

新・省エネルギーシステムへの自励式インバータの適用

Application of Self-Commutated Inverters to Alternative Energy Systems

横山 智紀
T. Yokoyama

田中 進
S. Tanaka

木本 兼一
K. Kimoto

大和田 晃司
K. Ohwada

近年の地球環境問題への関心の高まりに伴い、燃料電池発電、太陽光発電は、環境性に優れた新発電方式として注目を集めている。燃料電池発電は、オンサイト用の比較的小容量でも発電効率が高く、また排熱を利用できるコジェネレーションシステムであることなどに特長がある。また太陽光発電は、無限の太陽エネルギーを直接電気エネルギーに変換するクリーンなエネルギーであること、ビルから個人住宅まで広い範囲に適用できることなどの特長をもっている。

これらのシステムの中で自励式変換器は、直流電力を交流電力へ変換し電力系統へ連系する機能を担っており、パワーエレクトロニクスの進歩に伴い、小型・高効率化が達成されている。

ここでは、オンサイト型 200 kW 燃料電池インバータと太陽光発電インバータについて紹介する。

With concerns increasing about environmental issues, interest has grown in environmentally safe power generation systems such as fuel cells and photovoltaic cells. Fuel cell generation features higher electrical efficiency but relatively small capacity, and is a cogeneration system which uses exhaust heat. Photovoltaic generation produces clean energy because it converts solar energy directly into electricity, and is applicable to residential and office buildings.

A self-commutated inverter converts direct current into alternating current, thereby providing linkage to power systems. As a result of the advances made in power electronics, inverters have become compact and highly efficient.

This paper introduces on-site type 200 kW fuel cell inverters and photovoltaic cell inverters.

200 kW オンサイト型燃料電池インバータ

Fuel Cell Inverters

1 まえがき

電力需要増加に伴うエネルギー問題や環境問題から燃料電池発電システムが注目を浴びている。当社は、これまで IFC (International Fuel Cells) 社と共同で燃料電池の研究開発を行い、11 MW, 1 MW, 200 kW の燃料電池プラントを完成し、現在 200 kW のオンサイト型燃料電池プラントの普及に向けて開発を進めている。この燃料電池プラントの電気・制御システムとして組み込まれ、電池で発電した直流電力を交流電力に変換する燃料電池インバータは、プラントのシステム構成機器の中でも主要なシステムである。燃料電池プラントの普及には、この燃料電池インバータのさらなる小型化、高機能化、コスト低減が一つのかぎとなる。

以下、燃料電池の概要および 200 kW オンサイト型燃料電池インバータを紹介する。

2 燃料電池プラントの概要

燃料電池は、電気分解の逆の原理で電気化学的に燃料を

反応させることによって、電気を発生させる発電システムである。発電時に硫黄や窒素酸化物などの発生がほとんどなく、その際発生する熱を電熱併給システムとして冷暖房や給湯に利用でき、かつ小容量でも大型火力発電所に匹敵するほどの高い発電効率が得ることができる。発電時の騒音もきわめて小さいなどの特長とも併せて、クリーンかつ高効率な地域分散型エネルギーシステムとして注目されている。

図 1 に燃料電池プラントの概念を示す。

燃料電池インバータは、燃料電池プラントの電気・制御システムとして組み込まれ、電池で発電した直流電力を交

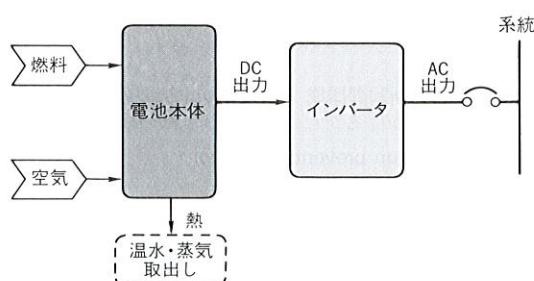


図 1. 燃料電池プラントの概念
燃料と空気から電気エネルギーと熱エネルギーを取り出す。

Configuration of fuel cell plant

流電力に変換し、系統連系運転での運用を行う。また、自立負荷運転にも適用できる機能をもつ。燃料電池は、一度発電を開始したらなるべく連続運転を行なうことが望ましい。よって連系運転中の系統事故時には、インバータを自立負荷運転に切り換えて、自己プラントの補機動力を燃料電池自身でバックアップする機能をもたせることで、発電を継続するようにしている。

3 200 kW オンサイト型燃料電池インバータ

当社は、IFC 社の子会社である ONSI 社と共同で、200 kW オンサイト型燃料電池 PC-25A プラントを商品化したが、その中で改質器、制御装置およびインバータは当社が開発と製作を分担した。その後 1994 年に国内ユーザ向けに最新技術を適用した 200 kW 燃料電池インバータ TFC200-ST0 を製作し、今回さらに小型化を図った TFC200-ST1 の製品化を完了した。以下に TFC200-ST1 を例に、200 kW 燃料電池インバータ技術について述べる。

3.1 主回路構成

オンサイト型の燃料電池インバータには、系統連系インバータとしての基本機能以外に、小型であること、安価であること、メンテナンス性がよいことなどが求められる。

燃料電池プラント用インバータは発電出力に応じて、また経時的に変化する電池出力電圧／電流に対処しなければならない。インバータ側から見た場合、電池電圧が高く、電流容量が少なく、かつ直流電圧範囲が狭いほうがインバータ装置の小型化、高効率化が容易である。

TFC200-ST1 では、燃料電池プラントとして、電池側とインバータ側とか最適な構成となる仕様を検討し、TFC200-ST0 と比較して、表 1 に挙げる改良を行なった結果、コストおよびサイズの大幅な低減を達成した。

改良内容の主なものとして、①燃料電池の二次冷却水をスイッチングデバイスの冷却に利用するため、冷却方式を風冷から水冷にした、②スイッチング周波数を上げ、スイ

ッチングデバイスに 600 V-800 A 定格の電流容量の大きい IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) を用いて、一組のブリッジ回路で構成される三相インバータとした、などが挙げられる。

また、PC-25A からの改良点として、電池電圧昇圧用のチャップを省略し、電池電圧をインバータにより直接交流電圧に変換する構成とした。この改良で、インバータと電池間の電流逆流防止ダイオードが不要となった。これらの改良により、インバータの効率を 94 %以上にすることができた。

図 2 に主回路構成を、図 3 に外観を示す。

3.2 制御回路構成

TFC200-ST1 では、インバータの制御装置がプラント制御装置とは独立に設けられており、プラント制御装置側からの運転切換え指令および出力電力指令に基づき、インバ

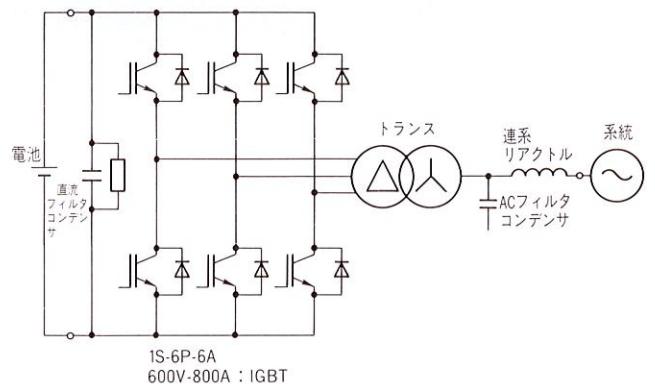


図 2. 200 kW 燃料電池インバータ TFC200-ST1 の主回路構成
池電圧により直接三相インバータを駆動する方式としている。

Configuration of TFC200-ST1 200 kW on-site fuel cell inverter

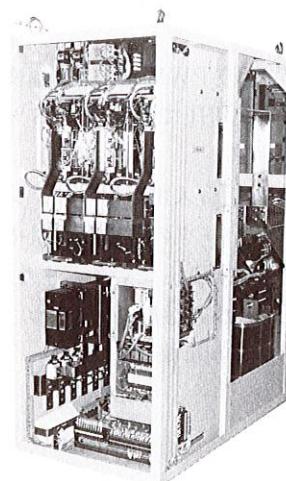


図 3. 200 kW 燃料電池インバータ TFC200-ST1
インバータ
コンデンサ
ユニット × 3
制御ユニット
出力トランス
主回路水冷方式
TFC200-ST1 200 kW on-site fuel cell inverter

表 1. 200 kW 燃料電池インバータ TFC200-ST0/ST1 の仕様
Specifications of TFC200-ST0/ST1 200 kW on-site fuel cell inverter

項目	TFC200-ST0	TFC200-ST1
定格出力	200 kW	200 kW
電圧・周波数	440 V - 三相 - 60 Hz	210 V - 三相 - 60 Hz
電池直流電圧運転範囲	195 V ~ 265 V	165 V ~ 224 V
主回路構成	単相 PWM インバータ × 3	三相 PWM インバータ × 1
IGBT	1,200 V - 500 A - 72 個	600 V - 800 A - 36 個
冷却方式	風冷方式	水冷方式
スイッチング周波数	1.26 kHz	1.98 kHz
効率	93.5 %	94 %
体積比	100 % (ベース)	45 %

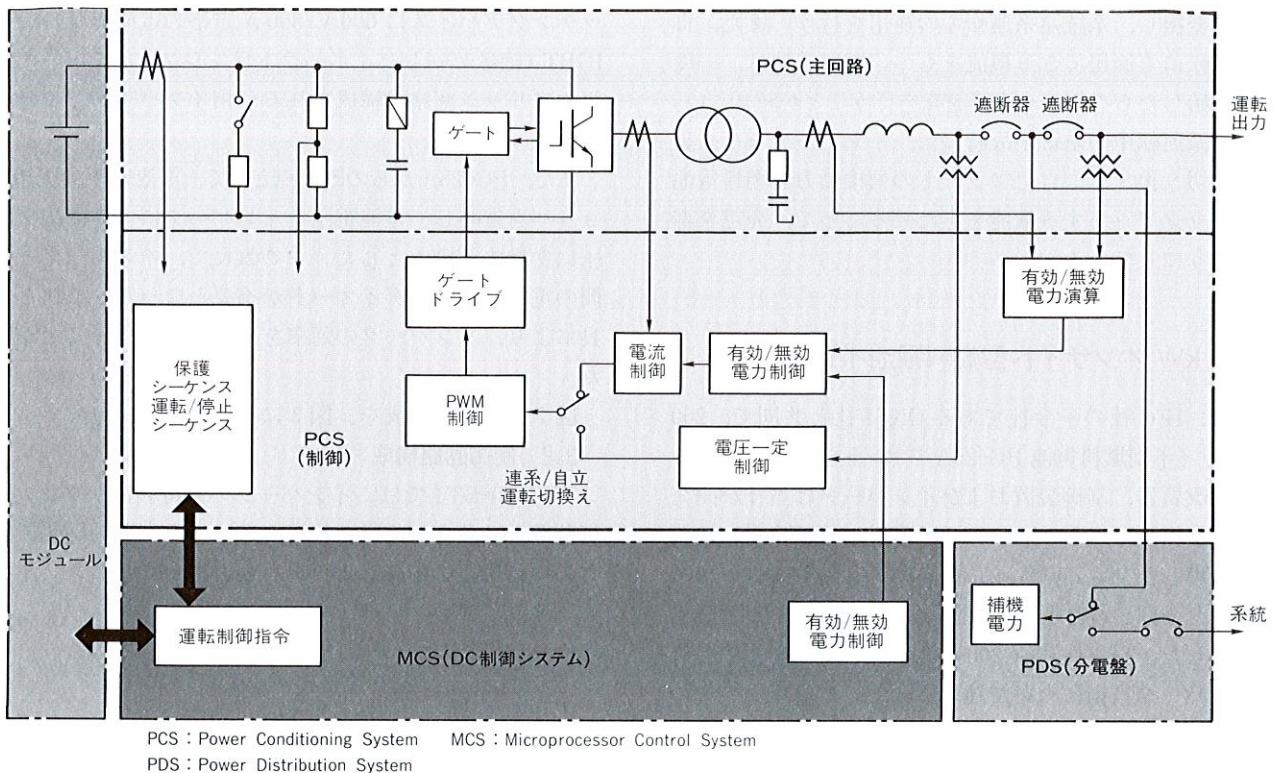


図4. 200 kW 燃料電池プラントの制御構成
System control diagram of 200 kW fuel cell plant

プラントコントローラからの指令により、運転モードを切り換える。

ータを制御している。

インバータ制御装置の特徴を以下に示す。

- (1) 制御用ハードウェアの基本部は、16ビットCPUおよび32ビットDSP(Digital Signal Processor)で構成している。
- (2) 制御機能として有効電力・無効電力制御、電流マニアルアップ制御、電圧一定制御をもち、上位制御系からの指令により連系、待機、停止などの運転モードの切換えを行う。
- (3) 主回路のゲート制御には台形波PWM(パルス幅変調)制御方式を採用し、同じ電池電圧で従来より15%程度高い交流出力電圧が得られる。
- (4) PIO(プロセス入出力)による指令入出力以外に、シリアル通信を行うことで、インバータの各種状態量や運転モードをプラント制御装置に転送している。また、故障発生時の解析診断用として故障記録機能をもつ。

図4に200 kW燃料電池プラントの制御構成を示す。

4 今後の取組み

今後、燃料電池の普及を推進するためには、インバータとしてもさらなる小型化、高機能化、コスト低減が求められている。

小型化に関しては、現在複数の基板で構成されている制御装置のワンボード化、次世代素子の適用による主回路サイズの低減などに取り組んでいく。高機能化に関しては、燃料電池プラントの並列運転を可能とすることで、簡単に出力容量を上げるパララン運転機能などを検討している。

また燃料電池単体ではなく、エンジン発電機などの電源との組合せによる信頼性の高い分散電源システムの検討も実施している。

5 あとがき

当社は、200 kW オンサイト型燃料電池の本格的な普及を目指し、装置の小型化、コスト低減を図ってTFC200-ST1を開発した。今後も燃料電池プラントのさらなる普及を推進するため、燃料電池プラントおよびインバータの開発に取り組む所存である。

(横山／田中)

太陽光発電インバータ

Photovoltaic Inverters

1 まえがき

系統に連系する太陽光発電システムにおいて、余剰電力を電力会社が積極的に買い取る施策が1992年に始まった。その後、システムの価格が低下したことや、システム設置に対する補助金制度もあることから、特に住宅用システムの普及が加速している。

太陽電池には出力が最大となる動作点があり、この動作点は日射強度や太陽電池温度などの気象状況により変化する。インバータにはこの最適点に追従する最大電力点制御が望まれる。また、系統連系に関し、電力品質、系統の保護、保安への悪影響を防ぐための技術的事項が、通商産業省資源エネルギー庁通達の系統連系技術要件ガイドラインや、(社)日本電気協会発行の分散型電源系統連系技術指針の中でとりまとめられている。

一般に、系統連系方式の太陽光発電システムは、太陽電池のほかにインバータ、絶縁変圧器、連系保護装置などの周辺装置で構成される。周辺装置は住宅内に設置されるために特に小型化が望まれ、一体化している例も多い。当社は1994年に絶縁変圧器、連系保護機能を内蔵した5kW出力のインバータを商品化したが、変圧器の存在によりサイズ、質量は必ずしも市場要求を満たすものではなかった。そこで、変圧器のないトランスレス回路方式で、小型、低価格化を図ったインバータを開発し、商品化した。これらのインバータは、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から当社が受託した研究で開発した成果を活用している。

一方、5kWを超えるシステムでは、容量や系統の電気方にさまざまな組合せが考えられるため、単位システムを組み合わせる方式を開発中である。

ここでは、住宅向けトランスレスインバータに採用されている技術概要と、容量拡大のシリーズ化について述べる。

2 個人住宅向けトランスレスインバータの開発

2.1 トランスレス化による新技術

変圧器を内蔵したインバータの例では、全体の質量が大きく、床に据え置く設置方式となり、住宅内の設置場所には制約があった。変圧器の質量は全質量の約1/2を占め、ユニットサイズにも大きく影響していた。変圧器のないトランスレスインバータは、質量が小さくなるために壁掛け式の設置が可能となり、設置場所の自由度が広がっている。

変圧器の機能の中には、電気方式や電圧レベルの変換が

ある。単相2線式と3線式の変換や、系統電圧の変更など、変圧器を交換することでさまざまな系統に適応できる。これに対し、トランスレスインバータは、現在の個人住宅への配電方式にもっとも多い単相3線方式専用としていること、これらの変圧器の機能を不要としている。

出力段に変圧器のあるシステムでは、インバータ回路から発生する電流の直流分は変圧器で除去され、系統には流出しない。直流分は、柱上変圧器の直流偏磁を引き起こす可能性があるため、分散型電源系統連系技術指針の変圧器の省略に関する記述でも、出力側に直流検出器を備えることや、直流を検出したときには運転を停止する機能をもたせることを義務づけている。トランスレスインバータには、高精度の電流検出回路を採用し、定常の直流分流出量を異常値(定格電流の1%)の数分の一に低減している。また、直流検出回路を備え、故障などによって直流分が異常値に達したときには、インバータを停止させる保護機能がある。

図5にトランスレスインバータの主回路概要を示す。インバータ回路を二組の単相ハーフブリッジ回路で構成することで、出力を電気的に単相3線とし、各回路個別に電流を制御する。ハーフブリッジ方式に必要な二つの直流電源のうち、一方は太陽電池をそのまま利用し、もう一方は太陽電池を入力としたコンバータ回路により供給される。連系中は系統の中線接地電位と太陽電池の正極電位とを等しくしているため、直流各部の電位は接地電位に対して固定され、スイッチングによる大幅な電位変動は発生しない。

なお、スイッチング回路ではIGBTを高周波PWMで制御している。この結果、ひずみの小さい正弦波電流を出力しているほか、1/2出力から定格出力まで変換器効率は93%以上となっている。

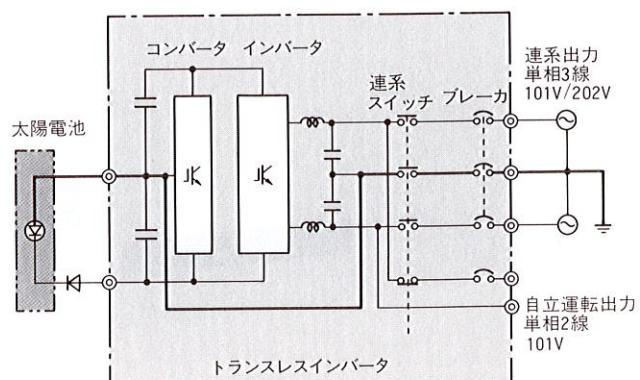


図5. 太陽光発電用トランスレスインバータの主回路概要 インバータ出力は電気的に単相3線であり、その中性電位と太陽電池正極の電位は等しくなっている。

Main circuit of transformerless inverter for photovoltaic cells

2.2 仕様

表2にトランスレスインバータの仕様を示す。

表2. 太陽光発電用トランスレスインバータの仕様
Specifications of transformerless inverter for photovoltaic cells

定格出力	3.5 kW (110%連続出力可能)
定格入力電圧	DC 200 V
入力電圧範囲	DC 160 V~350 V
定格交流電圧 周波数	AC 101 V (単相 3 線) 50/60 Hz
電力変換効率	93%以上
保護機能	直流地絡検出、ほか
単独運転防止	受動的：電圧位相跳躍検出 能動的：周波数シフト方式
付加機能	系統電圧バランス制御 系統電圧上昇抑制機能 (進相力率制御、出力制限) 自立運転
冷却方式	自然冷却
寸法 (mm)	580(W) × 330(H) × 180(D)
質量	20.5 kg
据付け方式	壁面固定
その他	系統連系技術要件 ガイドライン準拠

インバータは連系保護機能を内蔵し、(財)日本電気用品試験所による系統連系技術要件ガイドラインへの適合性の確認試験を受け、認証登録されている。

2.3 構造

図6にトランスレスインバータの外観を示す。

ユニットは薄型、壁掛け式としたので、外観的に圧迫感がない。内部に冷却ファンをなくし、自然冷却方式としたので低騒音である。



図6. 太陽光発電用トランスレスインバータ トランスレス化により薄型、壁掛け方式となった3.5 kW太陽光発電用インバータ。
Transformerless inverter for photovoltaic cells

2.4 電圧上昇対策

各住宅によって系統引込み状況には差がある。引込み配線が長い場合はインピーダンスが大きくなり、発電によっ

て電圧が上昇しやすくなる。電圧上昇を抑制するために、電圧に対して電流の位相を進めて(系統からみて遅れて)出力する力率制御機能を設けている。さらに電圧上昇が継続する場合には、出力を制限することで電圧上昇を抑制し、住宅内負荷の安全を確保している。また、負荷の片寄りによって単相3線の電圧不balanceが発生した場合、電圧の高い側の出力を低減し、電圧の低い側の出力を増加することで電圧のバランス化を図る機能も備えている。

2.5 自立運転機能

災害などで系統が喪失した場合にも発電可能な、自立運転機能を標準装備している。自立運転の発電は日中に限られ、発電能力も日射に影響されるが、ある程度の負荷ならば運転を継続できる。

自立運転をする場合、インバータ回路は電圧を制御する方式に切り替わり、連系スイッチはオンせずに専用端子だけに電圧を出力する。連系運転から自立運転への移行は、連系用の出力遮断器(ブレーカ)を遮断することから始まる。連系スイッチとブレーカの2か所で電路が遮断されるため、系統からは確実に切り離されることになる。ブレーカを投入した場合には速やかに自立運転を中止し、連系運転に備える方式としている。

2.6 単独運転防止方式

連系運転中に系統が喪失したにもかかわらず、インバータが運転を継続する状態を単独運転と称する。この状態は、系統の復旧作業や再投入時の安全性および信頼性にかかる現象なので、単独運転を確実に防止する手段が必要である。

トランスレスインバータでは、単独運転防止に独自の周波数シフト方式を採用している⁽³⁾。系統が喪失したときには自動的に速やかに出力周波数を発散させ、周波数異常を発生させることで運転を停止する方式である。シフト後の周波数には制限値があり、負荷に対しては安全性を確保している。この方式では、誤動作や不動作領域がないのが特長である。

2.7 外部モニタ

ユニットの表示部には、発電電力と積算の発電電力量の二つの量が交互に表示される。インバータが監視しにくい場所に設置された場合を想定し、本体から離れたところでも運転状況を認識できるモニタボックスを付属品として準備している。

3 インバータのシリーズ化構想

連系用インバータは出力の電流を制御するため、単位ユニットを並列に接続することで容量を拡大できる。5 kWを超えるシステムでは三相3線方式が多く、開発したトランスレス方式は適用できず、変圧器をもつシステムが前提と

なる。なお、入力である太陽電池側は一系統とする要求が多い。

3.1 小容量システムの並列接続

開発したトランスレスインバータを利用する場合、太陽電池アレーとインバータの組合せを単位システムとして、このシステムを複数並列に接続することで発電容量を拡大できる。

太陽電池アレーの一部に影ができる場合など、アレーの一部の発電能力が低下すると、アレー全体の発電量が必要以上に低下することがある。小容量のシステムを並列に接続した場合は、それぞれのシステムの太陽電池アレーの特性を最大限に引き出せる特徴がある。ただし、この方式はシステムの数だけ入力や出力の配線や開閉器が増加するため、実際には市場要求が少ないのが現状である。

3.2 三相 3 線化

図 7 に三相 3 線システムの構成を示す。三相 3 線システムは、変圧器を含んだ単相 2 線式の単位ユニット 3 組で構成する。直流側は一括で並列とし、出力側は系統のそれぞれの線間に接続する。太陽電池の最大電力点制御は一つのユニットで実施し、他のユニットはその結果に従って同一の出力をする。この結果、最大電力点制御の情報や各ユニットの異常情報を授受するインターフェースが必要となる。

現在、単位ユニット出力を 7 kW 程度とする 20 kW 出力の三相 3 線システムを開発中である。

今後、単位ユニット出力を増加して、20 kW を超えるシステムも開発していく予定である。

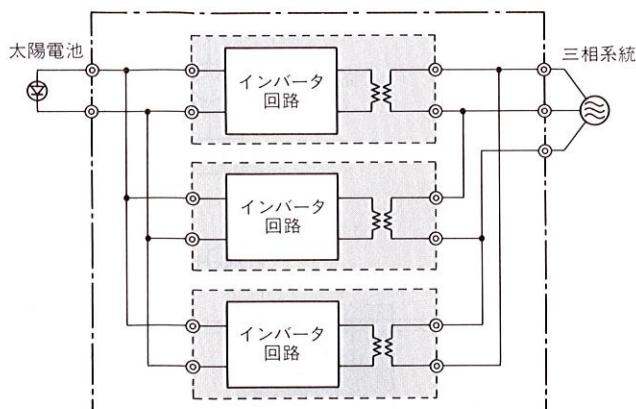


図 7. 三相 3 線システムの構成 単相 2 線式の単位ユニットを組み合わせて三相化する。

Configuration of three-phase system

3.3 容量拡大

単位ユニット出力を増加させるほかに、三相 3 線システムを核として並列接続することでも容量が拡大できる。一つのシステムで太陽電池の最大電力点制御を実施し、他のシステムはその結果により出力を制御するため、システム間の情報の授受が必要であることは三相化のときと同様である。開発中の三相システムを複数並列接続することで、20 kW 単位のシリーズ化が可能となり、例えば 5 台分の一括運転によって 100 kW のシステムも構築できる。

4 あとがき

高効率、小型、低価格化を目指した個人住宅向けトランスレス方式のインバータと、5 kW を超えるインバータシステムの構想について紹介した。

個人住宅向けのインバータは、急速な普及に伴って価格競争の時代に突入しており、さらに低価格化のための努力の継続が必要である。
(木本／大和田)

文 献

- (1) 吉田修一、他：オンサイト用燃料電池の製品化、東芝レビュー、48、1、pp.37-41 (1993)
- (2) 田中 進、他：燃料電池プラントにおける電気・制御システムの開発、FCDIC (1995)
- (3) 岡土千尋、他：太陽光発電用インバータの新しい単独運転検出保護、電気学会論文誌 B、114、7、pp.732-738 (1994)

横山 智紀 Tomoki Yokoyama, D.Eng.



府中工場パワーエレクトロニクス部、工博。
燃料電池インバータの開発設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Works

田中 進 Susumu Tanaka



電力事業部燃料電池事業推進部主査。
燃料電池電気・制御システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。
Fuel Cell Systems Div.

木本 兼一 Ken'ichi Kimoto



府中工場モータドライブ・電子制御装置部。
太陽光発電用インバータの開発設計に従事。
Fuchu Works

大和田 晃司 Kohji Ohwada



電力事業部新エネルギー技術開発部。
太陽光発電システムのエンジニアリング業務に従事。
Power Systems Div.