普通论文

使用大容量 UPS 的数据中心用通用备用系统

Common Backup Systems for Data Centers with Large-Capacity UPS

安本　浩二 YASUMOTO, Koji　　**滨田　一平** HAMADA, Ippei　　**根本　健司** NEMOTO, Kenji

就数据中心所用的不间断电源系统（UPS）而言，其可靠性、节能性和经济性至关重要。迄今为止采用的待机冗余和并联冗余系统，因冗余容量为单机 UPS 容量，所以单机 UPS 容量小的一方经济性优异。近年来，用户期望采用可靠性更高的通用备用系统，在此情况下，单机 UPS 容量大的一方经济性优异。因此，富士电机构建了无论单机 UPS 容量和负载容量多大，冗余容量均可保持不变，且可靠性和经济性优异的通用备用系统。

Uninterruptible power systems (UPS) used in data centers require reliability, energy savings and economic efficiency. In standby redundant and parallel redundant systems, redundant capacity will equal the capacity of a single UPS. As a result, smaller capacity units provide more economic efficiency. In recent years, there has been growing demand to deploy common backup systems with enhanced reliability, whose economic efficiency increases as the single UPS capacity becomes higher. It is against this background that Fuji Electric has developed highly reliable and economical common backup systems whose redundant capacity does not depend on single UPS capacity and load capacity.

1　引言

为确保系统的平稳运行，数据中心对所有设备均进行了冗余化。

其中所用的不间断电源系统（UPS：Uninterruptible Power Systems），其可靠性、节能性和经济性至关重要。在节能方面，富士电机开发了逆变器输出电压为三电平[(1)]、主电路元件采用 SiC[(2)]、可直接给服务器负载供电的三相四线制[(3)]、在三相四线制的基础上增加台数控制和常时商用供电[(4)]的产品，提供高效系统。

设计 UPS 时，考虑负载容量和冗余系统来确定单机容量非常重要。迄今为止，冗余系统主要采用待机冗余和并联冗余、2*N*〈注 1〉系统等。其中，由两个 UPS 构建的 2*N*，可靠性比其他方式更高，但冗余率〈注 2〉为 1。与此类似的高可靠性通用备用系统因对组〈注 3〉的容量进行冗余化，所以可使冗余率为 1/*N*。因此，在该系统中，构成组的单机 UPS 容量越大，越能减少台数，经济性越好。

此前，已经介绍了 UPS 的待机冗余和并联冗余等的系统可靠性计算[(6)、(7)]。但是，未发现通用备用系统的计算例。另外，UPS 的主电路和控制方法因厂家而异。因此，在考虑到富士电机 UPS 电路结构和控制方法的前提下进行了计算，确认了通用备用系统的高可靠性。

由此，通过将增大了单机容量的 UPS 系列化，推进高可靠性通用备用系统的使用。

2　单机 UPS 容量的选择方法

如**表 1** 所示，富士电机开发了单机容量为 500 kVA 和 1000 kVA 的产品，推进了大容量 UPS 的系列化。各系列均可最多有 8 台并机。此外，针对三相四线制，正在开发单机容量为 1200 kVA 的产品。

以带旁路的单一 UPS 为基本系统，如**图 1** 所示，将其进行组合，构成待机冗余、并联冗余、通用备用、2*N*、2（*N* + 1）等冗余系统。此系统中，UPS 与负载的连接状态如**图 1** 所示。各系统的 UPS 单机容量为 500 kVA，负载容量为 1000 kVA。

相对于各冗余系统单机容量的冗余容量如**表 2** 所示。针对负载容量为 3000 kVA×4，UPS 单机容量为 500 kVA 和 1000 kVA，比较了待机冗余、并联冗余和通用备用系统。在待机冗余和并联冗余中，每组需要 1 台备用机，因此整

表 1　富士电机的大容量 UPS 系列

UPS 型号	7000HX-T3[(1)]	7000HX-T4[(3)]	7000HX-T4E[(3)、(4)]	7400 WX[(5)]
供电方式	常时 INV	常时 INV	常时 INV 常时商用	常时 INV 常时商用
接线	三相三线	三相四线	三相四线	三相三线
电压（V）	420	400	400	480
单机容量（kVA）	500	500	500	1000
宽度尺寸（mm）	1500	1600	1600	3000

〈注 1〉UPS 系统的构成通常使用 *N* 这一术语。*N* 是指与负载容量同等的 UPS 台数。

〈注 2〉为了用一个指标来表示相对于负载容量有多少多余的容量，引进了冗余率这一概念，冗余率 =（备用的 UPS 台数）/（供电所需的 UPS 台数）。在并联冗余 *N* + 1 系统中，设置供电所需的 *N* 台再加备用机 1 台，共计 *N* + 1 台 UPS。即使 1 台发生故障，也可由剩余的 UPS 继续供电。此时，冗余率为 1/*N*。

〈注 3〉在通用备用系统中，相对于各负载，构成电源的单机 UPS 的集合定义为组。

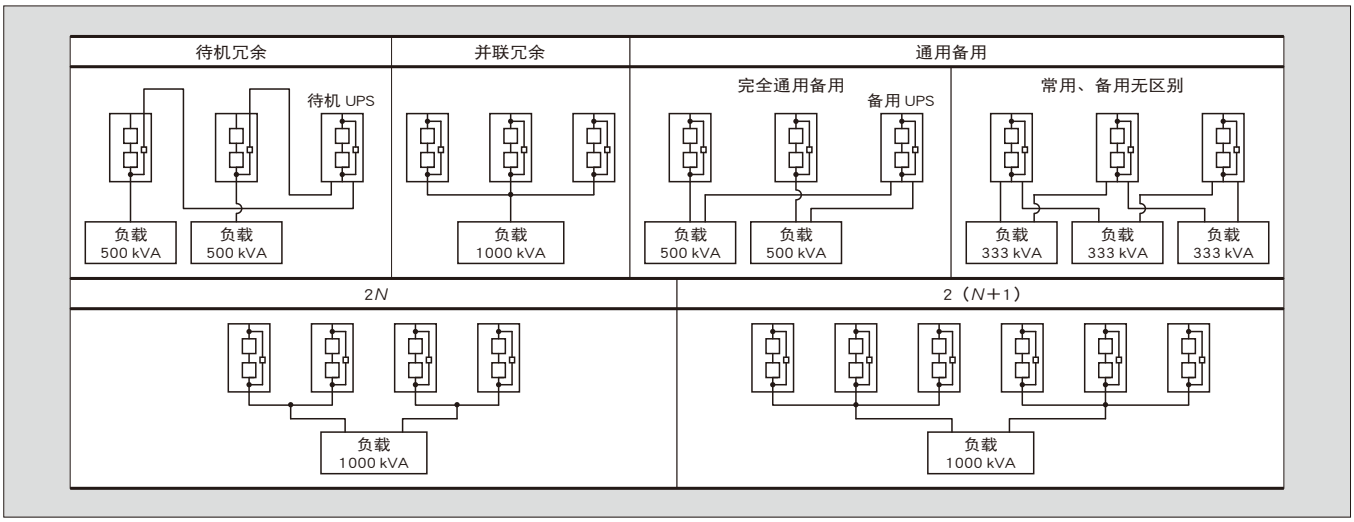

图 1　各冗余系统的 UPS 与负载的关系（单机 UPS 容量 500 kVA、负载容量 1000 kVA 之例）

普通论文

表 2　相对于各冗余系统单机容量的冗余容量
（负载容量 3000 kVA×4）

冗余系统	单机容量（kVA）	UPS 构成	冗余容量（kVA）
待机冗余	500	单机（6＋1）×4 式	2000
	1000	单机（3＋1）×4 式	4000
并联冗余	500	并联（6＋1）×4 式	2000
	1000	并联（3＋1）×4 式	4000
通用备用	500	并联 6 台 ×（4＋1）组	3000
	1000	并联 3 台 ×（4＋1）组	3000

体冗余容量与单机容量成比例增加。与此相对，在通用备用系统中，与单机容量无关，一个组的容量即为冗余容量。因此，单机容量越大，越能减少电路数量，经济性越高。而且，即使 UPS 的组增加，冗余容量也是固定的，所以，组的数量越多，经济性越高。

3　冗余系统的可靠性

在 **3.1 节**中，将计算**图 1** 所示的系统故障率，比较可靠性的差异。故障率的单位为每小时发生故障的次数（1/h）。

3.1　旁路切换时故障率的对应方式

一旦逆变器在供电过程中发生故障，则切换至旁路，继续供电。

冗余系统中各设备等的故障率处理如**表 3** 所示。旁路电路和旁路切换电路是 UPS 故障后动作的设备，与逆变器供电时的故障率 λ_{UPS} 无关。

在带旁路的单一 UPS 情况下，如果从变频器供电向旁路切换失败，则电源停止供电。

而在并联冗余系统的情况下，如果只是 1 台切换失败，则仍可进行电源供电。因此，可考虑将**表 3** 的 λ_C 排除在外。取而代之的，是将并联单元切换功能的故障率纳入考虑范围。在并联单元中，发生故障时会对所有 UPS 发送切换指令，因此如果切换功能发生故障，则无法切换，导致供电停止。

表 3　冗余系统各设备的故障率处理

故障率	设备	带旁路的单一 UPS	待机冗余	并联冗余	通用备用
旁路电路 λ_{SB}	旁路方面的 MC4	○	○	○	○
旁路切换电路 λ_C	MC4 接口单元	○	○	排除	○
	半导体闸流管开关	○	○	排除	○
	半导体闸流管驱动单元	○	○	排除	○
切换控制部 λ_{CT}	并联用 CT	—	—	○	○
并联单元 λ_{PIU}	并联单元（负载分担）	—	—	○	○
切换控制部 λ_{CH}	并联单元（切换功能）	—	—	○	○
并联单元的切换功能 λ_{DIU}	切换控制部	—	—	○	○

通用备用时，各组不具备冗余性，所以要将**表 3** 中的所有设备都作为考虑对象。

3.2　带旁路单一 UPS 的故障率

带旁路单一 UPS 如**图 2** 所示。与旁路电路并联设置了晶闸管开关和交流接触器（MC）。一旦 UPS 发生故障，晶闸管开关瞬间起弧，从变频器供电切换为旁路供电。然后，并联启动 MC，晶闸管开关灭弧。

(a)　UPS 发生故障，无瞬断切换至旁路电路。

$$\lambda_{UPS} \quad \cdots\cdots(1)$$

(b)　UPS 故障修复过程中，商用电源停电或旁路电路故障，供电停止。

$$\lambda_{UPS}(\lambda_S + \lambda_{SB})\gamma_{UP} \quad \cdots\cdots(2)$$

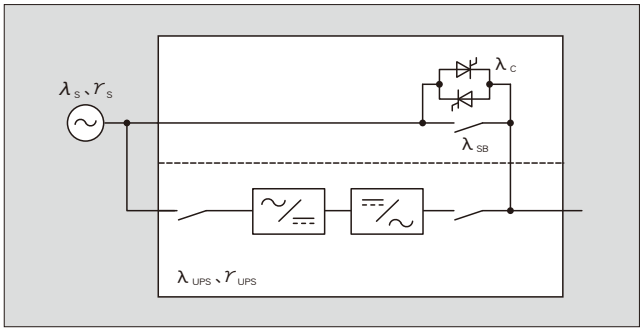

图 2　带旁路单一 UPS

(c)　如果旁路切换电路再发生故障，则供电停止。

因此，单机系统的故障率 λ_{SM} 如式(3)所示。

$$\lambda_{SM}=\lambda_{UPS}(\lambda_S+\lambda_{SB})\gamma_{UPS}+\lambda_C \quad \cdots\cdots(3)$$

3.3　待机冗余系统的故障率

待机冗余系统如**图 3** 所示。备用 UPS 的输出电路与常用 UPS 的旁路输入电路相连。由常用 UPS 给负载供电。一旦常用 UPS 发生故障，则切换至旁路，由备用 UPS 进行逆变器供电。

(a)　常用 UPS 为 N 台时，UPS 故障率为 N 倍。

$$N\lambda_{UPS} \quad \cdots\cdots(4)$$

(b)　常用 UPS 故障修复时，如果常用 UPS 的旁路电路或备用 UPS 发生故障，则停止供电。

$$N\lambda_{UPS}(\lambda_{SM}+\lambda_{SB})\gamma_{UPS} \quad \cdots\cdots(5)$$

(c)　如果常用 UPS 切换至旁路失败，则停止供电。

待机冗余系统的故障率 λ_{SR} 如式(6)所示。

$$\lambda_{SR}=N\lambda_{UPS}(\lambda_{SM}+\lambda_{SB})\gamma_{UPS}+\lambda_C \quad \cdots\cdots(6)$$

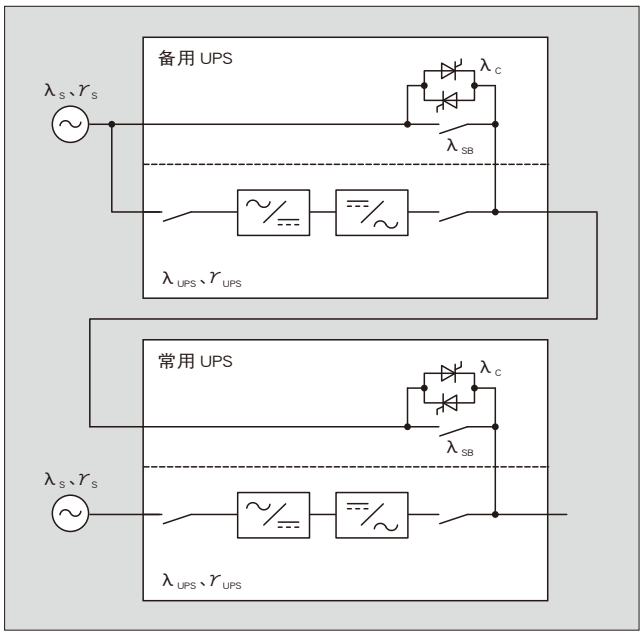

图 3　待机冗余系统

3.4　并联冗余系统的故障率

并联冗余系统如**图 4** 所示。一旦 UPS 发生故障，则切换至旁路电路。旁路供电时，如果停电或旁路电路和并联单元的切换电路发生故障，则停止供电。

(a)　并联台数为 N 台时，UPS 的故障率为 N 倍。

$$N(\lambda_{UPS}+\lambda_{NB}) \quad \cdots\cdots(7)$$

(b)　UPS 故障修复时，如果其他 UPS 发生故障，则切换至旁路。

$$N(N-1)(\lambda_{UPS}+\lambda_{NB})^2\gamma_{UPS} \quad \cdots\cdots(8)$$

(c)　另外，在并联系统中，为进行负载分担控制，有电流测量用的 CT 和并联单元。这些设备一旦发生故障，则无法进行负载分担，会发生过电流，切换至旁路。

因此，切换至旁路的故障率 λ_{PINV} 如式(9)所示。

$$\lambda_{PINV}=N(N-1)(\lambda_{UPS}+\lambda_{NB})^2\gamma_{UPS}+N(\lambda_{CT}+\lambda_{PIU}) \quad \cdots\cdots(9)$$

(d)　切换至旁路后，N 台中 1 台的旁路电路发生故障。

$$N\lambda_{SB} \quad \cdots\cdots(10)$$

(e)　旁路电路故障修复时，如果剩余的 $(N-1)$ 台中 1 台的旁路电路发生故障，则发生过载，供电停止。

$$N(N-1)\lambda_{SB}^2\gamma_S \quad \cdots\cdots(11)$$

(f)　如果再发生停电，则商用供电停止。

$$N(N-1)\lambda_{SB}^2\gamma_S+\lambda_S \quad \cdots\cdots(12)$$

(g)　如果 UPS 故障修复时发生上述 f，则商用供电停止。

$$\lambda_{PINV}[N(N-1)\lambda_{SB}^2\gamma_S+\lambda_S]\gamma_{UPS} \quad \cdots\cdots(13)$$

(h)　如果并联单元的切换功能和切换控制部再发生故障，则供电停止。

并联冗余系统的故障率 λ_{PR} 如式(14)所示。

$$\lambda_{PR}=\lambda_{PINV}[N(N-1)\lambda_{SB}^2\gamma_S+\lambda_S]\gamma_{UPS}+N(\lambda_{CH}+\lambda_{DIU}) \quad \cdots\cdots(14)$$

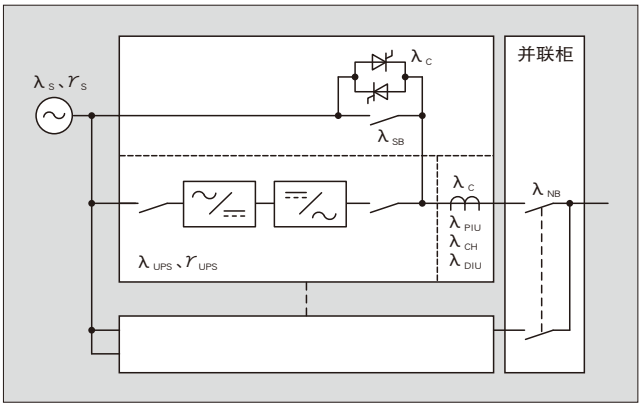

图 4　并联冗余系统

3.5 通用备用系统的可靠性

通用备用系统如**图 5** 所示。如**图 1** 所示，通用备用方式的系统有两种：完全通用备用方式和不区分常用与备用的方式。无论何种方式，故障率均是指两组 UPS 停止，无法给负载供电时的情况。在负载方面有可切换两个电源的设备，但其故障率不予考虑。

(a) UPS 一旦发生故障，则切换至旁路。另外，在并联系统中，为进行负载分担控制，有电流测量用的 CT 和并联单元。这些设备一旦发生故障，则无法进行负载分担，会发生过电流，切换至旁路。一个 UPS 系统的并联台数为 N 台时，故障率为 N 倍。

$$N(\lambda_{UPS}+\lambda_{NB}+\lambda_{CT}+\lambda_{PIU}) \quad \cdots\cdots(15)$$

(b) 发生故障的 UPS 正在修复时，如果发生停电或旁路电路故障，则商用供电停止。

$$N(\lambda_{UPS}+\lambda_{NB}+\lambda_{CT}+\lambda_{PIU})(N\lambda_{SB}+\lambda_{S})\,\gamma_{UPS} \quad \cdots\cdots(16)$$

(c) 如果并联单元的切换功能、切换控制部、旁路切换电路再发生故障，则停止供电。并联系统的故障率 λ_P 如式(17)所示。

$$\lambda_P=[N(\lambda_{UPS}+\lambda_{NB}+\lambda_{CT}+\lambda_{PIU})](N\lambda_{SB}+\lambda_S)\gamma_{UPS}+N(\lambda_{CH}+\lambda_{DIU}+\lambda_C) \quad \cdots\cdots(17)$$

(d) 如果两个 UPS 系统发生故障，则电源供应停止。通用备用系统的故障率 λ_{CS2} 如式(18)所示。

$$\lambda_{CS2}=N_S(N_S-1)(\lambda_P)^2\gamma_{UPS} \quad \cdots\cdots(18)$$

另外，2 (N+1) 系统设有两套并联冗余系统，其故障率如下。

$$\lambda_2(N+1)=2\lambda_{PR}^2\gamma_{UPS} \quad \cdots\cdots(19)$$

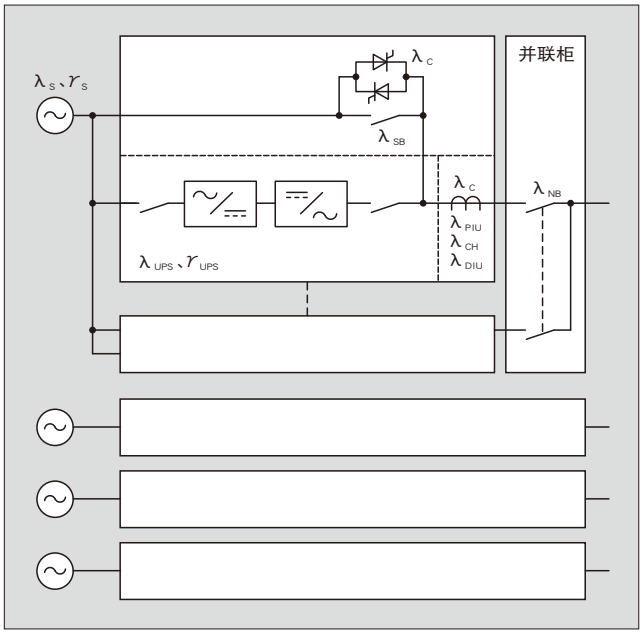

图 5 通用备用系统共通（4 组之例）

3.6 冗余系统的可用性

如果商用电源的停电发生频率为每年 4 次，则商用电源的故障率 λ_S 如下式所示。

$$\lambda_S=4/(365\times24)=1/(2.19\times10^3)\ (1/h) \quad \cdots\cdots(20)$$

此外，以整流器和逆变器的冷却风扇进行了冗余化且进行定期更换为前提，从 λ_{UPS} 的故障率中排除。

故障修复时间为 8 小时，使用“7000HX-T4”时的单机、待机、并联冗余系统的可用性 (Availability) 如**表 4** 所示。待机冗余是固定的，与常用机的台数无关。其原因与单机系统一样，旁路切换电路的故障率处于主导地位。并联冗余随着台数的增加而变小。

同样使用 7000HX-T4 时的并联冗余、通用备用、2N、2 (N + 1) 系统的可用性如**表 5** 所示。设负载容量为 2000 kVA。并联冗余、通用备用、并联 2N、并联冗余的 2 (N + 1)，可用性依序增大。而且，与并联冗余相比，通用备用的年度停止时间从 173 s 降为 0.03 s，可用性得到了飞跃性提高。

可用性是指系统可持续运行的能力。可用性可通过运行率来表示。可修理系统、设备、部件等在某个特定瞬间维持功能的概率（瞬间运行率），或在规定时间维持功能的概率（平均运行率）。运行率 A 与平均故障间隔 (MTBF : Mean Time Between Failure)、平均恢复时间 (MTTR : Mean Time To Recovery) 的关系如下式(21)所示。

$$A=\frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad \cdots\cdots(21)$$

MTBF= 运行时间 / 故障次数，MTBF 的值越大，故障间隔越长，可靠性越高。另外，MTBF 为故障率 λ 的倒数。

表 4 单机、待机、并联冗余系统的可用性
（单机容量 500 kVA）

冗余系统	负载容量 (kVA)	运行率 (%)	年度停止时间 (s)
单机	500×1	99.9995	158
(1+1) 待机冗余	500×1	99.9995	158
(7+1) 待机冗余	500×7	99.9995	158
(1+1) 并联冗余	500×1	99.99991	28
(7+1) 并联冗余	3500×1	99.9996	126

表 5 并联冗余、通用备用、2N、2 (N+1) 系统的可用性
（单机 UPS 容量 500 kVA、负载容量 2000 kVA）

冗余系统	UPS 台数	负载容量	运行率	年度停止时间 (s)
并联冗余	(4+1)	2000 kVA×1	99.9995	173
通用备用	2 台并联×3 组	1000 kVA×2	99.99999992	0.03
2N	2×4	2000 kVA×1	99.99999997	0.009
2 (N+1)	2 (4+1)	2000 kVA×1	99.9999999989	0.0003

普通论文

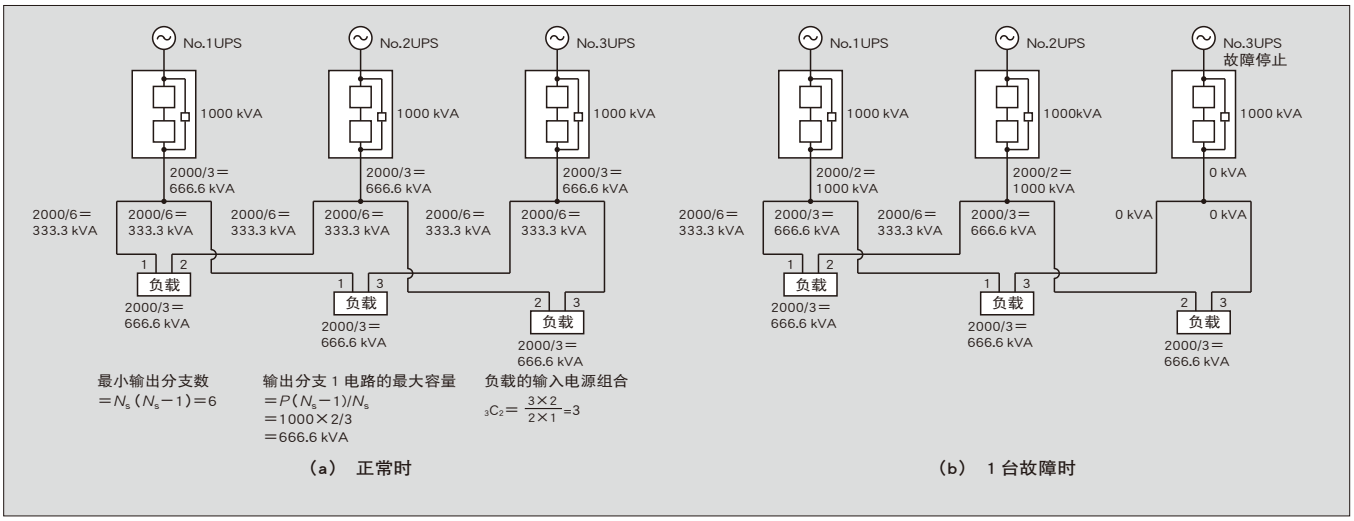

图 6　常用、备用无区别通用备用系统（3 组、UPS 组的容量 1000 kVA、负载容量 2000 kVA 之例）

4　使用大容量 UPS 的通用备用系统的设计

在不区分常用和备用的情况下，即使由一台或多台 UPS 构成的 UPS 组停止，也需要由其他正常 UPS 组平均分担负荷，以免过载。

根据负载容量确定各 UPS 组的容量和数量 N_s 后，输出分支的最小电路数为 N_s（N_s−1），同时可确定各分支的容量。负载容量 2000 kVA、单机 UPS 容量 1000 kVA 时的例子如**图 6** 所示。当 UPS 的单机容量为 P 时，每 1 电路的平均容量 P_L 可用下式(22)计算。

$$P_L=P\ (N_s-1)\ N_s \quad \cdots\cdots(22)$$

另外，各负载的输入电源为两个时的组合为 $_{N_s}C_2$，所以如**表 6** 所示，UPS 组的数量增加时，组合增加，电路变复杂，因此需考虑整体的经济性和可靠性来决定。

采用不区分常用和备用的系统时，需确定 UPS 输出的电路数、每个电路的平均容量及负载的供电系统，会限制负载的供电设计。另一方面，完全通用备用系统则没有这样的限制，供电设计简单。

表 6　通用备用系统的输出分支设计例
（UPS 组的容量 1000 kVA 之例）

负载容量（kVA）	组数量 N_s	最小输出分支数	输出分支 1 电路的容量（kVA）	负载输入电源组合数 $_{N_s}C_2$
2000	3	6	666.6	3
3000	4	12	500.0	6
4000	5	20	400.0	10
5000	6	30	333.3	15

5　后记

本文对使用大容量 UPS 的数据中心的通用备用系统进行了论述。将大容量 UPS 系列化可构建可靠性与经济性优异的通用备用系统。此外，对 UPS 系统设计所需的单机 UPS 容量的选择、各种冗余系统的可靠性也进行了说明。

今后，随着负载容量的增大，预计 UPS 系统容量也会增大。富士电机仍将致力于可应对大容量系统的系统设计和产品开发。

〔本论文中的符号〕
λ_S ：商用电源的故障率（1/h）
γ_{UPS} ：UPS 的故障修复时间（h）
γ_S ：商用、旁路电路的故障修复时间（h）
λ_{UPS} ：UPS（逆变器供电）的故障率（1/h）
λ_{SB} ：旁路电路的故障率（1/h）
λ_C ：旁路切换电路的故障率（1/h）
λ_{NB} ：输出断路器的故障率（1/h）
λ_{CT} ：并联用 CT 的故障率（1/h）
λ_{PIU} ：并联单元的故障率（1/h）
λ_{CH} ：切换控制部的故障率（1/h）
λ_{DIU} ：并联单元的切换功能故障率（1/h）
λ_{SM} ：单机系统的故障率（1/h）
λ_{SR} ：待机冗余系统的故障率（1/h）
λ_{PINV} ：旁路切换故障率（1/h）
λ_P ：并联系统的故障率（1/h）
λ_{CS2} ：通用备用系统的故障率（1/h）
N：并联冗余的 UPS 台数、待机冗余的常用 UPS 台数
N_s：通用备用系统的 UPS 组的数量
L：每 1 电路的平均容量（VA）
P：UPS 组的容量（VA）
A：运行率
MTBF：平均故障间隔
MTTR：平均恢复时间

参考文献

⑴ 山方义彦等. 面向数据中心的应用高级中性点钳位式三电平大容量高效率 UPS “7000HX 系列”. 富士时报. 2013, vol.C5, no.1, p.55-59.

⑵ 佐藤笃司等. 运用了 SiC 混合模块，面向北美的大容量 UPS “UPS7300WX-T3U”. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.2, p.118-120.

⑶ 安本浩二ほか . 三相 4 線式無停電電源装置を活用した電源システムの高効率化 . 富士電機技報 . 2019, vol.92, no.1, p.54-59.

⑷ 安本浩二等. 带有常时商用供电方式和台数控制功能的高效 UPS “UPS7000HX-T4”. 富士电机技术期刊. 2019, vol.C11, no.4, p.188-191.

⑸ 佐藤笃司等. 用于超大规模数据中心的 UPS. 富士电机技术期刊. 2019, vol.C11, no.4, p.184-187.

⑹ 定由征次 . ユーザーズガイドシリーズ 無停電電源装置 (UPS) 導入実践ガイド . 電気書院 , 1989 年 2 月 .

⑺ 松崎薫. 大規模無停電電源システムの高信頼化技術. 電気学会論文誌 D（産業応用部門）. 1994 年 3 月 , vol.144-D, p.260-p.267.

普通论文

安本　浩二

从事道路用电除尘装置、液晶玻璃基板恒温装置、不间断电源装置的研究、开发与设计。现为富士电机株式会社电力电子系统能源事业本部设施、电源系统事业部 D 项目部主席。博士（工学）。技术士（电气、电子部门）。

滨田　一平

从事大中容量 UPS 的开发和设计。现为富士电机株式会社电力电子系统能源事业本部开发统括部电源机器开发部主任。电气学会会员。不间断电源系统标准化委员兼 IEC SC22H 专家。

根本　健司

从事大、中容量不间断电源装置的工程设计业务。现就职于富士电机株式会社电力电子系统能源事业本部设施・电源系统事业部 D 项目部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。