

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.006

火电项目节能评估要点探讨

梁思伟

(中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司, 南宁 530023)

摘要: 目前开展火电项目节能评估报告编制工作的主要有专业咨询公司和电力设计院, 设计院在编写报告时, 往往有较多疑问, 报告审查返修的内容也较多。结合《固定资产投资项目节能评估工作指南(2014年本)》, 根据作者参与节能报告编写审查过程的体会, 对报告编写要点进行论述, 供电力设计同行参考。

关键词: 节能评估; 超低排放; 供电煤耗; 厂用电率

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0026-06

Discuss on Key Points of Energy Saving Evaluation for Thermal Power Projects

LIANG Siwei

(China Energy Engineering Group Guangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanning 530023, China)

Abstract: Nowadays energy conservation estimate is carried out by professional consulting companies or electric power design institutes. When electric power design institutes carry out this job, they often meet questions and difficulties. In this paper, combining with the “Energy conservation estimate and review guide of fixed assets investment projects (2014)”, according to the experience of report writing and reviewing, the author discusses the key points on the report for reference for the electric power design designers.

Key words: energy conservation estimate; ultra-low emissions; net coal consumption

2010年11月1日《固定资产投资项目节能评估和审查暂行办法》实施以来, 节能评估报告审查跟环境影响报告一样, 作为项目核准前置条件, 在项目建设中有着十分重要的地位。节能评估工作随之越来越受到重视, 2011年国家节能中心发布了《固定资产投资项目节能评估工作指南》, 相关工作有了规范性依据, 大大推动了这项工作, 为我国建设节能型社会起到了很大作用。经过几年的实践, 节能评估工作积累了越来越多的经验, 经过不断总结改进, 2014年4月, 国家节能中心发布《固定资产投资项目节能评估工作指南(2014年本)》^[1], 该指南对评估报告深度和广度要求大幅提高, 能评报告对项目指导作用大大加强。虽然2014年12月29

日, 国务院办公厅印发《精简审批事项规范中介服务实行企业投资项目网上并联核准制度工作方案的通知》, 能评报告审批不再作为项目核准前置条件, 但节能与环保作为社会发展的两大主题, 项目建设能评仍十分值得重视。

火电厂作为重大“耗能”大户, 其能评工作更重要, 指南2014年本专列的三个行业篇章就有火电专篇, 其对报告编写的章节内容规定得很详细, 本文不作赘述, 只对相关的要点进行探讨。

1 评估报告“前言”部分要点

1.1 “节能评估报告”内涵

初次接触节能评估报告编写工作的同行往往会从“节能评估”字面上认为编写节能评估报告就是对项目建设方案能源利用状况进行分析, 评价其用能合理性, 做出结论。实际上, 这只是节能评估报告一方面的工作, 而且还是相对次要和简单的工作, 节能评估更重要的工作体现在指南“评估原则”的

收稿日期: 2015-06-17

作者简介: 梁思伟(1970), 男, 广西平南人, 高级工程师, 注册咨询工程师, 注册公用设备工程师, 双学士, 主要从事电力设计工作 (e-mail) liangsw9@gxed.com。

“专业性”要求“提出针对性的节能措施”和“实操性”要求“根据项目特点，提出科学、合理、可操作的节能措施，建设方案、用能工艺调整意见和能源计量器具配备方案，为下一阶段设计、招标及施工、验收考核等提供依据”。如果编写人员不能把握这点，其报告必然是不合格的。

关于报告编写的阶段，一些同行会认为节能评估报告是项目可研报告编写后进行的一项工作，其输入依据就是项目可研报告，这并不完全正确。由于我国项目建设的复杂性，有的项目在编写节能评估报告时主机已招标，有的甚至初步设计已经完成……节能评估报告要以项目建设当前的进展情况作为输入内容，这也是报告中“能评前”和“能评后”的划分依据。

1.2 “评估范围”确定

指南要求“评估范围与项目申请报告一致”，即节能评估报告既不能超出申请报告范围，又不能漏掉申请报告范围的内容。

对于新建项目，煤场、码头、铁路等围墙外系统和设施，如果与项目申请捆绑一起，不管由哪个设计院负责，均应列入评估范围。对于电力设计院来说，评估的难点是码头和铁路，它们有其对应的评估规范，如码头，就有《港口基本建设(技术改造)工程项目设计能源综合单耗评价》作为其评估依据。扩建项目，则要注意与老厂共用部分设施的清晰划分，如化水、输煤等。

范围划分不是一个很简单的问题，牵涉到厂用电的分摊，评价对标标准的调整，能效水平的判断等，需要足够重视。

1.3 “评估依据”甄选

根据指南，评估依据主要有三类：一与政府相关的法律、法规、规章；二是与行业相关的规程规范，标准；三是与工程相关的技术资料和设计文件。

节能评估是一项政策性很强的工作，一定要注意相关依据的时效性，在火电项目评估中，以前最重要的依据是《国家发改委关于燃煤电站项目规划和建设有关要求的通知》，也就是常说的864号文，但这个文件是十年前出台的，后续又有了《产业结构调整指导目录》、《大气污染防治行动计划》、《煤电节能减排升级与行动计划(2014—2020年)》等一系列文件，有冲突的内容要用最新的文件作为

评估依据。如864号文要求“机组单机原则上应为60万千瓦及以上，机组发电煤耗控制在286克标准煤/千瓦(gce/kW)以下”(1 $\text{gce}=29.307\text{ kJ}$)，而行动计划要求为“新建机组原则上采用60万千瓦及以上超超临界机组”，评估中要与时俱进。

能效指标评价的标准方面，主要依据是国家节能中心的《火电行业能效评价技术依据》，其来源于国内现有机组实际运行数据及建设机组设计数据，反映当前我国火电能效水平，是最完整和权威的；其次为中电联每年的机组竞赛数据，反映了当前我国火电机组实际运行的整体能效水平，也可以作为判断依据。

1.4 “所在地情况”收集

“所在地情况”反映省市两级的社会经济文化发展状况、项目所在地交通水文气象情况、项目建设区规划现状、环保等情况。

省市社会经济文化发展状况在资料集中要注重资料的时效性，比如2015年要作的评估，其数据资料应尽可能采用2014年。一般来说，当地政府的和社会发展规划和专项发展规划(如能源发展规划)都会有相关的资料，但规划一般是较为长期的，要保证时效性，还要注意从每年的政府工作报告等文件获取数据。

项目所在地交通水文气象情况资料，一般从可研报告等文件可以获取，要注意的是与节能密切相关的气候、风和冷却水温度等因素要突出论述，评估其对节能的利弊。

项目建设区规划和现状资料一般从可研报告等文件也可获取，尤要注意的是热电联产是机组提高能效最有效的方式，对于项目所在区域的供热现状和供热规划要重点进行论述，评估项目热电联产的可能性。

所在地执行的环保排放标准，在主要标准是《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)，另外各省市特别是东部沿海省市还执行更加严格的地方标准，此外，《煤电节能减排升级与行动计划(2014—2020年)》发布后，不少企业向东部地区靠齐，提出了接近燃机排放甚至于更加严格的标准。由于同等条件下提高排放标准必然会增加能耗，这需要评估单位与项目业主充分沟通，在满足国家标准的前提下确定项目执行的标准作为评估方案。

2 评估报告四大主要内容要点

2.1 建设方案评估要点

指南建议：对于用能系统采取首先说明工艺方案、设备参数；其次从节能角度查找问题，形成评估意见；再次提出具体改进方案；最后计算设备能效指标进行评价。评估的重点在方案评估、改进方案和指标计算。建设方案评估绝不能简单根据可研报告等文件的系统方案描述罗列了事，需要把握的原则是：应根据电厂工艺流程、关键耗能环节，紧紧抓住重点，对能评前不够优化、有较大节能潜力的工艺系统和设备进行详细分析，提出有实操性的优化方案。

主机选型评估是系统评估的重点，当前新建项目基本都是超临界机组，是否选用二次再热，主汽参数如何选择需要重点论述。汽轮机和发电机属于定型产品，主要根据机组技术成熟性、材料可靠性等条件进行论述，做出评价。锅炉是个性化的设计，是主机选型评估的重点，评估时要根据“实操性”要求，对煤质进行详细分析，分析其利于和不利于机组选型优化的因素，评估锅炉选型的科学性和可行性。如挥发分、含硫量等指标对锅炉选型有重大影响，要详细分析其含量变化对提高蒸汽参数、提高效率的影响。锅炉效率合理性、可靠性是重点中的重点，目前大型烟煤锅炉效率已达94%以上，评估需要提供类似工程实例说明本项目锅炉效率实现的可靠性。

总平面布置节能评估，本章节内容在指南2014版中已经弱化，不再要求对规划选址进行评估，在评估时从节能角度对不同功能分区及管线通道、总平面水平布置(包括竖向布置)方案等合理性进行评估分析，提出优化建议即可。对于直流湿冷机组，循环水泵电耗占较大份额，循环水取水方式要重点评估。

运煤系统：关键点是清晰划分评估范围，对于煤场设置在电厂外，扩建项目等更是如此。输送皮带、筛碎设备等要按照初步设计的深度要求进行设备选型核算，评估其合理性。指南将码头列入附属设施的章节，如果其在项目建设范围内，对于从事电力设计的同行，其工艺合理性及卸船机等设备选型及评估是工作的难点，要与相关设计院密切配合，进行科学评估。

锅炉及其辅机在电厂工艺流程是耗能最大的系统之一，通常其节能潜力也是最大的，所以这是建设方案评估重点^[2-3]。先进的节能措施如烟气余热利用、磨煤机动态分离器、等离子或微油点火、除尘器、高频电源、汽动引风机等是否适用于本工程都要充分研判；磨煤机及密封风机、三大风机等设备要按照初步设计深度进行选型计算，评估其合理性。除尘及脱硫脱硝系统要根据本工程污染物排放标准配置，如果是超低排放，其技术路线对节能的影响较大，能耗和环保本身是一对矛盾的指标，是否有新的技术既能满足环保指标又能减少能耗？像布袋除尘还是电除尘，湿式除尘还是高效除雾，新技术不断涌现，评估人员要凭借其专业知识进行分析评估。脱硫系统的主要辅机也要按初步设计深度进行容量计算及评估。

汽机系统也是火电厂重要的系统，但其系统配置方案比较成熟，通用性较强。给水泵是该系统的耗能大户，其配置方案评估是重点，要从单泵技术发展等方面评估其适用性；华东电力设计院与上汽厂对回热系统进行了优化研究，有先进的技术成果，可针对实际工程判断是否适用。凝结水泵变频已经是一种常规设置，按二拖一还是一拖一配置？

管道系统，主要是温降降压的控制，除了规范作为依据外，国内一些电厂具备更先进的指标。冷端损失是电厂工艺流程中最大的能源损失，要详细评估，根据水文气象、汽轮机热平衡、电价等资料综合比较，确定合适设计背压，冷凝器面积和循环水泵参数等。

电气系统比较成熟，其耗损在电厂系统中不占重要地位，而且大多有规范限定，如《三相变压器能效限定值及节能评价》等，一般情况下只要根据相关规范要求对照，评估其是否符合节能的要求，进行优化即可。

水处理系统、压缩空气系统、保温油漆、信息系统等都比较简单，根据目前较先进的系统进行系统和设备对照评估即可。需要指出的是2014版指南对建筑节能提出了较高要求，要计算主要建筑物单位面积综合能耗，这部分报告要完全满足指南要求有一定困难，笔者认为实际评估中可适当灵活处理。

大型用能设备要进行容量和能效评估，设备耗电率评估，其范围和要求工作指南都有说明，需要

注意防止使用过期标准，防止超出规范适用范围评估设备。由于部分规范发布时间较早，当前技术水平已优于规范，推荐设备应参照近期同类设备先进水平提出。对于没有规范作为依据的设备（如锅炉，磨煤机等），指南要求与同类机组先进水平对标，所谓同类机组先进水平，可以从近期同类型国内示范项目、新投产项目、通过初设审查项目和招投标项目以及中电联相关统计资料获取。设备耗电率，指南虽然要求详细列出，但笔者认为这指标仅有参考价值，实事求是根据中电联竞赛指标进行对照，给出评价结论即可，评估中不必过多考虑单个设备耗电率水平是否低于参考工程。

能源器具配备方案节能评估的内容比较简单，根据指南要求编写即可，但由于输入资料不足，有时项目进展还不足以获取某些计量器具的具体规格，可参考同类工程开列。

2.2 节能措施评估要点

节能措施评估分为能评前和能评后两部分，重点是能评阶段提出的措施。节能措施强调的是节能效果，措施的投资不可能也不需要进行分析，但应与业主和电厂主体设计院沟通，结合经济效益考虑其适用性。主要节能措施通过广泛收集本行业和相关行业技术信息得到（如码头岸电技术就是近年大发展的码头节能技术）。主要的节能措施，要进行详细节能效益计算，措施的节能“产出”减去耗能“输入”为收益，收益要统一折算为年节约标煤量。表1列出了部分主要节能措施和节能效果。

计算节能措施效果要注意，有的节能措施针对设计工况，有的节能措施针对运行工况，运行工况节能措施只是为了使其尽量接近设计工况，其节能效果不能累计。如凝汽器真空保持技术，只是使凝汽器真空接近设计值，合计节能措施节煤量时，不能既计算冷端优化的节煤量，又计算真空保持技术的节煤量。

节能管理方案评估根据《能源管理体系要求》和《工业企业能源管理导则》等规范要求进行评估^[4]，指南有说明，不做赘述。

2.3 能源利用状况核算及能效水平评估要点

本章是节能评估报告主要结论部分，项目是否满足国家相关节能政策指标要求，是否能通过审查，下一阶段控制指标及项目验收依据都在本章节

表1 主要节能措施

Tab. 1 Some main energy saving measures

节能措施	节能效果
提高主机参数	主蒸汽压力提高 1 MPa；机组热耗率降低 0.15%；主蒸汽温度每升高 10 ℃；机组热耗率降低 0.25%。高温再热蒸汽温度每升高 10 ℃，机组热耗率降低 0.20%。
循环冷却水冷端优化	设计背压附近，汽轮机背压每降低 1 kPa，汽轮机热耗降低 0.4%
烟气余热回收利用	烟气温度每降低 10 ℃，加热凝结水，汽机热耗约降低 15 kJ/kWh
节能点火稳燃系统（等离子或微油）	对比传统油系统，节油 90% ~ 95%
空预器设计及密封新技术（四分仓+柔性密封）	减少空预器漏风率 3 个百分点
电除尘器节能提效控制技术（高频电源+闭环控制）	节能达到 70%
磨煤机动态分离器技术	降低磨煤电耗 10% 以上
中央空调节能系统（智能控制+全自动清洗）	降低能耗 50% 以上

注：表中所列效果为大概数据，不同机组不同工况会有所变化。

体现。如果说“实操性”是建设方案和节能措施评估的核心要求，那“科学性”就是本章节核心要求。“科学性”体现在数据来源科学、对比标准科学、评估结论科学三个层次。

能源利用状况核算要求对能评前和能评后情况分别进行用能核算（含指标核算和能源消费量核算），重点是能评后核算。能评前只要求做设计工况核算，数据来源只要求提供依据或出处。而能评后除了要进行设计指标核算，纯凝机组还要进行估算运行指标核算。

能评后锅炉效率、汽轮机热耗率，厂用电率三个基础数据要根据相关基本参数进行计算（核算）。锅炉效率可以参照《电站锅炉性能试验原理方法及计算》^[5]，根据煤质特性，锅炉进风参数、排烟参数、漏风参数、灰渣参数等计算；汽轮机热耗可以参考《火力发电厂技术经济指标计算方法》（DL/T 904）^[6]，根据进汽参数、抽汽回热系统参数、排汽参数、减温水参数核算；厂用电率根据能评后建设方案各系统厂用电率合计，节能中心“指标 6”不建议采用轴功率法计算。

利用小时数对机组估算能效指标有较大影响，

可参照中电联最近年份统计的同等级机组平均年利用小时数确定,也可参照本地区最近年规模以上机组年利用小时数确定。运行小时分配按照节能中心“指标6”确定,汽轮机热耗根据100%THA、75%THA、50%THA不同负荷数值考虑,厂用电率没有按不同负荷考虑的要求。

年综合能源消费量,燃煤消耗量应根据发电煤耗和机组容量计算,不能采用设计中习惯的锅炉BMCR耗煤量,电力生产消费的其他能源要根据项目评估范围计算,如码头若有耗油设施,则不要遗漏。年综合能源消费量要计算当量值和等价值,电的当量值折标系数为固定值 0.1229 gce/kWh ,等价值的折标系数为发电煤耗,各工程不同。能量平衡表和平衡图按照《企业能量平衡表编制方法》(GB/T 28751)和《企业能量平衡网络图绘制方法》(GB/T 28749)绘制,这两个标准目前有效版本是2012年的。

能效水平评估根据《火电行业能效评价技术依据》进行,评价的核心指标为供电煤耗,参考指标为发电煤耗和厂用电率。核心指标反映全厂整体能源利用水平,评价要以此指标为准,参考指标反映火电厂工序设备能效水平,仅起“参考”作用。国内电厂运行管理人员由于历史的原因,一直比较重视厂用电率,但如果以厂用电率作为电厂能效水平评价指标,可能会产生“扭曲”:比如引风机电耗是全厂耗电大户,特别是引增合一系统,其厂用电率会超过0.8%,单从厂用电率看,采用汽动引风机,节能收效明显,但从全厂看,电动机效率较高,大型汽轮机效率高于小型汽轮机,采用汽动引风机方案,当引风机汽轮机排汽不能对外供热时,凝结水能耗也要增加,汽动方案全厂能效水平不一定高于电动方案。还需要注意的是2014年5月份发布的《火电行业能效评价技术依据》仅保留了空冷机组的“修正系数”,2013版的煤质、脱硫、脱硝等修正系数都不再考虑。此外,能效评估还可以将估算运行值与中电联最近发布的机组竞赛数据对标,作为参考。

2.4 能源消费影响评估要点

能源消费影响是通过计算项目对所在地的 m 值和 n 值,判断项目对所在地消费增量影响和节能目标影响。“当地”指省级和市级。由于目前各省、市能源消费总量都是采用等价值口径核算的,所以本

章计算要以等价值为准。

所在地能源消费增量控制目标和节能目标可通过查询当地“十二五规划纲要”、国家和各省发布的统计年鉴、各省实施《节约能源法》方案、各地能源发展“十二五”规划、节能减排规划、政府工作报告等获得。目前国内统计数据比较混乱,如果没有数据,可通过GDP基值,规划年增长率、能源消耗总量基值、节能目标等计算。举例如下。

某市2010年GDP为401亿元,“十二五”年均增长13%,2010年综合能源消费量345万吨标煤,“十二五”GDP节能目标11%,求2015年单位GDP能耗和综合能源消费量,计算流程如下:

1)“十二五”期间GDP年均增长目标13%, $p=5$ 年。

2)预测2015年 $GDP=401 \times (1+13\%)^5=739$ (亿元)。

3)2010年GDP能耗 $=345 \div 401=0.86$ (tce/万元),其中 $1 \text{ tce}=29.307 \text{ GJ}$ 。

4)预测2015年GDP能耗 $=0.86 \times (1-11\%)=0.765$ (tce/万元)。

5)预测2015年综合能源消费量 $=0.7654 \times 739=566(10^4 \text{ tce/年})$ 。

6)该市能源消费增量控制目标 $=566-345=221(10^4 \text{ tce/年})$ 。

7)根据节能中心网站“能评在线”栏目2012年7月的解答:“在节能评审阶段,项目是否可以通过审批核准程序还是未知数,是否应包含在其所在地“十二五”末的各项预测数据中也存在疑问,以“十二五”预测数据来做计算基础不尽适宜。结合现有条件下可以获得的实际数据,认为可以通过测算项目增加值能耗对所在地“十一五”末单位GDP能耗的影响程度,来定量分析项目对所在地单位GDP能耗的影响。”所以 n 值公式: $n=[(a+d)/(b+e)-c]/c$ 中, a, b, c 均取当地2010年的数值。

但2014年10月“能评在线”回答相似问题时,指出“结合现有条件下可以获得的实际数据,认为可以通过测算项目增加值能耗对所在地“十二五”末单位GDP能耗的影响程度,来定量分析项目对所在地单位GDP能耗的影响”,上述公式 a, b, c 均取当地2013年的数值。

由此,笔者认为 n 值计算 a, b, c 取实际可得

前一年度权威数据, d , e 取为该项目的投产年数值。另需注意 n 值有可能为负, 判断时按照“ $n \leq 0.1$ ”, 判断为“影响较小”。

3 两个待探讨的问题

3.1 厂用电范围调整

厂用电率影响供电煤耗计算和项目能效水平评价, 由于项目评估范围与建设范围一致, 相应的厂用电率涵盖范围也与此一致, 这就导致不同评估范围工程厂用电率的“基准”不同, 如有的工程厂外输煤系统含在项目评估范围, 有的扩建项目根本不考虑输煤系统, 不同基准计算的供电煤耗并不能准确反映项目能效水平。建议相关部门对厂用电计算的范围统一界定, 以确保评估科学性, 计算项目能效时, 围墙外设施全不考虑, 扩建工程按对应机组容量分摊。

3.2 技术经济指标

2014 年本指南总纲“评估概要”的“指标优化对比表”, 有“主要经济技术指标”一项, 由于项目评估通常输入为可研报告, 可研阶段投资收益等指标均为概算值, 仅作为下一阶段控制指标。一般来说节能措施投资对项目影响局部的, 细化计算相关指标比较困难, 进行比较没有意义, 建议“指标优化对比表”取消“主要技术经济指标”, 仅保留与能效能耗密切相关的“主要能效指标”、“能源消费情况”两项。

(上接第 25 页 Continued from Page 25)

4 结论

国内先进电网的建设经验表明, 负荷中心城市的电力供应均主要依靠区外主干交直流通道送入电力, 特别需要指出的是北京和上海电网区内规划建设 500 kV 终端站, 通过加强 220 kV 层面的电网, 可以保障终端站的供电可靠性。

目标网架应该能够很好协调短路电流控制和负荷中心输电能力的要求。为控制 500 kV 主网短路电流, 要求电网结构不能太密集, 而为了增加负荷中心输电能力, 又必然需要新增输电通道, 从而加强电网结构。这两个相互矛盾的要求, 必须通过合理的原则进行协调。这就要求目标网架规划的研究中, 一方面需要简化网架, 断开过于密集的局部电网,

4 结论

火电项目节能评估是一项政策性、专业性、时效性都很强的工作, 电力设计院的强处在于项目建设方案和节能措施评估这两部分内容, 薄弱之处在于对国家、地方节能政策相关信息把握程度、地方能源利用现状和能源消费影响评估等时效性很强的内容, 此外对评审专家关注的重点也不够清楚, 以至于报告普遍质量不高。根据作者的经验, 只要能充分理解节能评估的内涵, 加强对节能政策的领会, 把握好能源消费现状时效性, 紧紧抓住评估的要点, 完全可以编写出高质量的评估报告。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委资源节约和环境保护司, 国家节能中心. 固定资产投资节能评估工作指南(2014 年本) [M]. 北京: 中国市场出版社, 2014.
- [2] 蒋明昌. 火电厂能耗指标分析手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [3] 李青, 潘焰, 宋淑娜. 火力发电厂节能减排手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 中国电力企业联合会环保与资源节约部. 电力行业节能减排法规政策选编 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 赵振宇, 张清峰, 赵振宇. 电站锅炉性能试验原理方法及计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [6] 中国电力企业联合会. 大中型火力发电厂设计规范: GB 50660—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.

(责任编辑 高春萌)

另一方面需要通过增加输电通道加强电网, 有所为和有所不为相结合, 以保证电网安全可靠供电。

参考文献:

- [1] 饶建业, 杜忠明, 陈铮, 等. 广东电网网架形态及远景目标方案 [J]. 广东电力, 2016, 29(3): 38-45.
- [2] 靳晓凌, 张运洲, 尹明, 等. 欧洲电网发展趋势及联网技术路线分析 [J]. 能源技术经济, 2012, 24(4): 19-23.
- [3] 卞学海, 张炜, 徐奇. 我国电网目标网架初探 [J]. 电网技术, 2000, 24(2): 74-81.
- [4] 李晗, 罗建生. 北京电网分层分区与调度运行分析 [J]. 现代电力, 2005, 22(4): 29-33.
- [5] 孔涛, 程浩忠, 王建民, 等. 城市电网网架结构与分区方式的两层多目标联合规划 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 59-66.
- [6] 阮前途. 确保上海电网安全运行的若干思考 [J]. 电网技术, 2005, 29(22): 7-13.
- [7] 深圳供电局有限公司. 深圳远景目标网架研究 [R]. 深圳: 深圳供电局有限公司, 2014.

(责任编辑 郑文棠)