

基于国外现货市场与四川实际的现货市场建设分析

李健华¹,刘继春²,付浩¹,白智丹¹

(1.西南电力设计院有限公司,四川成都 610021;2.四川大学电气工程学院,四川成都 610065)

摘要:现货市场是电力市场建设的关键环节,同时对推进国家电力体制改革、打破电力行业垄断、实现电力资源市场化的合理配置具有重大意义。基于分析国外电力现货市场建设经验,结合四川水电清洁能源大省、电网结构复杂的特点,从市场模式、市场主体、交易品种、电价机制、结算机制以及弃水量大、阻塞断面较多、弃水期与非弃水期市场差异化较大等问题出发,对四川电力现货市场建设进行了思考与分析,为建设具有四川特色的电力现货市场方案提供建议。

关键词:现货市场;四川特色;交易品种;电价机制

中图分类号:TM73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0083-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210218

Analysis of Spot Market Construction Based on Foreign Spot Market and Sichuan Current Situation

Li Jianhua¹, Liu Jichun², Fu hao¹, Bai Zhidan¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The spot market is the key link of power market construction, and it is of great significance to promote the reform of national power system, break the monopoly of power industry and realize the rational allocation of power resources. Based on the construction experiences of foreign electric power spot market, and combined with the characteristics of Sichuan clean energy and complex power grid structure, starting from such problems as market model, market subject, trade variety, electricity price mechanism, settlement mechanism, large amount of abandoned water, more obstruction sections and the big differences between the abandoned water market and the non-abandoned water market, etc, the construction of Sichuan electric power spot market is analyzed, which can provide the suggestions for building a electric power spot market with Sichuan characteristics.

Key words: spot market; sichuan characteristics; trade category; electricity price mechanism

0 引言

自从2020年国家提出电力体制改“打破垄断,引入竞争,提高效率,优化资源配置,构建政府监管下健康发展的电力市场”以来,电力行业已经突破了传统的垄断机制,从根本上改变了计划体制和厂网不分等问题,电力市场多主体竞争的格局初步形成。但同时,电力行业的发展还存在一些尚未解决的难题,主要有以下几点:一是交易机制不完善,资

源利用效率有待提高。售电侧没有引入有效的竞争机制,发电侧和用户侧之间的市场交易量受到限制,市场难以发挥对资源的配置作用。二是电价机制尚未明确,市场主导的定价机制尚未完全形成,现行电价仍以政府定价为主,难以反映市场实时供需状况。三是机制发展不健全,新能源和可再生能源开发利用面临困难,弃风、弃光、弃水现象仍大量存在。

2015年中国开启了新一轮电力改革,新电改总体思路是管住中间,放开两头,在发电侧与用户侧引入竞争,从而解决解决上述资源利用率低、新能源渗

透率低等一系列相关问题^[1-2]。中国在 2020 年全面开启电力现货市场交易,而国外电力现货市场建设已经相对成熟,这对中国研究电力现货市场建设具有重要意义。四川作为电力现货市场建设的 8 个试点之一,借鉴国外电力现货市场建设经验并结合四川实际情况不断完善现货方案,对建设具有四川特色的电力现货市场是尤为重要的^[3]。

1 国外现货市场分析

1.1 美国 PJM 电力现货市场

PJM 是经美国联邦能源管制委员会审批通过的一个独立系统运营商(ISO),目前负责了美国最大、最为复杂的电力市场运营。PJM 现货市场采用全电量模式、日前市场和实时市场组成^[4]。在日前市场,所有的发电机组按各自意愿参与竞价,并申报机组的全部发电量,用户侧需要申报所有的用电需求,市场需要对发用双方申报的曲线进行匹配。美国电力网络较为复杂且存在的阻塞较多,所以采用节点边际电价对日前市场进行结算。实时市场其实是对机组剩余发电能力与实时用电需求重新进行匹配,因此日前市场的交易信息对实时市场的开启尤为重要,但实时市场需要按照实时市场的节点边际电价进行结算。

1.2 英国电力现货市场

英国电力市场以中长期市场为主,采取双边交易的方式,中长期交易电量物理执行。由于其电网结构坚强,网络中的阻塞较少,所以现货市场建设较为简单,由日前交易和实时平衡机制组成。日前市场的交易由发用电双方共同参与报价,市场出清不考虑电力网络中的潮流约束和机组的物理参数,日前市场中所有交易电量按照边际成本价格进行结算^[5]。实时平衡机制是对日前交易的补充,在实时运行阶段,调度中心为了电网的安全,需要考虑真实的网络约束,计算网络中的阻塞,同时需要发电企业申报机组的实际运行参数。在实时平衡机制阶段是按照市场主体的报价(pay as bid, PAB)方法进行结算,即结算价格为发电企业的竞价和用户报价。

1.3 北欧电力现货市场

北欧电力市场成员国拥有挪威、瑞典、芬兰、丹麦,4 个国家的电网已经实现互联。挪威基本全部依靠水力发电,瑞典水电、火电和核电的装机容量相对均衡,芬兰和丹麦火电机组占比较大,各个国家在电源

结构上存在一定的互补性。北欧的大部分电量是在中长期市场实行场外双边交易,且均为物理执行。现货市场则是由日前市场、日内市场和平衡市场组成^[6],实现双边交易之外的电量交易,这部分电量主要集中于日前市场。北欧电力市场被划成多个分区,主要是因为地理因素和各区域之间存在较多阻塞。日前市场分为区内交易和跨区交易,进行出清计算时,分区内部不考虑网络约束,跨区交易需考虑各个分区之间线路的传输能力。日前市场结算时,分区内部采用系统电价进行结算,分区之间进行无约束出清,发现阻塞时则计算各个分区的边际电价对该部分电量进行结算。日前市场结束之后,各个分区线路之间可能会存在剩余的传输能力,则通过日内市场进行交易,日内市场采取撮合定价的电价机制。平衡市场由各国输电运行机构负责,此时需要考虑各自所属区域的真实网络约束和发电机组运行参数。各国输电运行机构在平衡市场阶段则根据机组申报的上调出力、下调出力和对应的报价,分别进行排序,在满足网络约束的条件下,以经济性最优的原则进行调度,按区域内的边际价格进行结算。

1.4 巴西电力现货市场

巴西电力市场主要包括管制交易市场、自由交易市场和短期市场,电力调度中心负责全网集中调度,交易中心负责自由交易。管制交易市场是确保满足普通居民的用电需求,多为中长期交易,约为 70%。自由交易主要以大用户交易为主,约为 25%。短期交易市场作为前两个市场补充,以现货合约为主,保障电力供需平衡,市场份额约 5%。

交易中心将中长期交易合同和短期市场相互关联起来,预测电量与各公司购电合同和售电合同相比较,差额部分在短期交易市场进行平衡。在管制及自由交易市场,清算和结算由买卖双方直接处理。在短期交易市场中,进行多边交易和结算,且引入金融机构担保等多种方式,提高短期交易市场的结算保障能力。

1.5 各国电力现货市场对比分析

英国电网结构坚强,电能资源充足,且电网阻塞程度相对较轻。因此,英国电力现货市场只是为市场成员提供了一个集中式的交易平台,市场规则较为简单。四川电力现货市场处于起步阶段,可以先采用较为简单的市场规则,可参考英国,利用中长期物理执行+现货集中竞价模式。北欧电力市场,水电装机比例较大,电能资源相对充足,电网阻塞主要

存在于部分区域之间的输电断面上,其主要目的在于为北欧各国提供了一个高效便捷的能源输送平台,实现资源的优化配置^[7]。四川与北欧较为相近,同样是水电装机规模比较大,北欧电力市场的交易品种和交易模式存在较多值得借鉴的地方。美国PJM市场电网阻塞较为严重,美国引入了金融输电权等多种机制,后期四川现货市场较为成熟后,可逐步建立金融机制。巴西建立了多种电力市场分别满足不同的用户,四川可借鉴建立分类互补的电力市场,通过用户需求引导发电计划,提高匹配程度。

2 四川现货市场建设特点

四川电源以水电为主,其资源分布特性使电网资源配置、电源和负荷呈现出逆向分布的特点,系统负荷需求主要分布在经济较为发达地区,而电源则主要分布在较为偏远的地区^[8]。四川电网凸显出市场供求关系失衡、电价体系繁多复杂、径流式水电多、调节能力差等特点,加之发电主体成员多、市场成熟度较低,给市场交易组织带来了诸多困难和挑战。

2.1 水火矛盾突出

四川是水电装机大省,水电装机接近80%,火电装机只有17%左右,风电、光伏清洁能源占比较小,如图1所示。同时在经济性方面,龙头水电站与径流式水电站成本差异大,火电机组成本远高于水电机组^[9]。水电企业弃水期弃水量较大,火电企业发电成本高、利用小时数较低、经营困难。以上问题都为现货市场的建设带来了较大的困难。

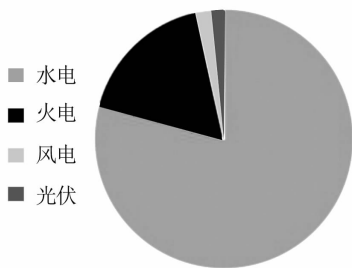


图1 四川电源结构

2.2 季节性供需矛盾突出

“十二五”以来,四川发电装机年均增长为13.2%,而用电增长为5.21%,在装机快速增长和用电需求趋缓的双重压力下,发电企业弃水期弃水严重,参与市场意愿强烈,但枯期动力不足。这与用电侧市场交易意愿无法匹配,导致市场主体利益诉求差异明显,

市场化方案制定困难。

2.3 电价体系繁多复杂

由于历史原因,四川电价体系十分复杂,不同发电企业上网批复电价差异巨大,现有33个电价标准,最低为0.218元/kWh,最高为0.4901元/kWh,加之发电两侧丰枯、峰谷电价浮动和负荷结构的巨大差异,进一步加大了交易的组织难度^[10]。

2.4 电网结构薄弱

四川电网是以500kV网架为骨干、覆盖全省各市州、全电压等级的电力网络。其通过锦苏、复奉、宾金、德宝直流和川渝、川藏交流通道分别与华东、西北、重庆和西藏昌都电网相联,电网地理覆盖范围广泛。鉴于上述四川存在的较多问题,四川电力现货市场建设要结合四川的实际情况,按照积极稳妥、市场主导、安全可靠、有效监督的基本原则进行。

2.5 建设难点分析

根据上述建设特点,四川电力现货市场主要存在以下难点:

1) 弃水量大。四川每年的弃水电量较大,通过开设双边新增电量竞争市场,对新增电量需求且带曲线电力的用户以及国家鼓励发展的新兴行业开放。新兴用户的准入条件可由政府设置,例如水电企业在日前竞价过后,可以针对区间突然来水与新增电量用户再次进行报价,减少弃水量。

2) 水电资源跨省、跨区配置。从各送出通道情况来看,三大特高压以及川渝通道已基本排满,德宝直流通道年度已落实的外送计划约5112GWh,通道利用率仅60%,尚有较大拓展空间。

3) 中长期电量与优先电量分解。采用部分电量交易的现货市场模式,要在保证电网安全的前提下,进行中长期电量与优先电量分解,并在公平的前提下,确保该电量的执行。这是一个较为复杂的问题^[11],建议中长期电量由交易中心分解,优先电量可由调度中心分解。中长期和优先电量分解考虑按日滚动,当月末几天分解的中长期和优先电量高于日前预测负荷时,中长期电量的占比可以在当月的最后几天进行调整,即现货市场竞价空间可以浮动,以确保中长期与优先部分执行。

4) 梯级水电不同业主竞价。四川普遍存在一条梯级流域中的上、下游电站隶属不同主体的现象。各电站独立参与现货市场竞价时,上游电站的竞价结果以及水流的滞时时间会对下游水电站造成影响,导致下游电站竞价困难,面临竞价电量与实发电

量匹配失衡的问题,致使交易结果难以执行,不利于市场稳定和水电资源利用^[12]。针对上述情况,可以采取以下措施:

(1)水电站可以按时间块进行竞价。降低电站竞价的时间尺度要求,只需要在规定的时块之内执行中标电量即可。

(2)龙头水电站竞价。没有调节性能的径流式水电站不参与竞价,考虑水流滞时时间及水能-电能转换关系,即可计算出径流式水电站在各个时段的出力,并进行全额收购。但结算时,径流式水电的电价要按照龙头水电站的竞价进行打折。

(3)龙头水电站、径流式水电站信息共享下的协调竞价。各个电站之间实行信息共享,可以提升来水预测的准确性,进一步确定各个时段水电机组的出力能力。

3 四川电力现货市场建设建议

四川电力现货市场处于起步阶段,所以建设初期主要设置日前市场、实时平衡市场、部分辅助服务市场。同时,需针对四川弃水期弃水量较大、阻塞断面较多、梯级水电站不同主体竞价等问题进行具体分析。

四川是水电装机大省,市场具有明显的季节性特征,所以电力现货市场的建设可分为弃水期与非弃水期两种电力现货市场建设方案。由于在非弃水期,水电资源较少,区间来水难以预测,又考虑到非弃水期不能弃水的刚性要求,火电机组基本处于满发状态,仍需从省外购电才能满足省内用电,所以建议在非弃水期保留现有的清洁能源优先消纳的电网调度运行模式。下面重点探讨弃水期电力现货市场的建设。

3.1 市场模式

从国外电力现货市场分析来看,电力现货市场主要存在两种模式:1)中长期交易采用物理双边合约,剩余部分电量参与现货交易,如英国、北欧普遍采用该模式。该模式较为简单,但不能很好地反映市场价格随供需的变化。2)中长期交易采用双边差价合约,发电企业全部电量均参与现货交易,如美国 PJM 市场模式。该模式的特点是价格能够更加及时地反映市场供求变化,资源配置效率更高,但市场规则复杂,对电网安全运行和用户用电安全等存在较大风险。

四川电力市场建设处于起步阶段,电力交易以计划为主,存在大量的中长期交易品种,现货市场技术支持系统仍不完善,市场成熟度低。建议从现有中长期交易中分出一定比例来进行现货交易,采用发电侧单边开放部分电量模式,将更有利于与现有中长期模式衔接,降低现货市场建设的风险,实现现货市场的稳步推进^[13]。待市场较为成熟后,可以采用全电量优化模式,避免中长期电量分解的难题。

3.2 交易品种

日前市场即是提前一天开展的电力现货市场,是中长期市场的重要衔接。四川现货市场起步阶段,建议建设发电企业单边开放的日前市场,由电网企业进行负荷预测,同时扣除优先电量、留川电量、外送电量及中长期电量后,发布日前市场竞价空间。所有的水电、火电企业均参与竞价,风电、光伏等清洁能源不参与竞价,全额收购。实时平衡市场是提前 1 h 组织开展的市场,是为了平衡日前市场与实时负荷两者之间的偏差^[14]。为简化市场复杂程度,减轻调度人员压力,建议在日前市场之后,组织市场主体参与实时市场的报价,机组申报上调出力、下调出力及相应的价格,在日前进行封存。在实际运行过程中,考虑到径流式水电站区间突然来水或机组可能出现的一些意外状况,在实时平衡市场开启的 1 h 之前,发电企业可以修改上下调出力,但是不改变价格,所以报价曲线应该是两部分,一部分是输出功率的增加,一部分是输出功率的减少。

在市场起步阶段,建议采取强制型辅助服务市场,第二阶段再建立辅助服务市场,可以只开设调频和备用,市场成熟度逐渐加深之后,可增设无功、黑启动等。同时建议火电机组作为辅助服务市场的主要参与者。

3.3 电价机制

根据电力生产和使用的过程,电价具体可以细分为上网电价、输电电价、配电电价和销售电价^[15]。在电力行业垄断阶段的销售电价为

$$\lambda = \frac{C(1+r)}{Q} \quad (1)$$

式中: C 为电力生产成本; r 为利润率; Q 为总电量。

各个国家在建立电力市场之后,通过市场竞争定价,现在主要有 3 种较为成熟的基于边际成本原理的定价方式:边际成本电价、节点边际电价、分区边际电价。

边际成本电价,利用传统经济调度模型求得:

$$\min w = \sum_{i \in N_g} C_i(P_{gi}) \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in N_g} P_{gi} = \sum_{j \in N_d} P_{dj} \quad (3)$$

式中: $C_i(P_{gi})$ 为发电机组*i*的生产成本; P_{gi} 为发电机组*i*的出力; P_{dj} 为用户*j*的需求。

$$\rho = \frac{\partial C_i(P_{gi})}{\partial P_{gi}} \quad (4)$$

式中, ρ 为使系统有功平衡的价格,即边际成本价格。

节点边际电价是在考虑电网阻塞、网损和发电机组边际成本的条件下制定的电价。节点边际电价可由优化模型得出,通用模型为:

$$\max(S_c + S_p) \quad (5)$$

$$\text{s. t. } G(X, P, Q) = 0 \quad (6)$$

$$H(X, P, Q) \leq 0 \quad (7)$$

式中: S_c 为生生产者剩余; S_p 消费者剩余; X 为系统其他参数约束; P 、 Q 分别为节点有功功率和无功功率。式(5)表示社会福利最大化,式(6)表示所有等式约束,式(7)表示所有不等式约束。该模型的最优解即是节点边际电价。

分区电价的提出,是因为电网在运行的过程中阻塞并不是存在于所有地区,而是频繁地出现在部分重要断面上,所以将具有相同或相近边际成本的节点集合,根据分区的结果和分区定价模型,确定各个区域的电价。

四川地区水电资源大部分分布在攀西、康甘等地区,该地区负荷用电量小,水电难以消纳,尤其在弃水期,水电基本处于满发状态。四川电网架构虽然整体较为坚强,但较康甘和攀西地区阻塞较多,导致水电外送困难,不同区域电力供需差异较大,四川电力市场现状与北欧较为相似,所以建议采取分区边际电价进行各个分区交易电量的结算。或者采用较为简单的方式,实行按阻塞断面分区出清与省级出清的两级出清方式,先省级出清,没有成交的剩余部分下放到分区虚拟出清,省级结算按省级的统一出清价格进行结算,分区出清价格与省级出清价格挂钩并下浮一定的比例。关于阻塞问题的处理,也可待市场较为成熟之后,引入金融输电权的方式进行解决。

3.4 结算机制

现货市场的结算机制是现货市场运营的重要内容,合理的结算机制是现货市场平稳发展的根本保障。四川日前市场和实时市场的结算可以采用差价合同的方式进行,即日前市场结算基准曲线与中

期市场结算基准曲线之间的偏差,按日前市场出清价,实行“差价合约”结算。实时市场结算基准曲线与日前市场结算基准曲线之间的偏差,按实时市场出清价,实行“差价合约”结算。发电企业差价合约收入可以表示为

$$S = \sum_{t=1}^T \lambda_t P_{\lambda,t} + \sum_{t=1}^T (\lambda_c - \lambda_t) P_{c,t} \quad (8)$$

式中: $P_{\lambda,t}$ 、 $P_{c,t}$ 分别为实际履行电量和合同电量; λ_t 、 λ_c 分别为*t*时段现货价格和合同价格。

实时平衡市场采取单边报价,不满足安全校核的机组上下调报价自动退出。具体的结算方式为:发电侧上调电量部分按上调现货价格结算;下调电量部分按(日前价格-下调价格)的差价进行结算。上调现货价格为机组增发发电量的交易电价;下调价格则是机组为实现功率平衡而少发的部分电量的交易价格。

辅助服务市场中,备用机组在报价时需要申报上下旋转备用,自动发电控制(automatic generation control, AGC)和实时平衡市场同步报价、分别出清,采用PAB电价机制。

4 结 语

四川作为清洁能源和电力外送大省,弃水期与非弃水期电力供需关系差异化大、水火基础成本差异化大、径流式水电站较多、区间来水难以预测、弃水期弃水量较大等问题均表明了四川电力现货市场建设是十分复杂的。上面通过借鉴国外电力现货市场并从四川实际出发,认为四川电力现货市场建设正处于起步阶段,市场规则不宜复杂,建议在弃水期和非弃水期采取不同的建设方案,建设具有四川特色的电力现货市场。

参考文献

- [1] 白杨,谢乐,夏清,等. 中国推进售电侧市场化的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化,2015,39(14):1-7.
- [2] 戴洁芬,陈沪伟. 新能源参与电力现货市场的过渡机制研究[J]. 浙江电力,2020,39(12):78-84.
- [3] 葛睿,陈龙翔,王铁禹. 中国电力市场建设路径优选及设计[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):10-15.
- [4] 朱继忠. 美国电力市场的发展和实现方法分析[J]. 南方电网技术,2016,10(5):22-28.
- [5] 文安,刘年,黄维芳. 英国电力市场的价格机制分析[J]. 南方电网技术,2015,9(1):1-6.

- [6] 宋永华,孙静. 欧洲的电力市场发展及对中国的启发[J]. 能源技术经济,2008,20(3):1-6.
- [7] 邹鹏,陈启鑫,夏清. 国外电力现货市场建设的逻辑分析及对中国的启示与建议[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):18-27.
- [8] 张宏亮.“十三五”期间四川电力发展面临的问题和几点思考[J]. 四川水利,2017,38(6):71-74.
- [9] 杨卫,吴宏宇. 试论新形势下四川水电市场营销策略[J]. 四川水力发电,2020,39(1):132-134.
- [10] 宋嗣博,郭红霞,杨苹. 基于节点边际电价的电力市场分区策略研究[J]. 电力建设,2017,38(9):132-138.
- [11] 陈雨果,王一,李嘉龙. 双边交易合约电量的分解模型与结果评估[J]. 南方电网技术,2015,9(8):32-37.

- [12] 张粒子,刘方,许通. 多运营主体梯级水电站参与的日前市场出清模型[J]. 电力系统自动化,2018,42(16):104-110.
- [13] 刘治理. 四川上网侧分时电价政策实施效果分析[J]. 中国电力企业管理,2015(17):47-49.
- [14] 刘妍,谭建成. 南方区域大用户参与电力市场交易的现状及展望[J]. 南方电网技术,2017,11(11):68-74.
- [15] 宋嗣博,杨苹,许志荣,等. 基于日前电价预测的机组报价策略[J]. 南方电网技术,2017,11(2):57-62.

作者简介:

李健华(1994),男,硕士研究生,研究方向为电力市场;
刘继春(1975),男,博士,教授,研究方向为电力系统经济性分析与电力市场。 (收稿日期:2020-10-26)

(上接第 72 页)

根据现场解体检查状况及结构分析,造成回路电阻超标、罐体发热的原因因为压气缸外侧的中间触头与连接的铸铝导体接触不良。在通过负荷电流时局部发热,在对流、热辐射作用下,最终导致 A 相断路器罐体及相通气室的上 CT 罐体温度升高。

该断路器中间触头与铸铝导体为螺纹紧固连接,装配过程中中间主触头紧固不到位,在断路器分合闸操作振动及电动力的作用下,导致中间触头松动,触头连接部位接触不良,造成回路电阻增大。

GIS 罐体内大量灰色粉尘可能来源有两种,一是由于局部接触不良,在接触部位产生了局部放电,将铸铝导体和铜触头烧蚀,高温的铜、铝颗粒与 SF₆ 气体在局部放电作用下产生了罐体内部的灰色粉末;二是导电体表面涂的润滑膏为有机物,在高温作用下与 SF₆ 产生反应,生成的碳化或氟化物。

检修人员对该中间触头进行更换处理后,设备回路电阻测试合格;投运后,红外测试无异常。

4 结 语

通过对一起 220 kV 断路器 GIS 壳体发热缺陷的分析处理,详细阐述了该类缺陷的诊断测试及故障分析的流程及方法,对今后该类缺陷的处理具有借鉴意义。同时,对 GIS 设备的运行维护提出以下几点建议:

1) 加强 GIS 设备红外巡视工作。GIS 设备虽无法通过红外测温直接测到内部温度,但是外壳温度在一定程度上可反映内部状况。通常情况下,GIS 设备发热时,内部真实温度远高于外壳显示温度,因此对 GIS 设备红外巡视工作具有重要价值。

2) 断路器作为重要的电力系统设备,当检测到其发热时,必须查明原因,避免设备缺陷发展为电网事故。

3) 加强设备安装工艺质量管控,避免设备存在隐形缺陷。

参考文献

- [1] 丁登伟,高文胜,刘卫东. GIS 中局部放电特高频信号与放电严重程度的关联分析[J]. 高压电器,2014,50(9):6-9.
- [2] 邱炜,刘石. GIS 设备现场交流耐压试验放电故障定位与分析[J]. 四川电力技术,2016,39(5):67-70.
- [3] 邵进,胡武炎,贾凤鸣. 红外热成像技术在电力设备状态检修中的应用[J]. 高压电器,2013,49(1):126-129.
- [4] 徐国政. 高压电器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [5] 陈宝怡. 红外诊断技术在高压断路器内部发生热故障中的应用[J]. 高压电器,2011,47(5):92-95.
- [6] 赵明,李靖翔,赖浩. 气体绝缘全封闭组合电器环流发热原因分析及改进措施研究[J]. 电工技术,2020,41(5):109-112.
- [7] 段辉,颜廷立,王伟. 一起 110 kV GIS 电流互感器气室内部发热故障分析[J]. 山东电力技术,2019,46(7):78-80.
- [8] 范敏,郭文笔,朱文彬. SF₆ 断路器灭弧室发热缺陷分析[J]. 湖南电力,2017,37(6):58-60.
- [9] 杨明昆,马宏明,何顺,等. 发热缺陷下 GIS 内部温度分布数值分析[J]. 云南电力技术,2020,48(1):58-63.

作者简介:

邱 炜(1985),男,硕士,高级工程师,主要从事变电设备检修、技术监督工作;

刘军军(1990),男,硕士,工程师,主要从事变电设备检修、电气试验工作。 (收稿日期:2020-09-27)