

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

骆钊,高培淇,和婧,刘可真,梁俊宇,
董敏,刘果.
需求响应下基于自抗扰的抽水蓄能与电
化学储能联合参与电网负荷调频研究.
电机与控制应用,2022,49(3):77.



SEARI
上电科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

需求响应下基于自抗扰的抽水蓄能与电化学储能联合参与电网负荷调频研究*

骆 钊¹, 高培淇¹, 和 婧¹, 刘可真¹, 梁俊宇², 董 敏¹, 刘 果¹

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650000)

摘 要: 为应对大规模可再生能源接入电网带来的随机性和波动性挑战, 确保可再生能源利用的灵活性, 在实际电网运行中加入合理的储能设备成为目前研究的热点。针对电化学储能参与含抽水蓄能电站的互联电网调频问题, 提出一种基于线性自抗扰技术的抽/储联合负荷频率控制(LFC)策略。在建立了考虑调速器死区和发电速度限制等非线性条件的抽/储联合 LFC 模型的基础上比较不同控制器性能, 采用所设计的二阶线性自抗扰控制器(LADRC), 凭借其优良控制性能并引入需求响应(DR)参与调频。仿真验证在抽水蓄能中加入电化学储能后系统具有更强的抗干扰性, 对平抑电网频率波动具有良好的动态响应。

关键词: 电化学储能; 抽水蓄能电站; 线性自抗扰控制器; 需求响应

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)03-0077-10

doi: 10.12177/emca.2021.200

Research on the Combination of Pumped Storage Power Station and Electrochemical Energy Storage Based on ADRC in Load Frequency Control of Power Grid Under Demand Response*

LUO Zhao¹, GAO Peiqi¹, HE Jing¹, LIU Kezhen¹, LIANG Junyu², DONG Min¹, LIU Guo¹

(1. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650500, China;

2. Electric Power Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: In order to cope with the challenge of randomness and volatility brought by large-scale renewable energy access to the power grid, and to ensure the flexibility of renewable energy utilization, it has become a hot topic to add reasonable energy storage equipment into the actual power grid operation. A load frequency control (LFC) strategy based on linear auto disturbance rejection technology is proposed. It can solve the problem of electrochemical energy storage participating in frequency modulation of interconnected power grid with pumped storage power station. Based on the establishment of a combined pumping/storage LFC model considering the dead zone of the governor, the power generation speed limit and the other nonlinear conditions, the performances of different controllers are compared, and a designed second-order linear active disturbance rejection controller (LADRC) is adopted, with its excellent control performance and the introduction of demand response (DR) to participate in frequency regulation.

收稿日期: 2021-12-22; 收到修改稿日期: 2022-02-09

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51907084); 云南省应用基础研究计划项目(202101AT070080); 云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20190087)

作者简介: 骆 钊(1986—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为综合能源系统运行、电力系统运行与控制、信息技术在电力系统中的应用。

高培淇(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。

刘可真(1974—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力设备状态监测与评估技术、信息技术在电力系统中的应用。

The simulation verifies that the system has stronger anti-interference ability after adding electrochemical energy storage to the pumped storage, and has a good dynamic response to smooth the frequency fluctuation of the power grid.

Key words: electrochemical energy storage; pumped storage power station (PPS); linear active disturbance rejection controller (LADRC); demand response

0 引言

抽水蓄能电站(PPS)作为成熟的储能技术,具有容量大、经济性好、环保清洁等优势,对于我国“十四五”规划及未来电力系统的发展至关重要。通过抽水蓄能电站,可充分发挥传统机组的调频潜力,提高常规机组的调频性能^[1-2],有效解决新能源规模化并网带来的电网频率波动问题^[3]。然而 PPS 在夏季频繁投切会导致电网间联络线波动增大,影响线路的输电能力。

在此背景下,可引入电化学储能(电池储能系统,BESS)参与调峰、调频以平滑可再生能源出力的任务。BESS 凭借快速响应和精确的跟踪特性来改善调频效果,可有效弥补 PSS 在调频上的缺陷^[4]。目前 BESS 在提高电力系统的稳定性以及促进可再生能源消纳等方面有着广阔的应用潜力,将成为新一代智能电网的重要组成部分^[5-6]。

目前投运的抽水蓄能电站与电化学储能系统协同运行时存在功率备用上限、荷电状态(SOC)限制及其他种种约束条件。传统 PID 控制处理约束条件效能较差,难以同时应对这些非线性约束^[7]。自抗扰控制(ADRC)是一种非线性控制算法,能够在不依赖于系统精确模型的基础上自动补偿对象模型的内外干扰,实现对不确定、强耦合系统的有效控制,解决非线性约束问题^[8-9]。

然而,现有研究仅仅考虑抽水蓄能或储能系统单独参与调频,并未将两者整合起来,发挥其协同优势。尽管 PPS 与 BESS 在功率等级、响应时间等方面存在着一定差异^[7],但 BESS 联合 PPS 参与负荷频率控制(LFC)的优势有以下几点:(1)响应速度快,可减少功率储备裕度;(2)控制精准,可在任何功率点稳定输出;(3)双向调节;(4)减少 PSS 机组旋转备用容量。

基于以上分析,本文结合 BESS 与 PSS 调频性能,提出一种基于 ADRC 技术的抽/储联合 LFC 策略,并引入需求响应(DR)参与调频。与传统

PID 控制器和分数阶 PID 控制器进行对比,设置不同情景,对调节时间、频率偏移、振荡幅值三个方面进行仿真。仿真结果验证了本文所提控制方法是正确且有效的。

1 区域模型

1.1 机组模型

机组模型包括以汽轮机和水轮机为主的原动机及其调速器^[10]。本文汽轮机选用再热式汽轮机,模型为

$$G_r(s) = \frac{K_r \cdot T_r s}{T_r s + 1} \cdot \frac{1}{T_r s + 1} \quad (1)$$

式中: T_r 为蒸汽室时间常数; K_r 为高压缸段蒸汽与总功率之比; T_r 为汽轮机时间常数; s 为 Laplace 算子。

汽轮机调速器模型为

$$G_g(s) = \frac{1}{T_g s + 1} \quad (2)$$

式中: T_g 为调速器惯性环节的时间常数。

水轮机模型为

$$G_t(s) = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5T_w s} \quad (3)$$

式中: T_w 为水起动时间。

水轮机调速器模型为

$$G_d(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{K_d s^2 + (K_p + f/R)s + K_i} \quad (4)$$

式中: R 为水轮机机组调差系数; f 为系统额定频率; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例环节、积分环节和微分环节的增益。

1.2 区域控制误差

电网的二次调频方式一般采用自动发电控制(AGC),根据受到扰动时机组的区域控制误差(ACE)信号变化,调整该区域的发电机组输出。按照不同的 ACE 策略,AGC 的调控方式分为 3 种^[11]。本文采用联络线偏差控制(TBC)模式,其表达式为

$$e_{ACE} = \Delta P_{tie} + \beta \times \Delta f \quad (5)$$

式中: e_{ACE} 为区域控制误差; Δf 为频率偏移量;

ΔP_{tie} 为联络线交换功率偏移量。

系统的频率偏差系数 β 定义为

$$\beta_i = D_i + 1/R_i \quad (6)$$

为了使 Δf 和 ACE 为零, 系统控制信号以 ACE 为输入, R_i 为调节系数, 负载阻尼系数 D_i 取值为 8.33×10^{-3} MW/Hz。

1.3 非线性环节

(1) 调速器死区。由于调速器的迟滞性和非线性, 其死区一般用间隙特性环节来描述。假设输入输出关系为^[12]

$$Y = F(X, \dot{X}) \quad (7)$$

式中: X 为非线性元件的输入; Y 为非线性元件的输出。

当函数 Y 呈正弦关系时, 有:

$$X = A \sin \omega_0 t \quad (8)$$

式中: A 为正弦输入信号幅值; ω_0 为正弦输入信号频率。

用描述函数法来实现 Y 的线性化, 再用傅里叶级数展开 $F(X, \dot{X})$, 取前三项得到:

$$F(X, \dot{X}) = F_0 + N_1 X + (N_2/\omega_0) \dot{X} \quad (9)$$

其中: 各项系数为

$$\begin{cases} F_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(A \sin \omega_0 t, A \omega_0 \cos \omega_0 t) d(\omega_0 t) \\ N_1 = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} F(A \sin \omega_0 t, A \omega_0 \cos \omega_0 t) \sin \omega_0 t d(\omega_0 t) \\ N_2 = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} F(A \sin \omega_0 t, A \omega_0 \cos \omega_0 t) \cos \omega_0 t d(\omega_0 t) \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)并经 Laplace 变换, 结合式(2), 可得到线性化后的计及死区的汽轮机调速器传递函数为

$$G_g(s) = \frac{(N_2/\omega_0)s + N_1}{T_g s + 1} \quad (11)$$

(2) 发电速度约束(GRC)定义为爬坡速率限制, 指机组出力受到某个最大变化率的约束。其限位装置数值设置为 1.7×10^{-3} MW/s^[9]。

2 抽/储联合系统建模

2.1 联络线模型

忽略网络线损, 两区域间的联络线功率流动表示为^[13]

$$P_{tieij} = \frac{|V_i| |V_j|}{X_{ij} P_i^*} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (12)$$

式中: P_{tieij} 为联络线流动功率; X_{ij} 为两端电路电抗; P_i^* 为区域 i 的额定功率; θ_i 、 θ_j 分别为区域 i 、 j 两端电压角; V_i 、 V_j 分别为区域 i 、 j 两端电压值。

两区域联络线功率微增量模型为

$$\Delta P_{tieij} = 2\pi \frac{|V_i| |V_j|}{X_{ij} P_i^*} \cos(\theta_{i0} - \theta_{j0}) \left[\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_j dt \right] \quad (13)$$

式中: ΔP_{tieij} 为区域 i 、 j 流动功率微增量; Δf_i 和 Δf_j 分别为 i 区域和 j 区域的频率偏差。 ΔP_{tieij} 经 Laplace 变换后有:

$$\Delta P_{tieij}(s) = \frac{T_{ij}}{s} [\Delta f_i(s) - \Delta f_j(s)] \quad (14)$$

式中: T_{ij} 为联络线同步系数, 可表示为

$$T_{ij} \triangleq 2\pi \frac{|V_i| |V_j|}{X_{ij} P_i^*} \cos(\theta_{i0} - \theta_{j0}) \quad (15)$$

2.2 两区域汽轮机 LFC 模型

忽略区域互联电网中各机组之间的差异性, 对电网进行精简建模, 用联络线将两区域连接起来, 每个区域仍以再热式汽轮机为基础, 再考虑非线性因素, 得到两区域互联的 LFC 模型, 如图 1 所示。

图 1 中, ACE 为输入, Δf 为系统输出; ΔP_{Di} , ΔP_{Dj} 为不同区域施加的负荷扰动; B 为频率偏差系数; a_{ij} 为同步功率系数, 有:

$$a_{ij} = -P_j^*/P_i^* \quad (16)$$

式中: P_i^* 、 P_j^* 分别为 i 、 j 两区域的发电机额定功率。两区域联络线参数取值为

$$T_{ij} = 0.545, a_{ij} = -1, B = 0.425 \quad (17)$$

电网中发电机与系统连接的传递函数关系为

$$G_p(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P_g(s) - \Delta P_d(s)} = \frac{1}{1 + \frac{2H}{fD}s} \triangleq \frac{K_{pi}}{1 + sT_{ri}} \quad (18)$$

式中: $K_{pi} \triangleq 1/D$; $T_{ri} \triangleq 2H/fD$; ΔP_g 为发电机组的输出功率; D 为负荷阻尼系数; ΔP_d 为负荷状态下功率变化量; H 为再热式汽轮机惯性常数。

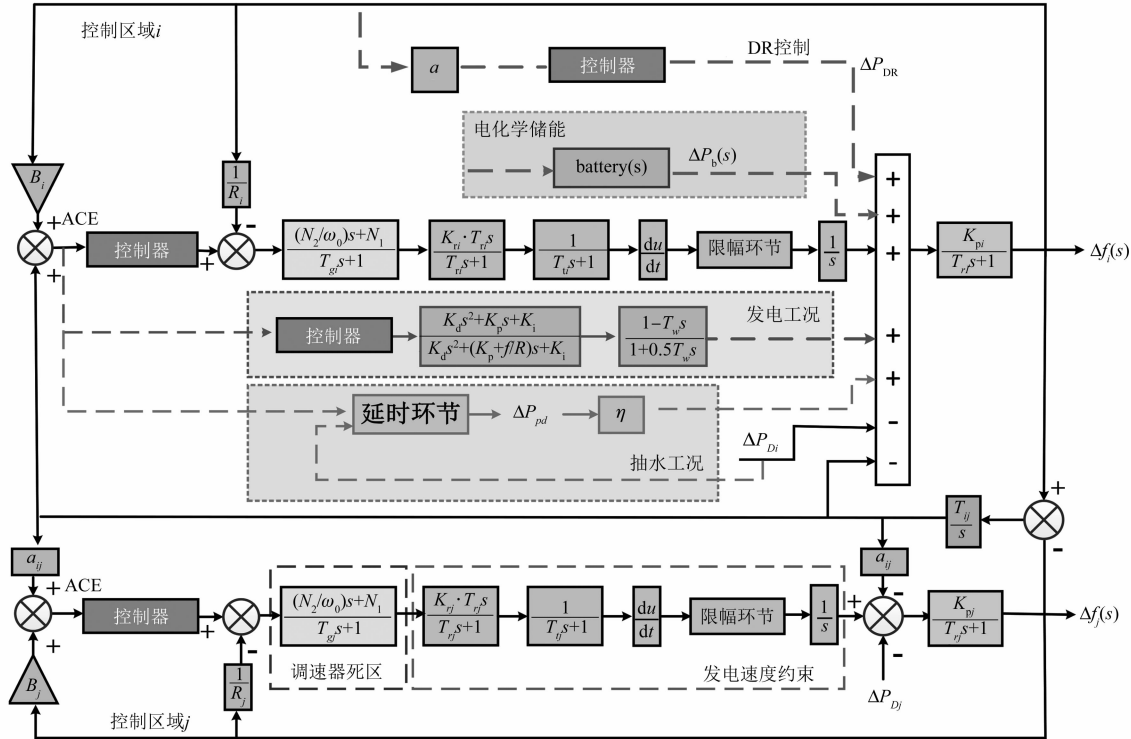


图1 抽/储联合系统 LFC 模型

2.3 PPS 模型

本文提出的抽/储联合 LFC 模型以两区域再热式汽轮机组 LFC 模型为基础。负荷低谷期时, 电化学储能充足, PPS 依赖盈余电力从下游水库向上抽水, 处于抽水状态, 通过势能的形式将能量储存起来。负荷高峰期时, 电化学储能总量不足, 蓄能电站为系统提供输出, 处于发电状态, 上游水库的水通过水轮机流向下游水库发电。本文将 PPS 的发电工况模型综合简化为一台水轮机组, 模拟作为一个水电站对外供电。在抽水工况下, 相当于一个负荷。在此基础上建立了两段式 PPS 传递函数模型。其仿真结构如图 1 虚线部分发电工况和抽水工况所示。

两段式 PPS 传递函数模型如下:

$$G_p(s) = \begin{cases} \Delta P_{pd} \\ G_d(s) G_i(s) \end{cases} \quad (19)$$

式中: ΔP_{pd} 为抽水工况停止运行时输送到电网的功率; $G_i(s)$ 为水轮机的传递函数模型, 如式(3)所示; $G_d(s)$ 为发电工况下水轮机调速器的传递函数模型, 如式(4)所示。图 1 中 η 为 PPS 在抽水工况下机组工作的数量, $\eta = \{1, 2, \dots, n\}$ 。

2.4 电化学储能模型

按照基尔霍夫定律简化得到如图 2 所示的电化学储能等效电源模型^[4]。图 2 中, R_c 表示能量转换系统与储能电池单元模型的连接阻抗; n 为串联电池单体数目; m 为储能电池单元模型中由电池单体串联形成的子系统并联数目; k 为所有单元模型数目; R_{series} 为电池内阻; C_1 、 R_1 分别为过电容和电阻; V_{oc} 为开路电压。

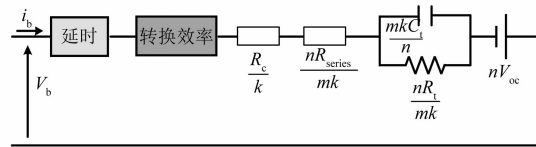


图2 电化学储能电源等效模型

根据戴维宁等效电路模型(II型), 将图 2 的等效模型图转化为传递函数的形式^[14], 得到对应的传递函数数学模型表达式:

$$i_b(s) = \frac{1}{1 + sT_b} \times \text{control}(s) \quad (20)$$

$$V_{series}(s) = \frac{i_b(s) n R_{series}}{mk} \quad (21)$$

$$V_i(s) = i_b(s) \frac{nR_i}{mkR_i C_i s + mk} \quad (22)$$

$$V_c(s) = i_b(s) \frac{R_c}{k} \quad (23)$$

$$V_{oc}(s) = f(\text{SOC}) = f\left(\frac{C_0 - \frac{i_b(s)}{3600}}{C_p}\right) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_b(s) &= \Delta i_b(s) V_b(s) = \\ & i_b(s) [V_{oc}(s) + \Delta V_i(s) + \\ & \Delta V_{series}(s) + \Delta V_c(s)] \end{aligned} \quad (25)$$

式中:control(s)为控制信号,电池内部以电流作为响应变量; T_b 为一阶惯性环节时间常数;开路电压 V_{oc} 为SOC的函数,常用百分数表示; C_0 为电池初始容量; C_p 为电池额定容量; $\Delta V_c(s)$ 为连接阻抗电压增量; $\Delta V_b(s)$ 为储能电池前端电压值; $\Delta V_{series}(s)$ 为电池内阻电压增量; $\Delta V_i(s)$ 为暂态电压增量; $\Delta P_b(s)$ 为实际输出功率偏差。电池SOC表达式如下^[15]:

$$S(t) = S(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t Idt}{\eta_{bat} C_p} \quad (26)$$

式中: $S(t)$ 和 $S(t_0)$ 分别为电池在 t 时刻和初始时刻 t_0 的SOC; η_{bat} 为电池充放电效率,代表充放电循环中内部耗散的电量。

电化学储能电源传递函数模型如图3所示。

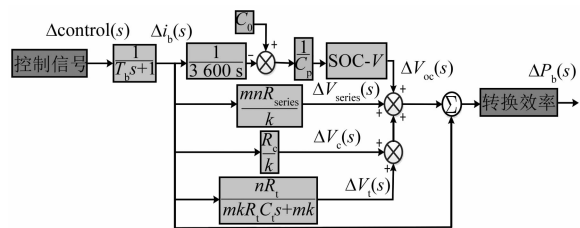


图3 电化学储能电源传递函数模型

该模型具体实现步骤如下:在接收外部控制信号后,电池内部以电流作为响应变量,电流经过积分环节后与初始电池电量作差并除以电池额定容量得到储能电池的SOC值,然后根据SOC值与储能电池开路电压之间的函数关系求得开路电压 V_{oc} 值,此外,电流经过电池的內部电阻与过电压电阻时会产生相应的电压增量,电压增量与开路电压 V_{oc} 进行叠加后得到储能电池当前端电压值 V_b , V_b 同 Δi_b 的乘积即为当前储能电池的功率输

出量。

在本文所描述的短时调频场景中,不考虑ACE死区限额、最大负荷调整限幅和机组容量限额,抽/储联合参与电网二次调频方法如图4所示。

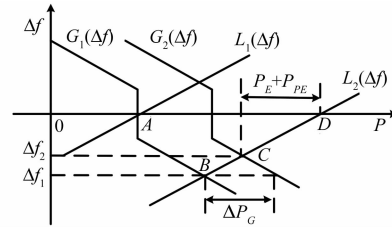


图4 抽/储联合系统二次调频方法

当扰动发生时,负荷需求增大,负荷频率特性曲线由 $L_1(\Delta f)$ 平移至 $L_2(\Delta f)$,系统稳定运行点A随之移动至非稳定点B,产生 Δf_1 的频率偏差。系统二次调频传统机组出力为 ΔP_G ,使功率曲线 $G_1(\Delta f)$ 平移至 $G_2(\Delta f)$,系统运行点移至点C,频率偏差恢复至 Δf_2 。此时PSS与BESS工作,出力分别为 P_E 和 P_{PE} ,以系统ACE为控制变量进行功率分配及补偿,参与系统整体调节,保持电网频率稳定。

2.5 计及需求响应的抽/储联合系统LFC模型

可再生能源的间歇性和波动性无法为日益增长的需求提供实时能源,但并非所有的需求都必须立即满足,适当推迟或减少部分需求对用户并无影响。需求响应^[16]就是在系统供需不平衡时,通过一些经济措施与技术手段,达到增/减用电负荷的目的,以保持发电和负荷需求之间的平衡。考虑DR可以降低抽/储联合LFC高峰时段的负荷消耗,提高电网的运行可靠性和应急能力,促进可再生能源适应性和减少电力负荷峰谷差异,缓解储能系统的调频压力。文献[17]针对风电接入电网出现的LFC问题,提出一种低压低频减载的DR控制方法。文献[18]将DR考虑到变频空调的削峰优化中,提出一种考虑时间约束的频率控制方法和空调群组的削峰控制算法。因此,有必要在研究抽/储联合LFC时考虑DR对调频的影响。DR参与调频的最终目的是实现需求侧和发电侧资源对频率的协调控制,在本文抽/储联合调频中的作用等同于在图1频率响应模型中增加一条额外的闭环控制回路,被控制量为 Δf 。DR

控制回路能够在突然出现负荷增量使系统频率下降时,通过削减一部分负荷量 P_{DR} 与之相抵消,最终使系统频率恢复至额定值。设置 DR 比例控制参数为 $a(0 < a < 1)$,定义 a 为 DR 在控制系统中所占比例。

3 控制器设计

基于 PID 控制算法的非线性 ADRC 控制算法,能够在不依赖于系统精确模型的基础上自动补偿对象模型的内外干扰,实现对不确定、强耦合系统的良好控制^[19]。但在加入小信号发生器时,ADRC 带来的稳态高增益容易引起抖动,其多个参数需要同时调节,这些条件限制了 ADRC 在实际工程中的应用。LADRC 不依赖于受干扰系统的具体数学模型,继承 ADRC 优良性能的同时简化了调节参数,具有快速适应性且能够及时对难预测的外部扰动进行自动估计和补偿,抗干扰能力强^[19]。LADRC 由线性扩张状态观测器(LESO)、线性反馈控制器(LESF)和扰动补偿这三个部分构成^[8]。基于 LADRC 的抽/储联合 LFC 结构图如图 5 所示。

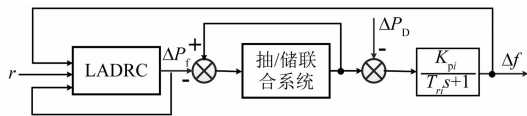


图 5 基于 ADRC 的抽/储联合系统 LFC 结构图

图 5 中,以设定值 $r=0$ 为系统参考输入; ΔP_f 表示为了维持频率稳定抽/储联合系统需要调节的功率值; ΔP_D 表示系统所受干扰;输出为 Δf 。

控制器被控对象为两区域抽/储联合系统。用二阶 LADRC 可实现高阶系统的有效控制^[20],故本文采用如图 6 所示的二阶 LADRC。

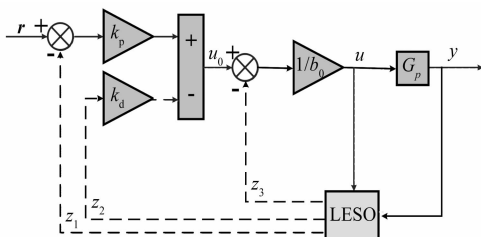


图 6 二阶线性自抗扰控制器结构图

图 6 中, k_p 、 k_d 为线性反馈控制率参数; $u = \Delta P_f$ 为控制量; u_0 为扰动补偿后所形成的积分串

联型控制对象的控制量; b_0 为对系统输入增益 b 的估计; $G_p(s)$ 为被控对象; y 为输出 Δf 。对所设计 LADRC 详细建模如下。

LESO 是整个 LADRC 的核心部分,不依赖于生成扰动的具体的数学模型,就可对系统总扰动进行估计和预测。用 $\text{fal}(e, \alpha, \delta) = e$ 的线性形式来替代 ESO 的 $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 非线性函数,得到 LESO 的形式^[8]:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 e + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e \end{cases} \quad (27)$$

式中: z_1 、 z_2 、 z_3 为系统状态变量的估计值; β_1 、 β_2 、 β_3 为 LESO 的增益参数。

LESO 的带宽与其估计值的准确性密切相关,利用控制器带宽设置增益参数的办法,令 ω_0 为 LESO 的带宽,则可以将 LESO 的特征方程配置为如下形式:

$$\lambda_0 = s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3 = (s + \omega_0)^3 \quad (28)$$

参数化的 LESO 增益系数为

$$\begin{cases} \beta_1 = 3\omega_0 \\ \beta_2 = 3\omega_0^2 \\ \beta_3 = \omega_0^3 \end{cases} \quad (29)$$

ω_0 为 LESO 中唯一需要整定的参数。此配置方法既能保证系统稳定,又能给出较好的过渡过程,使计算变得简单。取值范围兼顾系统的控制性能与抗噪性。

设控制器带宽为 ω_c ,再次利用带宽与控制性能的关系,用 ω_c 来表示闭环方程式有:

$$\lambda_0 = s^2 + k_d s + k_p = (s + \omega_c)^2 \quad (30)$$

控制器参数可以表示为

$$\begin{cases} k_p = \omega_c^2 \\ k_d = 2\omega_c \end{cases} \quad (31)$$

ω_c 为线性反馈控制中唯一需要整定的参数,大大简化了参数计算。通过多次试验, ω_c 最优取值为 3。

4 仿真分析

4.1 考虑非线性因素的两区域 LFC 仿真

本文利用 MATLAB/Simulink 建立了如图 1 所示的考虑非线性因素的两区域再热式汽轮机组

LFC 模型,系统容量为 1 000 MW。仿真边界条件参数见表 1,再热汽轮机组参数见表 2,仿真时域为 60 s,1 s 时区域 i 发生 0.01 p.u. 的扰动。在相同扰动及相同区域控制参数下,控制器分别采用普通 PID、分数阶 PID 和 LADRC,控制器参数如表 3 所示^[8]。

表 1 仿真边界条件

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电池 SOC 限额	0.2~0.8	频率偏差范围	$\pm(0.2\sim0.5)$ Hz
标么化基准	1 000 MW, 50 Hz	试验环境	(20 \pm 3) °C
超调量范围	$\pm(0.02\sim0.05)$ Hz	-	-

表 2 再热式汽轮机组区域 LFC 基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
T_{gi}/s	0.08	T_{ri}/s	10
T_{ii}/s	0.3	T_{pi}/s	20
K_{ri}	0.5	K_{pi}	120
R_i	2.4	-	-

表 3 控制器基本参数

控制器	参数名称	参数值	参数名称	参数值
普通 PID	K_p	5	K_i	0.5
	K_d	1	-	-
分数阶 PID	K_p	37	K_iS	7
	K_d	8	λ	0.08
	μ	0.055	-	-
LADRC	K_p	49	K_d	14
	ω_0	1.1	ω_c	7
	b	290	d	0

不同控制器受扰下区域频率偏差如图 7 所示。由图 7 可知,由于存在非线性约束条件,如在汽轮机转速限制下,机组不能快速输出功率,功率缺额无法及时补偿,导致频率恢复时间较长。非线性情况下频率变化幅值显著增大,调节时间也较长,实际工程中不考虑非线性因素的影响是不现实的。对比三种控制器,频率偏差最小和恢复时间最短的是 LADRC,其控制效果最好,虽然对比其他两个控制器存在少量超调,但都在可控范围内。分数阶 PID 控制和传统 PID 控制的幅值逐渐增大,调节速度依次减慢,振荡次数较高,但分数阶 PID 控制相对平滑。与传统 PID 控制器

相比,LADRC 的振荡幅值约减小 0.017 Hz,调节时间缩短近 20 s。该结果验证了本文提出的 LADRC 方法的可靠性和有效性。

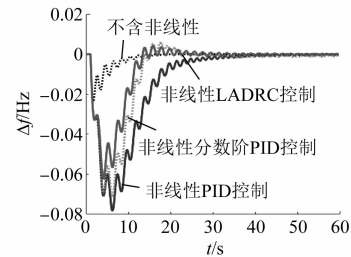


图 7 不同控制器受扰下区域频率偏差

实际情况中扰动受随机因素影响,为不规则、不可测信号。设置扰动时间为[10 s, 25 s],扰动幅值为[-0.01 p.u., 0.01 p.u.],仿真时域为 50 s,仿真结果如图 8 所示。由图 8 可知,LADRC 有最短的扰动时长和最小的振幅值,说明其控制精度更好,抑制扰动能力显著,超调量在合理范围内。分数阶 PID 与传统 PID 的扰动时长近乎相同,但分数阶 PID 的数据变化程度较低,误差较小,虽然控制效果要优于传统 PID,但相较于 LADRC 还是有很大差距。由此可得,在随机扰动下,本文所提 LADRC 仍然具有优良的控制性能。

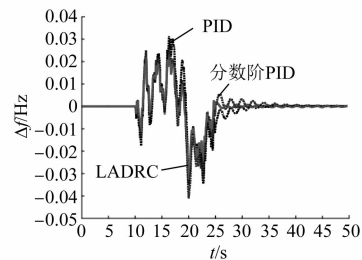


图 8 随机扰动下系统频率偏差

4.2 抽/储联合 LFC 仿真

根据图 1 搭建发电和抽水工况下的抽/储联合 LFC 模型,水轮机组参数见表 4,单台容量为 300 MW。电池单体为 50 Ah 的磷酸铁锂电池,其额定电流、电压分别为 50 A 和 3.2 V,其余基本参数如表 5 所示。控制器采用 LADRC,控制参数如表 3 所示,仿真时域设置为 60 s,在 1 s 时 i 区域发生 0.015 p.u. 的扰动。

(1) 发电工况。发电工况模式下可不计 GRC 的影响,水轮机组能够迅速补偿所需功率,

弥补干扰状态下功率缺额,从而提高系统频率稳定性。仿真结果如图 9 和图 10 所示。由图 9 可知,在加入了电化学储能之后,系统频率振荡幅值减小 50%,频率恢复速度加快,调节时间缩短了近 10 s,调节过程更加平滑,同时消去了抽水蓄能参与过程中出现的超调量,系统振荡次数也大幅度减小。如图 10 所示,不含抽水蓄能时,系统振荡次数较多,恢复时间接近 40 s,而加入电化学储能后的联络线交换功率偏差减小 50%,振荡次数显著减少,调节过程快速且平缓。

表 4 水轮机组基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
T_{wi}/s	1	T_{pi}/s	20
K_{pi}	120	R_i	2.4
K_p	1	K_d	4
K_i	5	-	-

表 5 电化学储能模型基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
T_b/s	0.05	R_c/W	0.016 7
C_0/Ah	750	$\eta/\%$	85
C_p/Ah	1 500	R_l/W	0.001
R_{series}/W	0.013	C_l/W	1
n	240	m	6
k	5	单元容量/(kW·h)	200
单元功率/kW	200	-	-

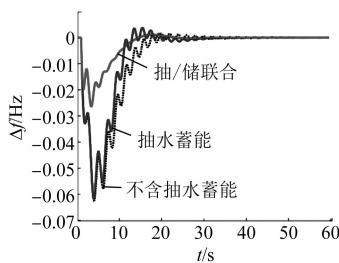


图 9 发电工况下抽/储联合扰动系统频率偏差

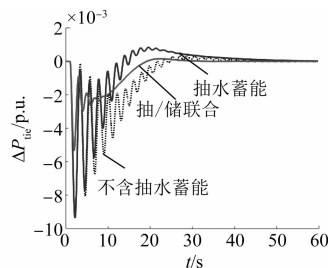


图 10 发电工况下抽/储联合联络线交换功率偏差

(2) 抽水工况。设置抽水功率为 0.05 p.u.,即 $\Delta P_{pd}=0.05, \eta=1$, 仿真结果如图 11 和图 12 所示。

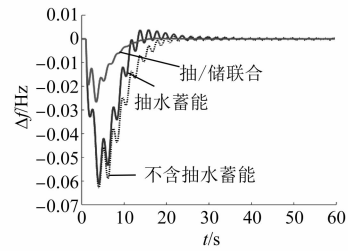


图 11 抽水工况下抽/储联合扰动区域频率偏差

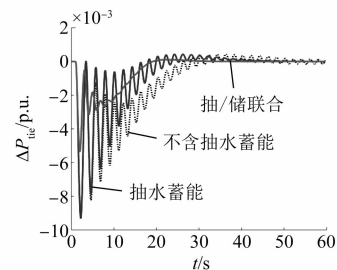


图 12 抽水工况下抽/储联合联络线交换功率偏差

如图 11 所示,抽水蓄能电站在收到系统发出的调频指令后,放弃部分负荷以支援电网,使频率偏差回到正常范围,对保持系统平稳运行有一定的积极作用。在加入电化学储能后,抽/储联合状态下,系统能在较短时间内获得一定的功率支援,频率波动幅值缩小 33%,且系统频率恢复时间缩短近 10 s,与单独 PPS 相比,调频效果显著。对于联络线交换功率,如图 12 所示,抽/储联合能够在短时间内抑制系统频率振荡,使得频率波动幅度明显减小。加入电化学储能,对含有 PPS 的 LFC 是一个有效的补充,使系统控制性能得到了极大改善,电网的安全性和稳定性得到显著提高。

(3) 电化学储能阶段控制。考虑电化学储能和 PPS 的调频分摊,假设容量有限的电化学储能承担电网调频任务中的高频分量,即在区域 i 受到 0.01 p.u. 扰动后,系统功率偏差大于 0.015 p.u. 时,才引入电化学储能参与调频,其余时段由 PPS 和传统发电机组控制。仿真结果如图 13~图 15 所示。

当发生扰动时,从图 13 可知,扰动区频率整体波动性较未加电池储能时明显下降,调节时间缩短一半,在 10 s 内完全恢复系统频率的稳定

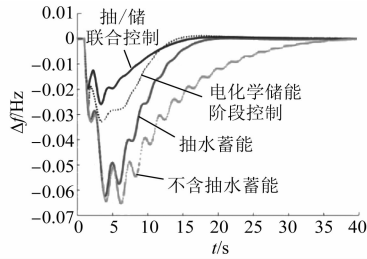


图 13 扰动区域频率偏差

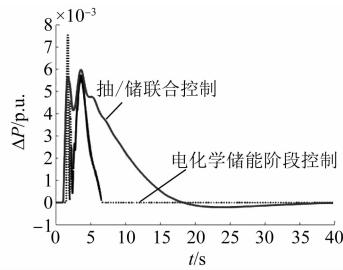


图 14 电化学储能输出功率

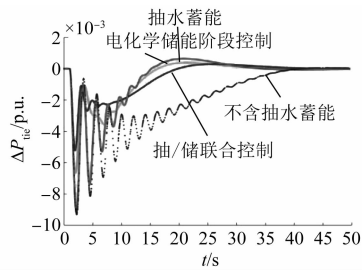


图 15 联络线交换功率偏差

性,比抽水蓄能时的 20 s 缩短 50%,虽然系统存在一定的超调,但仍在规定范围内。

电化学储能系统设有机械环节,电能和化学能的转换在瞬间完成,响应功率指令的速度在毫秒级。由图 14 可知,电化学储能能在短时间内迅速

向电网补充功率以使得电网快速恢复稳定。从图 15 仿真结果来看,抽/储联合下频率偏差最小,调节速度最快。可见,在加入电化学储能条件下,相对于仅含抽水蓄能机组参与电网调频的情况,其频率波动幅度、超调量及联络线功率波动程度明显减小。

调频过程中电化学储能 SOC 值的变化如图 16 所示。对优化模型进行初始化时,储能 SOC 值的上限 SOC_{max} 设为 0.9,下限 SOC_{min} 设为 0.3。整个调频过程中,在充放电策略的作用下,储能从最大值 0.9 向电网提供能量,没有超出 SOC 的范围,达到稳态后,储能的 SOC 值趋于稳定,在 0.4~0.7 的区间内波动,满足了储能电池 SOC 约束条件。

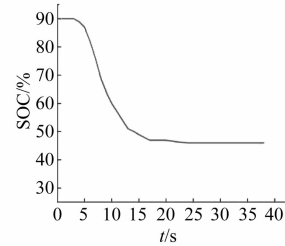


图 16 电化学储能 SOC 变化曲线

表 6 从八个方面对控制策略进行评估。可明显看出,加入电化学储能后,系统二次调频动态响应能力显著提高,联络线功率偏差大大减小。对于电化学储能的阶段控制,其控制效果要比联合控制时稍弱,最大振幅偏大,但恢复时长近乎相同。由于电化学储能只承担了调频任务中的高频分量,在投入初期为平抑频率扰动,其输出功率和联络线功率较大,当调节至系统功率小于 0.015 p.u.后,电化学储能退出运行,因此其工作时长较联合控制缩短了近 12 s。由此得出:抽/储

表 6 负荷扰动下的控制策略误差评估

控制方式	扰动时长/s	最大幅值/Hz	超调量/Hz	MSE ($\times 10^{-4}$)	电化学储能 最大输出功率/ (p.u.)	电化学储能 工作时长/s	联络线最大 功率偏差/ (p.u.)	联络线功率 恢复时间/s
抽/储联合全程控制	16.72	-0.025 7	0.000 7	1.935	-0.006 0	17.670	-0.005 1	20.07
电化学储能阶段控制	14.74	-0.032 9	0.001 1	3.420	-0.007 5	5.588	-0.006 6	16.23
抽水蓄能控制	18.16	-0.060 0	0.003 5	9.432	-	-	-0.009 3	15.28
不含抽水蓄能	20.30	-0.063 0	0.001 4	11.691	-	-	-0.009 2	24.55
平均值	17.48	-0.045 4	0.001 7	6.620	-0.006 8	11.629	-0.007 6	19.03

联合较常规机组而言,能够在短时间内满足大功率充放电要求。但若考虑到电化学储能配置的额定功率、容量及使用寿命等因素,为实现系统总体经济效益值最高,应考虑电化学储能的阶段控制与实际工程相结合。

4.3 考虑 DR 的抽/储联合 LFC 仿真

在 PPS 发电工况下加入电化学储能,以比例控制参数 a 来决定 DR 所占比例。1 s 时区域 i 发生 0.01 p.u. 的扰动,仿真时域设置为 25 s。设置 $a=0, 0.12, 0.45, 0.88$, 仿真结果如图 17 所示。

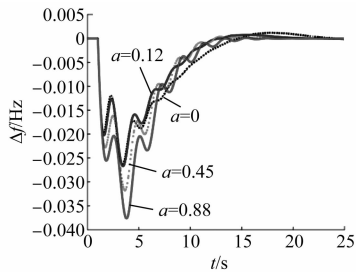


图 17 不同 DR 系数下的频率偏差

由图 17 可知,随着 a 取值升高,频率振荡幅值增大, a 取 0 和 0.12 时,振荡幅值较为接近,但 $a=0.88$ 时,与 $a=0$ 相比,振荡幅值扩大近 200%,调节时间却有所减小。 $a=0$ 时,系统在 15 s 时恢复到稳定状态。随着 DR 比例的增加,恢复速度加快,然而若 DR 占比过大,振荡次数也随之增多,系统波动下频率恢复速度有所减慢。由此得出:DR 的比例控制参数需要设置在合理范围内,过多的 DR 参与使得系统灵敏性下降且控制效果变差。合适的 DR 比例能够在经济、技术层面提高新能源接入下系统适应性和减少电力负荷峰谷差异,对平抑电网波动具有积极的现实意义。

5 结论

本文提出了一种基于自抗扰控制器的抽/储联合参与电网 LFC 策略,并考虑 DR 影响,根据 PPS 的发电和抽水工作模式建立了抽/储联合 LFC 模型,从仿真结果得到以下结论。

(1) 本文提出的自抗扰控制方法在含非线性因素的抽/储联合 LFC 中,控制效果明显优于分数阶 PID 和传统 PID 控制。与传统 PID 控制器相比,振荡幅值减小 0.016~0.02 Hz,调节时间缩短 10~20 s,控制效率显著提高。

(2) 将电化学储能加入 PPS 联合参与调频是有效的,抽/储联合方式下,振荡幅值大幅度降低,频率偏移减小 200%~300%,调节时间缩短约 10 s,使 LFC 动态性能得到明显提高,能够更好地实现系统安全稳定运行。

(3) 在抽/储联合参与调频时,适当考虑需求响应的比例控制系数 a ,将缩短频率调节时间,减小频率偏差,实现电网频率的快速稳定。

【参考文献】

[1] 鲍珣珣,高伏英,顾丽鸿,等.抽水蓄能电站区域负荷频率控制[J].上海交通大学学报,2015,49(11):1701.

[2] 胡泽春,夏睿,吴林林,等.考虑储能参与调频的风储联合运行优化策略[J].电网技术,2016,40(8):2251.

[3] 杨蕾,李胜男,黄伟,等.考虑风光新能源参与二次调频的多源最优协同控制[J].电力系统保护与控制,2020,48(19):43.

[4] 陈远扬,黄际元,李欣然,等.新型快速储能参与调频的必要性及可行性[J].湖南电力,2015,35(6):15.

[5] 谢惠藩,王超,刘湃泓,等.南方电网储能联合火电调频技术应用[J].电力系统自动化,2021,45(4):172.

[6] LI J, WANG S, YE L, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018,3: 2.

[7] 冯越琪.电池储能参与含抽水蓄能的电网调频研究[D].长沙:湖南大学,2018.

[8] LIU K, HE J, LUO Z, et al. Load frequency control of pumped storage power station based on LADRC [J]. Processes, 2020,8(4):380.

[9] HAN W, WANG G, STANKOVIC A M. Active disturbance rejection control in fully distributed automatic generation control with co-simulation of communication delay [J]. Control Engineering Practice, 2019,85: 225.

[10] 姚建村,梅兰,徐越,等.基于 CPS 标准的火电机组 AGC 模糊优化控制策略[J].广东电力,2017,30(6):11.

[11] 杨超,姚伟,文劲宇.基于事件驱动的含风电互联电网负荷频率鲁棒控制[J].电力系统自动化,2018,42(16):57. (下转第 102 页)

60 kW 变频器样机平台。半控整流模块使用塞米控的 SEMiX365DH16, 其门极触发电流最小为 0.1 A。充电电阻 R_1 选择 $36 \Omega/55 \text{ W}$ 。恒流自适应电路参数同仿真参数。三相 380 V 交流接入, 变频器运行正常。实测 Q1 开通时间为 $5.25 \mu\text{s}$, [见图 6, 其中 CH3: $I(L)$; CH4: V_L], 与仿真结果 (图 5) $5.1 \mu\text{s}$ 基本一致, 实测电感电流纹波 249.4 mA 。调整滞回差电压, 即可调整晶闸管门极电流的大小, 调试方便灵活。

图 7 为预充电电路实测波形。其中 CH1: L1 对母线的电压; CH2: 母线电压; CH3: V_{DC2} ; CH4:

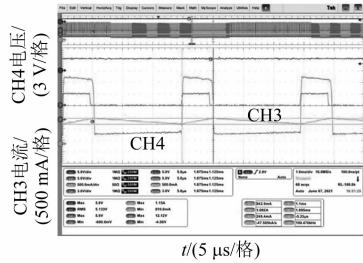


图 6 实测自适应供电电路波形

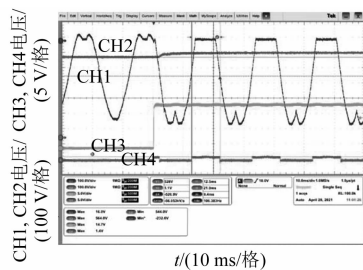


图 7 实测预充电电路波形

晶闸管 Th1 门极电压。当 L1 对母线电压超过 -232 V 时, 晶闸管 Th1 开通。各相晶闸管交替开通约 180° , 符合预期控制效果, 方案具有可行性。

4 结 语

本文针对传统变频器预充电电路存在的问题, 设计了一种具有恒流自适应功能的预充电电路。该电路可以自适应维持稳定, 为晶闸管触发提供相对稳定的供电, 以此实现对每相晶闸管精确控制, 不再依赖软件参与, 同时避免了光耦和开关电源时序问题。通过 PSIM 仿真和实物平台测试表明, 该电路方案切实可行, 调试方便, 具有一定的参考价值。

【参考文献】

[1] 李方园. 变频器技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

[2] 张铁军. 变频器软充电单元设置与否的计算分析 [J]. 电机与控制应用, 2012, 39(1): 36.

[3] 唐白山, 黄翠柏. 一种新型单象限变频器预充电电路设计 [J]. 工矿自动化, 2013, 39(2): 20.

[4] 刘祖超, 张加胜, 肖喜鹏, 等. 基于变频器的新型预充电电路的研究 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(2): 95.

[5] 张臻, 金龙, 沈湛, 等. 适用于大功率逆变器的预充电方案研究 [J]. 电气自动化, 2015, 37(2): 1.

[6] 王彦红, 靳宝会. 变频器预充电电路的改进设计 [J]. 煤矿机电, 2012(6): 108.

(上接第 86 页)

[12] 高琴, 刘清晨, 陈亦平, 等. 不同调速器死区特性对系统频率稳定的影响分析 [J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3575.

[13] 段正阳, 李冰, 黄珣, 等. 适应电网侧 AGC 不同控制模式的光伏发电参与电网频率调节 [J]. 可再生能源, 2020, 38(3): 373.

[14] 井文辉. 电池储能参与电网辅助调频的控制策略及优化配置研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

[15] 严干贵, 刘莹, 段双明, 等. 电池储能单元群参与电力系统二次调频的功率分配策略 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 26.

[16] 雷敏, 魏务卿, 曾进辉, 等. 考虑需求响应的负荷控制对供电可靠性影响分析 [J]. 电力系统自动化,

2018, 42(10): 53.

[17] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32.

[18] 杨济如, 石坤, 崔秀清, 等. 需求响应下的变频空调群组削峰方法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 44.

[19] GAO Z. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design [C] // 2006 American Control Conference, 2006.

[20] 郭瑞, 胡鹏程, 樊亚敏. 基于时间尺度的一类典型高阶系统的二阶线性自抗扰控制 [J]. 计算机科学, 2016, 43(10): 40.