

# 储能系统在区域电网一次调频中的应用研究

李 飞<sup>1</sup>, 肖仕武<sup>1</sup>, 徐 歌<sup>1</sup>, 宋瑞华<sup>2</sup>, 张媛媛<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

## Research on the Application of Energy Storage System to Primary Frequency Regulation for Regional Power Grid

LI Fei<sup>1</sup>, XIAO Shiwu<sup>1</sup>, XU Ge<sup>1</sup>, SONG Ruihua<sup>2</sup>, ZHANG Yuanyuan<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**摘 要:** 储能系统具有响应迅速、跟踪精确的特点, 将其应用于区域电网的一次调频时, 可以有效改善区域电网暂态频率特性。为了实现储能系统与区域电网中常规机组一次调频的配合, 基于区域电网的一次调频理论模型, 分析了常规机组独立参与一次调频时及与储能系统配合参与一次调频时的各自特性及相互配合的问题。基于此, 提出了常规机组作为一次调频主体, 储能系统承担功率缓冲的配合原则; 并提出了包含改进下垂控制、调频退出控制及能量管理控制的完整的储能系统参与一次调频的控制策略。最后, 搭建了相应的仿真模型, 验证了控制策略的正确性。

**关键词:** 储能系统; 区域电网; 一次调频; 控制策略

**Abstract:** When Energy storage system, which has such characteristics as quick response and accurate tracking, is applied in primary frequency regulation of regional power grid, the transient frequency characteristics will be improved effectively. In order to coordinate energy storage system and conventional thermal units, such issues as the primary frequency regulation characteristics of conventional thermal units and its cooperation with energy storage system and their coordination operation are analyzed based on the primary frequency regulation mathematical model of regional power grid. The coordination principle that conventional thermal units take main role and the energy storage system takes the supplementary role in primary frequency regulation is proposed. In addition, the whole control strategy of primary frequency regulation with the involving of energy storage system, which includes such functions as improved droop control, exiting control of regulation control and energy management control, is proposed. In the end, its effectiveness is verified through the simulation results.

**Keywords:** energy storage system; regional power grid; primary frequency regulation; control strategy

基金项目: 国家电网公司科技项目(XT71-13-037)

primary frequency regulation; control strategy

## 0 引 言

为使电网稳定可靠运行及保证相应的电能质量, 需对电网运行频率进行控制。频率控制的本质为控制网内发电量与用电量的实时平衡, 由一次调频、二次调频以及三次调频来实现, 一次调频在维持电网频率稳定中发挥着重要作用。同时, 随着风力发电、光伏发电等具有间歇性、不确定性及波动性特点的新能源发电大规模接入电网, 其剧烈的功率波动或故障退出都将会对电网频率稳定产生不容忽视的影响, 且其自身不具备调频能力, 常规机组必须承担由此带来的调频任务。现阶段国内的调频电源主要为火电机组, 然而由于其存在响应速度慢、爬坡速率低的缺点, 同时其动态特性受调频死区、调频上下限及机组迟滞率等非线性因素影响, 调频质量与灵活性难以满足要求甚至出现功率反调现象<sup>[1]</sup>, 这一情形在孤立运行的区域电网中表现得尤为明显。虽然水电机组调频性能优于火电机组, 但由于其建设受地理条件限制, 可提供的调频容量有限。

近年来发展起来的储能技术包括锂离子电池、钠硫电池、钒液流电池、超级电容、飞轮储能等, 在使用寿命、功率和容量的规模化、制造成本等方面已获得了突破, 具备了进入电力行业的基础条件。相对于常规机组, 储能技术的突出优点是快速精确的功率响应能力<sup>[2]</sup>。其调频效果远优于火电机组, 增加储能能够有效提升以火电为主的电力系统整体调频能力, 保证系统频率稳定, 提高频率及联络线功率合格率, 提升电网运行的可靠性及安全

性<sup>[3]</sup>。储能参与电网调频在全球范围内,尤其是在美国获得了技术及应用上的长足发展,在美国应用的实践证明其对提高电力系统的稳定安全、提高电能质量及对新能源的消纳吸收都有着积极作用;同时储能参与调频也得到了政策层面的积极推动,如2011年,美国联邦能源监管委员会(FERC)提出的核心内容为按调频服务效果支付调频补偿费用的755法案,有效解决了储能参与调频的合理收益问题<sup>[4]</sup>。储能参与电力调频在美国市场的成功也得到了我国的高度重视,2016年6月,国家能源局下发《关于促进电储能参与“三北”地区电力辅助服务补偿(市场)机制试点工作的通知》,鼓励投资建设电储能设施,进一步探索电储能技术在电力系统调频调峰方面的作用,同时通知中明确提出了“按效果补偿原则”尽快调整调峰调频辅助服务计量公式,提高辅助服务补偿力度,适时将电储能参与辅助服务转化为常态运行。

国内外学者针对储能系统参与电网调频进行了相应的研究,文献[3-4]中详细介绍了多个服务于电网二次调频的储能调频示范工程,其中包括国内第一个储能调频示范项目——北京石景山热电厂2MW锂电池储能电力调频系统;文献[5]针对我国的实际情况,对大规模储能系统辅助常规机组参与调频的技术可行性进行了分析,得出了利用储能技术可以更好地服务于电网调频的结论;文献[6-8]对储能技术在风电、光电等清洁能源中的应用进行了相关研究;文献[9]在忽略与传统机组配合问题的条件下,通过仿真方法对不同类型的储能装置参与一次调频时的各自特性进行了分析;文献[10]分析了储能系统在微网中应用的控制策略及容量配置算法。

我国在储能参与调频的研究多针对于二次调频及其在新能源发电中的应用,对储能系统参与区域电网一次调频及与常规火电机组一次调频的配合问题研究较少,同时也没有明确提出适合于储能系统参与的一次调频的控制策略。本文以常规火电机组及储能系统参与一次调频时的各自特点为基础;以火电机组作为一次调频主体,储能系统承担“能量缓冲”为原则;以实现火电机组与储能系统一次调频良好配合为目的,提出了储能系统参与区域电网一次调频的变功频调节系数的改进下垂控制、调频退出控制及电量管理的完整控制策略,并在PSCAD/EMTDC中搭建了相应的仿真模型,验证

了控制策略的正确性。

## 1 区域电网常规机组的一次调频

国内孤立运行的区域电网成因如下:①联络线严重故障、极端天气或地质灾害的发生或人为操作失误导致与大电网的解列;②由于经济性等原因,拥有自备电厂的企业主动选择孤立运行;③由新能源等分布式电源构成的微电网<sup>[11]</sup>。由运行经验可知,孤立运行的区域电网普遍存在维持频率稳定的难题。经典的区域电网一次调频理论分析模型如图1所示。

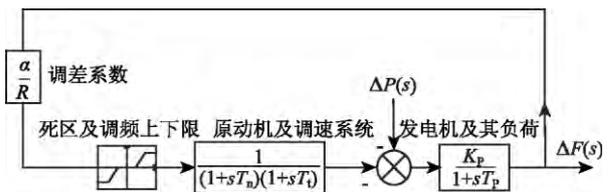


图1 区域电网一次调频数学模型

图中 $\Delta P_L$ 是以区域电网运行的总发电机容量为基准的标么值,表示有功扰动量; $\Delta F$ 是以50Hz为基准的标么值,表示电网频率变化量; $\alpha$ 为系统中参与一次调频机组的容量占孤网中运行机组总容量的比值; $R$ 为调速器调差系数; $T_n$ 为调速器时间常数; $T_l$ 为汽轮机汽容时间常数; $K_p=1/K_L$ , $K_L$ 为负荷频率调节效应系数; $T_p=2H/K_L$ , $H$ 为发电机标么惯性时间常数<sup>[12]</sup>。当有功扰动为阶跃性负荷时,有 $\Delta P_L(s)=\Delta P_L/s$ ,同时忽略死区及调速器调频上下限时,频率变化的频域表达式如下:

$$\Delta F(s) = - \frac{\frac{K_p}{1+sT_p} \times \frac{\Delta P_L}{s}}{1 + \frac{\alpha}{R} \times \frac{K_p}{1+sT_p} \times \frac{1}{(1+sT_n)(1+sT_l)}} \quad (1)$$

应用终值定理可求得稳态频率偏差值如下式:

$$\Delta f = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta F(s)] = - \frac{K_p}{1 + K_p \alpha / R} \Delta P_L = - \frac{\Delta P_L}{K_L + \alpha / R} \quad (2)$$

由式(1)可知,频率变化与负荷扰动量 $\Delta P_L$ 成正比,由于 $\Delta P_L$ 是以网内运行总发电机容量为基准的标么值,因而可知在相同的负荷扰动下,区域电网的 $\Delta P_L$ 值将远大于大电网,这也是孤网频率稳定问题远比大电网严重的原因。

区域电网一次调频的静态频率特性曲线如图 2 所示， $P_E$  和  $P'_E$  分别为考虑和不考虑非线性环节时机组的一次调频静态频率特性曲线，其斜率的绝对值为  $\alpha/R$ ，负荷静态频率特性曲线为  $P_0$ ，其斜率绝对值为  $K_L$ ， $\epsilon$  为调速器死区， $\Delta P_{max}$ 、 $\Delta P_{min}$  为调速器的一次调频上下限。通常  $K_L$  远小于  $\alpha/R$ 。

常规机组的一次调频功能主要由于其调速器来实现。目前国内火电机组配置的调速器多为数字电液调速器 (DEH, digital electric hydraulic control system)，其主要由 3 部分组成，分别为速度/负载控制环节、OPC 环节和执行机构，其详细数学模型如图 3 所示(简化了 OPC 环节)，机组和大电网并列运行时通常选择控制方式 2(功频控制模式)，而孤立运行时，为了避免功率反调现象，选择控制方式 1(转速控制方式)<sup>[1]</sup>，图中数据均为标么值。

一次调频的物理过程简述如下：电网内功率不平衡导致频率变化，调速器速度/负载控制环节检测到这一变化，在相应的控制模式下输出调门指令  $P_{CV}$ ，调速器的油动机控制机构接受这一调门指令

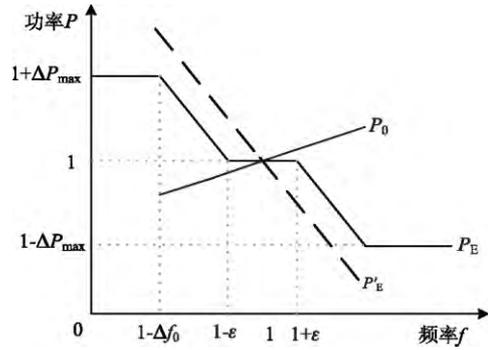


图 2 静态频率特性曲线

并执行，调节调门开度  $P_{GV}$ ，从而调节汽轮机输出的机械功率，然而由于汽轮机的汽容影响，机械功率滞后于汽门开度<sup>[12]</sup>。由总控制过程可知，由于油动机的执行动作总需要一定的时间，汽轮机汽容影响不可避免，因而传统机组的一次调频响应速度慢，且难以改进。其典型的一次调频响应曲线如图 4 所示。孤网运行时，一次调频暂态过程中的频率偏差大，威胁着电网的稳定运行。

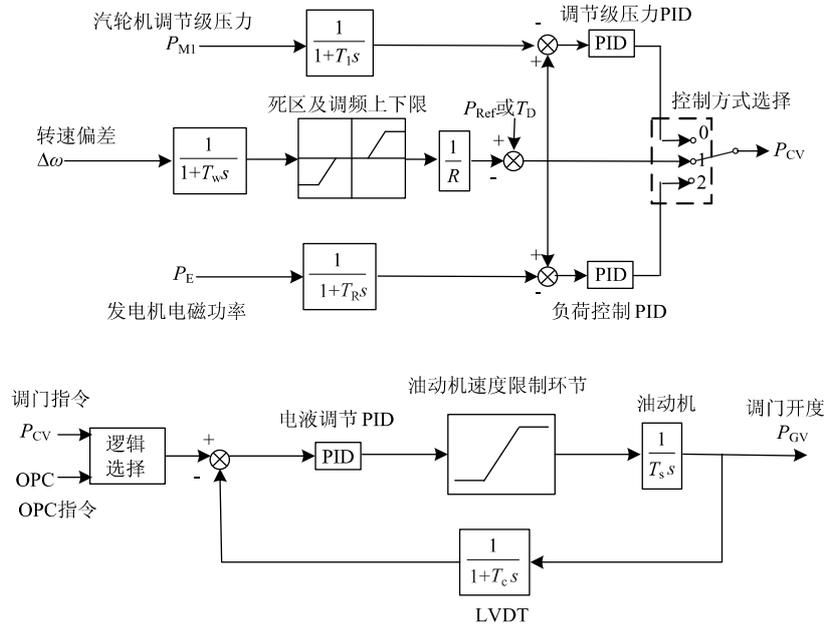


图 3 调速器数学模型

### 2 含储能系统的区域电网一次调频

储能系统按其用途可分为能量型储能和功率型储能两大类，能量型储能的代表有抽水蓄能、化学电池等，其特点为能量密度高、放电时间长；功率型储能的代表有超级电容器、飞轮储能等，

其特点为功率密度高、响应迅速但能量密度相对较低。能量型储能多用于电网的二次调频，如抽水蓄能在电网的二次调频中已有广泛应用。同时我国一次调频响应精度指标为：电网频率变化超过一次调频死区开始时的 15s 内机组的调频幅度达到最大幅度的 90%，45s 内机组的实际出力与响应

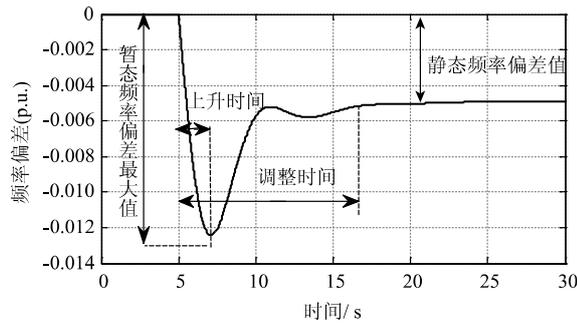


图4 一次调频频率响应曲线

精度误差不大于3% (即一次调频基本结束)<sup>[13]</sup>, 由此特点可知, 一次调频动作调整时间为秒级, 相较于以能量密度高为特点的能量型储能, 功率密度高的功率型储能在参与区域电网的一次调频时更具优势。近年来获得技术突破超级电容受到业界的广泛关注, 其由双电层理论研制而成, 响应时间为毫秒级, 属于静态元件, 运行过程中可靠性高、维护工作量小, 且其材料无毒性, 环境友好, 适合于作为储能装置参与区域电网的一次调频。需要特别指出的是, 下文所述的储能系统特指化学电池、超级电容等响应时间毫秒级的新型储能装置, 不包含抽水蓄能机组。

1992年, D. Kottick M. 提出储能电源应用于孤岛系统的频率调整, 基于频率响应模型提出将储能电源等效成时间常数为  $T_{Esc}$  的一阶惯性环节乘以功频调节系数  $K_{Esc}$ , 用于分析其对电网调频的影响<sup>[13]</sup>, 其传递函数如图5所示。

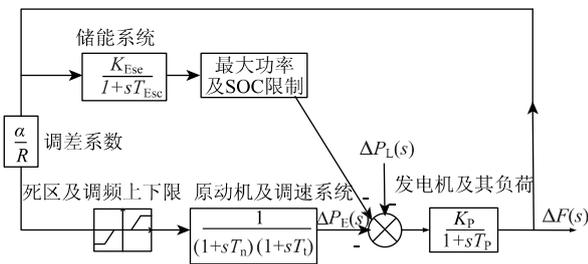


图5 包含储能系统一次调频模型

忽略调速器及储能系统的非线性环节时, 此时频率变化的频域表达式如下:

$$\Delta F(s) = \frac{\frac{K_p}{1+sT_p} \times \frac{\Delta P_L}{s}}{1 + \frac{\alpha}{R} \times \frac{K_p}{1+sT_p} \times \left[ \frac{1}{(1+sT_n)(1+sT_T)} + \frac{K_{Esc}}{1+sT_{Esc}} \right]} \quad (3)$$

此时稳态频率偏差值如下式:

$$\Delta f = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta F(s)] = - \frac{\Delta P_L}{K_L + \alpha/R + K_{Esc}} \quad (4)$$

由图5可知, 在一次调频的过程中, 负荷频率效应、常规机组与储能系统在一次调频指令功率量由比值  $K_L : \alpha/R : K_{Esc}$  确定。相较于常规机组一次调频而言, 储能系统一次调频特点为响应更快、精度更高, 然而一般而言区域电网中配置的储能系统的总容量远小于常规机组。

### 3 含储能系统区域电网一次调频控制策略

结合常规机组及储能系统各自一次调频的特点, 有储能系统参与的区域电网一次调频预期的目标及需要与常规机组配合的问题如下:

- ① 改善暂态频率特性, 减小暂态频率偏差;
- ② 与常规机组调速系统的死区及调频上下限相配合;
- ③ 储能系统容量有限, 因而须由常规机组承担主体调频功率, 储能系统承担功率缓冲;
- ④ 在一次调频基本结束, 电网频率基本稳定时, 储能系统能够平稳地退出一次调频, 节省能量。

为此, 提出了变功频调节系数的改进下垂控制及调频退出控制。下垂控制指采取与发电机相似的功率-频率静特性曲线(如图2所示)来控制并网逆变器的出力<sup>[14]</sup>, 由频率偏差来决定增发的功率量。然而由于频率偏差并不能反映电网网内的电磁功率与机械功率的不平衡量, 采用该种控制方式无法充分发挥储能装置响应速度快的特点, 考虑发电机的转子运动状态方程如下式(式中各参数均为标么值)<sup>[15]</sup>:

$$\frac{dw}{dt} = 2\pi \frac{df}{dt} = \frac{1}{T_J} (P_T - P_e) \quad (5)$$

由上式得

$$(P_e - P_T) = -2\pi T_J \frac{df}{dt} = 2\pi T_J \frac{d(1-f)}{dt} = 2\pi T_J \frac{d\Delta f}{dt} \quad (6)$$

可见频率偏差的微分与功率不平衡量成正比, 以此为据, 变功频调节系数的改进下垂控制策略如图6所示, 在传统的下垂控制中叠加频率差值的微分控制作为储能系统功率量参考值, 以此来实现储能系统的功率缓冲功能。

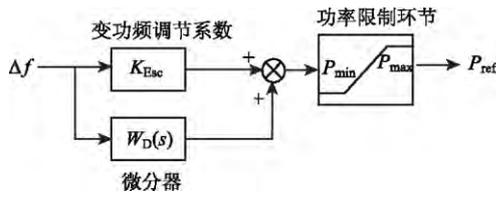


图 6 改进的下垂控制

由图 5 及式(4)可知改变调节系数  $K_{Esc}$  即改变了常规机组与储能系统的功率分配关系，在常规机组的调频工作区时，为了保证其承担功率的主体地位， $K_{Esc}$  不能太大；而在死区及一次调频上下限时机组不具备一次调频能力，此时需由储能系统承担本应由常规机组承担的调频任务。由图 2 可知频率偏差值即反映了机组的各种工作状态，因而  $K_{Esc}$  值应当为变量，且可以根据频率偏差所处的取值区间确定，即采用变功率调节系数，以此实现与常规机组一次调频的配合。结合图 2， $K_{Esc}$  的取值范例如表 1 所示 ( $\epsilon$  为调速器死区，对国内火电机组而言，死区取值为  $\pm 2r/min$ ； $\Delta f_0$  为调频上下限，一般其取值  $\pm 8\% - \pm 10\%$  机组额定功率)：

表 1 变功频调节系数取值表

$\Delta f$	机组调频状态	$K_{Esc}$
$ \Delta f  < \epsilon$	死区	$a/R$
$\epsilon \leq  \Delta f  < \Delta f_0$	工作区	$0.2 \times a/R$
$ \Delta f  \geq \Delta f_0$	上下限	$a/R$

在电网频率基本稳定时(稳定条件由频率偏差变化量  $|d\Delta f/dt| < \epsilon_1$  判定， $\epsilon_1$  可依据实际情况整定)储能系统应当能够平稳地退出的调频，退出控制如图 7 所示：调频退出信号送达后，将下垂控制送来的功率参考  $P_{ref}$  经过锁存器锁存作为初值；退出功率参考值零与储能装置反馈的实际功率作差经过 PI 控制器以实现控制储能装置输出功率为零；将以上两值叠加得到退出功率参考  $P_{ref0}$ ，以实现平稳退出，退出速率可通过改变 PI 控制器参数进行调节。

储能系统参与一次调频整个控制的流程如下图 8 所示，图中 SOC(state of charge)为储能系统的荷电状态，也被称为剩余电量，通常电池的 SOC 工作区间为  $0.2\% \sim 0.8\%$ 。通过测量 SOC 值来实现储能系统一次调频时的能量管理，若 SOC 值不在工作区间，则应将储能系统闭锁。

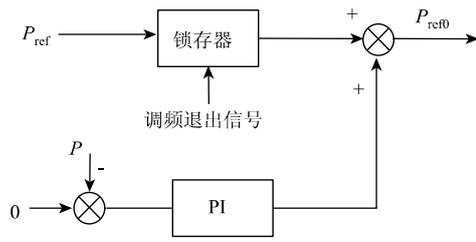


图 7 调频退出控制

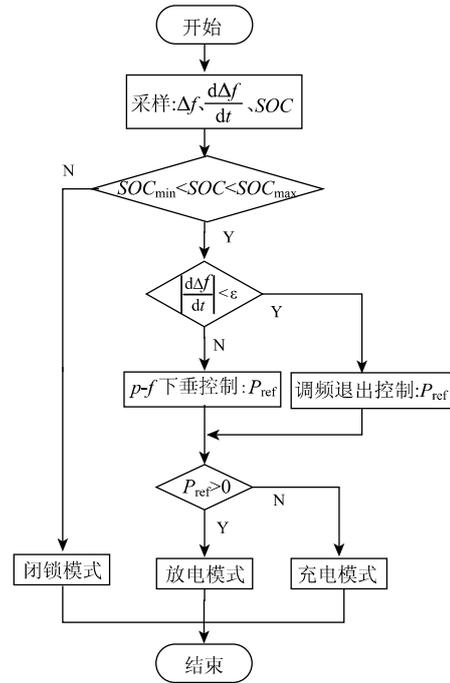


图 8 储能系统参与调频整体控制策略

### 4 仿真分析

选取超级电容储能装置作为储能系统，采用上文所述的一次调频控制策略，在仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建区域电网模型如图 9 所示，超级电容储能装置通过 DC-DC 双变换器及并网逆变器与电网相连，并网逆变器采用基于 dq 轴的功率解耦双闭环控制(该控制方法可以实现并网逆变器有功无功的独立控制)，外环为功率环并控制无功为 0，内环为电流环；DC-DC 双变换器同样采用双闭环控制，外环为电压环，维持直流母线电压的稳定，内环为电流环；区域电网中采用的调速器模型如上文图中图 3 所示。

运行模式设置如下：储能系统的最大功率容量配置为 5MW/0.5MWh，初始 SOC 设定为 0.5；

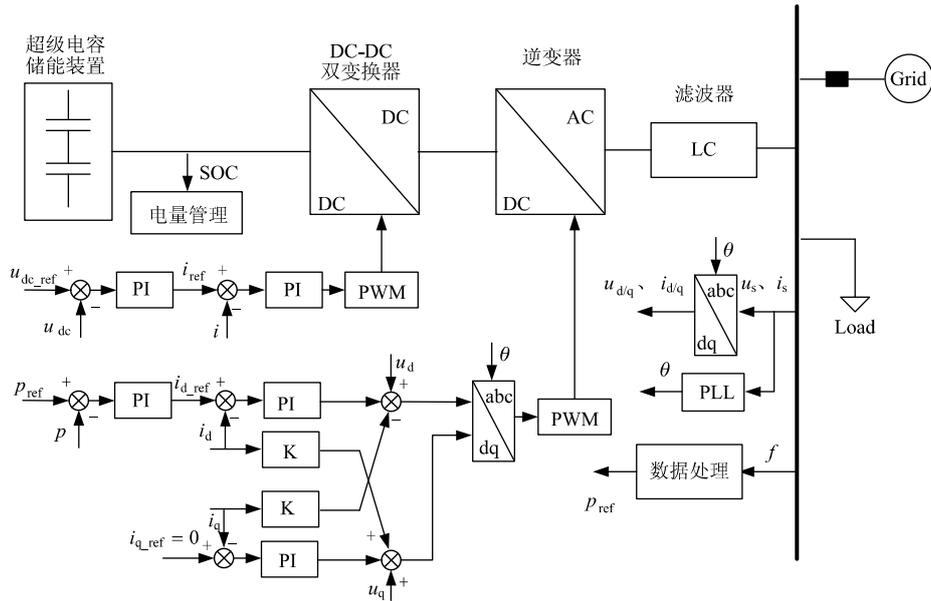


图9 包含储能系统区域电网仿真模型

区域电网机组总容量为 160MVA，运行机组负荷总功率为 65MW，设置的扰动为 6.5MW 的负荷阶跃增加。

区域电网频率变化如图 10 所示，图中改进下垂控制特指图 6 中控制策略，传统下垂控制特指上文图 6 中去除微分器后的控制策略。由图 10 可见储能系统参与调频时可以有效缩减暂态频率偏差，并且改进下垂控制效果优于传统下垂控制。

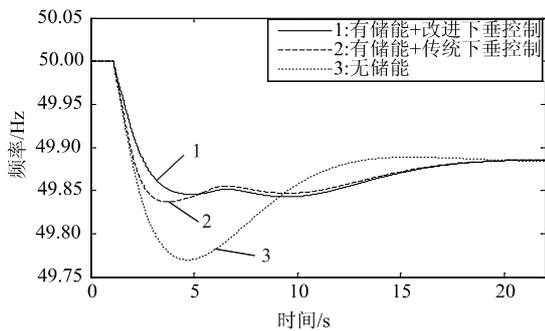


图 10 阶跃负荷扰动下频率响应曲线

图 11 为一次调频过程中储能系统与常规机组的功率增量，以改进下垂控制为例说明如下储能系统参与调频的工作过程：扰动发生至频率偏差处于机组调频死区前，储能系统迅速增发有功；当频率偏差进一步增大，常规机组进入调频工作区后，储能系统的有功调节系数在无功调节系数的控制下大幅减小，避免与机组争抢有功；当一次调频基本结束，电网频率变化量很小时，在

调频退出策略控制下，储能系统功率逐渐减小直至退出调频。对比改进与传统下垂控制时的有功增量可知改进下垂控制更能充分发挥储能系统响应快的优点。

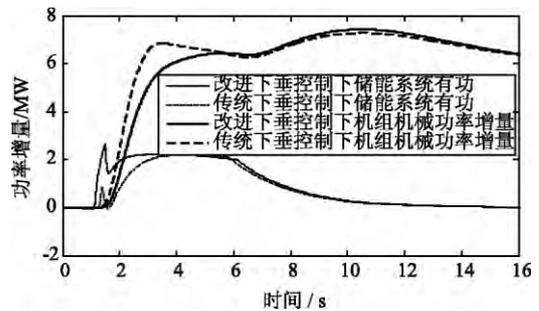


图 11 储能及机组功率曲线

由图 12 可知采用改进下垂控制辅助常规火电机组调频时，其整个调频过程总耗电量为  $(0.5 - 0.492) \times 0.5 \text{MWh} = 4 \text{kWh}$ 。

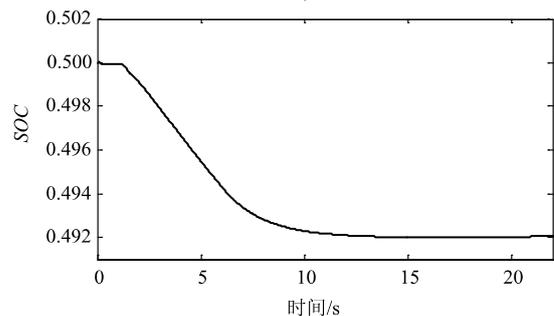


图 12 改进下垂控制储能系统 SOC

## 5 结 论

本文针对储能系统参与一次调频时与常规机组的配合问题展开研究，提出了相应的控制策略，建立了仿真模型，结论如下：

① 储能系统参与区域电网的一次调频可以有效改善其暂态频率特性，减小暂态频率偏差；

② 在下垂控制中叠加频率偏差微分控制量的改进下垂控制策略可以充分发挥储能系统响应速度快的特点，可以更好地改善区域电网的暂态频率特性，同时储能系统的调频退出控制策略可以有效地节省储能系统的配置容量；

③ 储能系统采用变功率调节系数能够更好地适应常规机组死区、调频上下限等一次调频非线性特性，更好地实现与常规机组的一次调频配合。

### 参 考 文 献

- [1] 张健铭. 小地区孤网频率稳定控制研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [2] 孙丙香, 姜久春, 时玮, 等. 钠硫电池储能应用现状研究 [J]. 现代电力, 2010, 27(6): 62-65.
- [3] 丁冬. 适用于调频的储能系统配置策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [4] 陈大宇, 张粒子, 王澎, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 9-13.
- [5] 李建林, 杨水丽, 高凯. 大规模储能系统辅助常规机组调频技术分析 [J]. 电力建设, 2015, 36(5): 105-110.
- [6] 吴俊玲, 吴畏, 周双喜. 超导储能改善并网风电场稳定性的研究 [J]. 电工电能新技术, 2004, 23(3): 59-63.
- [7] 侯世英, 房勇, 孙韬, 等. 混合储能系统在独立光伏发电系统功率平衡中的应用 [J]. 电网技术, 2011, 35(5): 183-187.
- [8] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 1-4.
- [9] 邓威, 谢煜东, 黄际元, 等. 多类型储能一次调频特性研究 [J]. 湖南电力, 2015, 35(1): 1-4, 10.
- [10] 戚艳. 微网广义储能系统协调控制策略及容量优化配置方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [11] 祁志远, 肖仕武, 李飞. 电解铝企业孤网运行频率的稳定控制策略研究 [J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2016, 43(1): 27-31, 38.
- [12] 杨冠城. 电力系统自动装置原理 [M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2007: 140-145.
- [13] 雷博. 电池储能参与电力系统调频研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [14] 刘海涛, 邱丽君, 兰征, 等. 引入储能单元的虚拟同步机研究 [J]. 电源学报, 2016, 14(2): 1-8.
- [15] 常鲜戎. 电力系统暂态过程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 117-120.

收稿日期: 2016-06-01

作者简介:

李飞(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制, E-mail: 1045278574@qq.com;

肖仕武(1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行分析与控制、电力系统故障分析与继电保护, E-mail: xiaoshiwu@263.net;

徐歌(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制, E-mail: xuge\_sg@163.com;

宋瑞华(1972—), 男, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为电力系统电磁暂态仿真分析, E-mail: 2391448346@qq.com.

(责任编辑: 杨秋霞)