

60至80年设计寿命要求对核电站应急柴油发电机的影响

David B. Hedrick

卡特彼勒公司电力部
核电站应急柴油发电机.

摘要

本文将深入探讨寿命较长的核电站 (NPP) 的发展演变对用于为全厂断电 (SBO) 提供电力支持的应急柴油发电机 (EDG) 的影响。将应急柴油发电机的寿命从最初40年的设计寿命基础延长到目前长达80年的反应堆设计寿命基础, 将给业主带来诸多挑战。我们对相关问题进行了分析探讨, 同时确保现有的应急柴油发电机随时可用。我们可以从当前的监管趋势、福岛地震和洪水后提出的各项新要求以及业主应主动解决的诸多独有问题中学到很多东西。

本文将在以下章节中分析探讨解决当前和未来特定挑战的可行解决方案:

- 延长核电站寿命的相关背景信息
- 应急发电机设备由此面临的挑战
- 应对这些挑战的三大方法
- 这些理论的考量点和优缺点
- 结论/建议

引言

现有核电站 (NPP) 的设计寿命为30至40年。这些现有核电站,有的已经完成20至30年的设计寿命延长,有的则正在考虑进行设计寿命延长(亦为20至30年)。

建造新型核电站的运营商要求核电站的设计寿命达到60至80年,并期望可延长设计寿命。如果考虑到为全厂断电 (SBO) 提供电力支持的应急柴油发电机 (EDG),即EDG/SBO,可能在核电站上线几年前就已建成,且需要在停运阶段保持随时可用,那么核电站的EDG/SBO的设计寿命则应达到70至90年。这能做到吗?能现实吗?你能确保其在最后10年的设计寿命期间的可靠性吗?这漫长的10年给EDG/SBO的现有业主/运营商带来了诸多挑战,也是我们所有人未来都将面临的挑战。我们来仔细研究一下现在的情况。

首先,让我们看看所谓的“浴缸曲线”,它说明了产品可靠性随时间的增减情况。下一页图1中的蓝色部分为第一部分,为递减早期/早夭期失效率。橙色部分为第二部分,为随时间变化的恒定失效率或偶然失效率。绿色部分为第三部分,为与寿命相关的失效率或耗损失效率。将这三种失效率结合起来,就会得到观测到的失效率(紫色),因这类图表形似浴缸的横截面,因此得名“浴缸曲线”。核应用程序会生成一个概率失效模型,以确定可接受或允许的失效率估测值,如红色所示。

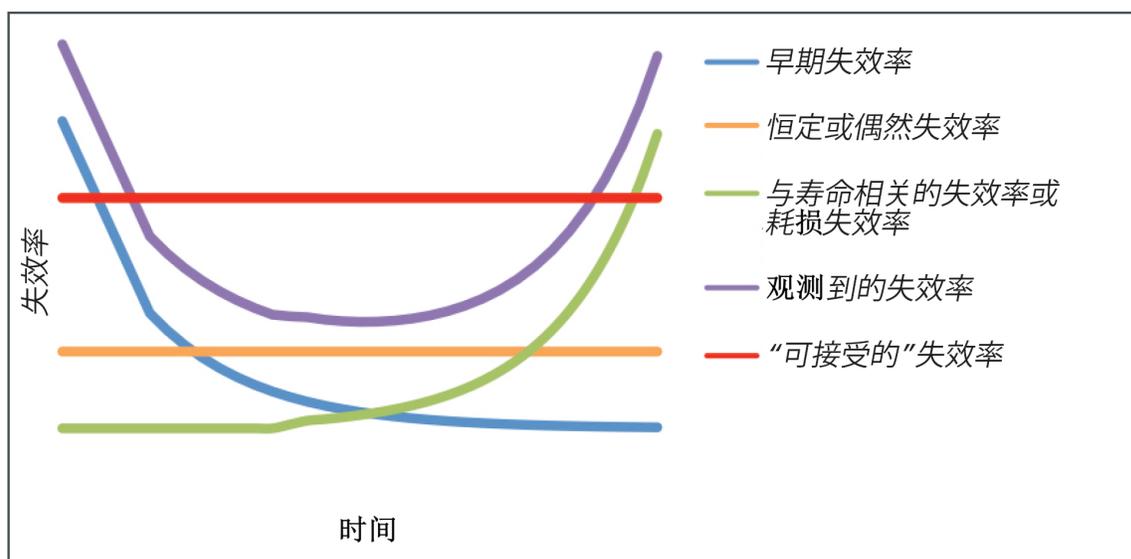


图1: 产品可靠性浴缸曲线

为解决和降低新的核项目中的早期失效率,我们投入了大量时间和精力。例如,多道质量检查、大量验证和广泛测试,这些都是我们为降低这些类型的早期失效率而作出的努力。

然而,本文的重点在曲线的末端,在那里,观测到的失效率接近可接受水平。本文稍后将对核电站运营商就应急柴油发电机系统日益增加的不可靠性和寿命结束问题制定的计划或长期资产管理方案进行探讨。在未来某一天,所谓的可靠性将会超过我们认为的可以接受的极限。在那之前,运营商会怎么做?我们来看看运营商会考虑采取哪些应对措施。

对于寿命为70到90年且可靠性仍在可接受范围内的EDG/SBO来说,有三种应对措施可供选择,且可为其制定计划并落实计划。第一种措施(对运营商和发电机组制造商而言)是尽量使机组在整个设计寿命内保持正常运行。第二种措施是在未来某一天(也许在寿命中期)更换新机组。第三种措施是在现有基础设施的基础上加入全新的柴油发动机驱动系统,以补充原有机组。我们来深入探讨一下这三种措施的利与弊。

保持现有机组正常运行

老化是不可避免的，确保发电机组始终处于良好的运行状态是一项十分艰巨的任务。这种方法需要每隔一段时间（特定时间）主动进行常规和预测性维护，将实际可靠性保持在可以接受的范围内。这可以通过更新、更换、升级和改进发电机组系统中的特定部件来实现。以普雷里岛的核电站为例，卡特彼勒目前仍在为其在20世纪70年代制造的Cat® D399发动机提供部件。有时，也可能对重新设计的部件进行升级。

这种方法的一个优点是初始投资仍然处于随时可用的状态。可以对部件改进进行验证，并将其整合到现有机组中。运营商能够遵循既定的现有流程和程序。

但是这种方法也面临一些挑战，老旧核电站的运营商可以证实这一点，如设备老化、供应问题和使整个系统的可靠性保持在可接受的范围内。

随着时间的推移，许多公司和供应商都发生了变化，其中一些供应商或子供应商已经倒闭。毫无疑问，这使得获得合格部件的问题变得更加复杂，且这一问题以后会继续存在。不过，一些核电站运营商和第三方供应商在逆向工程设计和寻找新的供应商方面已经变得十分富有创造性。即便如此，情况也不会随着时间的推移而好转。只会变得更糟，且会逐渐成为一种代价高昂的方法。

保持现有EDG/SBO正常运行所面临的另一个问题是，一些国家要求只有在规定时间范围内完成实际工作后，才能要求按规定启动反应堆关闭。然而，随着设备的日益老化，往往有更多工作要做，在某些情况下，如果没有得到特别许可或关闭反应堆，就没有足够的时间来完成实际工作。

一些核电站运营商不得不考虑加入新的摆动式柴油机，以便有足够的时间为现有老旧EDG/SBO进行必要的维护。这个解决方案可以解决时间问题，但成本不菲，而且运营商仍需要解决保持发电机组正常运行这一当前问题。

另一点要考虑的是保持机组正常运行所需的累计成本。虽然订购单个部件成本不大，但如果在核电站停运前始终使用该解决方案，其累计成本可能会接近或超出其他措施。

就地更换设备

我们将探讨的下一个措施是将主要设备全部拆除，并代之以新的EDG/SBO。更换新设备可使运营商免受老旧设备或供应商问题的困扰。新设备符合新出或更新法规，或新建发电站的要求，如可为应急负载提供更多电力。如果新的电力需求使得设备无法适应现有发电站的可用空间，就会出现这个问题，但通常不会出现这种情况，因为近年来大多数先进EDG/SBO的功率密度（千瓦每平方米）已得到大幅提升。

该措施的缺点大多集中在执行该措施所需的时间上。更换设备时，是否必须关闭核电站？换料大都可可在几周内完成。但若是拆卸和更换设备，时间则确实不够。

可以在长时间停机期间更换设备，如在CANDU设计的反应堆的中期核电站翻新项目（有多个项目是为了延长核电站的寿命）执行期间。

例如，阿根廷的Embalse发电站用的就是这种方法，运营商将现有设备拆除，然后用升级系统取而代之。



图2

下面我们来探讨一些适用于特定核电站的其他几种措施。如果在核电站运行期间有足够的冗余来替代发电机，那就太好了。但如果没有冗余，运营商可以在拆卸、安装、调试和移交新设备时使用便携式备用发电机。

卡特彼勒在英国某核电站进行的一个项目采用的就是这种方法。两个充电式柴油发电机组中的一个机组发生了致命故障。现场的应急移动设备作为备用电源，提供了电力。运营商借此机会提高了技术要求——特别是洪水和地震标准（鉴于福岛核事故），并进行了投标，然后选择了一种基于卡特彼勒的解决方案来现场替换现有应急柴油发电机。

新建EDG/SBO 站增补现有核电站

最后一个措施是为升级的EDG/SBO增添新站。CANDU反应堆的应急电力系统（EPS）是其中一个实例。

CANDU EPS系统旨在为CANDU反应堆单元提供在正常运行和发生故障的条件下执行所有安全功能所需的电力。在加强型新站中，设有两台通过地震测试的冗余备用发电机、多块电池和一台配电装置。

另一个实例是捷克共和国的两个核电站所采用的模块化程度更高的方法。与较传统的永久性砖瓦加水泥土木结构相比，该模块化方法可缩短交付时间并降低成本。

该措施有以下优点和缺点：新设备可以缓解老旧设备或供应商问题，同时提高可靠性。可从零开始，重新设计核电站，并将最新的EDG/SBO策略纳入其中。在设备选择和建筑设计方面，可以结合经验教训、新发布的规章制度和要求。其中包括新发布的地震和洪水要求。

此外，施工期间，核电站也可以正常运行。唯一需要关闭核电站的时候是其最终接入现有系统时，这通常可以在预定的加料时间内完成。使用模块化方法可以缩短从概念到安装再到最终交付的时间。

该方法的唯一一个是空间问题。一些核电站的反应堆周围没有足够的理想空间来安装新系统和兴建新站。必须在设计修改整体方案中创建新的程序和流程。此外，与任何新系统或设计一样，还须考虑进行人员培训。虽然每种措施都需要成本，但该措施所需的成本最高，但是是一次性的。从长远角度看，对成本和可靠性而言，这种一次性成本是合理的。



图3

三种措施对比

从目前运营的核电站来看，每种措施都是有是利有弊。有人可能倾向于保持现有EDG/SBO正常运行，因为这似乎是成本最低的选择。核电站可以选择维持现状，然后用新部件替换旧部件，以确保一切正常运转。然而，由于成本和可靠性之间的平衡会随着时间的推移而变化，来自内部和外部的因素可能会驱劝业主深入考量其他两种措施。我们来看一看每种措施所需的成本。

估算某一年每种措施的成本可能会使某些措施的成本过高。假定现有发电机组的维护费用将随着时间的推移而增加。

各种措施从最高单年成本到最低单年成本排序如下：

1. 新建—传统建筑
2. 就地更换
3. 新建—模块化更换
4. 摆动式柴油机

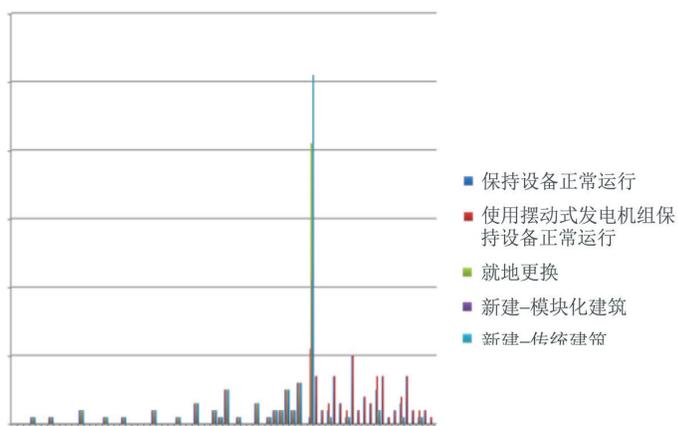


图4

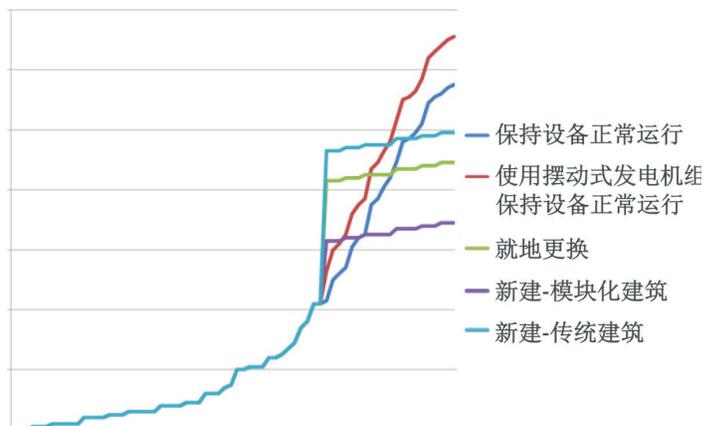


图5

但是，如果看一下累计成本，情况就有些不同了。在某个时间点，维护现有设备所需的累计成本会超过更换设备的累计成本。从长远角度，摆动式柴油机实际上是各种措施中最昂贵一种。这并不奇怪，因为它实际上只解决了时间问题，然而这是有代价的。模块化方法的累计成本较低，且超过“保持设备正常运行”线的时间较短，如下图所示。

我们来回顾一下可靠性浴缸曲线。同样，为了便于说明，浴缸曲线在初始阶段呈下降趋势，寿命成熟阶段呈平稳状态，在寿命结束阶段呈上升趋势。

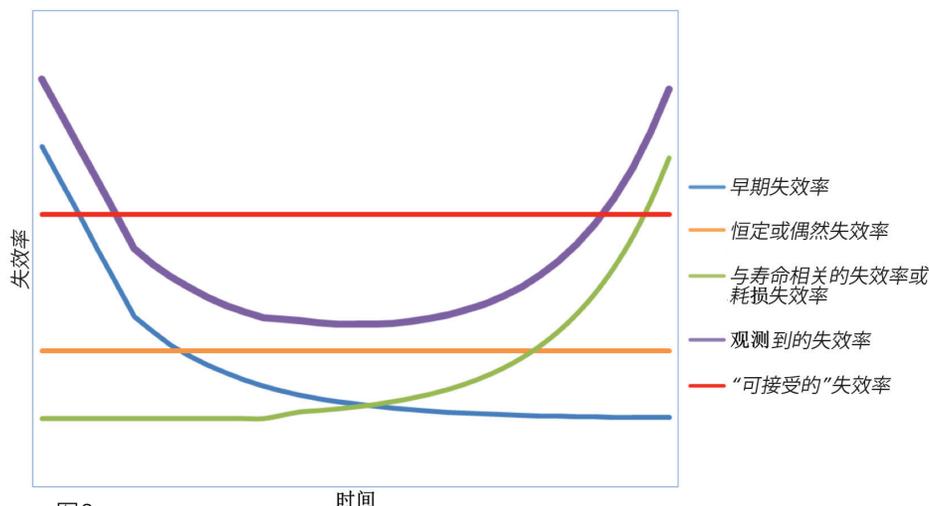


图6

在核电站选择更换发电机组的情况下，可靠性浴缸曲线将并排堆叠。

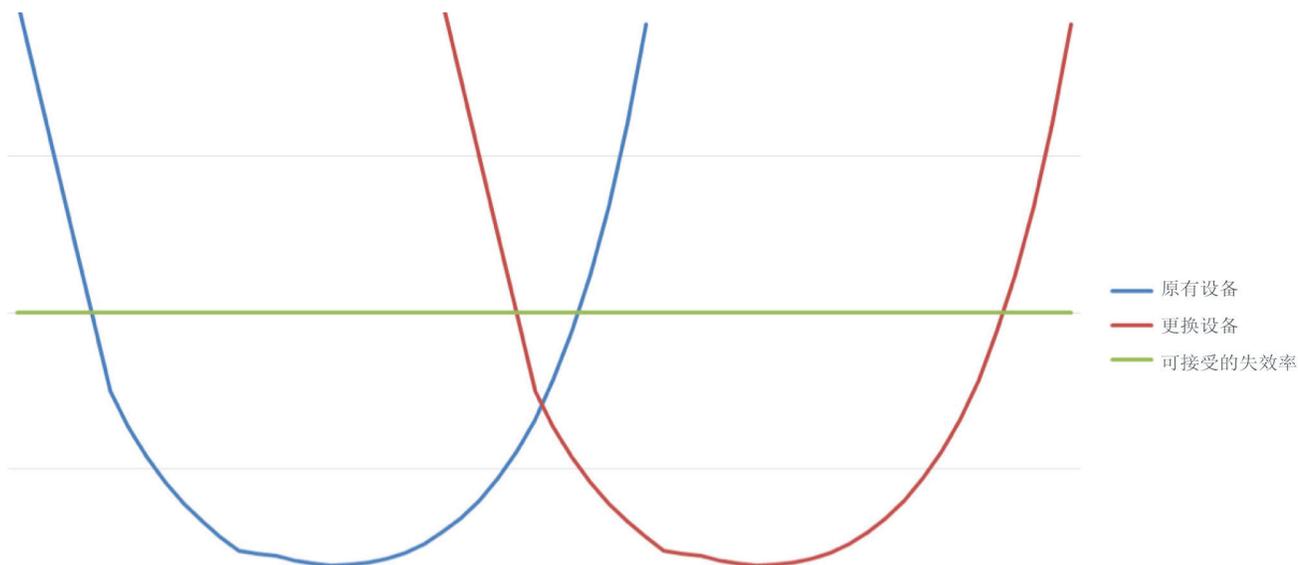


图7

如您所见，用新设备替换现有设备和在可接受的失效率下长期保持可靠性是最明智的选择。

结论与建议

获得部件有多难？当前的EDG/SBO的可靠性如何？预计未来的发展趋势如何？您的供应商体系的状况如何？新法规是否强制要求执行新要求？发电站预计运营多长时间？这些只是引导核电站运营商深入考量采用哪种措施（维护现有设备、就地更换、建造新建筑或采用模块化方法）的众多因素的一部分。

每个正在运营的核电站都需要对维护成本、对可靠性的影响、供应商状况和更换设备所带来的影响不断进行分析。当更换部件在成本或可靠性方面有意义或在两方面均有意义时，就会出现一个临界点。运营商的主要工作就是确定这个临界点是否会在核电站的使用期限内出现。

当前对柴油发电机组至少运行60至80年的设计预期只会增加临界点在这一运行窗口期出现的几率。可靠性的降低和保持设备正常运行成本的增加将促使运营商寻求各种方法来应对这两个问题。

主动规划是领先于浴缸曲线的关键一环，不仅对现有核电站来说是如此，对未来的核电站而言也是一种设计依据。设计可轻松更换设备的建筑，或者为未来施工预留出空间（包括接入现有系统所需的的空间），可以在未来节约一些成本。

卡特彼勒，全球实干家的强大伙伴

LCXE1193-00 2015 年9月

© 2019 Caterpillar。保留所有权利。CAT、CATERPILLAR、LET'S DO THE WORK 及其相应的徽标、“Caterpillar Yellow”、“Power Edge”和“Cat Modern Hex”商业外观以及本文所使用的企业和产品标识是 Caterpillar 的商标，未经许可，不得使用。

CATERPILLAR[®]