基于 AHP/GA 的储能装置参与电网调频 控制器参数优化

雷 杨,马宁宁,康积涛,王德林,曹 聪 (西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:针对电力系统调频过程中火电机组响应速度慢、不适合参与短周期调频的问题,提出一种基于层次分析法(AHP)和遗传算法(GA)相结合的优化算法用于电池储能控制器参数优化,使控制器能更好地控制电池储能装置并参与调频。通过 AHP 确定最大偏差幅值、稳态偏差、调节时间之间的权重大小,构造出一个 GA适应度函数,再由 GA 进行寻优计算得到最佳的控制器参数。借助 MATLAB/Simulink 对储能装置参与电网调频的两区域系统进行仿真。仿真结果表明,优化后的控制器可以有效地控制储能装置并辅助 AGC 进行调频,能够及时响应扰动,相较于传统以时间绝对偏差乘积积分(ITAE)准则作为适应度函数的参数优化效果更好。

关键词: 电池; 储能; 辅助调频; 参数优化; 层次分析法; 遗传算法

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.031

0 引言

电力系统中传统的调频装置对扰动的响应速度慢,不适合参与短周期调频^[1],储能装置具有响应速度快、跟踪精确以及能量双向流动等特点,能够有效地辅助传统的调频装置对扰动后的电网频率进行调整^[2]。而为储能控制器选择合适的参数又会使储能调频的效果事半功倍。因此,研究储能装置辅助参与电力系统调频及其参数整定对电网的安全稳定运行具有一定的实际价值。

目前的研究虽已注意到储能控制器的参数对控制效果具有一定的影响^[3-5],但其参数寻优算法中选用的评价指标较为单一,未从系统整体性能出发评估各评价指标(如最大偏差幅值、稳态偏差、调节时间等)之间的权重关系。文献[4]利用遗传算法(GA)对统一潮流控制器(UPFC)的比例积分微分(PID)控制器进行参数优化,其利用的适应度函数为偏差绝对值对时间积分的ITAE准则,适应度函数结构较简单,可能无法寻得最优解。文献[5]利用改进粒子群优化算法优化飞轮储能系统的多比例积分(PI)控制器,但只是改进了优化算法的寻优效率,运用的目标函数还是传统的时间与误差乘积积分的ITAE准则。因此,有必要进一步探讨优化算法的寻优准确性问题。

层次分析法(AHP)是将定性分析与定量分析相结合,对一些较为复杂和模糊的问题做出决策的分

收稿日期:2017-01-09;修回日期:2017-06-07 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477143)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51477143)

析方法^[6]。运用 AHP 找出最大偏差幅值、稳态偏差、调节时间等指标之间的权重大小关系构建 GA 适应度函数,可以使 GA 优化储能装置控制参数的效果达到最佳,进一步使得结果更符合预期要求,同时可以避免人为判断权重关系的不合理性。

本文提出了一种结合 AHP 和 GA 对储能装置控制器的参数进行优化的方法。该方法通过 AHP 确定多目标优化问题的权重,找到最符合预期目标的适应度函数,再通过 GA 的寻优计算优化储能控制器的控制参数。最后借助 MATLAB/Simulink 仿真平台将所提方法应用于两区域系统,仿真结果表明:通过优化储能控制器的控制参数可使储能装置更好地辅助自动发电控制(AGC)进行动态调频,有效地降低电网扰动对电网频率的影响。

1 含电池储能的两区域互联系统模型

1.1 电池储能系统模型

电池储能装置相对于其他储能装置具有能量密度高、响应速度快、充放电倍数高、建造环境要求低等优点^[7]。电池储能装置的动态特性可用一阶惯性环节来表示,其数学模型为^[8]:

$$G(s) = K_{\text{BESS}} / (1 + sT_{\text{BESS}}) \tag{1}$$

其中, T_{BESS} 为电池储能的时间常数; K_{BESS} 为电池储能的控制增益。

电池储能系统的戴维南等效电路模型如图 1 所示。由储能单体经过n次串联以及m次并联组成储能单元,再由k个储能单元并联从而得到储能系统的整体模型。该模型中 C_1 为过电压电容, R_1 为过电压电阻, R_{series} 为电池内阻, U_{∞} 为开路电压, Z_c 为连接阻抗[9]。

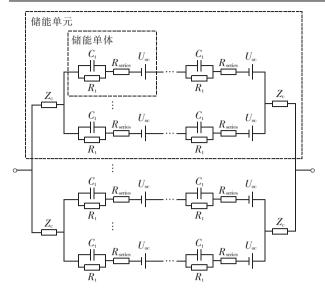


图 1 电池储能系统的戴维南等效电路模型 Fig.1 Thevenin equivalent model of battery energy storage system

为了反映电池内部的动态变化特性,电池储能的数学模型要计及电源容量、荷电状态(SOC)、内部电压电流限制等因素。按照安时计量法,可得储能装置中电池的 SOC 为[10]:

$$S_{\text{soc}}(t) = S_{\text{soc}}(t-1) - \eta \int_{t-1}^{t} I_{\text{b}} dt / S_{\text{Ah}}$$
 (2)

其中, I_b 为电池电流; S_{Ah} 为电池的安培容量; η 为充放电效率。

由式(2)得到 SOC,并通过 SOC 与电池开路电压的关系得到电池开路电压 U_{oco} 电流 i_b 经过 R_{series} 产生的电压 ΔU_{series} 、经过 R_1 和 C_1 产生的电压 ΔU_1 、经过连接阻抗 Z_0 产生的电压 ΔU_0 为:

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{series}}(s) = mnR_{\text{series}} \Delta i_{\text{b}}(s) / k \\ \Delta U_{\text{c}}(s) = Z_{\text{c}} \Delta i_{\text{b}}(s) / k \\ \Delta U_{\text{t}}(s) = nR_{\text{t}} \Delta i_{\text{b}}(s) / (mkR_{\text{t}}C_{\text{t}}s + mk) \end{cases}$$
电池的输出电压 U_{b} 和功率 ΔP_{b} 为:

$$\begin{cases} U_{\rm b} = U_{\rm oc} + \Delta U_{\rm series} + \Delta U_{\rm t} + \Delta U_{\rm c} \\ \Delta P_{\rm b} = U_{\rm b} \Delta I_{\rm b} \end{cases}$$
 (4)

具体传递函数模型如图 2 所示。图中, $C_{initial}$ 为储能初始容量; C_P 为储能总体容量。

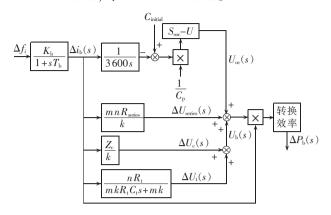


图 2 电池储能装置模型

Fig.2 Model of battery energy storage device

1.2 电力系统调频模型

本文采用两区域互联电网的 AGC 数学模型作为研究对象[11-12],两区域互联电网的系统图如图 3 所示。

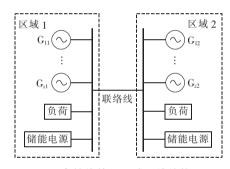


图 3 含储能的两区域系统结构图

Fig.3 Structure of two-area power system with energy storage

该模型由发电机(区域 1 为火力发电机,区域 2 为水力发电机)、再热汽轮机/水轮机、调速器系统和负荷等元件组成[13],其框图模型如图 4 所示。图中,i(i=1,2)为区域编号; T_g 为汽轮机调速器的时间常数: K_r 、 T_r 分别为汽轮机再热系数与时间常数: T_r 为

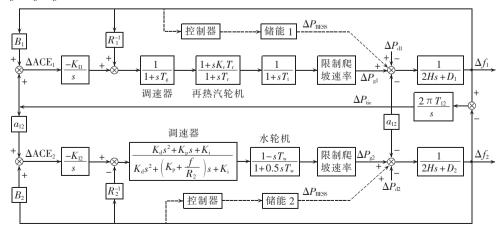


图 4 含电池储能装置的两区域互联电力系统调频模型

Fig.4 Frequency regulation model of two-area power system with battery energy storage system



发电机时间常数; K_{a} 、 K_{p} 、 K_{i} 为水轮机调速器的控制常数; T_{w} 为水启动时间; K_{li} 为积分控制增益; R_{i} 为机组调差系数; B_{i} 为系统调差系数; ΔP_{gi} 为发电机输出功率增量; ΔP_{di} 为负荷的变化量;H 为控制区内所有发电机组的惯性常数之和; D_{i} 为系统负荷阻尼常数; Δf_{i} 为频率偏差量; T_{12} 为两区域间的联络线功率同步系数; ΔP_{be} 为联络线交换功率偏差量。

在原本的两区域调频模型中加入储能及其控制器。以 Δf 作为控制器的输入控制信号,经由控制器进行调整并输入储能中控制储能输出功率,补偿由于机组响应不及时的功率,阻止频率偏差的扩大。然后通过与传统调频机组的有效结合,参与电网的一、二次调频,随着火电机组功率的攀升逐渐减小输出功率,将系统频率维持于标准范围之内。

2 AHP 与 GA 整定参数

2.1 AHP 在 GA 中的应用

AHP 是将与决策有关的元素分解成目标、准则及方案 3 个层次,然后在此基础上进行定性和定量分析。AHP 可以将难以通过定量分析的具有复杂耦合关系的变量关系进行反复比较,进而得到相对准确的权重系数。

对于判断一个控制的效果,仅通过系统偏差时间积分指标往往无法得到最准确的判断,需要引入更多的参数才可以得到较为准确的判断。本文通过AHP得到最大偏差幅值、稳态偏差、调节时间3个参数间的权重关系。判断控制效果的适应度函数为:

$$J = \min \sum_{i=1}^{N} k_i (\mu_i A_i + \nu_i B_{si} + \omega_i C_i)$$
 (5)

其中, k_i 为总排序权值; μ_i 为最大偏差幅值权值; ν_i 为稳态偏差权值; ω_i 为调节时间权值; A_i 为最大偏差幅值; B_{si} 为稳态偏差; C_i 为调节时间。

利用式(5)所示的适应度函数,即可筛选出 GA 中每一代的较优个体和最优个体进行保留,而将控 制效果不佳的参数淘汰[14],具体流程如图 5 所示。

2.2 AHP 确定权值关系

AHP 通过图 6 所示的流程可得到总排序权值和准则层权值,即式(5)中的相关参数。

具体步骤如下。

a. 建立递阶层次结构模型。以系统稳定性为目标层,稳态偏差、调节时间、最大偏差幅值为准则层,区域1至区域N-1以及联络线为方案层,建立如图7所示的层次结构模型。由于区域1至区域N-1的频率以及联络线功率都会受到准则层3个因素的影响,即每个区域中都有稳态偏差、调节时间、最大偏差幅值这3个因素。而不同区域由于存在差异,其同一因素对系统稳定性的影响也不同。如区域1

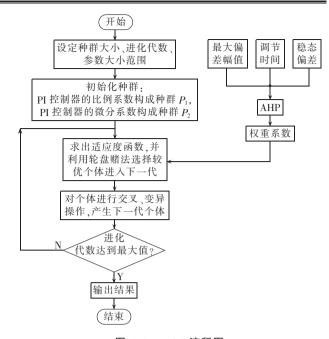


图 5 AHP/GA 流程图 Fig.5 Flowchart of AHP/GA

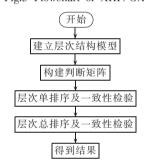


图 6 AHP 流程图 Fig.6 Flowchart of AHP

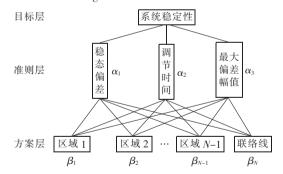


图 7 层次结构模型

Fig.7 Hierarchical structure model

的稳态偏差与区域 2 的稳态偏差对系统稳定性的影响大小是存在差异的。

b. 构造各层次中的所有判断矩阵。层次结构可以反映准则层与方案层各因素之间的关系,但无法反映各准则在衡量目标中所占的比重。通过对准则层因子进行两两比较,建立成对比较矩阵的办法,即每次取准则层 2 个因子 x_i 和 x_j ,以 a_{ij} 表示 x_i 和 x_j 对目标层 Z 影响的大小之比,全部比较结果用矩阵 $A = (a_{ii})_{NNN}$ 表示,称 A 为判断矩阵。

通常引用数字 1—9 及其倒数作为标度。表 1 列出了标度 1—9 的含义。

表 1 因子对比标度

Table 1 Factor contrast indicators

标度	含义
1	表示 2 个因素相比,具有相同重要性
3	表示2个因素相比,前者比后者稍重要
5	表示2个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示 2 个因素相比,前者比后者强烈重要
9	表示 2 个因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
标度倒数	若因素 x_i 与因素 x_j 的重要性之比为 a_{ij} ,那么因素 x_j 与因素 x_i 的重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

例如对准则层间元素进行总体判断,最大偏差幅值相比稳态偏差稍重要,调节时间相对于稳态偏差明显重要,那么准则层判断矩阵 A 中 a_{31} = 5、 a_{13} = 1/5、 a_{12} = 1/5、 a_{21} = 5。对于方案层区域 1,比较稳态偏差与调节时间对系统稳定性的重要程度,若对于区域 1 而言调节时间相较于稳态偏差对系统稳定性明显重要,则区域 1 准则层间判断矩阵 A_1 中的元素 a_{12} = 1/5、 a_{21} = 5。同理可找出方案层其他各区域及联络线的准则层判断矩阵,从而构造出各层次中的所有判断矩阵。

c. 层次单排序及一致性检验。通过步骤 **b** 得到的某一区域 i 或联络线的判断矩阵 A_i 对应于其最大特征值 λ_{max} 的特征向量 W, 经归一化后即为同一层次相应因素对于上一层次某一因素相对重要性的排序权值,这一过程称为层次单排序。通过层次单排序可以将各区域以及联络线针对稳态偏差、调节时间、最大偏差幅值中任意一个因素对于系统稳定重要性的权值顺序排列出来。其中得到的准则层的层次单排序权值即为式(5)中的 μ_i, ν_i, ω_i 。

为了尽量排除人为主观或其他因素的干扰,保证判断矩阵 A 的合理一致性,以及推导得到的层次单排序的准确性,还需要进行一致性检验。通过对步骤 b 得到的判断矩阵 A 计算一致性指标 C_1 ,根据工程要求查找平均随机一致性指标 R_1 ,最后计算出一致性比例 C_R 。当 C_R 小于一致性比例常数 C_0 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当修正,本文中 C_0 =0.1。相关计算如式(6)和式(7)所示。

$$C_{\rm I} = \frac{\lambda_{\rm max} - N}{N - 1} \tag{6}$$

$$C_{\rm R} = \frac{C_{\rm I}}{R_{\rm I}} = \frac{\lambda_{\rm max} - N}{(N-1)R_{\rm I}} \tag{7}$$

d. 层次总排序及一致性检验。设上一层次(准侧层)包含 α_1 、 α_2 、…、 α_M 共 M 个因素(本文中为准则层稳态偏差 α_1 、调节时间 α_2 、最大偏差幅值 α_3 3 个因素),它们的层次总排序权重分别为 α_1 、 α_2 、…、 α_M 。

然后设其后的下一层次(方案层)包含N个因素 β_1 、 β_2 、…、 β_N (本文中为各区域及联络线),它们关于 α_j 的层次权重分别为 b_{1j} 、 b_{2j} 、…、 b_{sj} (当 β_i 与 α_j 无关联时, b_{ij} =0)。现求方案层中各因素关于总目标的权重,也就是式(5)中的 k_i ,即:

$$k_i = \sum_{j=1}^{M} b_{ij} a_j \tag{8}$$

对于层次总排序的一致性检验,设方案层中与 α_j 相关的因素的成对比较判断矩阵在单排序中经一致性检验,可求得单排序一致性指标为 $C_I(j)(j=1,2,\cdots,M)$,相应的平均随机一致性指标为 $R_I(j)$,则方案层总排序随机一致性比例为:

$$C_{\mathrm{R}} = \left(\sum_{j=1}^{M} C_{\mathrm{I}}(j) a_{j}\right) / \left(\sum_{j=1}^{M} R_{\mathrm{I}}(j) a_{j}\right)$$
(9)

当 $C_R < C_0$ 时,认为层次总排序结果具有较满意的一致性并接受该分析结果。

3 仿真验证

为了验证本文所提电池储能系统辅助参与调频控制策略的有效性,借助 MATLAB/Simulink 仿真平台对含电池储能系统辅助调频装置的两区域互联系统进行仿真验证。系统参数及电池储能装置的仿真参数分别如表 2 和表 3 所示[15],区域 1 与区域 2 的装机容量均为 2000 MW,并选取基准功率为 2000 MW。依据在 0.01 s 时加入 20 MW 负荷扰动,电池储能的功率和容量分别为 30 MW、30 MW·h,该系统由 150 个 200 kW/200 kW·h 的电池储能单元

表 2 两区域系统仿真参数 Table 2 Simulation parameters of two-area power system

系统变量	数值	系统变量	数值				
f	60 Hz	R_1	2.4 Hz/MW				
R_2	$2.4~\mathrm{Hz/MW}$	$T_{ m g}$	$0.08 \mathrm{\ s}$				
$T_{ m r}$	10 s	K_{r}	0.5				
$T_{ m t}$	0.3 s	$T_{ m w}$	1.0				
a_{12}	-1	T_{12}	$0.0274\;\mathrm{s}$				
D_1	$8.33 \times 10^{-3} / Hz$	D_2	$8.33 \times 10^{-3} / Hz$				
B_1	0.425	B_2	0.425				
$K_{ m p}$	1	$K_{\rm i}$	4				
$K_{ m d}$	5	K_{11}	0.048				
K_{12}	0.012	H	8.33×10^{-2}				

表 3 电池储能仿真参数

Table 3 Simulation parameters of battery energy storage system

_				
	参数	数值	参数	数值
_	$T_{ m b}$	0.05 s	$R_{\rm t}$	0.001 Ω
	$C_{ m initial}$	750 A·h	$C_{\rm t}$	1 Ω
	$C_{ m P}$	1500 A·h	n	240
	$R_{ m series}$	$0.013~\Omega$	m	6
	$R_{\scriptscriptstyle m c}$	0.0167Ω	k	150
	η	85%		

231

并联构成,每个电池储能单元包括 6 个电池子系统,电池子系统由 24 个电池模块串联构成,每个电池模块包含 10 个 50 A·h 的磷酸铁锂电池单体(3.2 V,50 A)。如此设置储能略大于负荷扰动,可使储能在扰动瞬间提供峰值功率,避免了 Δf 的突变,将 Δf 控制在要求范围内。本算例中储能控制目标为区域 1 中的调节时间较其他区域尽可能短,区域 2 中的最大偏差幅值较其他区域尽可能小。通过系统及储能参数计算得式(7)中不同 N 值对应的 R_1 值如表 4 所示。仿真过程中 GA 的种群大小设定为 500,迭代次数为 30 次,经过多次试验后选定 K_p 与 K_i 的取值范围均在 0~5 之间。

表 4 不同 N 值对应的 $R_{\rm I}$ 值

Table 4 Values of R_1 corresponding to N

N	$R_{\rm I}$	N	$R_{\rm I}$	N	$R_{\rm I}$
1	0	4	0.90	7	1.32
2	0	5	1.12	8	1.41
3	0.58	6	1.24	9	1.45

根据 AHP 的步骤及具体的工程要求,可以设定对系统稳定性的影响因素从大到小为最大偏差幅值、调节时间、稳态偏差。本文区域 1 中的调节时间较其他区域的调节时间更为重要,区域 2 中的最大偏差幅值较其他区域的最大偏差幅值更为重要,联络线功率偏差中的稳态偏差较其他区域更为重要,最终得到评价权值结果如表 5 所示。

表 5 评价权值结果

Table 5 Results of weight evaluation

对象	评价权值				
M家	稳态偏差	调节时间	最大偏差幅值	总排序权值	
准则层	0.1095	0.5816	0.3090		
区域1	0.1220	0.6870	0.1220	0.4506	
区域 2	0.2297	0.1265	0.6483	0.2991	
联络线	0.6483	0.1865	0.2297	0.2504	

在 t = 0.01 s 时,区域 1 发生阶跃形式的负荷扰动,其幅值大小 $\Delta P_{\text{dl}} = 0.01 \text{ p.u.}$ 。通过 AHP/GA 优化后,储能装置控制器的 PI 控制环节的比例和积分参数 $K_{\text{DL}}K_{\text{i}}$ 如表 6 所示。

表 6 ITAE 与 AHP/GA 整定参数对比

Table 6 Comparison of settings between ITAE and AHP/GA

整定方法	$K_{ m p}$	$K_{\rm i}$	
ITAE	0.1635	1.3868	
AHP/GA	0.1088	2.0148	

储能装置在扰动下的响应情况如图 8 所示(图中 ΔP_{lie} 、 ΔP_{g} 、 ΔP_{BESS} 为标幺值)。选取区域 1、2 的频率偏差量在 AHP/GA 控制下与 ITAE 控制下的最大偏差幅值、调节时间、稳态偏差进行比较,ITAE 与 AHP/GA 的控制效果对比如表 7 所示。

由图 8 及表 7 可以看出,0.01 s 在区域 1 加入阶

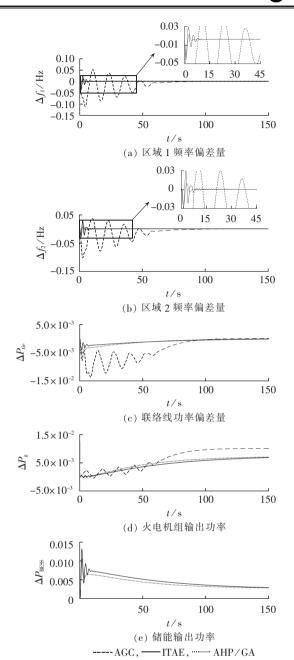


图 8 系统在扰动下的响应 Fig.8 System response to disturbance

表 7 ITAE 与 AHP/GA 控制效果对比 Table 7 Comparison of control effect between ITAE and AHP/GA

•	区域	最大偏差 域 幅值/Hz		调节时间/s		稳态偏差/Hz	
		AHP/GA	ITAE	AHP/GA	ITAE	AHP/GA	ITAE
-	1	0.034	0.039	8	32	1×10^{-4}	2×10^{-4}
	2	0.023	0.029	14	63	4×10^{-5}	4×10^{-5}

跃扰动时,传统 AGC 控制下区域 1 的频率偏差最大值达到 0.1 Hz,如图 8(a)所示;如图 8(d)所示,由于火电机组爬坡速率的限制,其无法及时响应扰动,使得图 8(a)初期扰动幅度一直较大,直到 50 s 左右火电才大幅出力,抑制扰动,最终经过 90 s 的调节过程才达到稳态,稳态偏差为 3×10-4 Hz。加入电池储能

装置后,储能在波动瞬间快速响应,在扰动瞬间达到峰值功率,如图 8(e)所示。在扰动前期储能输出功率从峰值不断下降,火电机组出力不断攀升,最终由火电机组为主要出力进行调频。经过 AHP/GA 优化后,在大约 8 s 时便达到稳态,区域 1 需要调节时间尽可能得短,仿真结果中区域 1 较区域 2 的调节时间更短,说明确实达到了要求。曲线稳态偏差为 1×10⁻⁴ Hz,最大频率偏差为 0.034 Hz,大幅降低了负荷变化引起的频率偏差。而采用 ITAE 准则优化,直到32 s 时方才达到稳态,最大频率偏差为 0.039 Hz,稳态偏差为 2×10⁻⁴ Hz。两者相对比可以看出,AHP/GA 的优化效果较 ITAE 优化效果更好,AHP/GA 优化后的参数可以更合理地控制储能辅助机组进行调频。

由图 8(b)可以看出,区域 2 在传统 AGC 控制下的频率偏差最大值约为 0.1 Hz,在 75 s 才基本达到稳态。加入电池储能装置后,经过优化算法优化后的 ITAE 曲线的最大频率偏差为 0.029 Hz,调节时间为 63 s,稳态偏差为 4×10⁻⁵ Hz。AHP/GA 曲线的最大频率偏差为 0.023 Hz,调节时间为 14 s,除了稳态偏差与 ITAE 相同外,其他指标均优于 ITAE。区域 2 要求最大偏差幅值较其他区域尽可能小,经 AHP/GA 优化后区域 2 的最大偏差幅值为 0.023 Hz,的确小于区域 1 的最大偏差幅值 0.034 Hz,达到目标要求。

图 8(c)中,加入电池储能后对比加入电池储能 前,区域间联络线的功率振荡幅度大幅降低,联络 线功率波动减小,使得各区域对区域负荷的波动大 部分可以自行平衡,对其他区域的影响大幅减小。 AHP/GA 参数优化后联络线功率偏差虽然初始略 大于 ITAE. 但最终达到稳定后的稳态误差要小于 ITAE。由图 8(d)和(e)可以看出,有储能装置参与的 调频过程中,储能装置在扰动初期的响应速度要远 快于火电机组的响应速度,其可以在火电机组未完 全出力的前期填补功率缺额,随着时间的推移储能 输出逐渐降低,将主要调频出力移交给火电机组。 加入储能前达稳态时火电机组的出力为 0.01 p.u., 而加入储能之后达到稳态时火电机组的出力幅度更 小,为 0.007 p.u.。经由 AHP/GA 配置 PI 控制参数 的储能装置比 ITAE 出力更小, AHP/GA 最大输出 功率约为 0.01 p.u., ITAE 最大输出功率为 0.013 p.u.。

表7反映了ITAE与AHP/GA控制效果具体量化的对比。从表7可以看出,针对储能参与调频算例AHP/GA的控制效果在最大偏差幅值、调节时间、稳态偏差3个方面几乎都优于ITAE。特别是在平抑负荷扰动方面,从扰动发生到达到稳态的调节时间上更是大幅缩短。

上述仿真结果说明,电池储能辅助 AGC 进行调

频确实可以减小系统频率偏差、缩短调节时间,且AHP/GA配置 PI 控制器参数下的结果要好于单纯采用传统的 ITAE 准则作为适应度函数的结果。

4 结论

本文基于 AHP/GA 研究了有电池储能辅助参与调频下的调频动态,对储能调频控制器参数进行了优化,得出结论如下。

- a. 电池储能辅助 AGC 的调频方式改善了系统调频性能。加入电池储能装置后可以很好地抑制频率扰动,有效地将系统频率偏差从 0.1 Hz 减小至 0.03 Hz 左右,将调节时间综合缩短了 40% 左右。
- b. 本文提出的 AHP/GA 整定控制器参数方法在最大频率偏差方面较 ITAE 准则优化下的结果减小了 13%,在调节时间方面较 ITAE 准则优化下的调频结果减少了 75%,稳态偏差方面与 ITAE 准则优化下的调频结果基本持平。AHP/GA 整定控制器参数方法的准确性、灵活性要优于传统 ITAE 作为目标函数的控制器参数整定方法。
- c. 本文提出的 AHP/GA 参数整定优化方法,通过判断矩阵的配置,合理地配置出多个目标函数的权重大小,继而由 GA 进行寻优计算,对于多个目标函数问题有较好的参数优化效果。

参考文献:

- [1] 杨水丽,李建林,李蓓,等. 电池储能系统参与电网调频的优势分析[J]. 电网与清洁能源,2013,29(2):43-47.
 - YANG Shuili, LI Jianlin, LI Bei, et al. Advantages of battery energy storage system for frequency regulation [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(2):43-47.
- [2] 黄际元,李欣然,黄继军,等. 不同类型储能电源参与电网调频的效果比较研究[J]. 电工电能新技术,2015,34(3):49-53,71. HUANG Jiyuan,LI Xinran,HUANG Jijun,et al. Comparison of application of different energy storages in power system frequency regulation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering

and Energy, 2015, 34(3):49-53,71.

- [3] 陈谦,陈霄逸,金宇清,等. 基于混合储能的大型风电场优化控制 [J]. 电力自动化设备,2015,35(4):70-76. CHEN Qian,CHEN Xiaoyi,JIN Yuqing,et al. Optimal control of large-scale wind farm based on hybrid energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):70-76.
- [4] 吴红斌,杨仪松,丁明,等. 遗传算法在 UPFC 的 PID 控制器参数 优化中应用[J]. 电力自动化设备,2007,27(2);24-27. WU Hongbin,YANG Yisong,DING Ming,et al. Application of GA in PID parameter optimization in UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(2);24-27.
- [5] 史林军,唐国庆,张磊. 飞轮储能系统多 PI 控制器参数优化[J]. 电力自动化设备,2011,31(10):65-69. SHI Linjun,TANG Guoqing,ZHANG Lei. Parameter optimization of FESS PI controllers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(10):65-69.
- [6] 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安



- 全科学学报,2008,18(5):148-153.
- GUO Jinyu,ZHANG Zhongbin,SUN Qingyun. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. China Safety Science Journal, 2008,18(5):148-153.
- [7] 钟宇峰,黄民翔,羌丁建. 电池储能系统可靠性建模及其对配电系统可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(19):95-102
 - ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, QIANG Dingjian. Reliability modeling of battery energy storage system and its effect on the reliability of distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19):95-102.
- [8] 李妍,荆盼盼,王丽,等. 通用储能系统数学模型及其 PSASP 建模研究[J]. 电网技术,2012,36(1):51-57.
 - LI Yan, JING Panpan, WANG Li, et al. A mathematical model of versatile energy storage system and its modeling by power system analysis software package [J]. Power System Technology, 2012,36(1):52-54.
- [9] 段开锋. 电池储能系统在配电网中的应用研究[D]. 北京:北京 交通大学,2014.
 - DUAN Kaifeng. The application of battery energy storage system in the distribution network[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2014.
- [10] 陆秋瑜, 胡伟, 郑乐, 等. 多时间尺度的电池储能系统建模及分析应用[J]、中国电机工程学报, 2013, 33(16); 86-93.
 - LU Qiuyu, HU Wei, ZHENG Le, et al. Modeling and analysis of battery energy storage systems in multi-time scales application [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16):86-93.
- [11] PILLAI J R, BAK-JENSEN B. Integration of vehicle-to-grid in the western danish power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(1):12-19.
- [12] 李欣然,黄际元,陈远扬,等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(7):145-153.
 - LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large scale involvement of energy storage in power grid fast

- frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016,44(7):145-153.
- [13] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2006:275-290
- [14] 江全元,程时杰,曹一家,等. 基于遗传算法的超导磁储能装置 H_2/H_z 鲁棒控制器设计[J]. 电力系统自动化,2002,26(12): 14-18.
 - JIANG Quanyuan, CHEN Shijie, CAO Yijia, et al. A genetic approach to mixed robust control design for SMES[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(12):14-18.
- [15] NANDA J,MANGLA A,SURI S. Some new findings on automatic generation control of an interconnected hydrothermal system with conventional controllers[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1):187-194.

作者简介:



雷 杨(1992—),男,安徽淮南人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统机电扰动与储能技术(**E-mail**;yleimirror@163.com);

马宁宁(1987—), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统频率动态、扰动传播、新能源发电等(E-mail:mnsdxt@163.com);

雷核

康积涛(1962—),男,江西遂川人,教授,博士,主要从事电力系统无功与电压稳定性、电力系统次同步振荡、电力变压器理论方面的研究工作(E-mail:kangjitao@swjtu.cn);

王德林(1970—),男,河南安阳人,副教授,博士,通信作者,主要从事电力系统机电动态、扰动传播、风力发电方面的研究工作(E-mail:dlwang@swjtu.cn);

曹 聪(1992—),女,河南郑州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定性分析、频率动态预测(E-mail: caocong321@163.com)。

Parameter optimization based on AHP/GA for frequency modulation controller of energy storage system

LEI Yang, MA Ningning, KANG Jitao, WANG Delin, CAO Cong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the slow response speed of thermal power generating unit, unsuitable for the short-period frequency modulation of power system, an optimization algorithm based on AHP(Analytic Hierarchy Process) and GA(Genetic Algorithm) is proposed to optimize the parameters of battery energy storage controller for enabling it to better control the battery energy storage system and to participate in the frequency modulation. The weights of the maximum deviation amplitude, steady-state deviation and adjustment time are determined by AHP, and a GA fitness function is constructed to optimize the controller parameters. A two-area power system with energy storage participating in the grid frequency modulation is simulated on MATLAB/Simulink simulation platform. Simulative results show that, the optimized controller can effectively control the energy storage device, assist AGC in the frequency modulation and respond to the disturbance in time, having better parameter optimization effect than that with the ITAE(Integrated Time and Absolute Error) criterion as its fitness function.

Key words: electric batteries; energy storage; auxiliary frequency modulation; parameter optimization; analytic hierarchy process; genetic algorithms