

储能电池参与电网快速调频的场景分析

为缓解间歇式电源并网瓶颈并改善电网频率指标，有必要引入新的辅助调频手段，而储能的快速响应特性使其在参与电网调频方面具有优势。总结了储能技术的调频现状，以含常规储能技术——抽水蓄能电站的湖南电网、南方电网为例，分析了引入储能电池的典型调频场景，并提出对应场景下储能电池的容量需求。结果表明，相关应用场景下配置较小容量的储能电池即可有效改善电网的频率特性。

宋 永¹ 黄继军² 黄际元¹ 邓 敏¹ 黎淑娟³ / 1. 国网湖南省电力公司长沙供电分公司 2. 国投北部湾发电有限公司 3. 湖南大学电气与信息工程学院

0 引言

传统电力系统有功功率主要由同步发电机来平衡，因而调频电源是同步发电机。目前，在大多数电网中，大型水电与火电机组为主要的调频电源，通过不断地调整调频电源出力来响应系统频率变化，但是由于二者均由具有旋转惯性的机械器件组成，从而导致各自具有一定的限制与不足，影响着电网安全与电能品质。例如，火电机组响应时滞长，不适合参与较短周期的调频，而水电机组的调频容量易受地域与季节制约；参与二次调频的火电机组由于爬坡速率限制（Generation Rate Constraint, GRC），不能精确跟踪调度调频指令；另外，传统电源在机组控制中要考虑对响应功率幅值与极性改变速度的限制。以上限制会导致调节的延迟、偏差及反向等现象，而对调频信号的不准确响应，使得电网调度需要更大的响应功率储备裕度^[1]。

同时，我国的能源结构中以火电机

组为主（比重约83.16%），因此在电网调频中起主要作用的是调频能力较弱的火电机组，导致区域电网整体调频能力更为有限。此外，火电机组若长期承担繁重的调频任务，不仅加剧机组设备磨损，还会显著增加燃料使用、运营成本、废物排放和系统的热备用容量等，而且调频的质量和灵活性不能满足系统对提高电能质量的要求^[2]。随着风电和光伏等可再生能源发电的大量并网和对电力质量要求的不断提高，调频容量不足的问题日益突出，亟需新的调频手段出现，而具备快速调节特性的储能技术能满足电网的安全稳定要求^[3]。

因此，总结了储能技术的调频现状，以含常规储能——抽水蓄能电站的湖南电网、南方电网为例，分析了引入储能电池的典型调频场景，并提出对应场景下储能电池的容量需求；最后进行总结及展望。

1 储能技术的调频现状

现有储能技术中，抽水蓄能应用最广泛、技术最为成熟，是电力系统中具有调峰、填谷、调频、调相和紧急事故备用等多种功能的特殊电源，释放时间可以从几小时到几天不等，能量转换效率在70%~85%之间。然而，其本身对地形环境的依赖、较大的工程投资和较长的建设工期是阻碍其进一步发展的制约因素。据统计，截至2012年底，我国已有86台总装机容量为2 018.6万kW的抽水蓄能机组投产运行^[4]。同时，以储能电池为代表的新型快速储能技术因



宋 永/工程师

关键词/Keywords

间歇电源 ·
调频 ·
储能电池 ·
场景分析 ·
容量配置 ·

国家自然科学基金项目（51477043）。

规模灵活、造价适中和安装维护简便等优势在电力系统中拥有广泛的应用空间，其还具有以下特点：响应速度快，可在毫秒范围内满功率输出；精确控制，可在任何功率点保持稳定输出。其可以在秒、分钟、小时乃至季节时间尺度范围内对电力系统的运行进行支持，通过为风光等间歇性电源配置一定容量的储能电池，利用储能的快速有功/无功功率吞吐能力可以有效平抑其出力波动，减少对负荷和电网的影响^[5]。目前，“间歇性电源—储能电池”的开发模式无外乎两种基本情况：一是“集中式”——大规模（如数百兆瓦甚至更大容量）间歇式电源以集中方式、经高压等级（如220 kV）直接并入主网；二是“分布式”——即以相对较分散的形式、经低电压等级（10 kV或0.4 kV）接入配电网。在满足平抑风光出力波动的前提下，储能电池在提供调频服务方面也具有应用潜力^[6]，国内以中国电力科学研究院张北风光储基地、南方电网深圳宝清电池储能电站及北京石景山热电厂锂电池储能调频系统等四处大容量储能电池的示范工程为代表，均对参与调频功能做过初步的测试，但尚属起步与借鉴阶段^[7]。综上所述，以储能电池为代表的新型快速储能技术已逐渐受到业界重视，挖掘其典型应用场景显得至关重要。

2 储能电池的调频场景分析

2.1 场景1：抽水蓄能机组起停时联络线功率越限

黑麋峰抽水蓄能电站位于湖南省长沙市，紧邻负荷中心长株潭地区，作为该地区的可靠应急电源，包含4台单机容量为300 MW的可逆式机组，总装机容量为1 200 MW，并通过500 kV黑沙线接入500 kV沙坪变电站以实现并网运行。自2009年6月投运以来，一直承担着湖南电网的调峰、填谷、调频、调相和事故备用等任务，对优化电网电源结构，解决负荷季节性不平衡问题起到了积极作用。同时由于其单机容量较大，机组起停负荷变化较剧烈，给网间联络线的调整与控制也造成了一定的影响^[4]。

对2014年7月1~16日的黑麋峰抽水蓄能电站机组起停次数、机组接带负荷和省间联络线功率波动等相关数据进行统计分析，具体如表1所示。由表1可知，该电站有效开、停机共164次，其中抽水工况并网共34次，发电工况并网48次，由开、停机所引起湖南电网省间联络线波动在200 MW及以上的情况高达93次，占总起停次数的57.4%。

表1 抽水蓄能电站运行数据统计分析

开、停机 次数/次	抽水工况 /次	发电工况 /次	联络线功率波动超过200 MW 的次数/次
164	34	48	93

一般而言，停备、并网发电和并网抽水为抽水蓄能机组的主要工况。为调节电网峰谷差，抽水蓄能机组一般在23:00~次日9:00区间内抽水，在9:00~22:00区间内发电。由于黑麋峰电站单机容量达300 MW，其并网发电时机组出力增加速率较快，调节范围为180~300 MW，而并网抽水机组只有-300 MW一个运行值。因此一台机组并网抽水时相当于瞬间300 MW左右的负荷波动，并网发电也相当于有180 MW左右的波动，对电网发用电平衡影响较大，造成省间联络线功率相应的波动，对省内平衡联络线备用容量要求较高。另外，以抽水为例，从下令启动机组，到抽蓄机组抽水工况并网接带负荷，需要为8~12 min，而这期间恰恰是备用最为紧张的时刻，联络线有可能持续少用计划，而瞬间接带-300 MW负荷，极有可能使联络线瞬时超用计划，这样对每15 min进行联络线的ACE绝对值调节控制，显然是不利的。

综上所述，传统抽水蓄能电站机组起停，对参与整个电网削峰填谷、调频调峰具有积极的意义，但是对省间联络线功率波动的影响也不容忽视，需要制定有效的措施进行预防控制。此时，具备快速灵活调节特性的储能电池成为可行的解决手段之一。

2.2 场景2：一、二次调频控制方向矛盾

一、二次调频的控制目标、控制方式和响应

时间均有较大差异,其都投入运行时,可能会出现相互间冲突、反调的现象。在潮流单一的南方电网,调节性能优异的水电大多集中在西部,东部大多为火电大机组,在系统压极限运行时,当东部损失机组较多而引起频率降低时,西部水电一次调频快速响应将可能引起系统潮流加重而导致稳定恶化。1994年5月25日的解网事件正是由于东部大机组跳闸、西部水电一次调频快速加负荷导致潮流越限而失稳。基于此,相关学者提出一些协调方案,但都未能很好地解决此问题,部分原因正是缺乏解决此协调问题的有效手段^[8]。

图1为区域电网示意图,其为TBC-TBC控制模式。以湖南电网为例对此问题展开分析, B' 为频率偏差系数(MW/0.1 Hz),区域控制偏差(Area Control Error, ACE)信号计算公式为 $ACE = \Delta P_t + 10B'\Delta f$,其中, ΔP_t =计划值-实际值; $\Delta f = f - 50$ 。各区域联络线潮流方向以区域受电为正,送出为负。当本区域ACE为正时,需控制机组减少出力;ACE为负时,需控制机组增加出力。

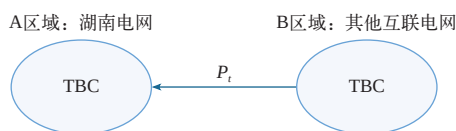


图1 区域电网示意图

假设电网一次调频死区为0.033 Hz,对湖南电网大量实测数据进行统计分析,可得表2所示的6种典型工况。从表2中可看出,这些工况均越过频率调节死区,即电网中有剩余容量的机组均需参与一次调频。

表2 湖南电网的实测ACE数据

工况	联络线实际/MW	联络线计划/MW	Δf /Hz	ACE/MW
1	1 137.11	1 221.00	-0.046 8	21.647
2	1 177.11	1 234.33	-0.046 5	-4.624 1
3	1 771.87	1 715.00	0.037 7	-6.726 7
4	1 759.04	1 737.00	0.038 8	29.563 6
5	1 203.27	1 194.33	-0.038 1	-59.613 8
6	1 305.24	1 327.00	0.038 2	72.563 4

工况1: $\Delta f < 0$,表明整个互联系统出现正向负荷扰动(即负荷需求增加);而 $\Delta P_t > 0$,表明B区

域向A区域输送的有功功率不足,可等效为A区域向B区域返送有功功率以保持互联系统的 f 一致,故可判断B区域发生了正向负荷扰动。对于A区域,为了维持联络线功率在计划值附近,需满足 ΔP_t 趋近于0的目标,故控制A区域中调频机组减小出力以减小区域间正有功功率的输出;但由于 $\Delta f < 0$,为了维持频率稳定,电网中带一次调频功能的机组会自动增加出力。在这种情况下,由于采用的是TBC控制模式,ACE信号由维持联络线功率和频率平衡的控制分量共同决定,工况1中 $ACE > 0$,此时控制调频机组减少出力,出现一、二次调频的反调问题。同理,工况2中 $ACE < 0$,此时不出现一、二次反调问题。

工况3中 $\Delta f > 0$, $\Delta P_t < 0$,可知B区域发生了负向负荷扰动,A区域为维持联络线功率在计划值附近,需控制本区域中调频机组增加出力;但由于 $\Delta f > 0$,为维持频率稳定,电网中带一次调频功能的机组会自动减少出力。由于 $ACE < 0$,此时控制调频机组增加出力,出现一、二次调频的反调问题。同理,工况4~工况6结果与工况2类似,在此不再赘述。

综上所述,工况1和工况3中存在一、二次调频反调的问题。相比传统的闭锁手段,引用快速、灵活的储能电池能弥补传统调频电源的缺陷,较好地解决此问题。

2.3 场景3: 参与一次调频时火电机组蓄热不够

通过选取典型的频率变化曲线来分析火电机组蓄热不够时的储能调频场景。图2为南方电网在2008年5月12日区外发生大功率缺额后的频率变化曲线^[9]。

由图2可知,频率快速由49.97 Hz下降到49.72 Hz,经9 min恢复至正常频率,可以将频率变化曲线分为5个时段。其中,第1时段($t_1 \sim t_2$),从14:34:31开始系统频率在8 s内从49.97 Hz下降至49.72 Hz,此时系统最大动态频率偏差 Δf_{dynmax} 为0.25 Hz;第2时段($t_2 \sim t_3$),14:34:39~14:34:53,系统频率单调上升,历时14 s逐步恢复至49.86 Hz,主要是由于机组一次调频响应的作

用，并在14:34:53一次调频作用达到顶峰；第3时段 ($t_3 \sim t_4$)，14:34:53~14:35:20，系统频率稳定在49.85 Hz附近，此时系统准稳态频率偏差 Δf 为0.12 Hz，持续27 s；第4时段 ($t_4 \sim t_5$)，14:35:20~14:39:19，历时239 s，系统频率从49.87 Hz缓慢下降到49.81 Hz。这是由于火电机组的锅炉蓄热逐渐释放，一次调频作用随时间衰减，此时AGC调出备用的速度低于一次调频衰减及负荷上升的速度，导致频率缓慢下降；第5时段 ($t_5 \sim t_6$)，14:39:19~14:43:35，系统频率从49.81 Hz逐步上升，恢复至50 Hz，共256 s，主要是调度发令加出力的作用。

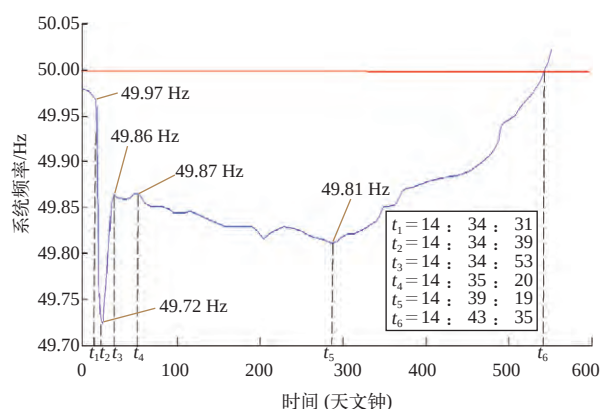


图2 南方电网“5.12”江城直流双极跳闸频率变化曲线

综上所述，在第4时段存在火电机组蓄热不够的问题，一次调频衰减，二次调频尚未开始，不利于频率稳定。此时，引用快速、灵活的储能电池增发相应的功率，给二次调频留出充足的投入动作的时间，维护频率的稳定。

3 调频用储能电池的容量配置

图3为调频用储能电池的容量配置流程。

图3中，首先，需要确定储能电池的应用场景。其次，统计扰动工况下的实测样本数据（连续负荷扰动或阶跃负荷扰动），通过确定储能电池的动作时机和出力深度（确定方法见文献[10]），分析其功率和容量需求。然后，若确定相关的储能类型，通过构建适应于调频仿真需求的等效模型（其目的为便于进行仿真计算），将前述的功率和容量代入具体模型进行分析，依据模

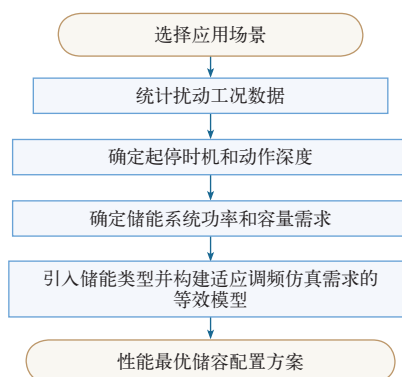


图3 储能电池容量配置流程

型可得到合理的功率和容量，最终完成储能电池额定功率和容量的设计（性能最优的储容配置方案），具体可参阅文献[10]。

考虑到电池储能元件的电流倍率效应和恢复效应^[11]。电流倍率效应指电池运行时剩余可用容量随着电流倍率增大而减少的现象；恢复效应是电池静置或者小电流放电时原来不可用容量重新转变为可用容量的现象。一般来说，如电池容量充足，其能够瞬时释放出1~5倍的额定功率，但增加的放电倍率将导致放电容量大幅降低。结合电池储能元件此特点，针对前述场景1~3，配置40 MW-15 min的磷酸铁锂电池储能能较好地满足调节需求。

4 结束语

提出利用储能电池作为辅助调频手段，对储能技术调频现状、含常规储能技术——抽水蓄能电站的湖南电网、南方电网引入储能电池的场景及容量需求等问题展开研究，结论如下。基于湖南电网和南方电网提出了储能电池的3种典型应用场景及其对应的容量需求，分析表明利用较小的储能电池容量即能有效改善因抽水蓄能导致的区间联络线功率偏移、一次和二次调频的反调节问题及火电机组参与一次调频时蓄热不足等问题。未来可在储能电池参与调频的经济价值量化方面展开研究。

参考文献

- [1] 何常胜，董鸿魁，翟鹏，等．水电机组一次调频

- 与AGC典型控制策略的工程分析及优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 146-151.
- [2] 刘维烈. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 3-88.
- [31] 丁立, 乔颖, 鲁宗相, 等. 高比例风电对电力系统调频指标影响的定量分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 1-8.
- [4] 陈为化, 程瑜, 徐珮, 等. 抽水蓄能电站对网间联络线功率的影响与措施[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(9): 71-78.
- [5] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 等. 几类面向电网的储能电池介绍[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 47-53.
- [6] 李欣然, 黄际元, 李培强, 等. 考虑电池储能仿真模型的一次调频特性评估[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2135-2141.
- [7] 李建林, 李蓓, 惠东. 智能电网中的风光储关键技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [8] 孙亮. 发电机组一次、二次调节动作协调的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [9] 李阳坡, 龙云, 王坚. 南方电网发电机组一次调频性能评价方法分析与改进[J]. 南方电网技术, 2010, 4(1): 28-31.
- [10] 黄际元, 李欣然, 曹一家, 等. 考虑储能参与快速调频动作时机与深度的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 454-464.
- [11] 李欣然, 户龙辉, 吕超贤, 等. 锂离子电池容量的预测建模及其仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(8): 1733-1740.

(收稿日期: 2016-05-15) EA

信息动态

鸿雁“智慧照明”项目荣获2017年杭州市科技进步奖

杭州市科学技术委员会近日公布2017年杭州市科技进步奖, 杭州鸿雁电器有限公司(以下简称“鸿雁电器”)的项目入围。杭州市科技进步奖旨在表彰和奖励为促进杭州市科学技术成果转化, 推动经济和社会发展的, 进一步做好科技成果的奖励工作, 推进杭州市创新驱动发展战略和知识产权战略。

鸿雁智慧城市研究所所长王晓东携手杭州鸿雁东贝光电科技有限公司总经理吴益辉共同承担的原浙江省重大科技计划项目——“高效、智能LED驱动电源研究及产业化”获得2017年杭州市科技进步奖三等奖。

本项目由鸿雁电器自主研发。重点从LED驱动电源的智能化控制(如智能调光)、优化电路设计(高效率电源设计)、控制系统(无线控制)以及灯具改进(如灯具形态、结构设计)等多个方面进行研究, 并形成规模化生产。研究了调光LED驱动电源的同步整流技术、调光技术、控制技术、网络技术以及工艺的改进, 改善调光LED

驱动电源普遍存在的效率低、智能化程度低、寿命短和成本高等问题。内容设置围绕项目的总体目标进行, 针对三个关键技术问题和八项重点研究内容, 利用本单位优势特点, 将研究内容和任务进行分解, 并成功研发了基于ZigBee的高鲁棒性自适应路由无线通信技术、基于二次侧调光的高效LED驱动技术以及基于人体视觉健康的光照自适应控制等适应智慧城市发展的新技术。本项目研究过程中专利申请发明专利1项, 实用新型4项, 均已授权有效。

本项目产品应用在家居智能灯具上, 主要包括元素系列LED智能吸顶灯、玉系列智能吸顶灯以及其他24W、42W、60W和90W等各种规格的LED家居吸顶灯, 还有LED情景灯、LED台灯以及LED球泡灯, 并已大规模推广到终端市场, 进入寻常百姓家中。基于该产品的LED照明系统具有高智能、低能耗和长寿命等特点, 能满足用户的使用要求, 得到设计方、施工方和业主的一致好评。