

考虑碳排放成本全寿命周期的变压器建设投资决策算法

文/汪立 刘鹤晨
国网天津市电力公司

提出了考虑碳排放成本全寿命周期的变压器建设投资决策算法，并以CLCC最小为目标，对配电变压器建设和改造进行选型，算例结果验证了该方法的有效性。与传统LCC选型原则相比，CLCC选型原则实现了变压器在寿命周期内社会环境总投资成本最优，可指导变压器建设和改造工作。

2020年12月，工业和信息化部、市场监管总局和国家能源局联合制定了《变压器能效提升计划（2021—2023年）》。文件要求加快电网企业变压器升级改造，推行绿色采购管理。自2021年6月起，新采购变压器应为高效节能变压器。高效节能变压器指符合《电力变压器能效限定值及能效等级》中1级、2级能效标准的电力变压器。电力变压器建设和改造时，不仅要考虑项目的初始建设成本，也要综合考虑运行维护成本，还要考虑CO₂排放成本，实现全社会成效最优。全寿命周期成本（Life Cycle Cost, LCC）管理是从整个项目寿命周期出发，侧重对项目决策、设计、施工和运行维护等各阶段造价进行控制，使LCC最小的一种管理方法。电力行业人员关于全寿命周期成本理论进行了大量的研究，但都未考虑变压器全寿命周期中的CO₂排放成本，忽视了变压器损耗排放的CO₂对环境的影响，忽视了高效节能变压器对环境保护绿色低碳的贡献。本文将基于LCC理论，考虑变压器损耗的CO₂排放成本，提出一种考虑碳排放成本全寿命周期（Carbon Life Cycle Cost, CLCC）的变压器建设投资决策算法，为变压器能效提升提供设备选型参考思路。

变压器CLCC理论算法

LCC是指在设备寿命周期内，为其论证、研制、生产、运行、维护、保障及退役后处理所支付的全部费用。对于电力行业，电力设备LCC是指电力设备从设计到退役的整个期间所需费用总和。电力设备LCC主要可划分为基本建设成本、运行维护成本、大修和技术改造成本、惩罚成本。CLCC指在全寿命周期中增加碳排放成本，按照全寿命周期理论配电变压器的CLCC可划分为：初次投资成本 C_F 、运行维护成本 C_{YW} 、停电损失成本 C_T 和设备残值 C_R 4部分，再加上碳排放成本 C_C 。碳交易是指通过向企业和组织施加碳排放上限，并允许它们在这个上限内自由交易碳排放权，以便实现减少温室气体排放的机制。碳排放成本 C_C 是指变压器运行过程中排放的CO₂在碳排放权交易市场上的价格。全寿命周期成本为

$$C_{LLC} = C_F + C_{WY} + C_T - C_R \quad (1)$$

再加上碳排放成本，得到考虑碳排放成本的全寿命周期成本计算公式为

$$C_{CLCC} = C_F + C_{WY} + C_T - C_R + C_C \quad (2)$$

设变压器的实际使用寿命为 n ，变压器各年的运行维护费用为 C_{YW1} 、 C_{YW2} 、…、 C_{YWn} ，各年的停电

损失费用为 C_{T1} 、 C_{T2} 、 $\cdots$ 、 C_{Tn} 。

变压器各年的碳排放成本为 C_{C1} 、 C_{C2} 、 $\cdots$ 、 C_{Cn} 。

变压器1年的运行维护成本计算公式为

$$C_{YW1}=C_{SH}+C_{YJ} \quad (3)$$

式中， C_{SH} 为变压器损耗电费，为变压器损耗电量 Q 和电价 P_E 的乘积； C_{YJ} 为变压器运行检修费用，可采用变压器运维经验值。

变压器1年的碳排放成本计算公式为

$$C_{C1}=QQ_C P_C$$

式中， P_C 为碳排放交易单价； Q_C 为单位电能产生的 CO_2 质量。

不考虑贴现率，设每年的运行维护成本、停电损失成本、碳排放成本相同，得到变压器 n 年的全寿命周期成本计算公式为

$$C_{CLCC}=C_F+nC_{YW1}+nC_{T1}-C_R+nC_{C1}$$

变压器CLCC理论算例

本文算例作出如下设定：

- 1) 新建1台10 kV油浸式三相双绕组无励磁调压配电变压器，额定容量为400 kV·A，接线组别Dyn 11。变压器的使用寿命为20年。
- 2) 变压器功率因数取1。
- 3) 电价（单位损失电量费用）为0.7元/（kW·h）。
- 4) CO_2 排放价格624元/t。欧盟是全球最大的碳市场，其市场规模占全球市场总量的2/3以上，已经建立了一个成熟的碳交易体系。预计2023年欧盟

排放交易体系（ETS）平均价格为80欧元/t（1欧元=7.8元人民币）。

5) 每消耗1kW·h电相当于排放了0.96 kg的 CO_2 。

6) 依据运行经验，电工钢带变压器年运维成本2 000元。非晶合金变压器抗重过载能力较弱，年运维成本比电工钢带变压器多20%，为2 400元。

7) 变压器设备残值为初次投资成本的5%。

8) 非晶合金变压器抗过载能力弱、故障率高，设非晶合金变压器比电工钢带变压器的运维检修成本和停电损失成本高20%。

依据《变压器能效限定值》，容量为400 kV·A的变压器能效见表1。

表1 10 kV油浸式配电变压器能效（400 kV·A）
（单位：W）

变压器能效及铁芯材质	空载损耗	负载损耗
电工钢带1级能效	330	3 250
电工钢带2级能效	370	3 615
电工钢带3级能效	410	4 520
非晶合金1级能效	160	3 660
非晶合金2级能效	200	3 865
非晶合金3级能效	200	4 520

算例1：某农村居民用变压器，负荷波动大，变压器年平均负载率30%，变压器负荷季节性波动较大。依据《2021年全国电力可靠性年度报告城市》，变压器年停电时间14.06 h。各型号变压器的CLCC成本计算结果见表2。

表2 变压器的CLCC成本计算（算例1）
（单位：万元）

变压器型号	初始投资成本 C_F	运维成本 C_{YW}	停电损失成本 C_T	设备残值 C_R	碳排放成本 C_C	不考虑碳排放成本 C_{LCC}	考虑碳排放成本 C_{CLCC}	碳排放成本占比（%）
电工钢带1级能效	12.5	32.0	1.6	0.6	23.9	45.5	69.4	34
电工钢带2级能效	10.4	35.1	1.6	0.5	26.6	46.7	73.3	36
电工钢带3级能效	6.9	42.3	1.6	0.3	32.8	50.4	83.2	39
非晶合金1级能效	11.5	33.7	2.0	0.6	24.7	46.6	71.3	35
非晶合金2级能效	9.4	35.7	2.0	0.5	26.4	46.6	73.1	36
非晶合金3级能效	5.9	40.5	2.0	0.3	30.6	48.1	78.6	39

由算例1可知，在变压器年平均负载率30%时，不考虑碳排放成本时，为节省变压器改造的长远投资按LCC最小原则进行投资选型规划，推荐采用非晶合金3级能效变压器。因为非晶合金3级能效变压器初始投资成本低。当考虑碳排放成本时，按CLCC最小原则进行投资选型规划，推荐采用非晶

合金1级能效变压器。因为非晶合金1级能效变压器碳排放成本低，且具有显著优势。

算例2：某城市小工业用户变压器，负荷稳定，变压器年平均负载率60%，变压器负荷季节性波动较小。依据《2021年全国电力可靠性年度报告城市》，设变压器年停电时间4.89 h。各型号变压器

的CLCC成本计算结果见表3。

由算例2可知，在变压器年平均负载率60%时，为节省变压器改造的长远投资，按LCC最小原则或者CLCC最小原则，都推荐采用电工钢带1级能效变压器。因为虽然电工钢带1级能效变压器初始投资成本最高，但运维成本和碳排放成本都具有显著优势。

算例3：设变压器年停电时间4.89 h，不同型号变压器在年平均负载率从10%至100%逐渐增加时的CLCC成本计算结果见表4。

表3 变压器的CLCC成本计算（算例2）								（单位：万元）	
变压器型号	初始投资成本 C_F	运维成本 C_{yw}	停电损失成本 C_T	设备残值 C_R	碳排放成本 C_C	不考虑碳排放成本 C_{LCC}	考虑碳排放成本 C_{CLCC}	碳排放成本占比（%）	
电工钢带1级能效	12.5	20.0	2.4	0.6	13.7	34.2	47.9	29	
电工钢带2级能效	10.4	21.8	2.4	0.5	15.3	34.1	49.4	31	
电工钢带3级能效	6.9	25.7	2.4	0.3	18.5	34.5	53.1	35	
非晶合金1级能效	11.5	20.2	2.8	0.6	13.2	34.0	47.2	28	
非晶合金2级能效	9.4	21.5	2.8	0.5	14.3	33.3	47.5	30	
非晶合金3级能效	5.9	23.9	2.8	0.3	16.3	32.3	48.6	34	

表4 变压器的CLCC成本计算（算例3）											（单位：万元）	
年均负载率	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
电工钢带1级能效	31.1	38.7	46.4	54.1	61.7	69.4	77.1	84.8	92.4	100.1		
电工钢带2级能效	30.8	39.3	47.8	56.3	64.8	73.3	81.9	90.4	98.9	107.4		
电工钢带3级能效	30.4	41.0	51.5	62.1	72.7	83.2	93.8	104.3	114.9	125.5		
非晶合金1级能效	28.0	36.7	45.3	54.0	62.7	71.3	80.0	88.6	97.3	106.0		
非晶合金2级能效	27.4	36.6	45.7	54.8	63.9	73.1	82.2	91.3	100.4	109.6		
非晶合金3级能效	25.5	36.2	46.8	57.4	68.0	78.6	89.2	99.8	110.5	121.1		

由算例3可知，当变压器年平均负载率低于20%时，初始投资成本为影响CLCC成本的主要因素，选用初始投资成本最低的非晶合金3级能效变压器，CLCC最低。当变压器年平均负载率在30%或40%时，初始投资、空载损耗和负载损耗都对CLCC成本有较大影响，选用非晶合金1级能效变压器，CLCC最低。当变压器年平均负载率高于50%时，负载损耗为CLCC成本最主要因素，选用电工钢带1级能效变压器，CLCC最低。

3）基于CLCC理念进行变压器改造选型时，应考虑变压器年平均负载率，以实现成本低、设备利用价值高。当年平均负载低时，选用非晶合金变压器；当变压器年平均负载高时，选用电工钢带变压器。

4）为防止变压器重过载运行，目前电网企业普遍将变压器最大负载率限制在80%以下，年平均负载率30%左右，变压器长期轻载运行。从碳排放全寿命周期成本考虑，应用一级能效非晶合金变压器是经济的。EA

结束语

1) 随着中国碳排放市场的逐步完善，碳排放成本将成为企业投资决策的重要考虑因素。为实现投资最优，配电变压器的选型投资决策应以CLCC最小为原则。

2) CLCC投资决策分析方法是考虑碳排放成本的全寿命周期成本分析方法，包括初始投资成本、运维成本、停电损失成本、设备残值和碳排放成本。其中起主要作用的是初始投资成本、运维成本和碳排放成本。

参考文献

[1] 李煜逵，田中华，张欢欢，等．广东省变压器能效提升潜力分析[J]．电气时代，2023(5)：20-22．

[2] 王瑛，郑凯．变压器节能设计的探讨与分析[J]．现代建筑电气，2022，13(7)：10-13．

[3] 关银环，朱庆民．节能配电变压器的应用及选型分析[J]．变压器，2023，60(5)：38-41．