

我国太阳能发电开发及消纳相关问题的研究

胡泊, 辛颂旭, 白建华, 张运洲

(国网能源研究院 北京 100052)

摘要: 介绍了我国太阳能发电开发规划、布局特点及存在的问题; 基于建立的光伏发电出力特性指标, 分析了大规模光伏发电并网对电力系统规划提出的新要求; 提出了太阳能发电消纳研究方法, 根据“十二·五”期间西北地区太阳能发电规划目标, 分析了西北电网太阳能消纳能力, 2015年, 西北地区太阳能发电装机规模为1320万kW, 电网调峰能力不能满足光伏、风电等新能源消纳需求, 需要跨区平衡消纳。

关键词: 电力规划; 太阳能发电; 布局; 消纳

中图分类号: TM715; TM615

文献标志码: A

文章编号: 1004-9649(2013)01-0001-06

0 引言

随着技术的进步和成本的降低, 太阳能发电已成为继风电之后可实现大规模开发利用的一种可再生能源。目前, 我国太阳能发电已进入快速增长期的起步阶段, 规模化发展态势明显。但同时也出现了太阳能发电无序建设、与电网规划不同步等问题。本文将针对我国太阳能发电开发规划、布局特点及存在的主要问题, 基于光伏发电出力特性指标分析, 对我国太阳能发电开发及消纳有关问题进行研究。

1 我国太阳能发电现状

1.1 太阳能发电并网容量快速增长

2011年是我国太阳能发电快速发展的一年, 截至2011年年底, 我国太阳能发电并网规模214万kW, 同比增长723%; 并网容量全年新增188万kW, 其中约80%分布在西北地区。

1.2 太阳能发电分布较为集中

目前, 我国分布式光伏发电装机规模还较小, 太阳能发电已有和新增装机以并网型光伏电站为主, 因此分布上呈现较强的资源依赖性。太阳能发电装机主要分布在青海、宁夏、江苏、河北、甘肃和西藏等省(区), 如图1所示。截至2011年年底, 青海省并网太阳能装机容量已达96万kW, 是我国太阳能发电并网容量最大的省。

1.3 太阳能发电发展遇到的主要问题

① 太阳能发电建设存在无序现象。国家未明

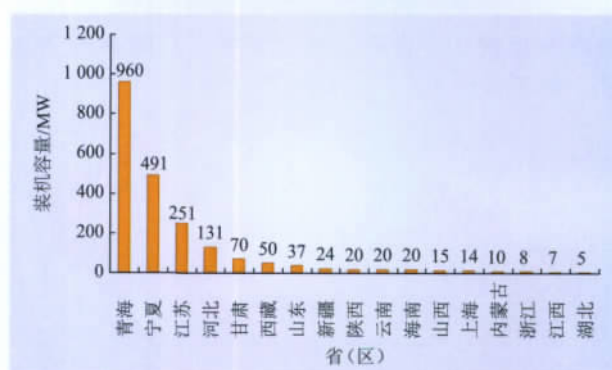


图1 各省(区)太阳能发电并网装机规模
(截至2011年年底)

Fig.1 Solar power generations integrated in each province (at the end of year 2011)

确太阳能发电发展规划的具体布局和开发时序, 加之受2011年7月出台的国家太阳能光伏发电上网电价政策激励, 太阳能发电建设出现了“翻番式”增长。②大规模光伏发电的配套电网规划和建设滞后, 大规模太阳能发电的消纳和送出存在一定难度。③大规模光伏发电的电源配套调峰问题突出。我国太阳能资源富集的西北等地区调峰能力不足, 满足大规模太阳能并网发电的调峰需求存在较大困难。④国内太阳能电站大多处于“自由运行”状态, 自动化、智能化水平较低, 普遍不具备有功无功调节、低电压穿越、发电功率预测以及发电计划申报能力, 无法为电力系统的安全稳定运行提供支撑。⑤光伏发电项目存在并网标准缺失的问题。目前, 国家尚未出台光伏发电接入电力系统的技术规定、运行规则、调度管

收稿日期: 2012-11-25

作者简介: 胡泊(1979—), 男, 湖南衡阳人, 博士, 主要从事能源与电力发展战略、规划及能源技术经济等方面的研究。

E-mail: hubo@sgeri.sgcc.com.cn

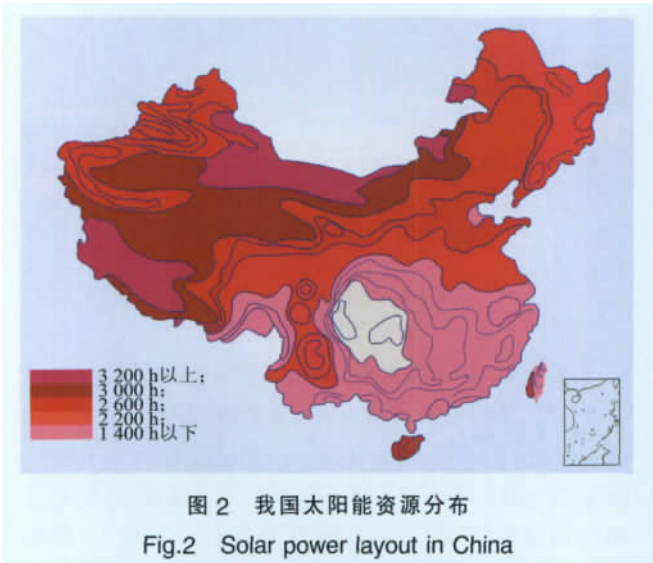
理等相关规范及技术标准，光伏发电发展与电网发展的协调难度加大，发电计划与调度管理工作缺乏依据和考核办法^[1-2]。

2 我国太阳能发电开布局

2.1 我国太阳能资源分布

据估算，我国陆地表面每年接受的太阳辐射能约为 1.47×10^8 亿 kW·h，相当于标准煤 4.9×10^{12} t，约等于上万个三峡工程年发电量的总和。我国各地的太阳能年辐射量达 933~2 330 kW·h/m²，中值为 1 620 kW·h/m²。

我国太阳能资源分布的主要特点是：太阳能的高值中心和低值中心都处在北纬 22°~35°一带，青藏高原是高值中心，四川盆地是低值中心；太阳年辐射总量，西部地区高于东部地区，而且除西藏和新疆 2 个自治区外，基本上是南部低于北部，如图 2 所示。



粗略估计，我国现有建筑屋顶面积总计约 400 亿 m²，假如 1% 安装光伏系统，可安装光伏发电装机容量 3 550 万~6 620 万 kW，年发电量 287 亿~543 亿 kW·h。我国荒漠化土地面积约 264 万 km²，其中干旱区荒漠化土地面积 250 多万 km²，主要分布在光照资源丰富的西北地区。按利用我国戈壁和荒漠面积 3% 的比例计算，太阳能发电可利用资源潜力可达 27 亿 kW，年发电量可达 4.1 万亿 kW·h^[3]。

2.2 我国太阳能开布局

由于资源条件和建设场地限制，长远来看，我国太阳能开发应以大型光伏电站和太阳能热发电集中式开发为主。但据相关规划，2020 年之前会经历一个分布式光伏发电系统迅猛发展的过程。根据 2012 年 7 月国家发展和改革委员会印发的

《可再生能源发展“十二五”规划》，“十二五”期间我国分布式光伏发电系统逐渐成为主要的太阳能发电开发方式，并在 2020 年超过光伏电站的开发规模。

根据上述规划，2015 年，我国太阳能发电装机规模将达 2 100 万 kW，其中光伏电站和分布式光伏发电系统各 1 000 万 kW、太阳能热发电 100 万 kW；2020 年，我国太阳能发电装机规模将达 5 000 万 kW，其中，光伏电站 2 000 万 kW，分布式光伏发电系统 2 700 万 kW，太阳能热发电 300 万 kW。分布式光伏发电系统装机规模占太阳能发电总装机的比重将从 2011 年的 26.9%，上升到 2015 年的 47.6% 和 2020 年的 54%，如表 1 所示。

表 1 不同太阳能发电开发方式的装机规模占比情况
(2011—2020 年)

Tab.1 The ratio of different kinds of solar power generations (2011—2020)

年份	分布式光伏系统	光伏电站	太阳能热发电
2011	26.9	73.0	0.1
2015	47.6	47.6	4.8
2020	54.0	40.0	6.0

综合考虑我国太阳能资源分布、太阳能发电项目前期工作、国家和地方规划等，2015 年 2 100 万 kW 太阳能发电，2020 年 5 000 万 kW 太阳能发电，开布局如表 2 所示。从开布局来看，西北地区由于大型光伏电站的快速发展，其占全国太阳能发电装机的比重保持在 50% 以上，西北作为我国最主要的太阳能发电开发区域的地位未来将长期保持。“三华”受端地区由于分布式光伏发电系统的快速发展，其占全国太阳能发电装机的比重在 2020 年之前将保持在 30% 左右。

表 2 太阳能发电分布情况
(2011—2020 年)

Tab.2 Layout of solar power generations (2011—2020)

年份	西北	东北	华中	华东	华北	南方
2011	75.5	0.0	0.7	13.1	9.0	1.9
2015	62.9	2.4	3.8	14.3	11.9	4.8
2020	56.0	4.0	6.0	14.0	10.0	10.0

3 太阳能发电大规模并网对系统规划提出的新要求

光伏电站并网对系统影响较大，以下主要结合西北地区光伏电站出力特性和发展规划，分析光伏发电大规模并网给电力系统规划带来的影响。

3.1 光伏发电出力特性指标

为较好地提取光伏电站出力的统计特性，满足电力系统规划和运行分析的需要，本文建立了包括光伏电站置信容量、调峰需求度和出力变化率在内的 3 个出力特性评价指标。

(1) 容量置信度。把负荷高峰时段的光伏电站出力按从大到小排序，容量置信度即为在某一保证率下(如 95%)光伏电站的最小出力系数。光伏电站容量置信度主要用于衡量在进行电力平衡分析时，光伏电站可为系统提供的保证容量。

(2) 调峰需求度。将等效负荷曲线(在原负荷曲线上扣除光伏电站自然出力即为等效负荷曲线)的峰谷差与原负荷曲线的峰谷差相比较，若等效负荷下的峰谷差变大，则记录该日系统调峰需求的变化量。把调峰需求变化量从小到大排序，在某一保证率下(如 95%)的最大调峰需求变化量除以光伏电站装机容量即为光伏电站的调峰需求度。光伏电站调峰需求度主要用于评估由于光伏电站并网导致系统新增的调峰容量需求，该指标也是规划输电容量时可参考使用的重要参数。

如果某地区同时有大规模的光伏和风电并网容量，则在上述等效负荷中还可叠加风电出力曲线，以确定新能源电源装机并网的调峰需求度。

(3) 出力变化率。在分钟级的时间尺度研究全年的光伏电站出力变化率，并研究变化率的概率分布情况。主要用于校核系统负荷跟踪能力是否能够满足大规模光伏电站出力变化的要求。

3.2 光伏发电大规模并网的影响

(1) 光伏电站大规模并网，必须结合光伏出力特性及负荷特性，研究光伏电站容量置信度。以甘肃为例，负荷高峰时段的光伏电站出力系数累积概率分布如图 3 所示，甘肃光伏电站 95% 保证率下的容量置信度为 0%。这是由于甘肃的日负荷特性以晚高峰为主，负荷高峰时段光伏电站出

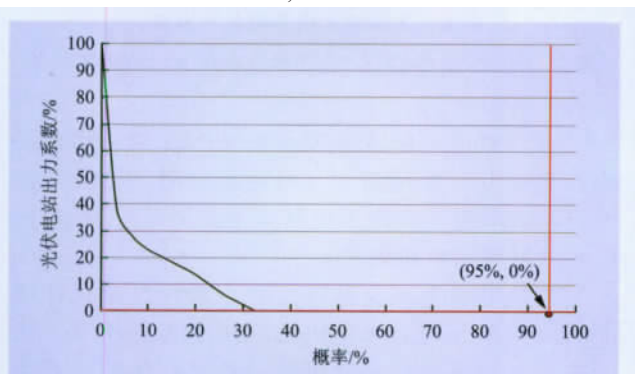


图 3 甘肃光伏电站出力系数累积概率分布
(负荷高峰时段)

Fig.3 The accumulated probability of PV power station
in Gansu (peak load)

力为 0 的概率约占 62%。随着常规电源单机规模不断增加，一般在日内不改变机组开停方式。因此，在进行电力平衡时，甘肃光伏电站无法提供保证容量。

(2) 光伏电站大规模并网，将加大对系统灵活调节电源的需求。我国西北地区太阳能发电规模大，但负荷水平低，且青海、宁夏、甘肃等省(区)的负荷峰谷差较小，当午间太阳能发电大发时，系统等效负荷水平将大幅降低，甚至可能出现白天负荷低于夜间的情况，系统等效负荷特性将呈现夜间低谷和午间低谷的“双低谷”特点，对水电、抽水蓄能等调峰电源的需求将会增大，同时调峰电源的运行方式也将有所改变。以宁夏 2013 年冬季典型日为例，2013 年冬季宁夏并网的光伏电站规模将达到 116 万 kW，届时宁夏电网冬季典型日负荷曲线及考虑光伏发电后系统等效负荷曲线如图 4 所示，光伏电站并网对宁夏负荷特性的影响是较大的，等效负荷曲线的峰谷差为 130 万 kW，相对原负荷峰谷差增大 25 万 kW。

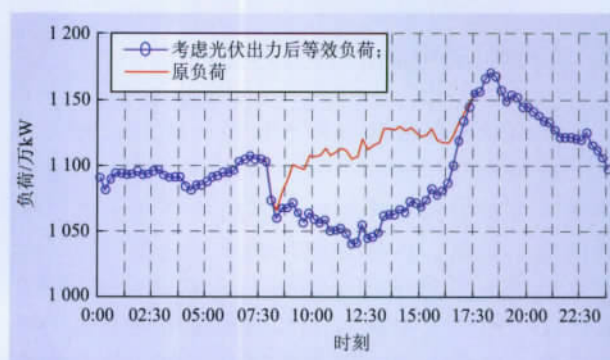


图 4 2013 年冬季典型日宁夏电网等效负荷曲线

Fig.4 Equivalent load curve of typical day in winter of
Ningxia by the year of 2013

光伏发电功率受天气影响很大，尤其在多云天气，发电功率会出现快速剧烈变化。国内在运的光伏电站最大出力变化率在每分钟 20%~70% 之间，例如，西藏羊八井 100 kW 光伏电站最大功率变化率 70%/min；浙江 250 kW 屋顶光伏工程最大功率变化率为 20%/min。光伏发电大规模并网后，发电功率的快速随机波动特性对系统负荷跟踪能力提出了更高要求，需要更多的灵活调节电源予以适应。

(3) 光伏电站大规模并网，对各级电网提出新的建设和技术需求。我国西部和北部的青海、甘肃、新疆、蒙西等地区适宜建设大规模集中式的光伏电站，但这些地区负荷水平低、电力需求有限，系统接纳光伏发电的能力很低，必须接入输电网远距离输送。在光伏发电规模较小时，主要通过超高压或高压输电送入本省电网的负荷中

心,需要同步加强省内超高压电网建设;随着光伏发电规模的增大,需要送入区域电网内消纳时,除了加强省内电网外,还要加强区域电网内跨省互联;随着光伏发电规模的进一步增大,还需要建设包括特高压直流在内的跨区外送通道,实现光伏发电大规模跨区外送。为提高输电通道的利用效率,还需要综合考虑与区域内的水电、风电、火电等各类电源配合,实现协调运行和外送。

(4) 分布式光伏发电系统的接入将给配电网规划带来诸多影响。用户侧分布式光伏电源的大量接入不但使等效负荷增长和分布情况难以预测,还会对配电网结构产生深刻影响。大规模分布式光伏并网将改变配电网的潮流方向,配网潮流将从单向变化为双向。对配电网的电压稳定及频率稳定也将产生影响。配电网调度运行和继电保护配置都将发生变化,调整配电网结构设计成为需迫切解决的问题。在建设智能电网的背景下,如何合理规划含光伏发电系统的智能配电网是必须考虑的重要因素。

4 太阳能发电消纳分析方法

太阳能发电消纳分析方法总体流程如图 5 所示。按照安全、清洁、经济的原则,从电力系统的整体效益出发,根据电力系统中各类电源,包括水电、火电、风电等运行的技术经济特点,优化水电、火电等常规电源运行方式,促进风电、光伏发电的高效率利用。考虑系统中各电站的计划检修、负荷备用、事故备用等约束条件,模拟系统全年 365 天各电站的运行方式和发电曲线,从调峰层面分析太阳能发电等新能源的消纳方案。然后进行负荷跟踪能力校核,若校核不通过,则返回调整检修计划和开机组合。若负荷跟踪能力校核通过,则进行网络约束分析,进而得到考虑网络约束的太阳能发电等新能源消纳方案。其中,负荷跟踪能力校核由于缺少光伏电站分钟级出力数据,在本文实证研究中未开展。

调峰层面太阳能发电等新能源消纳分析的具体步骤如下。

- (1) 根据系统全年负荷曲线、各类电源的检修约束,安排各类电源检修计划;考虑系统负荷及备用需求,安排各类电源的开机规模。
- (2) 安排由外部条件或机组运行要求的发电出力,如径流式水电站、可调节水电站的强迫出力、常规煤电和供热机组的最小出力等。
- (3) 按照可再生能源优先调度的原则,优先安排风电、光伏发电的运行位置,从系统负荷曲线上扣除风电、光伏发电的出力曲线,形成系统

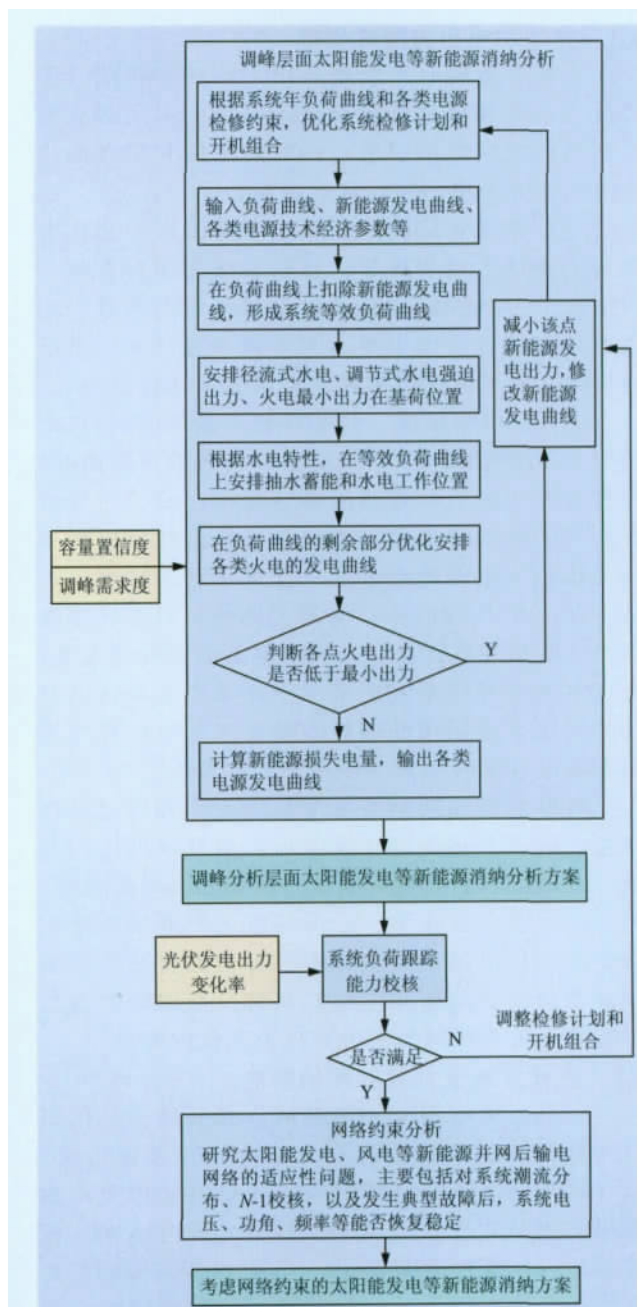


图 5 太阳能发电消纳分析方法

Fig.5 Analysis method of solar power accommodation

等效负荷曲线。

(4) 安排有调节库容水电站的可调出力部分的发电出力。在保证充分利用其有限、清洁、廉价能源的前提下,将水电站安排在尖峰位置运行,以充分发挥其容量效益。

(5) 完成上述步骤后,联合系统日负荷曲线上剩余的部分即为火电机组所应承担的负荷。由于各火电机组的技术经济性的差异,从联合系统运行的整体技术经济性出发,可以确定各火电机组承担系统负荷的优先顺序,按系统负荷需求安排各火电机组的工作位置。

(6) 对火电的发电出力进行校核,分析火电

出力是否低于其最小出力。如果火电出力低于其最小出力，通过降低该时刻的新能源发电出力等措施以实现系统平衡。

上述分析步骤中，电源检修计划的制定基于等风险度法计算^[4]，机组组合方案的制订基于以总运行费用最小为目标构造的优化模型^[5]。其中，等风险度法计算电源检修计划的模型目标函数如式(1)所示，意在通过对检修计划的优化，实现系统风险度在研究周期各时段接近相等，用 LOLP 这一概率可靠性指标来衡量系统风险度。

$$LOLP_i = LOLP_j (i \in T, j \in T, i=1, 2, \dots, T) \quad (1)$$

式中：LOLP_i、LOLP_j 分别为时段 *i*、*j* 的系统风险度；*T* 为研究周期的总时段数。等风险度法考虑的约束条件包括系统最小风电度约束、检修时间约束、检修最小时间间隔约束、年检修次数约束、同一电厂可同时检修的机组台数约束等。

机组组合方案计算模型目标函数如式(2)所示。

$$\min F = \sum_{t \in T} \sum_{i \in S_{NG}} [I_i(t) C_i(P_i(t)) + c_i^u(t) + c_i^d(t)] \quad (2)$$

式中：*F* 为总运行费用；*S_{NG}* 为发电机组集合；*I_i*(*t*) 表示机组 *i* 在时段 *t* 的状态，0 表示机组停机，1 表示机组开机；*P_i*(*t*) 表示机组 *i* 在时段 *t* 的有功出力；*C_i*(*P_i*(*t*)) 表示机组 *i* 在时段 *t* 的燃料费用；*c_i^u*(*t*) 和 *c_i^d*(*t*) 分别表示机组 *i* 在时段 *t* 的开机、停机费用。机组组合计算模型考虑的约束条件包括电力电量平衡、机组出力上下限、旋转备用、机组最小启停时间、机组爬坡等约束。

图 6 给出了新能源损失电量计算的示意图。光伏等新能源电源的损失电量 *E_{curtailment}* 对应系统无法平衡的新能源电源功率 *P_{curtailment}* 对时间的积分。当系统的调峰容量裕度 *P_{regu}* 大于新能源电源自然出力 *P_{New energy}* 时，电量可全部消纳；反之，由于系统无法平衡该部分新能源电源功率而需要弃风或

者弃光，新能源电源因此损失的出力对应时间的积分值即为新能源电源损失的电量。以下给出一天 24 h 的新能源损失电量计算公式(3)和公式(4)，全年的新能源损失电量即为全年每天损失电量的累加。

$$P_{curtailment}(t) = \begin{cases} 0, & P_{regu} > P_{New\ energy} \\ P_{New\ energy} - P_{regu}, & P_{regu} < P_{New\ energy} \end{cases} \quad (3)$$

$$E_{curtailment} = \int_1^{24} P_{curtailment}(t) dt \quad (4)$$

5 “十二五”西北地区太阳能发电消纳实证研究

从新能源发展看，西北地区重点建设新疆和甘肃 2 个千万千瓦级风电基地，以及甘肃、青海、宁夏和新疆的大型光伏电站，分别属于陕甘青宁电网和新疆电网；从电网发展格局看，新疆电网与陕甘青宁电网电气联系相对较弱，而陕甘青宁电网联系紧密，长期统一运行。根据西北电网的风电及电网格局，将西北地区分为陕甘青宁电网和新疆电网两部分进行分析，其中青海和甘肃新能源消纳考虑共用黄河上游水电调节容量。

5.1 “十二五”西北地区太阳能发电布局

根据项目前期工作情况、目前各省(区)有关规划等，2013、2015 年西北 5 省(区)太阳能发电装机规模分别约 650 万 kW、1 320 万 kW，甘肃、青海太阳能发电布局相对集中。甘肃太阳能发电主要分布在嘉酒和金昌地区，2013 年各占甘肃太阳能发电总装机的 43%、54%，2015 年各占 41%、56%；青海太阳能发电主要分布在海西地区，2013 年占青海太阳能发电总装机的 82%，2015 年占 71%。

5.2 “十二五”西北地区常规电源调节能力及电网规划

2011 年西北水电调节能力占水电装机的 30%~40%。从水电规划项目看，“十二五”未来 4 年投产的水电站装机容量都十分有限，调节能力较差，除了刘家峡排沙洞电站，其他都为径流式水电站或日调节水电站。2015 年水电调节能力占水电装机的 30%左右。

根据西北各省(区)火电发展规划及各类机组调节能力分析，2015 年西北电网供热期火电机组的平均最小出力可达到 69%，非供热期可达到 63%。在电力系统实际调度运行中，火电机组的实际调节能力应结合当时的火电开机方式确定。

考虑“十二五”期间西北电网规划：①在区内电网建设方面，建成新疆与西北联网第二通道，进一步增强省间电网互联。到 2015 年年底，西北

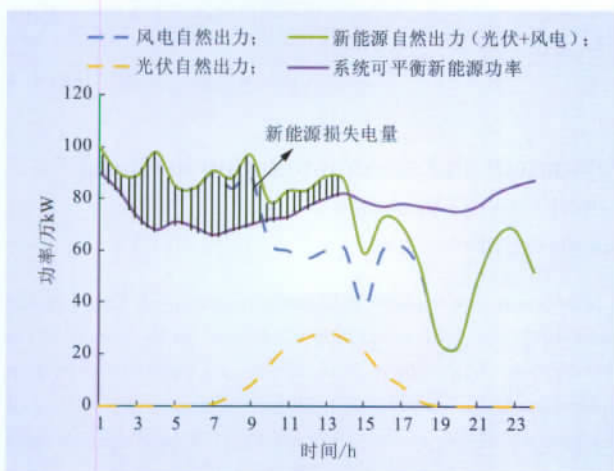


图 6 新能源损失电量计算

Fig.6 Computation method of new energy curtailment

电网形成陕甘4回、甘青6回、甘宁2回、甘新4回750 kV联网结构。②在跨区电网建设方面,建成酒泉—湖南 ± 800 kV直流外送通道;建成哈密—郑州、哈密—重庆 ± 800 kV,准东—成都 $\pm 1\,100$ kV直流外送通道;建成宁东—浙江 ± 800 kV直流外送通道^[6]。

5.3 2013年西北地区光伏消纳能力

研究表明,2013年陕甘青宁电网的光伏消纳能力约为830万kW。根据各省(区)的光伏发展规划,2013年陕甘青宁电网可消纳当年并网光伏电站容量,分别为陕西6万kW、甘肃241万kW、青海200万kW、宁夏116万kW。综合考虑电网规划、疆电外送等因素,通过对陕甘青宁各省网,以及河西750 kV交流通道的适应性研究表明,2013年陕甘青宁光伏发展布局及消纳方案不存在电网适应性问题。从2013年全年来看,新疆电网的光伏消纳能力为100万kW,根据新疆光伏发展规划,2013年新疆光伏装机为84万kW,可在新疆电网消纳。通过对新疆电网的适应性研究表明,2013年新疆光伏发展布局及消纳方案不存在电网适应性问题。

5.4 2015年西北地区光伏消纳能力

研究表明,2015年陕甘青宁电网光伏消纳能力约为1 000万kW。根据各省(区)的光伏发展规划,2015年,陕甘青宁电网可消纳光伏容量陕西41万kW、甘肃370万kW、青海360万kW、宁夏230万kW。另有主要布局在甘肃嘉酒、金昌地区的180万kW光伏无法在西北区域内消纳,需跨区外送。综合考虑电网规划、疆电外送等因素,通过对陕甘青宁各省网,以及河西750 kV交流通道的适应性研究表明,在有酒泉直流外送通道情况下,依据调峰层面光伏消纳分析调整的2015年陕甘青宁光伏发展布局方案不存在电网适应性问题。从2015年全年来看,新疆电网光伏消纳能力为170万kW,根据新疆光伏发展规划,2015年新疆光伏装机为233万kW,其中约60万

kW需要跨区外送消纳。

6 结语

受资源条件和建设场地限制,长远来看,我国太阳能开发应以大型光伏电站和太阳能热发电集中式开发为主。从开发布局来看,西北地区由于大型光伏电站的快速发展,其占全国太阳能发电装机的比重保持在50%以上,未来西北作为我国最主要的太阳能发电开发区域的地位将长期保持不变。

对西北地区“十二五”期间光伏消纳能力的研究表明,2015年,西北电网调峰能力不能满足光伏、风电等新能源消纳需求,需要跨区平衡消纳。未来随着“三北”地区(西北、东北和华北北部)风电、太阳能发电规模的进一步加大,对系统调峰调频提出更高要求,将持续加重“三北”地区新能源消纳压力。应适度建设燃气调峰电源,并在西北电网内选择条件好、造价相对较低的抽蓄站址开展前期规划工作,加强西北电网接纳新能源的能力。

参考文献:

- [1] 国网能源研究院. 2012中国发电电源供需与电源发展分析报告[R]. 2012.
- [2] 中国电力企业联合会. 青海太阳能发电调研[R]. 2011.
- [3] 中科院电工研究所. 我国太阳能资源及开发利用前景研究[R]. 2009.
- [4] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京:水利电力出版社,1990.
- [5] KAZARLIS S A, BAKIRTZIS A G, PETRIDIS V. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996,11(1):83-92.
- [6] 国网能源研究院. 太阳能发电大规模开发与市场消纳研究[R]. 2012.

(责任编辑 杨静)

Study on Issues Concerning Solar Power Development and Accommodation in China

HU Bo, XIN Song-xu, BAI Jian-hua, ZHANG Yun-zhou

(State Grid Energy Research Institute, Beijing 100052, China)

Abstract: The planning, layout characteristics and existing problems of solar power development in China are introduced. Based on the output characteristic index of PV generations, the new requirements of large-scale PV power integration is analyzed on the power system planning, and the analytical method of solar power accommodation is proposed. According to the planning targets of solar power generation of the “12th Five-Year Plan” period in the northwestern region, the solar power accommodation capacity of the northwest grid is studied. It is predicted that by the year of 2015, the installed solar power capacity in the northwestern region will reach 13.2 GW, and the balancing capability of the local power grid can't meet the accommodation requirement of such new energies as PV and wind power. Trans-region balance is therefore needed for accommodation of new energy.

Key words: power planning; solar power generation; layout; accommodation