DOI: 10.7667/PSPC180551

基于动态数据的输变电设备全寿命周期成本分析

辛建波[1]，康 琛[1]，陈 田[1]，刘明军[2]，周求宽[1]，刘玉婷[1]，陈 文[1]

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院，江西 南昌 330043；2. 国网江西省电力有限公司，江西 南昌 330043)

摘要：针对电力设备全寿命周期成本分析所用的基础数据不准确的问题，提出了基于动态数据的输变电设备全寿命周期成本分析。首先分析了输变电设备全寿命周期的特点，研究了输变电设备全寿命周期成本组成和具体的计算公式。接着研究了电力信息大平台背景下，采用数据驱动方式实现输变电设备全寿命周期成本分析所需的动态数据。介绍了基于动态数据的输变电设备全寿命周期成本分析的具体流程。最后，通过案例验证了所提方法的有效性。

关键词：输变电设备；全寿命；成本分析；数据驱动

Life cycle cost analysis of power transmission and transformation equipment based on dynamic data

XIN Jianbo[1], KANG Chen[1], CHEN Tian[1], LIU Mingjun[2], ZHOU Qiukuan[1], LIU Yuting[1], CHEN Wen[1]

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330043, China;
2. State Grid Jiangxi Electric Power Company Ltd., Nanchang 330043, China)

Abstract: In view of the inaccurate problem of the basic data used in the life cycle cost analysis of power equipment, the life cycle cost analysis of transmission and transformation equipment based on dynamic data is proposed. Firstly, the characteristics of life cycle of transmission and transformation equipment are analyzed, and the life cycle cost composition and specific calculation formula of transmission and transformation equipment are studied. Next, this paper studies the dynamic data needed to realize the life-cycle cost analysis of transmission and transformation equipment under the background of power information platform. It also introduces the specific process of life cycle cost analysis based on dynamic data for transmission and transformation equipment. Finally, the validity of the method is verified through a case study.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangxi Electric Power Company (No. 52182016001J).

Key words: transmission and transformation equipment; life cycle; cost analysis; data driven

0 引言

当前输变电设备大多仍沿袭定期检修和报废的管理模式，由于只是按照固定时间进行输变电设备的检修和报废，没有充分考虑输变电设备运行状况和运行环境的差异性，很难做到在合适的时机进行相应的输变电设备管理，容易出现缺检或过检等问题，愈发难以适应输变电设备的管理需求[1-3]。

随着输变电设备的精益化管理的不断深入，输变电设备全寿命周期管理逐步得到了电力行业的重视，已有学者陆续开展了相关领域的研究[5-8]。文献[9]从设备寿命周期费用的角度，结合 Weibull 寿命分布，用 Monte- Carlo 方法模拟设备运行中的故障情况，在此基础上分析了设备在寿命周期内的现金流问题，为选择电力设备维修方案提供了经济依据 。文献[10]研究了电网公司资产全寿命周期费用模型，将灰色系统理论引入到管理的全寿命周期费用建模，建立了电网公司资产管理的全寿命周期费用模型。文献[11]分析了传统资产管理中存在的问题，并运用资产全寿命周期理论，对全周期安全管理、全周期效能管理和全周期成本管理进行了分析，建立了电网公司资产全寿命周期评估模型。文献[12]

基金项目：国网江西省电力公司科技项目(52182016001J)

以全寿命周期成本理论为基础，对变电设备运行全过程的相关费用进行拆分，通过线性回归分析法对20组影响变电设备安全运行的成本因子数据进行分析，建立了变电设备的全寿命周期成本模型。

尽管目前针对输变电设备的全寿命周期管理已开展了许多卓有成效的研究，但是研究集中于全寿命周期管理方法，都假设设备费用、维修费用等基础数据不变的前提下所做的成本分析。

而实际的输变电设备全寿命周期管理涉及的设备费用、维修费用等成本是动态变化的，因此，现有的静态数据所分析出的全寿命周期成本，只能看作当前静态基础数据对应时刻的最优全寿命周期成本，若作为输变电设备投入运行过程中的成本分析，并不准确[13-14]。

本文将采用大数据思维，借助当前电网公司正在大力发展的输变电信息一体化平台[15]，以数据驱动方式，从输变电信息一体化平台中获得全寿命周期成本的动态基础数据，用于实时地计算全寿命周期成本，从而更好地支撑输变电设备的全寿命周期管理。

1 全寿命周期

输配电设备的全寿命周期过程，是指考虑到输配电设备寿命历程的所有环节，在输配电设备的设计和运行过程中，综合输配电设备的可靠性和经济性等因素，选择输配电设备最优的寿命周期。全寿命周期意味着，要全盘考虑输配电设备的规划、设计、生产、经销、运行、使用、维修保养、直到回收再用处置的全寿命周期过程[16]。

输变电设备的全寿命周期成本管理，实现的目标包括：① 经济最优化，在满足可靠运行的基础上，输变电设备在运行过程中，所用到的总费用最小，成本最低；② 可靠性最大化，因为输变电设备的缺陷引起的缺陷损失成本最低，该损失不仅指设备自身的费用损失，还包括设备缺陷导致的停电造成的社会经济甚至社会影响等综合损失的成本。

输变电设备的全寿命周期成本管理，就是输变电设备在满足可靠性基础上，实现整个设备运行过程中总费用的最小化，是经济属性和可靠属性的统一。

传统的输变电设备成本分析，通常只重视输变电设备初期的投入费用，而忽视了设备运行成本乃至设备故障损失造成的整个电网停电成本。实际上，输变电设备的后期使用时，运行成本已经远超初期投入成本，如果加上停电成本，则设备初期投入费用在整个设备成本中所占的比重可能小很多。

全寿命周期成本分析中，综合考虑输变电设备运行过程中产生的所有费用，设备总费用 OC 涵盖了初次投入成本 IC、运行成本 RC、缺陷损失成本 CC、报废成本 SC，如图 1 所示。输变电设备的总费用表达式为

$$OC = IC + RC + CC + SC \tag{1}$$

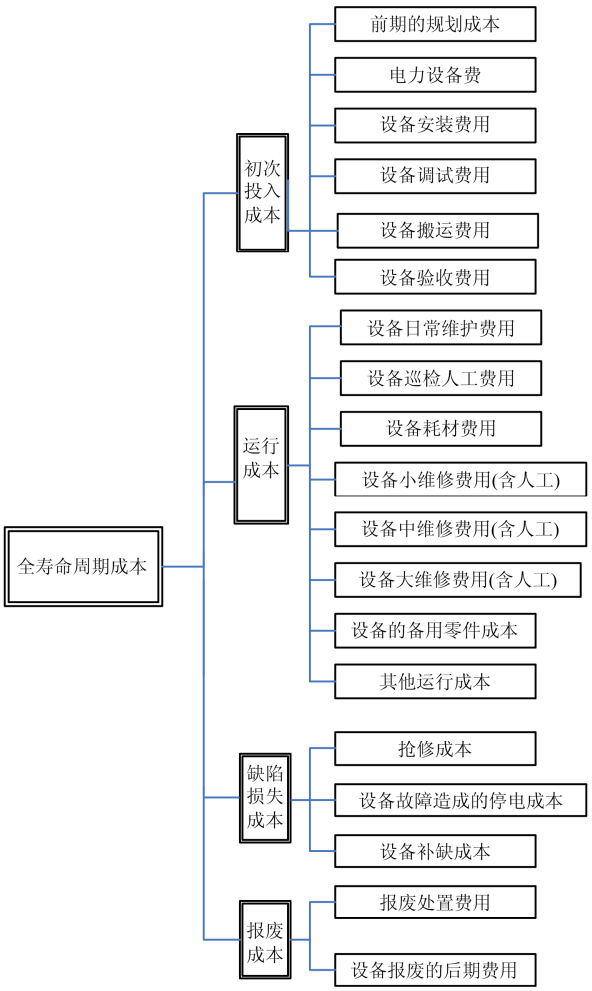


图 1 全寿命周期成本

Fig. 1 Life cycle cost

输变电设备初次投入成本 IC 较为固定，主要包括前期的规划成本、电力设备费、设备安装费用、设备调试费用、设备搬运费用、设备验收费用。在输变电设备投入运行后，该费用的绝对值就已经完成并且保持不变，但在整个全寿命周期成本所占的费用比例会因为设备运行成本的变化而变化。

因为输变电设备运行成本 RC 占据的比重较大，而且可变性较大，是全寿命周期成本的关键单元。输变电设备运行成本较为复杂，主要包括设备日常维护费用、设备巡检人工费用、设备耗材费用、设备小维修费用(含人工)、设备中维修费用(含人

工)、设备大维修费用(含人工)、设备的备用零件成本和其他运行成本。

输变电设备的报废成本相对简单，主要包括报废处置费用和设备报废的后期费用等成本，由于该费用实际发生在设备报废后，因此全寿命周期成本计算时，只是利用当前数据进行成本推算。

上述的输变电设备全寿命周期成本组成，都是从输变电设备自身费用的角度考虑的。而缺陷损失成本 CC 组成则更为复杂，不仅包含了设备自身费用，还包括了设备所处电网的停电成本，具体涵盖了抢修成本、设备故障造成的停电成本和设备补缺成本等。

本节重点分析设备故障造成的停电成本，从经济性角度分析, 设备故障造成的停电成本可表示为

$$FC = E_{\mathrm{LOL}} \times C_{\mathrm{P}} \tag{2}$$

式中：C_{P} 为停电时期的电价；E_{LOL} 为负荷损失期望，相关计算见式(3)。

$$E_{\mathrm{LOL}} = Q_{\mathrm{LOL}} \times T \times f \tag{3}$$

式中：Q_{LOL} 为切负荷量；T 为切负荷持续时间；f 为故障频率，相关计算见式(4)。

$$f = \frac{p}{1 + pr} \tag{4}$$

式中：p 为故障概率；r 为故障恢复时间。

全寿命周期费用的计算难点之一，就在于如何对较为分散的寿命周期各个不同阶段成本进行较为精确计算[17]，而这取决于设备日常维护费用等基础数据的准确性。由于电力市场化的推进[18]，全寿命周期费用计算所用到的基础数据，会随着市场变化而波动，全寿命周期成本也应该随着最新基础数据的变化而更新。

因此，本文将借助于输变电大数据系统，以数据驱动方式，从输变电一体化信息系统获得当前的基础数据，并实时计算出更为准确的全寿命周期成本。

2　支撑技术

2.1 电力信息大平台

随着智能电网建设的推进，信息技术在电网中扮演更加重要的角色，各种类型的电力信息系统也投入电网应用，但各种信息系统需要解决信息的兼容性，以实现信息的共享，否则很容易形成“信息孤岛”的问题。

针对电网信息的融合问题，电网公司正在推进电力信息大平台建设，借助于统一的信息化平台，实现以往分散在各个电力信息系统的各项服务功能[19]。

电力信息大平台整合了电力信息功能，成为整个电力二次系统的中心节点，负责电力信息收集、整合、状态监控和资源调度等功能。电力信息大平台示例如图 2 所示，涵盖了 GIS 系统、PMS 系统、EMS 系统、风险评估系统、生产调度、营销管理、故障报修等多个服务功能，通过信息集成技术，将上述信息服务功能集成到综合数据平台中，并通过信息交互总线进行信息的无缝对接，同时提供信息交互接口，供电力高级应用系统方便地调用所需的信息数据。

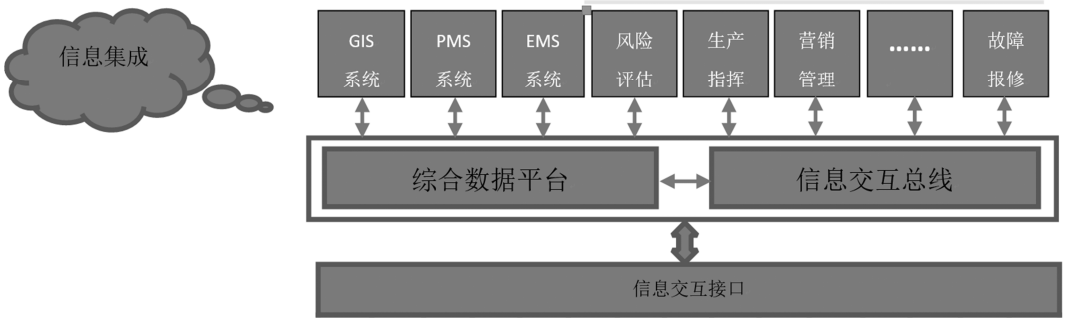


图 2 电力信息大平台

Fig. 2 Power information platform

电力信息大平台为输变电设备全寿命周期成本计算提供了实时的基础数据，解决了直接影响成本分析准确度的“数据源”问题[20]。

全寿命周期成本应用程序通过电力信息大平台，获取成本分析所需的实时数据，主要涉及从电力信息大平台的设备运行和管理区域，获取相应输变电设备的运行状态数据，实时获取当前设备的健康情况，为寿命周期成本计算提供技术支持；同时从电力信息大平台的采购区域，获悉当前时刻的维修人力成本和维修零部件等成本；从电力信息大平台的营销区域，获取当前时刻的电价成本信息。通过动态地获取上述信息，便可实时计算输变电设备

的全寿命周期成本，并为后续的输变电设备的成本评估和维修策略提供依据。

需要注意的是，按电力信息的重要性、实时性和信息类别等因素，从信息安全和及时响应的角度，将当前电力信息进行了分区管理，对 整个二次系统 分为四个安全工作区，进行总体的安全防护策略部署：实时控制区(安全区I)、非控制生产区(安全区II)、生产管理区(安全区 III)、管理信息区(安全区 IV)。

本文研究的电力信息大平台，仍将遵循上述原则，采用“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的电力信息安全策略，并在此基础上，将原先较为孤立的各个电力信息应用系统融入到电力信息大平台，并提供统一的数据管理方式和应用调用接口。

2.2 数据驱动

借助于电力信息大平台，电力系统形成一个汇集了多个数据源、数据量庞大的统一系统，这为输变电设备管理提供了可用于多个电力高级应用功能共享的全局信息，消除了电力信息孤岛甚至信息不一致的问题。

利用电力信息大平台所提供的大数据，可方便地实现输变电设备的状态监控和成本分析。但随着电力信息大平台汇集的数据日益增多，很容易出现数据庞杂但有价值数据被忽略的窘境，有效的数据分析与处理技术显得十分重要[21]。

数据驱动作为近年来信息领域的重要技术，能够从庞大的数据系统中，根据信息间的内在联系，挑选有价值的信息。数据驱动能够综合利用电力信息大平台的历史数据和实时数据，可挖掘输变电设备状态数据、采购数据和维修成本数据间的联系[21]。

利用数据驱动方式，结合输变电设备全寿命周期成本的理论知识，构建输变电设备的分析模型和计算公式，提高输变电设备全寿命周期成本的计算精度。

因此，采用数据驱动方式，综合利用电力信息大平台的多源数据，有望实现输变电设备全寿命周期成本的精确计算。同时，电力信息大平台采用数据驱动方式，实时更新电力信息大平台的数据，提升全寿命周期成本计算所需数据的有效性。

基于数据驱动的输变电设备全寿命周期成本分析，如图 3 所示，新数据进入电力信息大平台时，新数据一方面更新原有的旧数据，另一方面作为动态数据，供输变电设备全寿命周期成本分析做选择。从而选择最新的数据源，代入全寿命周期成本公式，计算对应输变电设备的最优寿命时间。

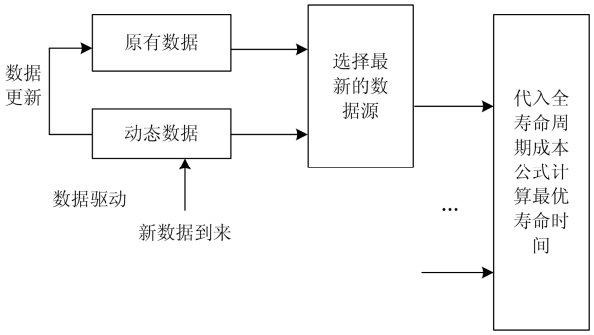


图 3 全寿命周期成本分析的数据驱动

Fig. 3 Data driven analysis of life cycle cost

3 实现流程

输变电设备全寿命周期成本分析基于电力信息大平台，电力信息大平台汇集了设备资产管理系统、设备集成数据库和设备运行数据库，为输变电设备全寿命周期成本分析提供数据支撑。输变电设备全寿命周期成本分析基于数据驱动，具体流程如图 4 所示。

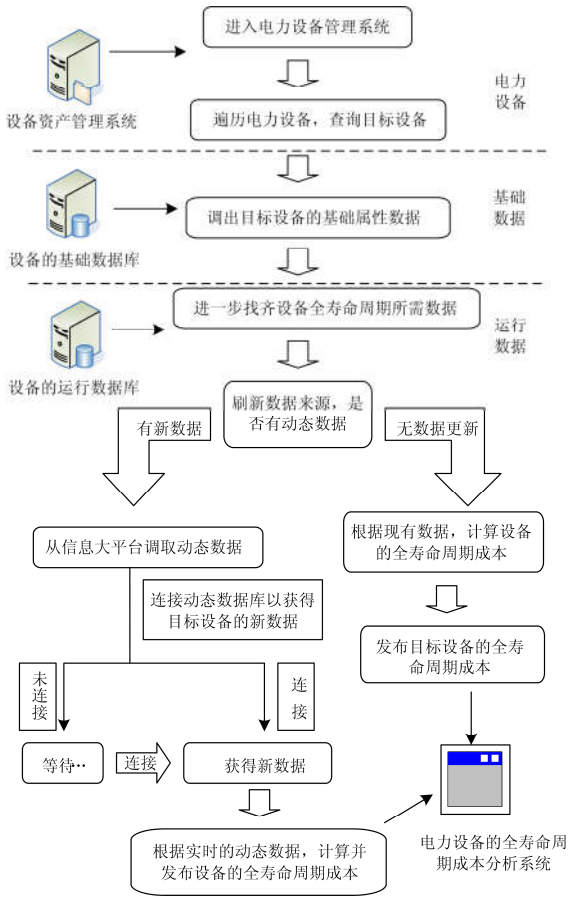


图 4 实现流程

Fig. 4 Implementation process

流程主要包括：

1) 调用触发输变电设备成本分析的应用程序，将触发输变电设备全寿命周期成本计算过程。首先进入输变电设备资产管理系统，遍历相关的输变电设备，并查询对应的目标输变电设备。

2) 找到对应的目标输变电设备后，进入输变电设备基础数据库。输变电设备基础数据库提供了输变电设备的设备费用、投运日期、使用年限、维修次数、维修费用等记录。

3) 进入输变电设备的运行数据库，找齐输变电设备全寿命周期成本计算所需的数据。该数据具有较强的时变性特征，包括反映设备健康情况的实时运行状态数据、当前时刻的设备维修的零件费用和人工成本等动态数据。

该类数据的更新实时性直接关系输变电设备成本计算的精确度。采用基于数据驱动方式，不断刷新数据来源，判断是否有新数据到来。

若有新数据到来，则从电力信息大平台中调取动态的新数据，连接动态数据库以获得目标输配电设备的新数据。如果暂时连接不上动态数据库，则等待动态数据库，直至连接上动态数据库后获得相关的新数据。根据所获得的新数据，计算相应输变电设备的全寿命周期成本。

若无数据更新，则根据现有数据，计算相应输变电设备的全寿命周期成本。

4) 通过上述步骤，保证参与输变电设备的全寿命周期成本计算的数据，来自于电力信息大平台的最新数据，数据源具有实时性，从而保证全寿命周期成本计算的准确性。在计算得到输变电设备的全寿命周期成本后，以可视化形式展现成本分析结果，提出相应输变电设备的最优寿命周期，并可以进一步结合维修策略，给出检修建议供现场运行人员参考。

4　算例

算例分析选取已投入运行的某 220 kV 电力变压器，采用本文所提方法，对输变电设备全寿命周期成本进行分析，220 kV 电力变压器的变压器模型参数和基础成本等数据来源于文献[22]，如表 1 所示。

注意到表 1 所列的电力变压器维修方法仍采用定期检修的方式；而且表 1 中所列的参数，是依据该电力变压器刚投入运行时所建立的，根据当时的参数，分析得出该电力变压器的寿命周期为 25 年。

实际上，表中所列的参数是随着该电力变压器投入年限、运行状况的变化而变化的；而且停电造成的损失等费用，无法依靠传统的电力信息系统嵌入到该电力变压器的全寿命周期成本分析中。因此，下述情景中将借助电力信息大平台，采用本文方法进行输变电全寿命周期成本分析。

表 1 某 220 kV 电力变压器参数

Table 1 A 220 kV power transformer parameters

全寿命周期成本的数据源	具体数值
容量/MVA	180
预计寿命/年	25
预计报废时间/年	25
空载损耗系数/%	0.066 4
负载损耗系数/%	0.586 5
大修平均周期/年	3
大修比例增加/%	8.55
初始投资成本/万元	1513
预防性试验周期/年	3
预计残值率/%	5%
退役清理成本/万元	1.5
回收净残值/万元	41
年计划停电时间/h	10
年实际停电时间/h	12
初始年运行人工成本/万元	4.64
初始年运行其他成本/万元	0
初始年运行保险费/万元	0
初始年贷款利息/万元	0
平均一次临检人工成本/万元	2.45
平均一次临检机械成本/万元	0.17
平均一次临检材料成本/万元	0.64
平均一次临检其他成本/万元	0.26
平均一次大修人工成本/万元	5.45
平均一次大修机械成本/万元	0.32
平均一次大修材料成本/万元	0.99
平均一次大修装置成本/万元	12.04
平均一次大修其他成本/万元	1.26
预防性试验人工成本/万元	6.98
预防性试验机械成本/万元	0.44
预防性试验材料成本/万元	1.27
预防性试验其他成本/万元	2.28
平均年修复成本/万元	0.89
平均年修复时间/小时/万元	8.6

情景 1：随着社会人力成本和劳动技能要求不断提高，输配电设备的维修人工成本不断上升。若该电力变压器仍然沿袭定期检修方式，假设当前的人工成本相较于表 1 所列的该电力变压器刚投运时的成本，增加了 1 倍，则基于该人工成本的动态数据，代入本文的输变电成本计算公式，得到最优的全寿命周期为 23.75 年。

这表明，在该电力变压器初期投入成本相对固定的情况下，随着人工维护成本的增加，电力变压器的运行成本不断增加，尤其当电力变压器使用年限越长，后期的维护成本也增加，在整个全寿命周

期成本的比重也会增加，尤其随着同类新设备的成本降低时，此时可考虑提前更换设备。

情景 2：随着输配电自动化和智能化水平不断提高，电力配备陆续增加了实时监控设备，大幅提高了电力变压器的故障事前检测和预防水平，降低了电力变压器的故障发生概率，从而也减少了电力变压器的维修成本。

当该电力变压器采用状态检修方式进行该电力变压器的维护工作，用本文方法计算该电力变压器的寿命周期成本，得到最优的全寿命周期为 32.7 年，大幅度提高了该电力变压器的使用年限。

由此可见，尽管人工成本的增加动态地反映在该电力变压器的寿命周期成本中，但由于考虑了该电力变压器实时的运行状态，并采用状态维修策略，事实上大幅降低了该电力变压器运行成本和故障预防成本。

5 结论

在输变电全寿命周期成本分析中，为了能够将分散的寿命周期中各个不同阶段的成本进行较为精确的计算，提出了基于动态数据的输变电设备全寿命周期成本分析方法。该方法借助于电力信息大平台，采用数据驱动方式，实现输变电全寿命周期成本分析，所用动态数据具有实时性，保证了输变电全寿命周期成本分析的准确性。

参考文献

[1] 许婧, 王晶, 高峰, 等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 48-52.
XU Jing, WANG Jing, GAO Feng, et al. A survey of condition based maintenance technology for electric power equipments[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 48-52.

[2] 马仲能, 钟立华, 卢铠, 等. 基于电力设备全寿命周期成本最优的检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 34-39.
MA Zhongneng, ZHONG Lihua, LU Kai, et al. Study on the maintenance strategy of power equipment based on the optimal life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 34-39.

[3] 张成林, 王克英. 变电设备状态检修现状与展望[J]. 供用电, 2006, 23(6): 1-3, 18.
ZHANG Chenglin, WANG Keying. Substation equipment condition-based maintenance status and prospects[J]. Utilization & Distribution, 2006, 23(6): 1-3, 18.

[4] 田继伟, 王布宏, 李夏. 智能电网状态维持拓扑攻击及其对经济运行的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 50-56.
TIAN Jiwei, WANG Buhong, LI Xia. State preserving topology attacks and its impact on economic operation of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 50-56.

[5] 郭基伟, 谢敬东, 唐国庆. 电力设备管理中的寿命周期费用分析[J]. 高电压技术, 2003, 34(29): 13-15.
GUO Jiwei, XIE Jingdong, TANG Guoqing. Analysis on electric power equipment management life cycle cost[J]. High Voltage Technology, 2003, 34(29): 13-15.

[6] 王月月, 陈民铀, 姜振超, 等. 基于云理论的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 71-77.
WANG Yueyue, CHEN Minyou, JIANG Zhenchao, et al. A state assessment method for secondary equipment in intelligent substation based on cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 71-77.

[7] 梁唐杰, 谢庆, 柳春芳, 等. 基于全寿命周期理论和云物元理论的配电网规划综合效益的评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 12-17.
LIANG Tangjie, XIE Qing, LIU Chunfang, et al. Comprehensive benefit evaluation of distribution network planning based on the life cycle cost theory and the cloud matter element theory[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 12-17.

[8] 申泉, 赵谦. 智能变电站全生命周期内 IED 即插即用技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 162-167.
SHEN Quan, ZHAO Qian. PNP technology of IEDs for whole life cycle of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 162-167.

[9] 郭基伟, 谢敬东, 唐国庆. 电力设备管理中的寿命周期费用分析[J]. 高电压技术, 2003, 34(29): 13-15.
GUO Jiwei, XIE Jingdong, TANG Guoqing. Analysis on electric power equipment management life cycle cost[J]. High Voltage Technology, 2003, 34(29): 13-15.

[10] 赖佳栋. 电网公司资产管理模型及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
LAI Jiadong. Power grid corp asset management model and application research[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

[11] 魏新杰, 徐茂文, 唐欣. 资产全寿命周期管理在电力生产工作中的应用[J]. 中小企业管理与科技, 2012(16): 40-41.
WEI Xinjie, XU Maowen, TANG Xin. Application of facility life cycle management in power production[J].

Management & Technology of SME, 2012(16): 40-41.

[12] 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 Xiaobei. Power transformation equipment management based on life cycle cost theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 50-53.

[13] 唐维, 陈友熙, 王子龙, 等. 基于不完整数据的变压器全生命周期成本[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(1): 42-49.
TANG Wei, CHEN Youxi, WANG Zilong, et al. Life cycle cost assessment for transformer based on incomplete records[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(1): 42-49.

[14] 徐敏, 刘井萍, 左重华, 等. 变电设备状态检修中试验数据的处理方法探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 91-93, 98.
XU Min, LIU Jingping, ZUO Chonghua, et al. Researches on test data processing method in electric equipments maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 91-93, 98.

[15] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 927-935.
SONG Yaqi, ZHOU Guoliang, ZHU Yongli. Present status and challenges of big data processing in smart grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 927-935.

[16] JUN H K, KIM J H. Life cycle cost modeling for railway vehicle[C] // Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, October 8-11, 2007, Seoul, Korea: 1989-1994.

[17] NILSSON J, BERTLING L. Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems-life cycle cost analysis for two case studies[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 223-229.

[18] 李晅, 马瑞, 罗阳. 基于 Stackelberg 博弈的微网价格型需求响应及供电定价优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 88-95.
LI Xuan, MA Rui, LUO Yang. Price-based demand response of micro-grid and optimal pricing strategy based on Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 88-95.

[19] 王继业, 季知祥, 史梦洁, 等. 智能配用电大数据需求分析与应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1829-1835.
WANG Jiye, JI Zhixiang, SHI Mengjie, et al. Scenario analysis and application research on big data in smart power distribution and consumption systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1829-1835.

[20] 王树鹏. 设备寿命周期费用研究及其应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
WANG Shupeng. Research and application of equipment life cycle cost[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007.

[21] HINOW M, MEVISSEN M. Substation maintenance strategy adaptation for life-cycle cost reduction using genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 197-204.

[22] 徐玉琴, 任正, 詹翔灵, 等. 电力变压器全寿命周期成本建模及其综合敏感性分析[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(6): 80-87.
XU Yuqin, REN Zheng, ZHAN Xiangling, et al. Life cycle cost model and comprehensive sensitivity analysis of power transformer[J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(6): 80-87.

收稿日期：2018-05-11；　修回日期：2018-07-03

作者简介：

辛建波(1970—)，男，博士，教授级高工，主要研究方向为供电和配电；

康　琛(1987—)，男，硕士，工程师，主要研究方向为设备状态检测；E-mail: jick2008357@163.com

陈　田(1986—)，男，博士，工程师，主要研究方向为复合绝缘子状态评估与诊断。

(编辑　张爱琴)