大規模無停電電源システムの高信頼化技術

正員 松崎 薫 (東芝)

Technology for Highly Dependable Large Capacity UPS System

Kaoru Matsuzaki, Member (Toshiba Corporation)

Our daily life is supported by powerful information networks which are composed of computers and communication equipments. If they do not work correctly or completely, our daily life would be surely confused. Under some circumstances safety could not be kept. Uninterruptible Power Supply (UPS) systems are commonly equipped to supply stable power to the critical loads, for example, large computer center telephone and telecommunication center, aviation control system and so on. Several kinds of UPS systems are now used in many important fields as the above mentioned. But they almost do not have been evaluated numerically based on system reliability.

This paper evaluates MTBF of parallel redundant UPS systems, and reports MTBF of 2 sets of parallel redundant UPS system is lower than that of 3 sets of parallel redundant UPS system under some circumstances. Continuous power supply reliability of the UPS system with bypass and uninterruptible transfer switch is much higher than any other UPS system without bypass circuit and uninterruptible transfer switch. And then the last some highly reliable parallel operation technology are shown.

キーワード：UPS, ディペンダビリティ, MTBF, 並列冗長運転, 無瞬断切換スイッチ

1. まえがき

近年の我々の生活は、非常に高度な情報によって支えられているが、その状況は日常の我々の意識の中には存在しない。しかし、一度その高度情報社会の仕組みが崩れると社会生活が混乱するだけでなく、時としては安全が確保されなくなる危険を含んでいる。情報システムを稼働させるためのエネルギー源としての電源も非常に重要である。電源がなければ、現代の高度情報社会を支えているコンピュータ、マイクロエレクトロニクス機器やシステムは稼働できなくなり、広い範囲にわたって前述したような状況に直面することになる。このように大規模化、複雑化してきている情報システムはそれを稼働させる電力に対し、より安定した高品質な電力とより高信頼度な供給品質、すなわち24時間365日一瞬の停電も許容しない電力を要求してきている。その手段に無停電電源システム(Uninterruptible Power supply System; UPS)を対策機器に設置することが一般的に行われている。

一方、UPSもパワーエレクトロニクス/マイクロエレクトロニクスの技術をはじめ、多種多様の技術を応用したシステムであり、しかも情報システムを支えるためそれ以上の高信頼性が要求される。UPSの高信頼化技術について以下事例を挙げて報告する。

2. システムの信頼性

〈2・1〉 ディペンダビリティ ディペンダビリティ (Dependability)とは、従来の単なる機器の信頼度稼働率 (Availability)の考え方ではなく、長く使用する間には故障もあり得るとの大前提のもとに、機器またはシステムを可能な限り連続で稼働させるための保守保全を含めた広い意味での信頼度を意味する概念である。すなわち、以下に示すように、信頼性(Reliability)、安全性(Safety)、稼働率(Availability)、保全性(Maintenability)をすべて包含した用語であり、「総合安全信頼性」とでもいうべき概念である。

このディペンダビリティの考え方を実現するには、企画設計段階から現地据付工事、調整試験、アフタサービスまで含めてそれぞれのポジションに応じて以下のような点を配慮する必要がある。

企画設計段階では、使用する部品、材料の故障確率、製造、調整上の不具合などによる装置の故障停止の確率を考慮して、ブロックごとの多重化や、システムによる冗長

図 1 UPS システムの信頼性体系
Fig. 1. Dependability system of UPS.

図 2 高信頼度 UPS システムの考え方
Fig. 2. Concept of highly dependable UPS system.

化，バックアップといった考え方を取り入れてシステム設計する必要がある。

ハード設計では，取り扱う人による誤操作，誤判断を回避するための配慮が必要である。

運転が開始された後は，長期にわたって安全に運転継続されることが重要であり，そのためには寿命近くなった部品の交換作業を含めた点検が必要である。この際も UPS システムの場合には，負荷への電力供給を停止しないで実

現する必要がある、そのためのシステム上の考慮が重要である。

〈2・2〉 信頼性体系 前節の考え方により、UPS における信頼性体系を図示すると図1のようになる。同図において、左上半分はUPSシステムの構成とシステムを取り巻く電源側、負荷側のシステム、設置環境を示した。右側にはそれらを実現させるための技術体系を主に示した。また、下側にはシステムを構築するうえでの管理体系をユーザ側、メーカ側の主に担当する領域を含めて示してみた。ここで示したように、信頼性とは素材から環境までの幅広い分野において、企画の段階から各種管理、試験検査、運用までの段階にわたって全体の連系が要求されている。技術の分野でみても、物理、化学からシステム解析、人間工学まで多岐にわたっている。

〈2・3〉 UPSシステムのディペンダビリティ ディ

ペンダビリティを実践するためのUPSシステムの考え方を図示すると図2のようになる⁽¹⁾。

3. UPSシステムの構成

〈3・1〉 UPSシステムの基本構成 UPSの基本的な事項を整理すると以下のようなになる。

- (i) 停電に備えてエネルギーを貯えておく機能：蓄電池
- (ii) 通常運転時蓄電池に充電しておく機能：充電器、整流器
- (iii) 整流器でも、蓄電池でも直流電源から安定した交流電力に変換する機能：インバータ

以上の機能で構成すると、図3に示す単一UPSシステムが構成される。このシステムは、万一インバータが故障した場合、負荷への電源供給は停止する。従って、この単

図3 単一UPSシステム
Fig. 3. Single UPS.

図4 バイパス無瞬断切換スイッチ付き単一UPSシステム
Fig. 4. Single UPS with uninterruptible bypass transfer switch.

図5 バイパス無瞬断切換スイッチ/保守バイパス付き並列冗長UPS
Fig. 5. Parallel redundant UPS system with uninterruptible bypass transfer switch and maintenance bypass.

一 UPS システムに商用電源のバイパスと無瞬断切換スイッチを付加した常時商用同期バイパス無瞬断切換スイッチ付き単一 UPS システムが一般的に使用されており、これを図 4 に示す。無瞬断切換スイッチは、電磁接触器とサイ

リスタを応用した半導体スイッチより構成されるハイブリッド切換スイッチが一般的に使用されている。以下のシステムにおける無瞬断切換スイッチも同様である⁽¹⁾。

〈3・2〉 バイパス付き並列冗長システム 図 5 は並列

図 6 バイパス無瞬断切換スイッチ付き並列冗長 UPS (分岐切換方式)

Fig. 6. Parallel redundant UPS system with uninterruptible bypass transfer switch (branch feeder transfer switch system).

図 7 共通予備 UPS システム

Fig. 7. A lot of single UPSs with a common backup single UPS.

冗長システムに常時商用同期バイパス無瞬断切換スイッチを設け、商用バイパス電源に無瞬断で切り換えることができ更に保守性、保全性の向上を図り、商用同期バイパス無瞬断切換スイッチの点検まで可能にした保守バイパス付きのシステムである⁽¹⁾。

〈3・3〉 バイパス付き並列冗長システム(分岐切換方式)

図6のシステムは並列冗長システムの出力側に、複数の切換スイッチを設けて、負荷のシステムの種類に応じて分岐回路を設け、それぞれの分岐回路でバイパスと無瞬断切換ができるようにしたものである。この方式の切換スイッチは、UPS側給電用にはサイリスタ遮断器を用い、ある一つの負荷側で短絡が発生してもUPSへ過電流を流さないように瞬時に遮断する機能をもたせてシステムの信頼度を上げている。

個々の切換スイッチの容量は、一般に300～500kVA程度であり、電源容量が2,000～3,000kVAの大規模並列冗長システムに使われる⁽²⁾。

〈3・4〉 共通予備UPSシステム 図7はN台の単一UPSがそれぞれNシステムの負荷に供給しており、それぞれのUPSのバイパス側に共通に無瞬断バイパス付きUPSを設けたシステムである。N台のUPSのうち1台が停止した場合には無瞬断切換スイッチにより共通予備のUPS出力に切り換えられ、負荷給電を継続するものである。このシステムは最近の高周波PWMインバータを採用した過渡特性の非常に良いUPSが出現して可能となった。また、負荷の増設に併せてUPSを増設していくことが、並列冗長システムに比較して簡単にできることも大きな特長である。これは並列運転に必要な高精度の並列制御を必要とせず、極めてシンプルなシステムのためである。

4. 信頼度計算

〈4・1〉 無瞬断バイパス付き単一UPSシステム

図4に示した常時商用同期バイパス無瞬断切換スイッチ付単一UPSシステムの信頼度について定量的に検討してみる。信頼度モデルを図8に示す。

ここに、

- λ_T : システム全体の故障率
- λ_1 : 単一UPSシステムの故障率
- λ_{s1} : UPS側切換スイッチの故障率
- λ_L : UPS→商用電源に不要に切り換わってしまう故障率
- λ_{1v} : 単一UPSシステム側から給電できなくなる故障率
- λ_s : 商用電源の故障率
- λ_B : バイパス変圧器などの故障率
- λ_{SB} : 商用電源側切換スイッチの故障率
- λ_{ss} : 商用電源側から給電できなくなる故障率
- λ_H : 切換回路の故障により負荷給電停止になる故障率
- γ_s : 商用電源側回路の故障修復時間

図8 無瞬断バイパス付き単一UPSシステム信頼度モデル

Fig. 8. Reliability model for single UPS with uninterruptible bypass transfer switch.

とする。

商用電源側から給電できなくなる故障率 λ_{ss} は、商用電源が故障してもバイパス変圧器が故障しても商用電源側スイッチが故障しても故障となることから

$$\lambda_{ss} = \lambda_s + \lambda_B + \lambda_{SB} \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。UPS側から給電できなくなる故障率 λ_{1v} は同様にして

$$\lambda_{1v} = \lambda_1 + \lambda_{s1} + \lambda_L \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

システム全体の故障率は、商用電源側が故障し、その修復に要する時間 γ_s の間にUPS側が故障して給電停止する確率と、共通部の切換回路が故障して、商用電源側もUPS側も給電できなくなる故障率 λ_H の和となるため

$$\begin{aligned} \lambda_T &= \lambda_{ss} \gamma_s \lambda_{1v} + \lambda_H \\ &= (\lambda_s + \lambda_B + \lambda_{SB}) \gamma_s (\lambda_1 + \lambda_{s1} + \lambda_L) + \lambda_H \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。

例えば、

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 1.00 \times 10^5 \text{ fit} \\ \lambda_{s1} &= 1.00 \times 10^3 \text{ fit} \\ \lambda_L &= 5.00 \times 10^3 \text{ fit} \\ \lambda_s &= 5.4 \times 10^5 \text{ fit} \\ &\dots\dots\dots (2.5 \text{ 箇月に 1 回と仮定}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_B &= 2.00 \times 10^3 \text{ fit} \\ \lambda_{SB} &= 1.00 \times 10^3 \text{ fit} \\ \lambda_H &= 1.50 \times 10^3 \text{ fit} \\ \gamma_s &= 0.1 \text{ H} \end{aligned}$$

と仮定するとシステム全体の故障率 λ_T は、

$$\lambda_T = 1,505.5 \text{ fit}$$

となる。ただし、1 fit = 1/10⁹ H

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda_T} \quad \dots\dots\dots (4)$$

なので、常時商用同期無瞬断バイパス付き単機運転システムの信頼度は上記に仮定した故障率において、

$$\text{MTBF} = \frac{1}{1,505.5 \times 10^{-9}} = \text{約 76 年}$$

MTBF: Mean Time Between Failure (平均故障間隔時間)

となる⁽³⁾。

4・2 並列冗長 UPS システム

(1) 並列冗長 UPS システム 並列冗長 UPS システムにおいて、信頼性が確保されるうえで重要なことは、個々の UPS 装置が故障した場合に、他の健全な UPS 装置が故障機に引きずられて故障しないことである。

並列冗長 UPS システムですべての UPS 装置が停止してしまうのは、システムに共通な要素をもつ部分、例えば並列制御回路の一部、基準発振器の一部等々での故障や、故障機の切離し、遮断失敗(二重故障)などによるものがある。従って、並列冗長 UPS システムの信頼度を上げるためには、いかに共通要素を削減するか、故障機の切離しに対し、いかに高信頼化設計がされているかが、ポイントになる。

いま、1 台の冗長性を有した N 台の UPS の並列運転システムの故障率 λ_{1p} を求めてみる。

ここに、

λ_{1p} : 並列システムの故障率(1/H)

λ_1 : UPS 単機の故障率(1/H)

λ_c : UPS 単機における並列システム共通部にかかわる故障率(1/H)

γ_1 : UPS 単機の故障復旧時間(H)

N : 並列運転台数

とする。

各 UPS 単機のうちシステムへ影響しない個々の故障率は $(\lambda_1 - \lambda_c)$ である。従って、システムに影響を与えないで N 台中の 1 台が故障する確率は、

$$N \times (\lambda_1 - \lambda_c)$$

となる。次に、残りの $(N-1)$ 台のうち 1 台が故障する確率は、

$$(N-1) \times (\lambda_1 - \lambda_c)$$

となる。 N 台中 1 台が故障し、その復旧時間 γ_1 の間に他の 1 台がまた故障してシステムに影響の出る確率は、

$$N \times (\lambda_1 - \lambda_c) \times (N-1) \times (\lambda_1 - \lambda_c) \times \gamma_1$$

である。次に、並列運転している N 台の UPS のうち共

通要素の故障でシステムに影響を与える故障率は、

$$N \times \lambda_c$$

である。従って、 N 台並列運転システムの故障率 λ_{1p} は次のようになる。

$$\lambda_{1p} = N(N-1)(\lambda_1 - \lambda_c)^2 \gamma_1 + N \lambda_c \quad (1/H) \quad \dots\dots\dots (5)$$

例えば、仮に、

$$\lambda_1 = 1 \times 10^5 \text{ fit}$$

$$\lambda_c = 1 \times 10^3 \text{ fit}$$

$$\gamma_1 = 2 \text{ H}$$

と仮定して、並列運転台数 N をパラメータとして計算し、

$$\text{MTBF}_{1p} = \frac{1}{\lambda_{1p}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

を求めて図示すると図 9 の「並列冗長 UPS システム」で示すようになる。同図より明らかなように、並列運転台数が増加するにつれて MTBF_{1p} が低下している。これは(5)式より明らかなように、並列運転台数 N が増加するにつれ共通部の故障率 λ_c の項が効いてきて、 N が増加するにつれ λ_{1p} が大きくなるからである。これが並列冗長 UPS システムでは共通部を極力減らすことが重要といわれるゆえんである。ちなみに λ_c を仮定した故障率の 1/2 にすれば、 MTBF_{1p} はおおむね 2 倍になる。

従って、並列運転台数をむやみに増やした大容量 UPS システムは得策ではなく、一般的には運用管理面、経済性、据付面積、低圧大電流の機器の限界などより最大 6 台並列システム程度までが妥当と考えられている⁽³⁾。

(2) 2 台並列冗長 UPS システム 2 台並列冗長 UPS システムは 3 台以上の並列冗長 UPS システムとは多少異なる点がある。

2 台並列冗長 UPS システムでは、非常にまれなケースであるが故障形態によっては、健全機から故障機に過大な横流が流れ、1 対 1 の関係から同時に過電流となり、共倒れしてしまうという場合がある。例えば、3 台並列冗長 UPS システムの場合、万一故障機が切り離されなく 1 台

(注) 本データはシステムのコンポーネントの信頼度をそれぞれ仮定して計算したものであり、相対評価としてみる。

図 9 UPS システムの信頼度

Fig. 9. MTBF of UPS system.

の故障機と健全機の間に横流が流れても、出力電流の比は、2対1となるため、故障機のほうが先に過電流保護が動作して選択遮断される。

従って2台並列冗長UPSシステムの信頼度は図9に示すように1台のUPS装置より信頼度は高くなるが、場合によっては、3台並列冗長UPSシステムより低くなる。

〈4・3〉 バイパス付き並列冗長UPSシステム 前節で扱った並列冗長UPSシステムの故障率 λ_{1p} は、単一UPSシステムの故障 λ_1 より大きくなる。バイパス付き単一UPSシステムで故障率を計算した手法で、(1)~(3)式の中の λ_1 を λ_{1p} に置き換えて計算することで、バイパス付き並列冗長UPSシステムの故障率を求めることができる。信頼度モデルは図10のようになる。(5)式で求めた λ_{1p} と(1)~(3)式およびそれぞれ仮定した数値で、バイパス付き並列冗長UPSシステムのMTBFを求め、図示すると図9の「バイパス付並列冗長UPSシステム」で示すようになる。

バイパス付き単一UPSシステム、バイパス付き並列冗

図 10 無瞬断バイパス付き並列冗長UPSシステム信頼度モデル

Fig. 10. Reliability model for parallel redundant UPS system with uninterruptible bypass transfer switch.

長UPSシステムいずれもシステム全体の故障率 λ_T は近似した数値になる。これは(3)式の λ_H 、切換回路の故障により負荷給電停止になる故障率で、ほとんど決定されるからである。

従って、電源供給信頼度はバイパス付き単一UPSシステムであっても、バイパス付き並列冗長UPSシステムであっても、無瞬断切換回路の信頼度にかかっているといえる。UPSによる安定した交流電力の供給信頼度から評価すれば、バイパス付き並列冗長UPSシステムのほうがバイパス付き単一UPSシステムより高くなる⁽³⁾。

5. 機器の高信頼化技術

機器の信頼性を上げるにはできるだけ簡素化し、部品点数をできるだけ削減する必要がある。また、電気磁的に外乱を受けにくくするための技術も必要になる。以下、UPSシステムでの高信頼化技術の事例を紹介する。

〈5・1〉 主回路の高信頼化技術 本節は、電力用半導体素子の発展に依存するところが大きい。例えば、サイリスタインバータでは転流リアクトル、転流コンデンサが必要であったが、自己消弧素子のGTO、パワートランジスタが適用されるとそれらは不要になった。更に、IGBTが適用されると瞬時値制御PWMインバータにより出力フィルタが小形になった。

〈5・2〉 制御回路の高信頼化技術 制御機能には電圧制御、周波数制御、出力電圧波形制御、電流制御、充電機能制御、並列バランス制御、運転停止などのシーケンス制御、故障検出、保護動作機能などの制御がある。近年では、それらにはマイクロプロセッサが使用されるようになり、部品点数が削除され高信頼化に大きく寄与している。更に、ASICやハイブリッドICといった集積回路が使用され、オールデジタル制御化が進んでいる。従来のアナ

図 11 高信頼度並列制御構成図

Fig. 11. Block diagram of highly reliable parallel control system.

ログ制御でのドリフトや経年変化による不安定事象は削減され信頼性は向上している。

〈5・3〉 並列制御の高信頼化技術 商用同期運転を行うためには、商用電源に同期して発振する商用同期発振器が必要である。この信号が並列運転している個別の UPS にとってみれば、出力電圧位相の基準となる共通信号になる。そこでこの共通部の信頼度を向上させることが高信頼化技術の重要な一つとなる。

常時商用同期並列冗長システムの商用同期並列制御について、図 11 に事例を紹介する。特長は次のようになる。

(1) 多重化商用同期発振器 商用同期運転は切換盤に収納された商用同期発振器により並列している各号機に同期信号を送り、それを基準に商用同期運転する。また、並列運転している個別の UPS 装置にも同様の商用同期発振器が収納されており、この個別の発振器でも並列運転しながら、商用同期運転できるようにし、共通部の多重化と独立化を実現して。

(2) 光信号の採用 切換盤に収納した共通の商用同期発振器からの同期信号は光信号とし、外乱となる電磁雑音の影響を受けないようにしている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

6. む す び

本論文の特長を要約すると次のようである。

(1) 高信頼度の UPS を構築するための考え方の整理。

(2) ディペンダビリティの考え方の導入。

(3) それによる保守保全を行いながら給電できるシステムの構築。具体的には、無瞬断切換スイッチ、保守バイパスを装備した冗長運転システム、共通予備方式によるバックアップシステムの採用。

(4) 定量的な信頼度計算による相対比較、評価。

(5) 共通制御部の多重化、独立化の高信頼化技術。

大規模 UPS システム、特に並列冗長 UPS システムと無瞬断バイパス付きシステムの信頼度について並列運転台数をパラメータとして定量的に計算し、相対評価を行ってみた。

この相対評価が高信頼度 UPS システムの計画に役立てば幸いである。

(平成 5 年 8 月 25 日受付, 同 6 年 1 月 5 日再受付)

文 献

- (1) 松崎：「最近の大規模 UPS システムの動向」, '90 建築設備システム研究会 (平 3-11)
- (2) 松崎・宮沢・長田：「サイリスタ断器を用いた高信頼度 UPS システム」, 電気学会半導体電力変換研究, SPC-89-75 (平元-12)
- (3) 無停電電源装置調査専門委員会：「無停電電源装置の動向」, 電気学会技報 (II 部), No. 372 (平 3)
- (4) 宮崎, 他：「特集：交流無停電電源システム」, 東芝レビュー, 46, No. 6 (平 3-6)
- (5) H. Oshima, Y. Miyazawa & A. Hirata : "Parallel Redundant UPS With Instantaneous PWM Control", INTELEC '91, 13-3

松 崎 薫 (正員) 1947 年 11 月 30 日生。1971 年 3 月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在、同社府中工場勤務。パワーエレクトロニクス、主として UPS の技術全般、研究開発、設計に従事。