

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02131

研究課題名(和文) 仮想同期機制御を適用した半導体変圧器の研究

研究課題名(英文) Study on Solid State Transformer with Virtual Synchronous Machine Control

研究代表者

三浦 友史 (Yushi, MIURA)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：90354646

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,000,000円

研究成果の概要(和文)：電力系統の慣性をサポートするために仮想同期機(VSM)制御を適用した電力貯蔵装置(ESS)を有する半導体変圧器(VSM-SST)について、まず満足すべき慣性補償の動作を明らかにした。次に常時はESSを動作させず、電力変動が発生した場合にのみ電力変動をVSM制御の内部変数である制動電力の変化を用いて検出しESSが動作する制御系を構築した。ESSが過充電などによってVSM-SSTから切り離された場合にも、VSM制御の変数を変更することによって継続して従来のSST同様に負荷に電力供給できるようにした。これらの提案制御手法の有効性は簡略化したVSM-SSTの1kW級装置の実験によって確認している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案する仮想同期機(VSM)制御を適用した半導体変圧器(SST)によって、電力系統の慣性不足の問題が解決され再エネ電源の大量導入が可能となる。またVSM制御導入時のパラメータ設定・コスト負担などの実用上の課題を解決できる。本研究では、VSM-SSTに必要な慣性補償動作を明らかにし、電力貯蔵装置がSSTと協調して動作する制御を提案し、その有効性を示すことによりVSM-SSTの開発に貢献している。

研究成果の概要(英文)：For a solid-state transformer (SST) with an electric storage system (ESS) that applies virtual synchronous machine (VSM) control to support power system inertia (VSM-SST), The requirements for the VSM-SST to compensate the inertia is first clarified. Then, a control system was constructed in which the ESS does not always operate, but only when a power fluctuation occurs, the power fluctuation is detected using the change in damping power, which is an internal variable of the VSM control, and the ESS is operated. In the case that the ESS is disconnected from the VSM-SST due to overcharging or other reasons, it is able to continue to supply power to the load in the same way as a conventional SST by changing the VSM control variables. The effectiveness of the proposed control method was verified by experiments with a simplified VSM-SST of 1 kW class.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：SST 半導体変圧器 仮想同期機制御 疑似慣性動作 電力貯蔵装置

1. 研究開始当初の背景

カーボンニュートラルを実現するために、電力系統に太陽光発電(PV)や風力発電などの分散電源が大量に、そして急速に導入されつつある。このような分散電源は半導体電力変換器であるインバータを介して系統に連系され、系統の周波数に従って運転されるため、回転子の機械的なエネルギーを持つ従来の同期発電機と異なり慣性を持たない。このため電力系統全体の慣性が相対的に減少し、周波数が不安定になることが懸念されている。

この慣性不足の解決策のひとつとして、図 1 に示すようにインバータを同期機の動揺方程式の特性をもつように制御することによって、同期機と同様の慣性を分散電源に与える仮想同期機 (Virtual Synchronous Machine, VSM) 制御が検討されている。しかし、図 2(a)に示すように低圧側の容量 10 kW 未満の設備も含めたすべての PV やガスエンジンコージェネ (GE) などの分散電源に、電力貯蔵装置を設置し VSM 制御を個別に適用してその制御パラメータを電力事業者が設定することは、技術的にもコスト的にも困難であることが課題であった。

2. 研究の目的

本研究では、近年開発が進められている半導体変圧器 (Solid State Transformer, SST) に電力貯蔵装置 (Energy Storage System, ESS) を付加し、VSM 制御を適用することを提案する。図 2(b)に示すように SST に VSM 制御を適用すれば、個別の分散電源に VSM 制御を適用する必要はなく一括して慣性を補償できるのに加え、VSM 制御のパラメータについても SST を管理する電力事業者が任意に設定することが可能になる。しかし、発電が安定している分散電源ではなく、時々刻々と負荷が変化して双方向電力変換を行う SST に VSM 制御を適用するには、ESS の運用も含め種々の技術的な課題が存在する。そこで本研究では、VSM 制御を適用した SST (VSM-SST) の基礎的な制御方法の確立を目的としている。

3. 研究の方法

想定する VSM-SST の構成を図 3 に示す。高压側にはモジュラーマルチレベル変換器 (Modular Multilevel Converter, MMC) を、絶縁部には DAB (Double Active Bridge) を入力側直列 - 出力側並列に接続し (Input-Series Output-Parallel, ISOP 接続)、低圧側は直流マイクログリッドに電力を供給することを想定している。ESS は電気二重層キャパシタ (EDLC) を想定し、低圧側直流リンクに双方向チョッパを介して並列接続する構成となっている。本研究では、VSM-SST の制御方法の確立を目的としているため、図 3 の構成を簡略化した図 4 の構成で検討を進めた。研究の進め方を以下に示す。

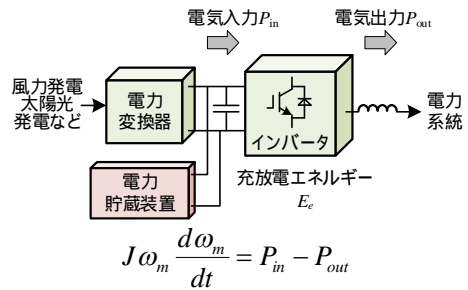
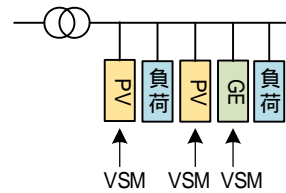
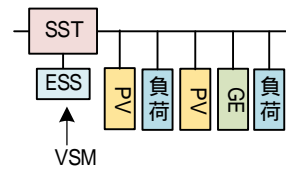


図 1 動揺方程式と仮想同期機制御 (ω_m :仮想同期機角速度, J :慣性モーメント)



(a) 個別に VSM 制御適用



(b) VSM-SST で一括慣性補償
図 2 SST に適用する VSM 制御

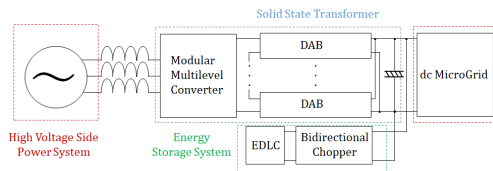


図 3 想定する VSM-SST の構成

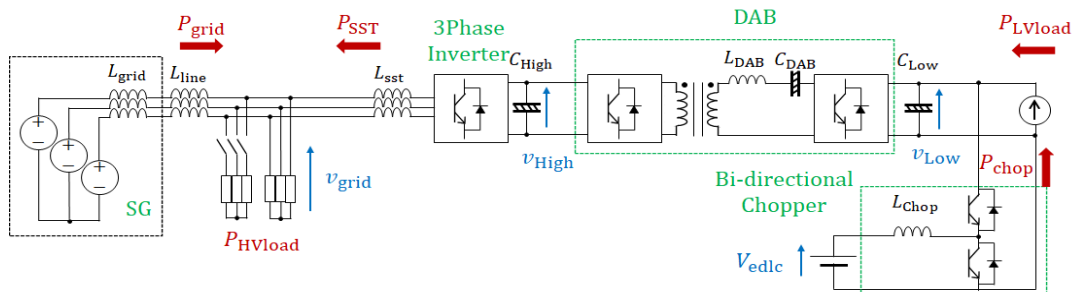


図 4 簡略化した VSM-SST の構成 (1 kW 小型試験システム)

< 研究の進め方 >

疑似慣性動作を行う VSM-SST が満足すべき要件の明確化
 機能要件を満たす制御系の構築と、回路シミュレーションによる VSM-SST の疑似慣性動作の確認
 VSM-SST の回路を簡略化した 1-kW 級小型試験システムを用いた実験による提案制御法の有効性の実証

4. 研究成果

(1) VSM-SST が満足すべき動作要件

まず、ESS を有する VSM-SST が満足すべき動作要件について明らかにした。VSM-SST は、(i) 電力潮流の方向（順潮流 / 逆潮流）、(ii) 擾乱が発生した場所（高圧側系統 / 低圧側負荷）、(iii) ESS の状態（接続 / 解列）などの条件によって、擾乱を補償し慣性を供給するために要求される動作が異なる。これらを整理して下記の動作要件を設定した。

< VSM-SST の動作要件 >

- a) ESS の蓄電池・キャパシタなどが過充電・過放電しないように、ESS は疑似慣性動作時のみ動作するものとし、その他の定常時の期間には充電量（State of Charge, SOC）の調整運転以外は動作しない
- b) 擾乱が高圧側系統で発生した場合、潮流の方向に限らず ESS が充放電することによって疑似慣性動作を行い、系統に電力を供給 / 吸収することによって擾乱を補償し系統への影響を緩和する
- c) 擾乱が低圧側で発生した場合、ESS がまず低圧側の擾乱を補償し、その後 VSM-SST が系統側の電力を緩やかに変化させることによって、系統への影響を緩和する
- d) ESS が過充電・過放電などの理由で SST から切り離されている場合には疑似慣性動作をせず、一般的な SST と同様に電力を系統から直流マイクログリッドに供給する

VSM-SST は従来の変圧器と同様に、負荷への電力供給を継続して行うことを優先すべきである。VSM-SST において ESS が常時低圧側直流電圧あるいは高圧側直流電圧を維持するように動作する制御方法では、ESS の蓄電池やキャパシタが過充電・過放電されるのを防ぐために ESS が SST から切り離される場合、あるいはメンテナンスにて運転を停止する場合に、VSM-SST 全体の運転も停止しなければならず、低圧側需要家は最悪停電することとなる。そこで本研究では上記、a)、d)の要件を設けており、これらを満足する制御系を構築することに特徴がある。

(2) 提案する制御系

提案する制御系を図 5 に示す。制御系は、系統連系インバータ、DAB、ESS をそれぞれ制御するブロックに分かれている。

連系インバータは、高圧側直流電圧 V_{High} と有効電力 P_{sst} をフィードバックし動揺方程式を用いることによってインバータ出力電圧の角周波数 ω と位相 θ を算出し、電圧振幅については、無効電力制御器（AQR）を用いて決定し、インバータ出力電圧指令値を得る。DAB は、高周波変圧器の一次側と二次側の印加電圧に位相差 δ^* を与えることで電力を制御し、低圧側直流電圧 V_{Low} を制御する。ESS の双方向チョッパは、動作時に V_{Low} を維持するようにリアクトル電流 I_L を制御する。

制動電力を用いた電力変動検出法

提案する制御系では、通常時、高圧側直流電圧 V_{High} は系統連系インバータによって制御され、低圧側直流電圧 V_{Low} は DAB によって制御されるため ESS は動作していない。高圧側あるいは

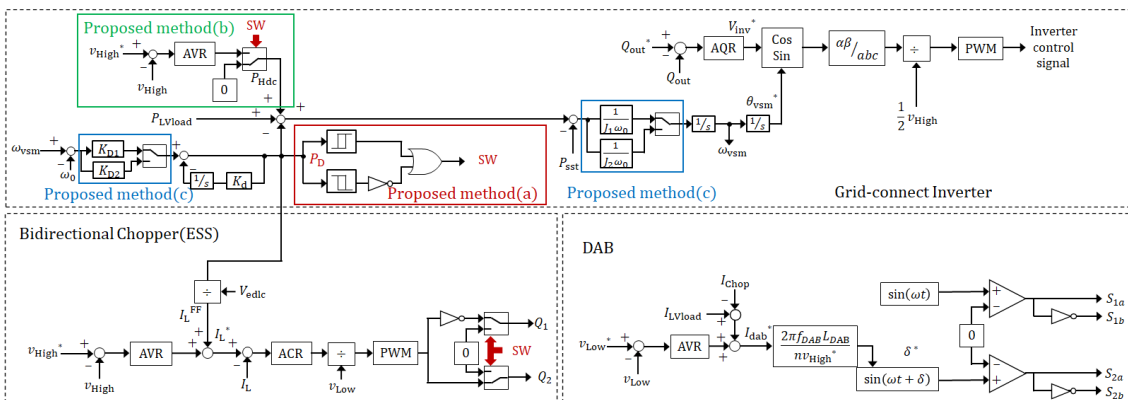


図 5 提案する VSM-SST の制御系

低圧側で擾乱が発生した場合には、疑似慣性動作を行うために制御を切り替え、 V_{High} は ESS によって制御し、インバータが疑似慣性動作によって供給する電力を ESS から供給することになる。しかし、この制御の切り替えのためには、擾乱の発生を検出することが必要である。そこで本研究では次式で表される VSM 制御の内部変数である動揺方程式の制動電力 P_D を用いて擾乱を検出している。

$$J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} - P_D \quad (1)$$

ここで ω_0 は系統の公称周波数であり、 $P_D = K_D(\omega - \omega_0)$ である。擾乱が発生すると P_D が増加するので、図 5 (a) のブロックによって、しきい値を超えた場合に擾乱が発生したと判断し、SW の値を切り替える。その結果、図 5 (b) のブロックによって V_{High} の制御はインバータの AVR から ESS に切り替わることとなる。疑似慣性動作後、 P_D はゲイン K_d をもつ積分フィードバックによって零に戻るため、 V_{High} は再びインバータによって制御されることになる。 P_D が零に戻るまでの時間は K_d によって決定するので、ESS から供給されて VSM-SST を介して系統に補償する電力量は K_d によって調整可能であり、ESS の蓄積エネルギー容量を適切に設計することができる。

ESS が切り離されている場合の制御

ESS が切り離されている場合には、VSM-SST は系統に電力を供給できないため疑似慣性動作を行うことはできない。しかし、VSM-SST は疑似慣性動作を行わなくとも変圧器として需要家への電力供給を継続すべきである。そこで、ESS 解列時には図 5 (c) に示すように、慣性モーメント J とゲイン K_D の値を、定常時の値 J_1, K_{D1} から J_2, K_{D2} へと十分小さい値に変更するものとした ($J_1 \gg J_2, K_{D1} \gg K_{D2}$)。この結果、インバータの仮想同期機制御の応答は速くなり、一般的な分散電源に用いられている電流制御 (Current Control, CC) の挙動に近づけることができる。すなわち、一般的な SST と同様の応答が実現でき、ESS が解列されている状態でも需要家への電力供給を継続できることになる。

(3) 実験

提案手法の有効性を確認するため、図 4 に示す回路を用いて実験を行った。電力系統は、動揺方程式を含む制御器によって制御される制御電源で模擬した 1 台の同期発電機 (Synchronous Generator, SG) として模擬し、将来インバータが大量に系統に連系された状況を想定して、その容量は VSM-SST と同じとした。実験に用いた装置の諸元、制御パラメータを表 1 に示す。

VSM-SST が 400 W の電力を負荷に供給している条件で、電力系統で 450 W の負荷電力のステップ変化が生じた場合の実験結果を図 6 に示す。提案する制御手法の有効性を示すために、(i) “VSM-SST” (VSM-SST が疑似慣性動作を行う場合)、(ii) “SST w/o ESS” (ESS が SST から切り離されている場合)、(iii) “CC” (一般的な電流制御を用いた場合) の 3 つのケースについて比較した。

VSM-SST が疑似慣性動作を行う場合

負荷変動前には SST の高圧側直流電圧 V_{High} は図 6 (g) に示すようにインバータによって指令値 200 V に維持されている。時刻 1 秒において系統で負荷変動が発生すると (図 6 (c))、”VSM-SST” の場合、図 6 (d) に示すように VSM 制御の内部変数である制動電力 P_D が即時に増加し、上側しきい値を超えた時点で ESS が図 6 (d) に示すように動作を開始し V_{High} を制御し始める。インバータは疑似慣性動作を行い、図 6 (b) のように電力を系統に供給する。その結果、負荷変動は系統 (SG) と VSM-SST とで分担されることになり、図 6 (a) のように SG の出力電力は緩やかに変化すること

表 1 装置諸元と制御パラメータ

Circuit parameters ($S_{\text{base}}:1 \text{ kVA}$)		
$v_{\text{grid}}:100 \text{ Vrms}$	$v_{\text{High}}:200 \text{ Vdc}$	$v_{\text{Low}}:200 \text{ Vdc}$
$V_{\text{edc}}:100 \text{ V}$	$C_{\text{High}}:800 \mu\text{F}$	$C_{\text{Low}}:4 \text{ mF}$
$L_{\text{grid}}:6.8 \text{ mH}$ (0.2 pu)	$L_{\text{line}}:590 \mu\text{H}$ (0.02 pu)	$L_{\text{sst}}:3.4 \text{ mH}$ (0.1 pu)
$L_{\text{DAB}}:150 \mu\text{F}$	$C_{\text{DAB}}:3 \mu\text{F}$	$L_{\text{chop}}:2.4 \text{ mH}$
Inverter control parameters		
$K_{D1}:100 \text{ pu}$	$K_{D2}:5 \text{ pu}$	$K_d:4$
$J_1:4.1 \times 10^{-2}$	$J_2:8.1 \times 10^{-4}$	
$K_{\text{PAVR}}:5$	$T_{\text{IAVR}}:0.5$	
$K_{\text{PAQR}}:4.0 \times 10^{-4}$	$T_{\text{IAQR}}:8.0 \times 10^{-2}$	
Bi-directional Chopper control parameters		
$K_{\text{PAVR}}:5.6 \times 10^{-2}$	$T_{\text{IAVR}}:1.4 \times 10^{-1}$	
$K_{\text{PACR}}:6.45$	$T_{\text{IACR}}:7.0 \times 10^{-4}$	
DAB control parameters		
$K_{\text{PAVR}}:5.2 \times 10^{-2}$	$T_{\text{IAVR}}:3.5 \times 10^{-2}$	
SG control parameters		
$K_{\text{gov}}:33.3 \text{ pu}$	$f:4.1 \times 10^{-2}$	
$K_{\text{PAVR}}:4.0 \times 10^{-4}$	$T_{\text{IAVR}}:8.0 \times 10^{-5}$	
Current control parameters		
$K_{\text{PAVR}}:2.4$	$T_{\text{IAVR}}:5.0 \times 10^{-1}$	
$K_{\text{PACR}}:4.76$	$T_{\text{IACR}}:1.4 \times 10^{-3}$	

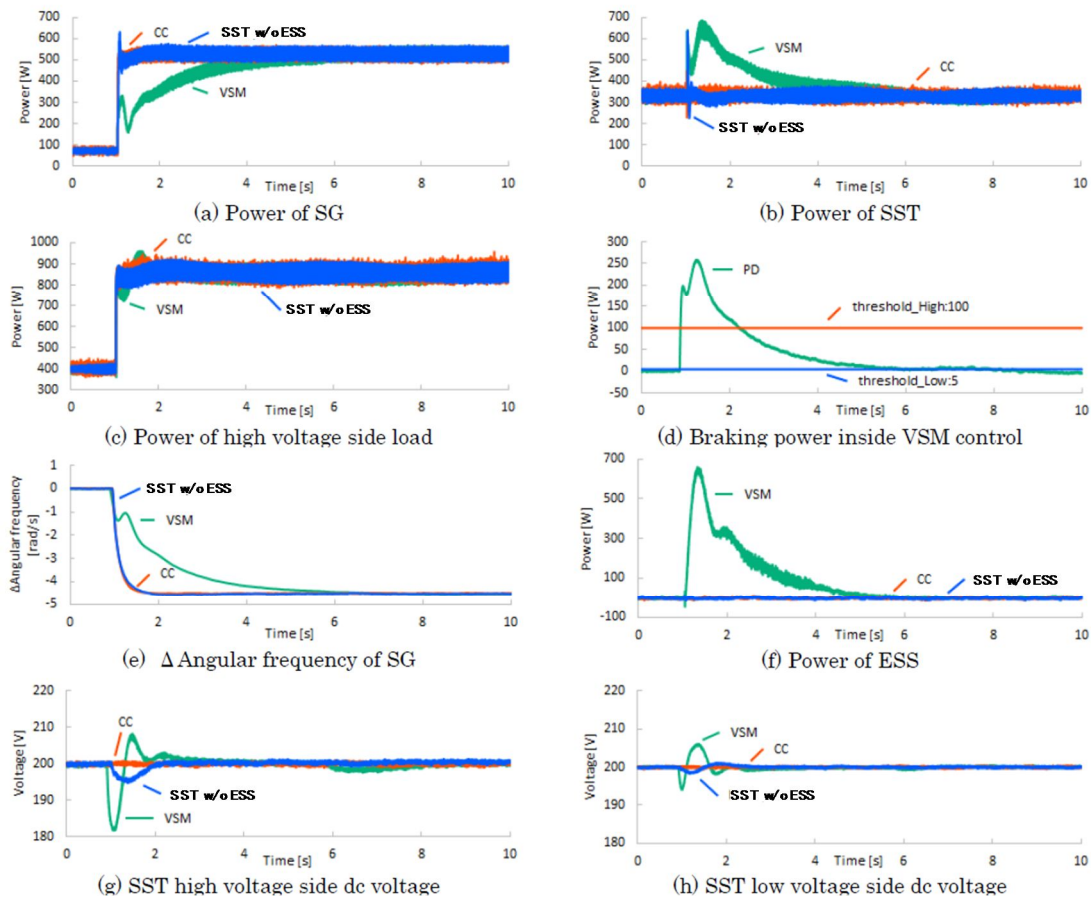


図 6 系統側で負荷変動が発生した場合の実験結果

となる。SGの角速度の公称角速度からの偏差も緩やかに変化しており、VSM-SSTが系統に対して慣性を供給していることが確認できる。疑似慣性動作後、 P_D は零に向かって緩やかに減少していき、下側しきい値を下回った時点で V_{High} は再びインバータによって制御される。

負荷変動直後、 V_{High} は疑似慣性動作のために変動するがその大きさは10%以下であった。その後ESSからインバータに再び制御が切り替わる時点においても V_{High} の変動は十分に小さいことが確認された。低圧側直流電圧 V_{Low} の変動も負荷変動時において5%以下と小さく、直流マイクログリッドへの影響も十分に小さいと考えられる。

ESSがSSTから切り離されている場合

ESSが切り離されている場合は、慣性モーメント J とゲイン K_D を十分に小さな値に変更することによって、慣性がない一般的なSSTとして振る舞うようにする。実験では、図6に示すようにESSが停止している場合(“SST w/o ESS”)にも、慣性補償をしない電流制御(“CC”)と同様の高速な応答が得られ、一般的なSSTと同様に需要家に電力供給できることが確認できた。

(4) 本研究の成果のまとめ

- ・ VSM制御を適用したSSTについて、電力潮流の方向、擾乱の発生場所、ESSの接続条件などを考慮して、慣性補償を行うために満足すべき動作要件を明らかにした
- ・ 慣性補償を行うための動作要件を満足し、ESSが切り離された状態であってもSSTとして機能することが可能となる制御系を構築した
- ・ 提案する制御を実装した簡易回路構成のVSM-SSTについて、回路シミュレーションおよび小型装置の実験を行い、所望の動作を実現できることを確認し、提案制御の有効性を確認した

本研究では、系統連系インバータ電源の容量増大による系統の慣性不足の問題を解決する対策として、疑似慣性動作を可能とするVSM制御を適用したSSTの基礎的な制御技術を確立した。太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの大量導入の実現に資すると期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 小谷駿介・三浦友史・伊瀬敏史	4. 巻 44
2. 論文標題 仮想同期発電機制御を適用した半導体式変圧器の基礎検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 パワーエレクトロニクス学会誌	6. 最初と最後の頁 168
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 小谷駿介・劉佳・三浦友史・阪部茂一・伊瀬敏史	4. 巻 SPC-20-009
2. 論文標題 仮想同期発電機制御を適用した半導体式柱上変圧器の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会 資料, SPC-20-009, MD-20-009	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 樋口順也, 三浦友史	4. 巻 SPC-20-169
2. 論文標題 電力貯蔵装置を有する半導体変圧器の仮想同期機制御	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会 半導体電力変換/家電・民生/自動車合同研究会, SPC-20-169, HCA-20-62, VT-20-58	6. 最初と最後の頁 133-134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 樋口順也, 三浦友史	4. 巻 1
2. 論文標題 仮想同期機制御を適用した電力貯蔵装置を有する半導体変圧器の系統サポート動作	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021年電気学会産業応用部門大会	6. 最初と最後の頁 99-102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 樋口順也, 三浦友史	4. 巻 SPC-22-069
2. 論文標題 動揺方程式に着目した負荷変動判別法を用いたSSTの仮想同期機制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, PE-22-021, PSE-22-041, SPC-22-069	6. 最初と最後の頁 119-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 樋口順也・三浦友史
2. 発表標題 電力貯蔵装置を有する半導体変圧器の仮想同期機制御
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小谷駿介・劉佳・三浦友史・阪部茂一・伊瀬敏史
2. 発表標題 仮想同期発電機制御を適用した半導体式柱上変圧器の提案
3. 学会等名 電気学会 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樋口順也・三浦友史
2. 発表標題 仮想同期機制御を適用した電力貯蔵装置を有する半導体変圧器の系統サポート動作
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樋口順也・三浦友史
2. 発表標題 動揺方程式に着目した負荷変動判別法を用いたSSTの仮想同期機制御
3. 学会等名 電気学会 電力技術 / 電力系統技術 / 半導体電力変換合同研究会, PE-22-021, PSE-22-041, SPC-22-069
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	劉 佳 (Liu Jia) (00791922)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------