

储能系统参与电网调频控制技术研究

尽管电力系统不断进步，但电网二次调频依然面临挑战。针对此问题，构建了储能系统参与电网调频的控制系统。该控制系统包含常规机组一、二次调频的协调控制方法、储能系统与常规调频电源的协调控制方法以及储能系统参与电网二次调频协调控制方法。对协调控制方法进行了仿真验证，通过建立满足控制策略的目标函数，实现了区域控制误差（ACE）信号在常规调频电源和电池储能系统之间的分配。同时，基于SOC(State of Charge)幂函数完成了两个储能单元之间的功率分配。验证了控制系统在电网调频中的有效性。

李海峰/华泰慧能（北京）能源技术有限公司

0 引言

电力系统运行时，对系统频率调节必须进行有效的控制，而这项任务主要由二次调频完成。尽管电力系统技术不断进步，但二次调频依然面临许多挑战^[1-3]。一方面，由于电力系统负荷的动态和惯性特性，系统检测，原动机、发电机出力控制及调节环节总会有不同程度的时差和误差。另一方面，电力系统本身包含大量控制器，且随着系统不断大型化、复杂化和智能化，更多新型控制器将被引入，这些控制器作用于不同层面，控制目标相互独立，甚至存在冲突^[4-6]。由此可见，制定电力系统调频控制策略时若不进行协调，则可能导致各方相互牵制、抵消，控制效果将背离目标。上述问题在风电、光伏发电等新能源发电并网之后将变得更加显著。与此同时，储能系统参与电力系统调频进一步丰富了系统调频的选择。因此，如何

合理协调各调频电源、合理分配负荷，以控制和调节各发电机、分布式电源和储能系统的输出功率使系统频率达到电网要求，也给国内外的调频控制研究提出了新的课题^[7-8]。

在储能系统辅助二次调频中，对ACE信号的分析、处理和分配非常重要。储能系统因其快速反应能力和高功率输出而具有很好的辅助功能^[9-11]。对ACE信号在常规机组和储能系统之间的合理分配，可以提高常规机组的效率和延长储能系统的寿命，而对于多个SOC初始状态不同的储能单元，使其SOC趋于一致和功率均分将有利于储能系统的有效利用^[12-13]。

本文主要研究储能系统参与电力系统一、二次调频的协调控制策略，针对二次调频中ACE信号的分配和互联电力系统储能系统与LFC的协调控制提出了新的方法，并在Matlab软件上进行系统仿真及结果分析。

1 常规机组一、二次调频控制策略

由于一次调频和二次调频在控制目标、运行方式和响应时间上有较大差异，两者均投入运行时，双方的控制目标可能会出现相互冲突，控制行为也可能不利于系统的安全稳定运行，如图1所示。

图1中，一次调频、二次调频的控制信号可能出现方向相反的情况（主要限于TBC及FTC控制模式），而且由于受



李海峰/高级经济师

关键词/Keywords

储能系统 ·
电网调频 ·
控制系统 ·

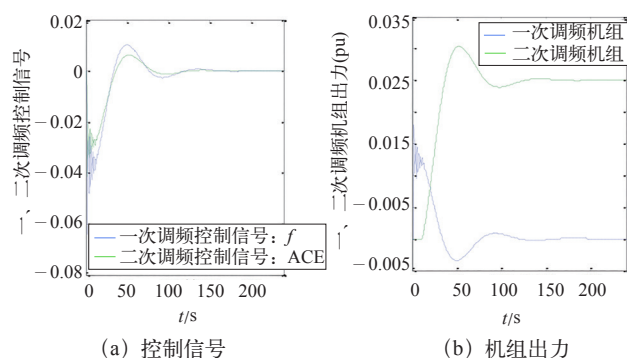


图1 调频应用控制信号及机组出力

到ACE信号延时的影响，机组所接受的ACE信号不一定针对当下电网的状况，所以机组的一次调频和二次调频的调节量可能相互矛盾，导致调频效果削弱。

针对上述问题，根据工程经验提出了以下几种解决方案：①在一次调频动作后屏蔽二次调频；②将一次调频量折算到二次调频的计算过程中，即在协调控制系统（Coordinated Control System, CCS）中把一次调频的调节量直接加入到机组的负荷设定中；③设置合理的一次调频负荷限制，增加二次调频的机组允许功率偏差；④退出一次调频，接收二次调频命令，当二次调频结束后，若电网频差大于转速死区，一次调频将再次自动投入；⑤当一、二次调频反向时，二次调频闭锁，若T时刻内一次调频方向仍然不改变，二次调频即更改指令，接收下发新的二次调频指令。若一、二次调频实际需求曲线与二次调频曲线相交，或一、二次调频曲线方向又相反时，二次调频将再次闭锁，T时刻内再检测一次调频方向是否变化，如此循环；⑥基于区域等效模型和微分博弈理论解决一、二次调频协调问题。

本文应用微分博弈论理论来缓解一、二次调频的冲突反调现象，减少无谓的机组磨损，提高机组的调频效率，具体技术路线如图2所示。

前五种方案都要在某一时间段内闭锁一次或二次调频，虽然能解决一、二次调频相冲突的问题，但并非最好的解决方法，也无法将一、二次调频的能力进行最优结合。第六种方案把一、

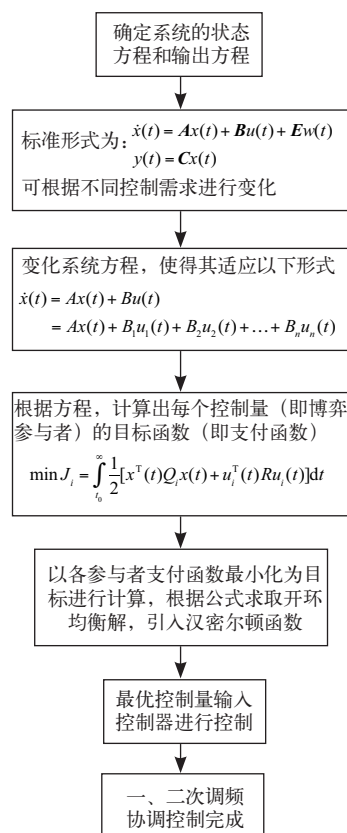


图2 一、二次调频协调技术路线

二次调频看作本质上是合作、随机及非线性微分博弈。所谓微分博弈，即在时间连续的系统内，多个参与者进行连续的博弈，力图最优化各自独立、冲突的目标，最终获得各参与者随时间演变的策略并达到纳什均衡。该方法通过分析客观存在的博弈对局关系，研究协调策略使各方利益达到均衡点，是一、二次调频有效发挥各控制器作用的最佳途径。

2 储能系统辅助电网调频控制策略

2.1 储能系统参与二次调频协调控制

(1) 控制策略

此控制策略的核心在于利用二次规划的数学方法求解目标函数，以进行需求输出功率的初次分配，再利用储能系统的快速反应能力对输出功率分配进行修正，使发电机组尽量接近其最优运行点，如图3所示。

如图4所示，对于常规机组来说，发电计划范围为某时间范围内发电机不考虑调频或其他辅助

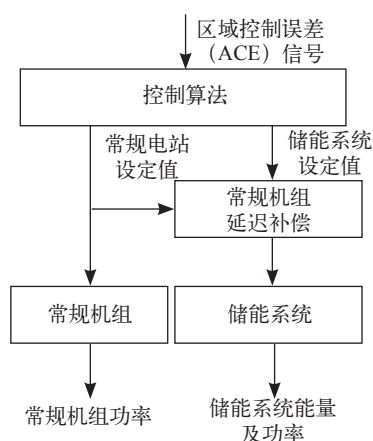


图3 控制策略框图

服务下的出力上下限；发电机基点功率即其最优运行点，在发电基点功率附近运行常规机组的效率会更高；运行上限和运行下限为常规机组技术出力范围；调节容量为常规机组在二次调频应用下的备用容量，主要用于机组二次调频；旋转备用跟调节服务一样都属于容量性质的辅助服务，但略有不同：①作用不同，旋转备用是在系统故障后才开始作用；②调用的时间和条件不同，旋转备用只能在一定的系统条件（如发生某种故障）下调用服务，且调用该容量有一定的时间限制；③对充裕度和服务性能的评价标准不同，对于调节服务，其评价指标为A1、A2或CPS1、CPS2，而旋转备用的评价指标为B1、B2或DCS。

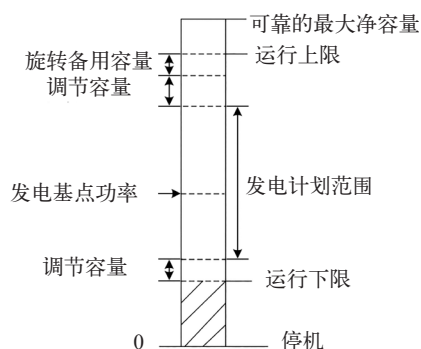


图4 常规机组容量分配示意图

具体控制策略如下：①发电机尽量接近其最优运行点，偏离此运行区域常规机组的效率会降低；②根据调频服务的上调与下调指令，尽量使储能系统保持在规定的能量标准范围内；③随时能够提供调频服务。

对于控制策略中的第一点和第二点，权重系

数的大小决定承担二次调频的主要是储能系统还是常规机组，因此必须慎重选择。对于控制策略中的第三点，调频系统必须满足既定的约束。若不满足约束（如储能系统能量耗尽），使用优化算法使二次调频尽量接近需求。

(2) 目标函数、约束条件和求解方法

储能系统参与二次调频的目标有两点，一是使常规机组尽量接近最优运行点以提高机组的效率，二是使储能系统的能量状态保持在规定范围以延长其使用寿命，同时满足调频服务。

1) 目标函数。为了同时满足控制策略中的第一点和第二点，建立目标函数 $F(x)$ ，使常规机组尽量靠近最优运行点，储能系统尽量保持在规定能量范围内。对于总的目标函数，可以化为 F_{bess} 和 F_{hyd} 相加的函数，并分别化简，即

$$\min_x F(x) = \min_x [F_{bess}(X_{bess}) + F_{hyd}(X_{hyd})] \quad (1)$$

式中， F_{bess} 为实际能量偏离储能系统最优能量点的程度； F_{hyd} 为实际功率偏离常规机组最优运行功率点的程度； X_{bess} 为储能的功率输出； X_{hyd} 为常规机组的功率输出。

$$\begin{aligned} F_{bess} &= a_{bess} (E_{bess,next} - E_{bess,offset})^2 \\ &= a_{bess} (E_{bess} - X_{bess} \Delta t - E_{bess,offset})^2 \\ &= a_{bess} [(E_{bess} - E_{bess,offset})^2 + (X_{bess} \Delta t)^2 \\ &\quad - 2(E_{bess} - E_{bess,offset}) X_{bess} \Delta t] \end{aligned} \quad (2)$$

式中， a_{bess} 为储能系统的权重系数； $E_{bess,next}$ 为储能系统的下一阶段的能量； $E_{bess,offset}$ 为储能系统的最优运行能量； E_{bess} 为储能系统的实时能量； Δt 为取点时间间隔。

$$\begin{aligned} F_{hyd} &= a_{hyd} (P_{hyd} - P_{hyd,eff})^2 \\ &= a_{hyd} (P_{hyd,sch} + X_{hyd} - P_{hyd,eff})^2 \\ &= a_{hyd} [(P_{hyd,sch} - P_{hyd,eff})^2 + X_{hyd}^2 \\ &\quad + 2(P_{hyd,sch} - P_{hyd,eff}) X_{hyd}] \end{aligned} \quad (3)$$

式中， a_{hyd} 为常规机组的权重系数； P_{hyd} 为常规机组的功率输出； $P_{hyd,eff}$ 为常规机组的最优运行功率； $P_{hyd,sch}$ 为常规机组的计划功率输出。

2) 约束条件。针对控制策略中的第三点，保证混合出力满足调频功率输出需求，并满足储能

系统与常规机组本身的技术要求。

$$\begin{cases} X_{\text{bess}} + X_{\text{hyd}} = RS \\ X_{\text{bess,min}} \leq X_{\text{bess}} \leq X_{\text{bess,max}} \\ X_{\text{hyd,min}} \leq X_{\text{hyd}} \leq X_{\text{hyd,max}} \\ X_{\text{bess,min}} = \max(P_{\text{bess,min}}, \frac{E_{\text{bess}} - E_{\text{bess,max}}}{t}) \\ X_{\text{bess,max}} = \min(P_{\text{bess,max}}, \frac{E_{\text{bess}} - E_{\text{bess,min}}}{t}) \\ X_{\text{hyd,min}} = \max(P_{\text{hyd,cap,min}}, P_{\text{hyd,min}} - P_{\text{hyd,sch}}) \\ X_{\text{hyd,max}} = \min(P_{\text{hyd,cap,max}}, P_{\text{hyd,max}} - P_{\text{hyd,sch}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $X_{\text{bess,max}}$ 、 $X_{\text{bess,min}}$ 分别为储能系统设定的功率输出上下限; $X_{\text{hyd,max}}$ 、 $X_{\text{hyd,min}}$ 分别为常规机组设定的功率输出上下限; $P_{\text{bess,max}}$ 、 $P_{\text{bess,min}}$ 分别为储能系统的额定功率上下限; $E_{\text{bess,max}}$ 、 $E_{\text{bess,min}}$ 分别为储能系统的能量上下限; $P_{\text{hyd,cap,max}}$ 、 $P_{\text{hyd,cap,min}}$ 分别为常规机组用于二次调频功率输出的上下限; $P_{\text{hyd,max}}$ 、 $P_{\text{hyd,min}}$ 分别为常规机组的额定功率输出上下限, RS 为二次调频需要功率。

3) 求解方法。结合目标函数与约束条件, $F(x)$ 可以化为标准二次型的形式, 即

$$\begin{cases} F = \frac{1}{2} X^T H X + f^T X \\ X = \begin{bmatrix} X_{\text{bess}} \\ X_{\text{hyd}} \end{bmatrix} \\ H = \begin{bmatrix} 2a_{\text{bess}} \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 2a_{\text{hyd}} \end{bmatrix} \\ f = \begin{bmatrix} -2a_{\text{bess}} (E_{\text{bess}} - E_{\text{bess,offset}}) \Delta t \\ 2a_{\text{hyd}} (P_{\text{hyd,sch}} - P_{\text{hyd,eff}}) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

根据目标函数的形式以及要求, 可应用二次规划的方法进行求解。

(3) 常规机组延时补偿环节

常规机组的出力可以等效为一阶惯性环节, 具有延时的特性, 出力会相对迟缓, 这对于二次调频是非常不利的。而储能系统反应迅速, 可以在满足自身的出力需求后对常规机组进行出力延时补偿, 如图5所示。

该方法主要通过计算常规机组的出力延时曲线, 增加储能系统的动作次数以进行延时补偿,

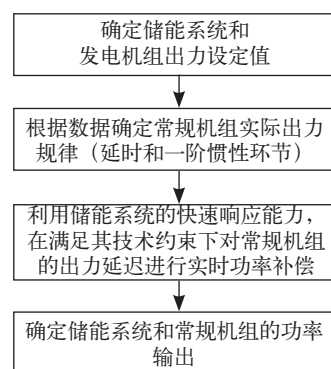


图5 常规机组延迟补偿流程图

从而使储能系统主要承担ACE信号中的高频分量, 常规机组主要承担ACE信号中的低频分量。

(4) 程序流程图

1) 主程序。在主程序中, 首先根据实际情况对参数进行定义以及赋初值, 然后对输入的ACE信号数据进行分析处理, 并根据指定的二次调频控制策略对需求功率进行初次分配和修正, 最后接入储能系统和常规机组的模型进行仿真, 以观察储能系统辅助二次调频的效果, 并对结果进行分析, 如图6所示。

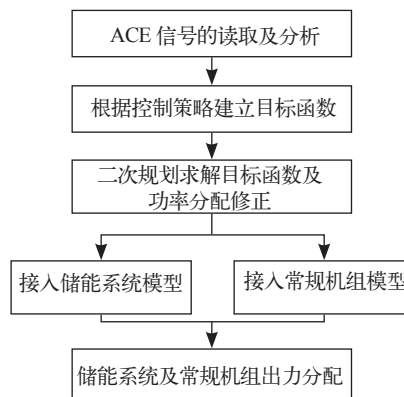


图6 延迟补偿流程图

2) 储能系统与常规机组出力分配子程序。出力分配子程序分为出力初次分配子程序和出力修正子程序。出力初次分配子程序中的目标在于结合控制策略中的第一点和第二点。根据实际情况计算储能系统与常规机组的实时能量约束值和实时出力约束值, 形成二次规划的标准形式, 然后通过二次规划求解, 得到满足控制策略的初次分配的ACE信号。

在功率输出修正子程序中, 利用储能系统响

应时间短的特点,在功率点之间增加储能系统的动作次数,以满足常规发电机组出力延时曲线上的功率缺额,实时补偿常规机组的出力。

2.2 储能系统应用于电网调频协调控制策略

利用储能系统的快速功率调节特性,可在AGC的LFC中为互联系统提供即时的补偿容量,维持系统的稳定。为了充分发挥储能系统在抑制电网频率和联络线功率波动中的作用,避免发生与LFC之间各自独立作用的情况,有必要研究应用于电力系统调频储能系统的协调控制策略。

以往针对这个方向的研究比较少,且主要集中于以最小方差(Integral Squared Error, ISE)等指标为依据,离线联合整定储能系统及LFC的控制参数。然而,这种方法难以计及储能系统与LFC等调频装置存在的各种约束,如储能系统的容量、SOC和额定功率限制,以及常规机组的GRC、可调容量和ACE信号延时等,也未能考虑系统负荷扰动的多样性,所以鲁棒性差。

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)产生于工业过程控制的实际应用中,并与工业应用紧密结合,进而不断完善和成熟。模型预测控制算法由于采用了多步预测、滚动优化和反馈校正等控制策略,具有控制效果好、鲁棒性强以及对模型精确性要求不高的优点。目前提出的模型预测控制算法主要有基于非参数模型的模型算法控制(MAC)和动态矩阵控制(DMC),以及基于参数模型的广义预测控制(GPC)和广义预测极点配置控制(GPP)等方法。其中,模型算法控制采用对象的脉冲响应模型,动态矩阵控制采用对象的阶跃响应模型,这两种模型都具有易于获得的优点。广义预测控制和广义预测极点配置控制是预测控制思想与自适应控制的结合,采用受控自回归积分滑动平均(CARIMA)模型,具有参数数目少、能够在线估计的优点,并且广义预测极点配置控制进一步采用极点配置技术,提高了预测控制系统的闭环稳定性和鲁棒性。

结合MPC的特点,为了解决以上调频的控制问题,本节提出了一套储能系统与LFC协调控制的体系。该体系为分层分布式框架结构,包括上

层的区域协调控制器及下层本地调频控制器。在区域协调控制器中,引入MPC中的GPC,以互联电力系统的CARIMA模型为基础,可结合电网实时信息预测频率与联络线功率的动态轨迹,通过建立储能系统、LFC输入与频率及联络线功率预测量的关系,构造以输出误差为目标函数,以储能系统与LFC调节能力为约束条件的优化模型。而各区域的本地调频控制器接受上层控制器的指令,即能对系统的频率及联络线功率偏差进行校正。

储能系统与LFC协调控制器的任务主要有以下三大部分,如图7所示。

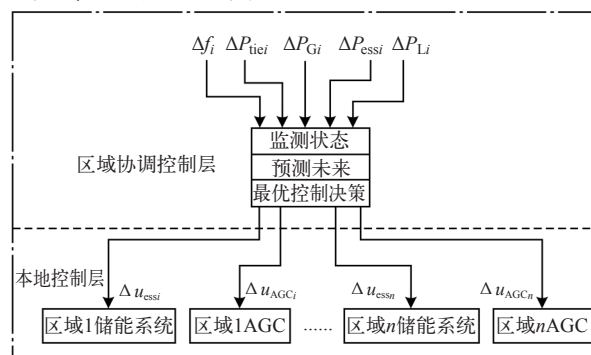


图7 互联电力系统储能系统与LFC的协调控制体系图

(1) 监测状态

区域协调控制器接收各区域监测到的系统实时状态信息,包括 ΔP_{tie_i} (区域联络线交换功率偏移)、 ΔP_{Gi} (发电机输出功率变化)、 ΔP_{ess_i} (储能系统输出功率变化)、 ΔP_{Li} (系统负荷功率变化)和 Δf_i (各区域系统频率偏差)等。

(2) 预测未来

区域协调控制器在系统CARIMA模型的基础上利用实时数据预测未来的 ΔP_{tie_i} 、 Δf_i 的动态轨迹,并建立控制量 Δu_{ess_i} 、 Δu_{AGC_i} 与预测量 ΔP_{tie_i} 、 Δf_i 的关系,为最优策略奠定基础。

(3) 最优控制决策

在第二步结果的基础上,区域协调控制器根据设定的目标函数及各调频装置的约束,求解 Δu_{ess_i} 、 Δu_{AGC_i} 。将 ΔP_{tie_i} 、 Δf_i 的预测值与实际值作比较之后,可以得出误差,从而进一步校正预测模型。

GPC预测控制的具体操作流程如下。

(1) 确定预测模型

首先根据系统确定其对应的状态方程，基本形式为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \quad (6)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (7)$$

$$x(t) \in R^r, u(t) \in R^m, w(t) \in R^p, y(t) \in R^n \quad (8)$$

式中， A 、 B 、 C 和 E 分别为系统的状态、输入、输出及干扰矩阵； $x(t)$ 、 $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别为系统的状态变量、输入变量及输出变量； r 、 m 、 p 和 n 分别为状态、输入、扰动及输出变量的维数。

GPC采用CARIMA模型作为预测模型，按照系统状态方程的基本形式变换成式(9)，即可得到系统的预测模型，即

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})\varepsilon(t)/\Delta \quad (9)$$

式中， $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 分别为 z^{-1} 的多项式， $\Delta = 1 - z^{-1}$ ； $\varepsilon(t)$ 表示均值为零的白噪声序列。此处，也可基于Matlab所搭建的区域等效模型直接使用Matlab自带的MPC Controller模块进行直接转化，从而避免编程，但其具体设置需参考文献。

(2) 确定预测输出，根据目标函数进行优化

在预测模型的基础上，可以利用实时信息预测未来时刻的输出变量的动态轨迹，其表达式为

$$Y = G\Delta U + f \quad (10)$$

式中， Y 为输出序列； ΔU 为输入增量序列；系数矩阵 G 和列向量 f 在当前时刻为已知，可由实时信息进行获取或者直接取定为系统的初始状态。

一般将GPC的目标函数定义为

$$J = (Y - \omega)^T R(Y - \omega) + \Delta U^T Q \Delta U \quad (11)$$

式中， ω 为给定值； R 、 Q 为加权系数矩阵。

(3) 使用二次规划求解，基于实时值滚动优化

基于目标函数在求最优解的过程中，结合考虑储能系统及常规调频电源的各种约束，包括储能系统的容量、额定功率、DOD、SOC和内部状态量，以及常规电源的GRC、容量和ACE信号延时等。将各约束转化为系统的输入量，即可将求解式(11)的最优值问题转化成带约束的二次规划问题。通过本次控制的结果对下一次预测校正，进而修正控制增量实现滚动优化。

利用预测控制实现互联电力系统储能系统与LFC的协调控制的技术路线，如图8所示。

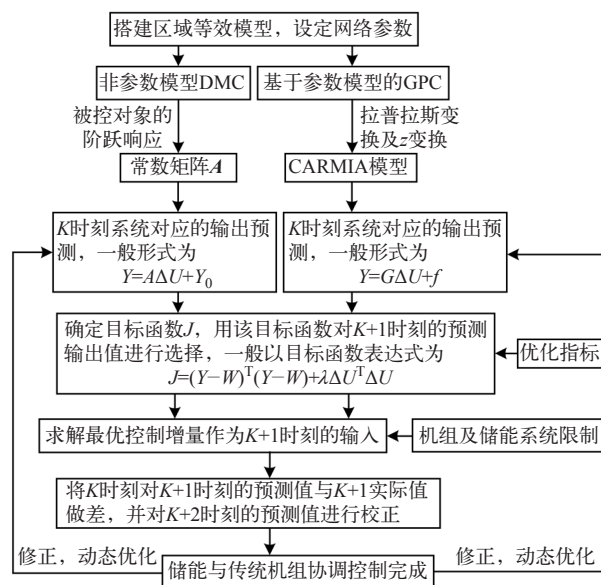


图8 本节技术路线

3 算例验证与分析

3.1 算例仿真

(1) 系统参数

1) 常规水电机组。参与二次调频的常规机组功率范围为100~400 MW；调频服务容量为-20~20 MW；机组响应时间（一阶惯性环节）符合以下规律，接收到信号后延时5 s，之后按照一阶惯性环节变化。

2) 储能系统。参与二次调频的储能系统功率范围为-2~2 MW；容量为0.5 MW·h，按照100%功率可持续充放电15 min；响应时间小于1 s；备用损失为1.1%；充放电效率为90%。

(2) 仿真波形

1) ACE信号功率分配。图9~图11分别反映了ACE信号及其概率分布和幅频特性。联络线潮流方向以省市受电为正，送出为负。

图12反映不同储能系统权重系数和常规机组权重系数下目标函数 F 的值。

图13~图15分别为储能系统出力分配、常规机组出力分配和储能系统荷电状态。

2) 储能单元功率分配

ACE信号进行功率分配后得到储能在二次调

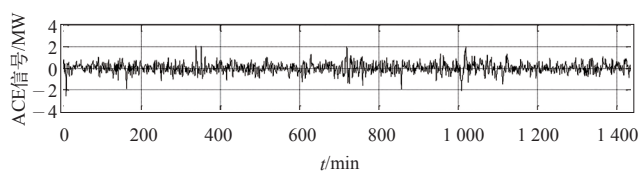


图9 ACE信号

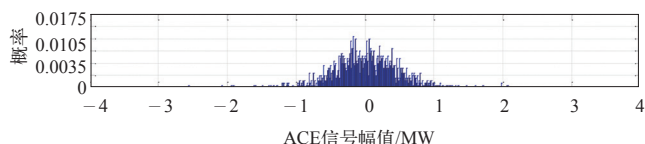


图10 ACE信号概率分布

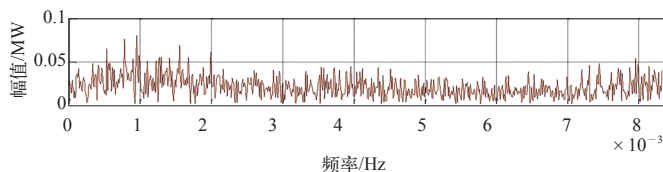


图11 ACE信号幅频特性图

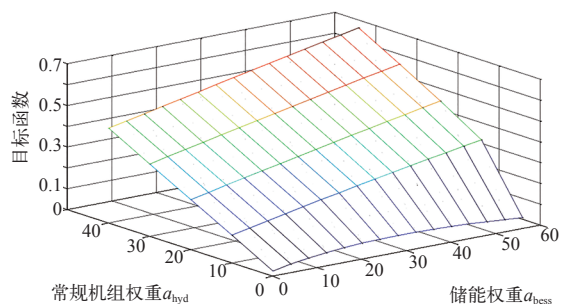


图12 目标函数与常规机组权重和储能系统权重的关系

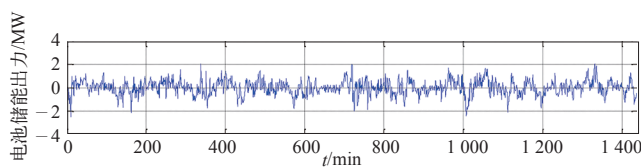


图13 储能系统出力分配 (高频信号)

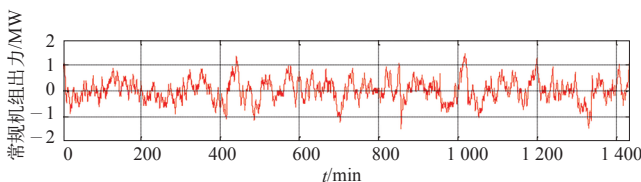


图14 常规机组出力分配 (低频信号)

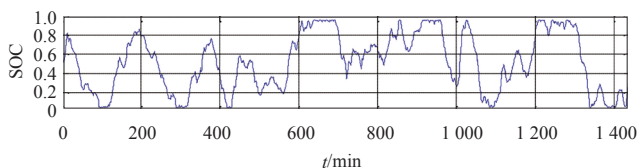


图15 储能系统SOC

频中承担的出力, 再对两个储能系统进行功率分配。若SOC初始状态不一致, 该方法可使SOC尽快趋于一致, 最终达到功率均分, 并判断其响应效果。

图16反映储能单元一和储能单元二的出力分配曲线, 图17反映两个储能系统SOC初始状态之差 $dSOC_0$ 不同时, 两者SOC达到相同的时间 dt 与 n 的关系, 图18反映 $dSOC_0$ 不同时, $dSOC_0/dt$ 与SOC幂指数 n 的关系。

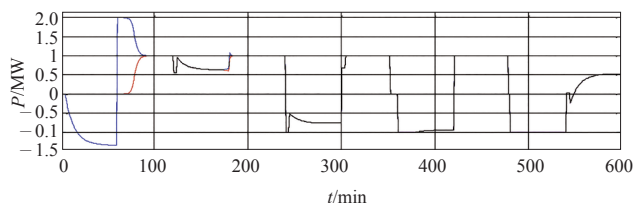
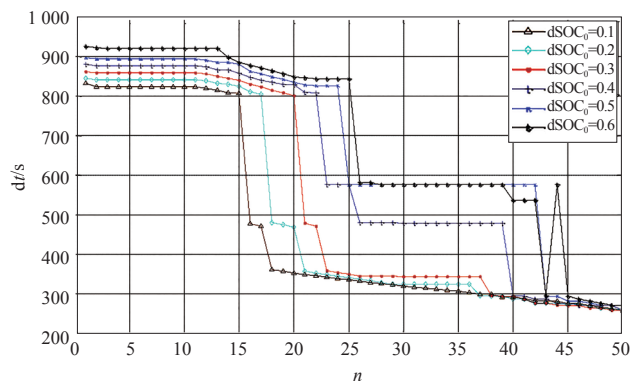
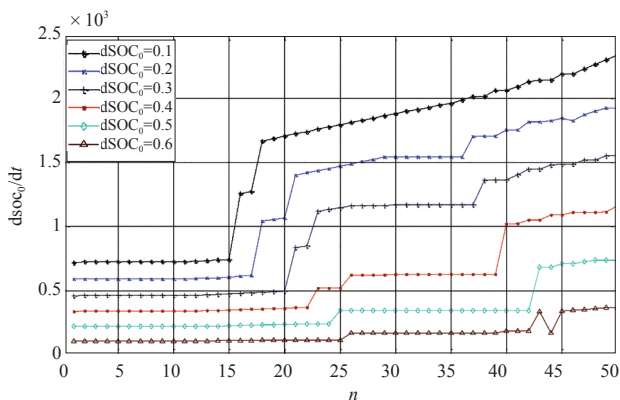


图16 储能单元一和储能单元二的功率分配

图17 $dSOC_0$ 不同时, 两个储能系统SOC达到相同的时间 dt 与 n 的关系图18 $dSOC_0$ 不同时, $dSOC_0/dt$ 与 n 的关系

3.2 结果分析与讨论

本文利用电力调度中心的ACE数据, 并根据调频系统中的常规机组和储能系统的数据, 在

Matlab软件上进行程序仿真,以得到调频系统的功率分配曲线。

(1) ACE信号功率分配

由ACE信号的概率分布和幅频特性可知,其幅值虽然基本满足正态分布,但相对比较分散,且其幅频特性变化不明显,故功率分配中高频分量和低频分量的幅值区分不大。

通过对常规机组权重系数和储能系统权重系统进行统计可得目标函数 F 的取值范围,结论如下:当储能权重一定时,常规机组权重越大,目标函数值越大,控制算法的效果越差;当常规机组权重一定时,储能权重越大,目标函数越大,控制算法的效果越差;综合考虑图12及仿真数据可知,当 a_{bess} 为1、 a_{bess} 为1时,目标函数最小,此时的 a_{bess} 和 a_{bess} 组合最好。此时 $F=0.015\ 3$ 。

常规机组的输出功率满足调频容量范围,且出力相对储能较平缓,适合常规机组出力延迟的特点,从而可以减少常规机组的动作次数,降低常规机组的磨损程度,提高其效率及寿命;储能系统的输出功率满足其出力上下限,且频率较高,幅值较大,储能动作次数较多,从而能够很好地利用储能系统快速响应的特点,从技术上提高二次调频的效果;SOC满足控制策略中的要求,使储能系统保持在比较好的状态上;储能系统辅助调频能够满足ACE信号的出力需求,并达到控制策略中的目标。

(2) 储能单元功率分配

两个储能单元的功率输出能够满足储能系统的出力总需求,并利用SOC幂级数的功率分配方式实现功率均分和SOC趋于一致;随着储能单元幂指数 n 的增大,SOC趋于一致和功率均分的速率越快,使多个储能单元的SOC状态和功率状态相一致;储能单元SOC初始状态的差异越大,该方法的效果越好,从而验证了此方法的有效性。

4 结束语

构建了储能系统参与电力系统调频的协调控制仿真系统。该系统涵盖了基于微分博弈理论的常规机组一、二次调频的协调控制方法,基于模型预测

控制(MPC)理论的储能系统与常规调频电源的协调控制方法以及储能系统参与电力二次调频的协调控制方法。通过对第三种协调控制方法进行仿真验证,结果合理,表明算法有效。具体结论如下。

1) 提出的基于微分博弈理论的常规机组一、二次调频的协调控制方法,能有效解决传统电力系统一、二次调频中的反调问题。

2) 基于模型预测控制理论,提出储能系统与常规调频机组的协调控制方法,该方法能对储能系统和常规调频机组进行有效协调,充分发挥储能系统在抑制电网频率和联络线功率波动中的作用。

3) 提出了基于二次规划的储能系统参与电力二次调频的协调控制方法,通过构建满足控制策略的目标函数,采用某电网的实测数据,实现了ACE信号在储能系统与常规调频电源之间的合理分配,提出的SOC幂级数的方法实现了两个储能单元之间的功率分配。

对储能系统参与电力系统二次调频的协调控制策略进行仿真研究。算例内容包括:一台400 MW的常规机组,调频容量为20 MW;额定功率为2 MW和额定容量为500 kW·h的储能系统;根据湖南电网的实测ACE数据,进行了相关的仿真研究,得到如下结论。

在满足常规机组出力接近最优运行点(320 MW)及储能系统SOC接近0.5的控制原则下,利用统计的方法对常规机组和储能系统的权重系数进行分析,可得当两者权重系数均为1时,目标函数最优。利用二次规划方法实现了ACE信号在常规机组和储能系统之间的合理分配。其中,常规机组承担低频的功率分量,储能系统承担高频的功率分量,既充分利用了储能的优势,又显著减少了常规机组的起停及磨损。在确定储能系统所需承担的功率信号后,对于SOC初始状态不同的多组储能单元结合的情况,通过SOC幂级数的方法进行了功率的分配,该方法能较好地使各储能单元的SOC快速趋于一致。

参考文献

[1] 王成山,于波,肖峻,等.平滑可再生能源发电

- 系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.
- [2] Tomoki A, Rion Takahashi, Toshiaki Murata, et al. Evaluation method of power rating and energy capacity of superconducting magnetic energy storage system for output smoothing control of wind farm[C]. 18th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2008, 2008: 1-6.
- [3] Liang Liang, Li Jianlin, Hui Dong, et al. An optimal energy storage capacity calculation method for 100MW wind farm[C]. 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2010: 1-4.
- [4] 曾杰. 可再生能源发电与微网中储能系统的构建与控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [5] Yang Hongxing, Zhou Wei, Lou Chengzhi. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system[J]. Applied Energy, 2009, 86(2): 163-169.
- [6] Yang Hongxing, Zhou Wei, Lu Lin, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm[J]. Solar Energy, 2008, 82(4): 354-367.
- [7] Asano H, Watanabe H, Bando S. Methodology to design the capacity of a microgrid[C]. IEEE International Conference on system of system Engineering, 2007: 1-6.
- [8] Li Q, Choi SS, Yuan Y, et al. On the determination of battery energy storage capacity and short-term power dispatch of a wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 148-158.
- [9] Nyeng P, Yang Bo, Ma Jian, et al. Coordinated multi-objective control of regulating resources in multi-area power systems with large penetration of wind power generation[C]. 7th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems, Madrid, Spain, 2008: 189-194.
- [10] Makarov Y V, Nyeng P, Yang Bo, et al. Wide-area energy storage and management system to balance intermittent resources in the Bonneville power administration and California ISO control areas[R]. PNNL-17574, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 2008.
- [11] Lu N, Weimar M R, Makarov Y V, et al. The wide-area energy storage and management system – battery storage evaluation[R]. PNNL-18679, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 2009.
- [12] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等. 孤岛运行交流微电网中分布式储能系统改进下垂控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 180-185.
- [13] Lu Xiaonan, Sun Kai, Guerrero J M, et al. SOC-based droop method for distributed energy storage in DC microgrid applications[C]. 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2012: 1640-1645.

(收稿日期: 2018-10-28) **EA**