

基于全寿命周期成本理论的变电站 经济性评价模型

刘 田¹, 陈 光¹, 戴 攀¹, 李 龙², 孙 可³, 周 浩^{1*}

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 济南市供电公司, 山东 济南 250012;
3. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 针对变电站在设计和改造过程中如何经济合理地选择配电装置的问题,建立了基于全寿命周期成本(LCC)理论的变电站经济性评价模型。考虑到变电站不同配电装置寿命周期不同,将LCC等年值作为变电站选型的经济性评价指标,并对影响经济性的重要因素进行了灵敏度分析;以500 kV变电站为例,计算了气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)变电站和空气绝缘开关设备(AIS)变电站全寿命周期成本的等年值;基于计算结果,对GIS变电站和AIS变电站的经济性进行了评价,并对影响变电站经济性的两个重要因素(土地成本和设备购置费用)进行了灵敏度分析。研究表明:在当前的价格水平下,对于偏远地区变电站,选择AIS配电装置更为经济合理;随着土地成本的升高或GIS设备成本的下降,GIS变电站的经济性将优于AIS变电站,城市变电站选择GIS配电装置更为经济。

关键词: 变电站; 配电装置; 全寿命周期成本; 经济性评价模型; 气体绝缘金属封闭开关设备; 空气绝缘开关设备

中图分类号: TM9 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1471-06

Model of substation economic evaluation based on LCC theory

LIU Tian¹, CHEN Guang¹, DAI Pan¹, LI Long², SUN Ke³, ZHOU Hao¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Jinan Municipal Electrical Power Company, Jinan 250012, China;
3. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Aiming at the problems of making scientific and rational decisions in the selection of high voltage electrical switchgear in the substation's design and renovation process, a model of substation economic evaluation based on the assets life cycle cost(LCC)theory was proposed. Annual value was used in the economic evaluation process regarding the difference in life cycles and sensitivity analysis was made on the most significant factors. Taking the 500 kV substations for instance, the LCC annual value of gas insulated switchgear(GIS) substation and air insulated switchgear(AIS) substation were calculated. Based on the calculation results, economic evaluation on GIS substation and AIS substation was made accordingly. Then, sensitivity analysis was made on the most significant factors, land price and the equipment price. The results indicate that AIS substation is more economical in remote areas under the current situation. Meanwhile, as the price of GIS equipments decreases or the price of land increases, GIS is highly cost efficient and more economical in urban substations.

Key words: substation; high voltage electrical switchgear; life cycle cost(LCC); model of economic evaluation; gas insulated switchgear (GIS); air insulated switchgear(AIS)

0 引 言

变电站作为电力能源的分配枢纽,对地区经济生

活起着非常重要的作用。变电站配电装置主要有空气绝缘开关设备(AIS)和气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)两种。配电装置的选择不仅直接决定了项目的

收稿日期: 2012-07-19

作者简介: 刘 田(1989-),女,重庆石柱人,主要从事电力规划及经济性评估方面的研究。E-mail:jessica1988@163.com

通信联系人: 周 浩,男,教授,博士生导师。E-mail:zhouhao_ee@zju.edu.cn

投资成本,也影响着变电站供电可靠性。

变电站选址是低碳电网规划的重要组成部分,变电站距离负荷越近电网损耗越小^[1]。对于城市负荷,变电站越靠近,负荷中心土地价格越高,GIS变电站因其占地面积小的优势越来越受到青睐;对于土地价格较低地区,AIS变电站因其设备价格低廉、运行经验丰富等优势应用非常广泛^[2-3]。目前变电站配电装置的经济性评价一般只考虑变电站建设前期到工程竣工移交并调试运行完成的初始投资成本,没有充分考虑变电站投入运行后的运行和维护成本。

全寿命周期成本(LCC)理论从项目的长远经济效益出发,全面考虑设备购置、安装调试、运行管理、检修维护、改造直至报废的全过程成本^[4-5]。LCC理论在变电站维护、招投标、改造等方面应用已有了一定的研究。文献[4]提出基于遗传算法的全寿命周期变电站维护成本优化算法。上海世博会新建的500 kV地下变电站采用LCC的理念进行设备采购和招投标^[6]。文献[7]以斗山变电站改造为例,用LCC方法建立模型综合评价500 kV变电站改造的经济效益。

在进行变电站配电装置选型时,研究者需要对初始投资成本、运行维护成本、供电可靠性等各方面进行综合评价,确定最优方案。本研究从LCC管理的概念和分析方法角度研究变电站配电装置选型问题,提出基于LCC的变电站经济性评价模型,把LCC等年值作为变电站选型的经济性评价指标,以500 kV变电站为例,分别计算AIS变电站和GIS变电站两种方案的LCC等年值,并对土地价格和设备购置费用进行灵敏度分析,以更加合理地评价变电站采用不同配电装置的经济性。

1 变电站 LCC 建模

1.1 变电站 LCC 模型

变电站LCC模型考虑了变电站建造直至报废的全过程成本,包括了设备购置、安装调试、运行管理、检修维护、改造直至报废的全过程发生的费用,可以表达为:

$$C_{LCC} = CI + CO + CM + CF + CD \quad (1)$$

式中: C_{LCC} —全寿命周期成本, CI —初始投资成本, CO —运行成本, CM —检修维护成本, CF —故障成本, CD —退役处置成本。

1.1.1 初始投资成本

变电站初始投资成本是指从工程设备采购开始直至工程竣工验收为止工程建设的所有费用,可表达为:

$$CI = C_{\text{eqpt}} + C_{\text{inlt}} + C_{\text{bldg}} + C_{\text{land}} + C_{\text{other}} \quad (2)$$

式中: C_{eqpt} —设备购置费用, C_{inlt} —工程安装费用, C_{bldg} —建筑费用, C_{land} —土地成本, C_{other} —其他费用。

1.1.2 运行成本

变电站运行成本主要包括变电站投入运行后设备的能耗费用和环保费用,可表达为:

$$CO = C_{\text{ecptn}} + C_{\text{evtp}} \quad (3)$$

式中: C_{ecptn} —设备能耗费用, C_{evtp} —环保费用。

1.1.3 检修维护成本 CM

检修维护可分为周期性检修和非周期性检修。其中非周期性检修主要包括故障检修,在故障成本中将会考虑到。检修维护成本主要计算周期性的检修费用,可表示为:

$$CM = C_{\text{dm}} + C_{\text{genm}} + C_{\text{inspm}} \quad (4)$$

式中: C_{dm} —解体检修费用, C_{genm} —定期预防性检修费用, C_{inspm} —日常巡视检查费用。

1.1.4 故障成本

故障成本主要包括故障检修费用和故障损失费用。故障检修费用包括因故障检修所发生的设备费、材料费、人工费等;故障损失费用包括电量损失费和因停电间接造成社会经济损失费。故障成本可表示为:

$$CF = C_{\text{troub}} + C_{\text{los}} \quad (5)$$

式中: C_{troub} —故障检修费用, C_{evtp} —故障损失费用。

C_{troub} 和 C_{evtp} 可表示为:

$$C_{\text{troub}} = \lambda \cdot n \cdot RC \cdot MTTR \quad (6)$$

$$C_{\text{evtp}} = W \cdot T \cdot (a_1 + a_2) \quad (7)$$

式中: λ —断路器或间隔的故障率, n —断路器或间隔数, RC —平均修复成本, $MTTR$ —平均修复时间, W —年平均中断供电负荷, T —年平均停电时间, a_1 —电费的平均收益, a_2 —每度电所创造的GDP值。

1.1.5 退役处置成本

退役处置成本是指变电站退役时设备退役处理费减去设备退役时的残值,可表示为:

$$CD = C_{\text{disp}} - C_{\text{revle}} \quad (8)$$

式中: C_{disp} —设备退役处理费用, C_{revle} —设备退役残值。

1.2 资金的时间价值

资金在生产和流通过程中随着时间推移而具有增值能力。研究者要正确评价电力项目的费用和效益,必须把不同时点上的金额换算成相同时点上的金额再行比较。在变电站LCC计算过程中,本研究将寿命周期中的各成本折算到现值,考虑到GIS变电站和AIS变电站不同的寿命周期,再将LCC总现值折算到等年值,最终以等年值作为变电站经济性评价指标。

第 k 年末的将来值 F_k 折算到现值 P_k 可表示为:

$$P_k = \frac{F_k}{(1+i)^k} \quad (9)$$

式中: i —贴现率。

此时总现值 P 可表示为:

$$P = \sum_{k=1}^m P_k = \sum_{k=1}^m \frac{F_k}{(1+i)^k} \quad (10)$$

式中: m —变电站使用年限。

将总现值 P 折算到等年值 A , 可表示为:

$$A = P \frac{i(1+i)^m}{(1+i)^m - 1} \quad (11)$$

为计算简便, 计算中作如下假设^[8]: 资金的现值发生在第一年初; 将来值和等年值发生在年末; 本年的年末即是下一年的年初。

2 变电站 LCC 灵敏度分析

变电站选址不同, 土地价格可能相差非常大, 随着变电站配电装置设计与制造不断发展, 不同配电装置的设备购置费用也会呈现不同的下降趋势。因此, 在变电站 LCC 分析中, 土地价格和设备购置费用是影响 LCC 结果的两个重要因素。

变电站 LCC 等年值 A_{LCC} 可表示为土地价格 C_{lp} 和设备购置费用 C_{eqpt} 的函数, 即:

$$A_{LCC} = f(C_{lp}, C_{eqpt}) \quad (12)$$

因此, A_{LCC} 对土地价格 C_{lp} 和设备购置费用 C_{eqpt} 的灵敏度分别可表示为:

$$R_{lp} = \frac{\partial A_{LCC}}{\partial C_{lp}} = \frac{\partial}{\partial C_{lp}} f(C_{lp}, C_{eqpt}) \quad (13)$$

$$R_{eqpt} = \frac{\partial A_{LCC}}{\partial C_{eqpt}} = \frac{\partial}{\partial C_{eqpt}} f(C_{lp}, C_{eqpt}) \quad (14)$$

3 GIS 和 AIS 变电站的 LCC 计算

3.1 变电站主接线

本研究以 500 kV 变电站为例, 分别计算 GIS 变电站和 AIS 变电站的全寿命周期成本。500 kV 变电站典型设计的主接线如图 1 所示^[9]。GIS 方案的 500 kV、220 kV 配电装置均为户外 GIS, AIS 方案的 500 kV、220 kV 配电装置均为户外 AIS。计算中有如下假定条件:

(1) 两种方案的变压器、35 kV 系统、二次系统没有区别, 可以不纳入比较范围, 因此, 本研究在计算变电站 LCC 时只需计算 500 kV、220 kV 配电装置部分。

(2) 根据相关规程和实际运行经验, GIS 配电装置的使用寿命为 30 年, AIS 配电装置的使用寿命为 20 年。不考虑设备到达寿命年限后变电站的技改和更新, 笔者认为变电站寿命与其配电装置寿命一致。

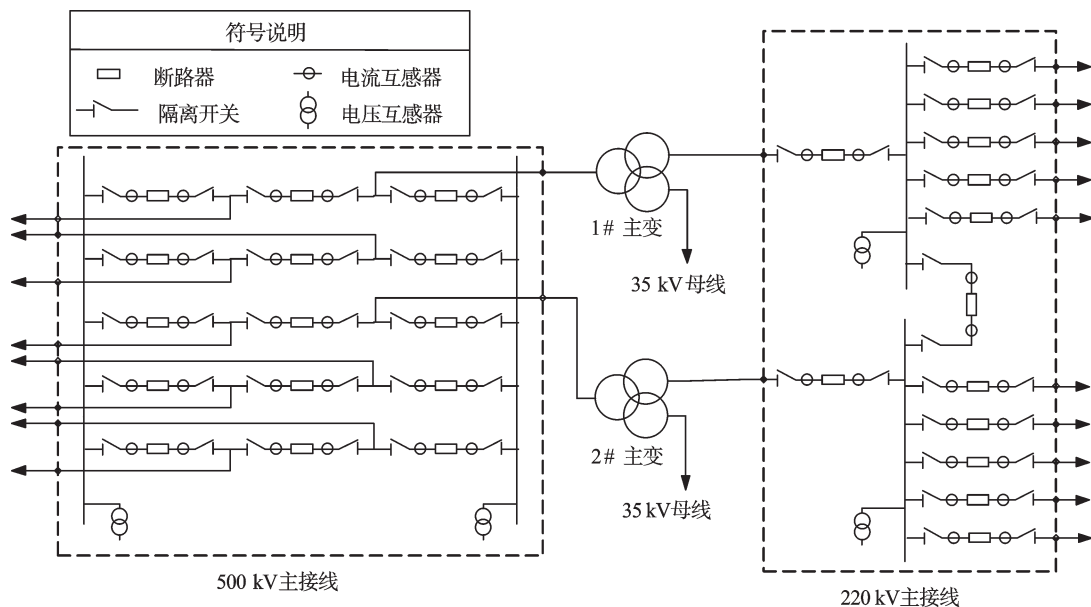


图1 500 kV 变电站典型设计主接线

(3) 文中所有现值计算, 贴现率均取 10%。

3.2 初始投资成本 CI

两种方案的初始投资成本有巨大的差别, 与 AIS 设备相比, GIS 设备价格昂贵, 但是运输成本低, 结构便于安装, 用地节省, 建筑成本也大大低于同等条件下的 AIS 设备。经验表明, GIS 方案和 AIS 方案变电站占地面积分别为 60 亩和 115 亩, 变电站的站区征地综

合单价按照 14 万元/亩。AIS 和 GIS 设备的价格如表 1 所示, 其余各项初始投资费用占设备购置费用的比例如表 2 所示^[10]。

表1 GIS 和 AIS 设备的价格

	GIS	AIS
500 kV	2 250 万元/完整串	400 万元/间隔
220 kV	180 万元/间隔	120 万元/间隔

表2 初始投资费用构成比例

	GIS		AIS	
	500 kV	220 kV	500 kV	220 kV
C_{eqpt}	100%	100%	100%	100%
C_{inlt}	10%	10%	25%	25%
C_{blidg}	1%	1%	10%	10%
C_{other}	15%	15%	25%	25%

本研究将以上数据代入式(2)和式(10)计算,可得GIS方案和AIS方案的初始投资成本现值 P_{CI} 分别为16 330.4万元和12 460万元。

3.3 运行成本CO

500 kV变电站的损耗约为输入电量的0.5%,只考虑两个方案配电装置不同时,变电站能耗费用基本相同^[11]。

《国家电网公司电网检修运维和运营管理成本标准(试行)》(后文简称《标准》)对绿化费做出明确解释,是指为生产、办公等公共场所环境绿化、绿地维护等发生的成本支出。该项费用以站为单位,一个500 kV变电站的绿化费用为2万元/(座·年),配电装置不同并不明显影响该站的绿化费用支出。

在进行变电站LCC计算时,可以省略对各方案寿命周期中费用相同阶段的分析和比较,因此本研究不再比较两种方案的运行成本。

3.4 检修维护成本CM

变电站检修维护主要分了解体检修、定期预防性检修和日常巡视检查。GIS变电站解体检修周期为20年,定期检修周期为4年;AIS变电站解体检修周期为15年,定期检修周期为4年^[12-13]。根据《标准》,解体检修和定期检修费用如表3所示。GIS变电站和AIS变电站日常巡视检查费用 C_{inspm} 分别为2万元/年、3万元/年。

表3 解体检修和定期检修费用标准

		500 kV	220 kV
GIS/(万元/间隔)	解体检修	6.2	4.0
	定期检修	1	0.6
断路器	解体检修	3.5	2.0
	定期检修	1.1	0.6
隔离开关	解体检修	1.3	0.8
	定期检修	0.4	0.3
AIS/(万元/台)	解体检修	1.5	1.2
	定期检修	0.2	0.2
电压互感器	解体检修	1.5	1.2
	定期检修	0.2	0.2
电流互感器	解体检修	1.5	1.2
	定期检修	0.2	0.2

500 kV变电站典型设计主接线如图1所示,变电站500 kV主接线共有15个间隔,15台断路器,30台隔离开关,30台电流互感器和2台电压互感器;220 kV主接线共有13个间隔,13台断路器,26台隔离开关,

26台电流互感器以及2台电压互感器。具体计算结果如表4所示。

表4 两种方案的检修维护成本

	GIS方案1		AIS方案	
	单次费用 /万元	周期 /年	单次费用 /万元	周期 /年
C_{lm}	145	20	219.9	15
C_{gennm}	22.8	4	56.1	4
C_{inspm}	2	1	3	1
$P_{\text{CM}}/\text{万元}$	86.1		181.1	

3.5 故障成本CF

3.5.1 故障检修费用 C_{troub}

统计表明,GIS设备事故率只有常规设备的16.6%~40%^[14]。根据国家电网和华东电网的输变电设备5年平均可靠性统计资料得到的500 kV和220 kV两种开关设备可靠性数据(间隔故障率 λ 、平均修复成本 RC 和平均修复时间 $MTTR$)如表5所示。

将表5中数据代入式(6),可得:GIS方案年平均故障检修费用 C_{troub} 为8万元,AIS方案年平均故障检修费用 C_{troub} 为77.8万元。由式(10)可得:两种方案的故障检修费用现值 P_{Ctroub} 分别为83万元和728.4万元。

表5 GIS和AIS可靠性数据

	GIS		AIS	
	500 kV	220 kV	500 kV	220 kV
λ /(次/百间隔年)	2	1.8	8.96	6.6
RC /(万元/小时)	2	2	2	2
$MTTR$ /小时	8.2	6.5	20	14

3.5.2 故障损失费用 C_{los}

考虑500 kV主接线(2/3接线方式)的可靠性,本研究计算变电站故障损失成本。文献[15]详细计算了采用2/3接线的500 kV变电站供电可靠性高达99.96%,年平均停电时间约为0.05 h。综合间隔故障率和平均修复时间数据,两种方案的年平均停电时间 T 分别为0.001 h和0.05 h。变电站年平均中断供电负荷 W 取1 500 MVA,电费平均收益 a_1 为0.1元/kWh,每度电所创造的GDP值 a_2 为9.1元/kWh(为浙江省某市每度电所创造的GDP值,不同地区可能存在差异)。由式(7)计算可得GIS方案年平均故障损失费用 C_{los} 为1.38万元,AIS方案年平均故障损失费用 C_{los} 为69万元。由式(10)可得两种方案的故障损失费用现值 P_{Clos} 分别为13.0万元和587.4万元。

由式(5)可得两种方案的故障成本现值 P_{CF} 分别为96万元和1 312.8万元。

3.6 退役处置成本

3.6.1 设备退役处理费用 C_{disp}

变电站的设备退役处理费用 C_{disp} 包括建筑清理

费 C_{Dbldg} 和机电设备清理费 C_{Deqpt} 两部分,可分别由以下两式计算:

$$C_{Dbldg} = R_b \times C_{bldg} \quad (15)$$

$$C_{Deqpt} = R_e \times C_{eqpt} \quad (16)$$

式中: R_b —建筑工程清理费率, R_e —机电设备清理费率。

建筑工程的清理费率为20%,机电设备清理费率为32%^[16-17]。由式(15)和式(16)可得, GIS方案的建筑清理费 C_{Dbldg} 为27.2万元,机电设备清理费 C_{Deqpt} 为4 348.8万元; AIS方案的建筑清理费 C_{Dbldg} 为151.2万元,机电设备清理费 C_{Deqpt} 为2 419.2万元。

3.6.2 设备退役残值 C_{revle}

变电站设备退役残值 C_{revle} 采用固定资产残值率计算,即:

$$C_{revle} = R_r \times C_{eqpt} \quad (17)$$

式中: R_r —残值率。

对于机电设备残值率通常取为设备购置费的5%,由式(17)可得两种方案的设备退役残值 C_{revle} 分别为679.5万元和378万元。

3.6.3 退役处置成本 CD 计算结果

由式(8)和式(10)可得两种方案的退役处置成本现值 P_{cd} 分别为211.8万元和325.9万元。

3.7 两种方案的 LCC 计算结果

两种方案变电站寿命周期内各成本现值如表6所示,将表中数据代入式(1)可得:两种方案的 LCC 现值 P_{LCC} 分别为16 724.3万元和14 259.6万元,再由式(11)计算得到:两种方案的 LCC 等年值分别为1 774.1万元和1 674.9万元。

比较两种方案 LCC 等年值, GIS 方案要比 AIS 方案每年都多投入96.8万元,占 GIS 变电站等年值的5.46%。从经济性考虑, AIS 变电站稍优于 GIS 变电站,然而综合考虑 GIS 变电站较低的故障率和维护的方便性, GIS 变电站在供电可靠性要求较高地区更值得推荐。

表6 两种方案的 LCC 计算结果(单位:万元)

	GIS 方案	AIS 方案
P_{CI}	16 330.4	12 460.0
P_{CM}	86.1	181.1
P_{CF}	96.0	1 312.8
P_{CD}	211.8	325.9
P_{LCC}	16 724.3	14 279.8
A_{LCC}	1 774.1	1 677.3

4 灵敏度分析

土地价格和设备购置费用是影响变电站 LCC 的两个重要因素,同时,这两个因素受变电站选址、GIS

技术发展和变电站规模等影响非常大。本研究分析两种方案 LCC 等年值对土地价格和设备购置费用的灵敏度,动态分析两种方案的经济性。

由于土地价格和设备购置费用的变化只影响初始投资成本 CI 和退役成本 CD ,其他成本不变。由式(1,2,8)推导可得两种方案的 LCC 现值,代入式(11),得到两种方案的 LCC 等年值函数,即:

$$A_{LCC1} = 0.106\ 08(1.161\ 0\ C_{eqpt1} + 54.545\ C_{lp} + 182.1) \quad (18)$$

$$A_{LCC2} = 0.117\ 46(1.497\ 6\ C_{eqpt2} + 104.545\ C_{lp} + 1\ 493.9) \quad (19)$$

式中: A_{LCC1} , A_{LCC2} —GIS 方案和 AIS 方案的 LCC 等年值; C_{eqpt1} , C_{eqpt2} —两种方案的设备购置费用; C_{lp} —土地价格。

4.1 土地价格灵敏度分析

变电站选址不同,土地价格可能相差非常大。随着城市负荷的快速发展以及低碳电网对变电站选址的要求,越来越多的500 kV 变电站会靠近城市甚至在城市内部,此时土地价格的大幅度提高对变电站经济性评价产生重大影响。

本研究将式(18,19)代入式(13),得到 GIS 方案土地价格灵敏度 $R_{lp1} = 5.79$, AIS 方案土地价格灵敏度 $R_{lp2} = 12.28$ 。两种方案的 LCC 等年值都随着土地价格的升高而升高,但是 GIS 方案的土地价格灵敏度小于方案 AIS,因此土地价格越高,越体现出 GIS 变电站的经济性优势。在当前设备购置费用下,两种方案随土地价格变化的 LCC 等年值曲线(如图2所示)交于点 M 。当变电站站址土地价格大于28.9万元/亩时, GIS 变电站的经济性优于 AIS 变电站。

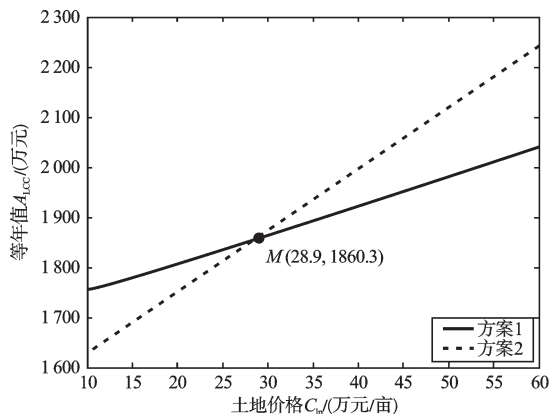


图2 随土地价格变化的 LCC 等年值曲线

4.2 设备购置费用灵敏度分析

设备购置费用是变电站初始投资成本最重要的组成部分,是影响变电站 LCC 的重要因素。随着 GIS 设备设计与制造不断发展,其价格会越来越低。本研究将式(18,19)代入式(14),得到 GIS 方案设备购置费用灵敏度 $R_{eqpt1} = 0.123\ 2$, AIS 方案设备购置费用灵敏

度 $R_{\text{opt}2} = 0.1759$ 。两种方案的LCC等年值随设备购置费用的下降而下降。

本研究在分析设备购置费用变化对两种方案的影响时,考虑到AIS设备技术已经非常成熟,降价空间低于GIS设备,假定AIS设备的价格不变,即AIS方案设备购置费用不变,分析GIS方案设备购置费用下降对LCC等年值的影响。土地价格分别为10万元/亩、30万元/亩、50万元/亩时,随GIS方案设备购置费用变化的LCC等年值曲线如图3所示。GIS方案的LCC等年值表示为3组斜率为0.1232的平行直线,AIS方案设备购置费用不变,其LCC等年值表示为3组与横坐标平行的直线,其交点 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为3种土地价格时的等价点(两种方案LCC等年值相等)。由图3可知,当GIS方案设备购置费用小于等价点 Q 时,GIS变电站的经济性优于AIS变电站。

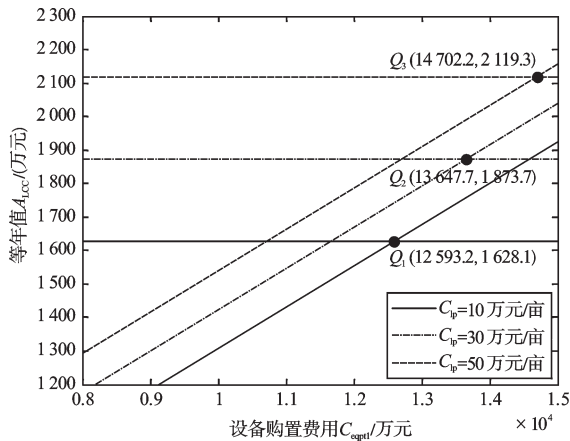


图3 随设备购置费用变化的LCC等年值

5 结束语

本研究提出了基于LCC的变电站经济性评价模型,计算了变电站设备购置、安装调试、运行管理、检修维护、改造直至报废的全过程发生的费用,并把LCC等年值作为变电站选型的经济性评价指标。该模型充分考虑变电站规划方案在其寿命周期里所要支出的各项成本,避免出现由于片面缩减方案初始投资而造成的后期成本过大的情况,以长远的眼光促进长期成本的降低。

以500 kV变电站为例,本研究分别计算了GIS变电站和AIS变电站的LCC等年值,计算结果表明在常规情况下AIS变电站经济性稍优于GIS变电站,综合考虑GIS变电站较低的故障率和维护的方便性,GIS变电站在供电可靠性要求较高地区更值得推荐。

土地价格灵敏度分析结果表明,当变电站位于偏

远地区,土地价格低廉时,从经济性和运行经验来看,AIS变电站更加具有优势。然而对于靠近城市的变电站,土地价格较高,此时选择GIS配电装置更为合理。设备购置费用灵敏度分析结果表明,随着GIS设备价格的下降,GIS变电站将逐渐体现出其经济性优势。

参考文献(References):

- [1] 丁然,康重庆,周天睿,等. 低碳电网的技术途径分析与展望[J]. 电网技术,2011,35(10):1-8.
- [2] 陈飞. GIS设备的发展和应研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2007.
- [3] 王晓京. 500 kV大型变电站配电装置的选型问题[J]. 电力建设,2001,22(10):30-31,36.
- [4] HINOW M, MEVISSSEN M. Substation maintenance strategy adaptation for life-cycle cost reduction using genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(1):197-204.
- [5] POLITANO D, FROHLICH K. Calculation of stress-dependent life cycle costs of a substation Subsystem-demonstrated for controlled energization of unloaded power transformers[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(4):2032-2038.
- [6] 姚明,陈红兵,李莉华,等. 全寿命周期成本(LCC)方法在500KV地下变电站GIS采购中的应用[J]. 中国电力,2008,41(8):32-34.
- [7] 韩天祥,李莉华,余颖辉. 用LCC方法对500kV变电站改造的经济性评价[J]. 华东电力,2007,35(8):7-11.
- [8] 肖先勇. 电力技术经济分析原理[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [9] 方煜英. QIS主接线的简化设计[J]. 机电工程技术,2011,40(2):97-99.
- [10] 电力规划设计总院. 电网工程限额设计控制指标(2010年水平)[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [11] 吴东升. 500 kV变电站理论线损计算[D]. 广州,华南理工大学电力学院,2005.
- [12] 中国电力企业联合会. DL/T 603-2006,气体绝缘金属封闭开关设备运行及维护规程[S]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [13] 张黎明. 基于全寿命周期成本管理的变电设备维修决策研究[D]. 杭州,浙江工业大学,2009.
- [14] 罗学琛. SF6气体绝缘全封闭组合电器[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [15] 周志超,邱文千. 基于可靠性的电气主接线实例方案研究[J]. 电力勘测设计,2010(4):42-43.
- [16] 电力建设工程造价手册编写组. 电力建设工程造价手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [17] 电力工程造价与定额管理总站. 电网工程建设预算编制与计算标准使用指南[M]. 北京:中国电力出版社,2008.

[编辑:李辉]