燃料電池プラント用大容量インバータの 開発と実績

正 員 阿 部 実 東京電力(株)

1. はじめに

パワーエレクトロニクスの進歩と、効率の高い電力変換装置のニーズから、インバータの応用技術は急速に発展を遂げ、その適用は拡大の一途をたどっている。現在では、家電製品から産業用まであらゆるところで回転数制御駆動装置、無停電電源装置などの心臓部にインバータが使用されている。電力の分野では直流送電、無効電力補償装置などの流通設備に適用され、また電力貯蔵設備、太陽光発電、燃料電池発電といった直流電源をもつ新エネルギーシステムには、インバータはとりわけ重要な構成要素となっている。

燃料電池は、燃料のもつ化学エネルギーから直接電気エネルギーを取り出す発電システムで、原理的に発電効率が高く、環境性が良いという特徴をもつことから、需要地に設置可能な分散型電源やコージェネレーションシステムとして早期実用化が期待されている。

燃料電池には、リン酸型、熔融炭酸塩型、固体電解質型などの種類があり、最も実用化が進んでいるのがリン酸型であり、現在国内では約40台のシステムが実証運転を行っている⁽¹⁾。しかし、現在稼働しているシステムのほとんどは、数百kW以下の小容量のシステムで、分散型電源として期待される大容量のシステムはまだ実績が少ない。

本稿では、大容量燃料電池において重要な構成要素であり、また、分散型電源として威力を発揮するためにはなくてはならない大容量インバータにスポットを当て、その技術を紹介するとともに、東京電力の五井火力発電所に設置した11MW燃料電池プラント用の

インバータの運転実績について紹介する。

2. 燃料電池用インバータ技術

2.1 燃料電池用インバータの特徴

インバータはどのシステムにおいても、高効率、高信頼性、コンパクト性を指向して設計されるが、燃料電池のインバータについては、さらに次のような条件が必要である。

(1) 直流電圧変動に対する電圧補正機能 燃料電池は、電池本体がもつ内部抵抗のために、電圧垂下特性と呼ばれる電圧・電流特性をもち、出力上昇に伴う電圧低下が比較的大きな値(最大出力時の電圧は最低出力時に比べ10~20%程度低下する)を示す。さらに、電池電圧は経時的に低下する傾向があり、このような直流電圧の変化に対し一定の交流出力が得られるような電圧調整機能をもつ必要がある。

(2) 電池本体に対する保護機能 燃料電池は過電圧に非常にデリケートで、電池電圧が通常の電圧範囲を超えると、触媒や電極材料の劣化を招くことがあるため、インバータの起動時や停止時に生じる過渡的な過電圧を抑制する必要がある。

また、電池本体から供給される直流電流のリプルが大きい場合や、インバータから逆電流を流したりすると、同様な理由で電池本体を傷めるので対策が必要となる。

これらのことから燃料電池用インバータでは、電池本体を保護するための回路をインバータの前段に置き、プロセス側との協調をとりながら保護機能を働かせなければならない。

(3) 低電圧大電流 電池本体は、0.7V程度の起電力をもった単電池を数百枚積層して構成されているが、電圧に比較して電流が大きいのが特徴である。

小容量の燃料電池では、通常1本の電池本体で所要の容量が得られる。例えば200kWのシステムでは、電圧は200V程度であるが電流は1,000Aくらいに

Development and Test Results of Large Capacity Inverter for Fuel Cell Plant.

By Minoru Abe, Member (Engineering Development Center, Tokyo Electric Power Company).

キーワード: インバータ, 燃料電池, 自励式インバータ, GTO サイリスタ, PWM

なる。

大容量燃料電池プラントの場合は、この電池本体を複数用いて、直列あるいは並列に接続して所要の容量を得る。インバータにとっては、直列数を増やし、電圧を高くする方が変換効率の点では有利であるが、電池本体にとっては、直列数を増やすと対地電圧が高くなり、絶縁対策の点で問題となる。実際の設計ではこれらのトレードオフで直列数・並列数が決定されるが、いずれにしても、燃料電池用のインバータには低電圧大電流の電力変換が課せられる。

2.2 燃料電池用大容量インバータ

燃料電池には、オンサイト用と呼ばれる50～1,000 kWの比較的小容量のものと、事業用などと呼ばれる5,000～10,000 kWの大容量のものがある。

オンサイト用燃料電池のインバータでは経済性やコンパクト性が重視されるのに対し、事業用燃料電池の大容量インバータではさらに変換効率、信頼性が重視される。また、前者が規模的に無停電電源装置など汎用のインバータと同等の技術基盤にあるのに対し、後者は容量が大きいゆえの難しさがああり、以下に述べるような技術を要する。

(1) 大容量素子の採用 インバータを大容量化するとともに、信頼性、変換効率、コンパクト性を追求するためには、可能な限り電流容量の大きい変換素子を用いることが必要である。

数千Aの容量をもつ変換素子としては、サイリスタ、GTO (Gate Turn Off Thyristor) などがあげられるが、サイリスタは自己消弧型素子ではないため複雑な転流回路が必要になることから、もっぱらGTOサイリスタが使用される。現在、GTOは最大6kV、3kAおよび4.5kV、4kAまでの素子が開発されている。

しかし素子の定格から決まる単位インバータブリッジの容量には限界があるため、所要の容量を達成するためには、GTOを並列接続するか、あるいはインバータブリッジの数を増やすことで対応しなければならない。実際には、GTOの並列接続については電流バランスなどの難しさもあるため⁽²⁾、インバータブリッジを複数もつ多重インバータ方式が採用されることが多い。

いずれにしても、変換素子数が増加すると使用部品数が多くなるので、可能な限り大容量(大電流)素子を使用し、回路構成を簡素化することが望ましい。

(2) 多重インバータの採用 インバータの出力には高調波が少ないことが要求される。大容量の燃料電池用インバータでは多重インバータを採用すること

で、高調波の発生を抑制する。

一般的に高調波を抑制するためにはスイッチング周波数を高くする方法が採られるが、スイッチング周波数を高くすると損失が増加する傾向がある。

インバータブリッジを複数用いて多重化することで、等価的なスイッチング周波数を上げることができ⁽³⁾。この方式を採用することで、インバータの容量を増加するとともに、高い変換効率を維持しながら高調波を抑制することができる。

また、ブリッジの数が多いほど高調波抑制の効果が大きいが、回路構成が複雑になるため、実際にはスイッチング周波数や高調波フィルタの採否も考慮した上で現実的な多重数を決定しなければならない。

なお、多重ブリッジの出力を合成する変圧器の巻線に特性のばらつきがあると、直流偏磁や高調波の増加を招くので、変圧器の各巻線の励磁特性や直流偏磁に対する制御性能を向上させる必要がある。

(3) PWM (Pulse Width Modulation) 制御方式の採用 燃料電池の電圧補正を行う方法としては、PWM制御方式や昇圧チョップを併用した方式が一般的に採用される。大容量では変換効率を重視し、回路構成を簡素化するためPWM制御のみの方式が採られる。

昇圧チョップを用いれば、インバータに入る直流電圧が一定になり、また昇圧するぶん扱う電流が小さくて済むのでインバータ側の設計が楽になる。しかし、容量の大きいものでは、大容量・高速のスイッチング素子を使用するか、あるいはチョップの多重化が必要となるため、変換効率、コンパクト性が悪くなる。

このような理由で大容量インバータでは、PWM制御方式のもつパルス幅制御で電圧調整を行う方式が採用される。

また、PWMのスイッチング周波数については、先に述べたように、多重数との関係で設定しなければならないが、実際のシステムでは多重数が3(18相変換)以上の場合は比較的低いスイッチング周波数で規定の高調波ひずみ率が達成されているようである。

なお、PWM制御方式は、パルス幅により高調波の発生量、周波数成分が変化するので、運転出力によってこれらが変化することに注意しなければならない。

2.3 燃料電池用インバータの開発経緯

実際の燃料電池プラント用大容量インバータの開発経緯について、次の3プラントを例にとり説明する。主回路構成を図1に、主要仕様を表1に示す。

(1) 五井4.5 MWプラント 1983年から1985年まで東京電力の五井火力発電所で運転された、アメ

(a) 五井4.5 MW プラント

(b) 五井11 MW プラント

(c) PAFC組合5 MW プラント

図1 インバータ主回路構成

表1 大容量インバータの仕様比較

	4.5MWプラント	11 MWプラント	5 MWプラント
定格容量(MVA)	4.8	11.8	5
定格直流電圧(V)	2,800	2,060	1,074
定格直流電流(A)	1,607	6,000	4,800
変換素子	サイリスタ 1.8 V 1 kA (54 個)	GTO 5 kV 2.5 kA (36 個)	逆導通 GTO 4.5 kV 3 kA (30 個)
多重数	3(18 相)	3(18 相)	5(30 相)
PWM 周波数 (Hz)	150	150	180
出力変圧器構成	移相変圧器 合成変圧器 出力変圧器	出力変圧器	高インピーダンス型出力変圧器
冷却方式	強制風冷 (ヒートパイプ)	強制風冷	水 冷

リカの UTC 社 (IFC 社の前身) 製の電力事業用に開発された燃料電池プラントである。

無効電力調整機能も有したこのインバータは、変換

図2 五井11 MW プラント外観図

表2 五井11 MW プラントの主要仕様

定 格 出 力	11 MW(交流送電端)
出 力 電 圧	66 kV
出 力 調 整 範 囲	30~100%
無効電力調整範囲	±11 MVar
発電効率 (HHV)	42.9%(交流発電端)
熱 回 収 率	31.6%(7.25 Gcal/h)
電 池 ス タ ッ ク	670 kW/スタック×6 直列×3 並列
燃料・使用量(定格時)	天然ガス・2,100 m³/h
NO _x 濃 度	10 ppm 以下
騒 音 値	55 dB 以下
設 置 面 積	約 3,100 m²

素子こそサイリスタであったが、PWM 制御・多重ブリッジなど現在採用されている方式と変わりはない。燃料電池用大容量インバータの基礎がここにできたといえよう。

(2) 五井11 MW プラント 本プラントは、アメリカの IFC 社と東芝がアメリカの電力向けに設計したプラントを基に、東京電力を含め3社が国内立地に適合させるように改良設計した世界最大規模のリン酸型燃料電池プラントである。

五井火力発電所の4.5 MW 燃料電池プラント跡地に設置され1990年より実証試験を行っている。プラントの外観を図2に、プラントの主な仕様を表2に示す。

インバータは、6台の単位インバータブリッジで構成されているが、それぞれ2台がペアブリッジと称し同一の動作をするので、実質的には3多重方式のインバータである。インバータ本体の構造図を図3に、ペアブリッジの外観を図4に示す。

変換素子に大容量GTOを採用することによりインバータは簡素化され、信頼性は一段と向上した。また、

図 3 インバータ本体構造図

図 4 ペアブリッジ

千鳥結線の出力変圧器の採用により移相変圧器と合成変圧器の二つの機能が統合され、コンパクト化が進んだ。

制御装置については、系統の三相不平衡、過電圧やインバータ換気温度が運用値を越えた場合、インバータを停止することなく発電出力を 85～90% まで抑制する機能を持ち、運転の信頼性を向上させている。またゲート信号の送信などに光ケーブルを用いることで、制御装置とインバータとのアイソレーションを強化するとともに、ノイズに対する耐力を向上させている。

(3) リン酸型燃料電池発電技術研究組合 5 MW プラント⁽⁴⁾ 本プラントは、NEDO (新エネルギー産業技術総合開発機構) とリン酸型燃料電池発電技術研究組合が国のムーンライト計画および民間プロジェクトの成果を基礎技術として電気事業用 (都市エネルギーセンタ型) に開発中のプラントで、1994 年より

関西電力尼崎第二火力発電所跡地で実証試験が開始される予定である。プラントの製作は富士電機があたっている。

インバータは、5 台の単位インバータブリッジで構成された 5 多重方式 PWM インバータであり、高調波の低減効果が高い方式を採用している。

変換素子には、4.5 kV、3 kA の容量の帰還ダイオードを内蔵した逆導通型 GTO を採用しており、回路の簡素化に貢献している。また素子の冷却は水冷式でコンパクト化が図られている。さらに、出力変圧器についても、リアクトルの機能も有した高インピーダンス型出力変圧器を採用している。

3. 五井 11 MW 燃料電池プラントの運転実績

3.1 プラントの運転実績

1991 年 3 月より発電試験を開始し、4 月には定格出力運転に成功した。しかし、電池本体のトラブルが発生したため、1992 年 5 月に全 18 本の電池本体のうち 6 本を直流回路から切り離し運転を再開し、1992 年 11 月に出力 7 MW で使用前検査に合格した。この間 1992 年 12 月までに累積発電時間 4,564 時間、累積発電電力量 26,143 MWh の運転を行った。

3.2 インバータの運転実績

これまでの発電試験の中で、変換効率、高調波ひずみ率、制御機能など、設計仕様を満足することが確認できた。特に変換効率については、各負荷帯で 97% の実績値が得られ、当初の計画値である 96% を上回る効率の高さが実証された。

試験の中で経験したトラブルとしては、次のようなものがあつた。

一つは、発電試験の初期段階に発生したもので、プラントの起動、停止の際にインバータが停止する現象である。

これは、起動あるいは停止時の過渡的な軽負荷状態において、他相の GTO が転流する際にスナバ回路に振動電圧が生じ、OFF 中の GTO のゲート電圧が振られて誤動作するもので、回路定数を変更することで対策を行い、解決した。

また、プラント運転中の不具合としては、ゲートドライブ用電源装置の異常によるものがあつた。

これは、インバータ盤下部に設置してある電源装置が、内部の基板に結露を生じたため出力電圧異常となったもので、基板の防湿対策、電源装置の換気の向上により対策を講じた。本プラントは海岸に近接して設置されており、環境条件の悪さも一因であつた。

4. 今後の課題

大容量燃料電池プラントを実用化するためには、プラントのコストダウン・コンパクト化が一大課題といえよう。

インバータについてコストダウン・コンパクト化するためには、汎用大容量変換素子の採用によるインバータ構成の簡素化、高インピーダンス出力変圧器の採用による直列リアクトルの省略、コンパクトな冷却方式の採用などが必要と考えられる。

このような観点から、我々は現在、11 MW 燃料電池プラントで得られた知見を反映しつつ、次期大容量燃料電池プラント用インバータを実現するための設計検討を行っている。

また、分散型電源用の大容量インバータとしては、内部故障だけでなく、系統動揺や系統事故などの外乱に対しても十分な信頼性をもつことが望ましい。この点はまだ十分に検証されていないが、今後コストダウンを阻害しないことを念頭におきつつ、さらに信頼性・耐久性の向上を図っていきたい。

そのためには、多くの運転実績を積むとともに、インバータ回路の標準化を図ること、変換素子などの最適な設計裕度を検討することも考えていかなければならないと思われる。更に、電力系統との関係で実機では困難な試験については、これを補完するためのシミュレーションによる解析技術も、ますます重要になると考えられる。

5. あとがき

以上、燃料電池用大容量インバータの技術および 11 MW 燃料電池プラント用インバータについて紹介

した。

大容量インバータを実現するためには、変換素子の開発や、回路技術・制御技術の向上など、メーカーの技術開発に負うところが大きい。大容量であるがゆえにメーカーサイドでの検証が難しい面もあるので、メーカー・ユーザ協力体制のもとに開発を進めていく必要があると思われる。

この意味でも、現在実施している五井 11 MW プラントの実証試験を通じて、できるだけ多くのデータを採取し、燃料電池のみならず、他の新エネルギーシステムにも必要となるであろう今後の大容量インバータの技術開発のために役立てていきたいと思う。

(平成 5 年 1 月 29 日受付)

文 献

- (1) 燃料電池発電システム編集委員会編：燃料電池発電システム・(平 4-10) オーム社
- (2) 関、他：ターンオフサイリスタ GTO の原理と応用 p. 119 (昭 58-4)
- (3) 植田：「大容量電力変換—大容量パワーのエレクトロニクス制御」電学誌, 112, 712(平 4-9)
- (4) 小清水、他：「500 kW 級および 1000 kW リン酸型燃料電池の開発」機械学会 (No. 920-93) シンポジウム講演論文集 p. 19(平 4-11)

阿 部 実 (正員)

昭和 30 年 12 月 9 日生。55 年 3 月電気通信大学大学院応用電子工学科修士課程終了。同年 4 月東京電力(株)入社。開発研究所燃料電池研究室にて燃料電池の研究開発に従事。現在、同研究室主任研究員。