

# 静止形周波数変換装置

Electronic Frequency Converter

大木 正之

■ OHKI Masayuki

大槻 みどり

■ OHTSUKI Midori

長山 徳幸

■ NAGAYAMA Noriyuki

石塚 智嗣

■ ISHIZUKA Tomotsugu

日本には二つの電力周波数があり、東日本は 50 Hz、西日本は 60 Hz に統合されている。東海道新幹線は、60 Hz の単相電力で走行しており、富士川を境に東地区は周波数が異なるため、周波数を変換する設備が要求される。この周波数変換設備を建設するにあたっては、高機能・高性能化、省スペース化、高信頼性、保守性の向上などが求められ、このような課題に応えるべく、パワーエレクトロニクス及びマイクロエレクトロニクス技術を駆使することにより、電鉄用静止形周波数変換装置を開発した。現在、東海道新幹線の安定電源供給、安定運行に寄与している。

Two electric power frequencies are used in Japan: 50 Hz in the eastern part of the country and 60 Hz in the western part. The Tokaido Shinkansen runs on 60 Hz single-phase electric power. Frequency conversion equipment is therefore required because the frequency changes at Fujikawa. There are many requirements in the construction of such frequency conversion equipment including high performance and efficiency, miniaturization of the equipment, high reliability, and easy maintainability.

We have developed an electronic frequency converter for electric railroads that meets these requirements by making full use of power electronics technology and microelectronics technology. This frequency converter is now contributing to stable power supply and steady services of the Tokaido Shinkansen.

## 1 まえがき

東海道新幹線の列車は、60 Hz の単相電力により走行している。日本には2種の電力周波数が存在するが、東海道新幹線の走行区間である東京～新大阪間の約1/4は50 Hz 地域であり、この50 Hz 地域の電力周波数を60 Hz へ変換する周波数変換設備が必要となる。

東海道新幹線は運転を開始し40年を迎えるが、既存の周波数変換設備は回転形周波数変換機 (Rotary Frequency Changer : 以下、回転形FCと略記) を用い、周波数変換を行っている。回転形FCは、同期電動機と同期発電機を組合せた回転機であり、いわゆる大型機械設備である。

近年、東海道新幹線は、2003年10月に品川新駅をオープン、のぞみ車両の増発などを実施しているが、今後は更に過密ダイヤ化などが予想され、地上電力設備の電力増強が必要であり、網島周波数変換変電所に静止形周波数変換装置 (Electronic Frequency Converter : 以下、静止形FCと略記) を新設した。静止形FCは、電鉄変電用周波数変換装置<sup>(1)</sup>として、以下の世界初を実現した。

- (1) コンバータとインバータは、共に自励式変換器を採用し、コンバータの入力効率1
- (2) 三相インバータにて逆相電流制御を実現
- (3) 既設の回転形FCとの並列運転を実現するため、同期合わせ制御技術と負荷分担制御技術を開発



(a) 静止形 FC



(b) 回転形 FC

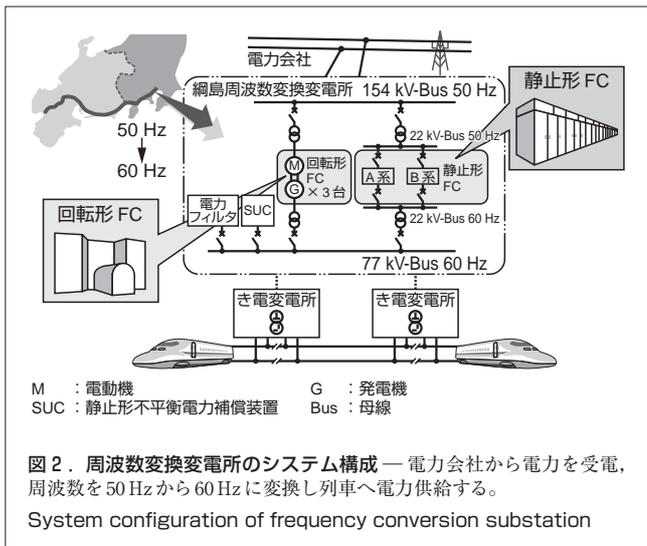
図1. 周波数変換設備の外観 — 静止形FC (a)と回転形FC (b)を示す。  
Appearance of frequency conversion equipment

- (4) 静止形FCの単機起動を可能とするため、系統変圧器を励磁しながら起動する制御技術を開発  
静止形FCの外観を図1 (a)に示す。

## 2 周波数変換変電所の構成と役割

東海道新幹線網島周波数変換変電所では、電力会社から受電した電力を既設設備では回転形FC3台を用い周波数を変換し、き電変電所へ送電、列車に電力を供給している (図1 (b))。

今回、新設した静止形FCは、半導体素子 (GTO (Gate Turn-Off) サイリスタ) を用い、周波数変換を行う装置であり、大容量でかつ、既設回転形FCとの並列運転を実現したシス



テムとなっている。

電力会社から電力を受電し、列車へ電力を供給するシステム構成を図2に示す<sup>(2)</sup>。

### 3 静止形FCの概要

交流き電方式では、列車は単相電力で走行する。列車は走行中、常に加・減速を行っており、地上変電設備はそのつど、列車へ安定した電力を供給する設備が必要である。

また、単相電力であるため三相系統での不平衡が発生するが、電気技術基準に定める基準を満たすことが責務である。そこで、静止形FCは、複雑な系統運用や既設設備である回転形FCとの並列運転を考慮した装置としている。

静止形FCは、GTOサイリスタ(1素子当り6 kV-4,000 A)を用い、素子構成は1直列、1並列接続で、単相ブリッジ3台で三相変換器を構成し、変圧器により6段直列多重としている。スイッチング方式は、損失低減を目的とした1パルス方式であり、出力電圧の振幅制御を可能とするためにパルス幅制御を適用している。また、冗長性を考慮し、1系の容量を30 MVAとした2系構成で合計60 MVAである。静止形FCの変換装置部の定格諸元を表1に、主回路構成を図3に示す。

静止形FCの定格出力時の損失は、回転形FCに比べ20%程度小さい。また、静止形FCは出力が小さいときには損失も小さく0.2 pu (12 MVA) 出力の場合に、回転形FCに対し損失は50%程度低減されている。なお、回転形FCの損失は機械損が大きく、出力の大きさにかかわらずほぼ一定である。

静止形FCのライフコストは、主回路部に可動部が存在しないため、大幅な保守コストの低減ができる。また、回転形FCは、メンテナンス時には大形機械であるために長時間の停止が必要であったが、静止形FCでは大幅な停止時間の短縮も可能である。

表1. 静止形FCの定格諸元

Electronic frequency converter ratings

項目	定格諸元
定格容量	60 MVA (定格有効電力: 50 MW) (30 MVA (25 MW) × 2系構成)
コンバータ交流定格電圧	22 kV-50 Hz (三相)
コンバータ構成	GTO変換器: 単相ブリッジ三相構成 (変圧器による6段直列多重)
コンバータ変圧器	千鳥結線変圧器 (6段直列多重)
直流定格電圧	2,800 V
インバータ交流定格電圧	22 kV-60 Hz (三相)
インバータ構成	GTO変換器: 単相ブリッジ三相構成 (変圧器による6段直列多重)
インバータ変圧器	千鳥結線変圧器 (6段直列多重)
スイッチング方式	1パルス: パルス幅制御 (コンバータ/インバータ共通)

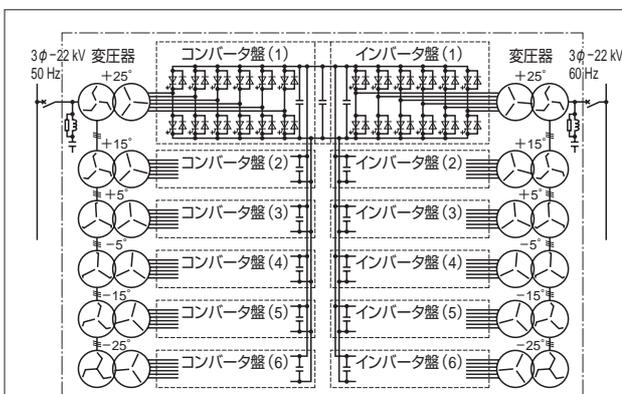


図3. 静止形FCの本体の構成(30 MVA-1系分) — 静止形FCは、GTOサイリスタ素子を用いた1直列、1並列接続とし、単相ブリッジ3台で三相変換器を構成し、変圧器による6段直列多重とした主回路構成である。

Main circuit diagram of electronic frequency converter

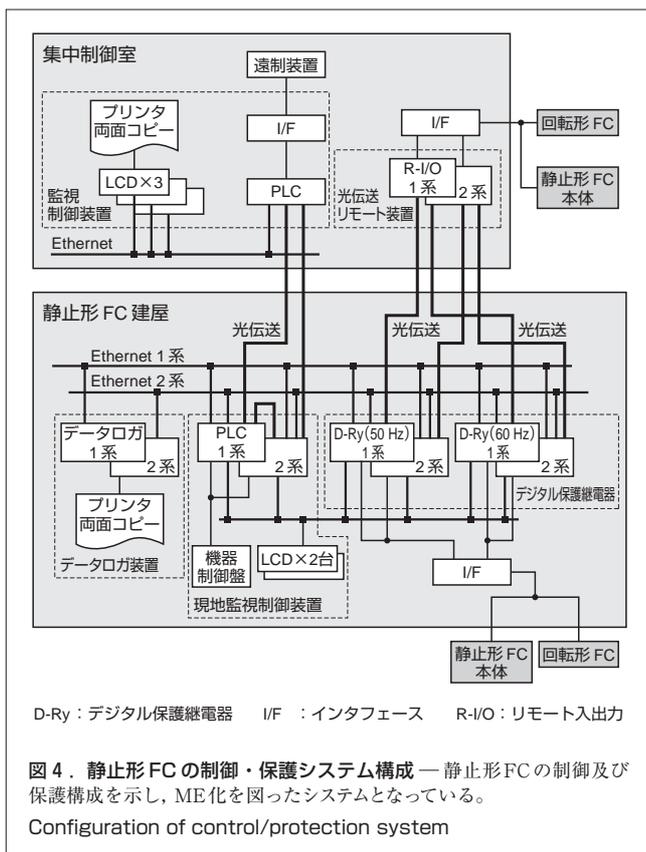
### 4 静止形FCの制御・保護システム構成

静止形FCは、静止形FC建屋での現地操作並びに、集中制御所室での操作が行える構成となっており、日常の通常運転時には遠方による運転であるが、現地における保守作業などにおいては、集中制御室側又は静止形FC建屋側での操作が可能である。

静止形FCの制御・保護システム構成を図4に示す。

#### 4.1 監視制御装置

監視制御装置は、PLC (Programmable Logic Controller) を用い、ME (Micro Electronics) 化を図った。静止形FCの監視機能は、従来の押ボタンスイッチによる監視制御盤のほか、タッチパネル式LCD (液晶ディスプレイ) を採用することにより、メニュー画面から各種操作表示 (機器動作状態表示や計測表示、故障表示など) を行うことができる構成となっている。



#### 4.2 保護継電器

静止形FCの主回路保護に用いている保護継電器は、デジタル保護継電器(DⅢ)を採用している。

このデジタル保護継電器は、大容量の集約形デジタルリレーで、タッチパネル式画面の採用でヒューマンインタフェースにより、保守性の向上を図っている。

#### 4.3 データログ装置

このデータログ装置は、静止形FCの日々の運転状況及びデマンド監視を目的とした装置であり、次のデータを一括監視し、保守及びメンテナンス時における情報をリアルタイムで確認することができる。

- (1) 運用・運転状態
- (2) 機器動作状況及び動作回数
- (3) オンデマンド計測情報及び日報・月報の作成

### 5 静止形FCの運転及び制御方式

#### 5.1 単機運転制御

静止形FCは、自励式変換装置であり、単機での運転も可能である。この単機運転の場合には電圧源として動作し、インバータ変圧器での電圧降下を補償し、22 kV母線電圧が一定になるように制御する。また、2系の電流がバランスするように各系の出力電流を制御する。

綱島周波数変換変電所は電源供給源変電所であり、負荷系統に大容量のき電変圧器などが存在するため、系統電圧が確立した状態で系統側の変圧器を投入すると、大きな励磁突入電流が流れる。静止形FCはこのような場合においても系統の変圧器の投入条件を元に、系統電圧をランプ関数にて上昇させ、過電流を抑制し、運転継続性を高める機能を持っている。

#### 5.2 並列運転制御

並列運転とは、静止形FCと回転形FCが個々に、同一母線の電圧に同期し、運転を行うことをいう。

静止形FCと回転形FCが並列運転を行う場合には、大きく二つの運転がある。

- (1) 回転形FCが先行運転の場合 回転形FCが運転中に静止形FCが同期合わせを実施し、同期後に77 kV母線の遮断器を投入して並列運転を開始(並入)する。
- (2) 静止形FCが先行運転の場合 静止形FCが運転中に回転形FCの起動完了(運転)後、回転形FCの出力電圧(14 kV)母線に静止形FCが同期合わせを実施し、電圧位相を同期させるように制御を実施する。

#### 5.3 負荷電流分担制御

静止形FCと回転形FCが並列運転を行う場合、静止形FCは、基本的に電流源として運転をし、電流指令値の決定は、負荷電流から求めている。

静止形FCは、負荷電流分担の制御において大きく二つの運転方式が設定でき、静止形FCの制御装置により簡単に設定の変更ができる。

- (1) 静止形FCの優先運転方式 静止形FCの優先運転方式を選択すると、静止形FCは、定格容量である60 MVA (30 MVA × 2系)まで優先的に負荷出力を行い、60 MVAを超過した分については、既設回転形FCに負荷を分担する。
- (2) 回転形FCの優先運転方式 回転形FCの優先運転方式を選択すると、回転形FC 1台当たりの定格容量(60 MVA)を超過した場合に、静止形FCは負荷を分担する。また、回転形FCは、過負荷定格(200%)を持っているため、静止形FCは、定格容量である60 MVA (30 MVA × 2系)まで負荷を分担後は、回転形FCに定格容量超過分を分担させる。

#### 5.4 逆相電流制御

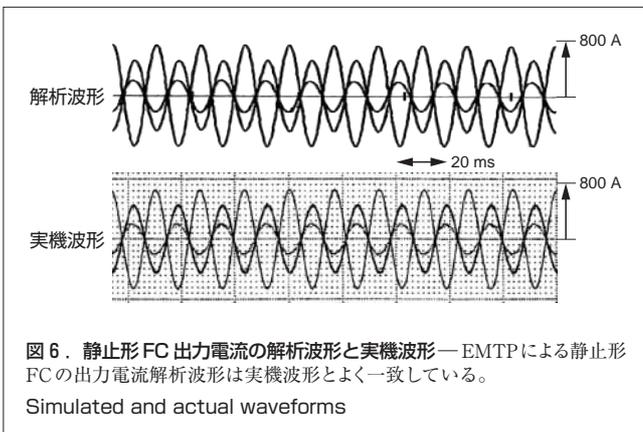
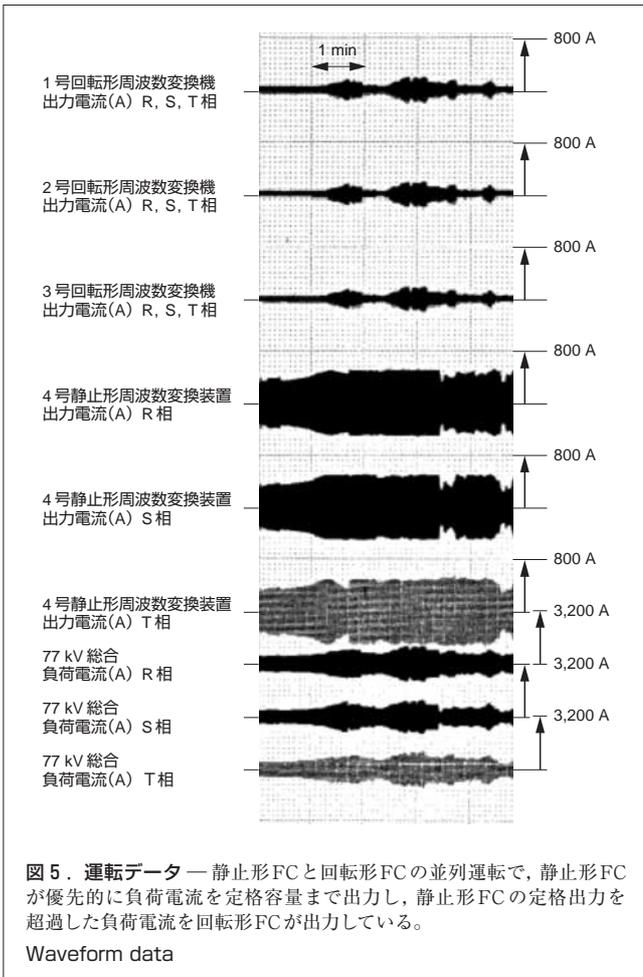
列車は単相負荷であり、負荷電流には大きな逆相電流が含まれるため、回転形FCと並列運転をしている場合には、この逆相電流に追従できる電流制御を実施する必要がある。

三相インバータに適用される一般的な電流制御<sup>(3)</sup>では、正相電流は正確に制御が可能であるが、逆相成分は120 Hzの振動となり、定常偏差が発生するため、この逆相成分の振動である定常偏差を補正する制御としている。

## 6 運用データ

静止形FCは2004年2月に運転を開始し、順調に運転をしている。ここでは、運用時のデータの一部を紹介する。

図5は静止形FCと回転形FC3台の組合せによる並列運転時の運用データである。この運転方式は、前項で紹介した静止形FC優先運転方式であるが、静止形FCが負荷電流の大部分を負担し、静止形FCの定格容量を超過したときのみ



回転形FCに電流が流れているようすがわかり、負荷電流分担を確認することができる。

また、この装置の設計段階から、EMTP(汎用回路解析プログラム)解析によるシミュレーションを実施し、システム構築を行ってきた。図6に静止形FCの出力電流についてEMTP解析波形と実機波形の代表例を示すが、解析波形が実機波形とよく一致しており、シミュレーションの正確さを表していることがわかる。

## 7 あとがき

東海道新幹線網島周波数変換変電所に静止形FCを新設し、2004年2月に運転を開始、現在順調に運転をしている。

ここでは、既設設備である回転形FCも紹介しているが、東海道新幹線は開業後40年を迎えている。

周波数変換設備は東海道新幹線の安全輸送において重要な役割を担っており、設備の老朽化に伴う対策を施していかなければならない。今回新設した静止形FCは、回転形FCと同等以上の運転実力を備えており、東海道新幹線設備の一つの技術として新たなる第一歩を踏み出した。

今後は、運転に実績を重ね信頼性を確保するとともに、次世代電源設備として期待が持てるシステムに発展させていく。

## 文献

- (1) O. Gaupp, et al. "Bremen's 100-MW static frequency link" ABB Review. 9, 10, 1996, p. 4 - 17.
- (2) 武政 尚,ほか. パワーエレクトロニクスの応用と保守(6)- 静止形不平衡電力補償装置(SUC)-. 鉄道と電気技術, 7, 8, 1996-8.
- (3) 電気学会 半導体電力変換システム調査専門委員会編. パワーエレクトロニクス回路. 2000.



大木 正之 OHKI Masayuki

東海旅客鉄道(株)建設工事業部電気工事課係長。  
東海道新幹線受変電設備の建設工事に従事。  
Central Japan Railway Co.



大槻 みどり OHTSUKI Midori

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター  
エネルギーソリューション開発部。電力システムの解析、  
制御開発に従事。  
Power Systems Solution Group



長山 徳幸 NAGAYAMA Noriyuki

電力・社会システム社 交通システム事業部 交通電力システム技術部。電鉄用受変電システムエンジニアリング業務に従事。  
Transportation Systems Div.



石塚 智嗣 ISHIZUKA Tomotsugu

東芝三菱電機産業システム(株)パワーエレクトロニクス部  
開発・設計課主任。電鉄・電力大型システム制御装置の  
開発・設計業務に従事。電気学会会員。  
Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corp.