

システムの信頼性を追及するパワーエレクトロニクス

Power Electronics Pursuing System Dependability

松崎 薫

MATSUZAKI Kaoru

眞野 康友

MANO Yasutomo

神達 幸雄

KANDATSU Yukio

一瞬たりとも欠くことを許されない“情報”，時間とともに刻々と変化する“情報”，時間関数である“情報”を処理，伝達するネットワーク，コンピュータシステム，通信システム，これらの情報システムをパワーエレクトロニクス技術が支えている。機械的なエネルギーの発生，伝達手段ではどうしても“一瞬”を補うことはできない。それを実現しているのが無停電電源装置(UPS)に代表されるパワーエレクトロニクス技術である。パワーデバイスであるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)の信頼度確保，コアとなる回路，制御，冷却，低インダクタンス実装技術をいかに高信頼化するか，そして更にシステムによる信頼度の確保が重要なポイントである。

Networks, computer systems, and information systems process and communicate information that is not allowed to disappear even for a moment, information that changes second by second, and information that has a time function. Power electronics technology supports these information systems. Mechanical energy generating and supply systems cannot compensate for momentary interruptions. Power electronics technology represented by the uninterruptible power system (UPS) realizes dependability for such systems.

The most important points in this field are securing the reliability of insulated-gate bipolar transistors (IGBTs) as key power electronic devices; finding ways to enhance the reliability of circuit technology, control technology, cooling technology, and low-inductance mounting technology as core technologies; and ensuring high system dependability.

1 まえがき

最近のIT(情報技術)は目覚ましい発展を遂げており，インターネットの爆発的普及やオープン化などにより，情報通信技術が飛躍的に向上している。こうしたITを利用した新しい概念のビジネスであるB to B(企業間の取引)，B to C(企業と消費者間の取引)などの電子商取引サービスが開始され，業務のアウトソーシング化が進み，インターネットデータセンター(IDC)が多数設立されつつある。IDCは日本国内のみならず，全世界地球規模の事業展開となるため，それに電源を供給するUPSには非常に高い信頼度が求められる。その高い信頼度を実現させるために，パワーデバイス技術をはじめ，回路技術，制御技術，実装技術などのコア技術をベースにシステム技術に至るまで幅広い技術が必要である。ここでは，それら信頼度にかかわるパワーエレクトロニクス技術について述べる。

2 デバイス技術

最新のUPSにおける主回路スイッチング用パワーデバイスとしては，その高速性と低損失性からIGBTが広く採用さ

れている。IGBTは1980年代に実用化されて以来，年々性能改善が進められてきており，現在では第3～4世代目の製品が広く使用されている。最近の動向としては，ゲート及びコレクタの構造を工夫することにより，いっそうの高速化，低オン電圧化を図っている。

更に，大容量化への対応も進んでいる。個々のパワーデバイスのオン電圧のばらつきを抑制し，熱こう配を正にすることで直並列での使用を容易にしている。また，ゲートドライブ回路の簡素化や信頼性の向上を目指し，ゲートドライブ機能や保護機能を内蔵した，いわゆるIPM(Intelligent Power Module)の適用も増加しつつある。

当社UPSにおいては，性能，コスト，信頼性，更には保守性までを考慮し，応用面から見た最適なパワーデバイス・ゲートドライブ回路を選定し使用している。

例えば，装置の特性を向上させるためには，より高速なスイッチング動作をさせる必要がある。しかしながら，スイッチング動作を高速にすると電圧サージや電磁障害(EMI)ノイズの増大を引き起こす可能性があり，全体のバランスを見た設計が不可欠である。また，パワーデバイスを並列で使用する場合，定常的な電流はその特性によって平均化されるが，スイッチング時の瞬間的な電流のバランスを保つために

は、各パワーデバイスへのインダクタンスが均等になるように設計する必要があり、装置設計側での対応が必要である。

2.1 低損失化

スイッチング用パワーデバイスの発生する損失は、UPS装置全体の40%前後を占め、変圧器などの磁気回路と並んで多くの電力を消費している。UPSでは、次の対策により損失低減を図っている。

- (1) 最新デバイスの適用
- (2) ゲートドライブ回路の最適化
- (3) スナバ損失を含めたトータル損失の削減

前述のように、パワーデバイスの損失と電圧サージとのトレードオフを考慮し、シミュレーションによるインダクタンス評価を事前を実施することで、低損失で信頼性の高い装置設計を実現している。シミュレーションモデルと結果の一例を図1に示す。

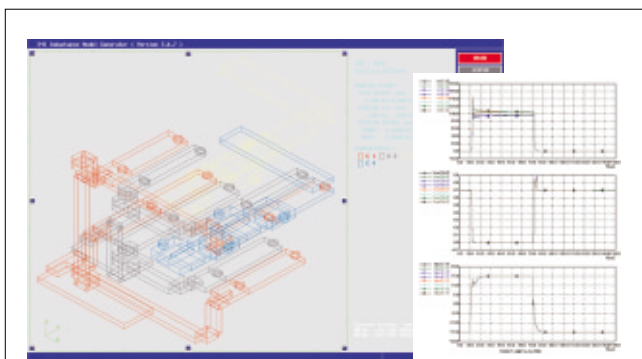


図1. パワーデバイスのシミュレーション - IGBTを並列で使用した場合の各デバイス間の電流バランスをシミュレーションするためのモデル(左)とシミュレーション結果(右)を示す。

Simulation of power device application

2.2 高信頼化

スイッチング用パワーデバイスはUPSを構成する最重要要素であり、一つでも故障すれば装置全体の故障へと波及し、UPSによる負荷給電の継続は困難となる。回路又はシステムの多重化によって高信頼化を図ることは可能であるが、装置、システムの価格アップを招くこととなる。当社UPSは、パワーデバイスを含めた個々の使用部品の信頼性向上を最優先課題とし、そのうえに回路・システム設計による高信頼化を積み上げるといった思想により設計されている。特にパワーデバイスについては、すべてのデバイスに対して受入れ時のスクリーニングを実施しており、デバイス製造メーカーより一段上の管理を行うことで、更に信頼性を確保している。この施策によって、実機におけるパワーデバイスの平均故障間隔時間(MTBF: Mean Time Between Failures)は、メーカー公表値を大幅に超える値となっており、UPSの信頼性向上に大きく貢献している。

3 コア技術

UPSのコア技術としては、主回路、制御回路、実装・冷却などに関するものが重要である。それぞれの技術について、様々な新しい方式が提案され、実用化されてきている。当社は、これら新しい技術に対し、装置の信頼性に与える影響を十分に検証したうえで採用可否を決定している。

3.1 主回路技術

主回路には、通常のコンバータ(整流器)+インバータを使用したダブルコンバージョン方式を採用している(図2)。UPSの基本的な役割は、商用電源に発生する様々なトラブルから負荷機器を絶縁し、安全に給電を継続することである。この役割を最大限に実現するためには、入力電源側と出力負荷側を完全に切り分けることが必要となる。高効率化のためには、電力が通過する変換器の数を減らしたり、常時商用給電とする方式などの手段も考えられる。しかし、安定した高品質電源を供給するというコンセプトにより、商用電源とは独立したダブルコンバージョン方式を採用している。

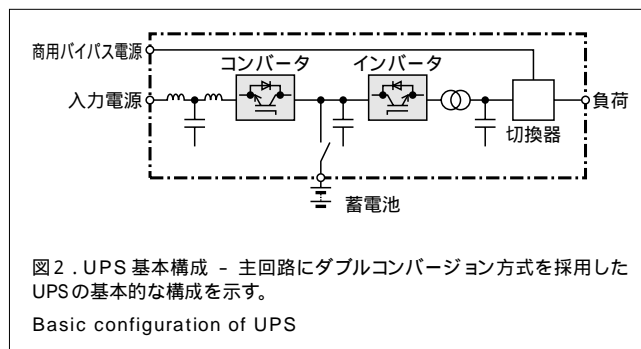


図2. UPS基本構成 - 主回路にダブルコンバージョン方式を採用したUPSの基本的な構成を示す。

Basic configuration of UPS

3.2 制御技術

UPSの制御は、最新のアーキテクチャを採用したデジタル制御により実現されている。制御のデジタル化は、次のようなメリットがあり、信頼性・長期安定性の向上に効果がある。

- (1) 部品点数の削減
- (2) 経年変化の防止
- (3) 調整の自動化

また、デジタル化することで、常に最新の制御技術が適用できるため、低損失化や高性能化へ寄与することになる。

検出回路、保護回路については、FTA(Fault Tree Analysis)を用いた解析を行い、重要度に応じてソフトウェア検出/ハードウェア検出/多重化検出を切り分けて適用している。更に、最重要信号については、光ファイバを使用することで電気的なノイズを完全に遮断するという工夫を行っている。

3.3 実装技術

パワーエレクトロニクスの世界では、装置内の温度分布や

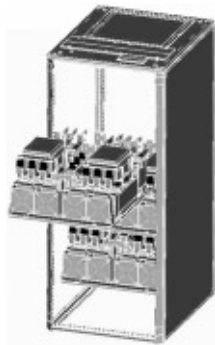


図3 . マルチユニット構成を採用したUPS - 複数のマルチユニットを採用したUPS構造の例を示す。

UPS using multi-unit converter

インピーダンス分布が信頼性や性能を決定する重要な事項になるため、実装には特に注意して設計を行っている。

当社の最新UPSであるTOSNIC™-7000シリーズでは、同一のコンバータ+インバースタックを複数台使用する“マルチユニット”構成を採用している(図3)。このユニットはすべての容量で共通化、標準化されており、量産による品質の安定性と高信頼性を実現している。また、各ユニットは異常発生時に個別に保護動作を行い、被害を最小限にとどめ、復旧までの時間を最短にすることが可能となる。

3.4 冷却技術

冷却技術は、回路上の高効率化設計とともに装置の小型化へ寄与するばかりではなく、信頼性への影響も大きい。一般的に、様々な構成部品を低い温度で使用することができれば、寿命要因による故障の発生を抑制することが可能となる。

UPSの設計においては、より厳密なモデルを使用した冷却シミュレーションを実施し、各個別要素に至るまで温度上昇値の解析を実施している(図4)。また、ファンの故障を想

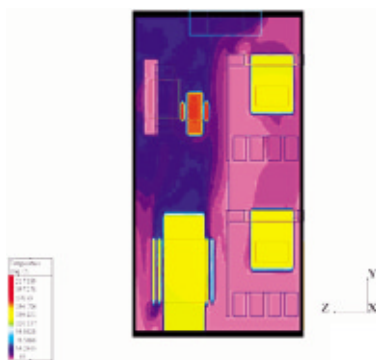


図4 . UPS筐体(きょうたい)内温度シミュレーション - UPS内の各部分の温度をシミュレーションによって評価した例である。

Simulation to evaluate UPS internal temperature

定したシミュレーションを行うことにより、ファンの冗長度を確認し、一つのファンの故障・停止で容易に装置停止に至らないような設計を実現している。

4 システムの信頼度向上

UPSシステム信頼度向上のポイントについて、以下に述べる。

4.1 ハイブリッド式無瞬断切換スイッチ

単一UPSシステムや並列冗長UPSシステムでは、バックアップ電源である商用バイパス電源に無瞬断切換するための切換スイッチを設けている。この無瞬断切換スイッチには、サイリスタのみで構成したスイッチがあるが、この場合、通電容量に見合ったサイリスタを複数個並列接続する必要がある。そのため、素子特性をそろえる選別、制御回路の複雑化、更に冷却が必要となり信頼度が低下する。これに対応し当社では、無瞬断切換スイッチにサイリスタスイッチとコンタクト(電磁接触器)を組み合わせたハイブリッド方式を採用している。この方式では、サイリスタスイッチは短時間通電でよいので複数個の並列接続は不要となり、制御回路も含めて構成がシンプルとなる。また、定期的に交換を必要とするベアリングを持つ冷却ファンが不要となり、負荷給電の最終出力となる共通部の故障率が低下し、システムの信頼度を飛躍的に向上させる(図5)。

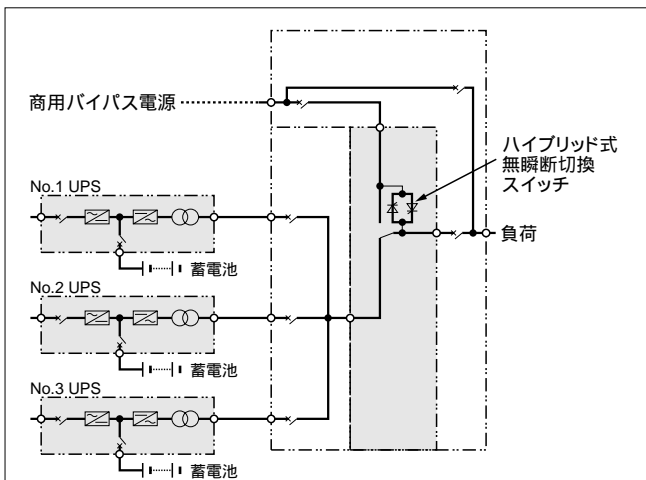


図5 . ハイブリッド式無瞬断切換スイッチ - 並列冗長UPSシステムに適用した事例で、シンプルな構成となり、負荷への供給信頼性が向上している。

Hybrid uninterruptible transfer switch

4.2 常用・予備UPSシステム

常用・予備UPSシステムは単一UPS 2台以上で構成する。常用UPSのバイパス入力に予備UPSの出力を接続することで、UPSの保守点検時にも予備機によるUPS給電が可能となり、給電電力の品質が更に向上したシステム構成となる。

表1. UPSシステムの比較
Comparison of UPS systems

UPSシステム	商用同期無瞬断切換 単一UPSシステム	商用同期無瞬断 並列冗長UPSシステム	常用・予備UPSシステム(商用同期)	常用・共通予備UPSシステム(商用同期)
構成図				
UPS故障時	UPS故障時: 商用バイパスへ無瞬断切換	UPS故障時(1台): 健全UPSで給電継続	UPS故障時(常用): 待機系UPSへ無瞬断切換	UPS故障時(常用): 待機系UPSへ無瞬断切換
UPS点検時	保守点検時: 保守バイパス給電又は給電 停止となる	保守点検時(UPS1台ずつ): 残りのUPSで給電継続 保守点検時(共通部分): 保守バイパス給電又は給電 停止となる	保守点検時(常用): 待機系UPSで給電継続 保守点検時(待機): 常用系UPSで給電継続	同左
供給信頼性				

:可(普通)
:良
:優

増設も容易な使い勝手のよいシステムを提供できる。大容量システムでは、上記単一UPSの代わりに並列冗長UPSを適用して信頼度を更に向上させたシステムも構築できる。各UPSシステムの比較を表1に示す。

4.3 共通要素の最小化と多重化

設備電源容量が大容量となるシステムの場合には、UPSを複数台並列接続してシステムを構成することになる。装置の信頼性向上施策は前項で述べたが、システムの信頼性向上を図るには、システムの共通部分を減らすことである。並列冗長UPSシステムでは、各UPSごとに商用同期制御回路を装備し、共通部を持たない完全独立制御方式を構築している。また、別に共通の商用同期制御回路を持ち、この共通クロック信号で並列制御を可能とする二重化クロック方式を採用し、共通部の信頼度を格段に高めている。一方、常用・予備UPSシステムは、常用と予備が完全に独立しており、共通要素となる並列制御を不要としているため、常用側で障害が発生しても予備側が影響を受けて給電停止することはない。

4.4 双方向無瞬断切換装置

双方向無瞬断切換装置(STS)は、2系統のUPSシステムと組み合わせ、片系統UPSの保守点検を実施するとき、UPS出力を無瞬断で他系統UPSに切り換える。負荷設備は、無停電で電源供給を受けることになるので給電継続性が向上したシステムを構築できる。

具体例を図6に示す。このシステムでは、UPSの出力側に

STSを2組設備することで幹線の二重化としている。更に、各フロアの2系統間にSTSを設けることで、幹線を含めてUPSを保守するとき無停電電源として負荷給電が可能となり、信頼度が向上したシステムとなる。

主回路は、ハイブリッド式無瞬断切換スイッチと同様に、サイリスタスイッチとコンタクタとを組み合わせた構成とし、信頼度を向上させている。STSはシステムの母線系統上共通部となるため、保守点検するときも、給電が継続できるように保守バイパス回路を設けている。

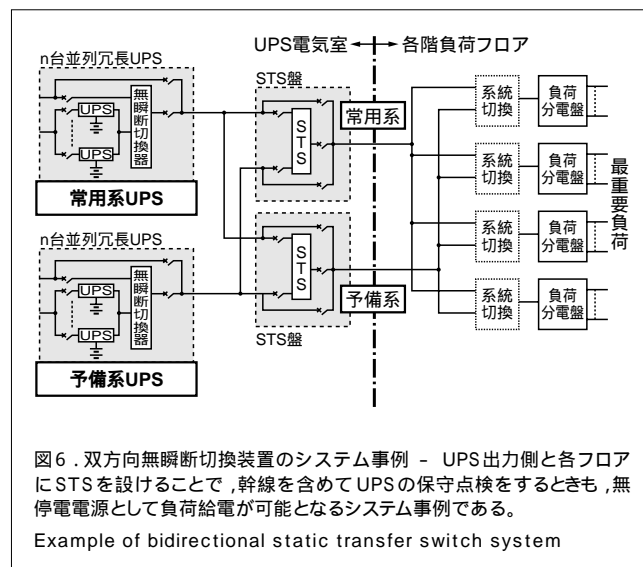


図6. 双方向無瞬断切換装置のシステム事例 - UPS出力側と各フロアにSTSを設けることで、幹線を含めてUPSの保守点検をすることも、無停電電源として負荷給電が可能となるシステム事例である。

Example of bidirectional static transfer switch system

5 監視システム

デバイス、コアやシステムの信頼度向上について具体的に内容を述べたが、万一UPSに不測の事態が発生した場合のことをあらかじめ考えておく必要がある。また、UPSを長い間安定な運転状態に保つためには、定期的な保守が必要不可欠となる。

UPSに不測の事態が発生したときの運転監視機能、及び安定した状態を保つための保守診断について次に述べる。

5.1 波形記憶機能

異常発生前後の各部波形などの情報をICメモ리카ードに記憶し、汎用パソコン(PC)を用いて簡単に記憶した情報を再生させることを可能とし、診断能力の向上を図っている。また、通常運転中の波形など内部の情報も手動にてメモリスさせることを可能とし、保守診断の一助としている。

5.2 Web監視機能

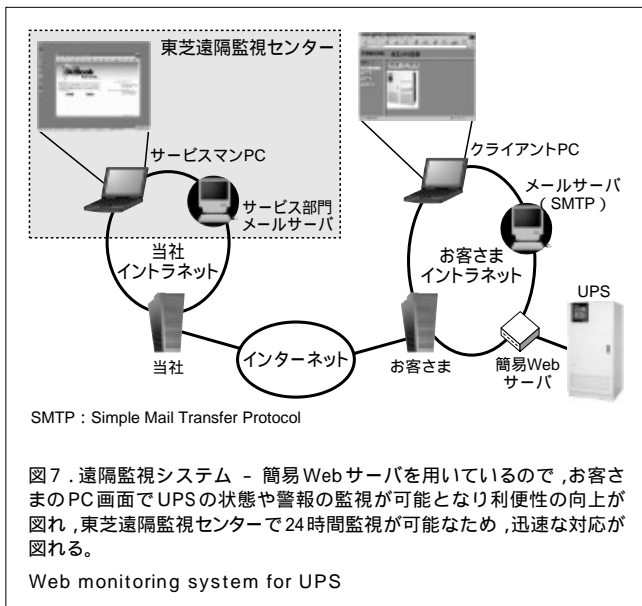
Web監視機能は、UPS本体にWebサーバを搭載し、汎用ブラウザによりLAN又はインターネット経由で監視が可能な

機能である。これにより、お客様のPC画面上で簡単にUPSの状態や警報の監視が可能となり、利便性の向上が図れる。また、インターネット経由で当社の24時間稼働の遠隔監視センターに接続することもできるため、専門家による迅速な対応も可能である(図7)。

6 あとがき

一瞬の停止も許されない情報システムを支えるパワーエレクトロニクスと高信頼度技術について、UPSをモデルに述べた。今後、ますます情報の価値は高まる一方であり、それを支える電力供給信頼度と利便性への要求は厳しさを増し続けるものと推測する。

今後とも、このようなお客さまからの要求に応えるため、パワーエレクトロニクス分野におけるコア技術からシステム技術まで全領域にわたって研究開発を推進し、高品質で高信頼性の商品を提案していきたい。



松崎 薫 MATSUZAKI Kaoru

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 パワーエレクトロニクス部主幹。UPSのシステム技術・開発・設計・品質保証など技術関連全般に従事。電気学会会員。Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



眞野 康友 MANO Yasutomo

社会インフラシステム社 社会・産業システム事業部 施設システム技術第三部グループ長。ビル・施設の電源システムエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。Public & Industrial Systems Div.



神達 幸雄 KANDATSU Yukio

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 パワーエレクトロニクス部主査。UPSの設計・開発に従事。電気学会会員。Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems