

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03960

研究課題名(和文)安全安心安定な電力システムを実現するクラウド形エネルギーストレージシステムの創造

研究課題名(英文)Creation of Cloud Energy Storage System for achieving stable power grid

研究代表者

伊東 淳一 (Itoh, Junichi)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：90377218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：エネルギーストレージシステム(ESS)をクラウド化することで安心、安全、安定な電力供給を実現する。太陽光、風力発電の普及に伴い、ESSが重要となっている。本申請では、小容量なESSを電力系統内に多数分散配置し、クラウド的にエネルギーを蓄えるシステムを開発した。これを実現するために、メンテナンスフリーかつ並列制御できるESSの要素技術確立した。特に、1)マトリックスコンバータをはじめとする電力変換技術とアクティブバッファ技術、2)フライホイールエネルギー貯蔵技術、3)高速冗長分散制御技術について詳細に検討を行い、シミュレーションと実験により有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This project achieves stable power grid using cloud energy storage for PV and wind turbine system. In this study, many small energy storage systems are distributed in the power grid. In order to realize the proposed system, the new technologies were developed as follows: 1) Power conversion technology using matrix converter and active buffer, 2) Flywheel energy storage system, 3) high speed distribution control. These technologies were evaluated by simulations and experiments.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：電力変換技術

### 1. 研究開始当初の背景

近年、日本国内において太陽光・風力発電といった発電量が不安定な自然エネルギー発電システムの導入が盛んに進められている。電力システムを安定化するため、これらの自然エネルギー発電システムの増加を背景に、電力の平準化を行うためのエネルギーストレージシステム(ESS)の重要性が高まっている。近年では、リチウムイオンバッテリーを用いたESSがよく知られているが、リチウムイオンバッテリーを用いたESSには下記の課題がある。

- (1) 系統インピーダンスにより発電・負荷状態によって補償能力に限界がある。
- (2) 広大な用地を必要とする。
- (3) エネルギーを1箇所に蓄えるため危険性を有する。
- (4) 化学バッテリーの寿命が短く、温度依存性が高い。

### 2. 研究の目的

上記の課題を解決するため、ESSをクラウド化することで安心、安全、安定な電力供給を実現することを目的とする。これを実現するべく、系統内においてマイクログリッドなどで用いられている従来のESSよりも、さらに小容量のESSを多数分散配置し、クラウド的にエネルギーを蓄えるシステムを構築する(図1)。小容量のESSに冗長性をもたせた上で分散配置することで高信頼、かつ安定なエネルギー供給システムを確立することが可能となる。

上記のシステムの構築にあたり、下記の技術的課題がある。

- (1) 自然エネルギーの変動や負荷変動状況に応じて、特性のESSに負荷が集中する。しかし、リチウムイオンなどの化学バッテリーを用いたESSでは一部のバッテリーの寿命の短縮を招く。
- (2) 多数の電力変換器が分散配置されることから、これらの電力変換器のメンテナンスレス化が要である。
- (3) 自然エネルギー、または負荷の電力変動に応じて複数台を同時に、かつ高速で冗長制御する必要がある。

### 3. 研究の方法

上述した課題を解決し、クラウドESSを実現するため、下記2つのサブテーマにおいて、小容量分散に適した長寿命なESS、高信頼性をもつ電力変換器及び、複数台制御技術の要素を開発した。

#### (1) クラウドESS向けフライホイールの開発

従来の化学バッテリーを用いたESSを分散配置した場合、一部のESSに負荷が集中する。これらのバッテリーの寿命はアーレニウス則に従うため負荷が集中したバッテリーの寿命が急激に悪化する。そのため、従来のESSは分散配置に適さない。

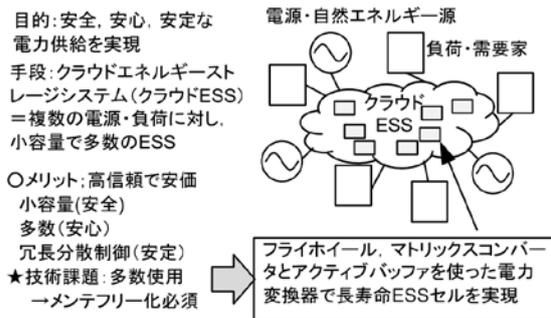


図1 本研究の目的

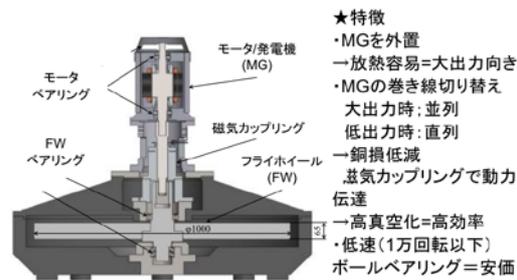


図2 フライホイール式エネルギーストレージシステム(FWESS)

本研究では、分散配置に適するESSを開発するため、機械エネルギーを用いたESSであるフライホイール式ESS(FWESS)を開発する(図2)。FWESSは高速回転体の慣性エネルギーとしてエネルギーを蓄積するため、体積あたりの蓄積エネルギーは他の蓄電方式に及ばないものの、瞬時的に大容量の充放電が可能である。さらに、FWESSは化学変化を伴わないため、定期的なベアリングの交換のみで半永久的な運用が可能である。

本研究ではさらに大容量の電解コンデンサが不要であるマトリックスコンバータをAC-AC電力変換器として適用することで、電力変換器を含めたESSの長寿命化を実現する。

#### (2) FWESS用インタフェース電力変換器の開発

FWESSを単相系統に接続して使用する場合、系統周波数の2倍周波数で電力の脈動が生じる。本脈動を補償するため、従来は大きな電解コンデンサが必要となっていた。本研究ではこれらの問題を解決可能なアクティブバッファ機能を有する電力変換器を開発する。従来、大きなエネルギーを蓄えるためにはコンデンサの容量を増やす必要があった。しかしながら、アクティブバッファ技術ではコンデンサの電圧変動を大きくすることで、等価なエネルギーの授受を少ないコンデンサ容量で実現することが可能となる。したがって、FWESSに接続されるインタフェース電力変換器では大容量の電解コンデンサが不要となり、システムの長寿命化が可能

となる。本機能を有する電力変換器を発案し、その設計法と制御法を確立した。

#### 4. 研究成果

##### (1) クラウド ESS 向けフライホイールの開発

図3に開発したFWESSの外観図を示す。開発したFWESSは定格速度5500rpmであり、最大3MJのエネルギーを蓄積可能である。さらに、11kWの電力の入出力が可能であるため、系統の急峻な電力変動を補償可能である。

##### (2) FWESS用インタフェース電力変換器の開発

図4に開発したマトリクスコンバータを用いたFWESSの構成図を示す。マトリクスコンバータは大容量の電解コンデンサを有さないため、FWと組み合わせることでFWESSの大幅な長寿命化が可能となる。FWESSのエネルギー充放電効率を改善するため、マトリクスコンバータの新たな制御法としてハイブリッド6ステップ動作を開発し、検証を行った。表1に制御法の比較を示す。提案法はインバータ側の動作を180度導通、電流型整流器側をPWM動作させる。これにより入力電流ひずみを低減しつつ、PWM動作に対してインバータ側のスイッチング損失を低減することが可能となる。これにより、高効率・長寿命なFWESSが実現可能となる。

図5にFWESS充電時の動作波形を示す。動作波形より、入力電流の正弦波化とともにモータ側が少ないスイッチング回数で制御できていることが確認できる。

図6に新たに開発したFWESSに対して、提案制御手法と従来のPWM制御においてFWを加速運転した際の効率比較を示す。加減速時間は170sである。弱め界磁領域における重負荷において、ハイブリッド1パルス駆動を用いた場合、出力電圧を従来のPWM駆動と比べて改善できるため、図6の電圧電流特性より出力電流を低減でき、変換器損失を低減できる。図9より、ハイブリッド1パルス駆動を用いたマトリクスコンバータは、従来のPWM駆動と比べて変換器損失を最大30.2%低減できる。

また、FWESSが単相電力系統に接続される場合には、単相電力脈動を吸収するため、インタフェースコンバータにアクティブバッファ機能を付与する必要がある。本研究ではアクティブバッファ機能を有する電力変換器を発案・構築し、検証を行った。

図7にアクティブバッファ機能を有する電力変換器を示す。本研究で開発したアクティブバッファ制御を有する電力変換器の特徴は、追加の受動部品が不要であることである。通常、アクティブバッファ制御を導入するためには追加のインダクタが必要となるが、提案システムでは既存の昇圧・降圧用リアクトルをバッファ制御と共用することが可能であるため、システム内の低コスト化が可能で

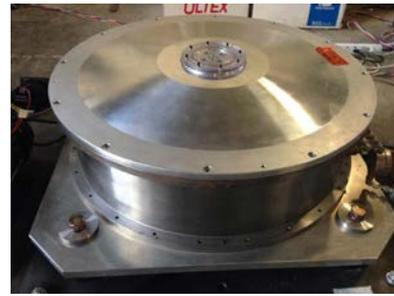


図3 開発したFW

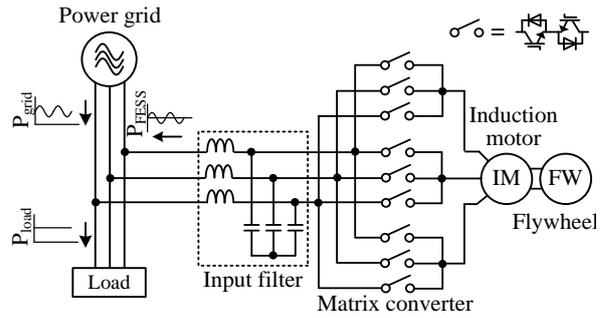


図4 開発したFWESS

表1 FWESS用マトリクスコンバータの駆動法検討

	PWM operation	Six-step operation	Hybrid six-step operation
Input current			
CSR	PWM conduction	120 deg. conduction	PWM conduction
DC-link voltage			
VSI	PWM conduction	180 deg. conduction	180 deg. conduction
Output voltage			
Switching loss	Large	Small	Nearly small
Input filter loss	Small	Large	Nearly small

あり、ESSの分散配置に適した構造をもつ。

図8にアクティブバッファ制御の原理を示す。本制御は、回路のフライングキャパシタをアクティブバッファとして用いる。このアクティブバッファに電流が通流する期間を調整することでコンデンサの電圧を大きく変動させ、単相電力脈動を吸収する。例えば図8(a)の動作モードでは、フライングキャパシタに電流が通流する時間を増加させることでコンデンサを充電する。図8(b)ではフライングキャパシタの放電時間を増加させ、電

圧を低下させる。図 8(c)はインダクタにエネルギーを蓄積する期間である。

図 9 にインタフェースコンバータの動作波形をしめす。提案制御を適用することでフライングキャパシタ電圧が系統周波数の 2 倍周波数で振動しており、電力脈動を吸収できていることが確認できる。

(4) 結論

以上の通り、ESS を分散配置しエネルギーを蓄積するために必要となる要素技術を開発し、その実証試験を行った。これにより、エネルギー蓄積要素をクラウド的に蓄積することで安心・安全・安定な電力システムを実現するための要素技術が確立された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- (1) H. Watanabe, T.Sakuraba, K..Furukawa, K. Kusaka, J. Itoh: "Development of DC to Single-Phase AC Voltage Source Inverter With Active Power Decoupling Based on Flying Capacitor DC/DC Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 6, pp. 4992 - 5004 (2018) (査読有)  
10.1109/TPEL.2017.2727063
- (2) H. Watanabe, J. Itoh: "Experimental Verification of Isolated Grid-Connected Inverter with Small Passive Component", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 138, No. 1, pp. 67-68 (2018) (査読有)  
10.1541/ieejias.138.67
- (3) N. Takaoka, H. Takahashi, J. Itoh: "Isolated Single-Phase Matrix Converter Using Center-Tapped Transformer for Power Decoupling Capability", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 54, No. 2, pp. 1523-1531 (2018) (査読有) (査読有)  
10.1109/TIA.2017.2774760
- (4) 高橋広樹, 伊東淳一: 「一括型ブレーキ回路を用いた多重マトリックスコンバータの FRT 制御」, 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 4, pp. 308-309 (2016) (査読有)  
10.1541/ieejias.136.308
- (5) 佐藤大介, 伊東淳一: 「オープンループ制御による永久磁石同期電動機の方形波駆動」, 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 8, pp. 604-605 (2016) (査読有)  
10.1541/ieejias.136.604
- (6) 渡辺大貴, 小岩一広, 伊東淳一, 大沼喜也, 宮脇慧: 「昇圧形アクティブバッファを有する電解コンデンサレス太陽光発電系統連系インバータの開発」, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 5,

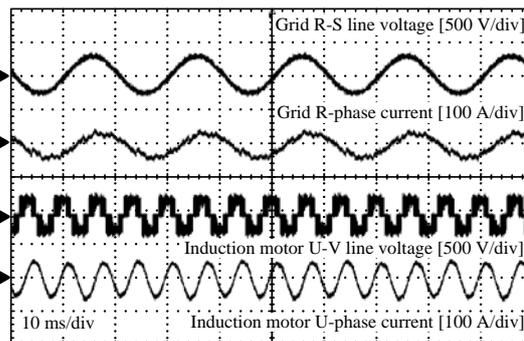


図 5 FWESS 充電時の動作波形 (ハイブリッド 6 ステップ動作適用)

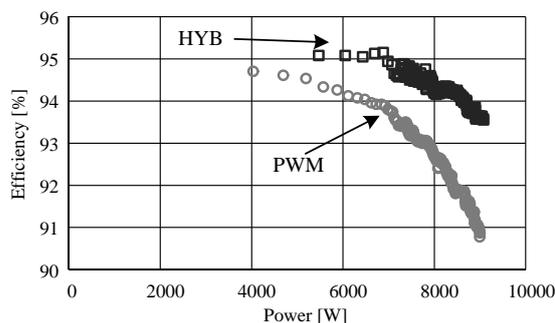


図 6 FWESS の効率評価

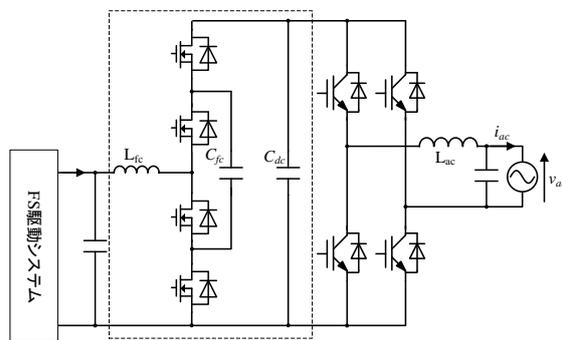


図 7 単相系統に接続するアクティブバッファ機能を有するインタフェースコンバータ

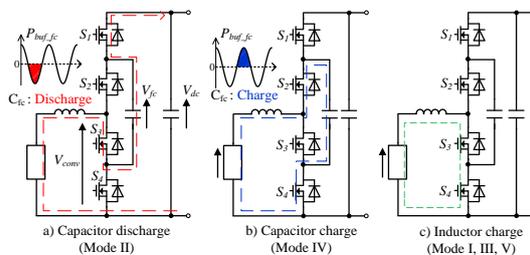


図 8 インタフェースコンバータのアクティブバッファ制御法

pp. 467-474 (2015)

10.1541/ieejias.135.467

- (7) 高橋広樹, 伊東淳一: 「フィルタ共振抑制と電流制御性能改善を両立するマトリックスコンバータの制御法」, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 7, pp. 802-815 (2015)  
10.1541/ieejias.135.802
- (8) 高橋広樹, 伊東淳一: 「発電機トルク制御と系統無効電流制御を両立するマトリックスコンバータの FRT 制御法」, 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 1, pp. 71-78 (2016)  
10.1541/ieejias.136.71

[学会発表] (計 20 件)

- (1) J. Itoh, K. Asai, T. Nagano, T. Kataoka: "Expansion of FRT Operation Range for Grid-Tied Matrix Converter System", International Future Energy Electronics Conference 2017-ECCE Asia, No. 1563 (2017)
- (2) 東井孝途, 伊東淳一: 「IPMSM の V/f 制御における等価抵抗ゲインを用いた安定化制御法」, 産業応用部門大会, Vol. 3, No. 63, pp. 301-304 (2017)
- (3) K. Asai, J. Itoh: "Reduction Method of Grid Current Distortion during FRT for Grid Tied Matrix Converter System", JIASC2017, Vol. 1, No. 126, pp. 557-560 (2017)
- (4) H. Watanabe, J. Itoh: "Single-phase Power Decoupling Method using fly-back converter with discontinuous current mode", JIASC2017, Vol. 1, No. 58, pp. 301-304 (2017)
- (5) J. Itoh, T. Sakuraba, H. Watanabe, N. Takaoka: "DC to Single-phase AC Grid-Connected Inverter using Back Type Active Power Decoupling Circuit without additional magnetic component", Energy Conversion Congress Exposition 2017, pp. 1765-1772 (2017)
- (6) 大桃章嘉, 高岡渚, Le Hoai Nam, 伊東淳一: 「電流不連続モードを適用した T-type NPC 型単相インバータのパワーデカップリング法」, 平成 29 年度電気関係学会北陸支部連合大会, No. A3-15 (2017)
- (7) 辻弘兵, 日下佳祐, 伊東淳一: 「マトリックスコンバータの制御を応用した UPS 向け 3 レベル AC/DC/AC コンバータの効率改善法」, 平成 29 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会, Vol. , No. NGT-17-203, pp. 17 (2017)
- (8) 浅井亨太, 伊東淳一: 「系統連系用マトリックスコンバータの系統電流ひずみ低減時における FRT 範囲拡大手法の検討」, 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, No. EDD-17-070,

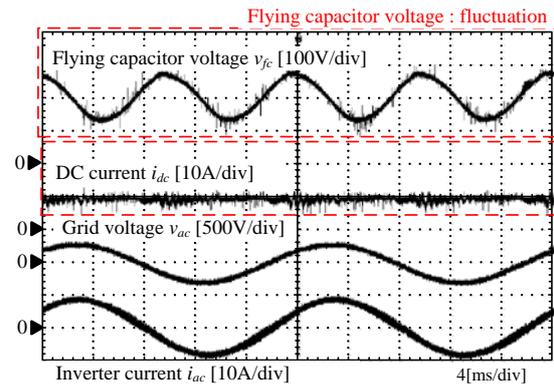


図 9 アクティブバッファ機能を有するインタフェースコンバータの動作波形

- (9) 増田匠, 西澤是呂久, 伊東淳一: 「マトリックスコンバータを用いたフライホイール電力貯蔵装置の弱め界磁制御に関する基礎検証」, 平成 29 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会, No. NGT-17-409 (2017)
- (10) 辻弘兵, 日下佳祐, 伊東淳一: 「マトリックスコンバータの制御を応用した UPS 向け 3 レベル AC/DC/AC コンバータの実機検証」, 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, Vol. , No. SPC-18-013, MD-18-013, pp. 67-72 (2018)
- (11) 増田匠, 伊東淳一: 「マトリックスコンバータを用いたフライホイール電力貯蔵装置におけるハイブリッド 1 パルス駆動の損失検討」, 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, No. SPC-18-012, MD-18-012, pp. (2018)
- (12) J. Itoh, T. Masuda, T. Nagano, H. Higa: "Hybrid Six-step Operation for Matrix Converter in Flywheel Energy Storage System", ICEMS2016, No. 0316, pp. (2016)
- (13) J. Itoh, T. Masuda, D. Sato, T. Nagano, T. Suzuki: "Development of Magnetic Assist System in Flywheel Energy Storage System for Power Load-Leveling", ICRERA2016, No. 52 (2016)

[その他]  
ホームページ

<http://itohserver01.nagaokaut.ac.jp/itohlab/jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊東 淳一 (ITOHO, Jun-ichi)

長岡技術科学大学・大学院工学研究科・技術科学イノベーション専攻・教授

研究者番号: 90377218