

分散型電源の受動性に基づく目標値追従および系統連系制御手法

—瞬時電圧低下の耐性について—

学生員 南 政孝^{*a)} 正員 引原 隆士*

Tracking and Linkage Control Methods of Distributed Generation Based on Passivity Characteristics: Tolerance to Voltage Sag

Masataka Minami^{*a)}, Student Member, Takashi Hikihara*, Member

(2012年8月9日受付, 2013年2月14日再受付)

This paper investigates tracking and linkage control methods between distributed generations and power system networks based on passivity characteristics. The proposed tracking control method focuses on the energy stored in inductors and capacitors in the operating system. In addition, the proposed linkage control method maintains the phase synchronization of distributed generations. It is numerically and experimentally clarified that the proposed control methods achieve tracking targeted states and stable linkage with the power system networks at an abrupt voltage sag.

キーワード: 受動性, 位相同期方式, 分散型電源, エネルギー, 瞬時電圧低下

Keywords: passivity characteristics, phase synchronization, distributed generation, energy, voltage sag

1. はじめに

近年, 太陽光や風力などの自然エネルギーが再生可能エネルギーとして注目されて, それらをエネルギー源とする電源が分散型電源として研究されている⁽¹⁾。しかし一方で, これらの自然エネルギー源のみを用いた分散型電源は, 天候, 気温, 風力などの気象条件により出力が大きく変動することが懸念される。そこで, これらの分散型電源の多くは, 出力を平準化するための蓄電装置を併設し, 連系する配電系統からは定電圧, 定出力の電源に見做せるような制御が求められている。さて, 分散型電源が系統連系するシステムは, 出力を調整するコンバータや蓄電装置の充放電を調整する双方向 DC-DC コンバータ, 系統連系のためのインバータなどから構成される。そのため, 結合された変換回路の制御を各変換回路個別の方式の統合により構築することは複雑になるばかりか, 各変換回路の優位な特性を活かすことが難しい。また, 今後これらのシステムが並列化して大容量化する議論が進められることを考慮したとき,

並列化に適した制御方式の確立が重要になる。

本研究は以上の観点から, 複数の変換回路が結合したシステムにおいて, エネルギーに関する概念である受動性⁽²⁾に基づく制御を用いて目標値追従を検討するものである。受動性を利用した制御は有本氏ら⁽³⁾によって提案された。有本氏らはこの制御手法により, エネルギーに散逸を与える方向に制御入力を加え, ロボットアームの目標値追従を達成している。さらにこの制御手法は, 機械系に留まらず, DC-DC コンバータにおいて同様の制御が可能であることが, Sira-Ramírez 氏らによって示された⁽⁴⁾。その後, Ortega 氏らによって一般化された⁽⁵⁾。著者らのグループは, Čuk コンバータが並列接続した回路⁽⁶⁾及びバックコンバータの並列回路とインバータを接続した回路⁽⁷⁾において, 同様の考え方で受動性を満たすシステムが構成できることを示した。さらに著者らは上述の結果に基づき, 本論文で対象とするブーストコンバータとインバータを接続した回路において, 受動性に基づく制御とインバータの系統連系のための位相同期方式⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾を適用して, その有効性および位相急変に対する耐性を検証した⁽¹¹⁾。

本論文は上述の続報であり, 連系する配電系統の瞬時的な電圧振幅の低下及びその回復に対しても, 目標値追従動作が実現可能であり, さらに系統連系が継続可能であることを数値的及び実験的に示す。

a) Correspondence to: Masataka Minami. E-mail: minami@dove.kuee.kyoto-u.ac.jp

* 京都大学大学院 工学研究科 電気工学専攻
〒615-8510 京都市西京区京都大学桂
Department of Electrical Engineering, Kyoto University
Kyoto Daigaku Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8510, Japan

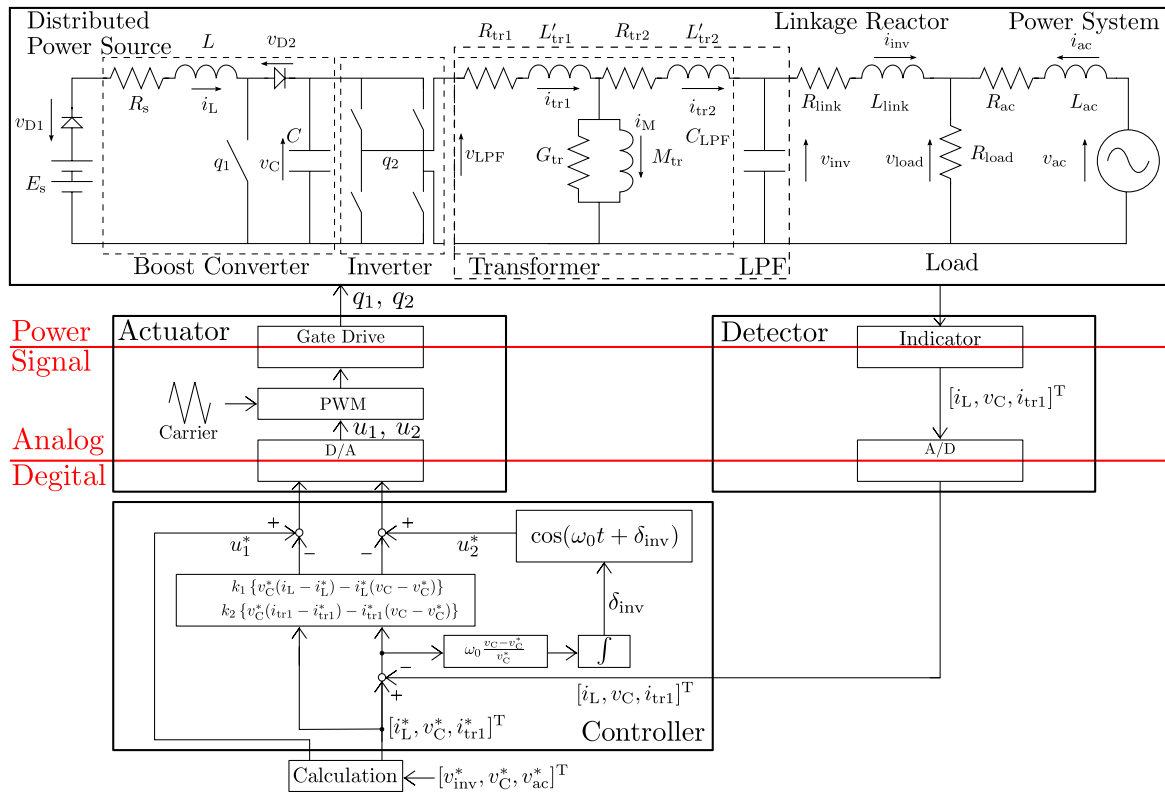


Fig. 1. Configuration of a distributed power system and its block diagram.

2. 分散型電源系統連系システムにおける制御

本章では、まずブーストコンバータとインバータを含むシステムを説明する。次に目標値追従のための受動性に基づく制御と系統連系のための位相同期方式について述べる。

〈2・1〉 対象とする回路 本節では、対象とする回路について説明する。一般家庭に分散型電源が接続することを想定する。つまり、一般電気工作物の需要内に分散型電源が接続するものとする。そのため、配電は 100 V 単相 3 線式の低圧配電システムを考える。Fig. 1 に配電システムに連系する分散型電源の構成と後述する制御系を含んだブロック線図を示す。分散型電源として太陽光発電を想定しているが、本論文では目標値追従と系統連系に注目しているため、理想的な直流電源 E_s で模擬する。分散型電源の後段にブーストコンバータを接続して、商用電源の電圧振幅値に相当する 141 V に昇圧後、インバータによって配電システムと連系する。ここで実システム同様、インバータの後段に絶縁トランスを接続して、直流成分を除去する。図中では、このトランスを T 型の等価回路で表現している。さらにそのトランスと並列にキャパシタ C_{LPF} を挿入し、ローパスフィルタとする⁽¹²⁾。このローパスフィルタは、インバータのスイッチング周波数成分を除去するように定数設定する。このインバータの出力はさらに、限流リアクトル L_{link} を介して、負荷と接続される。この限流リアクトルは、負荷側の電流急変への電源保護の機能を有す。また配電システムは理想的な

交流電圧源 v_{ac} とし、配電線は R_{ac}, L_{ac} で与える。Fig. 1 中の各内部抵抗は、後述する実験システムにおいて事前に実測により考慮する必要があるものを示している。そして、以下にインダクタおよびキャパシタによる微分方程式を示す。それぞれの変数と符号は Fig. 1 に従う。

$$\left\{ \begin{aligned}
 L \frac{di_L}{dt} &= E_s - v_{D1} - (1 - q_1)(v_C + v_{D2}) - R_s i_L \\
 C \frac{dv_C}{dt} &= (1 - q_1)i_L - q_2 i_{tr1} \\
 L'_{tr1} \frac{di_{tr1}}{dt} &= q_2 v_C - \frac{i_{tr1} - i_{tr2} - i_M}{G_{tr}} - R_{tr1} i_{tr1} \\
 M_{tr} \frac{di_M}{dt} &= \frac{i_{tr1} - i_{tr2} - i_M}{G_{tr}} \\
 L'_{tr2} \frac{di_{tr2}}{dt} &= \frac{i_{tr1} - i_{tr2} - i_M}{G_{tr}} - v_{inv} - R_{tr2} i_{tr2} \\
 C_{LPF} \frac{dv_{inv}}{dt} &= i_{tr2} - i_{inv} \\
 L_{link} \frac{di_{inv}}{dt} &= v_{inv} - R_{load}(i_{ac} + i_{inv}) - R_{link} i_{inv} \\
 L_{ac} \frac{di_{ac}}{dt} &= v_{ac} - R_{load}(i_{ac} + i_{inv}) - R_{ac} i_{ac} \\
 &\dots\dots\dots (1)
 \end{aligned} \right.$$

ここで、 q_1, q_2 は、ブーストコンバータ及びインバータのスイッチング関数⁽¹³⁾であり、それぞれ $q_1 \in \{0, 1\}, q_2 \in \{-1, 1\}$ とする。このスイッチング関数は後述の参照値 u_1, u_2 と周波数 f_1, f_2 の三角波との比較による PWM⁽¹⁴⁾により決定する。

(2・2) 目標値追従のための受動性に基づく制御 本節では、目標値追従のための受動性に基づく制御について説明する。そのためにまず、Fig. 1 が受動性を満たすことを示す。その上で、受動性に基づく制御について説明する。

Fig. 1 のインダクタ及びキャパシタに蓄積されているエネルギーの全体を H とし、以下に定義する。

$$H := \frac{1}{2} \left\{ L i_L^2 + C v_C^2 + L'_{tr1} i_{tr1}^2 + M_{tr} i_M^2 + L'_{tr2} i_{tr2}^2 + C_{LPF} v_{inv}^2 + L_{link} i_{inv}^2 + L_{ac} i_{ac}^2 \right\} \dots \dots \dots (2)$$

次にこのエネルギーの時間変化を考える。Eq. (2) を時間微分し、Eq. (1) を用いて変形すると以下の形になる。

$$\begin{aligned} \frac{dH(t)}{dt} = & E_s i_L + v_{ac} i_{ac} \\ & - (1 - q_1) v_{D2} i_L - (i_{tr1} - i_{tr2} - i_M)^2 / G_{tr} \\ & - v_{D1} i_L - R_s i_L^2 - R_{tr1} i_{tr1}^2 - R_{tr2} i_{tr2}^2 \\ & - R_{link} i_{inv}^2 - R_{load} (i_{inv} + i_{ac})^2 - R_{ac} i_{ac}^2 \\ & \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

この式の右辺 1 行目 ($E_s i_L + v_{ac} i_{ac}$) は、分散型電源と配電系統から供給されるパワーである。2~4 行目は損失分のパワーで、常に負となる。以上より次のエネルギーの関係が成立する。

$$H(t) - H(t_0) = \int_{t_0}^t \frac{dH(\tau)}{d\tau} d\tau \leq W(t_0, t) \dots \dots \dots (4)$$

$$W(t_0, t) = \int_{t_0}^t \left\{ E_s i_L + v_{ac} i_{ac} \right\} d\tau \dots \dots \dots (5)$$

これは、受動性が成り立つことを示している。ここで、受動性の関係を示す不等式にはスイッチング関数 q_1, q_2 が含まれていない。つまりこの不等式は、任意のスイッチングに対して受動性が成り立つことを意味している。

次に受動性に基づく制御について説明する。受動性に基づく追従制御は、目標となる値と状態との偏差エネルギーを常に減少させるように入力を与え、目標値への状態の追従を達成するものである。目標値は、ブーストコンバータの出力電圧 v_C 及びインバータの出力電圧 v_{inv} を予め定め、他の状態変数の目標値を導出する。以降では、上付き添字 * の変数を目標値とする。次に、それぞれの目標値からの偏差エネルギー H_e を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} H_e := & \frac{1}{2} \left\{ L (i_L - i_L^*)^2 + C (v_C - v_C^*)^2 + M_{tr} (i_M - i_M^*)^2 \right. \\ & + L'_{tr1} (i_{tr1} - i_{tr1}^*)^2 + L'_{tr2} (i_{tr2} - i_{tr2}^*)^2 \\ & + C_{LPF} (v_{inv} - v_{inv}^*)^2 + L_{link} (i_{inv} - i_{inv}^*)^2 \\ & \left. + L_{ac} (i_{ac} - i_{ac}^*)^2 \right\} \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

ここで、この偏差エネルギー H_e を Eq. (1) におけるインダクタ及びキャパシタに蓄積されているエネルギーと同様の形式で書き表している。

この偏差エネルギー H_e の時間微分を常に負になるように制御則を決定することで、 H_e を 0 に収束させる。 H_e が 0 になるとき、目標値への追従が達成される。そこで、文献⁽¹¹⁾に従い、この偏差エネルギー H_e の時間微分から制御則を以下のように与える。制御ゲイン $k_1 > 0, k_2 > 0$ とする。

$$u_1 = u_1^* - k_1 \left\{ v_C^* (i_L - i_L^*) - i_L^* (v_C - v_C^*) \right\} \dots \dots \dots (7)$$

$$u_2 = u_2^* - k_2 \left\{ v_C^* (i_{tr1} - i_{tr1}^*) - i_{tr1}^* (v_C - v_C^*) \right\} \dots \dots \dots (8)$$

u_1, u_2 はブーストコンバータ及びインバータの PWM に用いる参照値である。この制御則によって、偏差エネルギー H_e の時間微分が常に負となる。

(2・3) 系統連系のための位相同期方式 次に、配電系統に連系するためのインバータの位相同期方式を述べる。

まず、既存のインバータにおける系統連系について述べる。インバータは、外部から検出した系統電圧、位相、周波数などの情報によって系統連系を行っている⁽¹⁴⁾。一般的には、配電系統側の負荷やシステム構成によらず、インバータの力率を 1 に維持して⁽¹²⁾、最大有効電力をインバータから出力するように位相を決定している。この方式によって多数の分散型電源が系統連系する際、系統へ有効電力のみが多く出力されてしまう。

一方で同期発電機は、既存のインバータと異なる動作により系統連系を行っている。同期発電機は、回転運動の慣性によって入出力の調整を行っている。そのため、配電系統側のシステム構成と機械的入力に合わせて自律的に位相を決定している⁽¹⁵⁾。同期発電機はこのような特性を有しているので、多数の同期発電機が系統連系した場合にも、その新しいシステム構成に合わせて系統連系が可能である。

これらのことから、同期発電機を持つインバータを開発することは、現状の電力系統では多数の分散型電源を系統に連系するために有効な特性となる。原田氏は、インバータの電圧によって位相を決定するインバータを提案した⁽⁸⁾。さらに、著者らのグループでは、この概念を基にした位相同期方式について検討している⁽¹⁰⁾。また、同期発電機を持つインバータとして、仮想同期発電機モデルを用いる方式⁽¹⁶⁾について検討した報告がある。

本論文では、文献⁽¹⁰⁾で提案されている位相同期方式を用いてインバータの位相 δ_{inv} を決定する。その位相同期方式の支配方程式は次式となる。

$$\frac{d\delta_{inv}}{dt} = \omega_0 \frac{v_C - v_C^*}{v_C^*} =: \omega_{inv} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 v_C^* は、インバータ入力側のキャパシタ電圧 v_C の目標値であり、 ω_0 は系統の基準角周波数 (377 rad/s) である。また、インバータの位相 δ_{inv} の時間微分を ω_{inv} とおく。

この位相同期方式の動作について説明する。位相が定常状態の値から増加 (減少) してしまった場合には、インバータの出力電力が増加 (減少) する。これは、Eq. (1) における v_C の微分方程式の $q_2 i_{tr1}$ の項が増加 (減少) することに対応する。その結果、この微分方程式に従って v_C が減少 (増

Table 1. Values of parameters in Fig. 1.

E_s	55.2 V	R_s	2.5 Ω	L	25 mH
C	10 mF	$R_{tr1} = R_{tr2}$	1.66 Ω	G_{tr}	460 μ S
M_{tr}	660 mH	$L'_{tr1} = L'_{tr2}$	0.88 mH	C_{LPF}	10 μ F
R_{link}	72.8 m Ω	L_{link}	87 mH	R_{load}	144.5 Ω
R_{ac}	25.0 Ω	L_{ac}	87 mH	I_0	700 nA
f_1	18 kHz	f_2	6 kHz	nv_T	0.05 V

加)する。 v_C の減少(増加)に伴い,上記の位相同期方式によって位相が減少(増加)する動作を示す。この一連の動作によって,インバータの位相は,出力側のシステム構成に合わせて自律的に値が決まり収束する。すなわち,位相同期を達成して系統連系を達成する。このEq.(9)の位相同期方式を用いることによって,インバータは同期発電機のように振る舞う⁽¹⁰⁾。以降では,前項のEq.(1)にEq.(9)を加えた系を考察の対象とする。

3. 数値的検討

本章では,まず系統連系点の電圧 v_{ac} における振幅が低下及び回復する瞬時電圧低下について述べる。そして,この擾乱が発生した場合の過渡動作を数値的に検討する。

(3・1) 瞬時電圧低下 本節では,擾乱として検討対象とする瞬時電圧低下について説明する。落雷により地絡事故が発生した場合,その異常除去までに数十msから2s以下程度の時間を要する。その際に,電圧が一時的に低下する現象が瞬時電圧低下である^{(17)~(19)}。瞬時電圧低下の影響を防止するためには,需要家側での対策が合理的である⁽¹⁹⁾ことから,対策装置の提案及び開発が進められている^{(20)~(23)}。特に,分散型電源の系統連系に向けて,瞬時電圧低下が分散型電源連系システムに与える影響についての研究が進められている⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾。瞬時電圧低下の規模は,電圧低下率と継続時間によって決まる^{(17)~(19)}。現在使用されているパワーコンディショナーでは,FRT(Fault Ride Through)要件と比較すると,要件を満足するものがないことが指摘されている⁽²⁵⁾。そこで本数値実験では,FRT要件を参考に瞬時電圧低下を設定する。定常状態から $t = 0.1$ s時に電圧振幅が50%または10%に低下し,約1s後に回復する瞬時電圧低下を検討対象とする。

(3・2) 数値計算条件 本節では,数値計算の条件を与える。本数値計算では,ブーストコンバータ及びインバータのスイッチは理想スイッチとする。つまり,スイッチング関数 q_1, q_2 は瞬間的に切り替わり,スイッチング素子における損失が発生しないとする。次にダイオードの端子間電圧 v_{D1}, v_{D2} は,ダイオードの特性 $i = I_0(\exp(v/nv_T) - 1)$ の逆関数を用いて,電流の関数 $v(i(t))$ として与える。さらに,各パラメータの実値はTable 1に示す。配電線 R_{ac}, L_{ac} は文献⁽²⁶⁾の設定条件を参考に定める。また,文献⁽¹¹⁾では,配電系統電圧 v_{ac} の位相 δ_{ac} が急変するという擾乱に対し

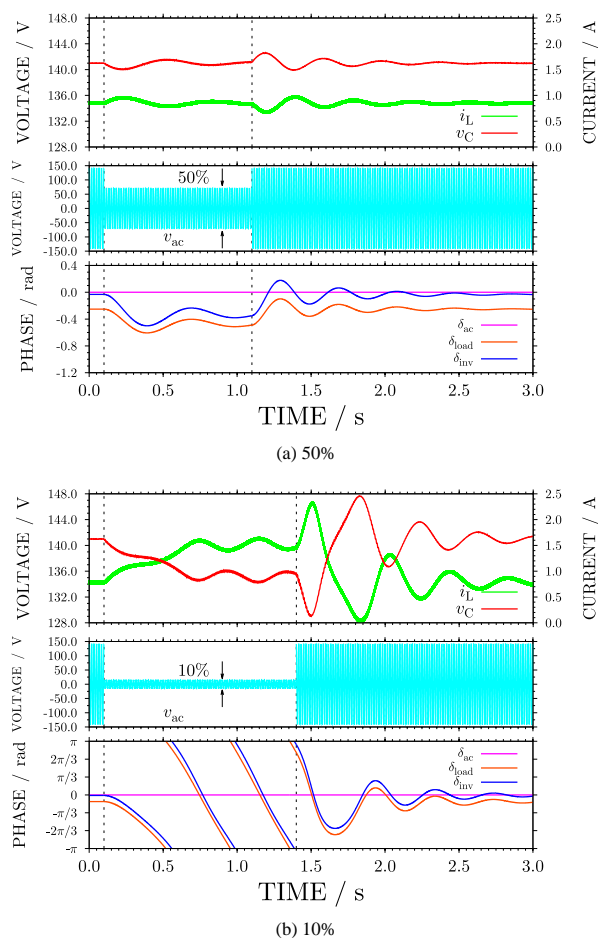
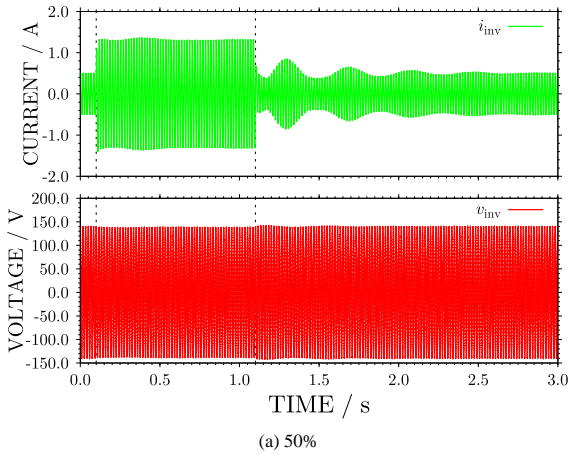


Fig. 2. Transient behaviors of the inductor current i_L , the capacitor voltage v_C , the power system network voltage v_{ac} , and the phases δ_{ac} , δ_{load} , and δ_{inv} at (a) 50% and (b) 10% in numerical calculations.

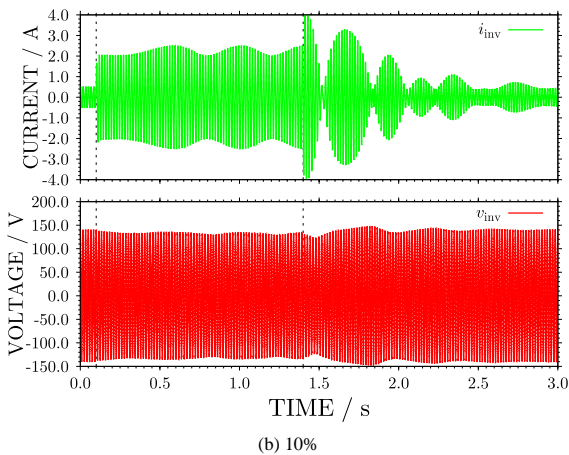
て,過渡挙動を検討し,適切な制御ゲインの値を決定する指針を得た。その結果から, $k_1 = 0.005, k_2 = 0.001$ と設定する。数値計算は全てC言語によるプログラム及びコンパイラGNU Compiler Collection (GCC)を用いて行っている。

(3・3) 数値計算結果 Fig. 2, Fig. 3に数値計算による各状態変数の挙動を示し, Fig. 4はFig. 2の結果を $(\delta_{inv}, \omega_{inv})$ 断面に表示したものである。

Fig. 2, Fig. 3に示す通り, $t = 0.1$ 直後に連系点の電圧振幅が低下し,配電系統側からの電力供給が減少する場合を考える。このとき,分散型電源側から電力の不足分を供給するために,インバータの出力電流 i_{inv} が増加する。このときキャパシタ電圧 v_C が減少し,キャパシタに蓄積されているエネルギーを消費していることがわかる。その結果,Eq.(9)に従い,位相 δ_{inv} が減少する。Fig. 2(a)では,位相 δ_{inv} が -0.4 rad付近で振動が収まり,電流 i_L ,電圧 v_C も元の定常状態と同じ値に収束している。この結果から,瞬時電圧低下時にも電流,電圧が目標値に追従することがわかる。またこのとき,負荷と連系点電圧の位相差 $\delta_{ac} - \delta_{load}$ は元の定常状態よりも増加し,配電系統から負荷へ供給する電力が増加している。一方,インバータと負荷の位相差



(a) 50%



(b) 10%

Fig. 3. Transient behaviors of the inverter voltage v_{inv} and the inverter current i_{inv} at (a) 50% and (b) 10% in numerical calculations.

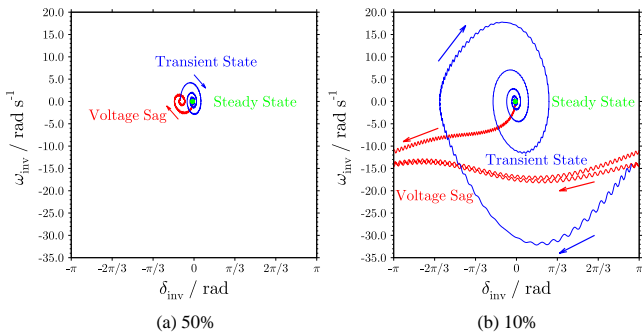


Fig. 4. Transient behaviors of the phase δ_{inv} and its derivation ω_{inv} at (a) 50% and (b) 10% in numerical calculations. The green, red, and blue lines respectively denote steady state, voltage sag, and transient state.

$\delta_{inv} - \delta_{load}$ は、元の定常状態と変化していない。すなわちこの動作により、インバータは出力電力を変えず系統連系を維持している。これは、Eq. (9) によってインバータが同期発電機と同じ振る舞いを実現していることを意味する。瞬時電圧低下回復後、再び位相が元の値に収束していることが確認できる。Fig. 4(a) においても、位相 δ_{inv} とその時間微分 ω_{inv} の変化の様子が確認できる。さらに Fig. 2(a) の結果から、位相 δ_{inv} が 2 s 程度で収束している。同期発電機の

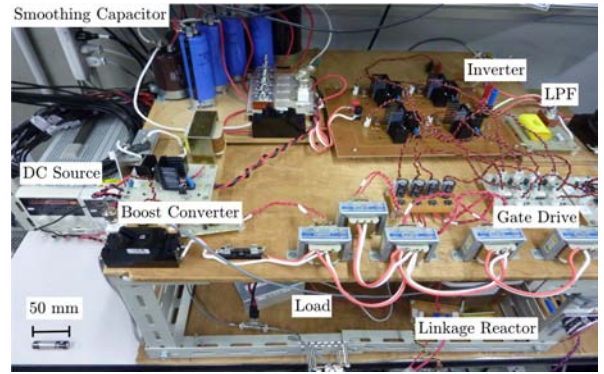


Fig. 5. Experimental system.

機械的な振動による位相の変動は数 s 程度の挙動を示す⁽²⁷⁾。Eq. (9) を用いた設定は、振動時間の観点からも同期発電機の特徴を持つインバータであることがわかる。

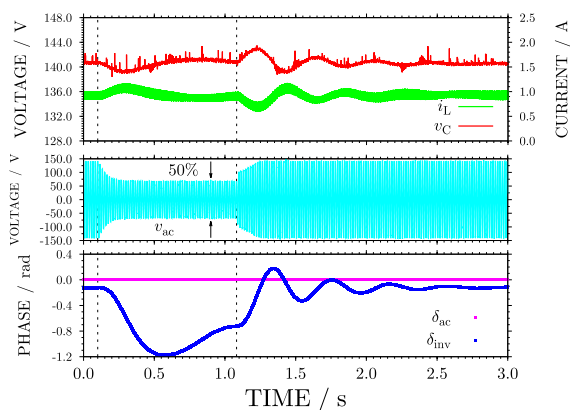
一方、Fig. 2(b) では、瞬時電圧低下時は電圧の減少に伴い、位相が収束せずに減少し続けている。これは、同期発電機の脱調のアナロジーで説明できる。瞬時電圧低下時に配電系統の連系点電圧に合わせた電力調整が可能な位相 δ_{inv} が定まらないことを表している。しかしながら、本システムは瞬時電圧低下回復後に電流、電圧の目標値への追従及び位相同期方式による配電系統への連系を再び達成している。

さて、Fig. 4(b) において、解の軌跡が上下に小刻みに振動している。これは、電圧 v_C の微分方程式に $q_2 i_{tr1}$ の項が含まれていることに起因する。 q_2 と i_{tr1} はそれぞれ 60 Hz の主成分を持っており、その積は一定値と 120 Hz の和になる。よって、この 120 Hz の振動成分が現れたものと考えられる。実際、Fig. 2(b) の電圧 v_C の波形を拡大すると 120 Hz で振動していることが確認できる。この振動振幅は 1 V 以下であり充分小さい。高調波に関する議論は次節の実験結果において詳述する。

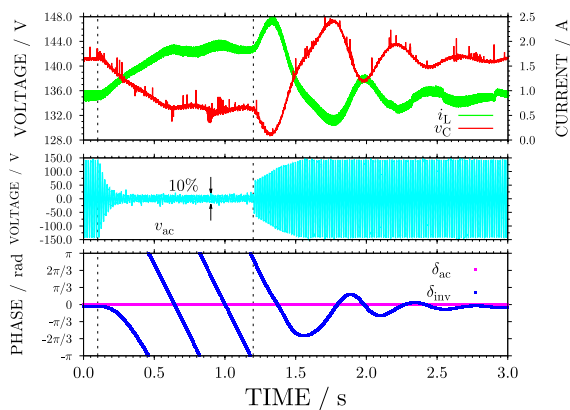
4. 実験的検証

本章では、瞬時電圧低下が発生した場合における動作を実験的に検証する。そのためにまず、製作した実験システムについて説明する。次に各状態変数の過渡動作が数値計算結果と定性的かつ定量的に一致することを示す。

〈4・1〉 実験装置 本論文で用いた実験システムの写真を Fig. 5 に示す。回路構成は、Fig. 1 に示す通りであり、実験条件は前章の数値計算と同じである。ブーストコンバータの半導体スイッチ素子には、SPW47N60C3 (infineon 社製、耐圧 650 V) を使用し、インバータの半導体スイッチ素子は、STW13NK100Z (STMicroelectronics 社製、耐圧 1000 V) を使用している。これらの素子は、本実験に必要な十分な定格を満たしており、各特性は詳細に測定している。計測及び記録はメモリハイコーダ 8841 (日置電機社製、12 チャンネル) を使用した。配電系統の電源としては、電力増幅器 4502 (NF 社製) を用いた。前章の数値計算では、瞬間的に連系点の電圧振幅が切り替わっているが、装置の応

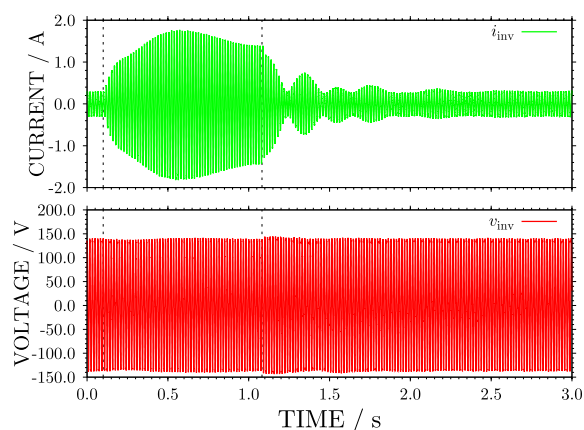


(a) 50%

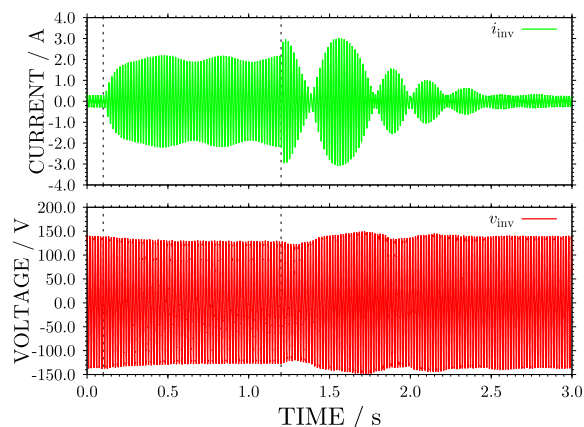


(b) 10%

Fig. 6. Transient behaviors of the inductor current i_L , the capacitor voltage v_C , the power system network voltage v_{ac} , and the phases δ_{ac} and δ_{inv} at (a) 50% and (b) 10% in experimental system.



(a) 50%



(b) 10%

Fig. 7. Transient behaviors of the inverter voltage v_{inv} and the inverter current i_{inv} at (a) 50% and (b) 10% in experimental system.

答速度により 0.5 s 程度の遅れがあった。

〈4・2〉 実験結果 本節では、〈3・3〉節の数値計算結果と対応する実験結果を示す。Fig. 6, Fig. 7 に各状態変数の実測結果を示し、Fig. 8 は Fig. 6 の結果を $(\delta_{inv}, \omega_{inv})$ 断面に表示したものである。これらの結果において、電流と電圧の振動の傾向が数値計算結果と定性的に一致する。さらに、振動波形の周波数が 7.5% 以下の範囲で一致し、振動のピーク値が 1 V および 0.3 A 以内で一致する。以上より、実験結果が数値計算結果と定性的かつ定量的に一致することが確認できた。さらに、JIS 規格により、インバータ出力電流の高調波を評価する。その結果、各次ひずみ率 3% 以下、総合ひずみ率 3% 以下であったので、十分に条件を満足する。これより、本論文で提案した受動性に基づく制御および位相同期方式が、瞬時電圧低下に十分に耐えうる制御手法であることが実験的にも確認された。

5. おわりに

本論文では、ブーストコンバータ及びインバータを組み合わせた分散型電源の配電系統連系について、瞬時電圧低下時にも、受動性に基づく制御によって目標値への追従を達成し、位相同期方式を用いて系統連系を達成できることを

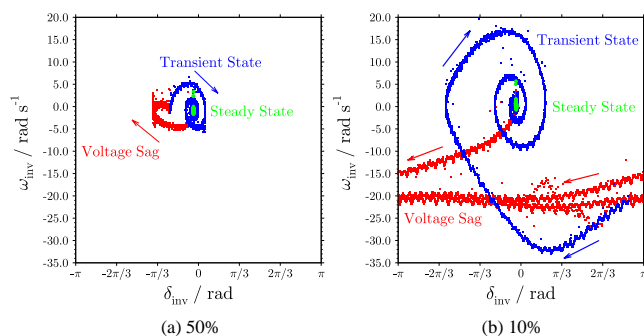


Fig. 8. Transient behaviors of the phase δ_{inv} and its derivation ω_{inv} at (a) 50% and (b) 10% in experimental system. The green, red, and blue lines respectively denote steady state, voltage sag, and transient state.

数値的に検討し、実験的に検証した。これらの結果によって、受動性に基づく制御と位相同期方式が分散型電源を系統連系させる有効な手法となりうることを示された。

謝辞

本研究における本回路の受動性に基づく制御則適用の可能性を数値的に示した京都大学大学院小室正之氏 (平成 20 年修了, 現 JFE スチール (株)) にはこの場を借りて謝意を

表します。また、本研究の一部は情報通信研究機構 (NICT) の委託研究の支援を受けたものであることを記す。

文 献

(1) J.M. Carrasco, L.G. Franquelo, J.T. Bialasiewicz, E. Galván, R.C.P. Guisado, M.Á.M. Prats, J.I. León, and N. Moreno-Alfonso: "Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey", *IEEE Trans. Industr. Electronics*, Vol.53, No.4, pp.1002-1016 (2006-4)

(2) C.A. Desoer and E.S. Kuh: Basic Circuit Theory, chap.19, McGraw-Hill (1969)

(3) M. Takegaki and S. Arimoto: "A new feedback method for dynamic control of manipulators", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control-Transaction of ASME*, Vol.102, No.3, pp.119-125 (1981-3)

(4) H. Sira-Ramírez, R.A. Perez-Moreno, R. Ortega, and M. Garcia-Esteban: "Passivity-based controllers for the stabilization of DC-to-DC power converters", *Automatica*, Vol.33, No.4, pp.499-513 (1997-4)

(5) R. Ortega, A. Loria, P.J. Nicklasson, and H. Sira-Ramírez: Passivity-based control Euler-Lagrange systems, chap.6, 7, Springer (1998)

(6) T. Hikihara and Y. Murakami: "Regulation of parallel converters with respect to stored energy and passivity characteristics", *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E94-A, No.3, pp.1010-1014 (2011-3)

(7) 小室正之・引原隆士:「コンバータ・インバータシステムの受動性に基づく制御に関する検討」, 信学技報 EE, Vol.107, No.330, pp.23-28 (2007-11)

(8) K. Harada and K. Murata: "Interface circuit between solar cell and commercial AC bus", *IEICE Trans. Electron.*, Vol.69-C, No.11, pp.1458-1464 (1986-11) (in Japanese)
原田耕介・村田勝昭:「太陽電池と商用交流電源のインターフェース回路」, 信学論 C, Vol.69, No.11, pp.1458-1464 (1986-11)

(9) T. Ohnishi, M. Furihashi, and K. Kawasaki: "Solar Power Generation System Installed Individually for Local Power Network System", *IEEJ Trans. IA*, Vol.115, No.12, pp.1448-1455 (1995-12) (in Japanese)
大西徳生・古橋昌也・川崎憲介:「分散形個別連系太陽光発電システム」, 電学論 D, Vol.115, No.12, pp.1448-1455 (1995-12)

(10) T. Hikihara, T. Sawada, and T. Funaki: "Enhanced entrainment of synchronous inverters for distributed power sources", *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E90-A, No.11, pp.2516-2525 (2007-11)

(11) M. Minami and T. Hikihara: "A study on linkage control between distributed generation and power system network based on passivity characteristics", *Systems, Control and Information*, Vol.25, No.10, pp.257-265 (2012-10) (in Japanese)
南 政孝・引原隆士:「受動性に基づく分散型電源の配電系統連系制御方式に関する検討」, システム制御情報学会論文誌, Vol.25, No.10, pp.257-265 (2012-10)

(12) F. Blaabjerg, R. Teodoresou, M. Liserre, and A.V. Timbus: "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems", *IEEE Trans. Industr. Electronics*, Vol.53, No.5, pp.1398-1409 (2006-5)

(13) J.G. Kassakian, M.F. Schlecht, and G.C. Verghese: Principles of power electronics, chap.7, 8, 11, Prentice Hall (1991)

(14) D.G. Holmes and T.A. Lipo: Pulse width modulation for power converters, chap.3, 4, IEEE Press (2003)

(15) 野中作太郎:「電気機器 (I)」, pp.270-276, 森北出版 (1973)

(16) J. Driesen and K. Visscher: "Virtual Synchronous Generators", PES GM 2008, IEEE (2008)

(17) M.F. McGranaghan, D.R. Mueller, and M.J. Samotyj: "Voltage sags in industrial systems", *IEEE Trans. Industr. Applications*, Vol.29, No.2, pp.397-403 (1993-2)

(18) IEEE SCC22: IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality, chap.4, IEEE Std 1159-1995 (1995)

(19) K. Sakamoto and M. Abe: "Voltage dip phenomenon", *The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan*, Vol.128, No.9, pp.598-601 (2008-9) (in Japanese)
坂本幸治・阿部 実:「瞬時電圧低下現象」, 電学誌, Vol.128, No.9, pp.598-601 (2008-9)

(20) S.S. Choi, B.H. Li, and D.M. Vilathgamuwa: "Dynamic voltage restoration with minimum energy injection", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.15, No.1, pp.51-57 (2000-1)

(21) Y.Q. Zhan, S.S. Choi, and D.M. Vilathgamuwa: "A voltage sag compensation scheme based on the concept of power quality control center", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.21, No.1, pp.296-304 (2006-1)

(22) E.R. Collins and J. Jiang: "Voltage sags and the response of a synchronous distributed generator: A case study", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.23, No.1, pp.442-448 (2008-1)

(23) B. Han, B. Bae, H. Kim, and S. Baek: "Combined operation of unified power-quality conditioner with distributed generation", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.21, No.1, pp.330-338 (2006-1)

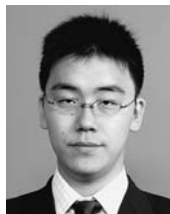
(24) T. Ueda and S. Komami: "Dynamic load stability in bulk power system with high DG penetration", *IEEJ Trans. PE*, Vol.127, No.2, pp.371-378 (2007-2) (in Japanese)
上田智之・駒見慎太郎:「分散型電源大量導入時における動的負荷の安定性解析」, 電学論 B, Vol.127, No.2, pp.371-378 (2007-2)

(25) 小林広武・山下光司:「瞬時電圧低下が太陽光発電と風力発電に与える影響の実験解明」, 電中研報告, No.R10037 (2011-6)

(26) D. Iioka, K. Sakakibara, Y. Yokomizu, T. Matsumura, and N. Izuhara: "Distribution voltage rise at dense photovoltaic power generation area and its suppression by SVC", *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.2, pp.153-158 (2006-2) (in Japanese)
飯岡大輔・榊原邦晃・横水康伸・松村年郎・出原範久:「太陽光発電装置が集中導入された配電系統の電圧上昇と SVC による抑制」, 電学論 B, Vol.126, No.2, pp.153-158 (2006-2)

(27) P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziaargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T.V. Cutsem, and V. Vittal: "Definition and classification of power system stability", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.19, No.2, pp.1387-1401 (2004-2)

南 政 孝 (学生員) 1985 年 11 月 9 日生。2008 年 3 月京都大学工学部電気電子工学科卒業。2010 年 3 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程に進学し、修了後、神戸市立工業高等専門学校助教。平成 20 年電気関係学会関西支部連合大会奨励賞受賞。電子情報通信学会、システム制御情報学会各学生員。



引 原 隆 士 (正員) 1958 年 8 月 9 日生。1987 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程研究指導認定退学。京都大学工学博士。関西大学を経て、1997 年 4 月京都大学助教授。2001 年 8 月同教授。パワーエレクトロニクス、非線形力学の工学的応用、MEMS の研究、情報通信・エネルギー統合技術の研究開発などのプロジェクトに従事。IEEE, APS, SIAM, 電子情報通信学会、システム制御情報学会などの会員。

