

特集

エネルギーシステムの計装制御

燃料電池プラントの計装制御

Control Systems of Fuel Cell Power Plants

古澤 明*

Akira Furusawa

1. はじめに

リン酸型燃料電池は、最近になり実用化に近い使用形態で多数運転される様になった。早くから燃料電池発電は、クリーンエネルギー、高効率発電、熱も供給できる発電装置として注目されており、電力供給設備として、実使用に向けての動きが、活発になってきている。ここでは、リン酸型燃料電池を使った燃料電池発電プラントの計装制御について概説をおこなう。

2. リン酸型燃料電池発電プラント

リン酸型燃料電池発電プラントの構成を、図-1に示す。電池に供給する水素・酸素のガス圧により、常圧型と加圧型がある。図-1は常圧型であるが、主要素は加圧型と同じである。常圧型は、数百mmAq程度のガス圧で、加圧型は数kgf/cm²程度のガス圧である。加圧型は、常圧型に比べ、システムが若干複雑になる。

また、水素極・酸素極間の差圧を数百mmAq以内にする為の制御装置が必要となる。

図-1の常圧型で主要素の機能を以下に説明する。

(1)脱硫器

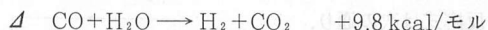
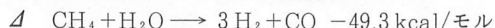
燃料として都市ガスを使用する場合、添加してある付臭剤は硫黄分を含み、これが改質器の触媒毒となる。この為脱硫器を設け、硫黄分を除去している。

(2)エジェクター

燃料を改質器を経由して燃料電池へ送るためには、数千mmAq程度に加圧する必要がある。この為にエジェクターを使用している。このエジェクターは蒸気駆動式で、改質用蒸気と原燃料との混合機能も兼ねている。

(3)改質器+CO変成器

メタンを主体とした都市ガスの改質は、水蒸気改質法(スチーム・リフォーミング)により行われている。反応式は次の通りで、吸熱反応と発熱反応がある。



改質器は上式の吸熱反応であるので、燃料電池オフガスを改質炉で燃焼させ反応熱を供給している。

CO変成器は下式の発熱反応であるので、熱交換器で反応熱を除去している。なお、図-1では熱交換器を省略して簡略にプロセスを示している。

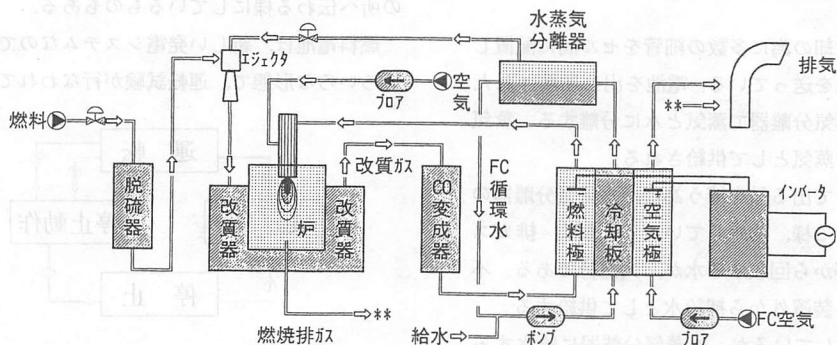


図-1 常圧リン酸型燃料電池発電プラントの構成

* 富士電機(株)技術開発推進センター燃料電池本部技術部 部長
〒290 市原市八幡海岸通り (富士電機(株)千葉工場内)

(4)燃料電池

燃料電池は電気化学反応である。一般の電池と同様に直流を発生する。電池一ケで発生する電圧は1V以下なので、発電装置の燃料電池では単一電池（セル）を直列に多数接続している。これを燃料電池スタックと呼称しているが、この構造を図-2に示す。

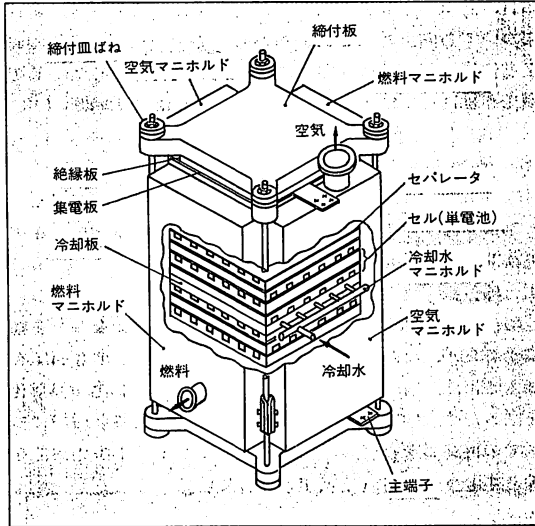
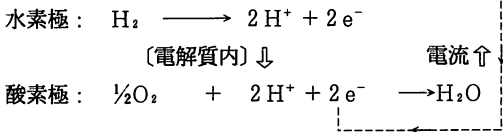


図-2 燃料電池スタックの構造

反応式は次の通り。



上の反応式で 2H^+ は電解質の中を移動し、 2e^- は電池電極へ接続した電気回路を流れる。

(5)蒸気/水系

燃料電池の冷却の為に多数の細管をセル間に配置しポンプで冷却水を送っている。電池を出た加熱された冷却水は、水蒸気分離器で蒸気と水に分離する。蒸気は、改質反応の蒸気として供給される。

改質蒸気として出る量を補う為に、水蒸気分離器の水位が一定になる様、給水している。給水は、排ガス及び改質ガス等から回収する水が、大部分である。不足する場合は、装置外から補給水として供給する。

図-1では省略しているが、水蒸気分離器に給水する水は水処理装置で、純水にしている。これは電池冷却用細管の汚染防止、及び電池セル間の冷却水による短絡防止のためである。

水処理装置は、小容量機の場合は使い捨て式イオン

交換機能とし、大容量機の場合は再生機能のついた水処理装置を使用している。

(6)空気系統

空気は燃料電池の反応用と改質炉の燃焼用に、使用される。大気を圧縮昇圧して各々へ必要量供給する。燃料電池発電では、補機動力の大半をこの空気供給用動力で占めている。

(7)逆変換装置（インバータ）

燃料電池の直流を交流に変換する装置である。交流出力の制御を下記の2方式で行い、必要電気エネルギーを直流で燃料電池から取り出している。

◇定電圧制御：負荷の変化があっても出力電圧を、一定にする。（周波数も一定）

◇連系運転制御：連系する系統線に出力電圧と周波数を合わせて、有効電力と無効電力を設定値にあわせて制御する。（PQ制御）

3. 運転方式

リン酸型燃料電池発電は、都市近郊に設置する数万kW級の分散電源用発電所として計画が進んでいる。

また電力需要のある所に設置するオンサイト型発電設備として、数十～数千kW級のものが、計画されている。

(1)運転方式の形態

運転方式は、連続運転、毎週起動/停止（WSS）及び毎日起動/停止（DSS）等があるが、出力の大きさ及び電力需要の形態により運営されている。

大容量機には、中央運転監視室が設置され、専任のオペレータが、配属されている。一方小容量機には、発電装置の機側で操作し、最小限の管理信号が管理者の所へ伝わる様にしているものもある。

燃料電池は、新しい発電システムなので運転方式はいろいろな形態で、運転試験が行なわれている。

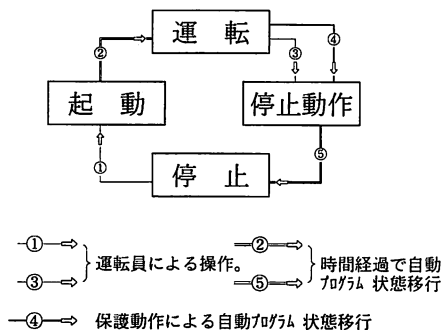


図-3 オンサイト型の運転方式

(2) オンサイト型の運転方式

オンサイト型発電設備として計画されている、比較的小容量のリン酸型燃料電池発電装置では、自動運転を基本にしている。これを図示したのが図-3であり、運転員の操作は、機側で起動の押釦スイッチを押すだけである。異常の場合は保護動作が作動し自動的に安全に停止する。

運転状態の表示用として、機側に簡単な表示装置を付け、そこで運転状態を監視できる様にしている。図-4はその一例を示したものである。

(3) 大容量機の運転方式

大容量機の場合は専任の運転員が、交代で監視しているので、監視装置を中央操作室に設置し、常時監視の運転方式をとる。この場合、自動運転が中心だが、半自動運転、手動運転もできる様にしている。

また、保護停止機能が装備されているが、一步前の警報を出す様、監視装置は設計される。

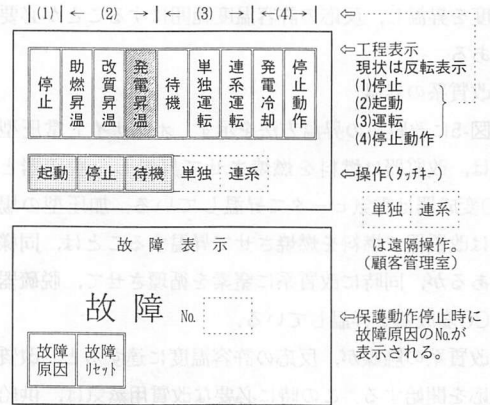
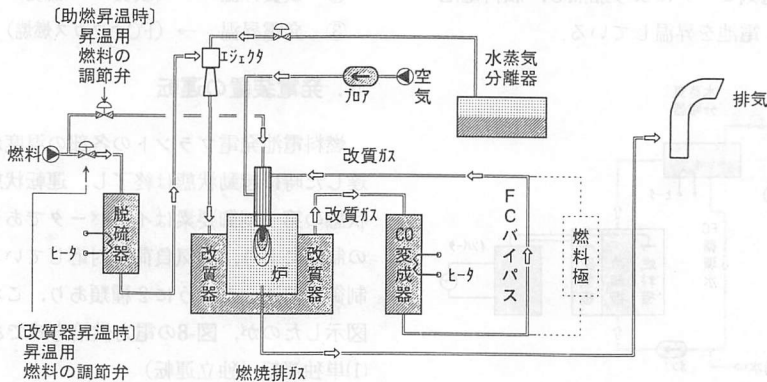


図-4 オンサイト型FCの機側操作パネル画面例

4. 発電装置の起動

燃料電池発電装置は内部に化学反応、電気化学反応をする重要部があるので、起動する場合これら各部の

(1) オンサイト常圧型



(2) 加圧型の一例

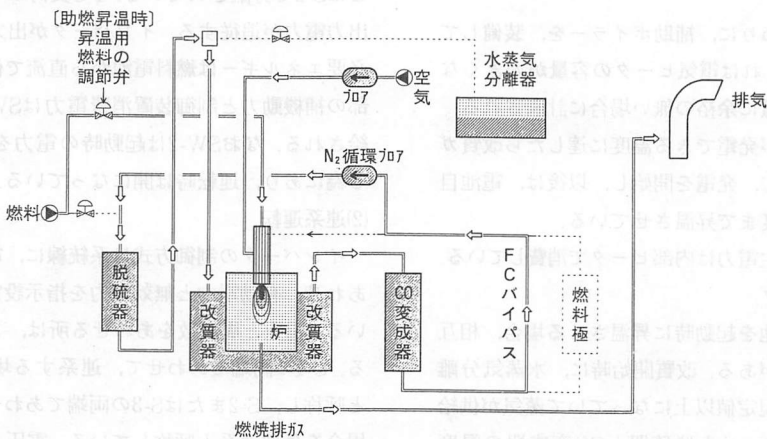


図-5 改質系の昇温方法

温度を昇温し、反応の許容温度範囲にすることが必要である。

(1)改質系の昇温

図-5に改質系の昇温方法を示す。オンサイト常圧型では、改質器は燃料を燃焼させて昇温し、脱硫器とCO変成器は電気ヒータで昇温している。加圧型の場合は改質器で燃料を燃焼させて昇温することは、同様であるが、同時に改質系に窒素を循環させて、脱硫器とCO変成器を昇温している。

改質系の触媒が、反応の許容温度に達すると、改質反応を開始する。この時に必要な改質用蒸気は、供給のタイミングを合わせて、準備しておく。

改質ガスは、改質ガス系が、安定に作動するまで、電池をバイパスし、改質器の炉に直接導入して、燃焼させている。

(2)燃料電池の昇温

図-6に燃料電池の昇温方法を示す。燃料電池の循環冷却水系を使って昇温している。循環水は、水蒸気分離器の中に設けた電気ヒータにより加熱し、燃料電池の冷却細管に送り、電池を昇温している。

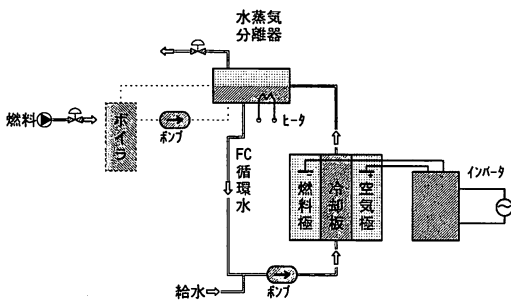


図-6 燃料電池の昇温方法

電気ヒータの代わりに、補助ボイラーを、装備している場合もある。これは電気ヒータの容量が大きくなり、受電設備の容量に余裕の無い場合に計画される。

燃料電池の温度が発電できる温度に達したら改質ガスと空気を導入して、発電を開始し、以後は、電池自身の発熱で定格温度まで昇温させている。

尚、この時の発生電力は内部ヒータで消費している。

(3)昇温のタイミング

改質系と燃料電池を起動時に昇温させる場合、相互に連系をとる必要がある。改質開始時に、水蒸気分離器内の蒸気圧力が規定値以上になって蒸気が供給できる状態である事、また脱硫器とCO変成器の温度が許容範囲内である事が、必要条件になっている。

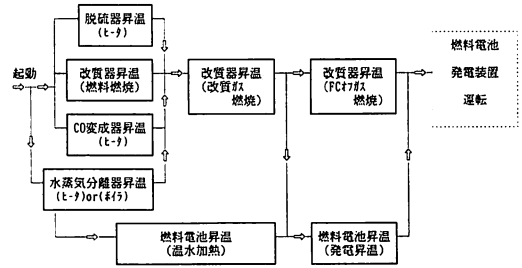


図-7 昇温タイミング関連図

これらの昇温過程を簡略化して、関連を図示したのが、図-7の昇温タイミング関連図である。この図中に（ヒータ）（燃料燃焼）等のカッコ内に示したものは昇温の熱源を示している。オンサイト型燃料電池発電装置の機側の表示面では起動時の状態進行を表示するために、改質器と電池の状態の組合せで下記の表示をしている。

- ① 助燃昇温 → (燃料燃焼) + (ヒータ)
- ② 改質昇温 → (改質ガス燃焼) + (ヒータ)
- ③ 発電昇温 → (FCオフガス燃焼) + (電池発熱)

5. 発電装置の運転

燃料電池発電プラントの各部の温度が、定格値に、達した時に起動状態は終了し、運転状態になる。運転状態の第一制御要素はインバータであり、インバータの制御により、電気負荷に対応している。交流出力の制御は前述したように2種類あり、これらの状態を、図示したのが、図-8の電力供給方式である。

(1)単独運転（独立運転）

インバータの制御方式は定電圧方式であり、系統線とはS-2で分離されている。FC負荷の増減によって、出力電力が追従する。インバータが出力をだすための必要エネルギーは燃料電池から直流で供給される。内部の補機動力と制御装置消費電力はSW-1を介して供給される。なおSW-2は起動時の電力を外部から受ける為にあり、運転時は開になっている。

(2)連系運転

インバータの制御方式は系統線に、電圧と周波数をあわせ、有効電力と無効電力を指示設定値にあわせている。電圧と周波数をあわせる所は、2ヶ所選択できる。S-1の両端であわせて、連系する場合を内部連系と呼称し、S-2またはS-3の両端であわせて、連系する場合を外部連系と呼称している。電圧と周波数を系統線にあわせる機能はインバータの制御装置に内蔵され

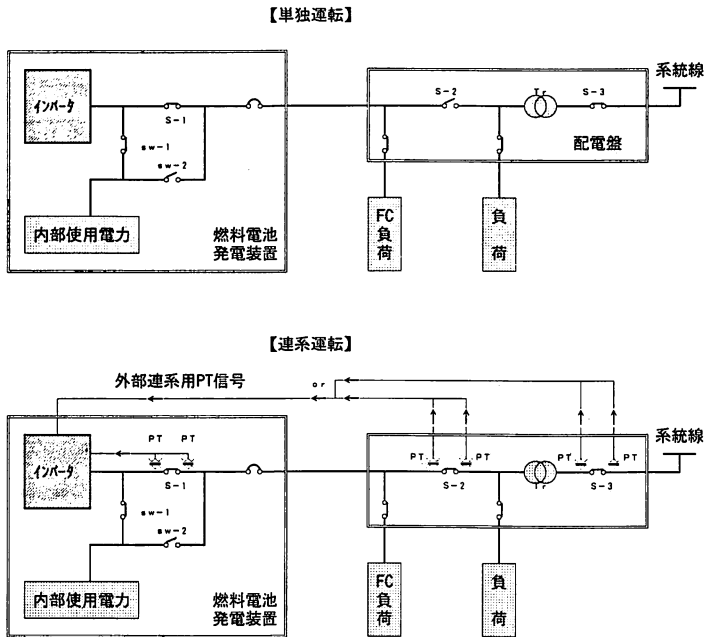


図-8 電力供給方式

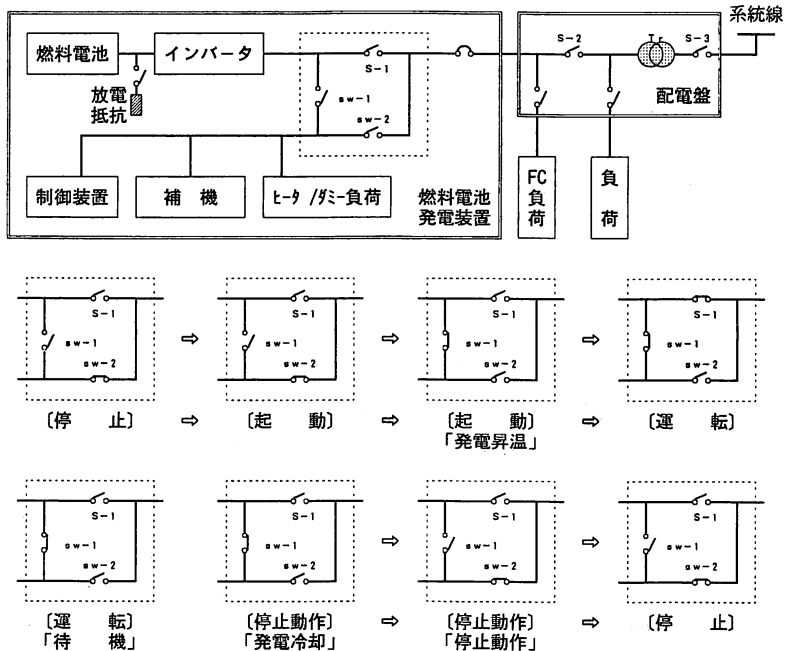


図-9 受電/送電スイッチの切替

ている。連系から単独に切り換える場合はS-2またはS-3を開けると同時に、インバータの制御方式も定電圧制御に切替えている。

(3)受電/送電スイッチの切替

運転状態になる時、燃料電池発電装置は受電状態か

送電状態になるので、補機および制御装置は受電先を外部から、内部のインバータへ切替えている。

この状態変化を示したのが、図-9の受電/送電スイッチの切替である。運転状態の中に待機があるが、これは、発電状態であるが、S-1を開にし、外部に送電

せず、燃料電池の発電電力を、補機と制御装置、及びダミーヒータで消費している。この状態は起動過程の発電昇温時と同じである。SW-1とSW-2は常に反対動作をさせており、同時にonにはならない様にしている。

停止時においては、SW-2を経由して外部から、電源を供給される様にしている。これは停止時でも、制御装置は動作させ、センサーで異常状態を監視する様にしている為である。

尚、停止時に外部電源が喪失すると、制御弁は安全方向に作動する様にしている。この場合、長期に停電が続くと燃料電池の保温ヒータが切れた状態になり、電池の温度が下がり、リン酸が液体状態から固体結晶になる。このことは電池にとって、絶対避けなければならないので、停止時に長期停電にならない様、充分に注意する必要がある。

6. 発電装置の停止

発電を停止する場合は、次の手順で行う。

(1)燃料電池

インバータを停止すると燃料電池の直流電流もゼロになる。改質ガスは電池バイパス弁を開にし、電池入口弁を閉にし、電池に入らない様にする。また反応空気も入口弁を閉にし、電池に入らない様にする。次に、窒素パーズ弁を、水素極・酸素極共、開にしてパーズを行い、内部を窒素で置換する。置換必要量のパーズを行ったら、微量パーズのみにし、大気の侵入を防止する。同時に放電抵抗を電池の両極に接続し、電圧が規定値に下がるまで、電池の放電を行う。

循環冷却水ポンプは運転を続け、電池の温度を、保管温度までさげる。この時循環冷却水は水蒸気分離器をバイパスした配管を流し、水蒸気分離器の温度とは独立して燃料電池の温度を下げる様にしている。保管温度になったら、ポンプを停止する。

(2)改質系

改質系を停止する時は、まず燃料遮断弁を作動させ燃料を遮断する。改質蒸気はしばらく流し、改質触媒の蒸気パーズを行う。これは、改質触媒へのカーボン付着を防止するためである。次に窒素パーズ弁を開にし、窒素パーズを行い、内部を窒素で置換する。置換必要量のパーズを行ったら、微量パーズのみにし、大気の侵入を防止する。次に改質炉への燃焼空気を停止する。以上を図-10に示す。

(3)発電冷却

燃料電池は運転温度より低い温度でガス遮断をする

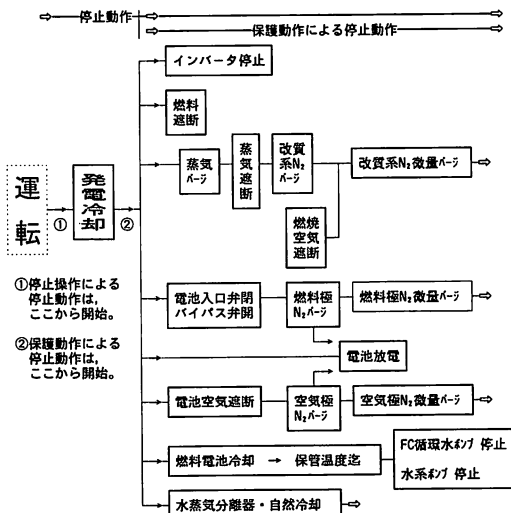


図-10 停止動作

と特性劣化が少ない。そこで、通常の停止の場合は、発電しながら電池の温度をさげる工程を行う。これは水蒸気分離器をバイパスした電池循環冷却水の配管回路に切替えて行う。この配管系の熱交換器で電池循環冷却水を冷却している。尚、水蒸気分離器のヒータは電池発電電力で加熱し、改質蒸気を確保している。

7. 保護動作

保安の為と、発電装置の破損防止の為に、保護動作を行う機能を、燃料電池発電システムとして、持っている。以下各部の保護動作について概説を行う。

(1)改質系

触媒の保護と容器の機械的強度保護の為に、温度高の保護動作を行なっている。また反応許容温度範囲があるので、運転中は触媒部分の温度低の保護動作も、行っている。燃焼部は失火検出が重要な点である。

また、配管接続部からの可燃性ガスの漏洩については装置内に可燃性ガス検知器を取付け、爆発限界の下のレベルで検出し、保護動作をさせる様にしている。

保護動作は、何れも停止動作のことであり、改質系では、燃料を遮断し、蒸気パーズ、窒素パーズを実施することで、安全に停止する。各部の温度の降下は、自然冷却にまかせている。再起動する時は温度が高い状態からでも、可能である。

(2)燃料電池

電池の温度は冷却系の水蒸気分離器の圧力で制御しているが、電池自身の温度高で、保護動作を行っている。電池電圧も重要な監視項目であり、供給ガス不足

○：有効
×：無効

分類	No.	保護動作項目	運転状態⇒	起動（昇温）			運 転			停止動作	
			停止	助燃昇温	改質昇温	発電昇温	待機	単独運転	連系運転	発電冷却	停止冷却
改質系	1	脱硫器触媒温度高	×	○	○	○	○	○	○	○	×
	2	” ” ” 低	×	×	○	○	○	○	○	○	×
	3	改質器触媒温度高	×	○	○	○	○	○	○	○	×
	4	” ” ” 低	×	×	○	○	○	○	○	○	×
	5	改質炉バーナ失火	×	○	○	○	○	○	○	○	×
	6	CO変成器触媒温度高	×	○	○	○	○	○	○	○	×
	7	” ” ” 低	×	×	○	○	○	○	○	○	×
電池	1	燃料電池温度高	×	×	×	○	○	○	○	○	×
	2	” ” 電圧低	×	×	×	○	○	○	○	○	×
蒸気・水	1	水蒸気分離器水位高	×	○	○	○	○	○	○	○	×
	2	” ” ” 低	×	○	○	○	○	○	○	○	×
	3	水蒸気分離器圧力高	×	○	○	○	○	○	○	○	×
	4	” ” ” 低	×	×	○	○	○	○	○	○	×

図-11 保護動作判定表の例

による、電圧低下を監視し、異常値で保護動作をおこなっている。

保護動作で停止する時は、供給ガスを遮断し、窒素バージを行い、放電抵抗を接続し極間電圧を下げる。また、電池の冷却は可能な限り行い、電池の保存温度まで冷却する。加圧型の場合は停止時に水素・酸素極とも、常圧まで徐々に下げるが、両極間の差圧が過大にならない様に、配管と制御弁の構成に注意しなければならない。

保護検出項目は起動から停止まで常に作動する必要がないので、検出項目の各々に運転状態による判定表が付随している。図-11にこの例を示す。判定表で○は保護動作を行い、×は行わない事を示している。

(3)インバータ

インバータは直流側と交流側に検出項目をもち、異常値で停止する。電気の保護はスピードが早いので、インバータ専用の独立した保護動作を行っている。

8. 制御装置

制御装置は電子部品で構成されているので、設置場所の温度を高く出来ない。中央監視室がある場合は、

そこに、装置と分離して設置する。オンサイト小型のように、発電装置と一体の場合は、装置の片側に仕切をつくり、改質器・燃料電池・水蒸気分離器等の高温と、温度的に分離した場所を確保し、同じ電子部品の構成品であるインバータと一所に設置している。オンサイト型の場合は、監視記録機能は最小限にし、できるだけコンパクトにしている。

9. おわりに

燃料電池発電の計装と制御については、一般の化学プラントの計装制御と基本は同じである。運転方法をプログラムとして入れる時に、工場実験の経験をもとに、よりよい運転が出来る様に検討計画している。

今後も関係各位と協力して、装置の能力を最大限に発揮する計装制御システムを、構成したいと考えている。関係各位の御鞭撻をお願いしたい。

参考文献

富士時報 1990 vol. 63 No. 11〔リン酸形燃料電池特集〕