

高効率 AC-DC モジュールの製品化

Commercialization of high-efficiency AC-DC modules

西山利行* 宮原隆浩* 宮田智弘* 宮崎伊佐夫**

Toshiyuki Nishiyama Takahiro Miyahara Tomohiro Miyata Isao Miyazaki

Abstract

We have developed and commercialized a high-efficiency and convection-cooling AC-DC converter module for a single-phase ac input and 48-V dc output. The module adopts a three-phase LLC resonant converter beyond 99% efficiency, even with Si superjunction MOSFETs, and the overall module efficiency still reaches 96% or more. We can expand the variations of power supply products by combining the modules developed as a core technology for modular design.

Key words : AC-DC module, high efficiency, modular design, three-phase LLC resonant converter

1 はじめに

地球環境の保全として CO₂ 削減目標が定められ、省エネルギー化や再生エネルギーの利用が進められている。データセンターや通信機器への電源供給には交流から直流に変換する直流電源設備¹が使用されており、その損失低減が課題であり、研究開発が加速している。直流電源設備は、整流装置（以下、AC-DC ユニットと呼ぶ）と蓄電池等で構成され、高効率の AC-DC ユニットの開発が急務である。

筆者らは三相マルチフェーズ LLC 電流共振コンバータ^{2,3}（以下、三相 LLC コンバータと呼ぶ）を搭載した AC-DC モジュール（以下、モジュールと呼ぶ）を製品化した。このモジュールは、直流出力 48 V 25 A と直流出力 48 V 50 A の AC-DC ユニット製品へ展開した。三相 LLC コンバータを搭載することでユニッ

トの変換効率 96% 超の高効率を得られた。本モジュールおよび AC-DC ユニットについて以下に報告する。

2 特徴

開発したモジュールは、以下 3 つの特徴がある。

①モジュール容量

- ・自然空冷 48 V 25 A
- ・強制空冷 48 V 35 A

②仕様

- ・- 46 ~ - 57.5 V と幅広い出力電圧範囲(+極接地)
- ・最高効率 96% 以上

③汎用・拡張性

- ・ Modbus 通信による外部動作制御が可能
- ・ 信号端子の接続で電流バランスした冗長運転が可能
- ・ 外付け制御基板の追加とモジュールの組み合わせで多種の AC-DC ユニット開発が可能

* 電源システム開発本部 第二開発部 第二 G

** 電源システム開発本部 第三開発部 第一 G

3 回路構成

図1に本モジュールの回路構成をブロック図で示す。

STBY回路（制御電源回路）、PFC回路（力率改善回路）、DC-DCコンバータ回路、冗長回路（ORing回路）、1次/2次マイコン（MCU）で構成される。DC-DCコンバータ回路には効率99%超の三相LLCコンバータを採用している。STBY回路では各回路の制御電源を作成している。PFC回路では力率改善（高調波対応）を行い、入力電流を正弦波状にしている。三相LLC回路では絶縁機能を持たせた電圧変換を行い、1次マイコンでは起動や停止などのシーケンス制御、2次マイコンでは外部機器との通信や出力電圧設定を行っている。モジュール同士の冗長運転を可能にするため、逆流防止機能を持つ冗長回路（ORing回路）が出力端に設けられている。

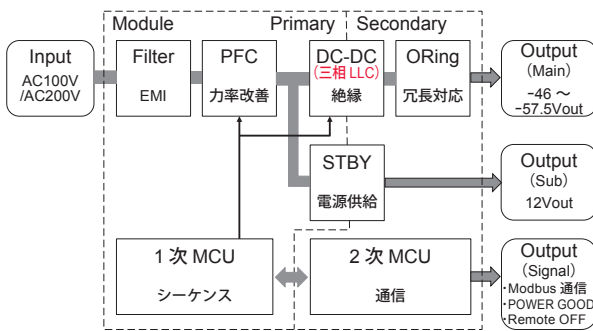


図1 モジュールのブロック図
Fig.1 Module block diagram.

4 三相 LLC コンバータ

4.1 回路構成と特徴

図2に三相LLCコンバータの構成図を示す。直流入力電圧 V_{in} を絶縁した直流電圧 V_o に変換する。コンバータ部分は三相の共振回路構成となり、各相は120度の位相差で動作する。共振回路特有のソフトスイッチング技術による低損失と低ノイズ、マルチフェーズ動作による熱分散と入出力リップル電流低減を併せ持つ。加えて各相の共振コンデンサを分割し、ひとつは各相へ相互接続、もうひとつは電源ラインへ接続することで電流バランスの取れた動作を実現し、軽負荷時には単相動作への切り替えを可能としている。以上により幅広い負荷電流範囲で高効率性能を得ることができる。

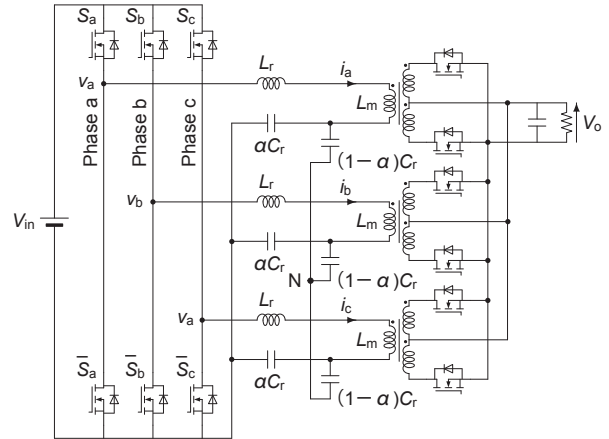


図2 三相LLC回路の構成図
Fig.2 Three-phase LLC resonant converter configuration.

4.2 動作波形と効率特性

図3に三相動作時と単相動作時の実際の共振電流波形を示す。各相が120度の位相差で電流バランス動作していることが分かる。三相/単相動作の切り替えも問題なく行われている。

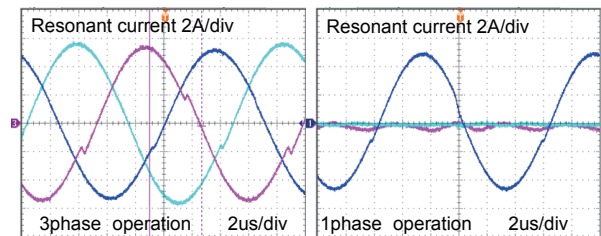


図3 実際の動作電流波形
Fig.3 Actual operating current waveforms.

図4に三相LLCコンバータの効率特性を示す。出力電力200W近辺で単相動作と三相動作の切り替えを行っている。600W以上で効率99%以上を達成し、200W以下の軽負荷時にも95%以上の効率を維持している。GaN、SiCなどの次世代デバイスを使うことなく、SJ-MOSの採用でも幅広い出力電力領域で99%以上の効率を得ることができた。

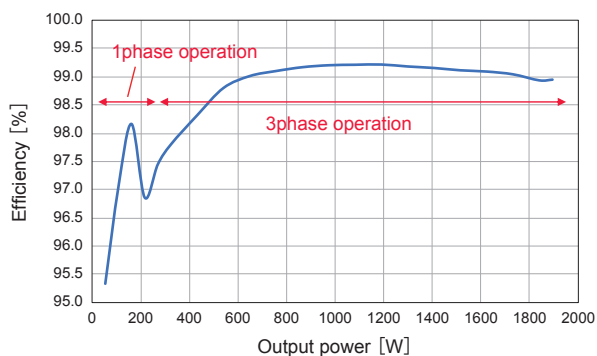


図4 3相 LLC 回路の効率特性
Fig. 4 Efficiency characteristics of a three-phase LLC resonant converter.

4.3 磁気統合トランス

三相 LLC コンバータでは3つの絶縁トランスと3つの共振インダクタを使用する。図5に使用するトランスを示す。上段が磁気統合トランス（開発品）、下段がトランス単品3個（従来品）である。コアを5脚構造とすることで外脚4本分を削減し、実装面積を約16%削減した。3つをそれぞれ統合して一体化することで磁束相殺による損失低減と小型化を図っている。



図5 トランス比較写真
Fig. 5 Comparison of the transformers.

5 製品概要

5.1 仕様と外観

製品仕様を表1に示す。単相入力、自然空冷時48V 25Aの出力定格となっており、入力電圧AC200V時には最大効率96%以上の効率を得る。正常動作状態を表示するPOWER GOOD信号や出力を停止させるリモートOFF信号の機能を搭載している。バッテリー

充電に対応するため、出力電流は定電流垂下特性で制限される。

図6に本モジュールの効率特性を示す。負荷電流10A以上の領域で効率96%を超える特性を得ている。

図7に本モジュールの外観写真を示す。写真上段が入力からPFC回路部分、下段がDC-DCコンバータ（3相LLCコンバータ）から出力部分、中央部に制御電源回路やマイコンなどが搭載されている制御回路基板が配置されている。入出力のインターフェイスには端子台を採用し、汎用性を高めている。

表1 モジュールの仕様
Table 1 Module specifications.

項目	仕様
入力電圧範囲	1 Φ AC90 ~ 110V/AC180 ~ 220V
最大効率	96%以上 (AC200Vにて)
力率	0.98以上
出力電圧範囲	-46 ~ -57.5V
出力電流範囲 ^{*1}	0~25A
出力リップル電圧	200mVp-p以下
使用温度範囲	-10 ~ +45°C (自然空冷)
EMI	VCCI class A 準拠
主な信号機能	POWER GOOD, リモート OFF
外形寸法 (W × D × H)	282mm × 133mm × 53.6mm
質量	約1.6Kg

^{*1} 強制空冷により35Aまで取得可

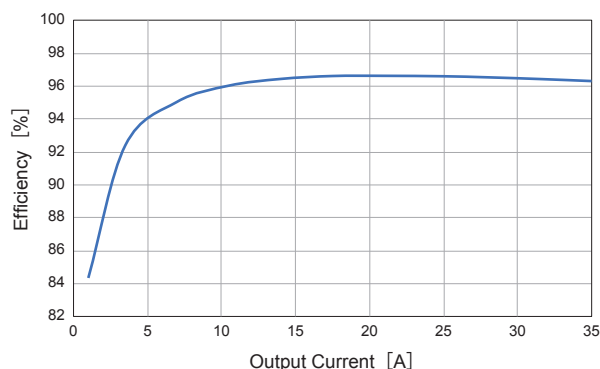


図6 モジュールの効率特性
Fig. 6 Efficiency characteristics of the module.

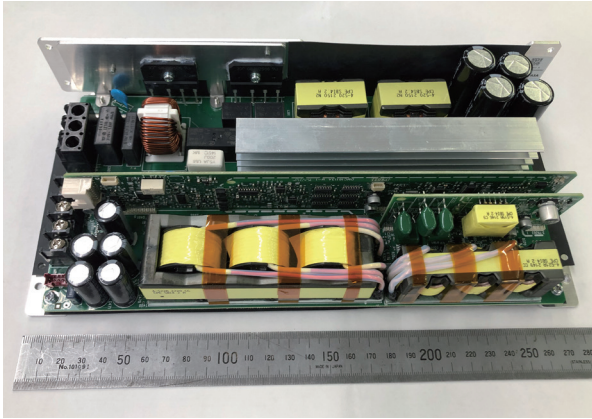


図7 モジュールの外観写真
Fig. 7 Outside view of the module.

5.2 モジュラーデザイン

新製品開発においてモジュラーデザイン⁴と呼ぶ設計に取り組んでいる。製品群全体から共通設計部（モジュール部）を抽出し、機能・仕様・インターフェイスを決めて開発する。モジュールの選定により多様な製品対応が可能になる上、開発期間短縮や設計工数削減、部品共通化によるコスト削減や調達性改善が図れる。

本モジュールは、モジュラーデザインのコアモジュールとして AC-DC ユニットへ展開するために開発した。図8に AC-DC ユニットへの展開例を示す。本モジュール1台搭載で単相 48 V 25 A ユニット、2台を並列搭載して単相 48 V 50 A ユニット、そして強制空冷条件で3台を並列搭載することで三相 48 V 100 A ユニットへの展開が可能である。外部にインターフェイス基板を設けることで各ユニット仕様に対応する。次章で 25 A と 50 A ユニットについて紹介する。

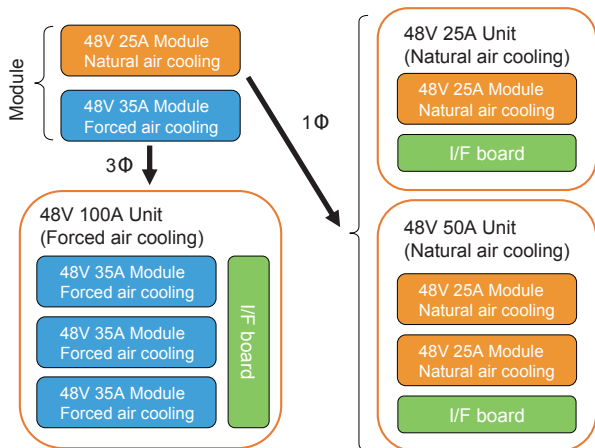


図8 モジュール展開例
Fig. 8 Module expansion portfolio.

6 整流器ユニットへの展開例

図9に 25 A ユニットの筐体内部写真を示す。モジュール1台を搭載し、入出力コネクタや入力ブレーカー、入力ヒューズ基板、インターフェイス基板より構成される。これらはハーネスアSEMBリで接続される。インターフェイス基板は、既存ユニットとの互換性を持たせるため、外部通信用マイコンや電圧調整用の可変抵抗、電圧チェック用端子などが搭載されている。

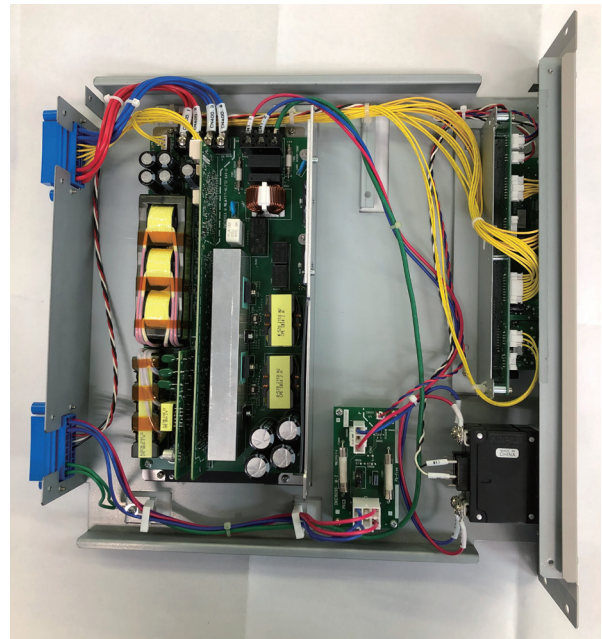


図9 NRS48-25SP 内部写真
Fig. 9 Inside of NRS48-25SP unit.

図10に 50 A ユニットの筐体内部写真を示す。モジュール2台が並列接続状態で搭載される。25 A ユニットと同様の入力ブレーカー、入力ヒューズ基板、インターフェイス基板で構成される。これらをハーネスアSEMBリで接続している。

本モジュールの展開により、製品のコアとなる電源回路部分の設計工数や評価工数が短縮でき、低コストで短期開発を実現した。

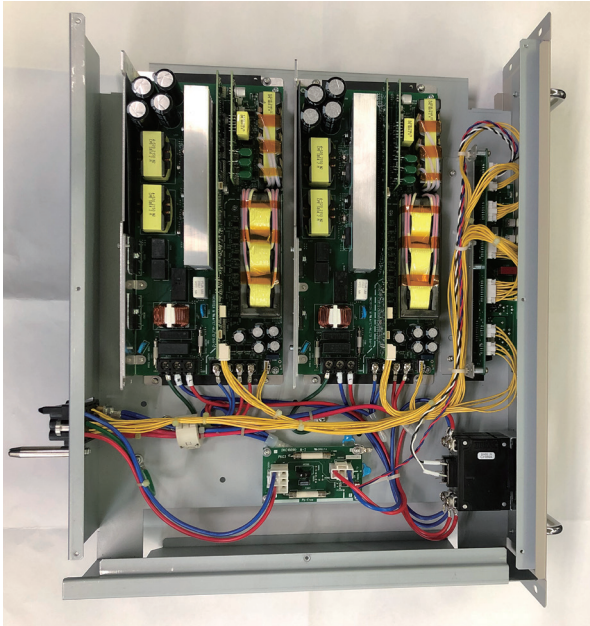


図 10 NRS48-50SP 内部写真
Fig. 10 Inside of NRS48-50SP unit.

7 おわりに

三相 LLC コンバータを搭載した最高効率 96% を超える高効率モジュールを製品化し、その展開により整流器ユニットの新製品開発を低コスト、短期間で行った。現在は、更なる高効率化を目指し、高効率 PFC 回路の開発と、それに三相 LLC コンバータを組み合わせた整流器ユニットの製品化を進めている。モジュラーデザインのコアモジュールとして 24 V 出力のモジュール開発を行い、整流器ユニット開発への展開を進めていく。

参考文献

1. 電気通信施設設計要領（電気編）第 5 章 令和 3 年 3 月 国土交通省 大臣官房 技術調査課 電気通信室.
2. A. Chiba, K. Takagi, Y. Aoyagi and K. Ishikura, "The potential of LLC resonant converters equipped with split resonant capacitors: from three-phase to fractal structures," in *Proc. IEEE Int. Power Electron. Conf.*, Himeji, Japan, May 2022, pp. 1711-1718.
3. 高木, 青柳, 千葉 “共振コンデンサを分割した三相 LLC 共振コンバータを用いた効率 99.9% 部分電力変換方式 DC-DC コンバータ” 電気学会産業応用部門半導体電力変換技術委員会電気学会研究会資料. MD / モータドライブ研究会 [編] 2021 (94-115・117), 7-12, 2021-09-17.
4. 【実践】モジュラーデザイン 時代が求めている新しい解, 日野三十四 日経ものづくりの本 2010 年.