

超縮小模擬配電システムを用いた PV インバータ試験装置の基本原理の実証

学生員 竹内 一平 (東京農工大学)
会員 黒川 浩助 (東京農工大学)

小泉 裕孝 (東京農工大学)

Verification on fundamental operation of ultra small scaled-down network simulator for testing PV inverter functions

Kazuhira TAKEUCHI*, Hirotaka KOIZUMI*
and Kosuke KUROKAWA*

* Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo, 184-8588 Japan
Phone: +81-42-388-7445, fax: +81-42-388-7445
E-mail: ippei@cc.tuat.ac.jp

ABSTRACT

This paper describes a new experiment equipment of PV inverters. It is composed of the ultra small scaled-down network simulator with electronic circuit and active power interface (API). For the first step of development, a scaled-down low voltage distribution system of single-phase two-wire system is developed. It has been tested in case when an ideal current source instead of a PV inverter is connected. By the experimental results, fundamental operations of proposed equipment have been verified.

キーワード: 配電システムシミュレータ, 電子回路, PVインバータ

Keyword: distribution grid simulator, electronic circuit, PV inverter

1. はじめに

近年 地球環境問題に対する関心の高まりを背景に, 一般家庭の屋根に設置する太陽光発電(以下, PV)システムが急速に普及しており, 今後も普及しつづけることが予想される。PVシステムを電力システムに接続する場合 設置前に単独運転防止機能, 電力システム保護機能やTHD機能等に対する試験を行う必要がある。直接的な試験方法としては実規模の独立した模擬配電システムを用いればよいが, これは規模的に電力会社など一部の法人のみ可能であり, 一般的には利用することはできない。また, コンピュータシミュレーションでは機器を実際に接続して試験することは不可能である。このため, 当研究室では配電システムを等価回路に置き換え, 抵抗やインダクタで構成される配電システムシミュレータを作成し, PVインバータを試験してきた⁽¹⁾。しかし, この試験装置は実規模の配電システムと比べて小さいがまだ大きなスペースを必要とし, コストも高い。さらに, 今後のPVシステムの普及状況を考慮し, PVシステムの多数台

連系試験や複数台連系によるシステム内相互干渉試験を行うにはある程度の規模が必要とされ, 試験装置を大型化しなければならない。そのため, 本研究では大きさやコストにメリットのある新しい配電システムシミュレータを開発することを目的としており, 配電システムを電子回路で作成した超縮小模擬配電システムを用いた試験装置の構成について検討してきた⁽²⁾。

本論文において, 試験装置全体の構成を検討し, PVインバータの試験方法について検討する。また, 本試験装置を作成する準備段階として, 柱上変圧器以下の低圧配電線を縮小し, 単相2線式で模擬した模擬低圧配電システムを作成し, PVインバータの代わりに3W程度出力することができる電流源を模擬PVインバータとして接続し, 本試験装置の基本原理を実証した。

2. 試験装置の構成

従来の試験装置は負荷が実規模の電源を直接接続できる抵抗やインダクタンスから構成されているためサイズが大きく, 規模や拡張や負荷の変更が困難であった。そこで, 本研究で提案された試験装置は小スペース, 低コストで, 電力システムの規模の規模の拡張や負荷の変更を容易に行える構成とするため, 抵抗やインダクタンスが電子回路で作成される超縮小模擬配電システムを検討した。しかし, PVインバータのような電力システムに接続される電源を直接, 超縮小模擬配電システムに接続した場合, 電子回路の動作電圧が系統電圧に比べ小さいためPVインバータを連系できなかつたり, 電子回路が破壊されるなどの問題がある。このため, 図1に示すように本試験装置は超縮小模擬配電システムと実規模の電源との間にAPI (Active Power Interface)⁽²⁾を挿入した。APIにより電子回路で作成した超縮小模擬配電システムの動作電圧を系統電圧に増幅することで等価的に両者を接続できる構成とした。

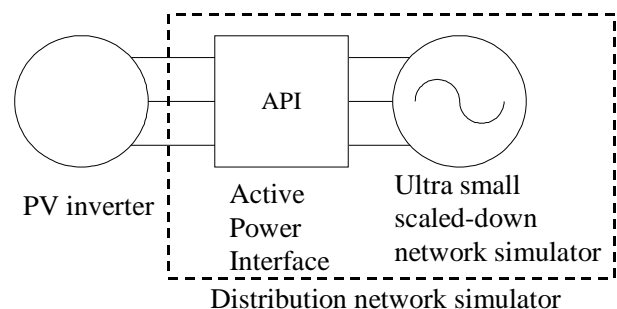


Fig. 1 Composition of a new type of distribution network simulator for testing PV inverters

3. APIの動作と構成

APIの機能は一方の端子の電圧、電流を忠実に縮小、または増幅した電圧、電流をもう一方の端子から出力させることで、パワーレベルの異なる機器同士を等価的に接続することである。また、基本原理はAPI両端子の電圧と電流の関係がそれぞれ常に $m:n$ 、 $M:N$ となるように制御することである。次にAPIの動作について説明する。APIのブロック図を図2に示す。APIは端子1の電圧 V_R 、電流 I_R を電圧センサ1、電流センサ1により常に測定していて、測定された電圧 V_R 、電流 I_R をそれぞれ n/m 倍、 N/M 倍した電圧 $(n/m)V_R$ 、電流 $(N/M)I_R$ が端子2の電圧 V_S 、電流 I_S となるように電圧制御ユニットが制御している。それと同時に端子2の電圧 V_S 、電

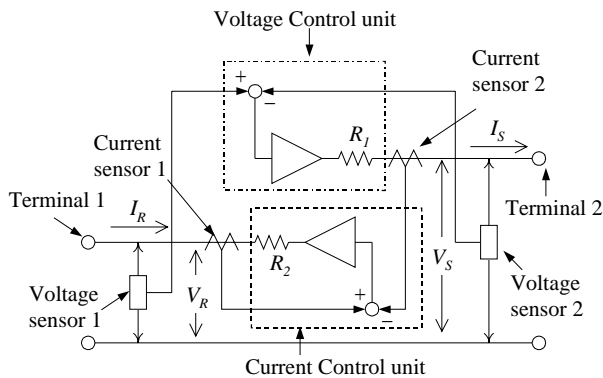


Fig. 2 Composition of the API

流 I_S も常に電圧センサ2、電流センサ2により測定していて、測定された電圧 V_S 、電流 I_S がそれぞれ m/n 倍、 M/N 倍された電圧 $(m/n)V_S$ 、電流 $(M/N)I_S$ が端子1の電圧 V_R 、電流 I_R となるように電圧制御ユニットが制御している。そのため、API両端子の電圧、電流の関係がそれぞれ常に $m:n$ 、 $M:N$ になるように制御される。これにより電子回路で作成した超縮小模擬配電系統と実PVインバータを等価的に接続することが可能である。

4. 超縮小模擬配電系統シミュレータの設計

作成する超縮小模擬配電系統は日本における平均的な配電線の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家までのモデル化を想定した。想定される配電線は配電用変電所の主変圧器(容量: 10MVA)から引き出された容量3,000kVA、6.6kV三相3線式高圧配電線1回線を基本とし、以下に柱上変圧器を介して100/200V単相3線式低圧配電系統が連なっているモデルとした。また、実際の配電系統において、無効電力調整源である力率改善用コンデンサも考慮した。

本研究で検討している超縮小模擬配電系統の構成を図3に示す。作成される模擬系統は配電用変圧器、高圧配電線の線路インピーダンス、高圧負荷、柱上変圧器、低圧配電線の線路インピーダンス、低圧負荷から構成される。

作成する模擬系統の諸量は(3)を参考にする。高圧、低圧配電線の線路インピーダンス、家庭負荷、変圧器が

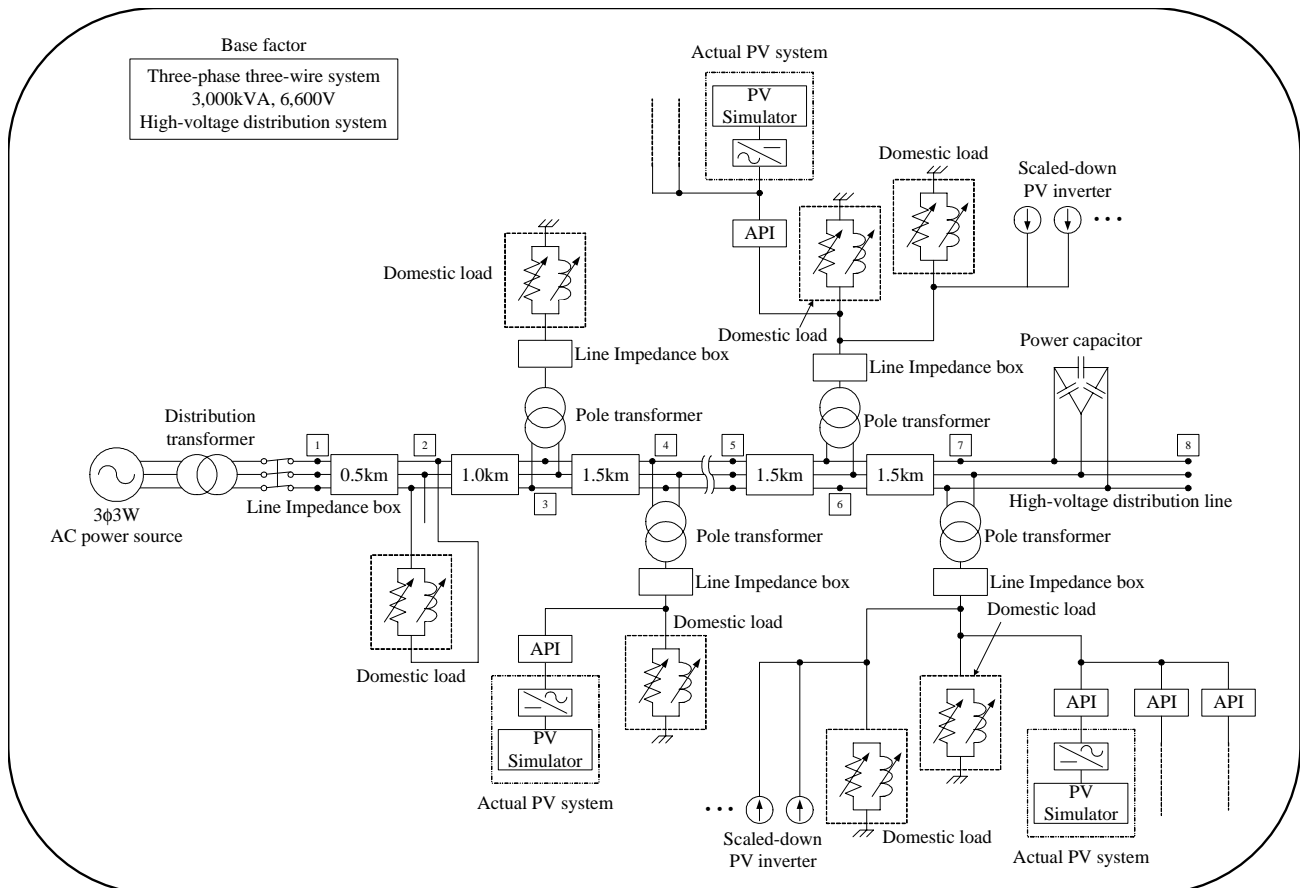


Fig. 3 Composition of the ultra scaled-down network simulator

電子回路で作成されることとAPIの電力変換能力を考慮し、高圧配電線、低圧配電線の容量、電圧を設定し、スケールダウンする。このスケールリングファクターを基に高圧配電線の線路インピーダンス、高圧、低圧負荷、変圧器容量の換算やPVシステム容量の設定を行う。

高圧配電線は1kmあたりの線路インピーダンス $0.313+j0.377[\Omega]$ ⁽⁵⁾を基準とし、p.u.法にて縮小換算する。

低圧配電線において、ACモジュールの多数台運転、PVシステムの高密度連系時の縮小試験を行う。PVインバータを試験するには低圧側にAPIを介してPVインバータを接続する。また、多数台連系や複数台連系による系統内の相互干渉の試験を行う際にはPVインバータを多数台APIを介して接続するか、数台のPVインバータとPVインバータを縮小し、模擬PVインバータとした電流源を多数台接続することで試験を行う。PVシステムの容量はACモジュールの出力を考慮し、最低100Wとし、これと縮小容量比で負荷及び模擬PVインバータの容量が決定される。図3が示すように低圧配電線は4区間に分割し、4つの模擬柱上変圧器を配置した。模擬柱上変圧器の容量は縮小容量比により縮小し、変圧器のインピーダンスはスケールリングファクターを基にp.u.法により換算する。また、変圧器は電子回路にて作成される⁽⁴⁾。

負荷容量は配電線データを縮小容量比で変換することにより設定する。負荷は抵抗負荷、誘導性負荷、容量性負荷より構成され、有効電力と無効電力を任意に設定できる。また、抵抗負荷と容量性負荷は一般的な素子を用いて構成し、誘導性負荷は電子回路にて作成する。

PVシステムの容量は住宅地区の低圧需要家の戸数1850戸における普及率で決定する。一戸あたりのPVシステムの出力を3kWとし、縮小容量比により変換する。また、実験の再現性を考慮して、太陽電池の代わりにPVシミュレータ⁽⁵⁾を用いる。

API両端子の電力比は縮小容量比と同様である。電圧比は模擬低圧系統の電圧と実規模のPVシステムの動作電圧100Vとの比となる。API両端子の電力比、電圧比より電流比を決定し、APIを調節する。また、複数のPVインバータと超縮小模擬配電系統をAPIを介して接続する方法は2種類考えられる。第一に、図3中の区間6に低圧配電線接続されているように一台のAPIに対して複数のPVインバータを接続する方法である。これはPVインバータの出力が比較的小出力であり、APIの容量が一台のPVインバータの出力と比較して十分大きい場合である。第二に図3中の区間7の低圧配電線に接続されているように一つのPVインバータに対して一台のAPIを接続する方法がある。これはAPIの容量とPVシステムの出力がほぼ等しい場合である。複数のPVインバータをAPIを介して超縮小模擬配電系統に接続する方法はAPIの容量とPVインバータの出力関係により決定される。

5. 試験装置の動作試験

本試験装置作成の準備段階として、単相2線式の模擬低圧配電系統を作成した。模擬低圧配電系統は低圧配電線における柱上変圧器、低圧配電線路、引込み線、家庭負荷を想定し、APIを介してPVインバータが接続さ

れる構成とした。現時点でのAPIの電力変換能力と電子回路の出力電圧の関係より、一般的な20kVAの柱上変圧器を10VAに、単相3線式100/200Vを2/4Vに縮小した。このスケールリングファクターを基に線路インピーダンスや負荷容量を変換し、単相3線のうち1線を用い、単相2線式模擬低圧配電系統を作成した。

作成した模擬低圧配電系統を図4に示す。柱上変圧器の低圧配電線側の出力はパルスジェネレータより正弦波を発生させ、それをパワーアンプにより10VA、2Vを出力させることにより商用電源として模擬した。線路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、需要家間の低圧配電線路(100m程度)、引込み線(20m程度)を経て受電点に至る低圧配電線路全体のインピーダンスを想定しており、 $0.150+j0.100[\Omega]$ ⁽⁶⁾を基準として、p.u.法により縮小換算した。その結果、線路インピーダンスは $0.12+j0.08[\Omega]$ に変換された。この値を用いて単相2線式の低圧模擬配電系統の線路インピーダンス模擬装置を作成した。このうち抵抗分は抵抗素子より作成し、リアクタンス分は電子回路により作成した⁽⁴⁾。模擬家庭負荷は誘導性から容量性まであらゆる負荷状態を模擬できるように、抵抗、インダクタンス、コンデンサの並列回路で構成した。このうち、インダクタンスは電子回路で作成した。PVインバータは縮小し、電流源で模擬した。APIは両端子の V_R と V_S の関係が3:1に I_R と I_S の関係が5:1となるように調節した。

次に作成した試験装置の動作を検証するため、実験を行った。電流源は1kWのPVインバータの1/100にスケールダウンされたPVインバータを模擬し、約3W、500mA出力させた。また、周波数を50Hzとし、家庭負荷として10[Ω]の抵抗を接続した。このとき、定常状態における V_R 、 V_S 、 I_R 、 I_S を測定した。また、定常状態時においてパワーアンプから出力される電源を切断し、系統の停電状態を模擬し、電圧切断時における V_R 、 V_S を測定した。電流は図2のAPI内部にある抵抗 R_1 、 R_2 の電圧降下を測定することにより、電圧値として電流を測定した。

図5(a)は定常状態における V_R 、 V_S の波形、図5(b)は I_R 、 I_S の波形を示す。図5(a)はCh1の V_R は一目盛り6V/div、Ch2の V_S は2V/divであり、これら二つの波形を重ね合わせたとこ一致することがわかった。これより、電圧は常に3:1となるように制御されていること

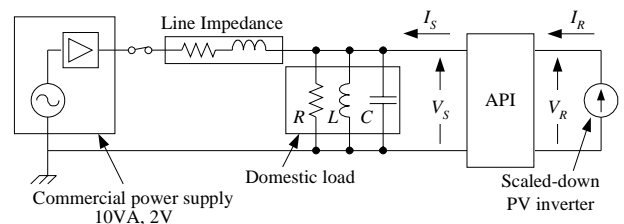
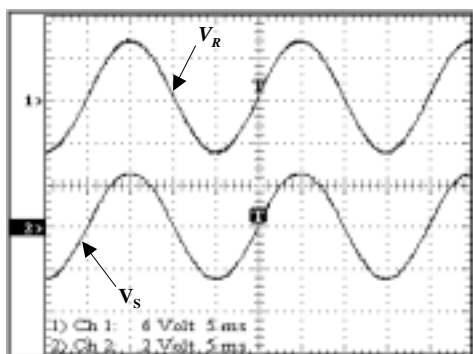


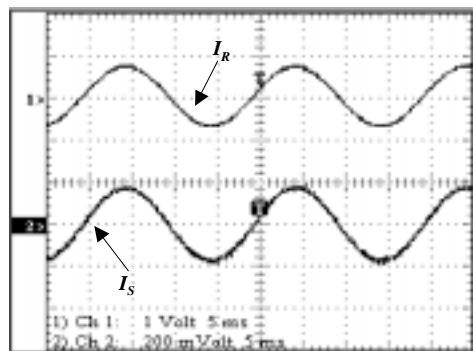
Fig4 Scaled-down low voltage distribution system of single-phase two-wire system

がわかる。図5(b)はCh1の I_R は一目盛り1A/div, Ch2の I_S は一目盛り200mA/divであり, これら二つの波形を重ね合わせたところ, 一致することがわかり, 電流もAPIの設定値どおり常に5:1に制御されていることがわかる。

図6は系統が停電した瞬間の v_R と v_S の波形である。PVインバータを模擬した電流源には単独運転防止機能は付加されていないため, 系統の電圧が切断されても電流源は電流を出力し続けている。注目すべき点は模擬低圧配電系統の電圧 v_S が系統の電圧が切断されたときに変化しているが, その変化に追従して v_R も変化していることがわかる。

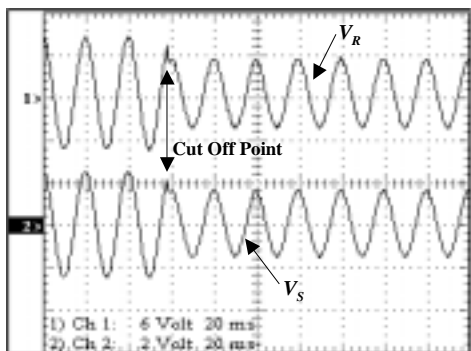


Ch1: 6V/div 5ms/div, Ch2: 2V/div 5ms
(a) Waveforms of v_R (Ch1) and v_S (Ch2)



Ch1: 1A/div 5ms/div Ch2: 200mA/div 5ms/div
(b) Waveforms of I_R (Ch1) and I_S (Ch2)

Fig.5 Waveforms of voltage and Current at both terminals of API



Ch1: 6V/div 50ms/div, Ch2: 2V/div 50ms/div

Fig. 6 Waveforms of v_R and v_S after power interruption

これらの結果より, 電流源から出力された3Wの電力がAPIにより200mWに縮小されて模擬低圧配電系統に入力されていることがわかった。また, 模擬低圧配電系統で生じた電圧の変化がAPIにより増幅され, 電流源にフィードバックされていることがわかった。これより, 本試験装置の基本的原理が実証された。

7. まとめ

本論文において, 新しいPVインバータ試験装置を用いたPVインバータの試験方法を検討した。本試験装置を用いることでPVインバータの多数台連系や複数台連系による相互干渉などを試験できる。

また, 試験装置作成の準備段階として, 単相2線式の模擬低圧配電系統を作成し, PVインバータを模擬した電流源を接続し実験を行い, APIで両端における電圧, 電流を測定した。この結果, 電流源から出力される電力が忠実に縮小されていることがわかった。また, 系統の停電状態を模擬したときの電圧波形を測定し, 模擬低圧系統で生じた電圧の変化が電流源にフィードバックされていることがわかった。これより, 試験装置の縮小モデルにおいて, 電圧, 電流のスケールが異なるPVインバータを模擬した電流源と模擬低圧配電系統が等価的に接続できることがわかり, 本試験装置の基本原理が実証された。APIの電力変換能力を向上させ, 試験装置の規模を大きくすることにより実際のPVインバータを接続でき, 単独運転防止機能等のPVインバータの機能を試験できる。

今後はPVインバータを試験装置に接続できるようにAPIの電力変換能力を向上させる。それに伴い超縮小模擬配電系統の容量, 電圧の設定を行い, 試験装置を作成する。さらに, 作成された試験装置にPVインバータを接続し, 多数台連系試験や単独運転防止機能等の試験を行う。

参考文献

- (1)Y. Noda, T. Mizuno, H. Koizumi, K. Nagasaka, K. Kurokawa: "The deployment of a scaled-down simulator for distribution grid and its application for verifying interference behavior among a number of module integrated converters (MIC)", 29 th IEEE PVSC, pp.1545-1548, May 2002
- (2)K. Takeuchi, H. Koizumi, H. Nagayoshi, K. Kurokawa: "A new type of scaled-down network simulator composed of power electronics", WCPEC-3, May 2003
- (3)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)
- (4)藤田秀紀, 紅林久之, 後藤益雄, 野原哈夫: "系統解析シミュレータ用電子化送電線モデル及び変圧器モデル", 電気学会全国大会, vol.9 pp.216-217, 1990
- (5)H.Matsukawa, K.Koshiishi, H.Koizumi, K.Kurokawa, M.Hamada, and L.Bo, "Dynamic Evaluation of Maximum Power Point Tracking Operation with PV Array Simulator", in Proc. 12th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, pp.415-416, June 2001
- (6)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)