

# 数据中心和网络机房 可选发电技术

## 第 64 号白皮书

版本 2

作者 Neil Rasmussen

### > 摘要

燃料电池和微型燃气轮机是数据中心和网络机房可采用的新型发电技术。本文介绍了这些系统的多种工作模式，并分析了这些新技术相对于传统方案（如备用发电机）的优势及劣势。

### 目录

*点击内容即可跳转至具体章节*

|              |   |
|--------------|---|
| 简介           | 2 |
| 备用模式         | 2 |
| 持续模式         | 2 |
| 市电交互模式       | 2 |
| 容错配置         | 2 |
| 确定总拥有成本      | 3 |
| 其他注意事项       | 4 |
| 结论           | 6 |
| 资源           | 7 |
| 附录 1: TCO 数据 | 8 |

## 简介

发电是数据中心和网络机房高可用性供电系统的关键组成部分。尽管 IT 系统依靠电池或飞轮发电机也能坚持工作数分钟甚至几小时，但若要达到“五个九”的可用性水平，必须具备本地发电的能力。在供电情况较恶劣的地方，也必须进行发电，以使可用性达到 99.99% 或 99.9%<sup>1</sup>。

要解决该问题，传统的办法是采用备用柴油机或燃气发电机与 UPS 相结合。在可用性要求很高的应用中，可使用此类备用发电机的 N+1 阵列。

也有人提出，燃料电池和微型燃气轮机是网络机房和数据中心发电方案的上乘之选。这类系统不仅可以持续为网络机房或数据中心供电，还可以产生超额的电力以用于其他负载或反馈给市电网络，或者可以用作备用发电机。其系统可用性和总拥有成本因系统的使用方式而异，下文将对此进行论述。

## 备用模式

该模式采用交流市电作为主要的供电电源，本地发电只是作为计划中的断电或交流主电源出现故障时的后备电源。备用系统启动时，将使用 UPS 作为系统启动延时的过渡。对于拥有本地发电机的网络机房和数据中心，有 99% 以上采用这种工作模式。

## 持续模式

该模式采用本地发电作为主要的供电方式，而将市电作为断电或本地发电出现故障时的后备电源。负载由本地发电机供电，并在系统切换过程中采用 UPS 作为延时的过渡。本地发电机只为关键负载供电，如果本地发电机的功率超出负载功率，则可能未充分利用发电系统，或其工作效率处于效率曲线上某个较低的点。

## 市电交互模式

该模式采用本地发电作为主要的供电方式，而将市电作为断电或本地发电出现故障时的后备电源。本地发电机与市电并联，这样可以将产生的超出关键负载功率的电能反馈给市电。在该模式中，超出的电量可能只是被系统中其他的非关键负载所消耗，也可能逆向流入市电网络。通常，需要采用 UPS 来为关键负载提供缓冲保护，以免受到供电变化的影响。正常情况下，发电系统工作于其效率曲线上经济效益最高的点。

## 容错配置

无论采用何种技术或模式，都可以通过以下方法来提高可用性：

### 双路结构

若采用双路结构，则整个发电系统都将处于冗余保护下。理想情况下，冗余性应遍及整个电源系统，并且一直延伸到关键负载，关键负载本身应配置为可接受双路电源输入。

### N+1 结构

在该结构中，发电系统中可靠性最低的组件由多个并联设备构成，以便在其中一个出现故障后，其他设备可以继续为关键负载供电。

<sup>1</sup> 至于发电对可用性的影响，请参阅第 24 号白皮书《UPS 对系统可用性的影响》，其中提供了具体数据（点击资源章节中的链接）

## 确定总拥有成本

在选择发电系统时，成本问题虽然不一定起决定作用，但始终是一个至关重要的考虑因素。发电系统的总拥有成本 (TCO) 由以下成本构成：

- 工程设计成本
- 投资成本
- 安装/启动成本
- 维护成本
- 燃料成本
- 节能（用于减少燃料成本）

在实际应用中，以下因素会对 TCO 的计算结果造成较大的影响：

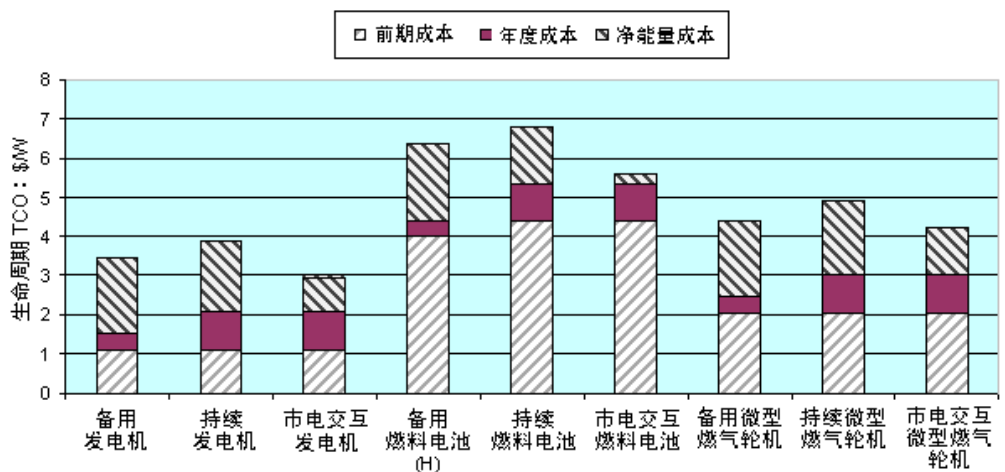
- 燃料成本与电力成本
- 市电闲置费或备用电源费
- 反向馈电价格和管理费
- 供电系统的负载百分比

我们可以构建一个模型来估算各种技术与工作模式的总拥有成本。对于传统的备用发电机，计算所需的数据很容易获得，估算结果也比较可靠。对于燃料电池和微型燃气轮机，我们基于行业未来 3-5 年的规划对设备成本进行了估算，这一前瞻性的结果可以为这些技术未来的经济效益提供有益的指导。

给定设备成本、安装成本、维护成本和能量数据，可以很容易计算出一个使用寿命为 10 年的典型数据中心的 TCO，此处不再赘述。附录 1 的表格中列出了各项成本数据以及生命周期 TCO 的计算过程与结果。

根据附录 1 中这些切合实际的前瞻性数据，图 1 显示了一个 250 kW 数据中心发电系统的生命周期 TCO。

**图 1**  
各种技术与工作模式下的发电系统 TCO



分析得出以下基本结论：

- 前期成本与使用寿命期间的能源成本相当。

- 燃料电池和微型燃气轮机节约的能源成本不足以抵消因采用这些技术而提高的前期成本。
- 假定通常情况下数据中心的利用率远远低于 100%<sup>2</sup>，那么，与备用模式或市电交互模式相比，持续本地发电是最不经济的模式。
- 本地发电的低效率抵销了采用低成本燃料所带来的大部分好处。

## 其他注意事项

从经济学的角度来看，数据中心发电系统采用燃料电池和微型燃气轮机并不比采用备用发电机更具优势。不过，在考虑到其他一些实际情况之后，采用燃料电池或微型燃气轮机技术也不失为一个值得尝试的选择。以下对此进行了详细论述。

### 排放物

最为严重的是柴油发动机。柴油发动机的审批过程十分复杂，与所在地理位置有很大关系，在某些地方甚至不可能采用柴油机。支持将柴油机作为备用发电机的观点认为，虽然其单位时间的排放量较大，不过工作时间很短，因而总的排放量较低。不过，实际上备用柴油机在启动时会产生大量的可见烟尘，尤其是当柴油机作为备用电源要在瞬间承担起负载时更是如此。因此，柴油机在启动时往往会遭到周围居民的抱怨，从而可能导致“事后”遭到当局有关法规的管制这样一个非常尴尬的局面。

为了进行 TCO 分析，我们假设用天然气或丙烷燃料的备用发电机来替代广泛使用的柴油发电机。这些发电机的成本要比柴油发电机的成本高出大约 30%，但极大地减少了排放物，尤其是可见排放物。如果主要目的是为了减少排放物，有数据显示，以天然气或丙烷为燃料的发电机要比电池材料或微型燃气轮机经济得多。

### 可用性

对于许多数据中心和网络机房而言，停机成本十分高昂。有人曾提出，与备用发电机相比，燃料电池和微型燃气轮机可以提高系统的总体可用性。人们经常会提及一个统计数据，即备用发电机在需要启动时只有 90% 的成功概率。

要评定此论点是否正确，需要燃料电池和微型燃气轮机的可靠性数据，以及故障模式的特性及其所需的修理时间。目前还无法获得这些数据。

我们能够肯定的是，在容错方面进行投资可以提高任何供电系统的可用性，例如，前面讨论过的 N+1 结构和双路结构。此外，加强同步维护设计、改进状态监控以及增强维护等措施都可以提高可用性。目前，有证据表明，如果将备用发电机系统所节约的 TCO 用于提高此类系统的可用性，则可以抵销燃料电池或微型燃气轮机的任何可能的（及尚未证实的）可用性优势。

### 取消其他设备

许多有关燃料电池和微型燃气轮机的讨论都认为，采用新技术后，供电系统中其他某些设备可以取消，从而可能会降低成本、提高可用性及效率。去掉 UPS 或电池是讨论得较多的一个话题。

若采用市电交互模式，则仍然需要采用 UPS 来隔离关键负载与市电。若采用持续模式，也仍然需要采用 UPS 来为关键负载提供缓冲保护，使之免受其他负载（如空调装置）的影响。若采用备用模式，很显然，在发电机能够运转之前必须用 UPS 为关键负载供电。

在持续模式或市电交互模式中使用，UPS 的后备时间原则上要比用在备用模式中的后备时间短。因而其电池可以更小。不过，缩短特定负载的电池运行时间，会给电池造成更大的压力，并

<sup>2</sup>有关典型利用率的讨论，请参阅第 37 号白皮书《避免数据中心和网络机房基础设施因过度规划造成的资金浪费》（点击资源章节中的链接）

降低系统可靠性。采用目前的电池技术，不可能将电池的大小缩小至运行时间低于 5 分钟。如果在持续模式或市电交互模式下采用带飞轮的 UPS，那么发电系统可以不用电池。不过，没有数据表明该措施会给 TCO 带来任何益处。此外，实际数据中心的故障数据显示，电池所提供的后备时间可以为在发生异常故障时进行人为干预提供时间，从而防止停机。

## 从交流电转换为直流电

某些关于燃料电池和微型燃气轮机的讨论认为，数据中心和网络机房采用这些技术后可以不再需要交流电源。其观点是，采用直流电源为关键负载供电可以减少电力转换步骤。而燃料电池和微型燃气轮机产生的都是直流电，因而有可能直接采用。

这种观点实际上不切实际。首先，数据中心或网络机房运营所需的许多设备都需要交流电，让这些设备改为采用直流电几乎是不可能的。这些设备包括照明设施、空调装置、办公设备，甚至个人计算机。其次，认为直流电比交流电效率更高或更具优势的观点无疑是错误的。<sup>3</sup>

## 热电联产

无论何种发电系统，除了产生电能之外，还会产生更多的热能。如果能将这部分热量转化为有用的能源，从而取代其他必需的热源，那么有可能大大降低成本。但很可惜，数据中心和网络机房本身所产生的热量已经足够多了，并不需要多余的热能。因此，在将节约成本的构想付诸现实之前，必须先找到持续热能的用武之地。虽然这样的应用环境难以找到，但有数据显示，在此类特殊环境中市电交互热电联产发电系统的 TCO 要低于备用供电系统的 TCO。

请注意，当采用热电联产时，有数据显示，以天然气为燃料的发动机的 TCO 仍比燃料电池或微型燃气轮机低许多。

## 冷电联产

发电过程中所产生废热的另一个用途是通过名为“吸收式制冷机”的设备来驱动制冷装置。此时，废热实际上转换为数据中心所需的制冷能源。由于一般的数据中心在运行制冷系统方面所需的电能并不少于关键负载所需的电能，因此，这种方法带来了双重好处：既降低了电力负载，又提高了发电系统的效率。从理论上而言，这会显著减少数据中心的 TCO。

就目前而言，在不损失优势的情况下为冷电联产系统提供容错功能仍然是一个尚未攻克的技术难题。

废热的温度越高，采用吸收式制冷机的冷电联供系统的性能也越高。因此，PEM 等燃料电池技术不适合采用吸收式制冷机，因为其工作温度太低。而微型燃气轮机的废热温度最适合冷热联产方案。

## 与市电完全断开

某些文章中偶尔会提到，采用燃料电池或微型燃气轮机的数据中心可以彻底与市电网络断开。这样一来，便无需备用费用或其他市电费用。这也使得可以将数据中心建在无法取得交流市电增容许可的地方。

与市电隔绝确实带来了诸多新的技术问题，譬如，发电机的冷启动、无市电作为后备电源的损失等等。此外，设施还要依赖于通过管道或汽车运送的燃料，因而可能会面临工人罢工或其他供应不畅问题。燃气设备也可能在紧急关头停止运行，譬如，在遇到罕见寒冷天气而急需燃气时，燃气压力却在下降。

---

<sup>3</sup> 有关数据中心中直流电使用情况的讨论，请参阅第 63 号白皮书《数据中心交流与直流配电综述》（点击[资源](#)章节中的链接）

有数据显示，如果不得不完全与市电断开，那么，传统发电机组的 TCO 仍然要低于燃料电池或微型燃气轮机的 TCO。

## 结论

数据中心和网络机房要想获得高可用性，仍需要采用本地发电来应对断电问题。至少在可预见的未来，传统的引擎驱动备用发电机要比燃料电池和微型燃气轮机更具经济性。

如果当务之急是减少排放物，那么，最实际的方法是采用以天然气或丙烷为燃料的发电机，而不是用燃料电池或微型燃气轮机来取代柴油发电机。

通过一些能显著降低燃料电池成本的技术革新手段和重整技术，可以采用燃料电池来取代引擎发电机组，不过，这些降低成本的方法尚未经过验证。

如果结合使用市电交互模式与冷电联产，那么，微型燃气轮机有可能比传统方法更具 TCO 优势。不过，还有许多技术障碍需要克服，包括如何经济有效地提供容错功能。

从用户的角度而言，要最大程度地提高供电系统的可用性，在目前所用的基于引擎技术的容错结构上进行改进，是最为理想的投资手段。此类投资包括采用双路供电线路结构、N+1 结构以及改进系统的集成与测试、改进监测仪表与监控等。



### 关于作者

**Neil Rasmussen** 是施耐德电气旗下 IT 事业部—APC 的高级创新副总裁。他负责为全球最大的用于关键网络设备（电源、制冷和机柜等基础设施）科技方面的研发预算提供决策指导。

Neil 拥有与高密度数据中心电源和制冷基础设施相关的 19 项专利，并且出版了电源和制冷系统方面的 50 多份白皮书，其中大多白皮书均以 10 几种语言印刷出版。近期出版的白皮书所关注的重点是如何提高能效。他是全球高效数据中心领域闻名遐迩的专家。Neil 目前正投身于推动高效、高密度、可扩展数据中心解决方案专项领域的发展，同时还担任 APC 英飞系统的首席设计师。

1981 年创建 APC 前，Neil 在麻省理工学院获得学士和硕士学位，并完成关于 200MW 电源托克马克聚变反应堆的论文。1979 年至 1981 年，他就职于麻省理工学院林肯实验室，从事飞轮能量储备系统和太阳能电力系统方面的研究。



点击图标打开相应  
参考资源链接



**UPS 对系统可用性的影响**

第 24 号白皮书



**避免数据中心和网络机房 基础设施因过  
度规划造成的资金浪费**

第 37 号白皮书



**数据中心交流与直流配电综述**

第 63 号白皮书



**浏览所有 白皮书**

[whitepapers.apc.com](http://whitepapers.apc.com)



**浏览所有 TradeOff Tools™ 权衡工具**

[tools.apc.com](http://tools.apc.com)



## 联系我们

关于本白皮书内容的反馈和建议请联系：

数据中心科研中心

[DCSC@Schneider-Electric.com](mailto:DCSC@Schneider-Electric.com)

如果您是我们的客户并对数据中心项目有任何疑问：

请与您的 **施耐德电气** 销售代表联系

## 附录 1: TCO 数据

本附录提供了生成上文的图 1 所用到的数据，并简要说明了所用的模型。该模型囊括了前期成本以及包括能源成本在内的重复成本，根据系统的使用寿命对这些成本进行累计，所用单位为美元/系统额定功率（瓦特）。

该模型基于如下假设：

备用燃料电池采用氢作为燃料，持续燃料电池具备重整系统并以天然气为燃料。

发电机系统以天然气或丙烷，而不是柴油为燃料。柴油设备的成本应低大约 25%。

向供电公司缴纳的备用费是针对未工作于备用模式下的所有系统而言的。这是供电公司因提供电力服务作为后备电源而每年收取的一笔费用。该费用包括在系统额定功率的基本费用中。

电费为持续运营的平均费用，包括高峰时段的使用费用。该成本通常要比基本费用高。

模型根据 250 kW 的系统成本构建。请注意，此处的 \$/W 成本将低于容量更高的系统的成本，并高于容量更低的系统的成本。



表 A1

TCO 计算中所用的数据

**设计输入**

|        |    |     |
|--------|----|-----|
| 系统使用寿命 | 年  | 10  |
| 负载百分比  | %  | 35% |
| 额定容量   | KW | 250 |

**成本输入**

|                |      | 备用发电机 | 持续发电机 | 市电交互发电机 | 备用燃料<br>电池 (H) | 持续燃料电池 | 市电交互<br>燃料电池 | 备用微型<br>燃气轮机 | 持续微型<br>燃气轮机 | 市电交互微型<br>燃气轮机 |
|----------------|------|-------|-------|---------|----------------|--------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| <b>投资/前期成本</b> |      |       |       |         |                |        |              |              |              |                |
| 系统工程设计         | \$/W | 0.2   | 0.2   | 0.2     | 0.4            | 0.4    | 0.4          | 0.4          | 0.4          | 0.4            |
| 发电机设备(3年)      | \$/W | 0.4   | 0.4   | 0.4     | 2              | 2      | 2            | 0.8          | 0.8          | 0.8            |
| 直流/交流逆变器       | \$/W | 0     | 0     | 0       | 0.3            | 0.3    | 0.3          | 0.3          | 0.3          | 0.3            |
| 辅助设备           | \$/W | 0.3   | 0.3   | 0.3     | 0.4            | 1.4    | 1.4          | 0.3          | 0.3          | 0.3            |
| 燃料存储           | \$/W | 0.1   | 0.1   | 0.1     | 0.7            | 0.1    | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1            |
| 常规安装           | \$/W | 0.1   | 0.1   | 0.1     | 0.2            | 0.2    | 0.2          | 0.15         | 0.15         | 0.15           |

**维护成本**

|      |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 维护成本 | \$/W/Y | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

**其他费用**

|       |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 闲置费   | 美元/KW    | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 市电备用费 | 费用百分比    | 0%      | 10%     | 10%     | 0%      | 10%     | 10%     | 0%      | 10%     | 10%     |
| 电费    | \$/kw-hr | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 |
| 燃料费   | \$/kw-hr | \$0.017 | \$0.017 | \$0.017 | \$0.200 | \$0.017 | \$0.017 | \$0.017 | \$0.017 | \$0.017 |
| 反向馈电费 | \$/kw-hr | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 | \$0.070 |

**性能**

|           |   |        |      |      |       |      |      |       |      |      |
|-----------|---|--------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| 发电空载损耗    | % | 25%    | 25%  | 25%  | 10%   | 10%  | 10%  | 20%   | 20%  | 20%  |
| 发电满负荷效率   | % | 30%    | 30%  | 30%  | 40%   | 35%  | 35%  | 28%   | 28%  | 28%  |
| 采用市电时间百分比 | % | 100.0% | 0.1% | 0.1% | 99.9% | 0.1% | 0.1% | 99.9% | 0.1% | 0.1% |

**生命周期 TCO**

|              |      | 备用发电机  | 持续发电机  | 市电交互发电机 | 备用燃料<br>电池 (H) | 持续燃料电池  | 市电交互<br>燃料电池 | 备用微型<br>燃气轮机 | 持续微型<br>燃气轮机 | 市电交互微型<br>燃气轮机 |
|--------------|------|--------|--------|---------|----------------|---------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| <b>前期成本</b>  | \$/W | \$1.10 | \$1.10 | \$1.10  | \$4.00         | \$4.40  | \$4.40       | \$2.05       | \$2.05       | \$2.05         |
| <b>年度成本</b>  | \$/W | \$0.40 | \$0.96 | \$0.96  | \$0.40         | \$0.96  | \$0.96       | \$0.40       | \$0.96       | \$0.96         |
| <b>净能量成本</b> | \$/W | \$1.96 | \$1.81 | \$0.90  | \$1.97         | \$1.45  | \$0.25       | \$1.96       | \$1.88       | \$1.22         |
| <b>合计</b>    | K\$  | \$865  | \$967  | \$739   | \$1,593        | \$1,702 | \$1,402      | \$1,102      | \$1,222      | \$1,057        |

**中间计算过程**

|              |          |           |            |            |           |            |            |           |            |            |
|--------------|----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| 负载能量         | kw-hr    | 7,000,000 |            |            |           |            |            |           |            |            |
| <b>一次性成本</b> | K\$      | \$275     | \$275      | \$275      | \$1,000   | \$1,100    | \$1,100    | \$513     | \$513      | \$513      |
| 备用费          | K\$/使用寿命 | \$0       | \$140      | \$140      | \$0       | \$140      | \$140      | \$0       | \$140      | \$140      |
| 其他年度成本       | K\$/使用寿命 | \$100     | \$100      | \$100      | \$100     | \$100      | \$100      | \$100     | \$100      | \$100      |
| <b>总年度成本</b> | K\$      | \$100     | \$240      | \$240      | \$100     | \$240      | \$240      | \$100     | \$240      | \$240      |
| 发电机固定能量损耗    | kw-hr    | 0         | 4,995,000  | 4,995,000  | 2,000     | 1,998,000  | 1,998,000  | 4,000     | 3,996,000  | 3,996,000  |
| 发电机比例损耗      | kw-hr    | 0         | 14,568,750 | 41,625,000 | 9,800     | 12,287,700 | 35,107,714 | 16,600    | 16,583,400 | 47,381,143 |
| 发电机能量输出      | kw-hr    | 0         | 6,993,000  | 19,980,000 | 7,000     | 6,993,000  | 19,980,000 | 7,000     | 6,993,000  | 19,980,000 |
| 所需市电能量       | kw-hr    | 7,000,000 | 7,000      | 7,000      | 6,993,000 | 7,000      | 7,000      | 6,993,000 | 7,000      | 7,000      |
| 所需燃料能量       | kw-hr    | 0         | 26,556,750 | 66,600,000 | 18,800    | 21,278,700 | 57,085,714 | 27,600    | 27,572,400 | 71,357,143 |
| 所售市电能量       | kw-hr    |           |            | 12,980,000 |           |            | 12,980,000 |           |            | 12,980,000 |
| 能量成本         | K\$/使用寿命 | \$490     | \$452      | \$1,133    | \$493     | \$362      | \$971      | \$490     | \$469      | \$1,214    |
| 所售市电能量       | K\$/使用寿命 |           |            | \$909      |           |            | \$909      |           |            | \$909      |
| <b>净能量成本</b> | K\$/使用寿命 | \$490     | \$452      | \$224      | \$493     | \$362      | \$62       | \$490     | \$469      | \$305      |