

全寿命周期成本分析方法在电网黑启动设计规划中的应用

靳希¹, 陆哲敏²

(1.上海电力学院, 上海 200090; 2.上海送变电工程公司, 上海 200235)

摘要: 电网一旦崩溃, 所造成的后果将是灾难性的, 因此, 进行电网灾变后的紧急恢复即黑启动非常必要。本文介绍了电网黑启动的定义, 并应用全寿命周期成本 (LCC) 的分析方法, 通过引用 LCC 在电力系统中的计算模型和计算方法, 对两种事故启动电源配置方案进行比较, 并对多种因素进行灵敏度分析。提出 LCC 在黑启动应用中的意见和建议, 为下一阶段的研究提供参考。

关键词: 黑启动; 全寿命周期成本分析; 灵敏度; 风险性

0 引言

自 2003 年震惊世界的“8.14”美加大停电发生以来, 大停电事故给大城市的电网安全乃至社会稳定敲响了警钟, 互联电网并非坚不可摧, 而且一旦电网崩溃, 由于电网结构的紧密性和负荷的集中性, 所造成的后果将是灾难性的, 因此, 进行电网灾变后的紧急恢复即黑启动非常必要。对于黑启动方案的制定来说, 选择最低的初期投资显然是不合适的, 因为运行、维护、及设备失效引起的成本往往是初购买成本的好几倍。全寿命周期成本分析是从设备/项目的长期经济效益出发, 全面考虑设备/项目或系统的规划、设计、制造、购置、安装、运行、维修、改造、更新、直至报废的全过程, 使全寿命周期成本 (Life Cycle Cost, 简称 LCC) 最小的一种分析理念和方法。其核心内容是对设备/项目或系统的全寿命周期成本进行分析, 并进行决策。在黑启动方案的设计中, 采用全寿命周期成本进行综合分析比较, 对厂址的选择、蒸汽循环和蒸汽参数的选择、燃料的选用的进行优化, 能有效的降低制造/建造成本, 提高投资效益, 为项目建成后的长期安全经济运行打下良好的基础。

1 LCC 在电力系统中的模型

1.1 LCC 的常用计算方法

为了便于比较各种方案, LCC 的分析结果通常是以净现值法来表示。

(1) 净现值(NPV, Net Present Value)

由于工程或项目的投入和产出往往有延迟性, 故 NPV 不仅考虑了资金的时间价值, 也建立了工

程中投入产出在财务上的联系。

NPV 的定义式为^[2]:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF}{(1+r)^t} \quad (1-1)$$

式中 r ——折扣率;

t ——计算年限。

由式 (1-1) 可见, 往往要考虑各项市场因素, 如涨价、市场风险等, 实际上也反映了资本成本。

NPV 方法反映了下列 3 个指标:

- 1) 投资回收年限;
- 2) 项目的风险性, 成本回收年限越长, 风险越大;
- 3) 投资收益率。

NPV 是负值, 说明投资收益是负值, 项目不可取。NPV 是正值, 且 NPV 值越大, 说明投资收益率越高。

(2) 净现金流(NCF, Net Cash Flow), 作为一个企业效益评价指标, 最直接地反映了财务运转的情况。因而, 现金流不仅用于财务报表, 也常用于工程实践的分析中。

对于电力行业的 LCC 分析计算, 现金流主要考虑用于生产经营目的中发生的现金。如总收入减总支出, 再考虑利率和年份。在电力系统 LCC 分析中, NCF 是广义的, 它将各种可能发生的故障情况也反映在现金流上, 因而, LCC 最终是以现金流来表述的。

1.2 电力系统中 LCC 的成本分析模型

电力系统的全寿命周期成本分析是在可靠性的基础上使设备或系统的全寿命周期拥有成本为最低的管理。在设备采购中, 不仅仅是考虑设备的购买价格, 而更要考虑设备在整个全寿命周期内的支持成本, 包括安装、运行、维修、改造、更新直至报废的全过程, 其核心内容是对设备或系统的 LCC 进行分析计算, 以量化值进行决策。主要应用以下计算模型:

$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD$$

CI: 投入成本

CO: 运行成本
 CM: 维护成本
 CF: 故障成本
 CD: 废弃成本

2 LCC 在燃机事故启动电源配置方案的经济分析上的应用

在缺乏水电机组的情况下，上海电网首次采用燃气轮机 GE 9E 作为黑启动电源。并对闸电燃气轮机电厂燃机启动电源的配置方案的研究。

由于涉及到闸北发电厂的启动锅炉，Solar 公司 C50 燃机、闸电燃气轮机电厂的备用柴油发电机组，以及蒸汽负荷、天然气价格、电价、蒸汽价格等多个敏感性因素，部分设备的运行维护成本远高于设备初投资，因此，必须应用全寿命周期成本效益分析法进行分析。

2.1 两种方案

(1) 闸电燃机电厂高速柴发并车运行方案：

采用 2 台美国卡特彼勒公司 3516B 柴油发电机（2000kW/2500kVA）并车运行作为 9E 燃机事故启动电源。高速柴发接入电厂的 6kV 厂用电系统。当电网全黑时，首先启动 2 台高速柴发和交流轻油泵，然后再启动大型 9E 机组。

(2) 闸北发电厂燃气轮机热电联供方案：采用柴油发电机启动的 2 套单机容量为 4600kW 的 C50 小型燃气轮机作为 9E 燃机事故启动电源。当电网全黑时，首先启动小型高速柴发和直流油泵，提供 400V 厂用电和燃机用轻油，再启动 C50 燃气轮机，在 C50 启动成功后再启动大型 9E 机组。

蒸汽负荷是闸北发电厂和闸电燃气轮机电厂所必须的，因此在对闸北发电厂小型燃机热电联供作全寿命周期成本效益分析中，还需要考虑以下情况：C50 机组带余热补燃锅炉不仅能够满足黑启动的要求，而且还能供电供气，满足两厂的蒸汽负荷需要。对于闸北发电厂来说，从 2008 年开始，预计可以逐步开发外界的蒸汽用户。假定 2008—2009 年闸北发电厂能够找到一定的蒸汽用户，在满足自身 27 吨蒸汽负荷情况下，将剩余的 36—27=9 吨外供，分别计算满供 9 吨蒸汽时间为 2 小时、10 小时、24 小时的情况。

2.2 两种方案的 LCC 计算

假定各工程于 2005 年开工建设，2006 年初正式投入运行，全寿命周期成本、效益的计算时间跨度为 20 年。平均筹资成本率，在此为广义成本，考虑银行利率、涨价因素、筹资风险后，参照设计院 5.76%，取值为 6%。

(1) 闸电燃机电厂高速柴发并机运行方案
 全寿命周期成本=投资+燃料成本+维护成本
 全寿命周期效益=政府补贴+设备残值

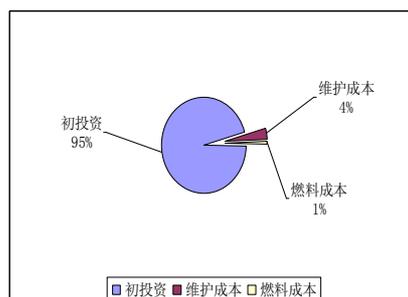


图 2-1 全寿命周期成本构成

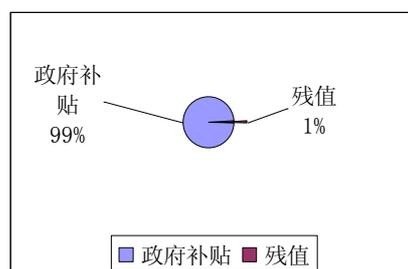


图 2-2 全寿命周期收益构成

高速柴发并机运行的全寿命周期成本为 1214 万元，全寿命周期收益为 1626 万元，其中政府补贴是收益的主要来源，全寿命周期利润为 411 万元。

高速柴发并机运行的全寿命周期成本比重中最大的是初投资成本，占 95%，其次是维护成本占 4%，而燃料成本仅占 1%。而从图 2-2 可以看出，全寿命周期收益中来自政府补贴占到了 99%。

(2) 闸北发电厂燃气轮机热电联供方案

1) C50 燃机+余热锅炉的全寿命周期成本效益分析计算：

$$\begin{aligned} \text{全寿命周期成本} &= \text{投资} + \text{人工成本} + \\ &\quad \text{天然气燃料成本} + \text{柴油成本} + \\ &\quad \text{备品备件} + \text{维修} \\ \text{全寿命周期效益} &= \text{售电收入} + \text{蒸汽收入} + \\ &\quad \text{设备残值} \end{aligned}$$

本方案的全寿命周期收益为设备残值、蒸汽收入与售电收入之和，折算到 2005 的现值共 16133 万元，全寿命周期利润为 -6897 万元。

2) 启动锅炉全寿命周期成本效益计算

$$\begin{aligned} \text{全寿命周期成本} &= \text{人工成本} + \text{燃料成本} + \\ &\quad \text{用电成本} + \text{维护成本} \end{aligned}$$

$$\text{全寿命周期效益} = \text{蒸汽收入} + \text{设备残值}$$

启动锅炉的全寿命周期的成本和收益折算到 2005 年的现值分别为 500 万元和 456 万元，全寿命周期利润为 -44 万元。

3) 新运行方式下全寿命周期成本效益构成

综合 C50 燃机+余热锅炉的全生命周期成本效益以及提供尖峰蒸汽负荷的一台启动锅炉的全生命周期成本效益，可以看出：

新运行方式下 C50 燃机+余热锅炉的全寿命周期利润总计 -6941 万元。其中，全寿命周期成本包括，C50 燃机热电联供的初投资、C50 和启动锅炉的检修成本、倍频备件、燃料费用、人工成本等，折算到 2005 年的年值为 23529 万元；全寿命周期收益由蒸汽收入、售电收入和残值收益三部分组成，折算到 2005 年的年值为 16588 万元。

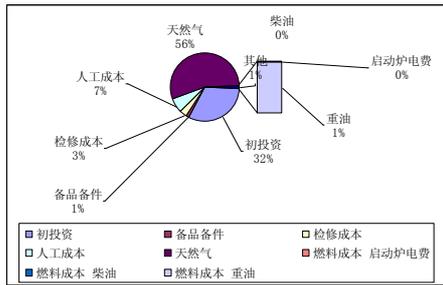


图 2-3 新运行方式下的全寿命周期成本构成

图 2-3 展示了各部分成本在全寿命周期成本（折算到 2005 年的现值）中的比例。图中可以看出，新运行方式下全寿命周期成本中，比重最大的是天然气费用，占总成本的 56%；其次是投资成本，占 32%；再次是人工成本，占 7%；其余如维修费用、倍频备件费用所占比例很低，重油费用、柴油费用和启动炉电费所占比例极低。

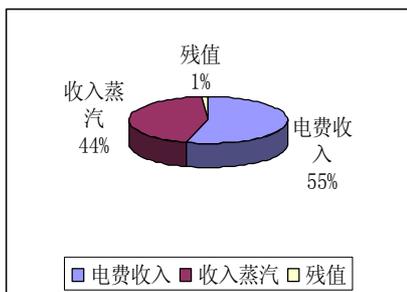


图 2-4 新运行方式下的全寿命周期效益构成

图 2-4 展示了各部分收益在全寿命周期收益（折算到 2005 年的现值）中的比重。图中可以看出，新运行方式下的全寿命周期收益中，比重最大的是电费收入，占总收益的 55%，其次是蒸汽收入，占总收益的 44%，而残值所占的比例可以忽略不计。

4) 不同蒸汽负荷下的全寿命周期利润

C50 燃机热电联供方案在无外部蒸汽负荷及三种不同蒸汽负荷下的全寿命周期利润如图 2-5 所示。

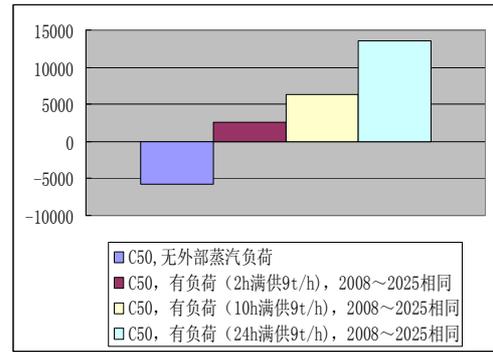


图 2-5 C50 燃机热电联供在不同蒸汽负荷下的全寿命周期利润

2.3 结论

当运用 LCC 的分析方法来计算项目的利润时，一定数量、稳定的蒸汽负荷是闸北发电厂 C50 燃机热电联供方案盈利的重要保证。在 20 年的运行过程中，相对启动锅炉继续运行，闸北发电厂 C50 燃机热电联供方案在有一定数量、稳定的外部蒸汽负荷情况下，具有较好的经济性。在 1.90 元/Nm³ 天然气价格、2014 元/吨重油价格、0.55 元/kWh 上网电价、2008 年后年蒸汽量 15.6 万吨的条件下，闸北发电厂 Solar C50 燃机热电联供方案的全寿命周期利润在不包括外部供热管道建设费用和供热管网损失的情况下为 14580 万元；当缺少外部蒸汽负荷时，将出现 5699 万元的亏损。

而闸电燃气轮机电厂的高速柴发并机运行方案虽然全寿命周期利润达到 411 万元，但其绝大部分全寿命周期收益来自政府补贴，常年处于备用状态，设备的利用率不高，不能最大化的资源利用。

表 2-1 闸北发电厂和闸电燃气轮机电厂两种方案的经济性比较

单位：万元		
	闸北发电厂 C50 方案	闸电燃气轮机电厂 2 台高速柴发方案
初投资	7481	1156
全寿命周期利润	-5699~14580	411

3 灵敏度分析

3.1 平均筹资成本率灵敏度分析

闸电燃气轮机电厂的全寿命周期利润随平均筹资成本率的上升而呈近线性方式下降，体现了闸电燃气轮机电厂的成本主要是前期的初投资，其收益是在后期的政府补贴中获得，在政府补贴年金相同的情况下，平均筹资成本率越高，未来年金折现

到 2005 年的数值就越低。闸北发电厂 C50 燃机热电联供方案的全寿命周期利润随平均筹资成本率的上升而呈近线性方式下降，这主要是因为闸北发电厂的收益主要是在其后期的售电和售汽收入情况下，平均筹资成本率越高，折现的数值就越低。而且如果能有足够的外部蒸汽负荷上述平均筹资成本率的变动范围内都将盈利，蒸汽负荷越大，盈利越多。

两种方案受平均筹资成本率变化的影响都很大。但在 C50 燃机热电联供方案能有足够外部蒸汽的情况下，其承受平均筹资成本率的风险能力要明显强于高速柴发并机运行方案。

3.2 天然气价格敏感性分析

关于天然气价格，在前面计算中 2010 年前取 1.90 元/Nm³，2010 年后取 1.24 元/Nm³。考虑到气价的不定因素和届时气源的多样性，在敏感性分析中把上述气价作为基准值，而后在其上分别下浮 10%和上涨 10%后代入计算模型，分别计算出闸北发电厂采用 C50 燃机热电联供方案的全寿命周期利润。

闸北发电厂 C50 燃机热电联供方案的全寿命周期利润随天然气价格的上升而呈线性下降，燃料成本对全寿命周期利润影响明显。如果有足够的外部蒸汽负荷，则 C50 燃机热电联供方案在计算的天然气价格变动范围内均有几千万元的盈利，外部蒸汽负荷足够大时则有近 1.8 亿元的盈利。

3.3 蒸汽价格的敏感性分析

将蒸汽价格 135 元/吨、155 元/吨、202 元/吨(上海电力设计院在闸北发电厂燃气轮机热电联供工程方案设想中选用的蒸汽价格)代入计算模型，分别计算闸北发电厂采用 C50 燃机热电联供方案的全寿命周期利润。

闸北发电厂 C50 燃机热电联供方案的全寿命周期利润随蒸汽价格的上升呈近线性上升，蒸汽价格直接影响着蒸汽收入。如果没有外部蒸汽负荷，C50 燃机热电联供方案在上述售气价格的变动范围内至少造成 5000 万元亏损；如果外部蒸汽负荷够大，

全寿命周期利润将增加得更快，当外部蒸汽负荷足够大时有逾 2 亿元的利润。

4 结语

本文提出的在电网黑启动设计规划中，应用全寿命周期的成本(LCC)分析方法,在国内电力行业尚无使用的先例，国际上也仅有少数国家在试行，还未形成系统的思路和方法。项目的先进性和前瞻性会带来可观的经济效益，但也必然会伴随带来相应较高的风险。数据输入的有效性，是降低 LCC 项目风险的有力保障。在配置黑启动电源这一项目上，黑启动是面临电网全黑这一突发事件所进行的紧急措施，各相关设备对于类似事件处理的有关数据较少，仅停留在理论上。那些对全寿命利润影响较大，如外部蒸汽负荷情况的准确性，尤为关键。两个方案的全寿命周期利润应根据下一阶段的试验和研究结果进行不断的校正，优化数据输入的有效性，以达到 LCC 项目风险的最小化。 \

参考文献

- [1] 帅军庆. 全寿命周期成本管理是公司可持续发展的重要举措.《上海电力》，2004-03.
- [2] 张怡. 浅析 LCC 管理在上海电力系统的应用.《上海电力》，2004-03.
- [3] 上海市电力公司全寿命周期成本管理前期研究项目研究总结.上海电力试验研究所，2004-09.
- [4] 全寿命周期成本(LCC)的基本概念与应用.上海电力试验研究所，2004-09.
- [5] 吴奕亮. 西欧国家如何推广应用 LCC 方法.2004 年全国 LCC 学术年会论文.
- [6] 韩天祥.LCC 管理研究项目中的风险分析.《上海电力》，2004-03.
- [7] 阮前途.基于燃机机组的上海电网黑启动系列试验.《电网技术》，2006-01.
- [8] 刘艳，顾雪平，张丹.基于数据包络分析模型的电力系统黑启动方案相对有效性评估.《电网技术》，2006-03.

作者简介:

靳希(1947-)，男，湖南长沙，汉族，教授，主要研究方向为电力系统安全稳定运行，Email: jinxiche@126.com。
陆哲敏(1984-)，女，上海，汉族，技术人员，主要研究方向为全寿命周期成本分析方法在电力系统中的应用，Email: emin716@hotmail.com。