

DOI: 10.7652/xjtuxb201508022

采用全寿命周期成本与风险分析的 农村配电变压器更换投资策略

张恒¹, 王建学², 曹晓宇²

(1. 西安交通大学经济与金融学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 农村现有的 10 kV 配电变压器由于老化问题已经难以满足逐年增长的用电需求, 变压器更换已成为农村配网改造中亟待解决的重要问题。为此, 提出了一种基于全寿命周期成本与风险分析的老化变压器更换决策新方法。该方法在分析变压器全寿命周期各项成本的基础上, 综合考虑服役时间、供电可靠率、重载负荷等因素对变压器经济寿命的影响, 并结合投资风险评估思想安排老化变压器的更换次序, 弥补了传统决策方法中仅以服役时间作为主要投资依据的不足。以陕西南部地区某农村配网中 9 台变压器的更换为例进行了计算, 结果表明: 所提方法能够在变压器更换方案中反映低供电可靠率、重载负荷对变压器经济寿命的负面影响, 较仅以服役时间为依据的传统方法更为科学有效; 此外, 采用文中提出的变压器更换投资决策方法减少了 2.93% 的更换成本, 显著提高了变压器更换投资的经济效益, 能够为农村配电变压器的投资规划提供参考。

关键词: 全寿命周期成本; 配电网; 变压器更换; 投资风险评估; 供电可靠率

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 253-987X(2015)08-0133-08

Replacement and Investment Strategy for Distribution Transformers in Rural Area Based on Life Cycle Cost Theory and Risk Assessment

ZHANG Heng¹, WANG Jianxue², CAO Xiaoyu²

(1. School of Finance and Economics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The current 10 kV distribution transformers in rural area can hardly satisfy the gradually increasing power demand due to the aging-failure. Facing this challenge, a novel decision approach for the replacement of aged transformers is developed with life cycle cost theory and risk assessment. The proposed approach considers the impacts of operating time, supply reliability and heavy load to transformer economic life, which remedies the limitation of the conventional approach. Furthermore, the methodology based on risk assessment is also utilized in the final investment strategy. A replacement order for nine aged transformers of a rural distribution network in southern Shaanxi is arranged. The numerical results indicate that the proposed approach enables to make a more reasonable investment decision and to reflect the adverse impacts of poor reliability and heavy load on the economic life of transformers. This approach improves the cost-effectiveness of transformer replacement by reducing 2.93% of the total cost.

收稿日期: 2015-01-19。 作者简介: 张恒(1973—), 女, 博士生; 王建学(通信作者), 男, 副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50807043)。

网络出版时间: 2015-05-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150504.0900.001.html>

Keywords: life cycle cost; distribution network; transformer replacement; investing risk assessment; power supply reliability

电力设备的全寿命周期成本(LCC)是指设备从购置、运行、检修直至退役的全过程中所需费用的总和^[1-2],早在 20 世纪 80 年代就已引入我国,在包括泰和变电站 GIS 设备更新^[3]、世博会蒙自变电站设备选型^[4]等在内的多次大型工程决策中得到了应用。随着电网投资建设规模的日益扩大,基于 LCC 分析的投资决策方法正逐渐成为电力设备更换投资研究的重点。文献[5]介绍了电力设备 LCC 的主要构成;文献[6-7]介绍了 LCC 理论在电力设备选型、变电站工程规划等领域中的应用;文献[8]在电力变压器 LCC 模型的基础上分析了影响变压器 LCC 的关键经济因素;文献[9-11]提出了基于经济寿命评估的变压器更新策略。但是,将 LCC 理论应用于农村 10 kV 配电变压器更换投资中的相关研究却较少涉及。

在农村配网中,10 kV 配电变压器直接与用户相连,其运行可靠性将直接影响当地居民的用电质量。现有的 10 kV 配电变压器大多数是长时间服役的老旧变压器,已经难以满足农村居民逐年增长的负荷需求,对农村配网的供电质量造成了不良影响。因此,配电变压器更换已成为配网改造中亟待解决的重要问题。但实际上,农村配网改造中较多关注初始投资成本的同时却容易忽略配电变压器在全寿命周期中产生的其他费用,在很大程度上影响了投资策略的经济效益,容易出现高能耗变压器超龄运行、经济寿命较长的变压器提前退役等不合理的设备投资和更换方案。

根据上述原因,本文应用 LCC 理论针对 10 kV 配电变压器的更换投资策略进行了深入研究,旨在为农村配网的改造投资提供理论依据。本文主要完成了两项工作:①立足于时间、空间、负荷特性等多个维度,综合考虑服役时间、外部供电可靠率、重载负荷等多项因素对配电变压器经济寿命的影响,完善了现有变压器 LCC 理论;②采用成本-收益评估方法,提出了符合农村配网实际情况的变压器更换投资策略方案,并通过实际系统算例验证了该决策方法的有效性。

1 多维度的变压器全寿命周期各项成本分析理论

变压器的全寿命周期成本可以分解为初始投资

成本、运行维护成本、用户停电成本与退役处理成本^[10],如表 1 所示。其中,初始投资成本和退役处理成本采用已有的模型和计算方法,而本文在运行维护成本和用户停电成本中分别加入了设备老化、负载情况和外部网络影响,并进行了理论分析,给出了具体计算公式。

表 1 变压器全寿命周期成本的构成

全寿命周期各项成本	费用明细
初始投资成本	购置费、安装工程费、其他费用
运行维护成本	变压器能耗费用、设备检修费用、运检人员费用
用户停电成本	用户停电成本
退役处理成本	报废成本、设备残值

1.1 初始投资成本

变压器的初始投资成本主要包括设备的购置费、安装工程费和其他费用。该项成本属于变压器寿命周期初期的一次性投入,计算公式为

$$C_{cap} = C_{pc} + C_{id} + C_{el} \tag{1}$$

式中: C_{cap} 为初次投资成本; C_{pc} 为购置费; C_{id} 为安装调试费; C_{el} 为其他费用。

1.2 运行维护成本

变压器的运行维护成本包括变压器能耗费用、设备检修费用、运行人员费用及检修人员费用等。其中,能耗费用 C_{ec} 主要与变压器的空载、负载损耗以及月份 t 的负荷水平有关^[8]

$$C_{ec} = (P_0 + \beta_t^2 P_k) \eta_t T_t p_r \tag{2}$$

$$\beta_t = \frac{P_{d,t}}{P_N} = \frac{P_{d,t}}{S_N \cos \varphi} \tag{3}$$

式中: P_0 为变压器空载损耗; P_k 为变压器负载损耗; β_t 为第 t 个月的变压器平均负载率,可以根据式(3)进行计算,近似表示为当月负荷 $P_{d,t}$ 占变压器容量的比例; $\cos \varphi$ 为配电变压器的功率因数; T_t 为第 t 个月的变压器运行时间; p_r 为变压器的能耗成本系数,在数值上等于当地的平均电价; η_t 为每月的负荷损耗率,可以根据经验公式进行计算^[8]。

变压器年度检修费用 C_{mt}^i 可以通过变压器检修率、检修成本进行简单估算

$$C_{mt}^i = \mu_{mt} Z_{mt} \tag{4}$$

式中: μ_{mt} 为变压器的检修率,次/a; Z_{mt} 表示变压器检修成本。另外,由于配网自动化水平提高而降低

了变压器运行维护所需的人力成本,年度运检人员费用 C_{sl} 可以表示为其他运行维护成本之和的固定比例 δ 。综上,变压器年度运行维护成本的计算公式为

$$C_{om}^i = (1 + \delta) \left(\sum_{t=1}^{12} C_{ec}^t + C_{mr}^i \right) \quad (5)$$

1.3 用户停电成本

为了衡量变压器故障、检修停运对用户造成的停电损失,在变压器 LCC 中计及用户停电成本 C_{out}^t ,并采用如下公式进行计算^[12]

$$C_{out}^t = VE_{out}^t \quad (6)$$

式中: V 为变压器安装区域的失负荷价值系数; E_{out}^t 为第 t 个月的期望停电量,根据配电变压器所在负荷点的停运时间指标计算得到。式(6)是理论计算公式,但在实际应用中,为了更准确地评估 LCC,还需要计及外部网络与变压器故障率的影响。

1.3.1 基于外部网络等效的停电成本计算方法
值得注意的是,不同地区配网的供电可靠性水平并不相同。这意味着,即使是完全相同的配电变压器与负荷,由于接入电网点的供电可靠性存在差异,运行产生的用户停电成本是不一样的。相关研究中的计算结果表明^[8,13],用户停电成本约占变压器 LCC 的 20%~30%,这就要求在 LCC 计算中必须计及接入点的供电可靠性。针对这个问题,本文提出了基于外部网络等效的停电损失计算公式,即在计算对应负荷点的可靠性指标时,可以将外部供电网络等效为一个可靠性水平已知的虚拟电源。因此,本文采用虚拟电源、变压器及负荷构成的串联系统来评估停电成本,如图 1 所示。

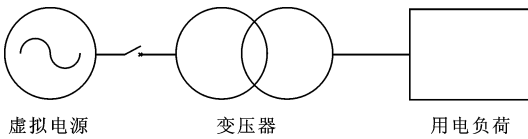


图 1 计算用户停电损失的等效系统

应用串联公式可以计算相关的可靠性指标

$$T_m = T_{vpp} + \lambda_{trans} T_{ave} \quad (7)$$

式中: λ_{trans} 为变压器的平均故障率; T_{ave} 为变压器的平均停运时间; T_m 为负荷点的月停电时间; T_{vpp} 为虚拟电源的月停运时间。实际上,地方电力公司每隔一段时间就会统计当地居民的停电情况,并发布供电可靠率(RS)指标。对于配网用户而言,RS 为有效供电时间与统计时间的比值,RS 指标低的地区停电事件更加频发,供电可靠性较差。因此,根据变压器所在区域的 RS 值可以直接导出 T_{vpp} 。

1.3.2 计及老化影响的 λ_{trans} 的计算方法
为了反映变压器老化造成的用户停电成本增长,需要在老化特性分析的基础上建立变压器故障率模型^[14-15]。因此,本文采用设备失效的浴盆曲线模拟变压器故障率 λ_{trans} 在整个寿命周期中的变化规律,如图 2 所示。

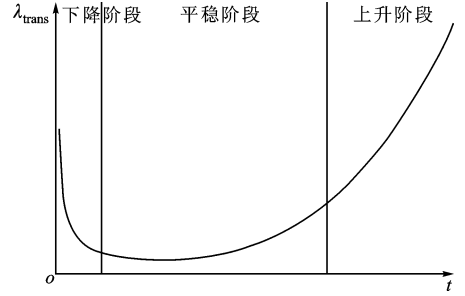


图 2 设备失效曲线

根据设备失效曲线,变压器老化主要分为 3 个阶段:在投运初期,由于工艺缺陷、装配水平等原因,设备故障率较高但呈迅速下降趋势;设备在运行过程中逐渐进入平稳阶段,在此期间设备故障率缓慢升高但仍能维持较低水平;随着运行时间变长,老化、磨损等原因将导致设备性能逐渐恶化,进入故障率快速增加的上升阶段,此时极易发生设备损坏。

对应设备失效的浴盆曲线,变压器老化过程可以采用 5 参数 Weibull 函数进行模拟,具体形式为

$$\lambda_{trans}^t = h \left[\frac{\beta_1}{\alpha_1} \left(\frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1 - 1} + \frac{\beta_2}{\alpha_2} \left(\frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2 - 1} \right] \quad (8)$$

式中: h 为平稳阶段的相关参数; α_1 、 β_1 分别为下降阶段的尺度参数与形状参数,且 $\beta_1 < 1$; α_2 、 β_2 分别为上升阶段的尺度参数与形状参数,且 $\beta_2 > 1$ 。各参数取值可以参见文献^[16]。

综合考虑以上因素的影响,根据月停运时间 T_m 可以得到变压器所在负荷点的月度电量不足期望,进而计算出第 i 年的用户停电成本

$$E_{out}^t = P_{d,t} T_m^t \quad (9)$$

$$C_{out}^i = \sum_{t=1}^{12} (V^t P_{d,t} T_m^t) \quad (10)$$

1.4 退役处理成本

变压器的退役处理成本主要包括报废成本和设备残值。报废成本是指卸载退役变压器所需的人力、物力费用以及处理退役变压器时产生的污染治理费用;设备残值是指变压器报废后的可回收费用,通常根据变压器退役报废时的市场情况对设备残值进行评估^[13]。变压器的退役处理成本为

$$C_{rt} = C_{sc} - C_{res} \quad (11)$$

式中: C_{sc} 表示变压器的报废成本; C_{res} 为变压器残值。

由于变压器的 LCC 是在较长时期内连续产生的费用, 在计算过程中需要考虑资金的时间价值。在计算变压器第 k 年的 LCC 时, 应按照确定的折现率和通货膨胀率将变压器全寿命周期内的各项成本折算至设备购置初期的现值, 并进行加和

$$C_{LCC}^k = C_{cap} + \sum_{i=1}^k \left[(C_{om}^i + C_{out}^i) \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^{i-1} \right] + C_{rt} \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^{k-1} \quad (12)$$

式中: C_{LCC}^k 为变压器第 k 年的 LCC; r 为通货膨胀率; R 为折现率。

综上所述, 本文在变压器 LCC 的计算过程中, 不仅考虑传统成本构成, 而且计及设备服役时间、外部供电可靠率、负荷波动等多项因素的影响, 提出了包含时间、空间、负荷特性等多个维度的变压器经济寿命全面评估框架。需要指出的是, 该评估体系不仅适合 10 kV 配电变压器, 也适合其他类型变压器的 LCC 评估。

2 重载负荷对变压器故障率的影响

在农村配电系统中, 一个突出的特点就是负荷具有鲜明的季节性, 具体来说就是全年平均负荷较低, 而在春节期间负荷激增, 变压器故障率显著增大。因此, 需要针对重载负荷对变压器故障率的影响进行重点分析。

重载负荷对配电变压器运行状态的影响显著, 会造成额外温升, 影响变压器的绝缘性能。根据文献[17-19], 在重载负荷下变压器持续高温运行引起的绝缘老化是变压器发生故障的重要原因。

由于 10 kV 配电变压器的额定容量不超过 6 300 kV·A, 一般采用自然油循环冷却方式^[20], 其绕组热点温度为

$$\theta_h = \theta_0 + \Delta\theta_{otN} \left(\frac{1+q_{ot}^2}{1+R} \right)^x + \Delta\theta_{WN} \beta_i^y \quad (13)$$

式中: θ_0 表示环境温度。根据热老化定律^[21], 变压器的绝缘寿命主要与绕组热点温度有关, 绕组温度每升高 6 °C, 老化率就增加一倍。由于标准配电变压器的基准热点温度为 98 °C, 则相对老化率为

$$\gamma = 2^{(\theta_h - 98)/6} \quad (14)$$

当变压器在 N 个时段下持续重载负荷运行时, 绕组温升引起的额外寿命损失为

$$\Delta L_{loss} = \sum_{i=1}^N (\gamma_i T_i) \quad (15)$$

式中: T_i 为时段 i 的长度。

重载负荷对配电变压器故障率的影响如图 3 所示。按照正常的故障率变化趋势, 当变压器运行 Δt 时段后其故障率将增加 $\Delta\lambda$, 但如果在 Δt 时段内出现重载负荷, 变压器将在一段时间内处于高温运行状态, 导致额外寿命损失, 使得设备运行时间等效向后延长 ΔL_{loss} 。根据设备失效曲线中故障率与运行时间的函数关系, 变压器故障率将相应地增加 $\Delta\lambda_{loss}$, 则 Δt 时段内的总故障率增量为

$$\Delta\lambda' = \Delta\lambda + \Delta\lambda_{loss} \quad (16)$$

可见, 重载负荷造成变压器额外寿命损失的具体形式是导致设备故障率在短时间内大幅度增加。

将以上理论具体应用到农村配电变压器的评估中, 可以看到由春节返乡潮引起的用电负荷激增不仅增加了供电压力, 还可能造成变压器故障率快速升高, 是春节期间农村停电事故频发的主要原因之一。因此, 在对配电变压器进行经济寿命分析的过程中不应忽视春节重载负荷的影响。

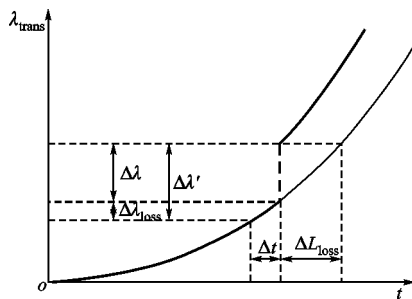


图3 重载负荷对变压器故障率的影响

3 基于风险评估的投资优化方法

当变压器渡过设备老化的平稳阶段后, 即进入预退役状态, 此时应进行成本-收益评估^[22], 以制定合理的变压器更换投资策略。假设某配电变压器在第 y 年进入预退役期, 则该变压器继续运行 k 年产生的全寿命周期成本增量为

$$\Delta C_{LCC}^k = C_{LCC}^{y+k} - C_{LCC}^y \quad (17)$$

式中: C_{LCC}^y 、 C_{LCC}^{y+k} 分别表示变压器预退役年与继续运行 k 年的 LCC。

同时, 因为不更换变压器而节约的投资费用 ΔI_C^k 可以采用变压器初始投资成本的复利公式进行计算

$$\Delta I_C^k = \sum_{i=1}^k \left[(1+r_1)^{i-1} r_1 C_{cap} \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^{i-1} \right] \quad (18)$$

式中: r_1 为储蓄利率。计算结果应折算为变压器预退役年的现值。

当累计节约的投资费用 ΔI_C^k 大于变压器继续

运行产生的成本增量 ΔC_{LCC}^k , 则无需进行变压器更换; 反之, 如果 LCC 增量超过累计节约的投资费用, 说明更换老化变压器可以带来更高的经济效益。因此, 本文提出了更新系数 ξ_k 作为老化变压器更换的直接判据。为了消除容量因素对变压器更换决策的干扰, 计算 ξ_k 时对 ΔC_{LCC}^k 与 ΔI_C^k 进行了单位容量化处理, 具体公式如下

$$\xi_k = \frac{\Delta C_{LCC}^k - \Delta I_C^k}{S_N}$$

(19)

更新系数 ξ_k 越大, 表示更换变压器的需求越迫切。在传统的变压器更换投资决策方法中, 一般以服役时间作为变压器更换的主要依据; 在基于 LCC 与风险分析的变压器更换投资决策方法中, 根据更新系数确定变压器更换的优先次序。以第 k 年的变压器投资方案为例: 按照 ξ_k 对处于预退役状态的变压器进行排序, 优先更换 ξ_k 较大的变压器, 直到资金余额不能满足单台变压器的更换要求。由于不同变压器的投运时间不同, 在排序之前应将不同变压器的 ξ_k 折算为同一基准年的现值。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文以陕西南部地区某农村 10 kV 配电网中 9 台变压器的更换方案为例, 对上述两种方法得到的变压器更换投资方案进行分析与比较。计算变压器 LCC 所需的基本参数如表 2 所示。变压器初始投资中的安装调试费、其他费用分别取购置费的 6.2% 与 11.8%; 运行过程中的功率因数近似取为 0.9, 运检人员费用取能耗费用与检修费用之和的 3%, 变压器平均停运时间为 6 h/次, 当地能耗成本系数、失负荷价值系数分别为 0.5 元/(kW·h) 与 24 元/(kW·h); 退役处理时的报废成本取安装调试费用的 32%, 残值则按购置费用的 5% 计算。根据我国国民经济情况, 通货膨胀率取 4%, 折现率取 8%。

此外, 为了计算运行维护成本, 通过调研得到配电变压器供电区域(台区)负荷与可靠性的情况, 如表 3 所示。其中, 当地供电企业发布的供电可靠率指标可以反映各台区的可靠性水平; 各台区的负荷根据其特性, 大致可以归纳为 4 类, 分别对应表 3 中的负荷类型 1、2、3、4, 如图 4 所示。从图中可以看出, 除了陕南地区普遍存在的冬季峰荷之外, 负荷类型 3、4 还在夏季产生了用电高峰, 负荷类型 1、4 则存在春节负荷激增现象。

表 2 配电变压器基本参数

变压器	型号	投运年	当年购置价格 /万元	更换投资成本 /万元	额定容量 /kV·A	空载损耗 /kW	负载损耗 /kW
T1	S9-M	1990	2.371	4.150	315	0.67	3.65
T2	S9-M	1993	2.371	4.150	315	0.67	3.65
T3	S9-M	1988	2.088	3.653	200	0.48	2.60
T4	S9-M	1988	2.088	3.653	200	0.48	2.60
T5	S9-M	1991	1.557	2.724	160	0.40	2.20
T6	S9-M	1992	1.200	2.100	100	0.29	1.50
T7	S9-M	1991	1.557	2.724	160	0.40	2.20
T8	S9-M	1992	1.200	2.100	100	0.29	1.50
T9	S9-M	1986	2.829	5.095	400	0.80	4.30

表 3 各台区的负荷与可靠性情况

变压器	负荷/kW	负荷类型	年度供电可靠率指标
T1	265	4	0.994 3
T2	265	4	0.994 3
T3	115	1	0.997 4
T4	155	1	0.995 3
T5	120	2	0.996 4
T6	65	1	0.998 5
T7	120	2	0.997 4
T8	65	2	0.998 5
T9	300	3	0.996 4

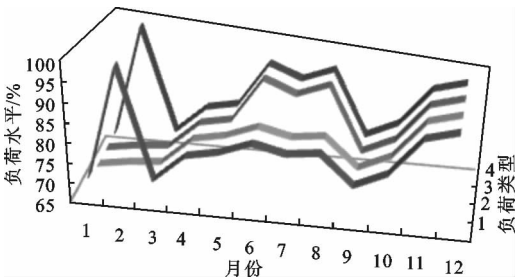


图 4 负荷特性曲线

4.2 变压器更换投资方案的制定与比较

根据厂家提供的信息, S9-M 型配电变压器的正常预期寿命约为 30 a, 一般运行 20 a 后进入预退役期。为了保证该地区的供电服务质量, 计划从 2015 年开始逐步更换这批变压器。为了便于分析与比较, 这里假设每年只完成一台变压器的更换。在上述前提与假设下, 分别采用两种方法确定变压器更换投资方案(以下计算结果中的 LCC 均已折算

为 2015 年的现值)。

4.2.1 基于变压器服役时间的传统决策方法 作为对比,这里给出传统决策方法下的变压器更换方案,即仅依据变压器服役时间长短来决定更换顺序,如表 4 所示。

表 4 传统决策方法下的变压器更换投资方案

年份	建议更换 的变压器	更换 役龄/a	$C_{LCC}/$ 万元	单位容量 LCC/ 万元·(kV·A) ⁻¹
2015	T9	29	886.59	2.216 5
2016	T3	28	238.74	1.193 7
2017	T4	29	571.56	2.857 8
2018	T1	28	1 103.02	3.501 6
2019	T5	28	299.78	1.873 6
2020	T7	29	224.88	1.405 5
2021	T6	29	80.88	0.808 8
2022	T8	29	78.02	0.780 2
2023	T2	30	1 070.50	3.398 4

4.2.2 基于 LCC 与风险分析的变压器更换投资决策方法 采用本文方法,首先根据变压器 LCC 与累计节约投资费用的计算结果,形成 2015—2023 年间的更新系数,见表 5。以表 5 为依据确定变压器更换投资方案,计算结果如表 6 所示。

表 5 更新系数表(2015~2023 年)

年份	ξ_k								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
2015	0.494	0.188	0.231	0.538	0.213	0.067	0.157	0.062	0.538
2016	0.588	0.279	0.263	0.610	0.264	0.089	0.195	0.083	0.594
2017	0.680	0.369	0.295	0.681	0.315	0.111	0.233	0.104	0.650
2018	0.771	0.457	0.327	0.751	0.365	0.134	0.270	0.125	0.705
2019	0.862	0.544	0.358	0.821	0.415	0.156	0.308	0.146	0.761
2020	0.951	0.630	0.390	0.890	0.464	0.178	0.345	0.167	0.816
2021	1.040	0.716	0.421	0.958	0.512	0.201	0.382	0.188	0.871
2022	1.129	0.800	0.453	1.027	0.560	0.223	0.419	0.209	0.926
2023	1.216	0.883	0.485	1.095	0.608	0.246	0.456	0.231	0.981

比较表 4、表 6 可以看出,两种方法得到的变压器更换投资方案存在明显差异。总体而言,传统方案仍遵循了优先更换高龄变压器的原则,如运行时间较长的 T1、T4、T9 号变压器的更换时间早于其他变压器。

与传统决策方法不同,本文方法综合考虑了区域供电可靠率、春节重载负荷等因素的影响。例如,

T2 号变压器比 T3 号变压器晚投运 5 a,但由于 T2 号变压器所在台区的供电可靠率水平低于 T3,且其运行过程中受到了春节重载负荷的影响,因此产生的单位容量 LCC 大于 T3 号变压器,应优先予以更换;如果单纯按照服役时间进行更换决策,应优先更换 T3 号变压器,而继续运行的 T2 号变压器将在延迟更换期内产生更多的额外费用,造成更换方案总体经济效益的下降。

表 6 基于 LCC 与风险分析的变压器更换投资方案

年份	建议更换 的变压器	更换 役龄/a	$C_{LCC}/$ 万元	单位容量 LCC/ 万元·(kV·A) ⁻¹
2015	T4	27	542.68	2.713 4
2016	T9	30	909.33	2.273 3
2017	T1	27	1 074.16	3.410 0
2018	T2	25	935.77	2.970 7
2019	T5	28	299.78	1.873 6
2020	T3	32	264.61	1.323 1
2021	T7	30	230.91	1.443 2
2022	T6	30	83.21	0.832 1
2023	T8	31	80.24	0.802 4

经过进一步计算得到,传统变压器更换投资方案的总成本为 4 553.98 万元,采用本文方法总成本为 4 420.70 万元,节约成本为 133.28 万元,节约比例达到 2.93%,提高了变压器更换投资的经济效益。

4.3 影响配电变压器经济寿命的关键因素

4.3.1 服役时间 T1、T2 号变压器的型号相同,且由于安装位置在地理位置上比较接近,所在台区的供电可靠性水平基本相同,主要区别在于 T1 号变压器比 T2 号变压器早 3 a 投运。比较两台变压器的 LCC 曲线,如图 5 所示。

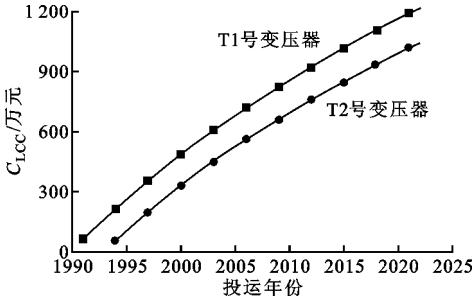


图 5 服役时间对变压器经济寿命的影响

不难发现,变压器 LCC 随服役时间单调递增。同时,T1 号与 T2 号变压器 LCC 之间的差距随着运行时间的增加没有明显变化,说明服役时间仍然

是影响变压器经济寿命的重要原因。

4.3.2 外部供电可靠率 T5号与T7号变压器的型号相同,但外部供电可靠率有较大差异,比较两台变压器的LCC,如图6所示。

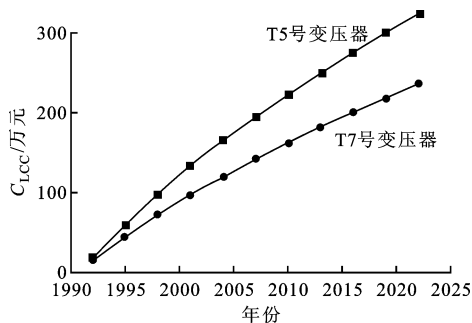


图6 供电可靠率对变压器经济寿命的影响

根据表3,T5号变压器所在台区的供电可靠率指标低于T7号变压器所在台区,说明T5所在台区的可靠性水平较低。根据图6,T5号变压器的LCC高于T7号变压器,且两者之间的差距随着运行时间推移而逐渐增大,说明外部供电可靠率对配电变压器的经济寿命有着较为明显的影响。

4.3.3 重载负荷 T6号与T8号变压器的基本参数及外部供电可靠率情况基本相同,但T6号变压器所在台区在春节期间出现负荷激增。两台变压器的LCC曲线如图7所示。

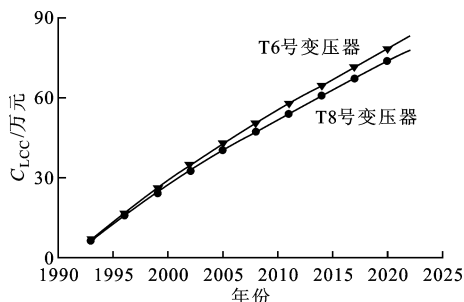


图7 重载负荷对变压器经济寿命的影响

从图7中可以看出,在重载负荷作用下,变压器的LCC增加导致设备经济寿命缩短;由表6可知,T6号变压器的更换役龄小于T8号变压器。因此,春节返乡潮等原因引发的重载负荷加速了农村配电变压器的老化更换进程。

5 结论

为了解决农村配网改造中的10 kV变压器更换问题,本文提出了一种基于LCC与风险分析的配电变压器更换投资决策方法。该方法通过分析变压器全寿命周期各项成本,从时间、空间、负荷特性等

多个维度对变压器的经济寿命作出评估,并以更新系数作为变压器更换的主要依据。算例结果表明,根据本文方法得到的变压器更换方案能够综合考虑服役时间、外部供电可靠率、重载负荷等因素对配电变压器经济寿命的影响,较仅以服役时间为依据的传统投资策略更为科学有效,且明显提高了变压器更换投资的经济效益。由于农村10 kV配电网中变压器数量庞大,该方法取得的总体效益将比较可观。

但是,本文对配电变压器经济寿命的估计仍偏于保守,主要原因是未考虑检修、维护等活动对设备老化的延缓作用。在后续研究中,将进一步完善设备故障率变化模型,并尝试将本文所提方法应用于其他配电设施的更换决策中。

参考文献:

- [1] 史京楠,韩红丽,徐涛. 全寿命周期成本分析在变电工程规划设计中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 63-66.
SHI Jingnan, HAN Hongli, XU Tao. Application of life cycle cost analysis in planning design of power transformation projects[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 63-66.
- [2] 郝洵. 基于全寿命周期成本的变压器技改经济评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [3] 马骏,韩天祥,姚明,等. 泰和变电站220kV GIS设备改造LCC计算后评估研究[J]. 华东电力, 2005, 22(12): 15-19.
MA Jun, HAN Tianxiang, YAO Ming, et al. Expost evaluation on LCC calculation for Taihe substation 220 kV GIS retrofit[J]. East China Electric Power, 2005, 22(12): 15-19.
- [4] 梅志农,袁思吟,韩天祥,等. 上海世博变电站工程中的LCC实践[J]. 上海电力, 2009(3): 242-245.
MEI Zhinong, YUAN Siyin, HAN Tianxiang, et al. Practice of LCC theory at Shanghai World Expo substation[J]. Shanghai Power, 2009(3): 242-245.
- [5] 滕乐天,李力,韩天祥. 以LCC理念进行可靠性管理的探讨与实践[J]. 上海电力, 2005(1): 65-67.
TENG Letian, LI Li, HAN Tianxiang. Discussion and practice of reliability management with LCC theory[J]. Shanghai Power, 2005(1): 65-67.
- [6] 王建. 全寿命周期成本理论在电力设备投资决策中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [7] 李涛,马薇,黄晓蓓. 基于全寿命周期成本理论的变电设备管理[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 50-53.
LI Tao, MA Wei, HUANG Xiaopei. Power transformation equipment management based on life cycle cost

- theory [J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 50-53.
- [8] 夏成军, 邱桂华, 黄冬燕, 等. 电力变压器全寿命周期成本模型及灵敏度分析 [J]. 华东电力, 2012, 40(1): 26-30.
- XIA Chengjun, QIU Guihua, HUANG Dongyan, et al. Life cycle cost model and sensitivity analysis of power transformer [J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 26-30.
- [9] 王成福. 变压器经济寿命评估及经济运行方式优选的方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [10] 刘有为, 马麟, 吴立远, 等. 电力变压器经济寿命模型及应用实例 [J]. 电网技术, 2012, 36(10): 235-240.
- LIU Youwei, MA Lin, WU Liyuan, et al. Economic life model of power transformer and its application [J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 235-240.
- [11] 黄晨宏. 上海电网更换高能耗变压器的技术经济性分析 [J]. 电力需求侧管理, 2010(1): 53-56.
- HUANG Chenhong. Technical and economic analysis of replacing Shanghai power grid high-energy-consumption transformers [J]. Power Demand Side Management, 2010(1): 53-56.
- [12] 冯长有, 王锡凡, 别朝红, 等. 基于系统可靠性评估的机组检修规划模型 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(8): 80-84, 106.
- FENG Changyou, WANG Xifan, BIE Zhaohong, et al. Unit maintenance scheduling model based on system reliability [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(8): 80-84, 106.
- [13] 罗晓初, 李乐, 魏志连, 等. 全寿命周期成本理论在配电变压器改造投资决策中的应用 [J]. 电网技术, 2011, 35(2): 207-211.
- LUO Xiaochu, LI Le, WEI Zhilian, et al. Applications of life cycle cost theory in decision-making of investment for distribution transformers renovation [J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 207-211.
- [14] 翟博龙, 黄绪勇, 孙鹏, 等. 基于可靠度的电力变压器寿命分析 [J]. 电网技术, 2011, 35(5): 127-131.
- ZHAI Bolong, HUANG Xuyong, SUN Peng, et al. Service life analysis of power transformer based on reliability [J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 127-131.
- [15] 张翔, 宋子彤, 杨致慧, 等. 一种基于负载率和设备检测信息的油浸式变压器故障率模型 [J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1159-1165.
- ZHANG Xiang, SONG Zitong, YANG Zhihui, et al. A failure model for oil-immersed transformer based on load factor and equipment inspection information [J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1159-1165.
- [16] FENG Changyou, WANG Xifan. A competitive mechanism of unit maintenance scheduling in a deregulated environment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 351-359.
- [17] WANG Jianxue, LU Jianming, BIE Zhaohong, et al. Long-term maintenance scheduling of smart distribution system through a PSO-TS algorithm [J]. Journal of Applied Mathematics, 2014: 694086 [2015-01-02]. <http://www.hindawi.com/journals/jam/2014/694086/>
- [18] WOUTERS P A A F, VAN SCHIJNDEL A, WETZER J M. Remaining lifetime modeling of power transformers: individual assets and fleets [J]. Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(3): 45-51.
- [19] 任双赞, 钟力生, 于钦学, 等. 变压器油加速热老化过程中的多参量相关-回归分析 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(10): 88-92.
- REN Shuangzan, ZHONG Lisheng, YU Qinxue, et al. Multi-parameter correlation-regression analysis for transformer oil under accelerating thermal aging [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(10): 88-92.
- [20] 陈书敏, 石玉美. 变压器及其冷却方式简介 [J]. 变压器, 2010, 47(4): 50-53.
- CHEN Shumin, SHI Yumei. Brief introduction of transformer and its cooling modes [J]. Transformer, 2010, 47(4): 50-53.
- [21] 熊信银, 律方成, 李永刚, 等. 发电厂电气部分 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 323-324.
- [22] LI Wenyuan, CHOUDHURY P. Probabilistic transmission planning [J]. Power and Energy Magazine, 2007, 5(5): 46-53.

(编辑 杜秀杰)