

# APC Symmetra MW 电源系统可靠性分析

## 第 109 号白皮书

版本 1

作者 Stephen Fairfax, M Technology, Inc.  
Neal Downing, M Technology, Inc.  
Dan Healey, M Technology, Inc.

### > 摘要

MTechnology 有限公司 (MTech) 对施耐德旗下 APC 的 Symmetra MW UPS 进行了可靠性定量分析。该研究采用概率风险评估 (PRA) 方法计算了超过 680,000 种潜在故障模式的几率。该数学方法说明了故障率和组件性能的不确定性,并在每一系统组件对整体故障风险的贡献率方面提供了详细的指导。此研究包括对系统体系结构、组件选择、控制系统、制造规范以及内部和外部故障响应等方面进行的详尽分析。研究表明,在采用冗余功率段运行时,系统平均故障间隔时间 (MTBF) 可以超过 100 万小时。此数据包括所有设备故障,包括因 APC 无法控制的原因造成的故障,如蓄电池厂或公共电力设施的故障。

### 目录

[点击内容即可跳转至具体章节](#)

发现	2
系统说明	2
小型功率模块的优势	3
模块性对可靠性的意义	4
可用性优势	6
故障树分析结果	6
冗余的优势	8
结论	9
资源	9
附录	10

## 发现

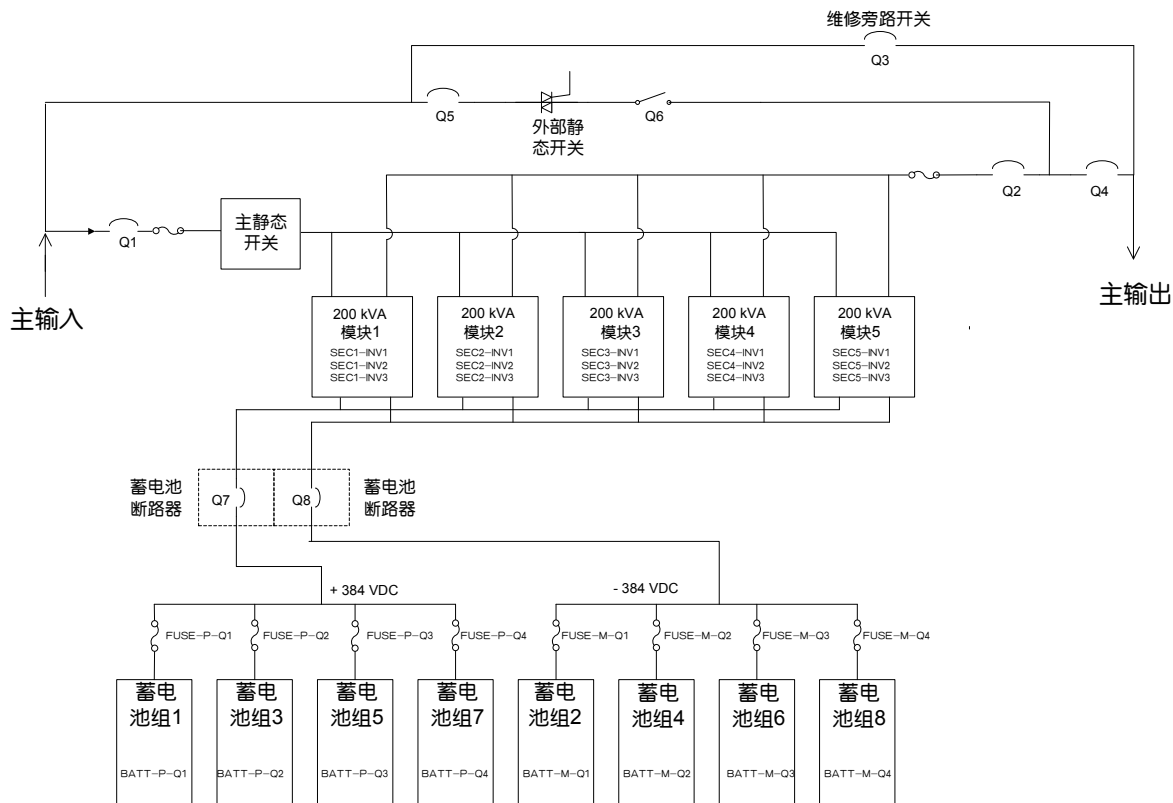
1. Symmetra MW的可靠性至少与额定功率类似的双转换式UPS相当，在采用冗余功率段运行时，其预期平均故障间隔时间（MTBF）约为 100 万小时。此数据包括UPS、蓄电池、静态旁路及公共电力设施故障的影响，即使在故障最终原因不受APC无法控制时亦如此。MTech计算MTBF的方法应反映了具有知识和能力的客户在运行Symmetra MW时可能遇到的情况。本研究中定义的故障涵盖了因任何原因造成关键负载供电丢失的所有情况。
2. 系统具备高度的冗余性，除输入母线、输出母线和输出断路器的灾难性故障之外，不存在任何单一故障点。这些故障模式存在于任何大型UPS中，尽管它们经常被忽略或低估。Symmetra的设计和试验进一步显著降低了这些不常见故障模式的可能性。
3. 冗余、模块化设计提高了系统可靠性和可用性。系统的可靠性高于其主要组件的可靠性。对功率模块及其它主要部件计算出的MTBF与竞争对手宣称的水平类似。
4. 在具有一个冗余功率段的单个Symmetra MW系统中，最大的故障因素在于要求多数维修工作在系统处于维护旁路时进行，因为在系统处于旁路期间发生的电力设施故障将导致关键负载掉电。
5. 缩短维修时间可以减少负载承受电力设施故障的时间，从而可以降低这种风险。模块化设计可对几乎所有主要组件实现快速、低风险替换。
6. 冗余的逆变器部分（如 1 MW的系统，负载小于 800 kW）可显著降低负载掉电的风险，其可能性约为非冗余式配置的 1/7。
7. 通过详细分析反对Delta转换在线式UPS的意见，可以看出，其中多数是没有价值的，其余则是设计选择而非基于拓扑结构的结果。参见附录A中关于此问题的更多信息。
8. 相比效率较低的双转换式设计，Delta转换在线的高效率所发的热量较少，组件工作温度会显著降低。工作温度升高几乎会使所有组件的可靠性都大大降低。我们的研究未包括这一重要因素的影响，因为我们缺少关于竞争对手产品典型组件工作温度的定量数据。这意味着我们的结果可能是保守的，Symmetra MW系列产品的MTBF将很有可能大大超出我们的预期。

## 系统说明

APC Symmetra MW是一种Delta转换在线式不间断电源（UPS）。Symmetra MW可作为单一系统被配置为支持 400 kW至 1.6 MW的负载，也可采用多台Symmetra MW并联方式支持更大的负载（我们的研究不会检查并联配置）。其设计为高度模块化，功率模块、控制和多数主要部件均置于标准的模块化构架中。这种模块性可在经济性、可靠性和可用性等方面为系统提供微妙而又重要的优势。图 1 示出了一套额定值为 1 MW的Symmetra MW系统的基本单线图。

图 1

额定值为1MW的  
Symmetra MW的  
单线图



通常此系统将被用于对不超过 800 kW 的关键负载供电，因此如果某一个 200 kW 段内的任何模块出现故障，系统可以继续正常运行，直至该模块被更换。对 800 kW 至 1 MW 的关键负载运行此系统的意义将在本报告后文中讨论。此图并未显示 UPS 控制和制冷系统中的冗余功能。

## 小型功率模块的优势

Symmetra MW 与可比产品的区别在于它采用相对较小（67 kW）的单相功率模块，每一个 200 kW 三相段内有 3 个此类模块。客户可以选择购买 200 kW 功率段空缺的单元。这些段随着关键负载的增长而填入功率模块。这种方式让不能确定未来关键负载大小的客户获得成本上的优势，但它对系统的可靠性没有显著影响，将不在本报告中进行讨论。（因简化升级而使风险有相当大幅度的降低，但这不属于本研究的范围）。

许多与之竞争的 UPS 采用并联单元来实现更高的功率水平，但通常每一个单元均基于“独立式”产品。也就是说，每一并联单元均具有完整三相 UPS 产品的所有组件和功能，包括整流器、逆变器、控制件、直流母线、保护电路以及某些情况下具有的静态旁路回路。这些模块往往都很大。施耐德电气旗下 APC 的 Silicon 产品线能够并联最高额定值为 500 kW 的模块，以实现更高的功率水平。Liebert、MGE 以及 Powerware 的产品也采用额定值为 100 至 500 kW 或更高的并联三相模块来实现更高的功率水平和/或冗余度。

## 小型模块的经济优势

采用较小模块有若干经济依据。经济分析是实用的、可实践的可靠性分析的一部分。其目标并非简单地实现最高的可靠性，而是要找到在一定的成本、空间和时间限度内可实现最高可靠性的系统。在可靠性讨论中引入经济论证的实质在于：如果两个相比较的系统可靠性相当，则应购买成本较低的系统，将有限的资金用于未来的可靠性改进或其它目的。“成本”的估算不可能十分精确；而且个别需求、时间偏好、预算限度以及风险容忍度都将影响任何购买决策。经验丰富的买家往往采用产品成本在其生命周期内可以实现的未来价值分析。

较小型模块的生产批量将大于较大型的模块，从而可以引入可降低单位成本同时又减少加工缺陷发生率的自动化及其它加工技术。对于每台UPS由两个 500 kW模块制成的 1 MW UPS，如其年市场需求为 100 MW，则将生产 200 个此类模块，而Symmetra设计将可以生产 1,500 个功率模块。

第二个经济依据在于冗余性。基于 500 kW模块的系统可通过加入 3 个模块的方式提供 1 台冗余的 1 MW UPS。Symmetra MW实现冗余的方式是在一个 200 kW隔间内集成 3 个附加的功率模块，将总数由 15 增至 18。Symmetra设计以模块数量增加 20%的代价实现相同的冗余度水平，而采用 500 kW模块的替代方案则需使模块数量增加 50%。

Symmetra MW的 67 kW模块具有足够的紧凑性和轻便性，两名合格人员可以安全地对其进行搬运。它可被快速拆卸和更换，而且没有用户可操作的控制件、指示器或旁路回路。而 500 kW模块则非常巨大且沉重，在搬运中需要机械协助。拆卸、更换Symmetra MW功率模块仅需数分钟，而拆卸大型功率模块则需要数小时或数天。更换大型模块的时间和难度意味着在多数情况下，大型模块的维修要在现场进行，而不能更换为经过工厂测试的单元。Symmetra模块在现场进行更换，而且总是在工厂设施内进行维修。维修的质量和维修时间的显著差异对于系统可靠性有巨大的影响。

## 模块性对可靠性的意义

关于可靠性的基本考虑认为，简单是一项优点，即零件较少的设备其可失效的零件也较少。对于两台实现相同功能的设备，如果其中一台的零件数是另一台的两倍，则许多人将以直觉认为较简单的设备可靠性更高。然而，对于低概率事件的理解，直觉往往很不可靠。

经过周密研究后增加的复杂性能够而且确实提高了系统可靠性。现在几乎所有汽车都采用双重制动回路和计算机控制的防抱死制动器。这些系统比单回路液压系统更为复杂，但可靠性要比后者高出许多倍，在处理紧急停车情况时要安全得多。

草率地添加额外的组件会降低系统可靠性，然而，对较为复杂的系统进行周全的设计和试验将可使可靠性大大提高。大部分关于组件或模块“最佳”数量的说法都经不起严密地推敲。为此类说法提供支持的论据忽略了现代UPS所通用的基本冗余特性，它们因此就丧失了可信度。

MTech对Symmetra MW可靠性的详尽分析表明，该产品至少会和与之竞争的大型UPS产品具有相同的可靠性。在我们的研究中，故障的定义包括关键负载供电因任何原因而中断的所有情况。许多已公布的数据均不包括蓄电池组功能失常等“外部”原因。一些制造商还将在预防性维护或维修期间或之后出现的故障特别排除在外，因此遮掩了由这些本身有风险的步骤所产生的非常重要的故障源。MTech对于故障的保守定义以及分析表明，在可靠性相等的要求之下，Symmetra MW通常发生故障的可能性较小。

对于每MW的负载，APC将生产 15 个功率模块，而与之竞争的大型UPS设计则仅采用 1 到 2 个。除了前文所述的经济优势之外，这一策略还使APC可以更有效地实施其可靠性增长管理进程。APC识别Symmetra功率模块内任何缺陷的速度约比相应的大型模块产品线要快 10 倍左右。最终，APC应能够检测到缺陷出现的频度不及竞争对手产品相应期望频度 1/10。

APC可以识别缺陷，并精心制定相应的响应措施，以实现更高模块产量的优势。APC对其可靠性增长管理计划的承诺和实施水平在业界居于领先地位，APC将有效地利用这一重要的竞争优势。

## 模块化设计在维修方面的优势

更大的单元产量、批量生产技术以及可靠性增长管理规范对于可靠性的意义十分重大。模块化设计对维修过程的影响要大得多、明显地多。APC的模块化设计将在维修故障UPS的过程中引入根本性的变化，这将使见多识广的客户立即获益并很容易看到这些变化。

运行、故障、维修和返回运行构成了一个循环，其复杂性很少被确认或详查。基于模块更换的系统体系结构将对这一循环产生深刻的变革。下表归纳了模块化设计与典型的大型或单体化UPS（其模块维修需在现场进行）的维修过程的差异。

表 1

修理过程：单体化与模块式设计的比较

维修步骤	单体化设计	模块化设计	优势
检测故障组件或模块	通常为自动进行。独立UPS并联运行可能使检测和隔离复杂化	自动进行。模块设计有自检和隔离功能。	模块化设计可能稍具优势。
操作人员对故障的确认	操作人员响应	操作人员响应	无显著差别。
维修人员动员	需要经过深入培训的维护人员。他们是稀有的资源，很少可在现场提供	经过最低培训的人员即可更换有故障或怀疑有问题的模块	模块化设计具有显著优势：可采用数量更多、成本不高的人员，缩短响应时间。
组件故障的确认/诊断	许多故障必须被跟踪至具体的组件。这经常需要现场试验步骤和时间。	故障仅需被跟踪至模块级。组件故障诊断在工厂维修设施内进行。	模块化设计可以缩短诊断时间，减少引入隐蔽缺陷的机会。
故障排查	对可疑零件进行现场试验和更换	无需在现场进行故障排除。在工厂进行模块维修。	模块化设计可以显著降低引入新的隐蔽缺陷和/或误诊断的风险。
备件的获取	需要多种备件	对于所有组件故障仅需更换模块	模块化设计可大大减少备件库存量。现场具备所需备件的可能性更高。
新部件安装	现场作业	对多数故障仅需更换模块	模块化设计可以显著降低引入隐蔽缺陷的可能性。
测试	通常无法进行全面测试	模块在工厂接受全面测试。系统可确认模块的运行。	模块化设计有非常明显的优势。对所有维修均按照原工厂标准进行测试。
返厂维修（RTS）	规程取决于维修的性质	标准规程和自动化的RTS	由于发生操作人员错误的可能性较低，模块化设计具有显著的优势。
复原（从现场撤除试验设备、零部件，清除废物，并撤出服务人员。）	规程取决于维修的性质	在更换模块之后为标准规程	由于可以降低引入隐蔽缺陷的可能性，模块化设计具备一定优势。

在模块化的系统设计中，移动性、故障排查、备件获取、安装、测试以及返厂维修等步骤的速度大大加快，风险显著降低，而且成本显著缩减。针对可疑零件的特别故障排查规程、现场维修以及现场更换的风险非常大。其中会产生很多发生人为错误的机会，并在所维修的UPS中引入隐蔽缺陷。通常情况下不可能让经过现场维修的UPS接受由所有高质量UPS的制造商对每一新模块进

行的全套功能和性能测试。相比之下，模块化设计则几乎不需要任何现场维修和故障排查。模块将被更换并返回工厂进行这些流程。新的（或经过维修的）模块在离厂之前会经过全面测试。

### 可用性优势

快速更换故障模块的能力可以缩短维修时间。可用性是系统可运行的平均时间的量度，因此缩短维修时间可以提高可用性。当以冗余备用功率模块运行（如在额定值为 1 MW 的 Symmetra 上负载不超过 800 kW）时，可以将维修时间缩短至 15 至 30 分钟，其间表 1 中所示的多数维修步骤可以在单元停用之前完成。本报告中所述的维修时间定义为关键负载由市电或发电设备供电而 UPS 停机维修的时间。

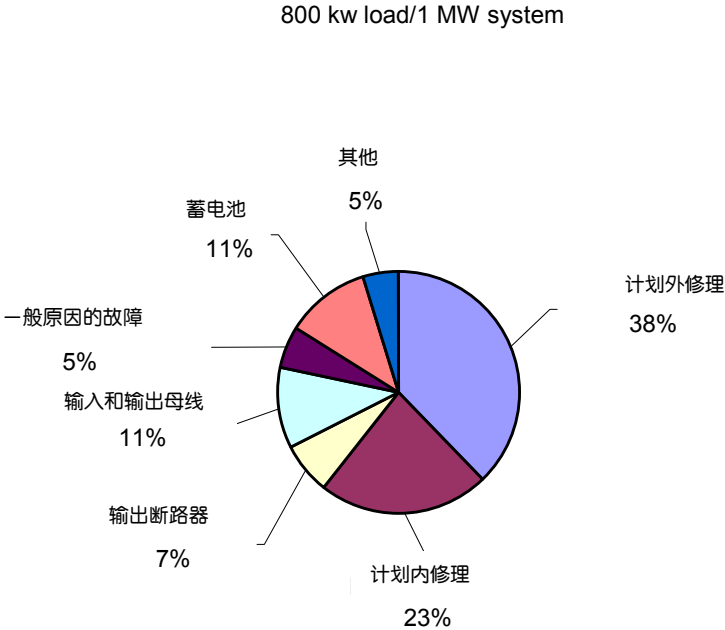
如果可用性对于客户而言是有意义且有用的指引，则其必须被谨慎地定义。MTech 采取 UPS 所保护设备的最终用户的角度。如果该设备正常运行，则其对这些用户可用。即使在为更换模块而使负载短暂切换至市电期间，只要没有市电不稳定，我们均将系统定义为可用。这并不意味着在系统的正常生命周期内没有任何模块故障。模块可以发生故障并被更换，但只要被保护的设备有供电且可用，就可视为未发生故障。根据我们的研究，预计 Symmetra MW MTBF 可超过 100 万小时。

### 故障树分析结果

故障树分析就是构建出描述组件故障的何种组合会最终导致系统故障的逻辑模型。Symmetra MW 高度冗余的设计意味着单一的组件故障很少会导致系统故障，这里的系统故障定义为关键负载电源缺失。故障树中包含的“故障逻辑”与标准的组件故障率结合，以得出系统可靠性的估算结果。故障树在附录中示出并加以讨论。

图 2 所示为我们对所保护的关键负载不到 800 kW 的 1 MW（5 段）Symmetra 的分析结果。由此将导致一个冗余功率段（N+1）。

图 2 功率模块以 N+1 冗余运行的 Symmetra MW 中组件对系统故障的贡献率



导致故障的主要因素有（以顺时针顺序）：

- **计划外维修（38%）**：是强制系统静态旁路的故障。在此状态下，电力设施的任何故障都将导致系统故障。计划外维修按照平均持续 24 小时进行建模。APC 在其对系统可用性和可靠性的内部计算中采用相对较高的市电故障率，即每小时 3.89E-03 次故障。此值所对应的平均市电故障时间为 257 小时，平均每年预期事件次数超过 34 次。这种保守（悲观）的市电故障率用于强调所需故障模式和对维修时间的敏感性。在美国某些市电配电网的

地区，实际的故障率可能不及此值的 1/10。将市电MTTF提高至 1000 小时可将预期系统故障率缩减为 1/3 以下。

能够对维修进行计划意味着维修不再是随机的，而概率方法最适用于随机事件。相比之下，“计划外维修”是真正的随机事件，因为如果系统需要维修，就需要立即开始，而且要在 24 小时内恢复运行。计划外维修的建模可能稍微乐观一些，因为许多维修要在 24 小时内完成很困难。

- **计划内维修 (23%)**：是因为有冗余组件而不会强制UPS进入静态旁路的系统组件（主要是功率模块）故障。计划内维修按照市电平均持续 30 分钟进行建模。在此期间内，关键负载可能受到市电故障的影响。  
我们对计划内维修事件的建模稍微保守（悲观）一些，原因在于其中假设在短暂的维修窗口期间市电故障率相同。在现实中，系统的操作人员会避免在故障可能性较高或故障后果会更严重的时段内进行维修。大型金融公司通常会禁止在交易时段内进行维修。在暴风雨、炎热天气或其它威胁市电可靠性的条件下也不会进行维修。
- **输出断路器 (7%)**：断路器的伪跳闸（当负载电流处于设备额定电流以内时跳闸）会对所有电力系统的可靠性造成显著的影响。针对美国核电工业中在无辐射环境中约 27,000 台机组所采集的数据显示，故障率为每小时  $1.2 \times 10^{-7}$  次，对应于MTTF为 500 万小时，即 57 年。<sup>1</sup>
- **输入和输出母线 (11%)**：输入或输出母线的灾难性故障（如持续性的线间或线对地故障）会导致系统故障。尽管输入母线故障不会导致立即故障，它却会阻止UPS蓄电池的充电，因此蓄电池电量耗尽就不可避免。
- 输入和输出母线故障的严重性不在于其发生的可能性，而是在于只要有一个此类故障就将使系统停止运行。这些故障模式通用于所有大型UPS，而并非Symmetra模块化设计的结果。消除这些重要的故障模式的唯一方式就是采用基于许多较小型UPS而非一台大型UPS的数据中心体系结构。感兴趣的读者可以在MTechnology所撰写的第 111 号白皮书《APC InfraStruXure英飞电源系统可靠性分析》中获得更多信息，在该白皮书中将PRA分析应用于此类体系结构。
- **共同原因的故障 (5%)**：这些是由于单一原因而导致多个组件失效的故障。共同原因的故障对冗余的优势添加了非常严重的限制。共同原因故障的来源很多：设计或生产缺陷；火灾、洪水或其它自然灾害；以及一个组件发生灾难性故障导致产生等离子体或碎片而使附近组件失效的情况。  
由于不当的规程或未能将系统复原至完全可用状态可能导致所有UPS或发电机或蓄电池同时禁用，定期维护就成为数据中心内非常大量的共同原因故障的来源。我们对Symmetra MW的设计、试验和生产设施的详细检查表明，其没有特定的共同原因故障来源。模块化设计以及冗余式故障保险控制系统体系结构有助于实现简单的测试和维护规程，即使在发生操作人员人为错误之后也不太可能导致失去负载。  
我们采用的每小时故障次数为  $10^{-8}$ ，对应的平均故障间隔时间（MTTF）为 1 亿小时，即 11,400 年。如此罕见的故障在所有故障中预期占到 5% 份额的事实既表明共同原因故障的影响，也证明了Symmetra MW的可靠性。
- **蓄电池故障 (11%)**：主要是需求型故障，它出现在市电失效而蓄电池又无法在规定时间内提供足够功率以保护负载的时候。我们的模型基于多个VRLA蓄电池串组，包括断路器、熔断器、连接和控制。我们证明Symmetra能够自动执行蓄电池定期测试，而该测试在识别失效蓄电池单元方面并非 100% 准确。测试会耗尽蓄电池组的电量，并缩短其使用寿命，因此我们的模型中将测试定为每 3 个月进行一次。具有许多单元和连线的大型蓄电池组会有许多失效的可能性，而蓄电池组的这种显著的贡献率既来源于在定期测试之间发生的可检测出的故障，也源自于仅在蓄电池运行期间发生的无法检测出的故障。影响此结果的因素还包括由APC保守估计（悲观）的市电故障率值得出的大量要求。
- **其它 (5%)**：表示其它所有故障来源。尽管Symmetra MW以及我们的模型有非常多的组件数量，但全部故障中有 95% 只是由其中的少数组件所导致。应注意，功率模块和控制模块故障不会在前述 95% 中出现，因为冗余式设计会防止模块故障导致系统故障。

 资源链接  
第 111 号白皮书  
APC InfraStruXure 英飞电源  
系统可靠性分析

<sup>1</sup> NRC AEOD/S92-93 et al, *Review of Operational Experience with Molded Case Circuit Breakers in US Commercial Nuclear Power*, 1992 年

# 冗余的优势

多数客户将采用N+1个冗余功率模块的方式运行Symmetra MW。例如，1 MW的关键负载通常由具有6个功率段的Symmetra供电，容量为1.2 MW。任何一个功率模块或段的故障都不会强制切换至旁路。

而如果Symmetra被配置为没有冗余功率模块，则每个运行年度内总体故障概率将增至7倍。故障原因的分布变化更为显著，如下所示。图3所示为我们对一套保护1 MW关键负载的1 MW（5段）Symmetra的分析结果。其中没有冗余功率段。

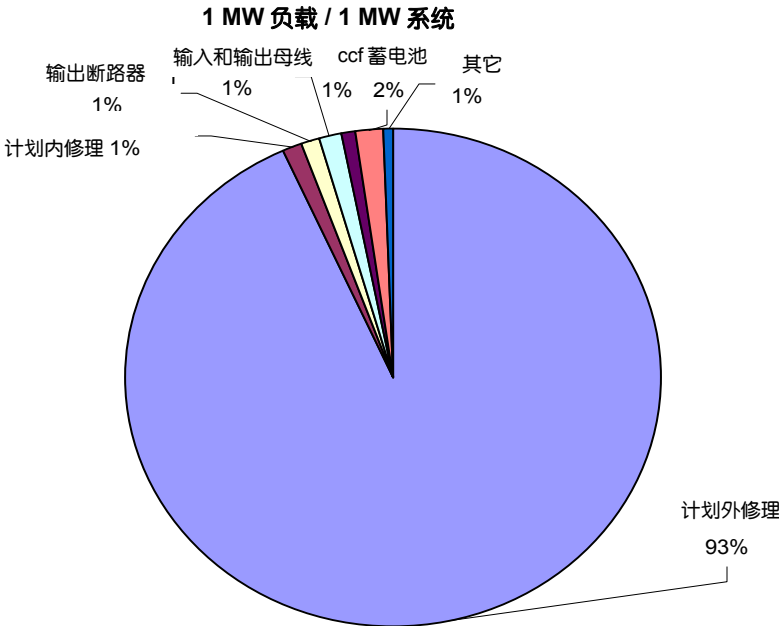


图3 无冗余功率段的Symmetra MW中组件对系统故障的贡献率

计划外维修现在几乎是所有故障的原因。功率模块故障会强制系统到静态旁路。此时维修是真正随机的（操作人员在凌晨2点和中午2点接到电话的可能性相同）。从确认故障到动员人力的整个维修过程在此时段内进行，我们对此时段按照持续24小时建模。由于大型数据中心中以具有的变更管理规程，通常难以在少于24小时的时间内获得对关键基础设施进行维修权限。



## 结论

MTech对施耐德电气旗下APC Symmetra MW的分析表明，其设计师所构造的是一种非常可靠、易于维护和维修的产品。故障的原因均匀分布在UPS及其相关组件中。这是设计中考虑周全的体现。如果所有风险仅源自 1、2 个组件，设计师应更好地利用其资源，以降低这些特定零件的故障机率。

Symmetra MW的模块化、冗余性质对于维修过程有深远且非常有益的影响。维修质量被大大改善，维修时间得以大幅缩短。没有设备是完美的，在任何成功的产品系列中都有可能出现故障，不论它们有多么可靠。施耐德电气旗下APC周到的工程设计和严格的测试所造就的UPS的性能相当于甚至很可能优于那些与之竞争的基于少数大型模块并联运行的设计。

### 关于 MTechnology, Inc. 公司

**MTechnology, Inc.** 有限公司提供 21 世纪所需的电力系统工程设计。该公司提供咨询、测试、产品开发和样机制造服务。MTech 进行电力系统的风险概率分析、设计审核、故障根本原因分析，并提供针对规章和法律诉讼的专家证明。MTech 可在知晓风险的系统设计、运行、维护、升级和可靠性增长管理方面提供咨询。客户经常能够实现资本和运营开支的大幅节省，同时又可显著提高可靠性。MTech 的设施包括一套占地 5,000 平方英尺的测试和实验室设施，能够运行 500 kW 的连续负载和数兆瓦级脉冲负载。MTech 曾开展许多高可靠性分布式发电项目，涉及从活塞式发动机到燃料电池的多种技术。该公司的客户包括公共电力企业、设计师和工程师、关键设施业主和运营商，以及从事 7x24 全天候关键任务行业的制造商。

### 关于作者

**Steve Fairfax** 是 MTechnology 有限公司的总裁。Steve 于 1997 年加入 MTech，但他自从在麻省理工学院（MIT）就读时起就一直从事数兆瓦级电力系统的研究工作，在 MIT 他协助建造并运行一套用于托卡马克聚变反应堆的 200 MW 电力系统。他在担任故障分析协会管理工程师期间开始了对电力系统可靠性的全职研究。他在 MIT 等离子聚变中心 Alcator C-MOD 核聚变反应堆的设计和初始运行期间担任工程和运行负责人，并担任波士顿地区公司的首席工程师。Fairfax 先生持有 MIT 的物理学和电气工程双硕士学位。

**Neal Dowling** 是 MTechnology 有限公司的高级工程师。他负责进行故障树分析及相关的建模和仿真，开发并测试新的电源和开关技术，并监管 MTech 的 400 kW 燃料电池电厂设施的运行和维护。在加入 MTech 之前，Neal 在波士顿地区几家医疗设备制造公司工作。他的专长包括关键功能的固件和软件的开发及维护、合乎 FDA 规范以及模拟和数字设计。Neal 持有 MIT 的电气工程学士和硕士学位。

**Dan Healey** 是 MTechnology 有限公司的高级工程师。他专门进行人为因素分析以及 PRA 技术在运行和维护活动中的应用。Dan 曾在波士顿地区几家公司担任工程主管，负责半导体处理、医疗设备、机器人以及光电系统方面的产品开发。Dan 持有罗切斯特大学电气工程学士学位，并在光学和编程方面进行了额外的研究生工作。他目前是哈佛大学的特别生，进行技术管理和软件开发的研究。



点击图标打开相应  
参考资源链接



**APC InfraStruXure英飞电源系统  
可靠性分析**  
第 111 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：

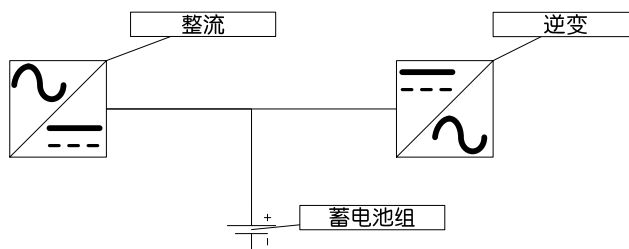
数据中心科研中心  
[DCSC@Schneider-Electric.com](mailto:DCSC@Schneider-Electric.com)

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 A: Delta 转换在线 式与双转换式 UPS 的比较

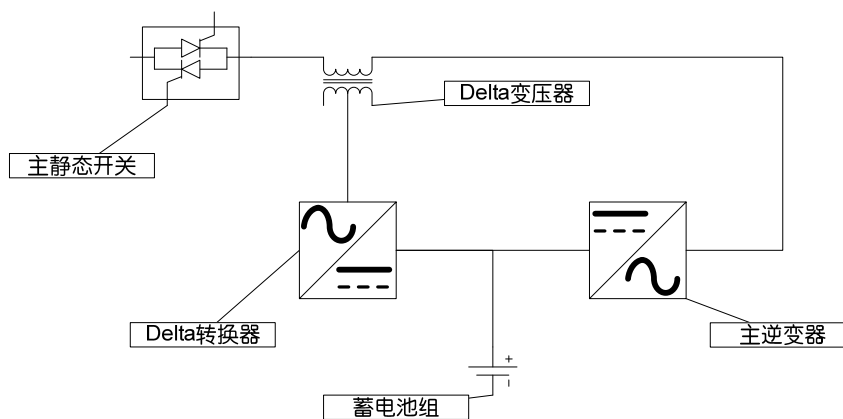
Delta转换在线式电路拓扑比较深奥，初看起来比标准的双转换式UPS更难理解。Delta变压器充当一个电流互感器。多数电气工程师对电压互感器很熟悉，而少数使用电流互感器的人主要将其用作传感器，而非受控源。



双转换式UPS

图 A1

两种转换设计的比较：双转换式与Delta 转换式



Delta转换式UPS

对Delta转换式UPS的一种常见批评就是它比较复杂。这种观点认为，组件较少的双转换式UPS应该更为可靠。本报告的正文中对此观点进行了讨论，发现它有问题。（汽车中的双制动回路比单回路设计既复杂，又更可靠。）

如果我们假设以下组件的故障率大体相等（双转换组件在前）：

- 逆变器 and 主逆变器，
- 蓄电池组和蓄电池组，
- 整流器和DELTA转换器，

则Delta转换式UPS的附加组件为：主静态开关和DELTA变压器。静态开关与干式变压器都是相对比较可靠的组件（每小时故障少于  $10^{-6}$  次），因此预计这些组件对故障的贡献度相对较小。两类UPS通常都具有由静态旁路开关给出的冗余供电路径，如果UPS组件发生故障，该开关将向负载提供市电电源。加装静态旁路开关将进一步减小两类UPS之间的可靠性差异。最后，两种设计均会出现相同原因的故障。在所有负载掉电情况中，很大一部分是由大型双冗余式UPS的控制系統故障所致。实际运行中的可靠性取决于体系结构和实施方式，而非简单的组件数量。

具体设计方案的选择对实际产品的可靠性有很大的影响，而不论设计师在关键组件、加工质量、维修质量、工作环境以及制造商可靠性增长管理计划的功效等若干可能存在的因素上是否适当采用了保守的裕度。这些因素要远远超出增加一两个电路元件的影响。

有些潜在客户对Delta转换持反对意见。在本研究进行期间，MTech的工程师们了解到了以下关于Delta转换的价值的意见。

### 它属于线路交互式 – 不如在线双转换好。

“线路交互式”是一个技术术语，它描述的是一种特定的UPS配置。线路交互式UPS的特性之一是，其中的单一逆变器总是被连接至关键负载，但在有市电电源时通常不工作，对蓄电池充电除外。有些型号中带有抽头变换式变压器或其它设备，以补偿较高或较低的市电设施电压。Delta在线式拓扑与线路交互式设计不同，只要市电存在，其Delta逆变器通常就会工作，这不同于多数线路交互式设计。与任何UPS一样，Delta转换在线式UPS会与线路进行互动，但它当然不是常规所说的“线路交互式”设计。

“不如在线双转换好”只是一种价值判断，并没有逻辑、科学或工程论据加以支持或反驳。其含义是“双转换式”UPS设计在本质上优于其它所有电路设计。并没有任何逻辑或经验证据可以支持如此宽泛的说法。当然现代的双转换式UPS要比有40年历史的线路交互式设计更为可靠，而它们也比早期的双转换式产品更可靠。我们对Delta转换在线式电路拓扑的分析结论是，功率模块、逆变器及其它主要组件的可靠性在本质上与其在双转换式UPS中的对应组件相同。

### Delta转换不能进行频率转换，且必须与公共电力设施同步。

这种说法的正确之处在于，Delta转换式UPS的输出频率必须与输入相同。然而，暗示这是一种缺陷却是不对的，理由有二。第一，现代的计算机负载对频率并不敏感。几乎所有的现代开关模式电源按照设计均可在48到63 Hz之间的任何频率运行，其中有很多的适用频率范围更宽。

第二点也是更重要的一点，保持UPS输出与输入交流波形同步的要求源自于静态旁路开关的应用。几乎所有大型UPS（不管是双转换式还是Delta转换式或其它设计）都带有静态旁路开关。它提供一个并联路径，是实现高可靠性所必需的条件。如果没有静态旁路，所有UPS将成为简单串联元件，UPS内的任何故障都将导致关键负载的故障。旁路开关从根本上改变了这种性质。通常大型UPS功率段的平均故障间隔时间约为150,000小时。只有当采用旁路开关并联运行时，系统的MTTF才会接近或超过100万小时。

UPS输入和输出波形必须保持接近同步，否则静态旁路开关将被禁用。在大型UPS中尝试进行非同步切换几乎一定会使下游变压器饱和，导致大电流，使保护设备动作。双转换式和Delta转换式UPS均必须对输入和输出波形进行同步。负载对频率并不敏感，因此如将双转换式UPS作为频率转换器工作，将会产生严重的风险（静态旁路保护缺失），而没有益处。

### Delta转换式UPS的蓄电池电压较高。大量蓄电池串联会降低蓄电池的可靠性，是一个安全问题。

多数大型双转换式UPS采用192到240个蓄电池单元串联，以实现384至528 V的额定开路电压。Symmetra MW Delta转换式UPS采用2个192单元的串，以中心抽头方式配置，形成总共384个单元串联，额定开路电压达到768 V。

直流母线电压的选择是一个设计参数，Delta转换式和双转换式UPS设计工程师均根据多项理由来选择蓄电池电压。选择较低的直流电压确实会使串联的单元数较少，但需要采用输入和输出变压器。这些串联设备会引入损耗（可显著增加大型系统的运行成本）和多种新的故障模式。选择+/- 384 V直流设计可以取消所有内部变压器，尽管在特定应用中需要隔离的情况下可以再加装。任何一种直流电源的可靠性都是客户的第二考虑；系统的可靠性更为重要。系统可靠性只有在对系统可靠性进行更大范围研究的条件下方可确定，且必须依靠分析方法（如本文档所述）或现场

历史数据。要确定某一种直流电压选择方案具备明显优势，所需要的绝不仅仅是简单地计算单元的数量。

当有不止一个蓄电池组并联时，此问题就需要讨论。单个蓄电池组的开路故障是最严重的故障模式，因为它使逆变器丧失所有直流电压。由于蓄电池仅在市电故障或严重超限时才放电，开路蓄电池单元故障通常会导致负载下降。并联蓄电池组会将这种故障模式的重要性降低到可忽略的水平。并联组排中的开路蓄电池单元故障会导致蓄电池维持时间缩短，但只要其余的蓄电池组可以支持负载运行到备用发电机开始运转，就不会有负载下降。不管关于串联的蓄电池单元数量有何可以讨论的价值，只要采用并联蓄电池组，这些就通常被视为无关紧要。

安全性问题经不起详细审查。所有大型蓄电池组都极其危险，因为它们不能被切断，会提供致命的电压，而且能够提供极大的故障电流。两种系统中的对地电势都大到足以造成人身伤害或死亡。国家和国际规范及标准对这两种设计没有区别。只要对地电势保持在 600 V 或更低水平，对两种设计的保护、构造和绝缘要求就完全相同。

### 蓄电池有中心抽头并连接至交流中性线。

Symmetra MW 蓄电池组确实采用中心抽头方式，并连接至交流中性线，但我们没有发现任何表明这样会造成安全威胁或以任何方式影响可靠性的证据。我们对其它大型 UPS 系统的分析需要有从相当数量的似是而非的电气故障（它们会导致关键组件级联故障）所引发的基本事件（故障模式）。我们对 APC 设计文档的审核表明，设计人员已预测到所有的似是而非的故障，并已成功证明其组件不会承受过大的应力。

### Delta 转换是一种新的未经验证的拓扑结构，不如双转换式可靠。

这种批评基于一种完全错误的认识，即“产品的可靠性会随着系统的年龄而自动增加”。历史和分析调研的结果都证明，可靠性是由设计、组件质量、加工质量以及维修质量所决定的。类似的系列产品的可靠性有时会随时间而增长的原因在于可靠性增长管理，在这种管理中，隐含于现场故障中的经验教训被用来消除已有系列产品的缺陷，并应用于新的设计中。除非完成了有效的现场升级，原始设备的可靠性将保持不变。

MTech 已研究了各种双转换式 UPS、Delta 转换、旋转式 UPS、燃料电池以及其它更特异的设计。我们从未遇到过一种显然优于其它所有类型的 UPS 拓扑。我们已经认识到，系统体系结构在模块性和冗余性等方面的特性对可靠性所起的作用要远远大于基本电路拓扑。加工质量、操作人员界面以及现场服务政策起着同等重要的作用。Delta 转换在线式拓扑本身可靠性与双转换式并无明显差别。

### Delta 转换比双转换更为复杂，会降低可靠性。

此观点基于“较多零件会导致较多故障”的简单化概念。但如果真是这样，则 N+1 式系统将比不上非冗余的替代系统。采用冗余实现高可靠性的事实证明，决定系统可靠性的是部件的添加方式而非单纯的部件数量。

Delta 转换器的功能组件确实比双转换式 UPS 要多。但所有大型 UPS 均有静态旁路，用于在大多数 UPS 故障期间保持对关键负载的安全供电。并联静态旁路开关的使用会大大降低功率回路中组件数量的重要性。此外，由多个功率模块实现的故障容忍能力意味着组件故障不需要导致静态旁路动作。这一优势不仅局限于 Delta 转换；模块化设计将使许多电路拓扑具有这样的优点。

### Delta 转换式主逆变器不使用变压器，且负载与蓄电池之间没有隔离。

在必要或适合时，可以在系统上加装隔离变压器。多数竞争性产品中采用隔离变压器是所选直流电压过低、无法直接转换为适当的交流电平的结果。这种观点试图从必要性方面加以论证，但现实中任何一种电路拓扑均可选择是否采用隔离变压器。

## Delta转换由于采用两个逆变器，将导致蓄电池更为频繁地放电，并造成直流线路上更大的波动，从而缩短蓄电池寿命。

每次放电都会缩短蓄电池寿命。深度放电则更为有害。Delta转换在线方式会自动提供以超限交流输入电压运行而不使蓄电池放电的一定限度的能力。电压容差由设计人员在选择Delta变压器特性和直流线路电压时进行设置。双转换式UPS的设计者经常在输入整流器中采用降压或升压变换器功能，以便实现同样的降低蓄电池放电频度的能力。在任何一种情况下，参数都是由设计师进行选择，而他们必须向管理层乃至最终向市场证明其选择的正确性。任何一种拓扑在交流输入电压范围和蓄电池放电方面均没有明显的优势。直流线路电压以及电流波动的问题同样由两种电路中的电感器、电容器以及设计方式来控制。

## Delta转换由于无法实现频率转换，故无法与发电机兼容。

如前文所述，采用双转换式UPS实现频率转换在风险和可靠性方面是很差的选择，因为它将禁用或许是大型UPS中最重要的保护组件，即静态旁路开关。现代的数据中心负载对于任何合理的频率变化并不敏感，要求频率转换并无依据。Delta变换器在几乎任何工作条件下均可提供统一功率因数和低谐波的能力在采用发电机运行方面具有显著的优势。几乎所有发电机在切换至前导型功率因数负载运行时均会出现非常严重的故障模式，即自激。自激会导致控制发电机输出电压的能力缺失。现代的数据中心负载经常会有稍微前导的功率因数，而某些双转换式UPS在轻载下也会以很大的前导功率因数运行。这些系统必须与发电机进行谨慎的集成，以避免自激和关键负载下降。采用Delta转换式产品的系统则不会涉及这种特定的问题。

## 逆变器采用kW额定值，必须进行超选型方可应对实际负载。

两类UPS的有功功率（kW）、无功功率（kVAR）和视在功率（kVA）容量均由设计工程师确定。双转换式和Delta转换在线式系统均可设计成视在功率大于或等于有功功率额定值。kVA额定值大于kW额定值的设计中通常包括无功功率源。将发电机切换至具有无功功率源的设备运行将可能导致自激和电压控制缺失。APC将Symmetra MW设计为具有相等的有功和无功功率额定值，但这只是一种选择，而并非Delta转换在线的必要条件。

## Delta转换在线式所宣称的高效率并不真实；双转换式在实际负载下效率更高。

这是一种事实存在的说法，可以通过简单的测试加以佐证或反驳。Delta转换仅让部分能量流接受硅功率晶体管的转换，而双转换式中的所有能量流均被转换两次，这一事实表明，Delta转换式拓扑在本质上效率更高。当然APC与其竞争对手的效率宣传均支持Delta转换在线式效率更高的观点。

## Delta转换在线式不能应对非线性负载，它们会导致输出电压波形出现大的失真。

两种设计均采用硅功率晶体管合成得出接近纯正弦的电压波形。两种设计中的功率晶体管的额定值选择均按照在最大额定功率下连续运行而选择。任何一种逆变器对非线性负载响应的任何差异均由负责测量输出和控制晶体管的电路的设计来决定。任何一种设计在本质上都不容易受电压失真的影响。

## 附录 B: 负载故障和协调 故障

有许多可能的故障模式可以被包含在故障树中，但实际却没有。我们对于其它大型UPS（特别是采用几个三相模块并联运行的大型UPS）的分析中已考虑一个模块内的负载故障或组件故障导致系统故障的可能性。通常这源自于熔断器与断路器之间协调不佳，使得一个模块内的短路会导致若干模块（有时还包括静态旁路）的断路器或熔断器开路。我们对Symmetra MW进行了审核，发现其工程师们已经加入了特别的准备，使这些故障模式难以出现，多数是要求同时发生的故障，而非一个故障会导致下一个故障发生的级联情况。

熔断器与断路器协调对于UPS在技术上通常有很大难度，对于大型UPS更是如此。当若干大型模块并联运行时，确保保护设备正确协调的目标可以被证明十分困难甚至根本不可能实现。协调意味着最靠近故障处的设备最先动作，而上游设备仅在首个设备未能清除故障时才动作。

许多大型UPS的设计基本上采取多套完整的UPS产品并联运行的方式。这些设备通常最初并非针对并联运行而设计。每台UPS均有其自己的输入和输出断路器、内部熔断器以及其它保护功能。针对并联运行的附加要求，特别是关于保护设备的响应协调方面，可能会与单台UPS的要求相冲突。

Symmetra MW设计以两种完全不同的方式降低了协调故障的可能性。第一也是最重要的一种就是，设计者考虑了系统每一部分内的故障电流和影响，包括输入、输出、功率模块、直流母线、交流滤波器以及外部旁路回路。他们采用了应用高速熔断器的策略，此类断路器预期仅在有很大故障电流的短路期间动作。每个熔断器均可无限期传导数倍于其正常工作电流的电流值。以这种方式运行熔断器将使热损耗非常小，因此，与长期温度相关的熔断器降级应可忽略。这种在设计阶段对并联运行细节的关注可消除许多潜在的故障模式。

Symmetra MW设计中降低熔断器和协调故障机率的第二方面是功率模块规格相对较小。有一个67 kW模块内出现故障的1 MW系统（5个段，每段200 kW）将有4个模块对发生故障的模块供电。发生故障的模块内的熔断器所传导的电流将是正常模块内的4倍，它将首先动作。相比之下，在由2个500 kW模块组成的1 MW系统中，故障模块和正常模块中熔断器的电流相等。正常工作模块中的熔断器很有可能在故障模块之前发生断路。即使故障模块的熔断器首先断路，正常模块内的熔断器也可能降级，并且在未来也有可能因为传导故障电流而产生伪动作的情况。控制系统要正确辨识哪个模块故障也要困难得多。许多并联式UPS设计在每次模块故障时都必须切换至旁路，依靠本地市电可提供的较大的故障电流来使保护设备动作。

附录 C:  
故障树模型

图 C1  
Symmetra MW 800 kW 负载

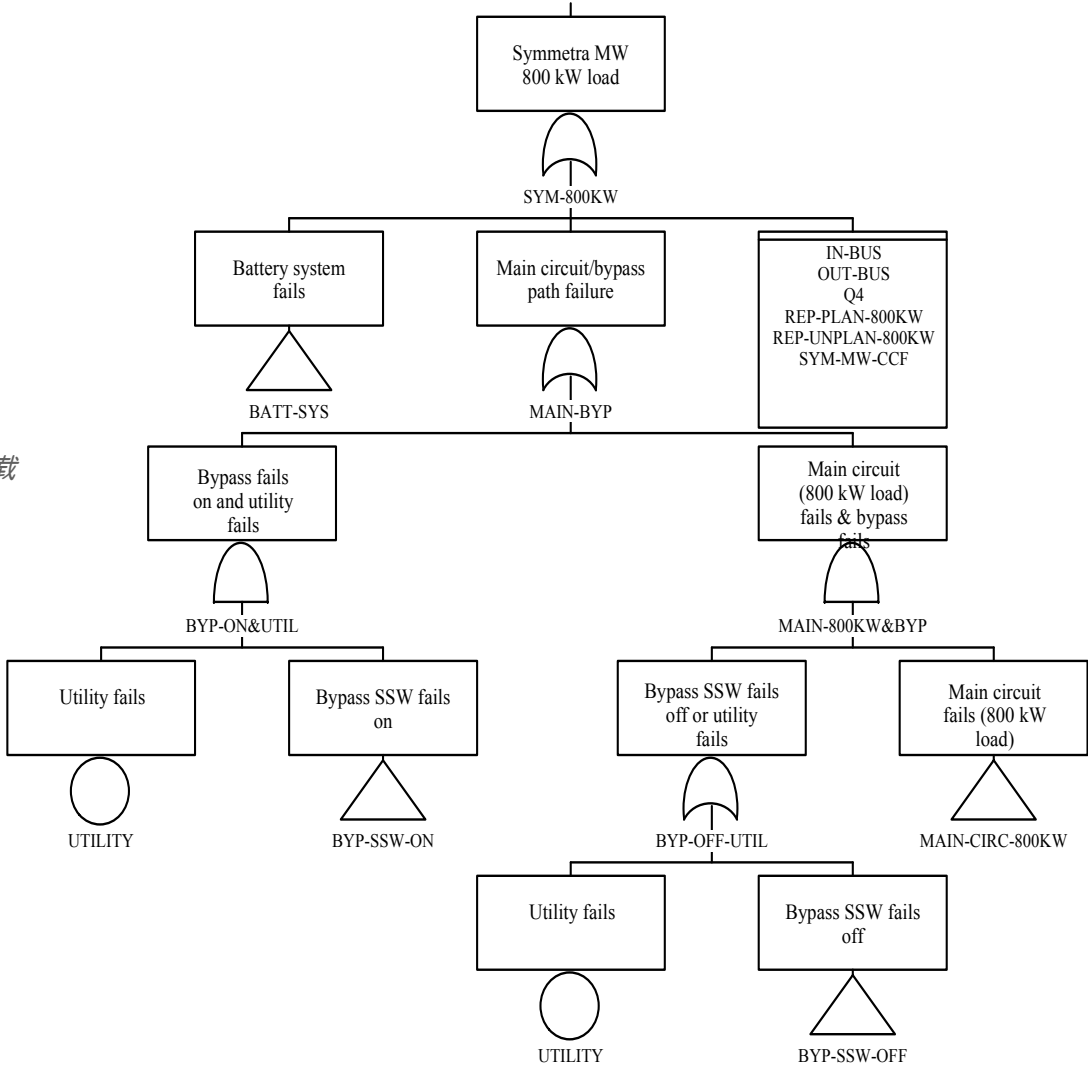




图 C2 Symmetra MW 1MW 负载

