30

【非特許文献】

【0006】

【文献】Fahad Saleh Al-Ismael, "DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review", IEEE Access, Volume 9, pp.36154-36172.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

特許文献1及び非特許文献1に記載された様々なシステムのように複雑な制御を行うことによってDCバス電圧がある程度安定化されるとしても、突然の電力負荷の増減によってDCバス電圧が不安定になることもある。そのため、DCバスには、ある程度の電氣的慣性力を持たせておくことが必要になる。電氣的慣性力とは、電力負荷の大きさが突発的に変化して瞬時に大きな電力が必要となる又は余る場合に、バスが瞬間的に電力を生み出す又は吸収する能力を言う。

40

【0008】

DCバスに電氣的慣性力を持たせる1つの方法は、急に大きな電力が必要になった場合又は余ったときに備えて、DCバスにバッテリーを直接装荷することであると本発明者は考えた。他の方法として、PV（Photovoltaic）デバイスを最大出力状態から敢えて外した状態で動作させておき、急に大きな電力が必要となったとき又は余ったときに、瞬時に最大出力状態での動作又は出力を更に絞った動作に移行させ、発電電力を増減させて疑似的に電氣的慣性力を生み出す方法もあると考えられる。

50

【 0 0 0 9 】

特許文献 1 のシステムでは、蓄電池が電圧変換部を介して DC バスに接続されているため、電氣的慣性力が効きにくくなり、相対的に電氣的慣性力は小さくなるため、バッテリーによる電圧変動の抑制効果は限定的となる。また、特許文献 1 及び非特許文献 1 のシステムでは、コントローラに入出力される制御信号の伝送遅延などがあるため、突然の電力負荷の増減に対応しきれずに DC バスの電圧が一時的に下限レベル未満に落ち込む又は上限レベルを超過するリスクがある。そのため、電力システムの安定動作を保証するには、そのような突発的な電力負荷の増減に対する DC バスの電圧変動を、より効果的に抑える工夫が必要である。

【課題を解決するための手段】

10

【 0 0 1 0 】

本発明の第 1 の態様によれば、電力負荷及び発電機が接続された DC バスと、DC バスに直接的に接続された複数のバッテリーユニットとを備える、自律協調制御システムが提供される。複数のバッテリーユニットは、DC バス上に分散装荷され、各バッテリーユニットの端子電圧は、DC バスの基準電圧と一致又は近似させる。

【 0 0 1 1 】

本発明の第 2 の態様によれば、電力負荷、発電機、及び複数のバッテリーユニットが接続された DC バスの電圧を電圧計によって計測することであって、複数のバッテリーユニットは、DC バスに直接的に接続される形態で DC バス上に分散装荷され、各バッテリーユニットの端子電圧は、DC バスの基準電圧に一致又は近似する、ことと、DC バスの電圧が、基準電圧を中心とする第 1 の電圧範囲内から、第 1 の電圧範囲の上限又は下限に達したとき、制御回路によって、DC バスを電力システムに接続し、電力システムによるアシストを得て動作するアシスト運転状態に切り替えることと、アシスト運転状態で、DC バスの電圧が、第 1 の電圧範囲内の特定範囲の境界に達したとき、制御回路によって、DC バスを電力システムから切断し、電力システムからのアシストなしに動作する自律運転動作に切り替えることと、を含み、自律運転動作では、DC バスに接続された発電機の少なくとも一部は、DC バスの電圧を監視し、事前設定された上限レベルを超える場合に発電又は DC バスへの電力供給を停止する自律動作を行う、自律協調制御方法が提供される。

20

【発明の効果】

【 0 0 1 2 】

本発明によれば、DC バスを利用した電力システムの安定性を向上できる。

30

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 3 】

【図 1】本発明の実施形態に係る自律協調制御システムの例を模式的に示した図である。

【図 2】本発明の実施形態に係る DC バスの例を模式的に示した図である。

【図 3】本発明の実施形態に係る DC バスの等価回路の例を模式的に示した図である。

【図 4】電氣的慣性力の減衰特性及び電力線の太さと減衰の速さとの関係について説明するための図である。

【図 5】DC バス上に装荷されるバッテリーユニットの数と、DC バス上の各位置における電氣的慣性力の強さとの関係について説明するための図である。

40

【図 6】図 8 に示した $N = 1 \sim 5$ のグラフに対応するバッテリーユニットの配置を模式的に示した図である。

【図 7】本発明の実施形態に係るスイッチの構造例を模式的に示したブロック図である。

【図 8】本発明の実施形態に係る自律協調制御方法の例を示した図である。

【図 9】自律協調制御システムのシミュレーションモデルを示した図である。

【図 10】シミュレーション結果を示した図である。

【図 11】本発明の実施形態に係る DC バスの第 1 の安定性条件を示した図である。

【図 12】本発明の実施形態に係る DC バスの第 2 の安定性条件を示した図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 4 】

50

以下に添付図面を参照しながら、本発明の実施形態について説明する。本明細書及び図面において実質的に同一の機能を有する要素については、同一の符号を付することにより重複説明を省略することがある。

【0015】

(1. 自律協調制御システム)

まず、本発明の実施形態に係る自律協調制御システムについて説明する。図1は、自律協調制御システム10を模式的に示した図である。図1に示した自律協調制御システム10は、本発明の実施形態に係る自律協調制御システムの一例であり、本発明の実施形態に係る技術の適用範囲はこの例に限定されない。

【0016】

自律協調制御システム10は、1つ以上の電力負荷及び1つ以上の発電機が接続されたDCバス11と、DCバス11に直接的に接続された複数のバッテリーユニットを含む。発電機は、太陽光発電機(PVデバイスなど)、風力発電機、及び地熱発電機などの再生可能エネルギー発電機である。電力負荷は、一般家庭、工場、商業施設、及びEVの充電スタンドなどの電力消費設備である。

【0017】

図1には、DCバス11に接続される複数のバッテリーユニットの例として、3つのバッテリーユニット12a、13a、14aが模式的に記載されている。また、図1には、1つ以上の発電機の例として発電機12b、13b、14bが模式的に記載され、1つ以上の電力負荷の例として電力負荷12c、13c、14cが模式的に記載されている。バッテリーユニット、発電機、及び電力負荷の数はこの例に限定されず、それぞれ3以外であってよい。以下、自律協調制御システム10の要素及び動作について具体的に説明する。

【0018】

(1-1. DCバス及びバッテリーユニットについて)

DCバス11は、図2に示すように、少なくとも2本の電力線11a、11bで構成される。図2は、本発明の実施形態に係るDCバスの例を模式的に示した図である。例えば、DCバス11は、5.5SQの2コアCVケーブル(Cross-linked polyethylene insulated Vinyl sheath cable)、即ち、コアの断面積が約5.5mm²の2コアCVケーブルで構成される。DCバス11の電圧は、後述する自律協調制御システム10内の制御機構によって、規定の電圧レベル(基準電圧)を中心とする予め設定された電圧範囲(許容電圧範囲)内に維持される。基準電圧は、例えば、400Vに設定される。

【0019】

図2に示すように、DCバス11の電力線11a、11bには、各バッテリーユニットが直接的に接続される。また、各バッテリーユニットは、その端子電圧がDCバス11の基準電圧にほぼ等しくなるように構成される。例えば、3.2Vのバッテリーセルを60個直列接続したバッテリーを2つ用意し、それらを接続することで384V(約400V)の端子電圧を有する1つのバッテリーユニットが得られる。

【0020】

各バッテリーユニットのバッテリーとしては、リチウム鉄リン酸塩(LiFePO)バッテリーなどのリチウムイオンバッテリー、又は鉛酸バッテリーなどが好適に利用される。リチウムイオンバッテリー及び鉛酸バッテリーは、電力負荷が重くなるにつれて端子電圧が単調に低下していく特性(所謂、垂下特性)を有する。また、蓄電率(SOC(State Of Charge))がある一定の範囲内にあるとき、端子電圧がSOCに対してほぼ直線的に変化する特性(図2のグラフ21aを参照)を有する。これらの特性により、負荷の変動に対して安定な動作が得られると共に、端子電圧から蓄電率を容易に推定することができる。

【0021】

複数のバッテリーユニットは、DCバス11の電氣的慣性力を高めるために、DCバス11上に分散装荷される。電氣的慣性力は、電力負荷による電力消費量の急激な増加及び発電機による電力供給量の急激な増加に対するDCバス11の電圧の変化しにくさを表す。例えば、電力負荷に1Aの突発的な電流変動があったときにDCバス11の電圧がV1

10

20

30

40

50

変化するDCバス11の電気的慣性力 f_1 は、同一条件下においてDCバス11の電圧が V_2 ($V_1 > V_2$) 変化するDCバス11の電気的慣性力 f_2 より小さい。このことは、電気的慣性力 f_2 を有するDCバス11の方が、電気的慣性力 f_1 を有するDCバス11よりも安定であることを意味する。

【0022】

(1-2. 電気的慣性力について)

ここで、図3を参照しながら、DCバス11の電気的慣性力の源について、さらに説明する。図3は、バッテリーユニット(蓄電池)を分散装荷したDCバスの等価回路の例を模式的に示した図である。

【0023】

図3の例は、2つのバッテリーユニット31、32が接続されたDCバス11の等価回路を模式的に表したものである。バッテリーユニット31は、バッテリー容量31a及び内部抵抗31bで表現されている。同様に、バッテリーユニット32は、バッテリー容量32a及び内部抵抗32bで表現されている。電力線11aのインダクタンス及びレジスタンスは、分布インダクタ33a、33b及び分布抵抗34a、34bでそれぞれ表現されている。同様に、電力線11bのインダクタンス及びレジスタンスは、分布インダクタ33c、33d及び分布抵抗34c、34dでそれぞれ表現されている。電力線11a、11b間の容量は、線間容量35で表現されている。

【0024】

バッテリーユニット31、32の端子電圧がDCバス11の基準電圧に等しい場合、バッテリーユニット31、32の内部抵抗31b、32bが小さいほど電気的慣性力が大きく、逆に内部抵抗31b、32bが大きいと電気的慣性力は小さくなる。DCバス11の電気的慣性力は、電力線11a、11bの分布抵抗34a、34b、34c、34dにも関係する。例えば、電力負荷の接続点と、バッテリーユニット31、32の接続点との間の距離が短い(即ち、電力線11a、11bの抵抗が小さい)ほど電気的慣性力が大きくなる。

【0025】

電力負荷は、DCバス11上の任意の地点(場所)に接続される可能性があり、バッテリーユニットを1カ所に集中装荷すると、バッテリーユニットから遠い電力負荷での消費電力の急増に対して電気的慣性力が十分に働かない。一方、複数のバッテリーユニットをDCバス11上の複数箇所に分散装荷すれば、DCバス上のどの地点に装荷されている電力負荷において消費電力が急増しても、期待される電気的慣性力が働き、DCバス11の急激な電圧低下を抑制することができる。同様に、PVなどの再生可能エネルギー発電機もDCバス上の任意の地点に接続される可能性があるが、どの発電機からの電力供給が急増した場合でも、DCバス11上にバッテリーユニットが分散装荷されていれば、電気的慣性力によってDCバス11の急激な電圧上昇を抑制することができる。

【0026】

上記の理由から、本発明の実施形態では、複数のバッテリーユニットをDCバス11上に分散装荷する構成を採用する。バッテリーユニットの装荷方法(数及び配置)は、必要とされる電気的慣性力の強さに基づいて決定されうる。例えば、バッテリーユニットの装荷方法は、想定される環境において、必要に応じてDCバス11を電力系統に接続する制御を併用することにより、DCバス11の電圧が常に許容電圧範囲内に維持されるように、シミュレーションなどによって決定されうる。

【0027】

上記のように、DCバス11を安定稼働させる上で電気的慣性力は重要である。また、電力負荷の消費電力及び/又はPVなどの発電機の発電電力の急激な変動によるDCバス11の電圧変動を抑制する作用に加え、より長期の電圧変動を抑制することもDCバス11の安定稼働のために重要である。電気的慣性力を持続させることのできる時間は、バッテリーユニット31、32のバッテリー容量31a、32aが大きいほど長く、バッテリー容量31a、32aが小さいと短くなる。即ち、各バッテリーユニットの容量が大きいほど、電力消費量及び発電量の変動に対するDCバス11の電圧変動を長期にわたって抑制するこ

10

20

30

40

50

とが可能となる。

【0028】

以上のことから、電氣的慣性力の大きさはバッテリーユニットなどの電氣抵抗によって決まり、電氣的慣性力の持続時間はバッテリー容量によって決まると言える。

【0029】

上述したように、複数のバッテリーユニットをDCバス11上に分散装荷することで、DCバス11上のどの場所においても電氣的慣性力が効果的に働くようになり、DCバス11を安定稼働させることが可能になる。加えて、各バッテリーユニットの容量を大きくすることで慣性持続時間が長くなり、DCバス11をより長期間安定稼働させることに寄与する。なお、特許文献1及び非特許文献1に記載されたシステムのように、バッテリーがDC / DCコンバータなどを介してDCバスに間接的に接続されている場合にはバッテリーの電氣的慣性力が効きにくくなり、相対的に電氣的慣性力は小さくなるため、バッテリーによる電圧変動の抑制効果は限定的となる。

10

【0030】

ここで、上述した電氣的慣性力について、その特性をより良く理解できるように、さらに説明を追加する。

【0031】

まず、上述した電氣的慣性力について直感的に理解しやすいように、一旦DCバス上の議論から離れ、既存の電力網を例に、電氣的「慣性力」についての簡単な考察を行う。

【0032】

既存の電力網における慣性力の源は、電力網の最上流にある発電所である。例えば、火力発電所の場合、大型の蒸気タービンを回転させることによって発電機を回している。タービンは、重たい回転体が高速で回転することで大きな慣性モーメントを有している。そのため、突然大きな電力負荷がかかってタービンの回転を減速させる力が働いても、大きな慣性モーメントによって回転数をあまり落とさずに回転を続けることができる。タービンの回転体の慣性モーメントをM、回転角速度を ω とすると、このタービンの回転運動のエネルギーKは、以下の式(数1)で与えられる。

20

【数1】

$$K = \frac{1}{2} M \omega^2$$

30

【0033】

発電所では、上記のタービンの回転運動のエネルギーを発電機により電氣エネルギーに変換し、途中何箇所かの変電所で降圧されて最終的に電力負荷まで届けられる。ここで、基線電圧がVの送電線に突然電力負荷が接続されて、I(A)の電流が取り出されるケースについて考える。このケースにおいて、電力負荷で消費される電力Pは、 $P = VI$ である。この電力Pは、途中の送電線での送電損失及び変電所での電圧変換損失を考慮しなければ、エネルギー保存則により、発電所のタービンの回転エネルギーの時間変化に等しいはずである。従って、電力Pと、タービンの回転体が有する慣性モーメントMとの間には、以下の関係(数2)がある。

40

【数2】

$$P = \frac{dK}{dt} = M \omega \frac{d\omega}{dt}$$

【0034】

上記の関係から、接続された電力負荷によってタービンの回転速度を減速させようとする力に抗して働く慣性力の強さ(慣性モーメントM)は、接続された電力負荷によって取り出せる電力Pに比例することが分かる。このことから、電力線に接続された電力負荷によって、接続時に瞬発的に取り出せる最大電力 P_{max} を用いて電氣的慣性力の特性を評価できることが分かる。これにならば、以下では、 P_{max} を用いてDCバス上の電氣的慣性

50

力の特性について、さらに考察する。

【 0 0 3 5 】

まず、DCバスに1つのバッテリーユニットが直接装荷され、バッテリーユニットが電力線と一体になっているDCバスを考える。DCバスの基準電圧を V （無負荷状態でのバッテリーユニットの端子電圧も等しく V である）と表記し、バッテリーユニットの内部抵抗を r と表記すると、DCバス上のある位置に1つの電力負荷を接続した場合、 P_{max} は、以下の式（数3）で与えられる。式中の r' は、バッテリーユニットから電力負荷の接続点までの電力線による電気抵抗を表す。

【 数 3 】

$$P_{max} = \frac{1}{4} \frac{V^2}{r + r'}$$

10

【 0 0 3 6 】

電力線による電気抵抗 r' はバッテリーユニットから電力負荷の接続点までの距離に依存するため、電気的慣性力は、DCバス上の位置によって異なることが分かる。また、上記の式（数3）から、バッテリーユニットから遠ざかるほど電気的慣性力が弱まることが分かる。例えば、 $V = 400$ （V）、 $r = 1$ （ Ω ）、 $r' = 1$ （ Ω ）の場合には $P_{max} = 2 \times 10^4$ （W）となり、 $r' = 4$ （ Ω ）の場合には $P_{max} = 0.8 \times 10^4$ （W）となる。また、電力線による電気抵抗 r' は、電力線の芯線断面積にも依存する。芯線断面積が大きいほど単位長さ当たりの電気抵抗 d_r は小さくなるため、芯線断面積が大きいCVケーブルを利用することで、バッテリーユニットから遠い位置まで電気的慣性力を作用させることができる。この点に関し、芯線断面積の違いによる P_{max} の特性変化を図4に示した。

20

【 0 0 3 7 】

図4のグラフは、DCバスの全長を1km、基準電圧 V を400（V）、バッテリーユニットの内部抵抗を0.1（ Ω ）とし、1つのバッテリーユニットをDCバス上の一端（0mの位置）に配置するという条件で、 P_{max} の特性変化を比較したものである。比較したCVケーブルの芯線断面積は、8SQ（ $2 \times d_r = 4.34$ / km）、22SQ（ $2 \times d_r = 1.08$ / km）、60SQ（ $2 \times d_r = 0.397$ / km）、200SQ（ $2 \times d_r = 0.121$ / km）である。

【 0 0 3 8 】

いずれのグラフもバッテリーユニットから遠ざかるにつれて P_{max} が落ち込むが、8SQと200SQのケースを比較すると、200SQでは、バッテリーユニットから800（m）の距離離れても、 P_{max} が 2×10^5 （W）以上を維持しているが、8SQの場合には50（m）以下の距離で 2×10^5 （W）以下まで落ち込むことが分かる。このように、電気的慣性力は、バッテリーユニットからの距離に加え、電力線の芯線断面積に依存する。従って、DCバス上で満遍なく電気的慣性力が働くようにするには、バッテリーユニットの数及び配置に加え、電力線の芯線断面積が1つの重要な要素になる。

30

【 0 0 3 9 】

逆に、電力線の芯線断面積が決まると、個々のバッテリーユニットによる電気的慣性力が十分な強さで作用するDCバス上の範囲もある程度決まってくる。既に説明したように、電気的慣性力の強さは、各バッテリーユニットの容量ではなく、主にバッテリーユニットと電力負荷の接続点との間の距離（つまり、電気抵抗）に影響される。なお、各バッテリーユニットの容量は、電気的慣性力が働く持続時間に主に影響を与える。そのため、DCバス上のどこに接続された電力負荷に対しても十分な電気的慣性力を作用させるには、適切な数のバッテリーユニットをDCバス上の適切な位置に配置することが重要になる。

40

【 0 0 4 0 】

そこで、DCバス上にバッテリーユニットを等間隔で配置するモデルを用いて、バッテリーユニット数 N の違いによる P_{max} の特性変化について検討した。 $N = 1 \sim 5$ 、10、20のケースについての P_{max} の計算結果を図5に示した。なお、 $N = 1 \sim 5$ のケースについては、バッテリーユニットの配置例を図6（a）～（e）に示している。 $N = 1$ のケース（

50

a) では DC バスの中央にバッテリーユニットを配置し、 $N = 2$ のケース (b) では DC バスの両端に 1 つずつバッテリーユニットを配置している。 $N = 3 \sim 5$ のケースでは、図 6 (c) ~ (e) に示すように、バッテリーユニットの間隔が同じ間隔になるように配置している。 $N = 10, 20$ のケースも同様にバッテリーユニットの間隔が等しくなるように配置している。なお、これらの配置例は一例であり、本発明の適用範囲はこれに限定されない。

【 0 0 4 1 】

図 5 を参照すると、 $N = 1$ のケースでは、バッテリーユニットが配置されている DC バス上の位置で P_{max} がピークとなり、その位置から遠ざかるにつれて P_{max} の値が大きく低下している。仮に、DC バスの安定稼働に $P_{max} = 3 \times 10^5$ (W) 以上が必要な場合、 $N = 1$ のケースでは、バッテリーユニットから 300 m 以上離れた位置で、その条件を満たさなくなる。一方、 $N = 2$ のケースでは、DC バス全域で $P_{max} = 3 \times 10^5$ (W) 以上になっており、DC バスのどこに電力負荷が接続されても十分な電氣的慣性力が働く。 N が大きくなると、DC バス上での P_{max} の値が大きくなり、電氣的慣性力がより強く働くようになることが分かる。 $N = 10, 20$ のケースのように、 N がさらに大きくなると DC バス全域で P_{max} の値がほぼ一定のレベルに近づいていく。

【 0 0 4 2 】

このように、複数のバッテリーユニットを DC バス上に分散装荷することによって、DC バス上の全体又は必要な領域全体にわたって十分な電氣的慣性力を働かせることが可能になり、DC バスの安定稼働を実現することができる。このような作用効果は、1 カ所にバッテリーユニットを集中装荷した場合 ($N = 1$ のケースを参照) には得られない。従って、電氣的慣性力による DC バスの安定動作を実現するには、複数のバッテリーユニットを DC バス上に分散配置すること、そして、各バッテリーユニットを DC バスに直接装荷することが必要である。また、より太い電力線を利用することが好適である。

【 0 0 4 3 】

(1 - 3 . 発電機及び電力負荷について)

再び図 2 を参照する。上記のように自律協調制御システム 10 の各バッテリーユニットは、DC バス 11 上に分散装荷され、DC バス 11 の電力線 11 a、11 b に直接的に接続される。一方、発電機及び電力負荷は、図 2 に示した発電機 22、及び電力負荷 23、24 のように DC バス 11 に間接的に接続されて自律的に動作する。

【 0 0 4 4 】

図 2 の例において、発電機 22 は、DC / DC 変換器 22 a を介して DC バス 11 に接続されている。DC バス 11 が電力系統と繋がっていない場合 (オフグリッドの場合)、発電機 22 は、DC バス 11 の電圧を監視し、DC バス 11 の電圧が予め設定された上限レベルを超える場合に、発電を停止するか、又は DC / DC 変換器 22 a が DC バス 11 への電力供給を停止する。これらの自律動作によって、DC バス 11 の電圧が異常に増大するリスクを低減することができる。一方、DC バス 11 が電力系統と繋がっている場合 (オングリッドの場合)、発電された電力のうち、消費しきれず、蓄電もできない余剰電力は電力系統が吸収してくれるため、発電機 22 は、上記の自律動作を行う必要はない。この場合、発電機 22 は、発電電力を全て DC バス 11 に流し込むことができる。

【 0 0 4 5 】

一方、DC バス 11 に接続される電力負荷は、必要とする時には DC バス 11 から必要な電力の供給を自由に受けられることが望ましい。従って、自律的動作は馴染まない。しかし、ブラックアウトを回避するため、電力負荷 23 のように、非常時や異常時にはバスから強制的に切り離すことを可能とするための外部制御可能な CB (Circuit Breaker) 23 a を介して DC バス 11 に接続されることが好ましい。CB 23 a は、DC バス 11 の電圧が、ある異常なレベルを下回る場合に、DC バス 11 から電力負荷 23 への電力供給を遮断する役目がある。なお、異常なレベルは、後述する第 1 の電圧範囲の下限値 $L V_1$ より大幅に低いレベルに設定され、また、既存の電力系統で許容される許容電圧範囲 (後述する第 3 の電圧範囲) の下限値 $L V_2$ よりも低いレベルに設定されうる。

【 0 0 4 6 】

10

20

30

40

50

AC駆動の電力負荷24をDCバス11に接続する場合、電力負荷24は、DC/AC変換器24aを介してDCバス11に接続される。DC/AC変換器24aは、DCバス11からのDC電力をAC電力に変換して電力負荷24に供給する。DC/AC変換器24aは、DCバス11の電圧が、上記の異常なレベルを下回る場合に、DCバス11から電力負荷24への電力供給を遮断してよい。代わりに、DCバス11と電力負荷24との間にCBを別途設けてもよい。これらの制御によりブラックアウトを回避できる。

【0047】

(1-4. 自律協調制御について)

再び図1を参照する。図1に示すように、DCバス11は、スイッチ15及び変換器16を介してローカルグリッド17に接続される。ローカルグリッド17は、火力発電、水力発電、風力発電、及び原子力発電などを利用して安定的に電力を供給可能な電力系統、又は他の電力グリッドなどの外部電力システムである。ローカルグリッド17は、接続されたDCバス11に電力を供給することに加え、接続されたDCバス11の余剰電力を受容することもできる。

10

【0048】

スイッチ15がオンになると、DCバス11とローカルグリッド17とが接続状態となる。接続状態において、DCバス11の電圧があるレベルよりも低い場合には変換器16を介してローカルグリッド17からDCバス11に電力が供給され、逆にDCバス11の電圧があるレベルよりも高い場合には、ローカルグリッド17によってDCバス11からの電力を受容される。変換器16は、DCバス11側のDC電力をローカルグリッド17側のAC電力に変換し、又はローカルグリッド17側のAC電力をDCバス11側のDC電力に変換する。

20

【0049】

(A) スwitchの構成例

上述したスイッチ15の機能は、例えば、図7に示したスイッチ40によって実装される。図7は、スイッチ40の構成を模式的に示したブロック図である。図7に示すように、スイッチ40は、電圧計41と、スイッチング機構42と、制御機構43とを含む。電圧計41は、DCバス11とローカルグリッド17との接続点(電圧監視点)における電圧を計測する手段である。スイッチング機構42は、DCバス11とローカルグリッド17との間の接続/切断を切り替える手段である。制御機構43は、電圧計41の計測値に基づいてスイッチング機構42の切り替え動作を制御する手段(例えば、制御回路)である。電圧計を採用する図7の構成は、後述する電圧監視システムの構成を採用する場合に比べてコスト面で有利である。制御機構43による制御の詳細については、図8を参照しながら後述する。

30

【0050】

変形例として、制御機構43の機能を省略し、DCバス11とローカルグリッド17との接続点での電圧監視とスイッチ15の制御とを行う外部の電圧監視システムを設けるようにしてもよい。この場合、電圧監視システムによって、各バッテリーユニットの接続点、各発電機の接続点、及び各電力負荷の接続点でDCバス11の電圧を監視する仕組みに、さらに変形することができる。電圧監視システムは、プロセッサ、及びメモリを含む。プロセッサは、CPU(Central Processing Unit)、DSP(Digital Signal Processor)、ASIC(Application Specific Integrated Circuit)、又はFPGA(Field Programmable Gate Array)などである。メモリは、ROM(Read Only Memory)、RAM(Random Access Memory)、又はフラッシュメモリなどである。例えば、プロセッサは、各接続点に設けられた電圧計の計測データを、通信回線を通じて取得し、取得した計測データをメモリに格納する。

40

【0051】

(B) スwitchの動作及び自律協調制御方法

次に、本発明の実施形態に係る自律協調制御方法について説明する。

【0052】

50

既に説明したように、DCバス11に接続される各バッテリーユニットは、SOCが一定範囲内において、端子電圧がDCバス11の基準電圧にほぼ等しくなるように構成され、運用中はSOCが一定範囲内に維持されるように制御される。また、DCバス11に接続される各電力負荷は、CBなどによる遮断制御が作動しない範囲で、DCバス11から必要に応じて自由に電力供給を受けられるように構成される。また、DCバス11に接続される各発電機は、ローカルグリッド17との間での電力授受の無いオフグリッドの場合、DCバス11の電圧が、あるレベルを超える場合に発電を停止又は電力供給を遮断するように自律的に動作する。一方、各発電機は、ローカルグリッド17との間での電力授受が可能なオングリッドの場合には自律動作の必要が無く、発電した電力を無制限にDCバス11に流すことができる。

10

【0053】

DCバス11に接続される各要素が自律的に動作することで、ローカルグリッド17からDCバス11が切り離されたオフグリッド状態での自律運転動作でも、DCバス11から各電力負荷への安定的な電力供給が、ある程度維持されうる。しかし、各発電機による発電量、各バッテリーの容量及びSOC、DCバス11に接続される電力負荷の数及び負荷の大きさ、又はその他の要因によって、DCバス11の電圧は、予め設定された第1の電圧範囲外になりうる。そのため、DCバス11の電圧が第1の電圧範囲を逸脱しそうなとき、スイッチ15がオンとなり、自律運転動作から、DCバス11がローカルグリッド17に接続されたオングリッド状態となり、ローカルグリッド17によるアシスト制御動作に切り替わる。

20

【0054】

ここで、図8を参照しながら、制御機構43による制御について、より具体的に説明する。図8は、本発明の実施形態に係る自律協調制御方法の例を示した図である。図8に例示したグラフの縦軸は電圧監視点でのDCバス11の電圧であり、横軸は時間である。図中のLV0、LV1、LV2、HV0、HV1、HV2は、予め設定された電圧閾値である。LV0は、基準電圧（この例では400V）より低いレベルに設定され、LV1は、LV0よりさらに低いレベルに設定される。一方、HV0は、基準電圧より高いレベルに設定され、HV1は、HV0よりさらに高いレベルに設定される。また、既存の電力系統で許容される電圧範囲は基準電圧の±5%であり、その電圧範囲の上限値及び下限値をそれぞれHV2、LV2と表記している。電気的慣性力を効果的に働かせるためには、バッテリーの端子電圧がSOCに対してほぼ直線的に変化する特性を示す範囲内に収まるように、LV1からHV1の範囲（第1の電圧範囲）を設定する必要がある。

30

【0055】

上記の例では、第1の電圧範囲を逸脱しようとする時、スイッチ15がオンとなり、ローカルグリッド17からのアシスト動作が開始される。そして、自律協調制御システム10では、全ての時点でのDCバス11の電圧が第1の電圧範囲内に収まるように制御する。但し、若干のアンダーシュート及びオーバーシュートは許容され、電圧監視点でのDCバス11の電圧が、HV1からHV2までの範囲及びLV1からLV2までの範囲に達することもあるが、第1の電圧範囲を逸脱したときには、できるだけ速やかに第1の電圧範囲内に引き戻されるようなアシスト制御が行われる。なお、LV0からHV0までの範囲を第2の電圧範囲と表記する。第2の電圧範囲は、基準電圧を含み第1の電圧範囲内にある。また、LV2からHV2までの範囲を第3の電圧範囲と表記する場合がある。第3の電圧範囲は、既存の電力系統（又は接続されるローカルグリッド）によって許容される規定の電圧範囲（許容電圧範囲）に設定される。また、第1の電圧範囲は、第3の電圧範囲内に設定される。

40

【0056】

図中の曲線51は、DCバス11とローカルグリッド17との接続点（即ち、DCバス11とスイッチ15との接続点）での電圧を表している。この例では、初めにオフグリッドの自律運転状態（DCバス11の電圧が第2の電圧範囲内にある状態）においてDCバス11の電圧は基準電圧付近にあるが、DC11バス内の全発電機（PVなど）による発

50

電電力が電力負荷全体の消費電力を上回る状態が続くと、その差分の電力はバッテリーユニットに流れることになる。その結果、バッテリーユニットの蓄電率が増加するため端子電圧も上昇し、DCバス11の電圧が上昇する。DCバス11の電圧は、時間とともに上昇してHV0を超え、P1の時点でHV1に達する。このように、DCバス11の電圧が上昇してHV1に達した場合、制御機構43は、DCバス11をローカルグリッド17に接続する制御を行う。接続後、DCバス11からローカルグリッド17に余剰電力が送電され、DCバス11の電圧が低下し始める。つまり、変換器16のDCバス11側の電圧が基準電圧（この例では400V）となるように変換器16を動作させておけば、電圧の高いDCバス11から変換器16へと電流が流れて、高くなり過ぎたDCバス11の電圧は低下を始める。

10

【0057】

既に説明したように、自律協調制御システム10では、複数のバッテリーユニットがDCバス11上に分散装荷され、電氣的慣性力が強化されている。そのため、発電量の急増に対してもDCバス11の急激な電圧上昇が抑えられ、それによって、制御信号の伝送遅延など何らかの理由で、オングリッドに切り替わる直前に電圧がHV1を僅かに超えても、DCバスの電圧は第1の電圧範囲内へと引き戻され、速やかにHV1以下のレベルに戻る。このように、電氣的慣性力を高めることで、DCバス11の電圧が第1の電圧範囲外に逸脱する時間を限りなく短くすることができる。なお、HV1以下のレベルに戻るまでの時間は、所定時間（例えば、1秒）以内であることが好ましい。つまり、自律協調制御システム10は、DCバス11に直接接続された複数のバッテリーユニットへのDCバス11からの充電及びローカルグリッド17によるアシスト動作によって、第1の電圧範囲を逸脱した場合でも、第3の電圧範囲を逸脱せず、かつ所定時間以内に第1の電圧範囲内に戻るように機能する。

20

【0058】

P1の時点でオングリッドになった後、DCバス11の電圧が下降してHV1を下回り、さらにP2の時点でHV0に達する。このように、DCバス11の電圧が下降してHV0に達した場合、制御機構43は、DCバス11をローカルグリッド17から切断する制御を行い、ローカルグリッド17によるアシスト動作を終了する。

【0059】

図8の例では、アシスト動作を終了したP2以降、DCバス11内の全発電機による発電電力がDCバス11の電力負荷全体の消費電力を下回る状態が続くと、その差分の電力はバッテリーユニットから放電されることになる。その結果、バッテリーの蓄電率が減少するため、端子電圧も減少し、バス電圧が減少する。この結果、DCバス11の電圧が下降してLV0を下回り、P3の時点でLV1に達する動作を示している。このように、DCバス11の電圧が下降して第1の電圧範囲の下限であるLV1にまで達した場合、制御機構43は、DCバス11をローカルグリッド17に接続し、再びローカルグリッド17からのアシストを得る。接続後、ローカルグリッド17からDCバス11に電力が供給され、DCバス11の電圧が上昇を始める。

30

【0060】

自律協調制御システム10では電氣的慣性力が強化されているため、負荷の急増に対してもDCバス11の急激な電圧低下が抑えられ、それによって、制御信号の伝送遅延など何らかの理由で、オングリッドに切り替わる直前に電圧がLV1を僅かに下回っても、速やかに第1の電圧範囲内へ引き戻され、すぐにLV1以上のレベルに戻る。このように、電氣的慣性力を高めることで、DCバス11の電圧が第1の電圧範囲外に逸脱する時間を限りなく短くすることができる。なお、LV1以上のレベルに戻るまでの時間は、所定時間（例えば、1秒）以内であることが好ましい。つまり、自律協調制御システム10は、DCバス11に直接接続された複数のバッテリーユニットからDCバス11への放電及びローカルグリッド17によるアシスト動作によって、第1の電圧範囲を逸脱した場合でも、第3の電圧範囲を逸脱せず、かつ所定時間以内に第1の電圧範囲内に戻るように機能する。

40

50

【 0 0 6 1 】

P 3 の時点でオングリッドになった後、DCバス 1 1 の電圧が上昇してLV 1 を超え、更に P 4 の時点でLV 0 に達する。DCバス 1 1 の電圧が上昇してLV 0 に達した場合、制御機構 4 3 は、DCバス 1 1 をローカルグリッド 1 7 から切断し、ローカルグリッド 1 7 によるアシスト動作を終了する。

【 0 0 6 2 】

以上説明したように、電圧監視点でのDCバス 1 1 の電圧が上昇してHV 1 に達したとき、及び電圧が下降してLV 1 に達したときに、制御機構 4 3 は、スイッチ 1 5 をオンにして、DCバス 1 1 をローカルグリッド 1 7 に接続する。また、電圧監視点でのDCバス 1 1 の電圧が下降してHV 0 に達したとき、及び電圧が上昇してLV 0 に達したときに、制御機構 4 3 は、スイッチ 1 5 をオフにして、DCバス 1 1 をローカルグリッド 1 7 から切断する。これらの制御により、DCバス 1 1 の電圧は、おおむね第 1 の電圧範囲内に維持され、若干のオーバーシュート又はアンダーシュートが生じても第 3 の電圧範囲を逸脱することなく速やかに第 1 の電圧範囲内に収束する。なお、電圧監視システムを利用する場合（変形例）の制御も上記と同様である。

10

【 0 0 6 3 】

< 2 . DCバス電圧の安定性条件 >

上記の通り、DCバス 1 1 にバッテリーユニットを分散して直接接続することにより電気的慣性力を強化し、各バッテリーユニットの容量を適切に設定して十分な慣性持続時間を確保することで、想定される環境において、自律協調制御によるDCバス 1 1 の安定稼働が実現されうる。但し、安定稼働の条件（安定性条件）は、DCバス 1 1 に装荷される電力負荷のスケール、バス電線ケーブルの心線の太さ（電気抵抗）及び長さなどに依存する。そこで、シミュレーションにより安定性条件を探った。

20

【 0 0 6 4 】

（ 2 - 1 . シミュレーションモデル及び想定環境について ）

シミュレーションには、図 9 に示したシミュレーションモデルを利用した。図 9 は、自律協調制御システムのシミュレーションモデルを示した図である。

【 0 0 6 5 】

このモデルでは、バッテリー 6 1 a、6 1 b を接続した第 1 のバッテリーユニット 6 1 と、バッテリー 6 2 a、6 2 b を接続した第 2 のバッテリーユニット 6 2 と、バッテリー 6 3 a、6 3 b を接続した第 3 のバッテリーユニット 6 3 とがDCバス 1 1 上に装荷されている。各バッテリーは、リチウムイオンバッテリーを想定し、その端子電圧がDCバス 1 1 の基準電圧にほぼ等しくなるようにセルを構成し、SOC に対して端子電圧が線形に変化する領域で動作するようにしている。DCバス 1 1 には、電力負荷 6 1 c、6 2 c、6 3 c、及び発電機 6 1 d、6 2 d、6 3 d がさらに装荷されている。DCバス 1 1 は、スイッチ 6 4 に接続され、ローカルグリッド 6 5 に接続できるように構成される。

30

【 0 0 6 6 】

ここで、第 1 のバッテリーユニット 6 1 と電力負荷 6 1 c との間の距離（電力線の長さ）を L 1 とし、電力負荷 6 1 c と発電機 6 1 d との間の距離を L 2 とする。また、第 2 のバッテリーユニット 6 2 と発電機 6 1 d との間の距離を L 3 とし、第 2 のバッテリーユニット 6 2 と電力負荷 6 2 c との間の距離を L 4 とする。電力負荷 6 2 c と発電機 6 2 d との間の距離を L 5 とし、発電機 6 2 d と第 3 のバッテリーユニット 6 3 との間の距離を L 6 とし、第 3 のバッテリーユニット 6 3 と電力負荷 6 3 c との間の距離を L 7 とする。また、電力負荷 6 3 c と発電機 6 3 d との間の距離を L 8 とする。

40

【 0 0 6 7 】

このモデルでは、DCバス 1 1 の各電力線を 5 . 5 S Q の CV ケーブルとした。また、DCバス 1 1 の基準電圧を 4 0 0 V に設定し、一方の電力線を接地電位に対して + 2 0 0 V とし、他方の電力線を接地電位に対して - 2 0 0 V とする方式を採用した。また、DCバス 1 1 の全長を 2 0 0 m とし、接続点間の距離 L 1 ~ L 8 を全て等しく 2 5 m に設定した。この例では、どの電力負荷で消費電力の急増が生じても同程度の電気慣性力が作用す

50

る。

【 0 0 6 8 】

シミュレーションでは、各発電機の停止又は遮断制御を省略しており、各発電機からの発電電力は制限なくDCバス11に供給されるようにした。また、各発電機からの電力供給量は、日本の仙台市の1月における日照量に相当するPVでの発電量を想定し、各電力負荷による電力消費量は、仙台市の1月における一般家庭の電力消費量を想定している。また、電圧閾値LV2、LV1、LV0、HV0、HV1、HV2をそれぞれ380V、385V、395V、405V、415V、420Vに設定した。既存の電力システムで許容される電圧範囲が基準電圧の±5%であり、電圧閾値HV2、LV2はそれぞれ、その電圧範囲の上限値及び下限値に設定されている。なお、シミュレーションツールとしてMAL

10

【 0 0 6 9 】

スイッチ64の制御により、図8に示した制御方法で、ローカルグリッド65とDCバス11との接続状態が切り替わるようにした。上記のモデル及び環境下でのシミュレーション結果を図10に示す。図10は、ローカルグリッド65との接続点でのDCバス電圧の変化を、1月の1か月間にわたってシミュレーションした結果を示した図である。

【 0 0 7 0 】

(2 - 2 . シミュレーション結果)

図10(a)のグラフ71は、各バッテリーユニットの容量をそれぞれ(20/3)kWhとし、DCバス11に接続されたバッテリーの総容量が20kWhになるようにした第1のシナリオに対応するシミュレーション結果を示す。グラフ71が示すように、DCバス11の電圧は、必要に応じてローカルグリッド65からのアシストを受けることにより、LV1とHV1との間の範囲に維持される。DCバス11にバッテリーユニットが分散装荷されて十分な電氣的慣性力が作用しているため、その範囲から電圧が大きく逸脱することはなく、DCバス11の電圧が常に安定している。

20

【 0 0 7 1 】

図10(b)のグラフ72は、各バッテリーユニットの容量をそれぞれ(10/3)kWhとし、DCバス11に接続されたバッテリーの総容量が10kWhになるようにした第2のシナリオに対応するシミュレーション結果を示す。グラフ72が示すように、DCバス11の電圧は、必要に応じてローカルグリッド65からのアシストを受けることにより、LV1とHV1との間の範囲に維持される。第1のシナリオと同様、十分な電氣的慣性力が作用しているため、その範囲から電圧が大きく逸脱することはなく、DCバス11の電圧が常に安定している。但し、各バッテリーユニットの容量が減少したことで、第1のシナリオよりも、第2のシナリオの方が、ローカルグリッド65からのアシストを受ける頻度が増している。

30

【 0 0 7 2 】

図10(c)のグラフ73は、各バッテリーユニットの容量をそれぞれ(5/3)kWhとし、DCバス11に接続されたバッテリーの総容量が5kWhになるようにした第3のシナリオに対応するシミュレーション結果を示す。グラフ73が示すように、DCバス11の電圧は、必要に応じてローカルグリッド65からのアシストを受けることにより、LV1からHV1までの範囲内に維持される。第1のシナリオと同様、十分な電氣的慣性力が作用しているため、その範囲から電圧が大きく逸脱することはなく、DCバス11の電圧が常に安定している。但し、各バッテリーユニットの容量がさらに減少したことで、第2のシナリオよりも、第3のシナリオの方が、ローカルグリッド65からのアシストを受ける頻度が更に増している。

40

【 0 0 7 3 】

上記のシミュレーション結果から、バッテリー容量が減少すると、オングリッドになる頻度が増加して、ローカルグリッド65からのアシストを受ける頻度及び時間が増していくことが分かる。一方、バッテリー容量が最も小さい第3のシナリオでも、ローカルグリッド

50

65のアシストを受けた直後、DCバス11の電圧が、LV1以上又はHV1以下の範囲に回復しており、DCバス11の安定稼働が実現されている。このことは、バッテリーユニットが小型でも、複数のバッテリーユニットをDCバス11上に分散装荷し、ローカルグリッド65からの適切なアシストが得られることで、自律協調制御によりDCバス11の安定稼働を実現できることを示している。

【0074】

但し、電力負荷のスケール（例えば、DCバス11に接続される電力負荷の数又は負荷の大きさ）が大きくなれば、消費電力の急激な変動に伴う電圧変動の幅も大きくなる。これに対応するためには、DCバス11に装荷されるバッテリー容量を大きくする必要がある。しかし、バッテリー容量の増加はコスト増に繋がるため、バッテリーコストと、DCバス電圧の安定性との最適なバランスを見つける必要がある。そこで、上記のシミュレーションモデルをベースに、電力負荷のスケールとバッテリー容量とを変えながらシミュレーションを繰り返し実行してDCバスの安定性条件を探った。

10

【0075】

図11は、本発明の実施形態に係るDCバスの安定性条件を示した図である。図中の安定領域81は、必要に応じてローカルグリッド65からのアシストを受けることで、DCバス11の電圧が第1の電圧範囲内にほぼ維持される条件（安定性条件）を示している。一方、不安定領域83は、ローカルグリッド65からのアシストを受けても、第1の電圧範囲を逸脱したDCバス11の電圧が、第1の電圧範囲内に回復できないか、或いは回復できたとしても非常に長い時間（ある規定値A（例えば、60秒）以上）がかかる条件を示している。遷移領域82は、安定領域81と不安定領域83との間の中間的な状態であり、DCバス11の電圧が第1の範囲外に頻繁に逸脱し、ローカルグリッド65からのアシストを受けても、第1の電圧範囲内に回復するに要する時間がある規定値Aよりは短い、ある規定値B（例えば、1秒）よりも長くかかる条件を示している。

20

【0076】

安定領域81を参照すると、バッテリー容量が十分に大きければ、電力負荷のスケールによらずDCバス11を安定稼働させることが可能であることが分かる。しかし、コストの観点から、バッテリー容量は小さい方が好ましい。そこで、安定領域81と遷移領域82との境界に着目すると、電力負荷のスケールが一定以上（この例では4以上）の範囲において、DCバス11の安定稼働に必要なバッテリー容量は、電力負荷のスケールに比例することが分かる。図11に示した安定性条件によれば、DCバス11に装荷される各バッテリーユニットの容量は、電力負荷のスケールに比例した最小限の容量に設定してよく、そのような小容量のバッテリーユニットでも分散装荷によってDCバス11の安定性を維持できる。

30

【0077】

既に説明したように、DCバス11の安定性は、バッテリー容量だけではなく、電氣的慣性力に依存する。電氣的慣性力は、バッテリーの内部抵抗だけでなく、電力線の分布抵抗にも関係する。電力線の分布抵抗は、電力負荷の接続点とバッテリーユニットの接続点との間の距離が長くなるにつれて、或いは、電力線が細くなるにつれて増加する。電力線の分布抵抗が増加すると、電氣的慣性力が作用しにくくなる。そのため、電力負荷の接続点とバッテリーユニットの接続点との間の距離が短く、電力線が太い方が、DCバス11の安定にとって好適である。

40

【0078】

図12は、本発明の実施形態に係るDCバスの安定性条件を、図11とは異なる観点から示した図である。図12のグラフは、横軸を、電力線に用いるCVケーブルの芯線の断面積とし、縦軸を、CVケーブルの長さとして、安定領域91、遷移領域92、及び不安定領域93をマッピングしたものである。

【0079】

安定領域91は、必要に応じてローカルグリッド65からのアシストを受けることで、DCバス11の電圧が第1の電圧範囲内にほぼ維持される条件（安定性条件）を示している。一方、不安定領域93は、ローカルグリッド65からのアシストを受けても、第1の

50

電圧範囲を逸脱したDCバス11の電圧が、第1の電圧範囲内に回復できないか、或いは回復できたとしても、ある規定値A以上がかかる条件を示している。遷移領域92は、安定領域91と不安定領域93との間の中間的な状態であり、DCバス11の電圧が第1の範囲外に頻繁に逸脱し、ローカルグリッド65からのアシストを受けても、第1の電圧範囲内に回復するに要する時間がある規定値Aよりは短い、ある規定値Bよりも長くかかる条件を示している。図12のグラフから分かるように、CVケーブルが細くて長いほど電力線の分布抵抗が大きくなり、DCバス11の安定性が低くなる傾向にある。このことから、DCバス11の安定動作を保証するためには、可能な限り芯線が太いCVケーブルを用いること、そして、CVケーブルの長さを一定以下に留めておくことが重要であると分かる。

10

【0080】

以下の表1は、CVケーブルの芯線の太さと、安定領域91の状態が維持できるDCバス11の全長との関係を示している。SQは、CVケーブルの芯線の断面積であり、Lは、DCバス11の全長である。表1から、CVケーブルの芯線を太くすることで、DCバス11の全長を伸ばしても、DCバス11の安定性を維持できることが分かる。これは、芯線を太くすればCVケーブルの分布抵抗が小さくなり、芯線が細かい場合に比べて電気的慣性力がより強く働くことに起因する。つまり、芯線を太くして電気的慣性力を強化した分だけ、DCバス11の安定性を維持しつつDCバス11の全長を伸ばすことができる。

【0081】

【表1】

20

SQ (mm ²)	2	3.5	5.5	8	14	22
L (m)	35	78	131	193	345	551

【0082】

以上、添付図面を参照しながら本発明の好適な実施形態について説明したが、本発明は係る例に限定されない。当業者であれば、特許請求の範囲に記載された範疇内において、各種の変更例又は修正例に想到しうることは明らかであり、それらについても当然に本発明の技術的範囲に属する。

30

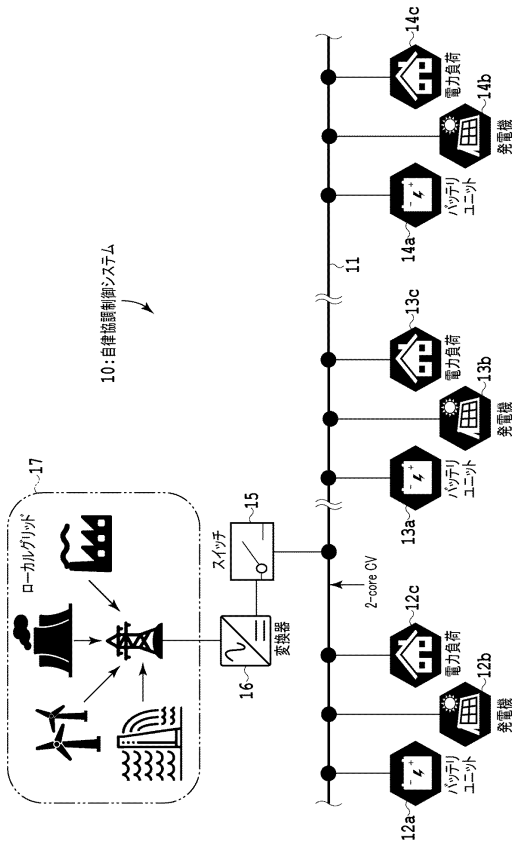
【符号の説明】

【0083】

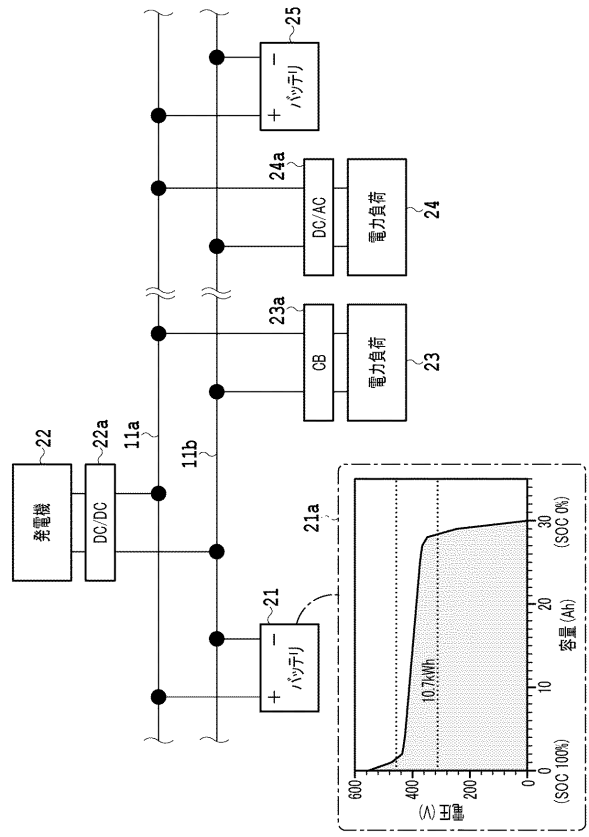
- 10 自律協調制御システム
- 11 DCバス
- 11 a、11 b 電力線
- 12 a、13 a、14 a バッテリーユニット
- 12 b、13 b、14 b 発電機
- 12 c、13 c、14 c 電力負荷
- 15 スイッチ
- 16 変換器
- 17 ローカルグリッド

40

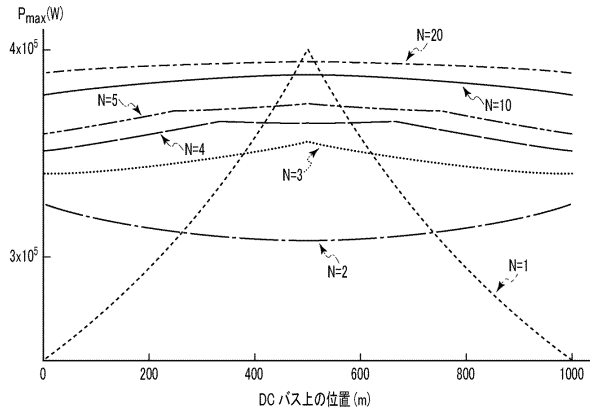
【図面】
【図 1】



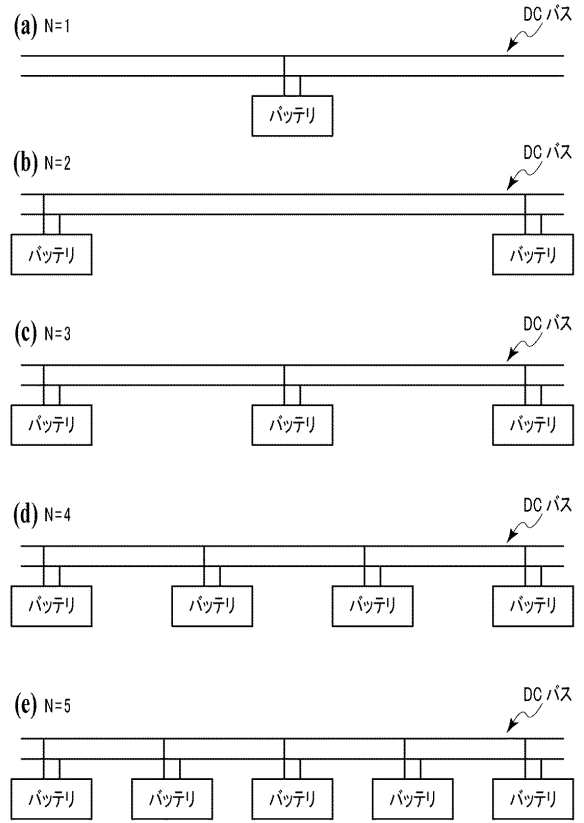
【図 2】



【 図 5 】



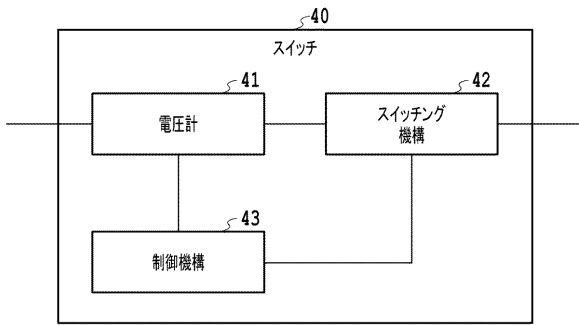
【 図 6 】



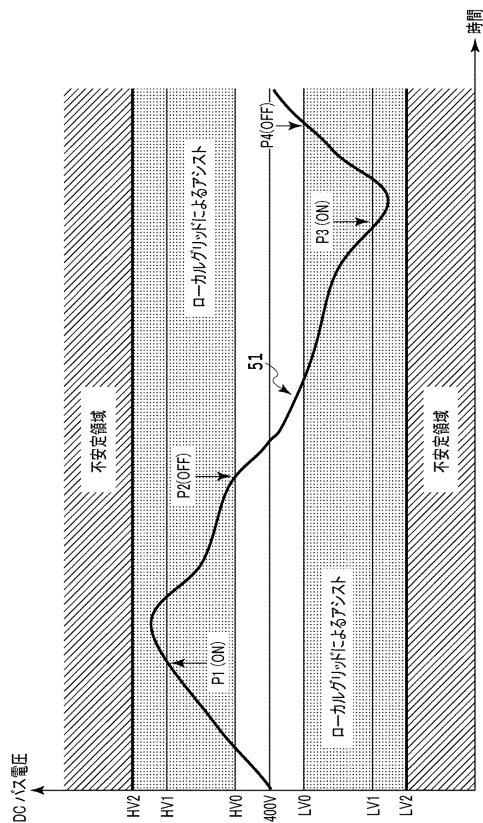
10

20

【 図 7 】



【 図 8 】

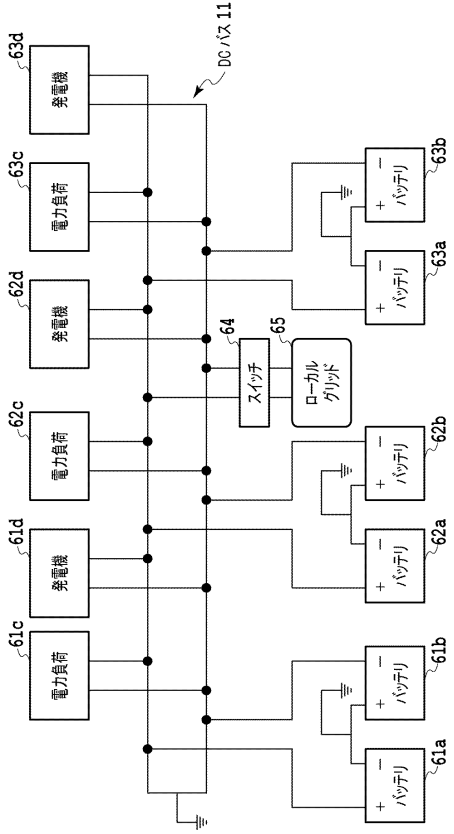


30

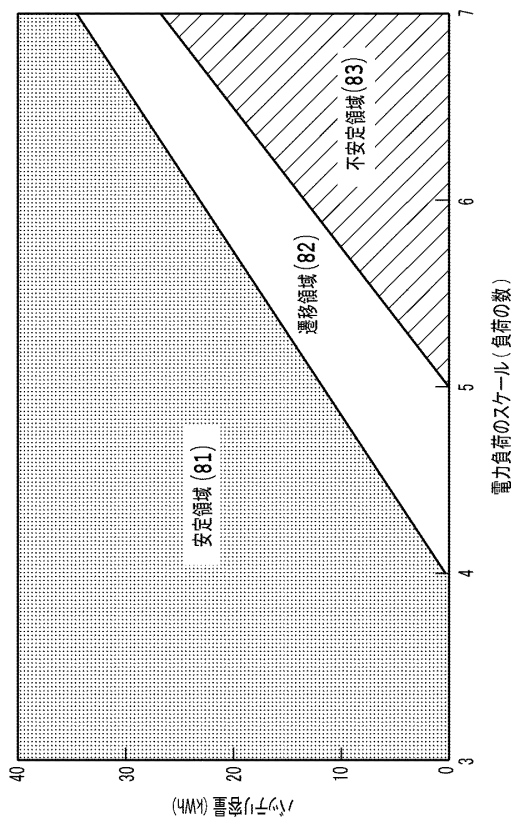
40

50

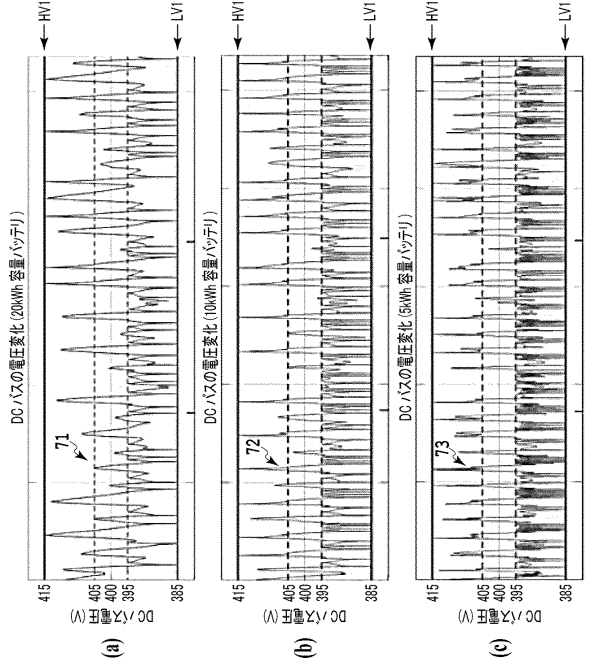
【図 9】



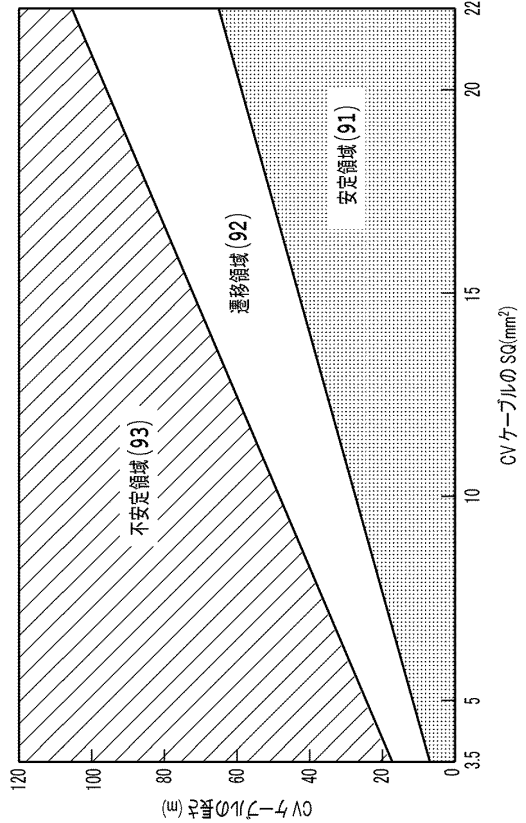
【図 11】



【図 10】



【図 12】



フロントページの続き

宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内

審査官 三橋 竜太郎

- (56)参考文献 特開2021-005985(JP,A)
特開2003-339118(JP,A)
国際公開第2012/144357(WO,A1)
特開2014-121185(JP,A)
国際公開第2020/121362(WO,A1)
特開2007-116809(JP,A)
特開2021-124752(JP,A)
特開2013-102573(JP,A)
特開2013-102578(JP,A)
特開2013-102576(JP,A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H02J 1/00 - 1/16
H02J 7/00 - 7/12
H02J 7/34 - 7/36