

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560318

研究課題名(和文) 連系・自立どちらの運転状態でも高性能を発揮する新しい構造切り替え型電力変換装置

研究課題名(英文) Novel Power Converter Suitable for Both Grid-Connected and Islanding Mode

研究代表者

船渡 寛人 (Funato, Hirohito)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60272217

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：自立運転時、連系運転時どちらも高性能を発揮する構造切り替え型系統連系変換器について、デジタルヒステリシス電流制御(DHI)と構造切り替え型ハイブリッドフィルタを用いることで実現した。DHIについてバイポーラ動作(BP)が有利であることを確認した。ハイブリッドフィルタについては、出力電圧制御方式という新方式を採用し、LCフィルタのみの場合の出力電圧歪率3.54%に対して1.04%という低歪みを得た。さらに、系統連系運転について、共振が発生する場合あることを確認して、HFの構造を切りかえてダンピング抵抗として動作させることで振動を抑制できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this project, high-performance inverter for distributed energy source using hybrid filter is proposed. The proposed inverter maintain high performance both under grid-connected and islanding situation. At first, the efficiencies of the proposed inverter applied different control algorithm were considered. From theoretical analysis and experiments, it is derived that unipolar hysteresis control can improve efficiency approximately 3 percents. In order to realize high-performance, linear amplifier of the hybrid filter is controlled as a negative capacitance in islanding mode and a dumping resistance in grid-connected mode.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：マイクログリッド 分散電源 系統連系 自立運転

1. 研究開始当初の背景

近年、自然エネルギーに代表される分散電源が普及している。分散電源を系統に接続して使用する場合、電流制御である系統連系モードと電圧制御である単独運転モードを切り替えて運転する必要がある。切り替え可能な変換器は種々提案されているが、両者の要求性能を同時に満たすのは難しい。そこで、以前より提案してきたヒステリシス制御とハイブリッドフィルタを組み合わせることで、用途に応じて切り替え可能な高効率で小型な変換器システムの構築を目指している。

2. 研究の目的

(1) 分散型電源に適用できる電流制御法であるヒステリシス制御は三角波比較法などのPWM制御と比較していくつかの利点を有する。一つは制御則が単純で平均的な偏差なく追従できるという点、一つはスイッチング周波数が時間的に変化するためにスイッチングデバイスのスイッチング損失を低減できる点である。そこで、単相の系統連系インバータにおいてヒステリシス電流制御を適用した場合の性能及び効率の測定を行い、ヒステリシス制御の有用性を検証する。

(2) 分散型電源の普及に伴い、パワーエレクトロニクス機器に起因する高調波電流の送配電系統への流入量が増大する。この高調波低減のために、申請者がこれまで提案してきたハイブリッドフィルタの実機検証を行い、パワーエレクトロニクス変換器の歪み低減の検証をする。

3. 研究の方法

(1) ヒステリシス制御

系統連系を用途としたヒステリシス制御の詳細な検討をするため、単相系統連系インバータにヒステリシス電流制御を適用した場合におけるスイッチング周波数と損失の理論計算を行う。また、実機において効率を測定し、理論値と比較する。それに加えPWM制御の一つである三角波比較法とヒステリシス制御との効率の比較検討を行い、ヒステリシス制御の優位性を検証する。

(2) ハイブリッドフィルタ

自立運転時への適用

系統連系を用途としたパワーエレクトロニクス機器には高調波低減が求められる。そこで、通常のインバータに使用されるLCフィルタにアクティブフィルタを組み合わせたハイブリッドフィルタを構成することで、スイッチングによる高調波成分を抑制する。ここでは、自立運転時の電圧制御インバータにおいてハイブリッドフィルタを適用した場合の実験検証を行い、その有効性を検証する。

連系運転時への適用

連系運転時にはインバータの出力にLCLフィルタを接続する。ヒステリシス電流制

御を適用した場合、スイッチング周波数が変動することからLCLフィルタによる共振現象が発生し、歪みが増加する。そこでハイブリッドフィルタをダンピング抵抗として機能させることで、電流歪みを抑制することをシミュレーションにより確認する。

4. 研究成果

(1) ヒステリシス制御

スイッチング周波数

図1にヒステリシス電流制御を適用した単相系統連系インバータの回路を示す。また、図1の等価回路を図2で表し、この等価回路に基づいてスイッチング周波数を解析する。ここで  $V_{inv}$  はインバータの出力電圧、 $i_L$  はインダクタンス  $L$  を流れる電流、 $V_x \sin t$  は系統の電圧、 $I_{HB}$  はヒステリシスバンドとする。回路方程式は(1)式で与えられる。

$$V_{inv} = L \frac{di_L}{dt} + V_x \sin \omega t \quad (1)$$

以下に示す条件下でバイポーラ型及びユニポーラ型のスイッチング周波数の解析を行った。

- 指令値と系統は同相の正弦波とする。
- 出力は指令値に偏差なく追従しているものとする。
- インバータは理想の電圧源とする。

この時、バイポーラ型及びユニポーラ型のスイッチング周波数の理論式はそれぞれ(2)、(4)式で与えられる。

$$f_{sw} = \frac{V_{dc}}{4I_{HB}L} \left\{ 1 - \left( \frac{V}{V_{dc}} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

$$V = V_x \sin \omega t + \omega I_{ref} \cos \omega t \quad (3)$$

$$f_{sw} = \frac{V}{2I_{HB}L} \left( 1 - \frac{V}{V_{dc}} \right) \quad (4)$$

$$V = \begin{cases} V_x \sin \omega t + \omega I_{ref} \cos \omega t, & (i_{ref} > 0) \\ \omega I_{ref} \cos \omega t - V_x \sin \omega t, & (i_{ref} < 0) \end{cases} \quad (5)$$

$i_{ref}$  は指令値電流であり、ユニポーラ型では  $i_{ref}$  の正負により  $V$  の値は(5)式で与えられる。次に(2)、(3)式を用いて基準信号一周期におけるスイッチング周波数の変化を計算した

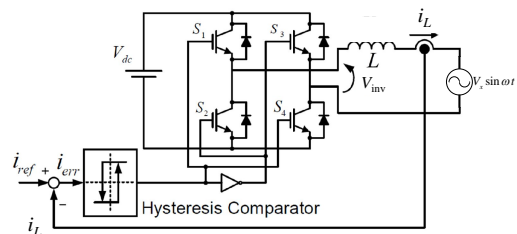


図1 ヒステリシス電流制御を適用した単相系統連系インバータ

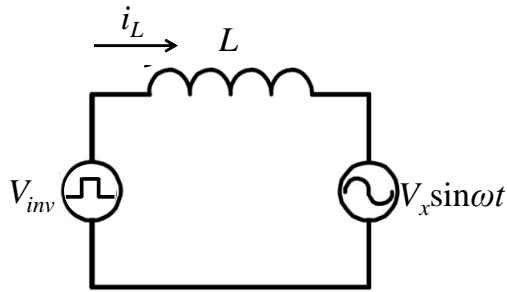


図2 ヒステリシス電流制御インバータ等価回路

表1 スイッチング周波数解析パラメータ

$V_{dc}$	180 [V]	$L$	2 [mH]	$I_{ref}$	14.1 [A]
$V_x$	141 [V]	$I_{HBb}$	1 [A]	$I_{HBu}$	0.89 [A]

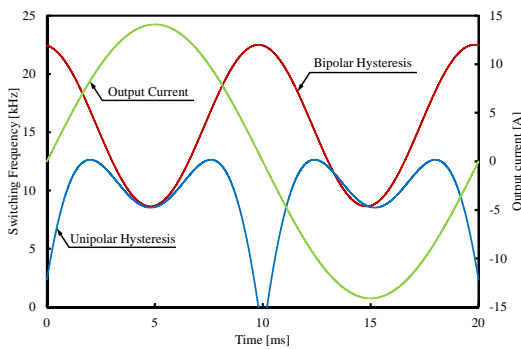
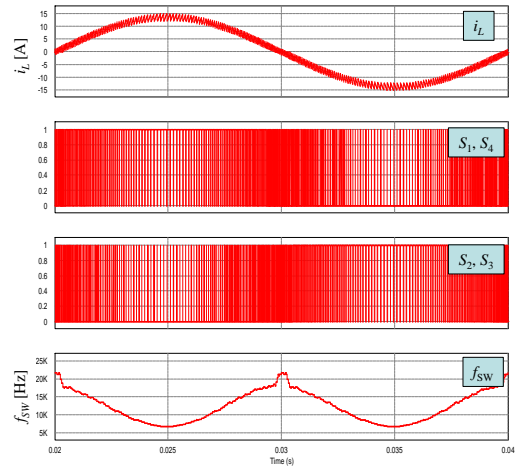


図3 スイッチング周波数理論値

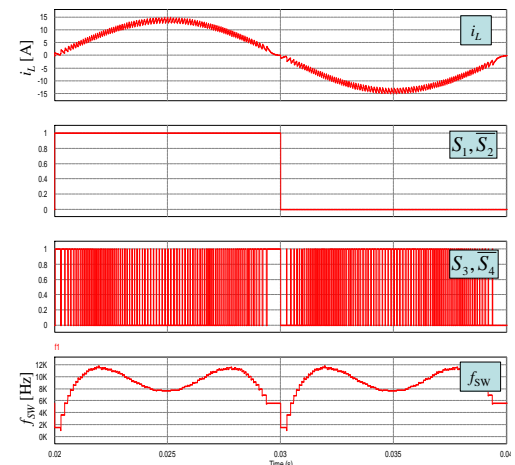
結果を図3に示す。また、その時のパラメータを表1に示す。バイポーラ型はスイッチング周波数が正弦波状に変化しており、スイッチング周波数は基準信号のピーク付近で最低となり、ゼロクロス付近で最大となることが確認できる。ユニポーラ型でも基準信号のピーク付近でスイッチング周波数が低くなっているが、バイポーラ型とは異なり基準信号がゼロで更にスイッチング周波数が下がり、ゼロクロス付近ではスイッチング周波数がゼロとなることが確認できる。

#### シミュレーション

ヒステリシス制御のシミュレーション結果を図4に示す。上から順にインダクタ電流  $i_L$ 、スイッチング波形、スイッチング周波数を表している。この時使用したパラメータは理論計算と同じ値を使用し、デッドタイムは  $4\mu s$  とした。この結果からバイポーラ型、ユニポーラ型共に理論計算と同じ傾向が見られる。異なる点はユニポーラ型において、理論値では電流のゼロクロス付近でスイッチング周波数がゼロとなっていたが、シミュレーションでは2kHzであり、ゼロまで下がっていない。理論計算ではその時点の回路状態がそのまま継続するという前提でスイッチング周波数を計算している。そのため、周波数ゼロということは周期無限大の状態が無限に続くことを前提としている。しかし、現



(a)



(b)

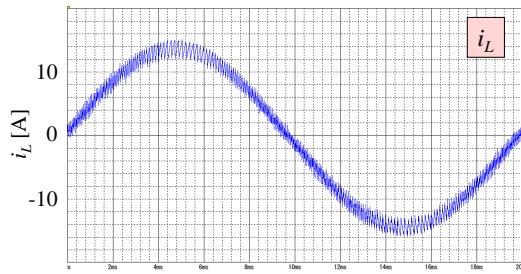
図4 シミュレーション

実は起こりえないため電流の変化によって次の動作モードに切り替わることになる。  
実験結果

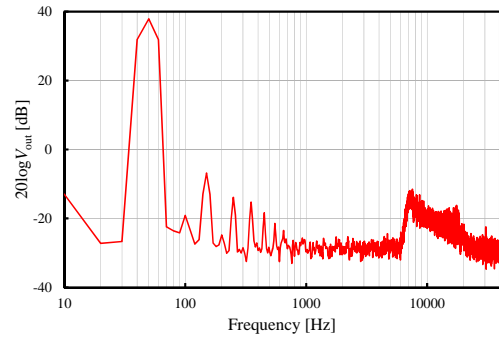
図5, 6 にバイポーラ型とユニポーラ型の実験結果を示す。(a)はインダクタ電流  $i_L$ 、(b)は出力電圧  $V_{out}$  のFFT解析結果である。 $i_L$ の波形からバイポーラ型、ユニポーラ型共にシミュレーションと同様の結果が得られ、正常に動作していることが確認できる。FFT解析結果からはバイポーラ型とユニポーラ型のスイッチング周波数成分はそれぞれ6-20kHz, 2-12kHzの成分が現れていることが確認できる。この結果から、ユニポーラ型はバイポーラ型と比べスイッチング周波数を低下させるためスイッチング損失を低減できると考えられる。

#### 損失計算

インバータを構成するスイッチング素子による損失は制御方式によって異なる。そこで、ヒステリシス制御の優位性を示すため、

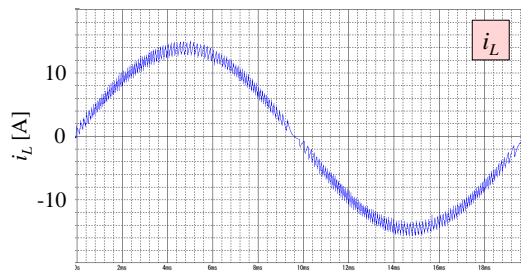


(a)

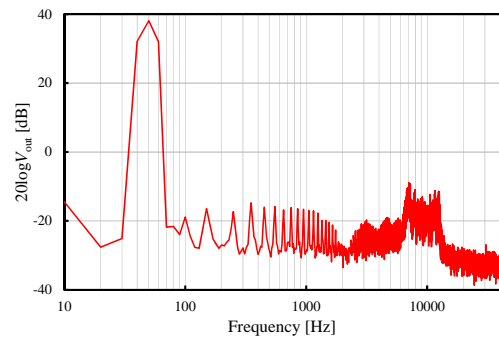


(b)

図5 バイポーラ型実験結果



(a)



(b)

図6 ユニポーラ型実験結果

系統連系運転を想定したヒステリシス電流制御単相インバータのバイポーラ型及びユニポーラ型での損失解析を行った。解析時のパラメータを表 2、インバータ損失の解析結果を図 7 に示す。バイポーラ型とユニポーラ型を比較するとユニポーラ型の方がスイッチング損失が小さくなっている。これはユニポーラ型の平均スイッチング周波数がバイポーラ型と比較して低くなるためである。そのため、ユニポーラ型の方がバイポーラ型よりも高効率である。

表 2 損失測定パラメータ

$V_{dc}$	180 [V]	$V_x$	141 [V]	$I_{ref}$	14.1 [A]
$I_{RRM}$	3.5 [A]	$I_{HBb}$	1 [A]	$I_{HBu}$	0.89 [A]
$\Delta T_{on}$	300 [ns]	$\Delta T_{off}$	600 [ns]	$t_{rr}$	100 [ns]
$V_{SD}$	2.4 [V]				

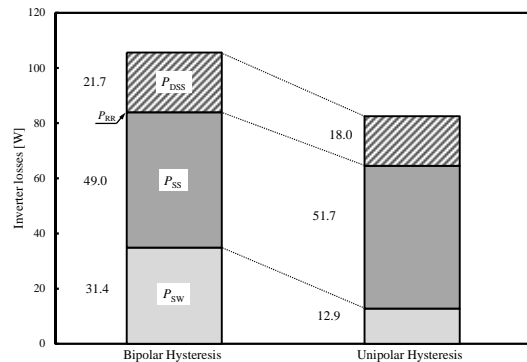


図7 インバータ損失

### 効率測定

ヒステリシス制御の効率の理論解析を検証するために実験を行った。実験においては三角波比較法との効率比較も行う。図 8, 9 にヒステリシス制御と三角波比較法の実験回路をそれぞれ示す。今回は実験装置の都合上抵抗負荷とし、連系動作に近づけるため出力にキャパシタを接続した。表 3 に実験パラメータを示す。三角波比較法においては PI 制御器による電流フィードバック制御を行っているが、偏差が出るため電流指令と実電流の基本波は完全には一致しない。そこで、ヒステリシス制御と同じ基本波振幅となるように電流指令を調整している。また、三角波比較法のスイッチング周波数はヒステリシス制御と抵抗の電圧 THD が同一となるように設定した。実験による効率の測定値を表 4 に示す。理論値と測定値で同様の傾向が得られ、バイポーラ型とユニポーラ型を比較するとユニポーラ型のほうが高効率であり、またその中でもヒステリシス制御が最も高効率である事が確認できる。

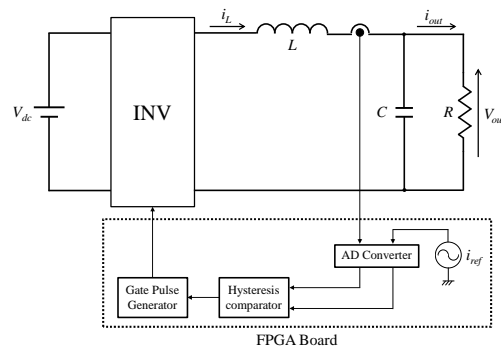


図8 ヒステリシス制御実験回路



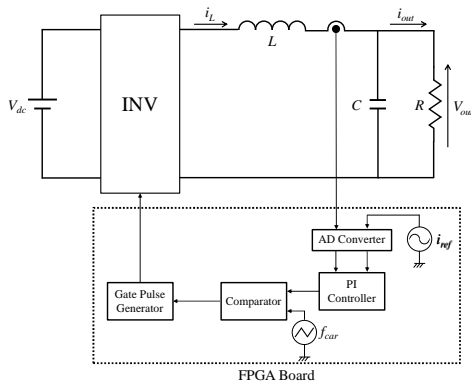


図9 三角波比較法実験回路

表3 実験パラメータ

$V_{dc}$	180 [V]	$L$	2 [mH]	$C$	3 [μF]	$R$	10 [Ω]
$I_{HBb}$	1 [A]	$I_{HBu}$	0.89 [A]	$K$	8.8	$T$	0.256 [ms]
Rating	1 [kVA] (100 [V], 10 [A])						

表4 インバータ効率

Control Method	Hysteresis Control		Triangular method	
	Bipolar	Unipolar	Bipolar	Unipolar
Efficiency [%]	87.7	90.8	86.9	87.9

(2) ハイブリッドフィルタによる歪み低減  
自立運転時における電圧制御インバータへの適用

自立運転時におけるハイブリッドフィルタ付きヒステリシス制御インバータを図10に示す。この回路ではLに流れる電流にヒステリシス制御を適用しており、またLCフィルタによる共振を防ぐためにキャパシタ電圧  $V_C$  を状態フィードバックしている。本回路に適用するハイブリッドフィルタはLCフィルタとリニアアンプを用いたアクティブフィルタで構成される。リニアアンプはフィルタ特性を改善するためフィルタキャパシタと直列に接続し、スイッチング周波数でフィルタキャパシタを増加させるように動作することで低歪な出力波形を得ること可能である。リニアアンプはLCフィルタで取りきれない歪みを補償するため、小容量なりニアアンプで低歪みな出力が実現可能である。また、リニアアンプは回路の状態により運転を切り替えることが可能なため、自立運転と連系運転でフィルタ特性の切り替えを実現できる。

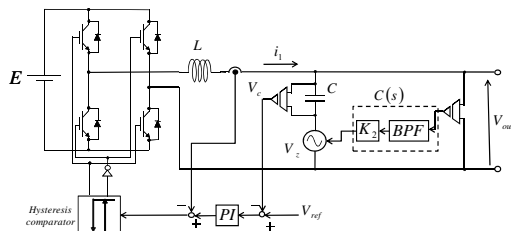


図10 自立運転時の提案回路

図11にハイブリッドフィルタなしの場合とありの場合の実験結果を示す。実験では、リニアアンプとしてパワーオペアンプであ

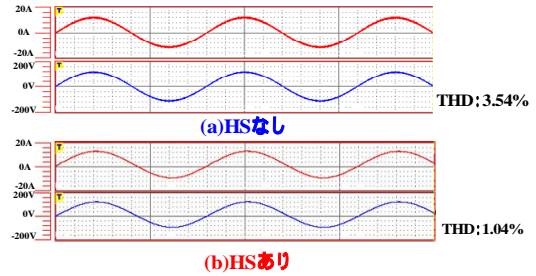


図11 実験結果

るPA12Aを用い、制御回路はヒステリシス制御も含めてFPGAによるデジタル制御で構成した。出力電圧のTHDはハイブリッドフィルタなしの場合が3.54%であるのに対してハイブリッドフィルタありの場合は1.04%と2%以上の低減効果が得られた。以上からハイブリッドフィルタ付きヒステリシス制御インバータの有効性が確認できた。

系統連系運転時における共振現象の抑制

ヒステリシス電流制御を用いた単相系統連系インバータの回路を図12に示す。本回路は出力にLCLフィルタを接続しており、インバータ出力インダクタンス  $L_1$  にヒステリシス制御を適用している。フィルタキャパシタにはハイブリッドフィルタを構成する小容量リニアアンプが直列に接続されている。表に示す定数を用いると、スイッチング周波数は概ね13~24kHzの間で変化する。図13にハイブリッドフィルタなしの場合の出力電流波形、図14にハイブリッドフィルタありの場合の出力電流波形を示す。図13の場合、連系リアクトル  $L_2$  とフィルタキャパシタ  $C$  の共振周波数が7.8kHzとスイッチング周波数の下限と近いことにより共振による波形歪みを生じている。図14ではハイブリッドフィルタを用いることで、 $L_2$  と  $C$  の共振周波数近辺のみでダンピング効果が現れるように、中心周波数7.8kHz、バンド幅60Hz、減衰係数0.7の二次のバンドパスフィルタを通して電流を検出して7.8kHz近辺で10の抵抗となるように運転している。ハイブリッドフィルタを運転した場合、共振が大幅に抑制されて出力電流歪みが低減されている。出力電流のTHDはハイブリッドフィルタなしの場合4.74%、ハイブリッドフィルタを運転した場合1.82%であった。この結果から、LCLフィルタ付き系統連系インバータにヒステリシス電流制御を適用した場合に出力フィルタの共振により歪みが発生することを確認し、

表5 パラメータ

$V_{dc}$	200 [V]	$I_{ref}$	10 [A]
$V_S$	100 [V]	$L_1$	2 [mH]
$L_2$	0.1 [mH]	$C$	2.6 [μF]
$P$	10	$\delta$	0.468 [deg]
BPF	Center Frequency	7.8 [kHz]	
	Band width	60 [Hz]	
Rating	1 [kW], 100 [V]		

ハイブリッドフィルタを適用することで歪みが低減されることを確認した。

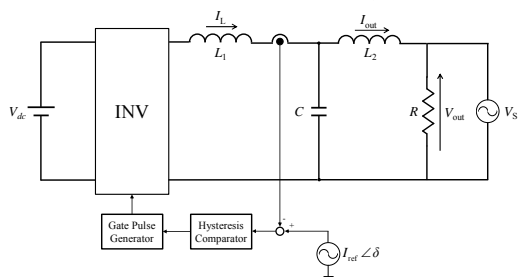
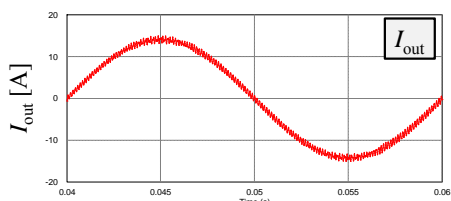
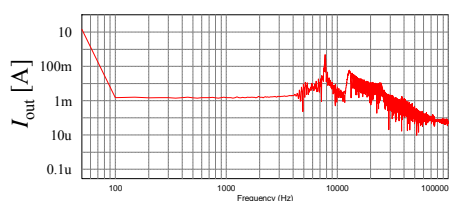


図 12 ヒステリシス電流制御を適用した単相系統連系インバータ

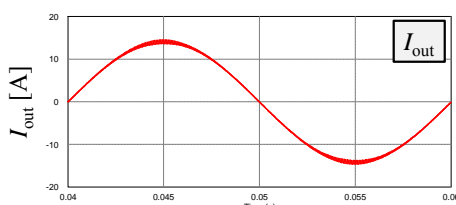


(a)

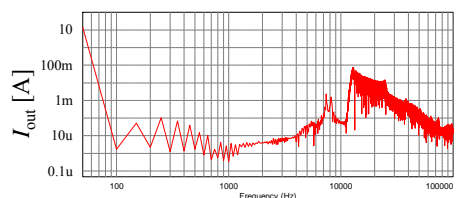


(b)

図 13 ハイブリッドフィルタなし



(a)



(b)

図 14 ハイブリッドフィルタあり

## 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 0件)

[学会発表](計 6件)

増淵展大, 船渡寛人:「LCL フィルタ付きヒステリシス制御を用いた単相系統連系インバータの歪み低減」, 平成 26 年電気学会全国大会, 4-144, vol.4, p.243, (2014.3) 松山市愛媛大学

増淵展大, 船渡寛人:「ヒステリシス電流制御を適用した単相インバータの効率の検討」, 電気学会半導体電力変換研究会, SPC-14-005, (2014.1) 神戸大学

増淵展大, 船渡寛人, 市川亮太:「ハイブリッドフィルタ付きヒステリシス制御インバータの電圧制御実験検証」, 平成 25 年電気学会産業応用部門大会, Y-35, p.Y-35, (2013.8) 山口大学、山口市

Ryota Ichikawa and Hirohito Funato, “Single Phase Utility Interface Inverter Based on Digital Hysteresis Current Controller - Operational Characteristics Both Grid-Connected Mode and Islanding Mode”, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition -ECCE Europe (EPE-PEMC 2012), pp.LS8b.3-1 - LS8b.3-8, in Novi Sad, Serbia (2012.9)

Ryota Ichikawa, Kenji Nemoto and Hirohito Funato, “An Experimental Verification of Single Phase Utility Interface Inverter Based on Digital Hysteresis Current Controller,” The 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2011), On CD-ROM, Paper No. PE-12, 6pages, in Beijing, China (2011.8)

市川亮太, 根本健司, 船渡寛人:「デジタルヒステリシス制御を用いた LCL フィルタ付単相系統連系インバータの動作特性」, 電気学会半導体電力変換研究会, SPC-11-109, pp.19-24 (2011.6)

[図書](計 0件)

[産業財産権]  
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]  
なし。

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

船渡 寛人 (FUNATO, Hirohito)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60272217