

# 太陽光発電が連系した 配電システムのシミュレータの開発

学生員 野田 幸久 (東京農工大学)  
小泉 裕孝 (東京農工大学)

水野 環樹 (東京農工大学)  
会員 黒川 浩助 (東京農工大学)

Development of a distribution network simulator  
connected with PV systems

Yukihisa NODA, Tamaki MIZUNO  
Hiroataka KOIZUMI, Kosuke KUROKAWA

Tokyo University of Agriculture and Technology  
2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588, JAPAN  
Fax: +81-42-385-6729, E-mail: yukiwo@cc.tuat.ac.jp

## ABSTRACT

Islanding is one of serious problems in an electric power system connected with dispersed power sources. To secure the power system from islanding, it is quite important to verify the ability of islanding detection for the individual power sources in advance. The authors have been developing a scaled-down, simulated distribution network including a distribution substation, a high-voltage grid in sections, pole transformers, low-voltage lines, customer loads and a number of PV systems. This installation can be used for testing plural PV inverters as well as a number of AC modules. It is also considered useful for studying interference phenomena among multiple inverters. As the first stage of the development, several types of 3-4 kW class PV inverters have been evaluated.

キーワード：系統連系，単独運転

Keyword: grid-connected PV systems, islanding

## 1. はじめに

エネルギー問題・地球環境問題への意識の高まりや設置コストの低下にともない、今後、住宅を中心として系統連系形太陽光発電システムがさらに普及していくと考えられる。その結果、多数の太陽光発電システムが一本の配電線に集中的に連系された高密度連系状態となることが予想される。高密度連系時においては、単独運転など、従来の配電線には見られなかった様々な現象が発生する可能性があり、安全性などの面からも評価が必要である。

これまで、実規模模擬配電線による試験や、シミュレーションによる解析が行われてきたが、実規模試験

設備は大規模・複雑でありコストがかかるという問題があり、シミュレーションの検証という観点からも配電システムの縮小モデルが必要とされている。

本研究では、ACモジュールの多数台連系および住宅地区に太陽光発電システムが高密度に連系したシステムを想定し、配電システムの縮小試験を目的として、高圧配電線から低圧需要箇所に至る6.6kV高圧配電線一回線をモデルとした縮小模擬配電システムを設計した。

また今回は、模擬配電システムの一部を用いて、一般家庭に用いられる3~4kW級のPVインバータ1~2台を連系させ、配電線事故によるシステム停止時の単独運転検出機能検証試験を実施し、その挙動について報告する。

## 2. 縮小模擬配電線の設計

縮小模擬配電線を設計するためには、実際の配電システムに即したモデルが必要である。そこで日本における平均的な配電線から線路定数等の配電線データを使用し、配電用変圧器から低圧需要箇所までのモデル配電線を作成した。本来、配電用変電所からは複数のフィーダが引き出されているが、今回は一本のフィーダのみに着目した。

想定する配電線は住宅地区の配電システムであり、配電用変電所引き出しの、3000kVA-6.6kV三相3線式高圧配電線1回線(巨長6km、直線状)を基本とする。高圧配電線以下に柱上変圧器を介して100/200V単相3線式低圧配電システムが接続しており、太陽光発電は高圧負荷・低圧負荷のそれぞれに連系している。

Table.1 Distribution line data (Residential area)

	Residential area
line impedance	$1.781+j2.382[\Omega]$
maximum demand (high-voltage)	814[kW]
maximum demand (low-voltage)	1301[kW]
minimum demand	703[kW]
number of customers (low-voltage)	1850
capacitance	345[kVA]

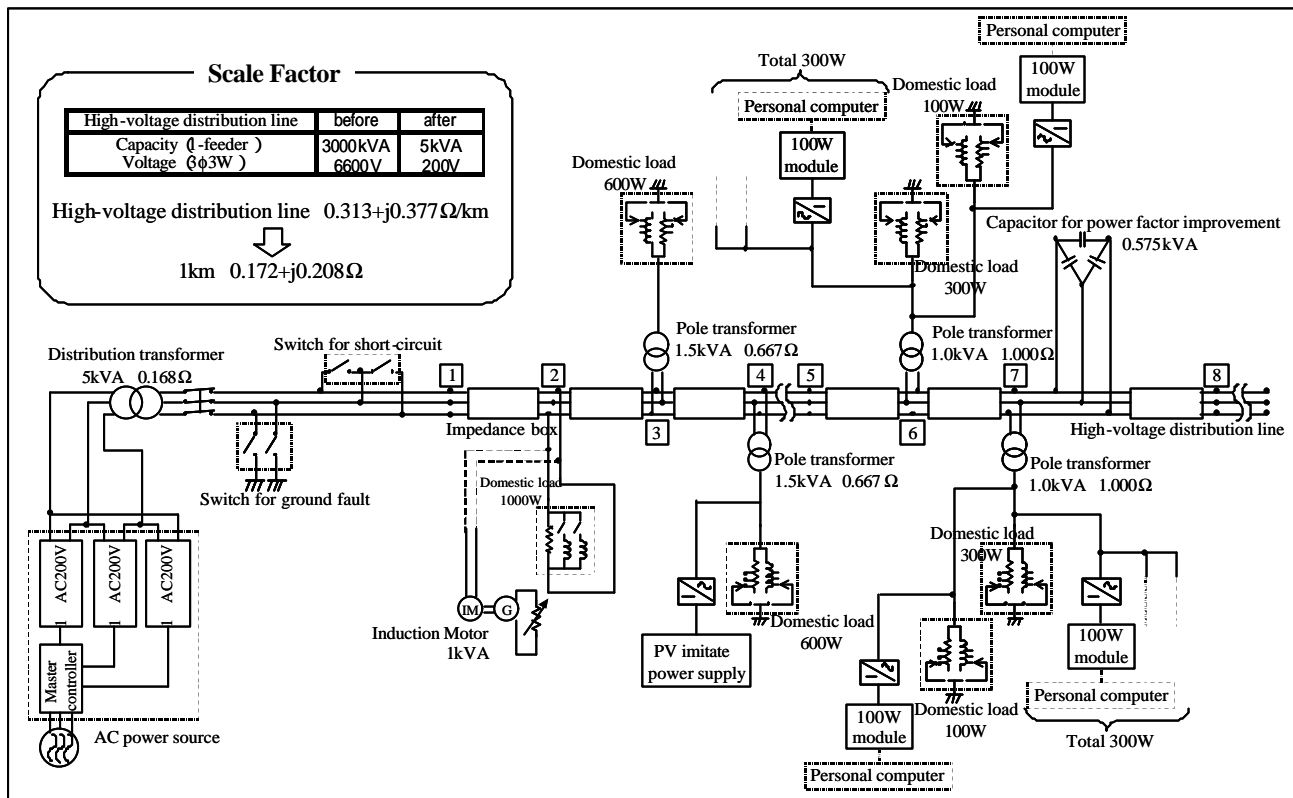


Fig.1 Composition figure of reduced distribution network model (Residential area)

設計に用いた住宅地区における高圧配電線 1 フィーダあたりの配電線諸量<sup>(1)</sup>を Table.1 に示す。これに基づいて、縮小配電系統モデルを設計した結果が Fig.1 である。高圧配電線について、容量および電圧をそれぞれ 3000kVA -6600V から 5kVA -200V にスケールダウンした。低圧系統については、実際の系統と同様、絶縁変圧器を介して単相 3 線式 100/200V とした。このスケールファクターを用いて線路インピーダンスの変換や高圧・低圧負荷の換算、太陽光発電容量の設定などを行う。

高圧配電線は、1km あたりの線路インピーダンス  $0.313+j0.377[\Omega]$ <sup>(2)</sup>を基準として、配電線データの線路インピーダンス値をもとに亘長を算出し、p.u.法により縮小換算した。その結果、1km あたりの換算インピーダンスは、 $0.172+j0.208[\Omega]$ となる。

低圧配電系統に関しては、AC モジュールの多数台連系試験と高密度連系時の縮小試験を行うことから、AC モジュールの出力を考慮して、負荷および太陽光発電の容量の最低単位を 100W とした。このため、複数の柱上変圧器以下の低圧配電系統を一つの模擬柱上変圧器に一括配置することとした。今回は、低圧系統を四区間に分割し、四つの模擬柱上変圧器を用いた。柱上変圧器 20 台相当の 1kVA 絶縁変圧器と柱上変圧器 30 台相当の 1.5kVA 絶縁変圧器をそれぞれ二台ずつ使用している。

負荷容量は配電線データ値を縮小容量比で変換し、決定した。負荷装置の構成は、抵抗負荷・誘導性負荷・容量性負荷の組合せにより、有効電力と無効電力を様々に変化させることができるものとする。また、誘導電動機を設置することで、回転機負荷を模擬する。

太陽光発電の設置容量は、配電線容量比 100% 以上の出力を可能とする。配電線容量 100% とは、太陽光発電の設置容量を低圧需要家一戸あたり 3kW とすると、住宅地区の低圧需要家戸数 1850 戸に対して、需要家戸数比で 50~60% 程度となる。太陽光発電の出力を模擬するためには、太陽電池模擬電源を用いる。この装置は、日射強度・直並列構成などが任意に設定可能であり、自由に I-V カーブを作成し出力することができる。

Table.2 にスケールダウン後の縮小模擬配電線（住宅地区）の諸量を示す。

Table.2 Reduced distribution line data (Residential area)

	Residential area
length of high-voltage distribution line	6[km]
line impedance	$1.035+j1.246[\Omega]$
maximum demand (high-voltage)	1.357[kW]
maximum demand (low-voltage)	2.168[kW]
minimum demand	1.172[kW]
number of customers (low-voltage)	1850
capacitance	0.575[kVA]

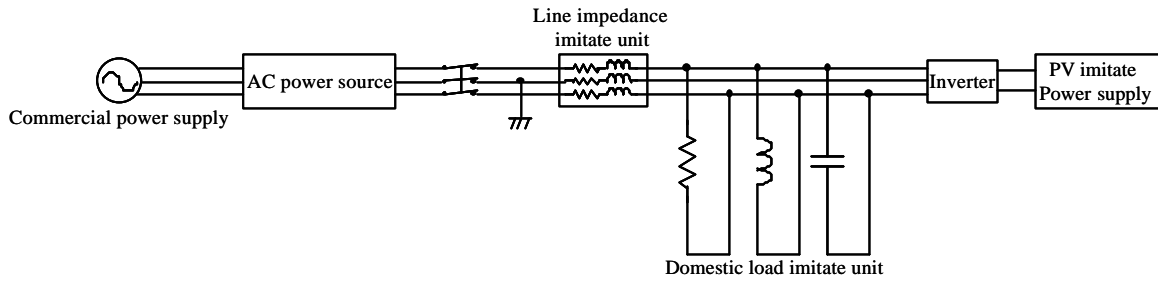


Fig.2 Composition of the experiment equipment for 1 or 2 inverters

### 3. 系統連系インバータ試験装置

今回、縮小模擬配電線の設計を行ったが、その全体装置の一部を使用して、一般家庭用の3~4kW クラス系統連系 PV インバータを試験するための実験設備を構成した。この実験設備を用いてインバータ単機試験および2台程度の並列運転試験を行うことができる。以下にその実験設備について概要を述べる。

実験設備の構成図を Fig.2 に、設置状況を Fig.3 に示す。設備は、模擬商用電源装置、系統インピーダンス模擬装置、模擬負荷装置、太陽電池模擬電源装置から構成され、負荷条件や太陽電池出力電力などのパラメータを様々に設定し、あらゆる条件下で系統連系 PV インバータの単独運転検出機能および電圧上昇抑制機能に関する実験などを行うことができる。

模擬商用電源は、6kVA の交流安定化電源を用いる。系統インピーダンス模擬装置は、単相3線式の低圧配電線における柱上変圧器・低圧配電線路(100m程度)・引込線(20m)を経て受電点に至る線路を想定しており、それらのインピーダンスの合計値  $0.150+j0.100[\Omega]$  を抵抗とリアクトルで構成する。模擬負荷装置は3kW程度までの負荷を模擬する装置であり、誘導性から容量性に至るあらゆる負荷状態を模擬するために、抵抗・リアクトル・コンデンサの並列回路とした。



Fig.3 Installation situation of experiment equipment

### 4. 系統連系インバータの動作試験

試験装置を用いて、系統停電時におけるインバータの動作試験を行った。使用したインバータの仕様を Table.3 に示す。単独運転検出機能の受動方式には位相跳躍検出、能動方式には無効電力変動が主に用いられている。今回は単独運転防止機能をマスクできるインバータ(Inv.B,C)は、機能をマスクして実験を行った。

Table.3 Specification of the inverter for examinations

	Rated power	Islanding detection	
		Passive system	Active system
Inv.A	3.5kW	System to detect jumping voltage phase	Variable reactive power system
Inv.B	4.5kW	System to detect jumping voltage phase	Variable reactive power system
Inv.C	4.5kW	System to detect jumping voltage phase	Frequency shift system
Inv.D	4.0kW	System to detect changing rate of frequency	Variable reactive power system

#### 4.1. インバータ単機試験

インバータを模擬系統に連系し、ブレーカを開放することで系統の停電を模擬した。実験条件は次のとおりである。周波数 50[Hz]、負荷は、 $R=13.3[\Omega]$ 、 $L=212[mH]$ 、 $C=48[\mu F]$ とし、太陽光発電出力は3kWに設定した。Fig.4 および Fig.5 に主な結果を示す。波形は上から負荷電圧、系統電流、インバータ電流の順である。Inv.A および Inv.B とともに系統停止後、150~300[ms]程度でインバータが停止していることがわかる。

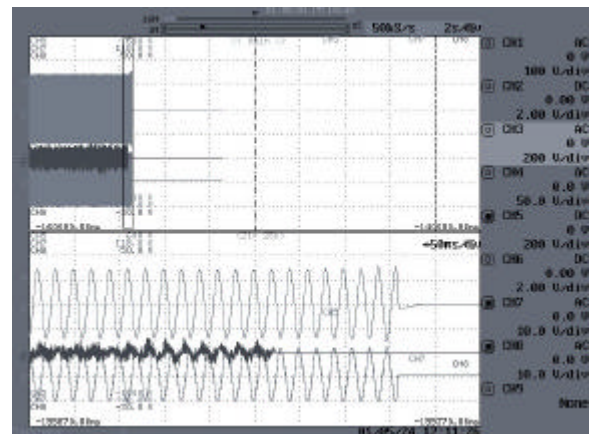


Fig.4 Waveform of Inv.A at open-circuit

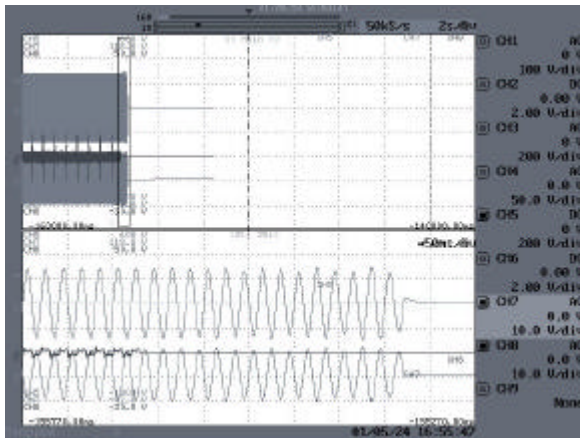


Fig.5 Waveform of Inv.B at open-circuit

#### 4.2. インバータ並列運転試験

インバータ二台を連系し、単機試験と同様に系統をブレーカにより切断した時のインバータの挙動を観測した。Inv.Cの単独運転防止機能はマスクされている。

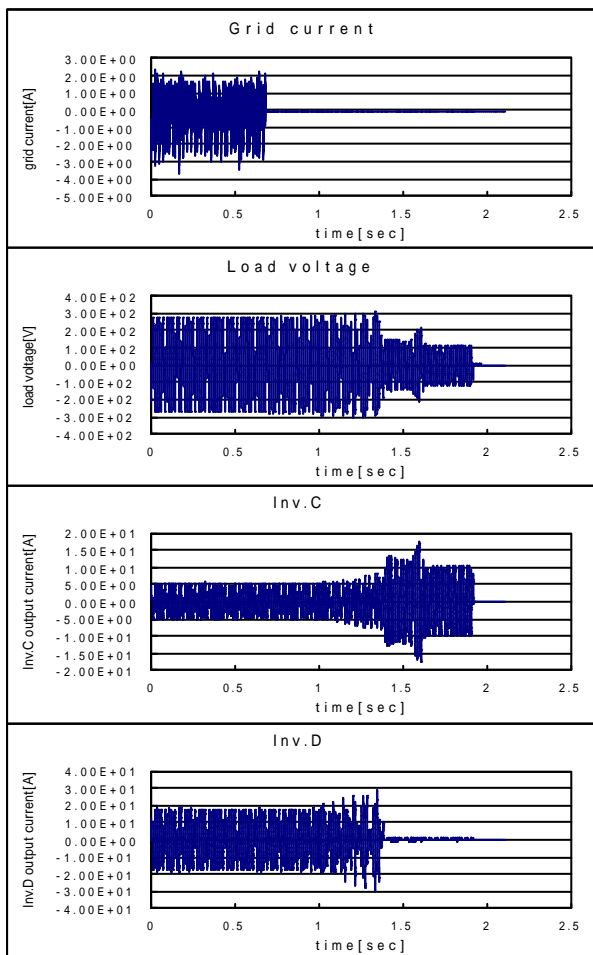


Fig.6 Behavior of inverter in islanding

実験条件は、負荷として  $R=13.3[\Omega]$  ,  $L=449[mH]$  ,  $C=32[\mu F]$ に加えて 125[W]のグラインダ二台を用いた。太陽光発電出力は、それぞれ 2670[W]と 720[W]に設定した。抵抗と直列に可変抵抗を接続し、有効電力潮流をできるだけゼロになるように調節した上で、系統を

切断した。

実験結果を Fig.6 に示す。系統切断時の有効電力潮流は 0[W]である。系統切断後、Inv.D は 0.8 秒間運転を継続した後、運転を停止したが、Inv.C はその後も 0.5 秒間運転を続け、1.3 秒間の単独運転が観測された。今回は有効電力のみを調整したが、無効電力の調整により、さらに長時間の単独運転が観測される可能性がある。

#### 5. まとめ

太陽光発電の高密度連系時の縮小実験や AC モジュールの多数台連系試験に適用するため、縮小模擬配電線を設計した。提案した方法により予想される利点を以下に挙げる。

- ・ 省スペースで配電線全体の挙動を検証可能
- ・ 試験設備を安価に構成可能
- ・ 日射量・負荷容量などが自由に設定可能
- ・ 一定条件下での比較試験が可能
- ・ 一定条件を維持した繰り返し実験が可能
- ・ 多数インバータの干渉問題の検証が可能

今回は模擬系統の一部を使用し、単独運転防止機能をマスクし、単機および二台のインバータ連系試験を実施し、本装置で単独運転が発生することを確認した。

今後、無効電力潮流の調整を加えてさらに条件を厳しくした場合の試験を行う。また、現在開発が進められている AC モジュール用インバータの多数台連系試験を実施し、その評価を行う。

なお、本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の地域新生コンソーシアム研究の一環として実施された。

#### 参考文献

- (1) 平成 9 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書「太陽光発電システム実用化技術開発 (高密度連系技術の研究)」(1998)
- (2) 平成 10 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書「太陽光発電システム実用化技術開発 (高密度連系技術の研究)」(1999)
- (3) 平成元年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書「太陽光発電システム実用化技術開発 (周辺装置の試験・評価法の調査研究)」(1990)
- (4) 平成 5 年度研究報告書「分散型新発電技術実用化実証研究に関する保護機能等試験方法の確立」(1994)
- (5) H.Haeblerlin, J.Graf "ISLANDING OF GRID-CONNECTED PV INVERTERS: TEST CIRCUIT AND SOME TEST RESULT" 2<sup>nd</sup> WORLD CONFERENCE AND EXHIBITION ON PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONVERSION (1998)
- (6) Weidong,He, Tomas Markvart, Ray.Arnold "ISLANDING OF GRID-CONNECTED PV GENERATORS: EXPERIMENTAL RESULT" 2<sup>nd</sup> WORLD CONFERENCE AND EXHIBITION ON PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONVERSION (1998)
- (7) Achim Woyte, Ronnie Belmans, K.U.Leuven, Johan Nijs, "ISLANDING OF GRID-CONNECTED AC MODULE INVERTERS" IEEE Photovoltaic Specialists Conference (2000)