

燃料電池用 パワーコンディショナーの開発

Development of Fuel Cell Power Conditioner

神部 晃^{※1}
Akira Kanbe

桑原 祐^{※1}
Tasuku Kuwahara

青山 浩二^{※1}
Kouji Aoyama

有川 清二^{※1}
Seiji Arikawa

加藤 英成^{※1}
Hidenari Katou

辻本 賢次^{※1}
Kenji Tsujimoto

1. はじめに

近年、地球環境保護を目的として、太陽光や風力などの自然エネルギーを利用した発電システムが普及してきている。また、化石エネルギーに代る次世代エネルギーの開発も人類全体の重要課題となっている。こうした情勢の中、最近盛んに研究・開発されているのが、燃料電池発電システムである。

燃料電池は、水素と酸素の化学反応により直流電力を発生する発電装置である。発電の際には熱と水が発生するが、環境に有害な物質は発生しない。燃料電池発電システムでは、この熱を暖房用や給湯用のエネルギー源として有効利用できるため、総合効率が高くなる。有害物質を発生しない上に、総合効率が高いので、燃料電池発電システムは、クリーンなエネルギーを供給するシステムとして、世界的に注目され、各国企業が競って開発を進めている。

当社は、以前から、太陽光発電システムに使用するパワーコンディショナー（以下、PVPC：Photo Voltaic Power Conditioner）を製造し、多くのお客様に納入してきた⁽¹⁾⁽²⁾。

今回、PVPCで培った技術を継承し、新たな技術を加えて、燃料電池用パワーコンディショナー（以下、FCPC：Fuel Cell Power Conditioner）を開発した。

本稿では、最初に、燃料電池発電システムの概要について簡単に説明し、次に、今回開発したFCPCの概要とパワーコンディショナー（以下、PC：Power Conditioner）のトランスレス化に伴う新しい直流検出技術について紹介する。

2. 燃料電池発電システムの概要

2.1 燃料電池発電の種類

現在開発が進められている燃料電池は、主に4種類ある。その種類と特徴を表1に示す⁽³⁾。

2.2 燃料電池発電システムの構成

表1に示した4種類の燃料電池に対応して、それぞれの特徴に適した燃料電池発電システムが開発されている。燃料電池発電システムの全体構成を示す一つの例として、表1のリン酸型燃料電池（PAFC）を使用した発電システムの構成例を図1に示す⁽⁴⁾。

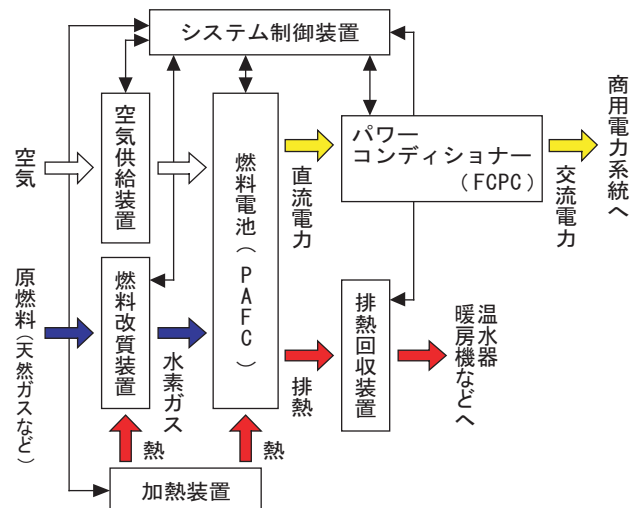


図1 燃料電池発電システムの構成例

表1 燃料電池の種類と特徴

種類	電解質	伝導イオン	動作温度	発電効率	原燃料	特徴	用途
固体高分子型 (PEFC)	イオン交換膜 (固体高分子膜)	H ⁺	約80℃	35~45%	共通燃料* など	・起動、停止が容易。 ・低温動作、小型化が可能。 ・高価な白金系触媒が必要。	自動車用、家庭用など
固体酸化物型 (SOFC)	YSZ (イットリア安定化ジルコニア、セラミックス)	O ²⁻	約1000℃	50~60%	共通燃料、石炭ガス、COなど	・発電効率が高い。 ・排熱を複合発電に利用可能。 ・起動、停止に長時間を要する。	オンサイト用、分散配置用、火力代替用 など
リン酸型 (PAFC)	H ₃ PO ₄ (リン酸水溶液)	H ⁺	約200℃	35~45%	共通燃料、廃棄物ガス など	・既に実用化段階にある。 ・コジェネレーション向き。 ・高価な白金系触媒が必要。	オンサイト用、バイオマス発電用 など
溶融炭酸塩型 (MCFC)	Li ₂ CO ₃ とK ₂ CO ₃ の溶融混合物 (溶融炭酸塩)	CO ₃ ²⁻	約650℃	45~60%	共通燃料、石炭ガス、COなど	・発電効率が高い。 ・大規模発電プラント向き。 ・炭酸塩に対する耐食性が必要。	オンサイト用、分散配置用、火力代替用 など

* 共通燃料：天然ガス、LPG、メタノール

※1 開発・環境事業部 新技術開発G

システム構成としては、燃料電池本体と、これを適正に動作させ、電気と熱を取出す周辺装置から構成されている。

2.3 FCPCの概要

FCPCは、図1に示すように、燃料電池発電システムを構成する主要装置の一つで、燃料電池が発電した直流電力を交流電力に変換して、商用電力系統(以下、系統)に供給する装置である。

燃料電池の発電電力は、システム制御装置が制御する燃料(水素)の量で決まる。そのため、FCPCはシステム制御装置からの指令にしたがって燃料電池から取出す直流電力を制御する。またFCPCは、交流出力電流を制御し、力率1で歪みの小さい電流を系統に供給する。

系統連系を安全に行なうため、系統やFCPC自体に異常が発生した場合には、速やかにそれを検出してFCPCを停止させ、燃料電池や系統からFCPCを切離す。

次に、今回当社が開発したFCPCの概要を紹介する。

3. 開発品の概要

3.1 PVPCからの技術展開

PVPCは、太陽電池が発電した直流電力を交流電力に変換して系統に供給する装置である。系統に連系する電力変換装置という観点から見ると、PVPCとFCPCの間には、技術的に類似した部分が多くある。

一方、PVPCとFCPCとの間には、表2に示すような動作の違いがある。このような動作の違いは、入力源である太陽電池と燃料電池の特性の違いに起因するものである。

今回は、PVPCで培った技術をベースとして、その上に、燃料電池特有の性能・機能に対する技術を新たに付加して、FCPCを開発した。

3.2 PCのトランスレス化

当社従来品のPVPCは、出力に商用周波絶縁トランスを用いている。この方式は、絶縁の信頼性は高いが、装置が大型になるという問題があった。

今回のFCPCでは、絶縁トランスをなくした、いわゆる

トランスレス方式を採用して、小型・軽量・高効率・低コスト化を図ることにした。

トランスレス方式では、直流側と交流側が非絶縁となるため、次の2点が大きな問題となる。

第一の問題点は、FCPCが故障した場合などに、直流電流が系統へ流出する恐れがあるという点である。この直流電流は、交流系統の線間を流れ(ノーマルモード)、受電変圧器を直流偏磁させるという問題を引き起こす。

次の問題点は、直流回路側で地絡が発生すると、系統の接地回路を通じて大地を帰路とした(コモンモード)直流の地絡電流が流れてしまうという点である。

これらに対する保護機能として、直流流出保護機能と直流地絡保護機能が必要となる。今回のFCPCでは、新たな検出技術を開発してこれらの機能を実現した。これらについては、次章で詳細を説明する。

3.3 仕様

今回開発したFCPCは、小容量据置タイプの燃料電池発電システム用である。このシステムの用途としては、集合住宅やコンビニ、レストランなどを対象とする小規模業務用のもので、容量的には10kW以下である。

このFCPCの仕様を表3に示す。また、その外観を図2に示す。

3.4 回路構成

本機の回路構成を図3に示す。図に示すように、主回路は、昇圧チョッパとフルブリッジインバータの組合せ構成としている。出力のノイズフィルタを強化し、絶縁トランスのないトランスレスPCを実現している。

燃料電池の出力電圧が100V程度と低いので、昇圧チョッパを用いて直流電圧を所定の電圧まで上げ、インバータにてAC 200V系統と連系させるようにした。

トランスレス方式としたことで、当社の従来品(10kW、商用周波絶縁トランス方式)に比べ、1kWあたりの容積が1/2と大幅に小型化された。

同図に示すコントローラは、FCPCの運転制御や入出力電流制御、保護制御を行なうもので、マイコンを使用したデジタル回路で構成し、燃料電池の種類ごとに異なる仕様に対して、ソフト変更で対応可能とした。

表2 PVPCとFCPCの動作の差異

PCの種類	入力源	入力源の特性	入力電圧	発電量制御	PCの電力制御	起動/停止
PVPC	太陽電池	定電流	高 (200~300V)	不可 (日射依存)	・自動 ・太陽電池電圧コントロールによる最大電力制御	自動 (開放電圧検出)
FCPC	燃料電池	定電圧	低 (100V以下)	可 (燃料制御)	・他動(システムからの受動) ・燃料電池電流コントロール	他動 (システムからの受動)

表3 FCPCの仕様

項目	仕様	
運転機能	系統連系運転機能	
直流入力	定格入力電圧	DC 102V
	許容入力電圧範囲	DC 0~160V
	運転入力電圧範囲	DC 65~145V
	入力電流リップル	3 A (p-p) 以下
	入力突入電流	6 A 以下
交流出力	電気方式	単相2線式(単相3線式の系統に連系)
	定格出力電圧	AC 202V
	定格出力	7 kW (最大容量8.2 kVA (力率0.85))
	定格周波数	50/60 Hz
	電力変換効率	92%以上(定格出力時)
	出力力率	自動電圧調節機能動作時: 0.85以上 自動電圧調節機能不動作時: 0.95以上
	出力電流歪率	5%以下(連系運転でかつ定格出力時)
	出力電流高調波含有率	各次3%以下(連系運転でかつ定格出力時)
絶縁方式	非絶縁方式(トランスレス方式)	
主回路方式	昇圧チョップパ+フルブリッジインバータ	
寸法・質量	500(W)×350(H)×270(D)・50kg	
設置場所・周温・冷却方式	屋内・-10~40℃・強制風冷	



図2 FCPCの外観

4. 新規開発の検出技術

4.1 保護機能の仕様

今回、PCのトランスレス化に伴い、直流流出保護機能と直流地絡保護機能に関して、独自の検出技術を開発した。これらの保護機能について、検出レベルや動作の仕様を表4に示す。

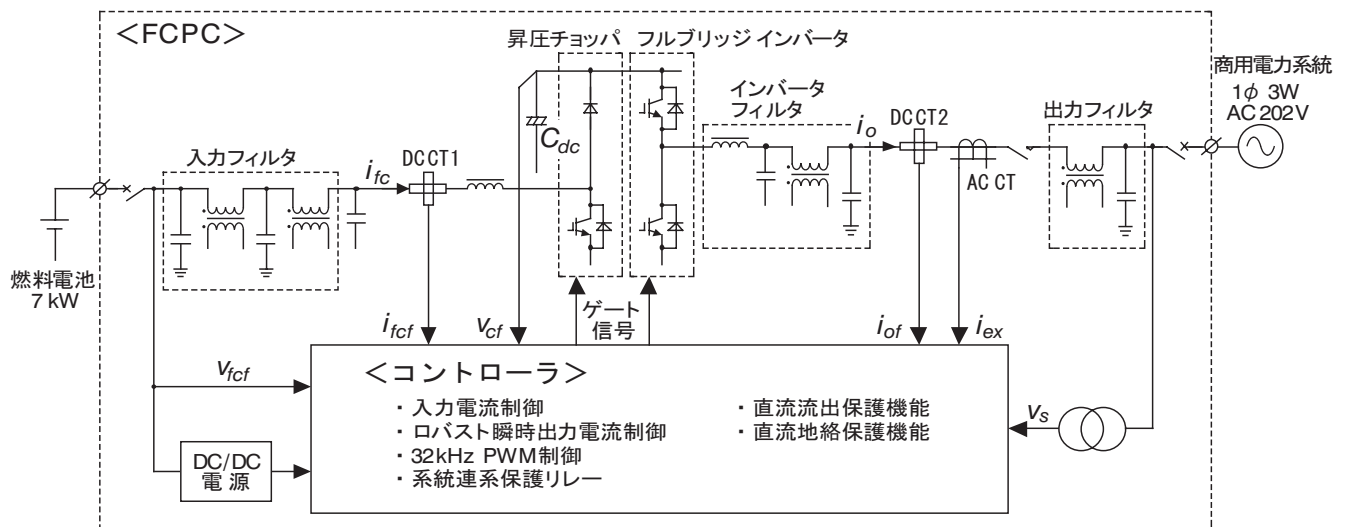
4.2 直流流出検出技術

FCPCは、出力電流を瞬時値制御して、交流のみを出力しているため、基本的には直流電流が系統へ流出することはない。しかし、何らかの異常により直流電流がFCPCから系統へ流出したときに、FCPCを停止し、燃料電池および系統からFCPCを切離す直流流出保護機能が必要となる。

この場合、FCPCの出力交流電流に直流が重畳して系統へ流出する。電流通路はFCPCの出力線路が往復路となるので(ノーマルモード)、単相出力の場合、1線に設置した電流センサで、直流流出電流の検出が可能である。しかし、電流センサ出力の交流成分を除去して直流成分のみを検出する技術が必要となる。ところが、直流成分は交流成分に比べて微少であるため、交流定格電流をフルスケールとする検出系では、検出系自体のオフセット誤差が問題となる。

この問題を解決するために、電流センサなどの検出系のオフセット誤差を除去して、出力電流に含まれる直流電流を、高精度かつ高速に検出する技術を開発した。

今回開発した直流流出検出技術を図4に示す。直流電流を検出するフィルタとオフセット誤差の除去方法について、次に説明する。



(1) 直流電流検出フィルタ

一般に、交流成分の多い信号から直流成分のみを取出す方法として、ローパスフィルタが用いられるが、通常のフィルタでは遮断周波数を低くする必要があるので、応答速度が遅くなり、検出に時間がかかってしまう。

これに対して、FIR(Finite Impulse Response)型とIIR(Infinite Impulse Response)型のデジタルフィルタを組合せて、応答速度の速いフィルタを実現した。それぞれの演算式を図4に示す。FIR型は奇数調波除去フィルタ、IIR型はローパスフィルタとしている。二つのフィルタを組合せた場合の周波数特性を図5に示す。この図は、系統周波数が50Hzの場合のフィルタ特性である。

(2) オフセット誤差の除去方法

運転開始直前の出力電流は実際には零であるが、検出系では誤差出力が出てしまう。この値を、出力電流の検出系オフセット誤差として記憶し、それを運転中の出力電流値から引き算することで、オフセット誤差を除去するようにした(図4)。

(3) 検出・保護動作確認試験

動作確認試験の結果、仕様どおりに動作していることを確認した。

4.3 直流地絡検出技術

FCPCが接続される低圧系統は1線接地されているので、非絶縁のFCPCでは、直流側で地絡が発生すると、大地-系統-FCPC出力線路の電流通路で、直流の地絡電流が流れる。この電流は大地帰路(コモンモード)の電流であるため、FCPCの出力線路に設置した零相電流検出器で検出が可能である。しかし、仕様に示したような微小な直流地絡電流を検出するためには、高価な零相DCCTを必要とするが、安価な零相ACCTを用いて検出する独自の技術を開発した。

(1) 検出原理

ACCTに直流電流が流れると、CTの鉄心が飽和して、CTの励磁インダクタンスが減少し、励磁電流が増加するという現象を利用した直流地絡検出方式を検討した。

この方式には、直流地絡が解消しても、残留磁気により鉄心が偏磁した状態になるという問題がある。このため、残留磁気を除去する方策が必要となる。

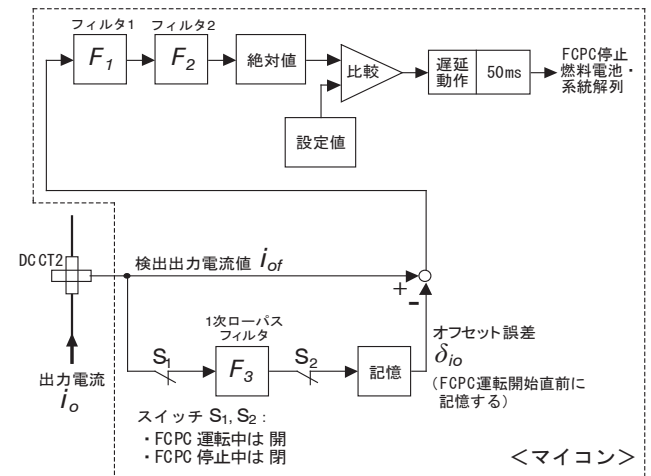
(2) 検出技術の説明

新しい直流地絡検出技術を図6に示す。

ACCTには一定の交流バイアス電圧を印加しておき、直流地絡電流が流れるとACCTの鉄心が飽和するようにしている。

表4 保護機能の仕様

保護機能	仕様
直流流出保護	<ul style="list-style-type: none"> 直流流出電流検出レベル： 定格出力電流(実効値)の1%以下の直流 (本機では0.35A以下) 動作：0.5秒以内にFCPCを停止し、燃料電池および系統から解列する。
直流地絡保護	<ul style="list-style-type: none"> 直流地絡電流検出レベル：DC 0.1A以下 動作：0.1秒以内にFCPCを停止し、燃料電池および系統から解列する。



・フィルタ F₁ の入出力関係式

$$y(n) = \{ X(n) + 2X(n-p) + X(n-q) \} / 4 \dots\dots (1)$$

X(n): 現時点の入力, y(n): 現時点の出力

X(n-p): 系統周波数の半周期前の入力

X(n-q): 系統周波数の1周期前の入力

特徴：系統周波数の奇数調波成分を除去する。

・フィルタ F₂ の入出力関係式

$$y(n) = e^{-2\pi fc\Delta t} y(n-1) + (1 - e^{-2\pi fc\Delta t}) x(n-1) \dots\dots (2)$$

y(n): 現時点の出力

y(n-1): 1 サンプル前の出力

x(n-1): 1 サンプル前の入力

fc: 遮断周波数(5Hz), Δt: サンプリング間隔

特徴：遮断周波数が低い1次ローパスフィルタ。

図4 直流出検出技術

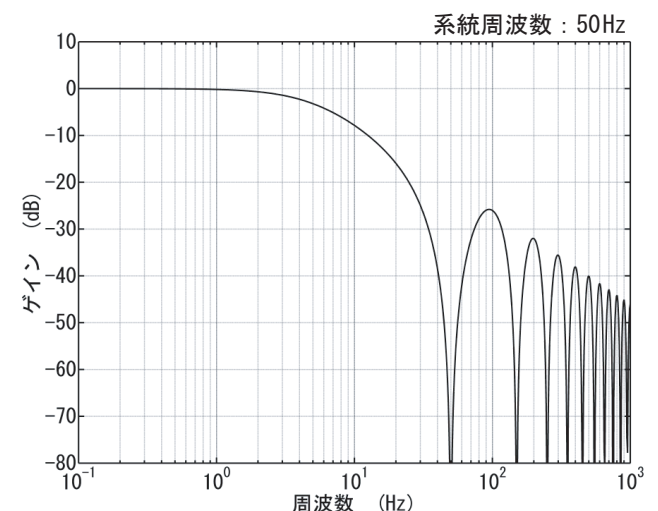


図5 フィルタ特性

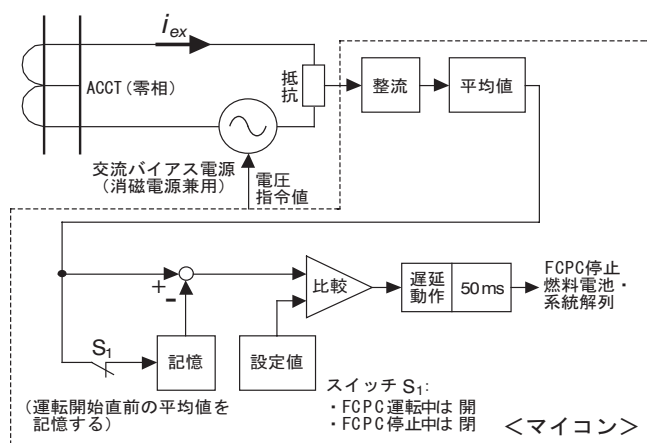


図6 直流地絡検出技術

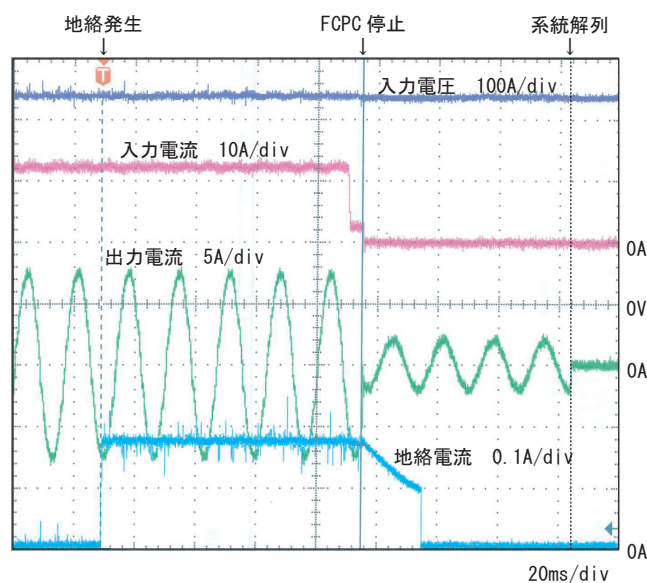


図7 直流地絡保護試験結果

鉄心が飽和するとACCTのインダクタンスが減少するので、2次側電流 i_{ex} が増加する。この増加分を計測することにより直流地絡を検出することにした。

具体的には、 i_{ex} を整流した後、その平均値を求め、FCPC運転開始直前に記憶した平均値を引いて増加分を求めて精度の向上を図っている。なお、平均値としては、交流バイアス電源周波数の1周期を区間長とする移動平均値を用いて、高速化を図った。

また、FCPC停止後にバイアス電圧を連続変化させることによる消磁処理を行ない、残留磁気を除去するようにした。

(3) 検出・保護動作確認試験

本技術による直流地絡保護の試験結果を図7に示す。試験は、FCPC運転中に直流側を抵抗で地絡させて行なった。同図に示す波形では、直流地絡電流が約0.2A流れている。

地絡発生後0.1秒以内にFCPCが停止し、その後、系統から解列しており、正常に保護動作することが確認できた。

5. あとがき

現在精力的に開発が進められている燃料電池発電システムに使用するパワーコンディショナー(FCPC)を新規開発した。開発にあたり、FCPCの小型・軽量・高効率・低コスト化を図るため、商用電力系統との連系を非絶縁方式(トランスレス方式)とした。

この方式を採用するためには、特に、系統への直流流出と直流地絡に対する保護という課題があった。そのため、安価でかつ確実性のある検出技術を新たに開発して、これらの課題を解決した。

今後は、お客様のニーズに応えるべく、より一層の製品改良に努め、各種燃料電池に対応した製品のシリーズ展開を図っていく予定である。最後に、本機の開発に御協力いただいた関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- (1) 佐藤、神部、ほか：「太陽光発電用インバータ(PVI)の開発」愛知電機技報 No.14 (1993)
- (2) 神部、桑原、ほか：「10kW PVインバータの開発」愛知電機技報 No.17 (1996)
- (3) 池田：『燃料電池のすべて』日本実業出版社 (2001)
- (4) 石井：『燃料電池がわかる本』オーム社 (2001)