

# 東京電力(株)横浜火力発電所 7号系列納入 ガスタービン サイリスタ起動装置

Gas Turbine Static Starter for TEPCO Yokohama Thermal Power Station Group No.7

林 正孝  
M. Hayashi

村林 一彦  
K. Murabayashi

柴田 雅彦  
M. Shibata

最近のガスタービンの大容量化に伴い、コンバインドサイクル発電プラントでは、ガスタービン起動用として従来使われてきたトルクコンバータが製作容量限界に近づいてきたことから、同軸の発電機を同期電動機として使用し、低周波から起動させるサイリスタ起動方式が採用されるようになってきた。

現在建設中の 1,300°C 級コンバインドサイクル発電設備である東京電力(株)横浜火力発電所 7号系列では、国内事業用火力としては初めてこのサイリスタ起動方式を採用した。当社はこの起動装置用に負荷転流型の他励変換器および制御装置を納入し、試運転時からガスタービンの起動特性の要求を満たす良好な制御性を得ている。

With the recent increase in gas turbine capacity, the static starter, using the generator as a synchronous motor from a low frequency, has come to be employed in combined-cycle power plants instead of the induction motor and torque-converter starting method because of the manufacturing limit of the torque-converter.

The Yokohama Thermal Power Station Group No.7 of The Tokyo Electric Power Co., Inc. (TEPCO), which is a combined-cycle power plant incorporating a 1,300°C-class gas turbine, has become the first utility thermal power plant in Japan to adopt the static starter. Toshiba supplied the load commutated inverter to satisfy the requirements of the gas turbine starting scheme from the commissioning stage.

## 1 まえがき

東京電力(株)横浜火力発電所 7号系列は、ACC (Advanced Combined Cycle) と呼ばれている 1,300°C級のガスタービンを適用した一軸当たり 350 MW、合計 4 軸により構成される 1,400 MW の一軸型コンバインド発電設備で、GE 社と当社がその建設にあたり、最初の軸が 1996 年 6 月に完成しすでに商用運転に入っている。

これまで、ガスタービンの起動には、標準的にパワーライン (ガスタービン (GT)、コンプレッサ (comp)、蒸気タービン (ST) と発電機 (G) など同軸で構成されたもの) に起動用の誘導電動機とトルクコンバータを直結させ、起動トルクの制御をトルクコンバータで機械的に行って起動させていた。

しかしながら、ガスタービンの容量増大に伴い、このトルクコンバータが製作容量限界に近づいてきたことから、横浜火力発電所では国内事業用のコンバインドサイクルプラントとしては初めて、被駆動機である同期発電機を同期電動機運転させて、低周波からの駆動機として使用するサイリスタ起動方式を採用した。

以下にそのシステムの概要と特長を紹介する。

## 2 システム構成

ガスタービンのサイリスタ起動装置の回路構成を図 1 に、

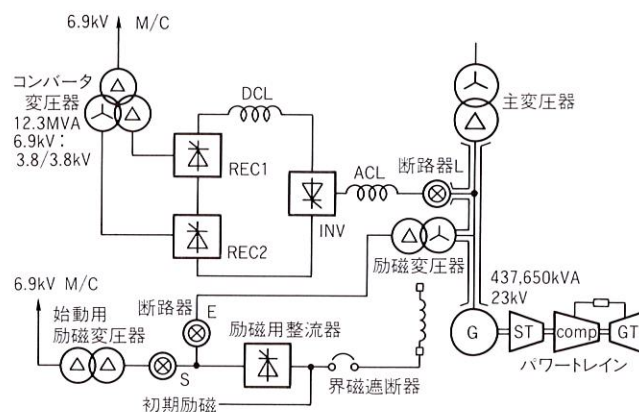


図 1. サイリスタ起動装置の構成 REC 側は 12 相、INV 側は 6 相の変換器とし、励磁用の整流器は、発電機運転時のものを共用とした。  
System configuration of static starter

サイリスタ変換器の定格を表 1 に示す。

サイリスタ変換器の電源は発電所内の 6.9 kV の電源からコンバータ変圧器を介して供給し、コンバータ (REC1, REC2)、直流電流のリプルを抑える直流リアクトル (DCL)、インバータ (INV)、転流インピーダンスを補う交流リアクトル (ACL) を介して断路器 L により発電機の主回路と接続されている。

一方、発電機が電動機運転されるとき励磁用整流器は、発電機運転時のものと共用することにしたが、起動時の励磁電源は発電機端からは供給できないので、サイリスタ起

表1. 変換器の定格

Converter/inverter ratings

	コンバータ (REC)	インバータ (INV)
定 格	定 格 出 力 9.83 MW 交 流 入 力 電 圧 3.8 kV 直 流 出 力 電 圧 8.6 kV 直 流 電 流 1,143 A	定 格 出 力 9.72 MW 交 流 出 力 電 圧 6.9 kV 直 流 入 力 電 圧 8.5 kV 直 流 電 流 1,143 A
時間定格	1 時間	
結 線	12 相	6 相
使用素子	光サイリスタ 6,000 V-2,500 A	
素子構成	3S-1P-12A	5S-1P-6A
冷却方式	強制循環風冷 (二次冷却水方式)	

動装置と同様に発電所内の6.9 kV 電源から始動用励磁変圧器で降圧して供給することにした。

なお、ガスタービン起動終了後は、断路器 S を断路器 E に切り換え、発電機端から電源を供給する通常のサイリスタ励磁による発電機運転に切り換えられるようなシステム構成とした。

### 3 機器仕様

#### 3.1 変換器

サイリスタ変換器 (図2) は、水力発電所や同期調相機の起動装置で十分実績のある負荷転流型の他励変換器 (LCI: Load Commutated Inverter) を採用した。

この変換器の特長を以下に示す。

**3.1.1 インバータ電圧の最適化** ガスタービンの起動装置では、定格回転数前に起動が完了し、ガスタービンが自立してトルクを十分発生できるようになった後は、起動装置を切り離すことができる。つまり、揚水発電所の発電電動機の起動装置のように系統併入まで起動装置を使用し

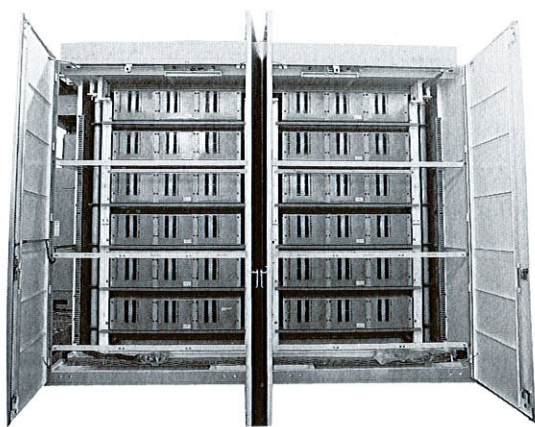


図2. 変換器 (コンバータ) の外観 コンバータ盤の正面扉開放時の状況を示す。

External view of converter

ないので、インバータの出力電圧を発電機の定格電圧に合わせる必要がないことから、これを低く設定し (発電機電圧の30%) 直列素子数の低減を図った。

**3.1.2 コンバータの12相化** 同一電源母線にある起動装置を2台同時に使用しても電源側への高調波の影響が問題ないレベルになるようにするため、図1に示すように2台のコンバータをカスケード接続し、三巻線としたコンバータ変圧器の二つの二次巻線の結線を変えることにより、それぞれの入力位相を30°ずらして12相整流とした。

**3.1.3 6kV 光サイリスタの採用** 6kV-2,500 A の大容量光サイリスタを採用することにより、直列数の低減、1並列化が可能となった。

**3.1.4 1S モジュールの採用** 素子の直列数はコンバータが3S、インバータが5Sであり、構成が異なるため、最小ユニットを1Sモジュール構成としてモジュールの共通化を図った (図3)。

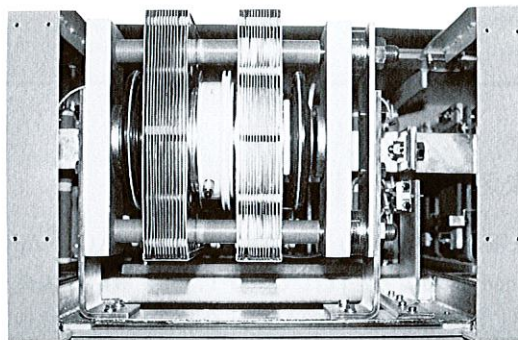


図3. 1Sモジュール コンバータ、インバータ共通モジュールとして1Sモジュールを採用した。

Thyristor module

**3.1.5 全閉強制循環風冷式の採用** 冷却方式は、密閉された盤内でサイリスタを冷却する冷却風をファンにより循環させ、熱交換は、外部から供給される冷却水を使った水冷式の熱交換器により行う方式とした。これにより、盤内部の汚損状態を良好に保てるので絶縁物劣化の防止、冷却の信頼性向上を可能とした。

#### 3.2 制御装置

LCI 制御装置および発電機の励磁制御装置用には、16ビットのCPUを使ったデジタル制御装置を適用し、後に述べるようないろいろな運転パターンに対してもソフトウェアで簡単に対応できるものとした。

### 4 起動パターン

図4にガスタービンの起動パターンを示す。

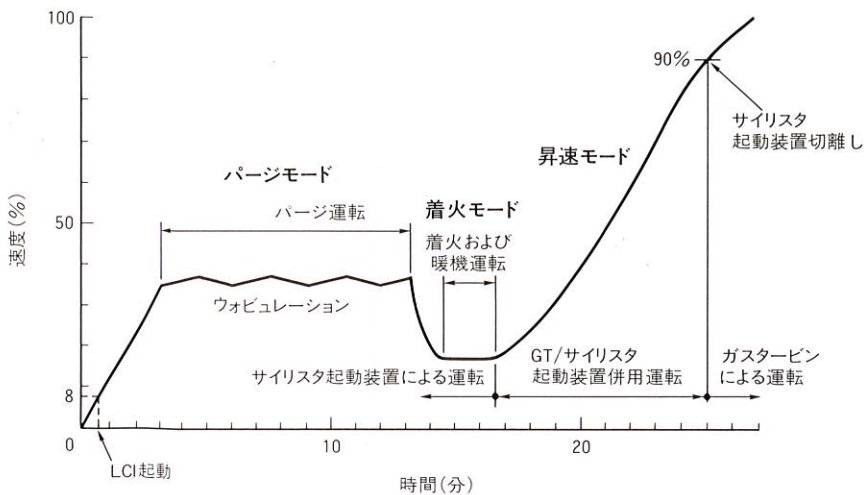


図4. ガスタービン起動パターン  
 ガスタービンの起動時のいろいろなパターンに対応した制御が要求される。

Gas turbine starting scheme

ガスタービンの起動は、例えば揚水発電電動機の起動装置のように回転数を直線的に定格速度まで上げるのではなく、次に述べるようないろいろなモードの速度制御が必要となってくる。

まず、パワートレインがターニング速度で回転している状態から補助蒸気を蒸気タービンに入力し、8%速度まで昇速後、コンバータ変圧器の電源を投入して、図1の断路器L、S、界磁遮断器を閉として発電機に所定の電機子電流、界磁電流を流し、30%程度の速度まで昇速させる（パージモード）。

ここで、系にある可燃性の残留ガスを追い出すため、パージを行うが、その際、軸系の危険周波数をできるだけ避けるため、のこぎり歯状に所定の速度帯、速度変化率で回転数を変化させる（ウォビュレーション：wobulation）。

パージ完了後、LCIの出力をいったんオフにし、ガスタービンを着火速度まで減速させ、ここで再びLCIの出力をオンして速度を一定に保ち、ガスタービンの着火および暖機運転を行う（着火モード）。

暖機運転完了後、昇速モードに切り換え、各速度領域の最大出力でガスタービンを昇速していく。

回転数が上昇するにつれて、ガスタービンの出力も増し、自立した時点（90%速度）でLCIの出力をオフし、界磁遮断器、コンバータ変圧器の電源を切り、断路器Lを開として起動装置を発電機から切り離す。

励磁系も断路器Sを開、Eを閉として通常のサイリスタ励磁システムの回路を作り、発電機運転の準備を行う。

以降は、通常の発電機同様、初期励磁をかけて再び電圧確立させ、同期併入操作に入り、プラントとしての起動を完了させる。

なお、このような起動時以外にコンプレッサの水洗時に、一定時間低速回転で回転させる運転をやはり発電機の電動機運転で行えるようにした（水洗モード）。

## 5 制御ブロック

このようないろいろな運転パターンを実現するためのLCI制御ブロックを図5に示す。

基本的に速度制御は、コンバータ側の制御角( $\alpha$ )を制御することにより行っている。

すなわち、3章で述べた各モード信号（これは、GSTCと呼ばれるガスタービン・蒸気タービン制御装置からLCI制御装置に入力される）であらかじめ決められている速度指令値( $S_{ref}$ )と現在の速度との偏差をゼロにするように電流指令値( $I_{ref}$ )を作り、この指令値と実際の変換器電流の差がゼロになるようにコンバータの制御角を制御する。

なお、電流指令値を作る際には、低回転時の発電機回転子の過熱を防止するため、速度に応じて電流指令の上限値を変化させる電流指令上限値制御を行っている。

また、インバータ側は運転状態の変化に対して転流失敗を起こさぬよう余裕角制御により余裕角( $\gamma$ )を一定(15°)とする制御としている。

水洗モード時は、低回転で定速運転となり、発電機回転子の冷却能力が落ちるため、V/F（電圧/周波数）を下げる指令を励磁制御装置に渡している。

一方、励磁制御側は低回転速度域（30%速度以下）では一定励磁制御（V/F一定運転）、高回転速度領域では発電機の出力電圧がインバータの定格電圧を超えないように一定電圧制御（AVR運転）するようにしている。

## 6 試運転試験結果

横浜火力発電所7号系列の最初の軸は1996年1月から試運転調整を行ってきたが、その際の起動時の試験結果を図6に示す。

インバータ出力電流が、回転速度に対応する所定の範囲

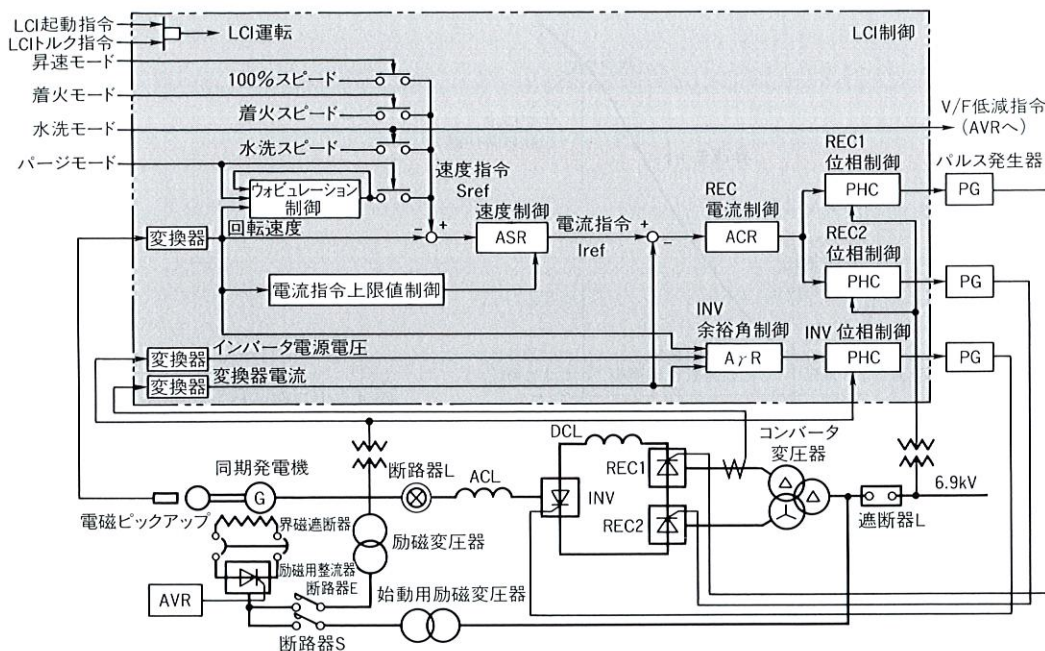


図5. LCI 制御の構成  
 LCI 制御装置は速度制御、電流制御、位相制御によりガスタービン起動制御を行う。  
 Configuration of LCI control system

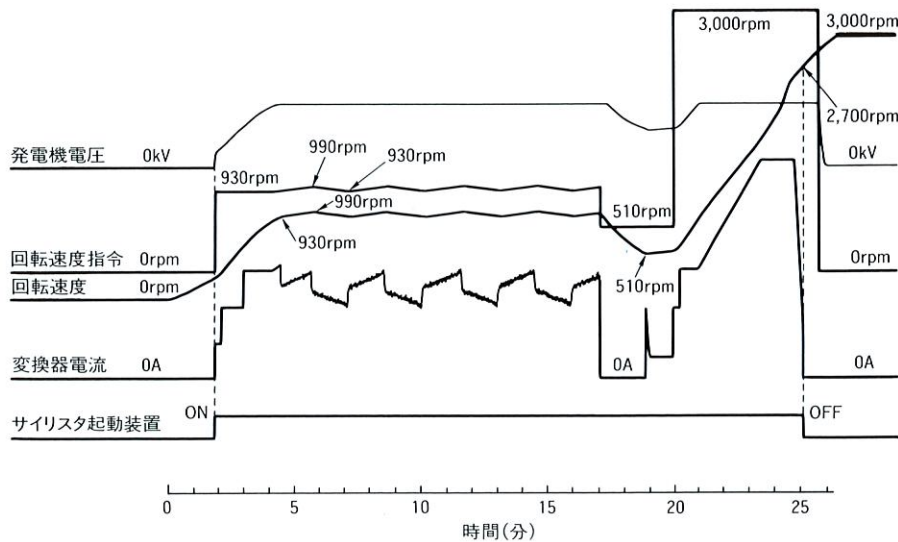


図6. サイリスタ起動装置試運転結果  
 良好な速度制御、電流特性を得られた。  
 Static starter commissioning data

内に維持されながら、回転数が速度指令に従って制御され、安定に運転継続されていることがわかる。

## 7 あとがき

サイリスタ起動装置は、従来の起動電動機+トルクコンバータ方式に比べ、制御性に優れているほか、静止器のため保守が容易、パワートレインの軸長が短くなるので基礎台も縮小できるなどのメリットがあり、ガスタービンの容量増大に伴い、採用が増えていくものと思われる。

今後、さらに装置のコンパクト化などを図り、使いやすく信頼性のある機器、システムを旨ざして努力していきたい。



林 正孝 Masataka Hayashi

火力事業部火力電機技術部課長。  
 火力発電所の電気系エンジニアリング業務に従事。電気学会会員。  
 Thermal Power Plant Div.



村林 一彦 Kazuhiko Murabayashi

府中工場パワーエレクトロニクス部主査。  
 大容量パワーエレクトロニクス機器の開発設計に従事。電気学会会員。  
 Fuchu Works



柴田 雅彦 Masahiko Shibata

府中工場発電制御システム部主務。  
 発電用調整制御装置の開発設計に従事。電気学会会員。  
 Fuchu Works