

# 高力率コンバータ“FR-HC2シリーズ”

市原昌文\*  
平良 哲\*  
福岡弘淳\*

## High Power Factor Converter "FR-HC2 Series"

Masafumi Ichihara, Satoshi Taira, Hiroatsu Fukuoka

### 要 旨

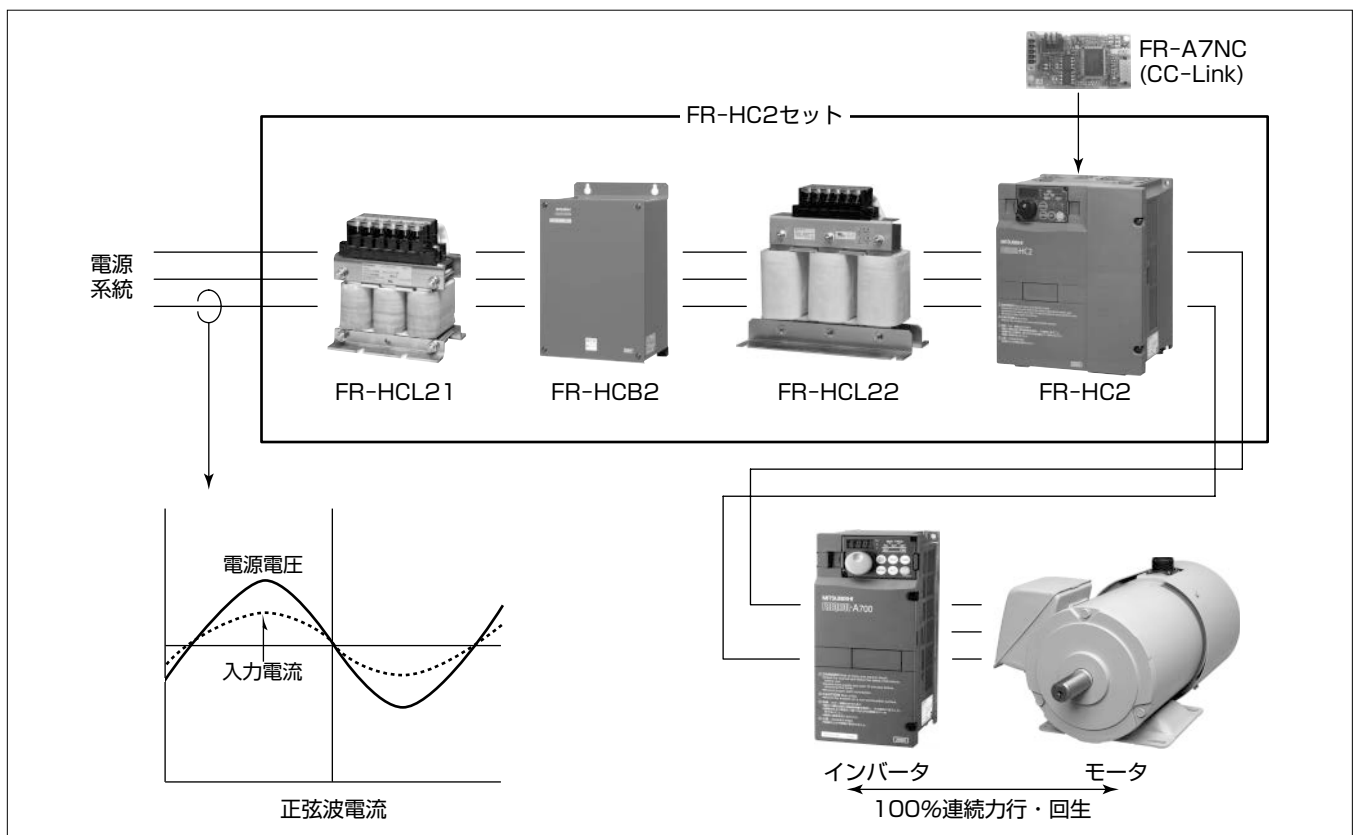
一般的な汎用インバータはコンバータ回路としてコンデンサ入力形ダイオード整流回路を用いていることから、入力電流波形に高調波成分が含まれる。高調波電流は電源電圧に歪(ひず)みを生じさせる場合があり、同じ電源系統に接続された他の機器に悪影響を与える可能性がある。このため、電源系統容量に余裕を持たせたり、リアクトルなどによる高調波対策を実施する必要がある。

この高調波問題に対する対策の1つとして、正弦波PWM(Pulse Width Modulation)コンバータの適用が考えられる。PWMコンバータは、入力電流が正弦波状になるよう瞬時電流制御を行うことで、高調波を大幅に抑制することができる。従来、PWMコンバータとして“FR-HC/

MT-HC”の両シリーズを供給してきたが、今回、後継機種として両シリーズを統合した“FR-HC2シリーズ”(以下“FR-HC2”という。)を新たに開発した。

FR-HC2では、PWMコンバータとしての基本的な機能を継承しつつ、最大容量の拡大、CC-Linkネットワークへの対応、専用操作パネルの装備、設計寿命10年の確保等の改良を加えている。また、単体での最大容量を超える容量を実現するために、2台のFR-HC2の直流出力を共通化する並列運転機能を実現した。

本稿では、このFR-HC2について述べ、さらに、容量拡大のために今回新規に開発した並列運転機能について述べる。



### 特定需要家の高調波抑制対策ガイドラインで換算計数K5=0を実現する“FR-HC2シリーズ”

高調波問題が避けられない汎用インバータの電源として、FR-HC2を適用することで大幅な高調波の抑制が可能となる。合わせて100%回生機能による省エネルギー対応、CC-Linkネットワーク対応、並列接続による超大容量アプリケーションへの対応等によって、汎用インバータをより高機能、高性能化できる。

### 1. ま え が き

モータ駆動の省エネルギー、高性能化のために、汎用インバータが広く用いられている。しかし、汎用インバータはコンバータ回路としてコンデンサインプット形ダイオード整流回路を用いていることから、入力電流波形に電源周波数の奇数倍の周波数(3の倍数を除く)を持つ高調波成分が含まれる。

電源容量が小さい場合には、この高調波電流によって電源電圧に歪みが発生する場合があります。同じ電源系統に接続された他の機器に悪影響を与える可能性がある。このため、電源系統容量に余裕を持たせたり、リアクトルなどによる高調波対策を実施する必要がある。

この高調波問題に対する対策の1つとして、正弦波PWMコンバータの適用が考えられる。三菱電機ではこれまでPWMコンバータとしてFR-HC/MT-HCの両シリーズを供給してきたが、今回、後継機種として両シリーズを統合したFR-HC2を新たに開発した。

次にこのFR-HC2の特長、及び容量拡大のために新規開発した並列運転機能の内容について述べる。

## 2. FR-HC2の特長

### 2.1 高調波抑制対策ガイドライン対応

電源系統に流れる電流を瞬時電流制御によって正弦波状にできるため、特定需要家の高調波抑制対策ガイドラインで換算計数 $K5=0$ を実現した。

汎用インバータをそのまま電源に接続した場合には、大きなピーク電流が流れることで、入力電流の実効値が大きくなる。この影響で、上位電源、NFB(No-Fuse circuit Breaker)、配線等の容量を実際の有効電力に対して大きく取る必要がある。

これに対し、FR-HC2を適用すれば入力電流実効値が減少するため、各種設備の容量圧縮が可能となる(図1)。

### 2.2 電源回生機能

FR-HC2が採用しているPWMコンバータ回路は、力行だけでなく回生運転も可能である。100%連続回生、及び150%-1分の短時間回生が可能であるため、大きな制動能力が得られるだけでなく、回生エネルギーを電源に戻すため省エネルギーになる(図2)。

### 2.3 大容量化

大容量モータを駆動する場合や、複数のインバータを直流通母線接続して使用する場合などは、PWMコンバータの大容量化が求められる。従来の大容量レンジ製品であるMT-HCでは最大容量375kWであったが、FR-HC2では最大560kWに対応した。これによって、従来対応できなかった大容量アプリケーションへの適用が可能となった。

さらに、3章で述べる並列運転機能を搭載し、容量を

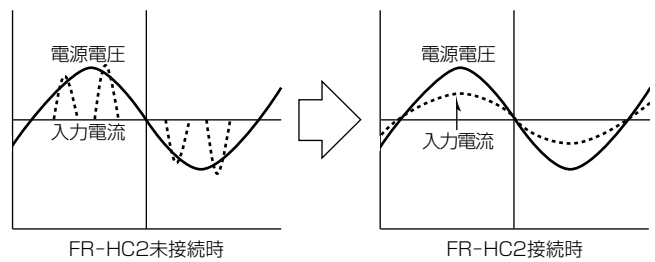


図1. FR-HC2接続による入力電流波形改善

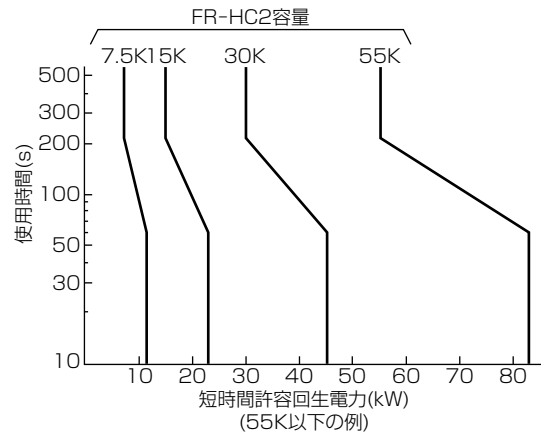


図2. FR-HC2の許容回生電力

800kWまで増加させることも可能である。

一方で、低損失パワーモジュールの採用や主回路導体形状の最適化等によって発生損失を低減することで、ユニット外形を小型化した。FR-HC2の560kWユニットは、MT-HCの375kWユニットとほぼ同一外形となっている。

### 2.4 CC-Linkネットワーク対応

FR-HC2では、CC-Linkネットワークに対応しており、運転状態をネットワーク経由で監視できるようになっている。回生状態から省エネルギー効果を確認したり、系統電圧検出値やアラーム状態から障害解析を行うといったことが可能となる。

### 2.5 長寿命部品採用と寿命診断機能搭載

FR-HC2では主回路直流コンデンサや冷却ファン等の寿命部品について設計寿命10年を確保した。また、寿命部品の劣化度合いを監視し、事前にアラームを出力することも可能である。これによって、計画的な設備メンテナンスが可能となる。

## 3. 並列運転機能

FR-HC2では単体での最大容量を560kWまで拡大しているが、これを超える容量を必要とする用途に対応するため、2台のFR-HC2を並列運転する技術を新規開発した。

### 3.1 並列運転構成と課題

並列運転時の構成を図3に示す。

2台のFR-HC2の直流端子を相互に接続し、負荷が必要とする電流を2台で等分に分担する。交流側は“FR-HCL21/

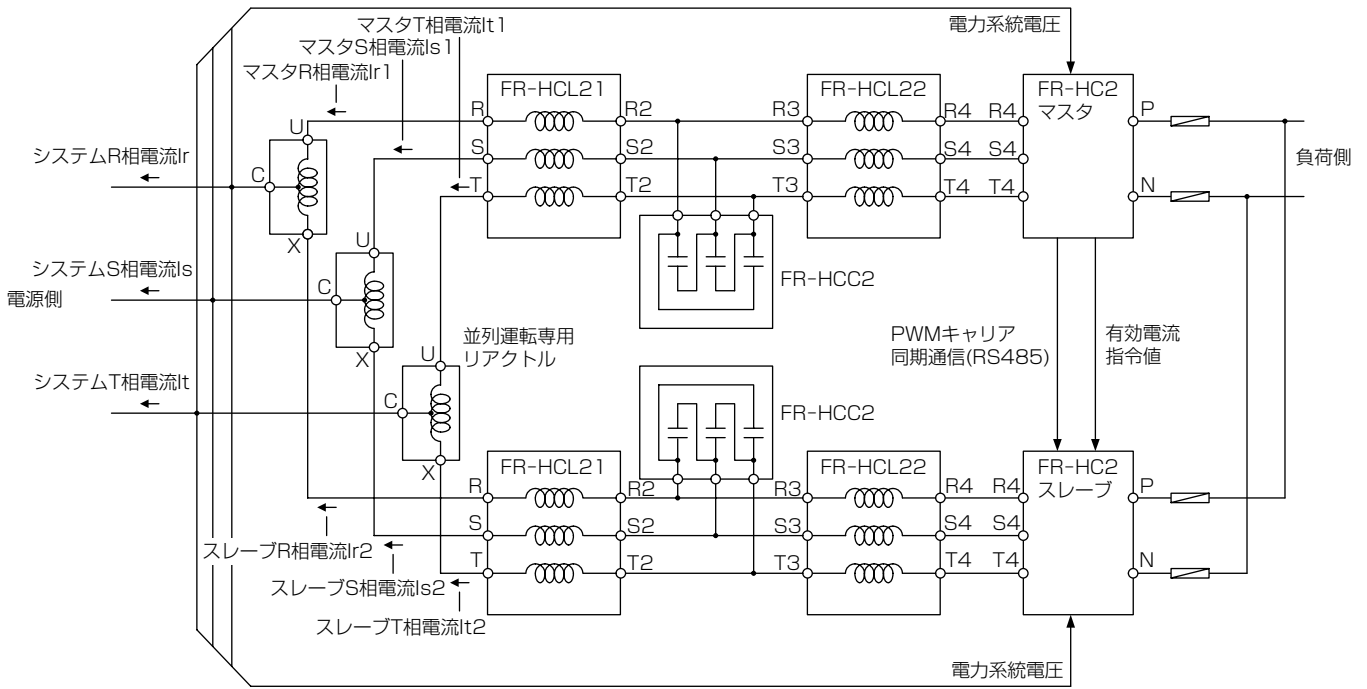


図 3. FR-HC2並列運転構成(予備充電回路などは省略)

22”及び“FR-HCC2”で構成するフィルタ回路の電源側を並列運転専用リアクトルによって接続し、並列リアクトルの中性点を電源に接続する。

このような回路構成での運転を実現するためには、次の2つの課題を解決しなければならない。

(1) 入出力電流のバランス確保

2台のFR-HC2の電流をほぼ同一の位相・大きさにする必要がある。

大きさのバランスが崩れると、電流負担が大きい方のFR-HC2で過電流保護などの保護機能が動作する可能性がある。また、双方の位相ずれが大きくなると、FR-HC2間に容量に寄与しない横流が流れてしまい、容量拡大ができなくなる。

(2) 零相横流電流の抑制

2台のFR-HC2の交流側と直流側の双方を接続していることから、仮に、あるタイミングでのスイッチングパターンが図4のようになっていた場合、図中に示すような経路で零相横流電流が流れる。

この電流の経路にはフィルタ回路のリアクトルや並列リアクトルが存在する。しかし、フィルタ回路のリアクトルは一般的な3脚タイプの鉄心を使用していることから、このような零相の電流に対してはほとんどインダクタンスがない。この結果、ほぼすべての電圧を並列リアクトルが負担することになる。

図4のモードに限らず、2台のFR-HC2のPWMキャリアが非同期であることによってスイッチングパターンが一致しない期間が長い場合、並列リアクトルに加わる電圧は非常に大きくなる。この場合、電流抑制のために並列リア

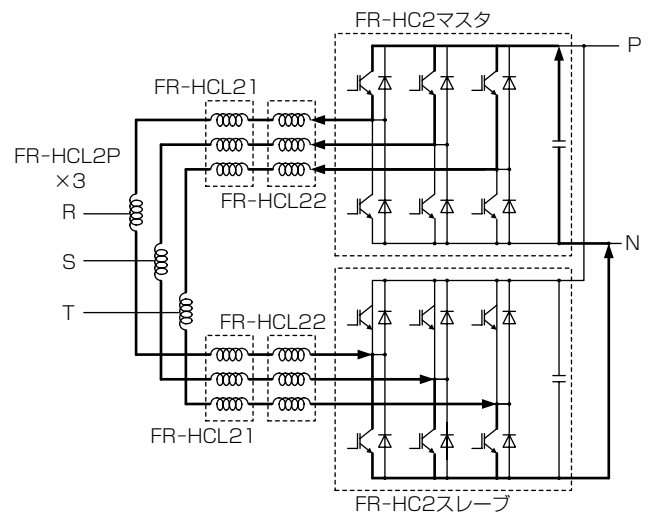


図 4. 零相横流電流経路

クトルを大型化する必要がある。

3.2 並列運転制御系構成

電流バランスを確保するために、図5のような制御系を構成して対策した。

2台のFR-HC2の片方をマスタ、もう片方をスレーブとする。マスタは単体での運転時と同様に直流母線電圧制御を行い、有効電流指令値を作成、その電流値を出力するよう電流制御を行う。この有効電流指令値を、マスタからスレーブに入力する。スレーブは直流母線電圧制御は行わず、マスタから入力される有効電流指令値を出力するよう電流制御を行う。

マスタ・スレーブとも、並列システムを受電端の系統電圧を検出し、デジタルPLL(Phase Locked Loop)によって

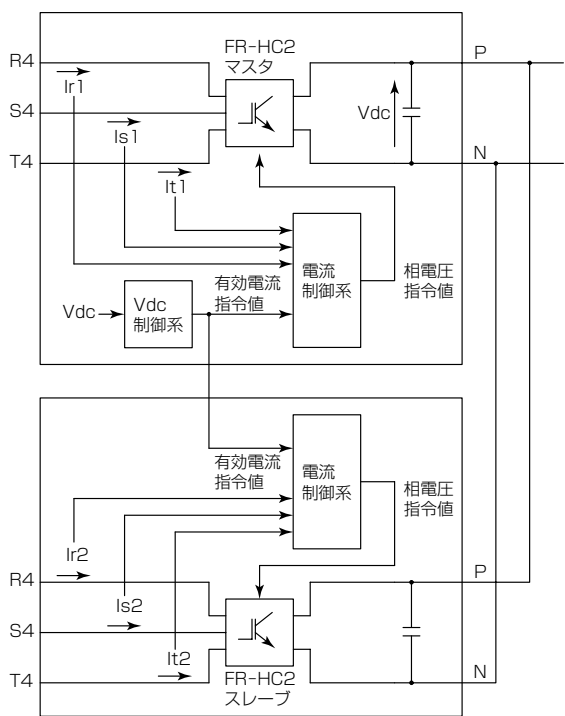


図 5. 並列運転制御系

電源位相を演算する。同一地点の位相をデジタル方式でロックするため、マスター・スレーブとも系統電圧位相としては同じ情報を使用することになる。同一の有効電流指令値を使用して電流制御を行うことによって、2台の電流の大きさがほぼ同一になる。また、同じ系統電圧位相によって電流制御を行うことから、2台の電流の位相が同期する。

結果として電流バランスが確保され、個々のFR-HC2の容量を有効に利用できるようになる。

### 3.3 通信回路によるキャリア同期制御

2台のFR-HC2の間を流れる図4のような零相電流を抑制するため、双方のFR-HC2が同一のPWMキャリアでスイッチングを行うよう、PWM用内部クロックを同期させるようにした(図6)。

マスターとスレーブの間をRS485の通信ラインで接続し、マスターからスレーブに対して、内部クロックの特定のタイミング(例えばオーバーフロー)で簡単なデータを送信開始する。スレーブは該当データを受信完了したら、スレーブの内部クロックによる時刻( $t_s$ )と、データ転送に必要な時間( $t_{com}$ )を考慮してマスターがデータを送信開始した時刻を求める。その時刻が内部クロックの特定のタイミングになるように内部クロックのカウント数を微調整( $t_c$ )し、マスターと同一のカウント値になるようにする。

RS485通信速度自体は、キャリアの位相調整の次元と比較すると低速であるが、送信開始から受信完了までの時間は制御系マイコンの水晶によるクロックで規定されるため精度が高い。このため、スレーブ側が推定するマスターデータ送信開始時刻の精度も高くでき、この方式で十分なキャリア同期精度が得られる。また、ノイズによって通信ライ

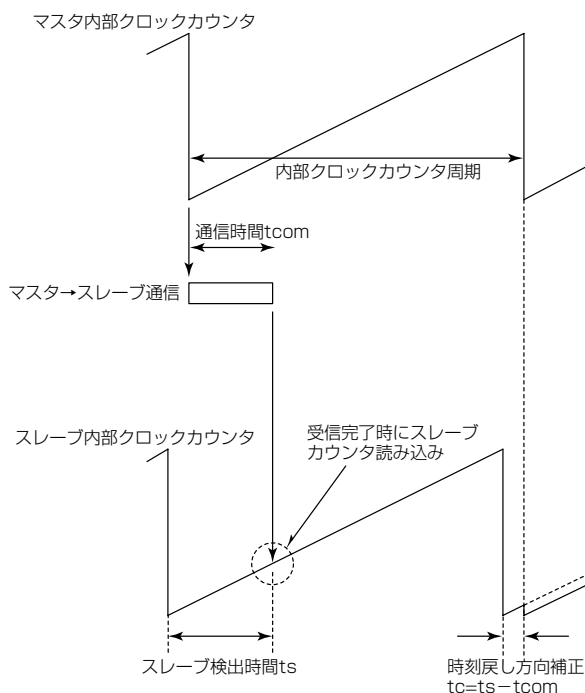


図 6. 内部クロック同期処理

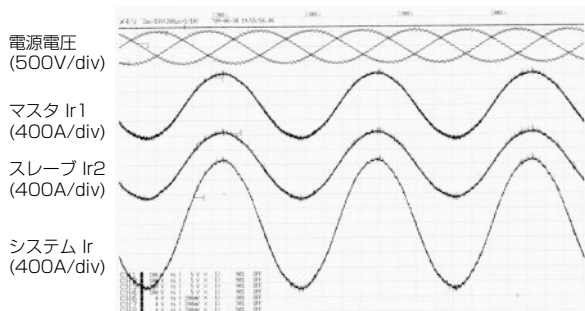


図 7. 並列運転動作波形(2 ms/div)

ンが妨害を受けた場合は受信エラーが発生するため、そのデータでは同期処理を行わないようにする。このため、正常受信した場合だけキャリア同期処理を行うことができ、ノイズによる同期ずれは生じない。

なお、通信系の配線長や回路部品に起因するばらつきは同期精度に直接影響を与える。これによる零相電流成分については、並列リアクトルによって抑制する。

### 3.4 動作波形

実際に2台のFR-HC2を並列運転させた際の電流波形を図7に示す。双方のFR-HC2がほぼ同一の電流を出力しており、電流分担が正常に行われていることが確認できる。

## 4. む す び

高調波電流による問題を抜本的に解決できる正弦波PWMコンバータのFR-HC2シリーズによって、限られた電源容量を有効活用できる。また、並列運転機能を適用することで、大容量のアプリケーションへの対応も可能とした。

今後も市場ニーズに合致したインバータ周辺機器の開発を推進していく所存である。