水电对风能太阳能间歇性电力的支持与协调运行

马吉明^{①*}, 张楚汉^①, 朱守真^②, 金勇^①, 栗楠^②

① 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

② 清华大学电机系, 北京 100084

* E-mail: majiming@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2015-05-14; 接受日期: 2015-06-28

国家自然科学基金(批准号: 51379099)资助项目

摘要 简要分析了绿色低碳可再生能源的发展要求、水电和可再生新能源发电的状况. 研究了水电对风电、光伏发电的支持及其协调运行. 研究表明, 水电对于促进风电、太阳能光伏发电的发展、促进可再生能源入网比例最大化具有重要作用. 我国的大区电网覆盖范围有数省之广, 区内水电站群的总调峰能力, 是支持、协调可再生新能源安全稳定运行的重要保障, 因而需要开展系统性的研究工作. 品质优良的水电, 可通过调度安排, 尽可能多地承担峰荷, 以使化石能源承担的调峰份额减少. 以青海为例的计算表明, 水电站群的可调节电量与汛期和非汛期有关, 年际间也发生变化, 在一定的发展年份出现的既需弃掉间歇性电力、而系统总负荷又不能满足要求的矛盾现象, 可通过抽水蓄能的双向调节作用予以解决. 从资源和环境的角度, 建议在适当地区修建咸水抽水蓄能电站.

关键词可再生能源
水电
风电
光伏发电
调峰

1 绿色、低碳可再生能源快速发展的形势需求

自 1992 年里约热内卢环境与发展宣言以来, 世界各国都十分重视资源的可持续利用问题; 而随着社会对温室气体排放问题的持续关注, 提高非化石能源的电力生产份额, 成为各国追求的目标. 2009 年哥本哈根世界气候大会上, 作为发展中国家, 中国政府自行宣布了减排目标, 到 2020 年单位 GDP 排放量在 2005 年基础上减少 40%~45%, 另据《可再生能源中长期发展规划》, 我国 2020 年可再生能源的消费目标为 15%. 欧洲则计划到 2020 年, 可再生能源要占到

20%^[1]; 根据 EIA^[2]的数据计算, 2012 年底, 美国常规水电及其它可再生能源的电力比例为 12.2%.

目前, 中、美两国是世界上温室气体排放量最大的两个国家^[3], 据《证券时报网》报道, 美国计划到 2030 年, 发电厂的二氧化碳排放量在 2005 年的基础上减少 30%, 这是迄今为止, 美国宣布的程度最大的减排计划; 《科技日报》报道, 中国政府也已经向联合国交存《〈京都议定书〉多哈修正案》的接受书. 由此, 我国将来的减排压力将进一步增大.

就目前来讲, 电力生产所基于的可再生能源主要来自于水能、风能与太阳能. 为适应绿色、低碳可再生能源发展的形势需求, 近年来, 我国水电、风电、

引用格式: 马吉明, 张楚汉, 朱守真, 等. 水电对风能太阳能间歇性电力的支持与协调运行. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1089–1097
Ma J M, Zhang C H, Zhu S Z, et al. Supporting of hydropower for intermittent wind and photovoltaic power and the coordinated operation between them (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1089–1097, doi: 10.1360/N092015-00124

光伏发电的发展速度都很快, 其中水电的高速发展, 是实现 2020 年减排目标的主要依靠. 此外, 国家也很重视核电的发展.

2 我国电力系统中水电与风电、光伏发电的构成简析

我国的电力系统中主要是火电, 据 2011 年的统计, 火电装机容量约占 72.4%^[4]; 其次为水电, 占 21.5%. 我国水能资源的蕴藏量与装机容量均占世界第一位, 显然, 作为可再生能源的水电在我国电力系统中占有重要的地位.

截至 2013 年底, 我国水电装机总容量达到 2.8×10^8 kW, 占理论蕴藏量的 40%, 技术可开发容量的 52%, 经济可开发量的 70%(图 1). 从资源蕴藏总量的角度看, 水电的开发比例仍然较低, 从经济可开发容量的角度看, 水电的开发比例已经较高, 由此, 一段时间之后, 水电的进一步开发, 技术难度与要求会进一步

增高, 开发成本也将会增加.

利用风力发电增加可再生能源的份额, 是重要的发展方向. 根据 GWEC 的数据^[7], 中国是风力发电累计装机容量最多的国家, 其次是美国和德国. 在全球累计风力装机最多的国家中, 除中国和印度为发展中国家外, 其余均为发达国家. 截至 2013 年, 中国的风力装机达 91413 MW(图 2), 占全国电力总装机容

图 1 2013 年底我国水电的开发比例

(数据来源: 国家统计局^[5]; 中国水力发电年鉴 2012^[6])

图 2 中国历年风电装机容量

(数据来源: 中国风能协会^[8])

量(124738×10^4 kW)的 7.3%^[5]. 鉴于近年来风电在我国的迅速发展, 相关学者对发展问题作了深入的分析与思考^[9~11].

迄今为止, 太阳能光伏发电装机容量最多的区域是欧洲, 2013 年的装机容量 81.5 GW, 占世界总装机容量的 59%^[12]. 我国太阳能资源丰富, 发展速度较快, 2013 年光伏总装机容量已经超过整个美洲(图3). 我国又是太阳能组件的生产大国, 太阳能光伏发电在我国具有广阔的发展前景.

3 水电对风、光间歇性电力的支持与协调运行

就目前来讲, 太阳能光伏发电与风力发电两种可再生新能源, 风力发电的装机容量远大于光伏装机. 二者均是间歇性电力, 具有随机性、波动性和不稳定性等特点, 因此, 电力品质较低. 据研究, 我国八大千万千瓦级风电基地(甘肃酒泉、新疆哈密、蒙西、蒙东、河北、吉林、江苏沿海及山东沿海), 风电的保证率均比较低^[13]. 现阶段, 风电发展中出现的一个问题是弃风现象, 弃风程度可达 20% 以上. 弃风有多种原因, 其中一个重要的原因是储能和调节能力的限制.

水电是品质优良的调节电源, 有许多的常规电

站、特别是抽水蓄能电站专门为调峰而设置, 如黄河上的拉西瓦电站、广州抽水蓄能电站、北京十三陵抽水蓄能电站等. 近些年, 学者对水电富集地区、特别是梯级水电站群对新能源的支持、调节作用尤为重视并进行了相关的研究^[14~17]. 我国的地区电网覆盖区域都比较大, 一般为数省. 在我国电力系统以煤电为主的情况下, 充分利用水库的储能功能和大电网的调度作用, 使水电尽可能多地承担峰荷, 将有利于增加水电对电网的调节作用, 即水电要担当起调控风能、太阳能等间歇性能源的重任—而不只是向电力系统提供电力, 这将最终有利于可再生能源电力入网比例的最大化和电网系统的平稳、安全运行. 因此, 有必要系统研究大区电网中水电站群所具有的调峰总能力及其变化特征.

3.1 常规水电对间歇性电力的支持与协调运行—以黄河上游青海为例

青海省是我国太阳能资源最为丰富的地区之一, 并具有风能资源, 同时富集了黄河上游的水电资源, 因此, 该地区是实现水电、风电、光伏发电协调运行的理想地域, 其梯级水电是实现对光伏发电、风力发电支持与协调运行的基础. 有关黄河上游梯级水库的研究较多, 如文献[18~21].

本文根据青海省黄河上游水电建设的现状和规

图3 中国历年光伏装机与美洲、欧洲的比较

(数据来源: EPIA^[12])

图4 某发展年(近期)不同来水年时水库群的逐月可调节电量

划,分析计算将来某一年份的梯级水库群的逐月调峰电量;然后根据风电、光伏发电的发展规划,计算出相应年份产生的逐月电量;最后,再考虑其它的电力(如煤电),根据预测的日负荷曲线,进行多电源的运行安排,以平衡负荷.如图4为某发展年(近期)在枯水年、平水年与丰水年来流情况下,水库群的逐月可调节电量,这部分电力可灵活地用来支持新能源入网后的调峰.从图中明显可以看出:受制于水库的防洪要求和来流,水库群的可调节电量年际间发生变化,对于枯水年和平水年,汛期的可调节电量要明显低于非汛期;丰水年的可调节电量明显大于枯水年,这发挥出了水库群的储蓄效益.因此,新能源入网依靠水电调峰情况下,不但要考虑年内调节能力的变化,还要考虑到丰水年、平水年、枯水年来水的调节能力变化.

在具体安排水电与风电、光伏发电的协调运行时,应优先安排风电、光电的调度运行,由此在系统负荷曲线的基础上形成等效负荷曲线(相当于新能源全部入网后的负荷曲线,如图5);此后,在等效负荷曲线上,优化安排有调节库容水电站的可调出力部分进行调度运行.在这种方式下,水电在高端位置运行,发挥出了容量效益,其不仅参与了负荷的调节,同时也参与了风电、光电的调节,即实现了水电与风光的协调运行.

通过上述安排,系统日负荷曲线上剩余的部分即为其它电源成份(如火电)所应承担的负荷.这时,需要对火电的发电出力进行校核,分析火电出力能否满足系统日负荷曲线上剩余部分的负荷,按照常规的调度原则,缺少部分的电量需要外购(图6).

下面结合算例予以详细说明.在图5中,某发展水平年(近期)电力系统要求的负荷在 1000×10^4 kW 上

图5 某发展水平年(近期)新能源入网后的等效负荷图

下,光伏出力的峰值为 270×10^4 kW,风电出力较大值约在 $(20 \sim 35) \times 10^4$ kW,光伏、风电 100%入网后,系统等效负荷曲线的谷值为 740×10^4 kW,时间点在于午后 1~2 点,此时正是太阳能辐射强度最大的时候.

图6为满足图5所示等效负荷曲线所做出的典型日调节安排,分为三种情况.图6(a)针对于枯水年来流,此时水电所能担负的调峰能力较小(曲线最上部分),水电的出力主要表现为泄放生态基流时所发出的基荷,调峰的主体为火电.火电调峰,热效率必定降低,带来资源的损耗,另外,火电调峰,其调峰比例受到限制.由于系统内总体供电能力不足,尚需要外购电力(曲线最下部).

图6(b)为平水年来流的情况,比之于枯水年,水库的调蓄作用有了充分的发挥,调峰作用大大增加(曲线最上部),火电调峰程度减小,这对火电站的平稳运行是有好处的.由于来水量增加,水电出力增大,本省电力系统已经可以满足负荷要求,图6(a)中的外购部分已经移除,不再需要外购电力.

图6(c)为丰水年来流情况下的日调度图,水电的调峰作用进一步增强,水电站获得了最大的出力,火电完全不需要再进行调峰运行,且其承担的基荷进一步减少,有效地减少了化石能源的消耗、提高了燃煤热效率.此时整个电力系统中可再生能源的发电比例最大,但受制于天然来流,这是一种理想的状态.

3.2 抽水蓄能对间歇性电力的支持与协调运行

为使间歇性电力大量入网,减少弃风、弃光率,最重要的解决途径是电力储存.电力储能可分为物理储能和化学储能,从放电功率和放电时间来衡量,抽水蓄能是目前大宗量储能最为成熟的技术.

在我国 2020 年风电规划中,为了吸纳风电,都

图 6 典型日调度图

(a) 枯水年; (b) 平水年; (c) 丰水年

配套规划了一部分抽水蓄能容量. 表 1 为与风电配套的抽水蓄能的装机比例.

在表 1 所示的各大电网中, 总体上说水电的比例都较低(华中电网除外), 这不同于青海电网的情况, 因此需要利用抽水蓄能的容量对风电予以调节. 关于抽水蓄能与风电的结合, 水利水电规划设计总

院曾进行过专题研究^[13]. 需要注意的是, 西北电网中的抽水蓄能比率最低, 抽水蓄能机组的装设容量可能不足, 原因如下.

在西北电网范围内, 甘肃酒泉、新疆哈密风电基地都有相应的抽水蓄能电站, 但迄今为止, 未见青海规划建设抽水蓄能电站, 可能的原因在于青海是以

表 1 与风电配套的抽水蓄能的装机比例^{a)}

电网	东北电网	华北电网	华东电网	华中电网	西北电网
比率	0.26	0.54	0.66	0.66	0.21

a) 数据计算依据: 中国水力发电科学技术发展报告^[4]

水电为主的省份, 青海的水电可以对省内大规模的光伏电站予以调节. 但事实上, 随着青海国民经济的发展, 青海黄河上游水电的调节能力稍显不足, 如果考虑到同属西北电网的甘肃、新疆大规模开发间歇性电力而需要青海的水电予以调峰, 青海对抽水蓄能装设容量的要求就会进一步提高. 下面的算例将说明, 青海在一定发展阶段需要抽水蓄能容量.

图 7 与 8 分别为某发展水平年(远期)青海省风、光、水电协调运行的等效负荷图和平水年典型日调度图. 在图 7 中, 负荷要求大大增加, 约在 2000×10^4 kW, 光伏发电、风电都有了长足的发展, 特别是光伏装机, 其峰荷出力接近 1700×10^4 kW. 对比二图可以看出, 水电参与一部分调峰, 而水电的基荷电力是不得不发出的电力, 在等效负荷低谷期, 水电基荷部分已经高于等效负荷曲线, 这时就不得不弃光, 所以存在于图 7 中的等效负荷曲线的“头部”在图 8 中就被“切”掉了. 而另一方面, 本系统中总的供电能力不足, 尚需外购电力(曲线最下部), “弃”、“购”形成一对矛盾. 很显然, 出现上述情况之后, 一个良好的解决途径就

图 7 某发展水平年(远期)新能源入网后的等效负荷图

图 8 平水年典型日调度图

是修建抽水蓄能电站, 将多余的电力(弃光)用于抽水蓄能, 在其它需要的时段予以发电, 进行双向调节。

4 修建海水、咸湖水抽水蓄能电站的建议

我国现有的抽水蓄能电站, 有与常规电站结合的抽水蓄能电站, 如潘家口电站(利用水库作抽水蓄能的上池); 有为调峰专门修建的纯抽水蓄能电站, 如十三陵抽水蓄能电站(利用十三陵水库作为抽水蓄能的下池)。我国现有抽水蓄能电站的储能介质都是淡水, 基于我国的经济发展与资源条件, 这里提出修建咸水抽水蓄能电站的建议, 包括海水抽水蓄能电站和咸湖水抽水蓄能电站。

我国沿海属于三级阶梯地带, 自然地貌多为 500 m 以下的丘陵、平原, 这为抽水蓄能的选址带来一定困难, 但我国近海地带经济发达、有丰富的海上风电, 普查资料显示, 我国 5~25 m 水深线以内、近海区域海平面以上 50 m 高度可装机 200 GW^[22], 而某些沿海地带存在着地形合适的山脉, 这为与近海风场相结合、修建抽水蓄能电站带来了方便条件, 且利用海水修建抽水蓄能电站可以省却下池。利用海水修建抽水蓄能电站在技术上没有困难, 潮汐电站就是海水电站, 20 世纪 80 年代我国已经修建成功双向潮汐电站江夏电站; 世界第一座试验性海水抽水蓄能电站 20 世纪 90 年代建于日本冲绳^[23]。

我国西部地区有丰富的风资源、光照资源, 同时在某些地区又有为数众多的咸水湖。如青海省, 有丰富的太阳能资源, 同时有青海湖和其它星罗棋布的咸水湖。根据上面的计算, 在一定的发展年份, 青海省光伏电站的发展需要修建抽水蓄能电站, 此时就可以考虑利用咸水湖修建抽水蓄能电站与光伏电站相结合, 这既有地理上的方便性, 也有省却修建下池所带来的经济性; 同样, 新疆风资源、光照资源、咸水湖资源丰富, 因此, 咸水抽水蓄能电站在我国是有发展前途的。

5 主要结论

1) 中国的水能资源蕴藏量及装机容量占世界第一位, 风电装机容量世界第一, 迄今光伏装机容量也居世界前列, 发展速度很快。绿色、低碳可再生能源

的大力发展是实现我国政府减排承诺的重要保障, 对于资源的可持续利用和节能减排具有重要意义。

2) 到目前为止, 水电的装机容量占到经济可开发总量的 70%, 在电力构成中约占 20%。水电是品质优良的电源, 风电与太阳能光伏发电同属于间歇性能源, 现阶段应当尽可能地利用水电承担峰荷任务, 协调可再生能源的入网。即水电要起调控风能、太阳能等间歇性能源的重要作用, 这将有利于可再生能源电力入网比例的最大化、减少弃风(光)、有利于电网系统的平稳安全运行, 并同时减少化石能源特别是煤炭消耗的比例。

3) 我国的区域电网覆盖范围大, 区内一般包含水电站群, 水电站群总的调峰能力是协调可再生能源入网运行的重要保障, 这涉及到调度图中各组份电力的位置安排、所占比例、运行效益等诸多方面因素的分析, 应当开展深入系统的研究工作。

4) 以青海为例的计算表明, 水电的调峰能力与水库的功能(如汛期防洪)和来水量直接相关, 汛期的调峰能力(电量)弱于非汛期、丰水年的调峰能力显著高于枯水年, 在考虑水电的调峰能力时, 要考虑到年内和年际间的变化。

5) 研究算例表明, 间歇性电力入网增加到一定程度之后, 等效负荷的峰谷差随之增大, 受制于水库的调节能力和电网总负荷的要求, 可能会出现一方面需要弃光(风)、另一方面又需要外购电力的矛盾情况, 一个有效的解决措施是利用抽水蓄能电站进行调节。

6) 现阶段解决间歇性电力储能问题的主要途径是抽水蓄能, 为吸纳风电, 我国大区电网中的风力发展规划都配套了一定比例的抽水蓄能容量, 其中西北电网的配套比例较低。考虑到青海光伏装机的快速大力增长, 尽管青海具有黄河上游丰富的水电资源, 但汛期的防洪任务使水库群的调节能力受到限制, 因此建议青海尽早规划修建抽水蓄能电站。

7) 从资源和环境的条件看, 中国东部地区经济发达, 需吸纳西部电力; 又由于海上风资源丰富, 发展风电, 对电力系统的储能、调节要求增高。由于东部地势平坦, 可考虑在条件合适的地方修建海水抽水蓄能电站。西部地区光资源、风资源丰富, 咸水湖泊众多, 而淡水资源相对不足, 可考虑修建咸水湖泊抽水蓄能电站。

参考文献

- 1 李俊峰. 中国风电发展报告 2012. 北京: 中国环境科学出版社, 2012
- 2 EIA. Electric power annual 2012. U.S. Energy Information Administration, U.S. Department of Energy. Washington DC, 2013
- 3 BP. Statistical review of world energy, British Petroleum. Orb Solutions, London, 2013
- 4 中国水力发电工程学会, 中国水电工程顾问集团公司, 中国水利水电建设集团公司. 中国水力发电科学技术发展报告. 北京: 中国电力出版社, 2013
- 5 中华人民共和国国家统计局. 2013 年国民经济和社会发展统计公报. 北京, 2014
- 6 中国水力发电工程学会. 中国水力发电年鉴 2012, 第 17 卷. 北京: 中国电力出版社, 2014
- 7 GWEC. Global wind statistics 2013. Global Wind Energy Council. 2014
- 8 中国风能协会. 2013 年中国风电装机容量统计. 北京, 2014
- 9 贺德馨. 对中国风能可持续发展的几点思考. 风能, 2011, 4: 14–16
- 10 施鹏飞. 中国风电装机容量迅猛增加及存在的问题. 可再生能源, 2007, 25: 4–5
- 11 李俊峰, 施鹏飞, 高虎. 中国风电产业发展现状与展望. 电器时代, 2011, 3: 39–44
- 12 EPIA. Global market outlook for Photovoltaics 2014–2018. European Photovoltaic Industry Association. Onehemisphere, Sweden, 2014
- 13 水电水利规划设计总院. 抽水蓄能与风电配合运行研究报告. 北京, 2011
- 14 严陆光, 周孝信, 张楚汉, 等. 关于筹建青海大规模光伏发电与水电结合的国家综合能源基地的建议. 电工电能新技术, 2010, 29: 1–9
- 15 严陆光, 周孝信, 张楚汉, 等. 关于筹建青海大规模光伏发电与水电结合的国家综合能源基地的建议(续). 电工电能新技术, 2011, 30: 8–11
- 16 唐新华, 周建军. 梯级水电群联合调峰调能研究. 水力发电学报, 2013, 4: 260–266
- 17 唐新华, 周建军. 梯级水电群联合调峰调能数学模型. 水力发电学报, 2013, 4: 38–45
- 18 西北勘测设计研究院. 龙羊峡、刘家峡水库径流常规联合调度设计报告. 西安, 1998
- 19 黄强, 范荣生, 沈晋, 等. 黄河干流水库联合调度规则模型研究. 西安理工大学学报, 1996, 12: 218–225
- 20 何予川, 安新代, 刘占松, 等. 龙羊峡、刘家峡水库联合调度模拟模型开发. 人民黄河, 2000, 8, 22: 33–34
- 21 张泽中, 张亮, 齐青青, 等. 龙羊峡、刘家峡梯级水库补偿调度节能能力分析. 水力发电, 2011, 37: 65–68
- 22 中国气象局风能太阳能资源评估中心. 中国风能资源评估 2009. 北京: 气象出版社, 2010
- 23 Fujihara T, Imano H, Oshima K. Development of pump turbine for seawater pumped-storage power plant. Hitachi Review, 1998, 47: 199–202

Supporting of hydropower for intermittent wind and photovoltaic power and the coordinated operation between them

MA JiMing¹, ZHANG ChuHan¹, ZHU ShouZhen², JIN Yong¹ & LI Nan²

¹ State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

It was analyzed at first the necessities developing of low-carbon green renewable energy in China as well as the exploring status of traditional hydropower and renewable energy power briefly. Then the supporting and coordinated operation of hydropower for the intermittent wind and photovoltaic power were studied. The results showed that hydropower played an important role in promoting the development of wind and photovoltaic power, and could increase the electric supply rate of renewable energy. For the very wide scope of regional power grid covering a few provinces, it is necessary to research the total capacity of all hydropower stations systematically in the grid to balance the intermittent energy, because it is an important guaranty to keep the operating of the renewable energy in grid safely and stably. By dispatching, water power should take the task of peak load as much as possible in order to reduce the peak load share of fossil energy. In addition, the calculation results related to Qinghai province showed that the balance capacities of cascade hydropower stations varied in seasons and years. In some years of the future, although the total supply capacity of electricity in the regional grid could not meet the total load demand, at same time, the intermittent electric power had to be discarded. The contradictory phenomenon could be resolved by pumped storage schemes. From the point of views of resources and environment, it was also suggested that seawater or salt lake water pumped storages in some appropriate region could be constructed in China.

renewable energy, hydropower, wind power, photovoltaic power, peak regulation

doi: 10.1360/N092015-00124