

基于节能因素的输电线路LCC评价方法研究

为了兼顾电网经济与节能的双重目标,基于全寿命周期成本(Life Cycle Costs, LCC)理论,考虑节能因素,建立了一种新的输电线路设计方案的LCC评价方法。通过全面分析LCC各项组成,考虑负荷变化对电阻损耗的动态影响,提出了更加完善的输电线路LCC模型,并通过折现率与通货膨胀率对其进行了经济学修正。基于上述完善的输电线路LCC模型,引入临界电价,提出了损耗外LCC与损耗的对比分析方法,实现了一个输电线路LCC评价辅助决策平台。以某220 kV输电线路方案比选为例,论证了评价方法的实用性,验证了节能效果。

黄伟¹ 赵晓凤² 蒋利民¹ 王程嘉² 耿建朝³/1.中国电力科学研究院
2.华南理工大学电力学院 3.国家电网石家庄供电公司

0 引言

全寿命周期成本指系统或设备从设计与开发、制造、安装、运行、维护以及废弃的整个寿命期间发生的费用总和^[1]。其在电力行业已有较长的发展历史,为电力系统工程及设备的经济性评价作出了贡献^[2-3]。但是,由于全寿命周期成本理论应用于电力行业中存在与经济学交叉、电力设备在不同时期涉及到技术差异以及管理部门众多、关系复杂,且各部门职责或专业知识存在差异,因此完全准确地评估其各时期内的成本需要从技术、经济和管理多方面深入调查和研究。所以,到目前为止电力设备的全寿命周期成本模型还有待进一步完善。同时,我国面临着资源短缺、线损巨大的现状^[4]。2013年我国发电量达53 223亿kW·h,按照2012年,全国电网损失率6.62%估算,约损失电能3 523亿kW·h,在8类终端销售电价中,按照最低居民生活电价(北京市第一档阶梯电价0.48元/kW·h)

估算,线损的金额为1 691亿元。由此推算,线损率降低0.1%,电网输电成本将降低25亿元。因此,有必要对电网节能进行深入研究,将节能因素纳入LCC评价方法中,这对节能降耗和提高经济效益均有重大意义。

针对上述问题,以输电线路为研究对象,开展了考虑技术、管理和经济学方法的LCC模型研究,提出了完善方法。同时,基于电网节能需求,研究了考虑节能因素和节能效果的输电线路LCC评价方法,为输电线路设计方案评价、比选提供参考。

1 输电线路LCC模型完善

1.1 LCC模型构成

输电线路LCC指线路在整个寿命周期内发生的费用总和^[5],拟采用单目标函数如式(1)所示,约束条件如式(2)所示,即

$$\min F = LCC = C_1 + C_O + C_M + C_F + C_D \quad (1)$$

式中, C_1 为初始投资成本(Investment costs); C_O 为运行成本(Operation costs); C_M 为维护成本(Maintenance costs); C_F 为故障成本(Failure costs); C_D 为退役处置成本(Disposal costs)。

$$\text{s. t.} \begin{cases} \text{国家行业标准} \\ \text{供电需求} \\ \text{设备运行状况} \end{cases} \quad (2)$$

式中,国家行业政策包括输电线路设计标准、运行规范和相关国家政策等;供电需求包括可靠性要求、特殊供电要求(如不间断供电要求)等;设备运行状



黄伟/工程师

关键词/Keywords

全寿命周期成本(LCC) ·
输电线路 ·
节能 ·
LCC评价 ·
辅助决策平台 ·

况指合理的维修策略等。

1.2 初始投资成本

输电线路初始投资成本 C_1 指在建设和调试期间内,在其正式投入运行以前,所付出的一次性的投资成本,主要包括设备购置费、土地购置费和安装调试费^[6]。采用工程法^[7]对各项费用进行估算,然后逐项叠加,以此来估算输电线路的初始投资成本,计算公式为

$$C_1 = \sum C_{1n} \quad n=1,2,3,\dots \quad (3)$$

式中, C_{1n} 为第 n 个元件的投资费用; n 为元件的总个数。

1.3 运行成本

输电线路运行成本 C_0 指运行期间所花费的一切费用总和,包括日常巡视费和损耗费。日常巡视费主要包括巡视人员的固定工资、巡视所需的设备费和材料费等。损耗费主要包括电阻损耗费和电晕损耗费。

目前计算输电线路的电阻损耗电量是通过额定功率和年最大利用小时数,计算公式为

$$\Delta W = 3n' \frac{P^2}{3n''U^2 \cos^2 \varphi} Rt \quad (4)$$

式中, ΔW 为输电线路电阻损耗电量; n' 为线路回路数; n'' 为导线分裂数; P 为线路传输额定功率; U 为输电电压; $\cos \varphi$ 为功率因数; R 为单位长度导线直流电阻; t 为年最大利用小时数。

在电力系统运行中,负荷时刻在变化^[8],输电线路的电阻损耗也随之变化。为了考虑负荷动态变化对电阻损耗的影响,同时负荷曲线难以给出准确的数学表达式,提出了分段求和法来修正这一影响,使LCC的计算结果更加准确、可靠,计算方法如下。

将设备运行时间平均分为 n 等份,对每一份进行损耗估算再求和,随着分段数 n 的增大,结果逐渐趋向准确值,计算公式为

$$\Delta W = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n 3n' \left(\frac{P_i^2}{3n''U^2 \cos^2 \varphi} R \right) \cdot \frac{t}{n} \quad (5)$$

电晕损耗 P_k 的计算一般采用EPRI推荐的电

晕损耗半经验公式或者皮克经验公式,采用皮克提出的输电线路电晕损耗(单导线)的经验计算式,计算公式为

$$P_k = \frac{241}{\delta} (f+25) \sqrt{\frac{r_0}{s}} (U-U_0)^2 \times 10^{-5} \quad (6)$$

式中, f 为电源频率,Hz; r_0 为起晕导线半径,cm; U 为导线对地电压; U_0 为一个只有计算意义的参数,当导线对地电压 $U < U_0$ 时,导线电晕功率损耗可忽略不计;当 $U > U_0$ 时,导线电晕功率损耗将与 $(U-U_0)^2$ 成正比。

U_0 的计算公式为

$$U_0 = 21.4 m \delta r_0 \ln \frac{s}{r_0} \quad (7)$$

式中, m 为导线表面状态系数; δ 为空气相对密度; s 为线间距离,cm。

1.4 维护成本

输电线路维护成本 C_M 主要包括日常维护成本和计划检修成本。考虑到目前我国输电线路工程关于维护成本的数据搜集比较困难,实际中这部分费用主要来自电网补贴费和固定拨款费。目前文献中按照初始投资成本的1.4%和1.5%计算的居多^[6,9],根据对实际情况的调研,本文采用1.4%。

1.5 故障成本

输电线路故障成本 C_F 主要包括缺电成本、修复成本和惩罚成本。缺电成本指电力供应不完全可靠或预期不完全可靠时,由供电量减少所造成的经济损失;修复成本指由断电到恢复正常供电需要的成本;惩罚成本指因断电给用电方造成损失,需要赔偿的成本。因此,年故障成本计算方法如下,即

$$C_F = \lambda C_R + W_{EENS} \varepsilon + W_{EENS} r \quad (8)$$

式中, λ 为年平均故障数; C_R 为故障平均修复成本; W_{EENS} 为期望缺供电量; ε 为输电电价; r 为产电比,元/kW·h; λC_R 为修复成本; $W_{EENS} \varepsilon$ 为缺电成本; $W_{EENS} r$ 为惩罚成本。

调研和分析表明,由于输电线路采用 $N-1$ 方式运行一般情况下线路故障不会引起断电,即使断电也很少有赔偿情况,因此缺电成本和惩罚成

本可取为零。

1.6 退役处置成本

退役处置成本 C_D 主要包括输电线路生命周期结束后的清理成本和残值^[9-10]，其中残值为收入，取负值。部分文献对残值和净残值概念混淆，大部分文献直接给出数值。针对以上情况，对现有方法进行分析和对比后，提出两种退役处置成本计算方法：净残值法和定率折旧法。

(1) 净残值法

残值指输电线路预计使用周期结束后可获得的价值；净残值指残余的价值（残值）减去清理费用后的那部分价值。因此退役处置成本实为净残值的负数。通过查询电力工业企业固定资产编码表，铁塔输电线路折旧年限31年，净残值占原值3%。因此，退役处置成本如下，即

$$C_D = -C_1 \times 3\% \quad (9)$$

(2) 定率折旧法

按照国际惯例，输电线路退役后，残值为购置费的5%。因国内输电线路使用寿命一般达不到其预期使用寿命，残值率也会相应提高，因此有必要对其进行加速折旧，本文选择定率法进行加速折旧。首先求得输电线路的固定折旧率，计算公式为

$$d = 1 - T \sqrt[n]{\frac{K_T}{K_0}} \quad (10)$$

式中， d 为设备的固定折旧率； T 为设备的折旧年限，即预期使用年限； K_0 为设备的原始价值； K_T 为设备在第 T 年末的残值。

将上述固定折旧率 d 代入式（11），得到设备 n 年退役时的残值。

$$K_n = K_0(1-d)^n \quad (11)$$

净残值法是按照初始投资的百分比来确定输电线路退役处置成本，忽略了退役年限的影响，而定率折旧法考虑到输电线路使用年限一般达不到预期使用寿命的现状，退役处置成本随着退役年限不同而变化，更符合实际运行情况。通过上述对比分析，采用定率折旧法计算退役处置成本。

2 基于折现率和通货膨胀率的经济学修正

考虑到资金的时间价值和通货膨胀，需要对输电线路LCC模型进行经济学修正。采用现值成本法，即在对多个方案进行比选时，若诸方案的产出价值相同，或者诸方案能够满足相同的需要，就可以通过对各方案费用现值的比较进行选择。资金的时间价值采用折现率进行修正，因此通过折现率和通货膨胀率对资金进行修正，其计算公式为

$$C_p = \sum_{t=1}^n C_t \frac{(1+R)^t}{(1+r)^t} \quad (12)$$

式中， C_p 为资金的现值； C_t 为资金第 t 年的年值； n 为折算年限； R 为通货膨胀率； r 为折现率。

将上述经济学修正方法引入LCC模型，得到基于折现率和通货膨胀率的LCC经济学修正模型，计算公式为

$$LCC = C_1 + \sum_{t=1}^n (C_O + C_M + C_F) \frac{(1+R)^t}{(1+r)^t} + C_D \frac{(1+R)^n}{(1+r)^n} \quad (13)$$

式中， C_O 、 C_M 和 C_F 分别为运行成本、维护成本和故障成本的年值；其他参数同式（12）。

为了计算简洁、方便，引入折算系数 K_{sum} 和 K ，上述修正模型可变为

$$LCC = C_1 + (C_O + C_M + C_F) K_{sum} + C_D K \quad (14)$$

其中 K_{sum} 和 K 分别为

$$K_{sum} = \frac{(1+R) \left[(1+r)^n - (1+R)^n \right]}{(1+r)^n (r-R)}$$

$$K = \left(\frac{1+R}{1+r} \right)^n$$

3 基于节能因素的输电线路LCC评价方法

基于全寿命周期成本理念，考虑节能因素，本文提出了一种新的输电线路LCC评价方法，即损耗外LCC和损耗对比分析方法。其中，“损耗外LCC”（LCC Except Electric Energy Loss，LCCEL）指LCC中除去损耗成本后的成本，“损耗”（Electric Energy Loss，EEL）指损耗电量。

进行方案比选时,主要有以下两种情况。

1) $LCC_{EL1} > LCC_{EL2}$, $EEL_1 > EEL_2$ 。此情况表示方案一损耗外成本 LCC_{EL} 大、损耗大,通过直观判断,方案一较差。

2) $LCC_{EL1} > LCC_{EL2}$, $EEL_1 < EEL_2$ 。此情况表示方案一损耗外成本 LCC_{EL} 大、损耗小,即方案一用成本($LCC_{EL1} - LCC_{EL2}$)换取电能($EEL_2 - EEL_1$)。

因此,“方案一是否为优选方案”转换为“方案一用钱换电是否值得”问题。为了评价是否值得,同时考虑损耗EEL的时间价值,引入临界电价 P_0 ,计算公式为

$$LCC_{EL1} - LCC_{EL2} = \left(\frac{EEL_2}{n} - \frac{EEL_1}{n} \right) P_0 K_{sum} \quad (15)$$

临界电价 P_0 计算公式为

$$P_0 = \frac{n(LCC_{EL1} - LCC_{EL2})(1+r)^n(r-R)}{(EEL_2 - EEL_1)(1+R)[(1+r)^n - (1+R)^n]} \quad (16)$$

通过临界电价 P_0 与实时电价 P 进行比较,来判断方案一“是否值得”。若 $P_0 > P$,表示方案一“大钱换少电”,则方案二为最优方案,反之方案一为最优方案。其中实时电价 P 指平均电价,即居民用电、工业用电和商业用电的平均值;设

备运行年限较长,应考虑随着时间推移电价的变化趋势;有时用某经济成本换取某电量,虽然从经济性考虑是不值得的,但是若可以节约大量电能,从社会整体效益来看是有利的,只要成本增加在可接受范围内,也是值得考虑的。情况2进行方案比选的流程如图1所示。

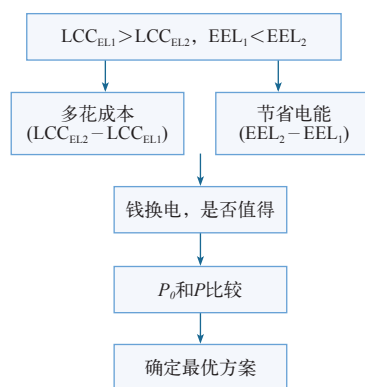


图1 方案比选流程图

4 系统实现及实例分析

基于前面的计算公式和评价方法,实现了一个输电线路LCC评价辅助决策平台,某输电线路实例的评价结果如图2所示。



图2 输电线路LCC评价结果

选取华南地区某220 kV输电线路进行实例分析，并讨论其节能效果。计算所需参数如表1所示，该输电线路所在电网各季节典型日负荷曲线如图3所示。

表1 算例所需参数

	方案一	方案二
导线型号	2×LGJ-630/45	4×LGJ-300/40
路径长度/km	16	16
导线单价/(万元/km)	200	230
导线安装费/(万元/km)	17	20
土地购置费/万元	217	250
线路回路数	2	2
单位长度直流电阻/Ω	0.023 165	0.024 035
功率因数	0.95	0.95
年最大利用小时数/h	4 000	4 000
故障率/[次/(100 km·a)]	0.35	0.35
平均每次修复成本/[万元/(100 km·a)]	50	50
预期运行年限/年	30	30
实际运行年限/年	25	25

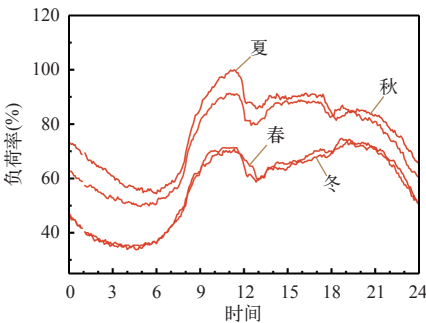


图3 该地区各季节典型日负荷曲线

对各项成本进行计算并按式（14）进行经济学修正，取 $R=3\%$ ， $r=8\%$ ，计算结果如表2所示，各项成本柱状图、饼状图如图4、图5所示。

表2 两方案计算结果

	方案一/万元	方案二/万元
初始投资成本 C_i	3 689	4 250
运行成本 C_o	15 825.59	8 393.13
维护成本 C_M	738.64	850.97
故障成本 C_F	40.05	40.05
退役处置成本 C_D	259.31	298.92
LCC	20 552.59	13 833.06

由图4可以看出，虽然方案一的初始投资成本比方案二小，但是在运行过程中产生的损耗比方案二大，导致LCC也较大，进一步验证了在设备选

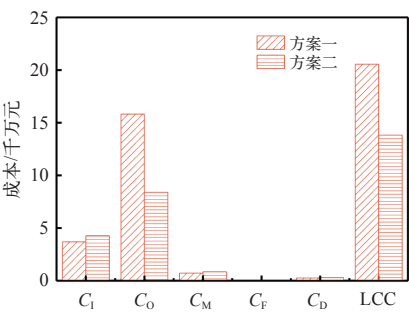


图4 两方案LCC柱状图

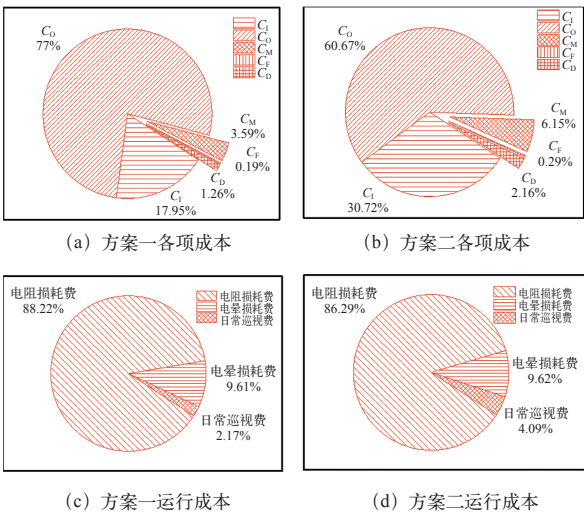


图5 各项成本饼状图

型中，不能着眼于眼前的利益，而要以设备整个生命周期作为考虑对象，才能实现综合效益最大。

图5a、b分别为方案一、二中各项成本饼状图，图5c、d分别为方案一、二运行成本中各项成本饼状图。由图5a、b可知，方案一和方案二中运行成本分别占LCC的77%、60.67%，由图5c、d可知，方案一、二运行成本中电阻损耗费分别占了88.22%、86.29%，电晕损耗费分别占了9.61%、9.62%。即由损耗产生的成本占LCC的55%以上，因此有必要对损耗进行准确计算，在方案评价中重点考虑节能因素。

基于所提出的损耗外LCC和损耗对比分析方法，得到220 kV输电线路实例的除损耗外成本 LCC_{EL} 和损耗电量EEL，如表3所示。

表3 两方案 LCC_{EL} 、EEL值

	方案一	方案二
LCC_{EL} /万元	5 070.25	5 783.18
EEL/kW·h	4.56×108	2.43×108

由表3可以看出,实例中方案二为损耗外成本大、损耗小的情况,由式(16)得临界电价 $P_0=0.06$ 。因此, $P_0 < P$,故方案二“值得”,为优选方案。其中,方案二总损耗(包括电阻损耗和电晕损耗)为 $2.43 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$,比方案一的 $4.56 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 降低了 $2.13 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$,即相对降低了46.7%,节能效果显著。

5 结束语

面对电网经济和环境友好的目标,针对输电线路提出了考虑节能的方案评价方法,得出以下结论。

1) 针对当前输电线路LCC模型中存在的不足,给出了明确的输电线路电晕损耗计算公式,电阻损耗的计算中提出了分段求和法,通过对比分析采用定律折旧法计算退役处置成本。

2) 考虑资金的时间价值,通过折现率和通货膨胀率对输电线路LCC进行了经济学修正,引入并推导了相应的修正系数 K_{sum} 和 K 。

3) 基于完善后的LCC模型,在方案评价中引入节能因素,提出了损耗外LCC与损耗对比分析方法,通过临界电价与实时电价的对比进行方案评价、比选,实现了一个输电线路LCC评价辅助决策平台。通过220 kV输电线路实例论证了评价方法的实用性,最优方案降损达46.7%,说明了对LCC模型考虑节能因素的必要性。

参考文献

[1] 尹来宾,范春菊,崔新奇,等.基于全生命周期

费用(LCC)的配电装置改造的研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(6):61-65.

[2] 邢海东.输配电系统电能损耗分配问题研究[J].科技创业家,2013(22):106-106.

[3] 郭基伟,谢敬东,唐国庆,等.电力设备管理中的寿命周期费用分析[J].高电压技术,2003,29(4):13-15.

[4] 崔新奇,尹来宾,范春菊,等.变电站改造中变压器全生命周期费用(LCC)模型的研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(7):69-73.

[5] 袁翔.架空输配电线路的LCC分析[D].上海:上海交通大学,2010.

[6] 苏海峰,张建华,梁志瑞,等.基于LCC管理的高压直流输电线路工程设计方案评价研究[J].华东电力,2011(5):698-701.

[7] 牛东晓,郭皓池,胥永兰,等.基于全生命周期成本应用分析的电网企业决策支持方法研究[J].华东电力,2014,42(1):54-57.

[8] 余健明,王征,许苗,等.考虑负荷变化的配电网动态分时段重构[J].高电压技术,2007,33(9):125-128.

[9] 刘汉生,刘剑,李俊娥,等.基于全生命周期成本评估的特高压直流输电线路导线选型[J].高电压技术,2012(2):310-315.

[10] 李林,刘芳芳,谢光彬.基于全生命周期成本理论的架空线选型方法研究[J].华北电力大学学报:自然科学版,2010(6):23-28.

(收稿日期:2015-10-12) EA

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告