

基于可变分频点的 SMES-VRB 混合储能系统 在风电并网中的应用

邱晓燕, 马娅妮, 朱英伟, 王 鹏, 雷 勇

(四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:为了平抑风电并网引起的功率波动,以超导磁储能(SMES)和全钒液流电池(VRB)组成的混合储能系统(HESS)为研究对象,针对变流器控制设计了基于径向基函数(RBF)神经网络的比例积分控制器,可根据 HESS 的动态辨识结果实时改变控制参数,有利于 HESS 功率指令跟踪和直流侧电压稳定。针对风电的功率分配,采用小波包分解,首先秉持“能者多劳”的原则,设置根据储能荷电状态变化的分频点,灵活分配高、低频功率,从而最大限度地利用储能空间;然后基于 VRB 能量密度大和使用寿命长的特点,在 SMES 充放电不足时给予援助性功率支撑,协助 SMES 迅速恢复最佳状态,有利于更加充分地平滑风电功率波动。在 MATLAB / Simulink 平台上建模仿真,结果验证了所提方法的优越性。

关键词:混合储能系统;RBF 神经网络;超导磁储能;全钒液流电池;可变分频点;最佳荷电状态;风电并网;小波包分解

中图分类号:TM 614;TM 716

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110007

0 引言

近年来,随着风电的大规模利用,其并网带来的波动性及间歇性愈加不容忽视。为了解决风电消纳问题,储能技术得到大力发展^[1]。单一型储能因其能量或功率限制,存在成本高或使用寿命短等不足。为了更加充分地平抑风电波动,混合型储能应运而生,将不平衡功率的低频、高频部分分别分配给能量型储能和功率型储能,有效解决了储能的经济和技术问题^[2]。

相比于超级电容器储能,超导磁储能(SMES)因其零阻性、直接以磁能形式存储等超导特性,具有更高的能量转换效率、更低的自放电率、更小的电能损耗以及更快的响应速度^[3-4],且随着未来高温超导材料的发展进步,SMES 的优势将使其在功率型储能技术领域发挥重要的作用,因此,性能更优的 SMES 具有广阔的市场应用前景。相比于传统的蓄电池,全钒液流电池(VRB)具有效率高、寿命长、安全性好、绿色无污染等优势^[5],且随着钒矿资源的开发,VRB 以其容量和功率可独立设计、扩展性强的特点有望得到大规模应用。

混合储能系统 HESS (Hybrid Energy Storage System)需要通过连接变流器并入电网,变流器的控制直接影响到 HESS 对风电的平抑效果。常见的控制策略包括比例积分(PI)控制、模糊控制、直接功率控制等^[6-7]。PI 控制结构简单,易于实现,但控制参

数依赖于精确的数学模型,难以确定;模糊控制中模糊规则的制定缺乏系统性,且当精度要求高时过于复杂;直接功率控制的响应速度快且超调小,但其开关矢量表的建立难度较大。上述方法均没有考虑系统的实时变化,无法维持复杂电力系统的稳定性。基于此,针对 HESS 的变流器控制问题,本文提出了基于径向基函数 RBF (Radial Basis Function) 神经网络的 PI 控制方法。该方法将神经网络精确、迅速的辨识功能与传统 PI 控制器的简单结构有机结合,通过对 HESS 模型的动态辨识,将控制参数与辨识结果进行联动调整,使得参数同步更新,从而实现系统的智能控制。目前已有许多学者将基于 RBF 神经网络的 PI 控制应用于电力系统^[8-9],验证了该方法适用于系统的功率变换,具有抗干扰能力强且能快速及时跟踪输入信号的特点。

为了确保 HESS 安全、高效运行,合理的功率分配策略至关重要。目前,应用较为广泛的风电波动功率的分解方法包括低通滤波、经验模态分解、小波包分解^[10-13]等。低通滤波通过设置时间常数得到低频分量,能有效滤除风电功率中的高频波动分量。但在实际应用中并未充分考虑风电波动功率的频率特性,仅是单纯依据所需的并网功率来确定滤波时间常数的大小,缺乏理论支撑,且存在严重的滞后问题。经验模态分解通过反复求解信号的均值包络线以得到频率从高到低的子信号,依据数据自身的时间尺度特征进行信号分解,无需预先设定任何基函数,但均值包络线的选取存在端点效应,且局部极值多次跳变会导致出现模态混叠现象,使其存在较大的误差。小波包分解类似于傅里叶分析,采用多尺

收稿日期:2021-03-26;修回日期:2021-08-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977134)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51977134)

度分析将原信号逐层分解为高、低频分量,其不同频率间的分解结果相互独立没有混杂现象,更加适用于考虑频率差异及消纳能力的 HESS 功率分配,且分解速度快,对信号的还原程度高。但目前将小波包分解应用于 HESS 的研究均是参考固定频率分配功率,对储能荷电状态(SOC)的优化也仅限于限制过充过放,不能最大限度地发挥 HESS 的作用。本文采用小波包分解方法,设定动态分配点,灵活分配高、低频分量,在 SMES 充放电极限情况下利用 VRB 补充能量,使 SMES 尽快恢复良好状态,为 HESS 响应风电功率波动提供充裕空间。

本文首先针对 HESS 并网变流器,设计了基于 RBF 神经网络的 PI 控制器;然后,介绍了可变分频点下功率分配的具体方法,并对 SOC 优化策略进行详细说明;最后,通过与其他控制方法及分配策略进行仿真比较分析,验证了本文所提方法平滑风电功率波动的可行性。

1 HESS 的结构及控制

1.1 HESS 的拓扑结构及数学模型

HESS 的拓扑结构见图 1。SMES 和 VRB 通过各自的并网变流器并联于交流母线,并网变流器根据拓扑结构可分为电压源型和电流源型,为了稳定直流侧电压,本文选用电压源型并网变流器^[14]。超导磁体通过斩波器与直流侧电容相连,而串联的钒电池组直接并联在直流电容两侧。图 1 中, R, L, R^*, L^* 为交流滤波器的等效参数; C 为直流稳压电容; L_{sc} 为超导磁体电感; U_{VRB} 为 VRB 的端电压。

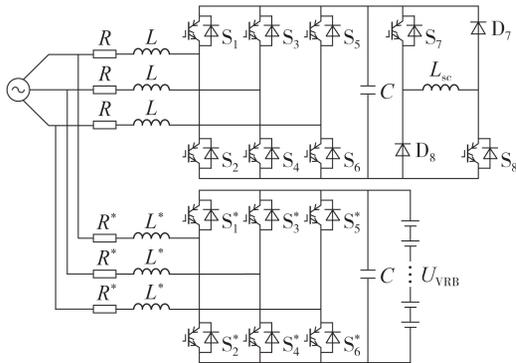


图1 HESS 的拓扑结构

Fig.1 Topological structure of HESS

根据图 1 所示拓扑结构,可得到 SMES 的电压源型变流器(VSC)部分在 dq 两相同步旋转坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} e_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q + S_d U_{dc} \\ e_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + S_q U_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $e_\varphi, i_\varphi, S_\varphi (\varphi \in \{d, q\})$ 分别为 dq 两相同步旋转坐

标系下电网电压、电网流向 SMES 的电流、SMES 的 VSC 开关函数的 φ 轴分量; ω 为网侧电压的角频率; U_{dc} 为直流稳压电容两侧电压。

VRB 的 VSC 部分在 dq 两相同步旋转坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} e_d = L^* \frac{di_d^*}{dt} + R^* i_d^* - \omega L^* i_q^* + S_d^* U_{VRB} \\ e_q = L^* \frac{di_q^*}{dt} + R^* i_q^* + \omega L^* i_d^* + S_q^* U_{VRB} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_\varphi^*, S_\varphi^* (\varphi \in \{d, q\})$ 分别为电网流向 VRB 的电流、VRB 的 VSC 开关函数的 φ 轴分量。

1.2 HESS 的基于 RBF 神经网络的 PI 控制

HESS 的并网变流器负责储能装置对系统功率指令的跟踪,直接关系到风电波动功率的消纳效果。因此,为了提升 VSC 的控制性能,采用 RBF 神经网络对其控制器进行改进。

基于 RBF 神经网络的 PI 控制框图如图 2 所示,其主要由被控对象、RBF 神经网络辨识器和 PI 控制器三部分组成^[15]。图中, $r(k)$ 为系统初始给定的输入, $y(k)$ 为系统的实际输出, $e(k)$ 为控制误差,三者之间的关系可表示为 $e(k) = r(k) - y(k)$; $u(k)$ 为 PI 控制器的输出, $f(x)$ 为 RBF 神经网络辨识器的输出。被控对象为对象的离散化模型,表现为 PI 控制器的输出与系统输出之间的关系;RBF 神经网络辨识器对被控对象进行模型辨识,并将辨识结果(即 Jacobian 信息)反馈到 PI 控制器中,PI 控制器再根据理想输出和实际输出的比较结果对控制参数进行进一步调整。

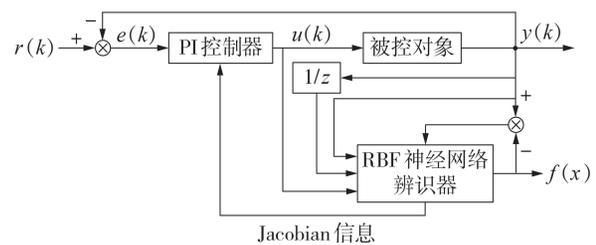


图2 基于RBF神经网络的PI控制框图

Fig.2 Block diagram of PI control based on RBF neural network

PI 控制器输入 $X(k)$ 为:

$$\begin{cases} X(k) = [X_1(k) \ X_2(k)] \\ X_1(k) = \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \\ X_2(k) = e(k) \end{cases} \quad (3)$$

PI 控制器输出 $u(k)$ 为:

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \\ \Delta u(k) = K_p(k) X_1(k) + K_I(k) X_2(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $K_p(k), K_I(k)$ 分别为比例系数、积分系数; Δ 表

示对应变量的增量。

定义 PI 控制器的性能指标函数 $E(k)$ 为:

$$E(k) = \frac{1}{2} (r(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (5)$$

为了减小控制误差 $e(k)$, 采用梯度下降法对 PI 控制器参数进行修正, 如式(6)和式(7)所示。

$$\begin{cases} \Delta K_p(k) = -\eta_p \frac{\partial E(k)}{\partial K_p(k)} = -\eta_p \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial K_p(k)} \approx \\ \eta_p e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} X_1(k) \\ K_p(k) = K_p(k-1) + \Delta K_p(k) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta K_i(k) = -\eta_i \frac{\partial E(k)}{\partial K_i(k)} = -\eta_i \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial K_i(k)} \approx \\ \eta_i e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} X_2(k) \\ K_i(k) = K_i(k-1) + \Delta K_i(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: η_p 、 η_i 分别为比例系数、积分系数的调整速率; $\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}$ 为 Jacobian 信息, 可以由 RBF 神经网络在线辨识获得。 $u(k)$ 和 $y(k)$ 由神经网络通过 3 层前向式结构全局逼近后得到辨识结果, 再反馈至控制参数的修正环节。 RBF 神经网络辨识器的输出 $f(x)$ 与 $y(k)$ 的比较结果决定了辨识器参数的更新, 进而影响辨识结果。 辨识器参数的迭代过程参考文献 [16]。 综上所述, HESS 的实时状态和控制器算法逐层嵌扣, 内外互连, 最终使得 PI 控制器参数得以及时更新, 以达到更佳的控制效果。

为了消除有功电流与无功电流之间存在的耦合关系, 对变流器均采用功率外环、电流内环的双闭环控制^[17]。 采用电流内环控制的目的是前馈解耦以实现有功功率和无功功率四象限独立运行, 采用功率外环控制的目的是调节内环电流使输出功率跟踪参考值。 为了确保功率外环应对系统变化能够快速响应指令, 及时调整控制参数, 对功率外环采用基于 RBF 神经网络的 PI 控制。 以有功功率外环为例, 令 $r(k)$ 为有功功率参考值 P_{ref} , $y(k)$ 为实际输出有功功

率 P , $u(k)$ 为有功电流内环参考值 $i_{d,ref}$, 将其代入基于 RBF 神经网络的 PI 控制器及辨识器进行迭代计算, 对 PI 参数进行修正。 可得变流器基于 RBF 神经网络的 PI 控制框图如图 3 所示。 图中, Q 、 Q_{ref} 分别为实际输出无功功率、无功功率参考值; $i_{q,ref}$ 为无功电流内环参考值。 无功功率外环同样采取上述方法。

2 HESS 的功率分配

2.1 基于可变分频点的小波包分解

风电场的输出功率与并网功率之间的差值即为 HESS 所需平抑的不平衡功率, 可见确定并网功率是 HESS 功率分配的前提。 若并网功率过于平滑, 则对储能容量要求过高; 若要尽可能还原风电功率, 则波动太大, 难以并网。 为了保证电力系统的稳定性, 我国《风电场接入电力系统技术规定》明确了风电并网时其输出功率的 1 min 最大波动率不得超过其装机容量的 10%^[18]。

小波包分解是一种以多层树状结构展开的局部化分析方法, 其首先对原始信号进行分解, 得到低频信号和高频信号, 然后对上一层分解得到的 2 种信号进行再次分解, 经过 n 层分解后可以将原始信号分成 2^n 个频率互不重叠且从低到高的信号分量^[19], 可表示为:

$$P_{wind} = \sum_{j=0}^{2^n-1} G_j \quad (8)$$

式中: P_{wind} 为风电输出功率; n 为小波包分解层数; G_j 为分解后的第 j 个子信号分量。

以 1 min 最大波动率为参考^[20], 采用小波包分解对风电初始功率进行逐层分解, 当最后一层分解中最低频部分的最大波动率恰好满足技术规定, 则可确定分解层数。 此时并网功率 P_{grid} 可表示为:

$$P_{grid} = G_0 \quad (9)$$

根据 SMES 和 VRB 各自的储能特性^[21] 将不平衡功率的低频分量、高频分量分别分配给 VRB、SMES。 VRB 分配所得的功率 P'_{VRB} 、SMES 分配所得的功率 P'_{SMES} 分别为:

$$P'_{VRB} = \sum_{j=1}^K G_j \quad (10)$$

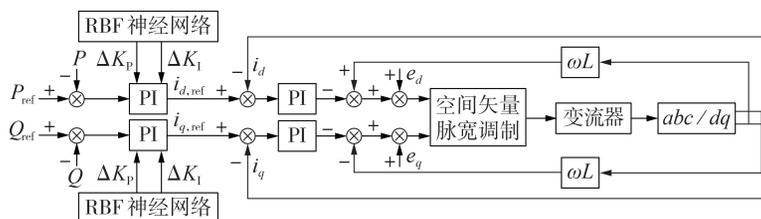


图 3 变流器的控制框图

Fig.3 Control block diagram of converter

$$P'_{SMES} = \sum_{j=K+1}^{2^n-1} G_j \quad (11)$$

式中: K 为 HESS 功率分配的分频点。为了充分利用储能的可用空间,根据储能各自的 SOC 确定分频点的大小。

在工程实践中,风电功率入网后,1 Hz 以上的高频段波动对系统的影响很小^[2]。因此,可将这部分高频分量直接输入电网由系统自身进行消纳,之后调整 SMES 的功率指令,以减小 SMES 的充放电次数。

设储能充放电优先级 $X \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 为中间变量,根据界限值对 SOC 进行区域划分以对应不同的充放电优先级,如图 4 所示。图中, $S_{SOC, \min}$ 、 $S_{SOC, \max}$ 分别为 SOC 下限、上限值; $S_{SOC, \downarrow}$ 、 $S_{SOC, \uparrow}$ 分别为 SOC 较低限制值、较高限制值。

放电优先级				
1	2	3	4	5
0	$S_{SOC, \min}$	$S_{SOC, \downarrow}$	$S_{SOC, \uparrow}$	$S_{SOC, \max}$
5	4	3	2	1
充电优先级				

图 4 充放电优先级设定

Fig.4 Setting of charging and discharging priority

分频点 K 由 2 种储能的充放电优先级决定,可表示为:

$$K = K_0 + \Delta K \quad (12)$$

$$\Delta K = m(X_{VRB} - X_{SMES}) \quad (13)$$

式中: K_0 为分频点的初始值,可通过综合考虑 SMES 容量及 VRB 响应频率二者对应的风电小波包分解结果确定,本文仿真根据所选风电分解结果(即分解层数为 6 层,得到 32 个子分量)设定 $K_0 = 9$; X_{VRB} 、 X_{SMES} 分别为 VRB、SMES 的充放电优先级; m 为修正系数,可变分频点的原理类似于滑动变阻器,为了灵活划定分频点的变化范围,本文设置 m 为常数。本文仿真研究中设置 $m = 1$,具体选定方法及不同 m 取值下的仿真对比结果见附录 A。

根据不同的储能 SOC 确定动态变化的分频点,基于此可以得到 SMES 和 VRB 的初始功率分配参考值。

2.2 基于充放电优先级的功率优化

考虑到 $X_{VRB} - X_{SMES}$ 可能为 0 的情况,还需根据充放电限制进行优化分配,此外还可以利用储能自身的特点稳定 SOC。进一步功率优化策略的步骤具体如下。

1) 当进行初始功率分配时,若 $X_{VRB} = X_{SMES}$, 则需考虑过充过放问题,对功率进行如下限制:

$$P_{\text{final}} = \begin{cases} 0 & X = 1 \\ cP' & X = 2 \end{cases} \quad (14)$$

$$c = \begin{cases} \frac{S_{SOC, \max} - S_{SOC}}{S_{SOC, \max} - S_{SOC, \uparrow}} & P_{\text{HESS}} > 0 \\ \frac{S_{SOC} - S_{SOC, \min}}{S_{SOC, \downarrow} - S_{SOC, \min}} & P_{\text{HESS}} < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: P' 为初始参考功率; P_{final} 为优化分配后储能的最终参考功率; c 为 SOC 修正系数; S_{SOC} 为储能实时 SOC; P_{HESS} 为不平衡功率。由于此处的功率限制设定储能独立调整,所以储能充放电优先级 X 及 P_{final} 、 P' 不区分储能类型(即变量未带下标 VRB、SMES)。当 $X = 3, 4, 5$ 时,表示储能具备充裕空间,应积极出力,因此不进行功率限制。

2) 当进行初始功率分配时,若 $X_{VRB} \neq X_{SMES}$, 则需考虑极限 SOC 下不利于下一时刻储能充放电的问题,为了使储能尽量保持良好的 SOC,需要合理安排储能之间进行功率转移,即使优先级高的一方承担优先级低的一方的充放电任务,并对优先级低的一方进行功率补充,使其反向充放电,尽快恢复最佳 SOC。

由于 VRB 具有容量大、响应速度快以及使用寿命长等特点,其 SOC 较易稳定;而 SMES 属于功率型储能,其 SOC 波动大,容易陷入极限区域。因此,利用 VRB 对 SMES 进行功率援助支撑,功率调整规则如下。

(1) 当 $X_{SMES} = 1, X_{VRB} = 4, 5$ 时,有:

$$\begin{cases} P_{SMES} = -fP'_{SMES} \\ P_{VRB} = P'_{VRB} + P'_{SMES} - P_{SMES} \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_{SMES} 、 P_{VRB} 分别为 SMES、VRB 的最终参考功率; f 为限制系数,其值与 SMES 额定容量和 VRB 额定容量的比值呈负相关。

(2) 当 2 种储能的充放电优先级取值为 1 或 2, 且 $X_{VRB} \neq X_{SMES}$ 时,按照 2 种储能的充放电优先级相同时的功率限制处理,SMES 和 VRB 单独调整,互不影响。

(3) 当 $X_{SMES} \geq 3$ 且 $X_{VRB} \geq 3$ 时,表明储能 SOC 良好,无需进一步优化,直接输出初始分配所得的参考功率。

综上所述,风电功率分配主要包括以下 2 个步骤:①利用储能可用空间适时改变分频点,由小波包分解方法灵活充分地分配得到初始参考功率;②针对储能的不同 SOC,借助 VRB 能量型储能的优势,对 SMES 功率进行补充以将其 SOC 维持在稳定水平。HESS 功率分配流程图如图 5 所示。

3 仿真分析

本文采用 MATLAB / Simulink 仿真软件对所提控制方法及功率分配策略进行仿真分析。基于 RBF

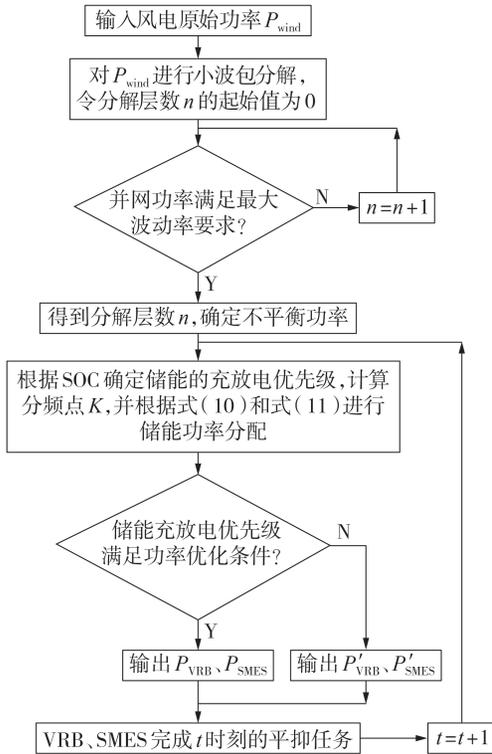


图 5 HESS 功率分配流程图
Fig.5 Flowchart of HESS power distribution

神经网络的改进 PI 控制器部分采取 S 函数形式编写;功率分配通过 Function 函数编辑器完成。因本文侧重于 HESS 的功率分配协调控制,未涉及容量配置,故在仿真中假定预设容量能够恰好满足不平衡功率的平抑任务需求,HESS 的仿真参数见附录 B 表 B1。

为了验证本文所提基于 RBF 神经网络的 PI 控制器的有效性,对其并网变流器分别采用传统 PI 控制器和本文所提 PI 控制器进行对比分析。SMES 的控制效果与 VRB 类似,因此以 VRB 为例进行分析,使 VRB 运行在单位功率因数下,即只接受有功功率指令,无功功率指令为 0。对有功功率设置阶跃指令,0、0.2、0.4 s 时的有功功率分别为 0、50、-30 kW。VRB 有功功率及电池端电压的跟踪结果如图 6 所示。由图可以看出,本文所提 PI 控制器在跟踪功率指令时更及时、更准确,电池端电压响应更迅速、超

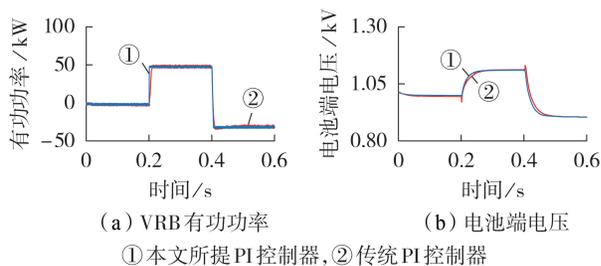


图 6 VRB 的仿真结果
Fig.6 Simulative results of VRB

调量更小。

为了验证本文所提功率分配策略的正确性,对配置 HESS 的含风电电网进行仿真分析。风电输出功率取自某风电场的实测数据,以 1 s 为时间间隔进行采样,共采样 2000 个点,风电机组的额定功率为 2 MW。当小波包分解层数为 6 层时,并网功率的 1 min 最大波动率为 8.4%,恰好满足波动率要求。因此,选择对原始风电功率进行 6 层分解后得到并网功率。原始风电功率及采用低通滤波和小波包分解所得并网参考功率见图 7。由图可以看出,小波包分解所得并网参考功率更加平滑,更贴合原始风电功率,且没有延时。

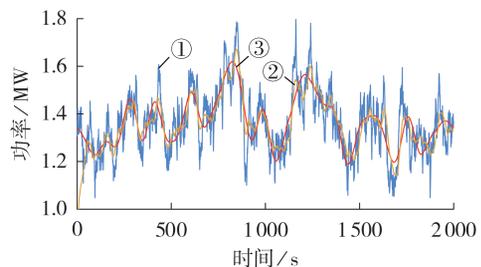


图 7 原始风电功率及并网参考功率
①原始风电功率,②低通滤波所得并网参考功率
③小波包分解所得并网参考功率

图 7 原始风电功率及并网参考功率
Fig7 Original wind power and grid-connected reference power

将本文所提功率分配策略(可变分频点并基于储能充放电优先级)与策略 1(基于低通滤波和储能充放电优先级的功率分配策略)、策略 2(基于一般小波包分解和储能充放电优先级且分频点固定的功率分配策略)进行对比仿真,且控制方法均采用基于 RBF 神经网络的 PI 控制器。储能 SOC 的分区设置见附录 B 表 B2,3 种策略下储能的 SOC 结果如图 8 所示。

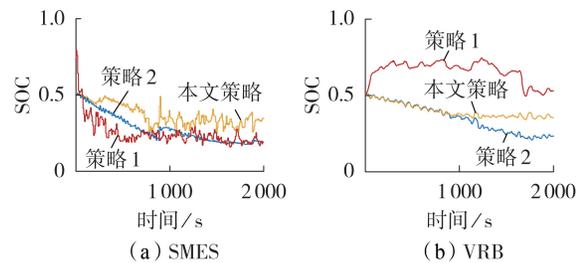


图 8 3 种策略下储能的 SOC
Fig.8 SOC of energy storage under three strategies

由图 8(a)可以看出:策略 1 下 SMES 的 SOC 在仿真起始时波动较大,这是因为低通滤波的滞后现象导致并网功率一开始远小于风电功率,故对储能大幅充电,SMES 得到的功率指令瞬间过大超出了其容量限制,无法稳定跟踪,且 100~200 s 内 SMES 分配得到的功率指令放电部分多于充电部分,因此造成

SOC先骤升后骤降;策略2下SMES的SOC下降也较为明显,虽然SOC因优化控制及时稳定了下降趋势,但始终在其SOC的下限值处波动;相较而言,本文策略下SMES的SOC稳定效果最佳。由图8(b)可以看出:策略1下并网功率延迟的问题导致VRB大幅度充电,进而使得SOC大幅上升;策略2下VRB的SOC下降幅度较大,最后稳定在VRB的SOC下限值处;而本文策略下VRB的SOC略微下降之后恢复平稳。

本文策略下分频点的变化情况如图9所示。由于VRB和SMES的初始SOC均为0.5,在充放电过程中SOC变化较为平稳,所以分频点也相对稳定;随着功率平抑过程的进行,储能的SOC发生变化,分频点也随之改变。

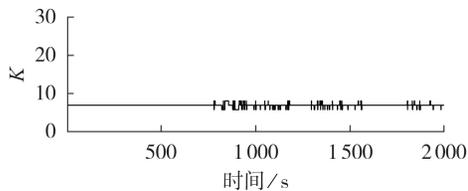


图9 可变分频点的变化情况

Fig.9 Change of alterable frequency division point

在本文策略下SMES和VRB的输出功率如图10所示。由图可以看出,SMES响应高频小幅功率指令,VRB响应低频大幅功率指令,HESS的优势得以体现。

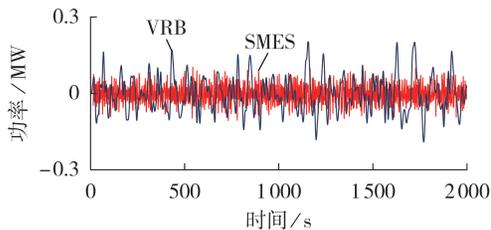
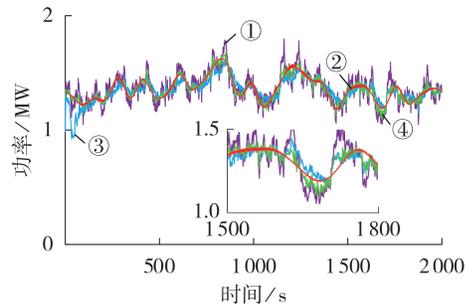


图10 HESS的输出功率

Fig.10 Output power of HESS

为了综合验证本文所提控制方法对风电波动的平抑效果,将其与方法1(低通滤波+PI控制器,并基于充放电优先级进行功率分配)、方法2(小波包可变分频点+PI控制器,并基于充放电优先级进行功率分配)进行对比仿真,3种方法的实际并网功率对比如图11所示。由图可知,相比于其他控制方法,本文所提控制方法下的实际并网功率更加平滑,且能较好地跟踪原始风电功率的波动。

对上述控制方法下的实际并网功率、原始风电功率及经6层小波包分解所得理想并网功率的波动率进行计算,结果如表1所示。由表可知,本文所提控制方法所得实际并网功率的1 min最大波动率仅为9.1%,虽然不及理想并网功率的波动率,但已满足工程实际的并网要求。



①原始风电功率,②本文方法所得实际并网功率
③方法1所得实际并网功率,④方法2所得实际并网功率

图11 3种方法的实际并网功率对比

Fig.11 Comparison of actual grid-connected power among three methods

表1 波动率对比

Table 1 Comparison of volatility

功率	1 min最大波动率 / %
原始风电功率	24.5
理想并网功率	8.4
方法1所得实际并网功率	22.1
方法2所得实际并网功率	15.5
本文方法所得实际并网功率	9.1

4 结论

针对风电消纳问题,本文研究了HESS在风电并网中的应用,在结合SMES和VRB各自优点的基础上,设计了基于RBF神经网络的PI控制器,可根据HESS实时功率在线调整控制参数,有效控制储能系统进行快速、精确的功率吞吐,克服了传统PI控制器控制参数固定且不易确定的不足;在风电功率分配中,对小波包分解法进行了优化,采用动态可变的分频点,可根据储能的实时SOC改变分配至不同储能的参考功率,最大限度地利用了储能空间且避免了储能过充过放,并充分发挥了VRB容量大、充放电次数多的特性,使其对SMES进行功率补充,有效稳定了储能的SOC,保障下一时刻充放电任务的顺利完成,有利于更好地实现风电功率波动的平抑目标。仿真结果验证了本文所提HESS控制方法及功率分配策略的有效性及可行性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘梦依,邱晓燕,张志荣,等. 计及风光出力相关性的配电网多目标无功优化[J]. 电网技术,2020,44(5):1892-1899.
LIU Mengyi, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, et al. Multi-objective reactive power optimization of distribution network considering output correlation between wind turbines and photovoltaic units[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1892-1899.
- [2] 雷勇,林晓冬. 超导磁储能-蓄电池混合储能系统在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 高电压技术,2019,45(3):983-992.
LEI Yong, LIN Xiaodong. Application of hybrid energy storage system based on SMES and BESS in smoothing the power fluctuations of wind farms[J]. High Voltage Engineering,

- 2019,45(3):983-992.
- [3] 刘洋,唐跃进,石晶,等. 超导磁储能系统发展现状及前景[J]. 南方电网技术,2015,9(12):58-64.
LIU Yang,TANG Yuejin,SHI Jing,et al. Development status and prospect of superconducting magnetic energy storage system[J]. Southern Power System Technology,2015,9(12):58-64.
- [4] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报,2020,40(1):1-18.
LIU Chang,ZHUO Jiankun,ZHAO Dongming,et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(1):1-18.
- [5] 贺鸿杰,张宁,杜尔顺,等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述[J]. 电力系统自动化,2020,44(12):193-207.
HE Hongjie,ZHANG Ning,DU Ershun,et al. Review on modeling method for operation efficiency and lifespan decay of large-scale electrochemical energy storage on power grid side[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(12):193-207.
- [6] 吕超贤,李欣然,户龙辉,等. 基于小波分频与双层模糊控制的多类型储能系统平滑策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(2):21-29.
LÜ Chaoxian,LI Xinran,HU Longhui,et al. A smoothing strategy for hybrid energy storage system based on wavelet frequency allocation and two-level fuzzy control[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(2):21-29.
- [7] 张晓琳. 储能电站双向逆变器的直接功率控制技术[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
ZHANG Xiaolin. Research on direct power control of battery storage system[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2012.
- [8] ZHANG L,CHEN K,CHI S B,et al. The bidirectional DC/DC converter operation mode control algorithm based on RBF neural network[C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). Chengdu, China: IEEE, 2019: 2138-2143.
- [9] 刘学文,任兴贵,徐定杰. 基于RBF神经网络单神经元PID控制的恒功率直流变换研究[J]. 自动化与仪器仪表,2019(8):126-129.
LIU Xuewen,REN Xinggui,XU Dingjie. Research on constant power DC conversion based on single neuron PID control of RBF neural network[J]. Automation & Instrumentation,2019(8):126-129.
- [10] 雷琨,欧阳曾恺,李征,等. 平抑风能波动的储能电池SOC与滤波协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):126-131.
LEI Ting,OUYANG Zengkai,LI Zheng,et al. Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power fluctuation smoothing[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):126-131.
- [11] 钱韦廷,赵长飞,万灿,等. 基于概率预测的混合储能平抑风电波动随机优化调控方法[J/OL]. 电力系统自动化. (2021-03-10) [2021-08-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210309.1020.002.html>. DOI:10.7500/AEPS20200616007.
- [12] 李大勇,都明亮,田春光,等. 基于总体平均经验模态分解的混合储能系统协调优化控制[J]. 电力建设,2018,39(4):92-99.
LI Dayong,DU Mingliang,TIAN Chunguang,et al. Coordinated optimization control of hybrid energy storage system based on ensemble empirical mode decomposition[J]. Electric Power Construction,2018,39(4):92-99.
- [13] 张鹏,张峰,梁军,等. 采用小波包分解和模糊控制的风电机组储能优化配置[J]. 高电压技术,2019,45(2):609-617.
ZHANG Peng,ZHANG Feng,LIANG Jun,et al. Capacity optimization of hybrid energy storage system for wind farm using wavelet packet decomposition and fuzzy control[J]. High Voltage Engineering,2019,45(2):609-617.
- [14] 朱英伟,付伟真,林晓冬,等. 基于动态演化理论的SMES变流器控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):7-13.
ZHU Yingwei,FU Weizhen,LIN Xiaodong,et al. Control strategy of SMES converter based on dynamic evolution theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):7-13.
- [15] 陈益飞. RBF神经网络的PID控制研究与仿真[J]. 计算机仿真,2011,28(4):212-215.
CHEN Yifei. Study and simulation on PID control based on RBF neural network[J]. Computer Simulation,2011,28(4):212-215.
- [16] 张静,裴雪红. 基于RBF在线辨识的PID整定[J]. 电机与控制学报,2009,13(增刊1):157-160,168.
ZHANG Jing,PEI Xuehong. Self tuning PID controller of RBF based on-line identification neural network[J]. Electric Machines and Control,2009,13(Supplement 1):157-160,168.
- [17] 辛征,魏莉,施啸寒. SMES装置用电压源型变流器双闭环功率控制系统设计[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):168-173,193.
XIN Zheng,WEI Li,SHI Xiaohan. Design of double closed-loops control system of VSC used in SMES device[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(12):168-173,193.
- [18] 杨晨. 基于混合储能的风电场输出功率波动平抑方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2017.
YANG Chen. Study on wind power output fluctuation stabilization method based on hybrid energy storage[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2017.
- [19] 程龙,张方华. 用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):100-104,128.
CHENG Long,ZHANG Fanghua. Wavelet transform method for hybrid energy storage system smoothing power fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(3):100-104,128.
- [20] 靳雯皓,刘继春,刘俊勇. 基于复合储能系统的微网联络线功率优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):22-28,33.
JIN Wenhao,LIU Jichun,LIU Junyong. Microgrid tie line power optimization based on hybrid energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(6):22-28,33.
- [21] 齐晓光,姚福星,朱天瞳,等. 考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J/OL]. 电力自动化设备. (2021-07-14) [2021-08-07]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202107032>.

作者简介:



邱晓燕

邱晓燕(1964—),女,四川南充人,教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、智能电网、分布式电源及微电网技术等;

马娅妮(1995—),女,宁夏固原人,硕士研究生,主要研究方向为新能源并网及混合储能控制技术(E-mail:915630945@qq.com);

朱英伟(1982—),男,湖北枣阳人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为超导磁储能、电磁发射技术(E-mail:77899428@qq.com);

王鹏(1981—),男,四川成都人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子设备中的电气绝缘、变频电机绝缘技术;

雷勇(1966—),男,四川成都人,教授,博士,主要研究方向为现代电子技术、低温超导技术等。

(编辑 陆丹)

(下转第24页 continued on page 24)

Coordinated optimal operation strategy of thermal power-energy storage considering demand response and life model of energy storage

CHEN Yanbo^{1,2,3}, WU Chao¹, JIAO Yang¹, SUN Zhixiang¹, DAI Sai⁴, ZHANG Pu⁵

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
 2. Qinghai Key Laboratory of Efficient Utilization of Clean Energy, Tus-Institute for Renewable Energy, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. School of Engineering, Xining University, Xining 810016, China;
 4. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
 5. Beijing Electric Power Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: Aiming at the peak regulation and consumption problems caused by the large-scale grid-connected new energy, and the insufficient consideration of existing optimal scheduling strategy on the life cost of energy storage, a coordinated optimal operation strategy of thermal power-energy storage considering demand response and life model of energy storage is proposed. The upper layer guides the electricity consumption through time-of-use electricity price, and the optimized load curve is obtained with the goal of minimizing the fluctuation of net load, which aims to reduce the peak regulation pressure of thermal power-energy storage and improve the consumption of new energy. The lower layer coordinates and optimizes the operation of wind power, photovoltaic, thermal power and energy storage with the goal of minimizing the total scheduling cost of the system. Considering the deep peak regulation of thermal power and embedding the life model of energy storage in the optimal scheduling, the optimal operation mode of each power source and energy storage is obtained. Taking an actual system in a certain area as the example, the results show that the proposed strategy can effectively improve the peak regulation pressure of the system, improve the consumption capacity of new energy, reasonably reflect the life cost of energy storage, and improve the operation economy of the system.

Key words: new energy consumption; demand response; deep peak regulation; life model of energy storage; coordinated optimal operation

(上接第7页 continued from page 7)

Application of SMES-VRB hybrid energy storage system based on alterable frequency division point in wind power grid-connection

QIU Xiaoyan, MA Yani, ZHU Yingwei, WANG Peng, LEI Yong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to smooth the power fluctuations caused by wind power grid-connection, the HESS (Hybrid Energy Storage System) composed of SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) and VRB (Vanadium Redox flow Battery) is taken as the research object. A proportional integral controller based on RBF (Radial Basis Function) neural network is designed for converter control. The control parameters can be changed in real time according to the dynamic identification results of HESS, which is beneficial to HESS power instruction tracking and DC side voltage stability. For the power distribution of wind power, the wavelet packet decomposition is adopted. Firstly, according to the principle of "Able men are always busy", the frequency division points are set according to the change of energy storage, and the power of high and low frequency is allocated flexibly, so as to make the energy storage space be utilized to a greater extent. Then, based on the characteristics of high energy density and long service life of VRB, auxiliary power support is given to SMES when charging or discharging power is insufficient, so as to help SMES quickly recover to the optimal state, which is conducive to smooth wind power fluctuations more fully. The simulative results on MATLAB/Simulink platform verify the advantages of the proposed method.

Key words: hybrid energy storage system; RBF neural network; SMES; VRB; alterable frequency division point; optimal state of charge; wind power grid-connection; wavelet packet decomposition

附录 A

关于 m 的选定，若所选风电波动大，为了平滑并网，自然小波包分解层数较多才能满足分解最后一层最低频分量达到并网波动率标准，根据分解结果数是分解层数的指数函数可知，分解结果数增大，分解结果子分量间频率划分会更为细致，相应地，分频点变化的跨度理应更大，因此设置 m 可灵活调整分频点范围。 m 为一个常数，本文仿真根据所选风电数据分解结果（即 6 层，32 个子分量），选取 $K_0=9$ ， m 分别为 0.5、0.8、1、1.2、1.5、2。根据仿真参数进行仿真，结果如图 A1 所示。

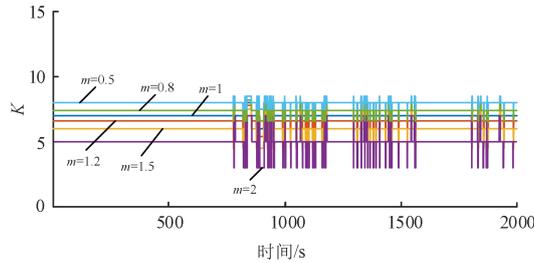


图 A1 不同 m 下的分频点

Fig.A1 K under different values of m

由图可以看出，在本文仿真设置情况下，当 $m>1$ 时，分频点 K 的范围过大，会使得 VRB 所分配平抑任务含高频分量过多或者 SMES 所分配平抑任务含低频分量过多，进而导致 VRB 充放电次数过多影响其使用寿命或者 SMES 容量不够；当 $m<1$ 时，分频点的范围过小，会使得分频点仅在某一点处上下调整，不能充分发挥可变分频点的设置作用。

在实际应用中，可根据不同分解情况灵活设置 m ，鉴于充放电优先级差值和分频点均为整数，当 m 不是整数时，可对 ΔK 作最小绝对值取整。

附录 B

表 B1 HESS 仿真参数

Table B1 Simulation parameters of HESS

参数		取值
RBF 神经网络	网络结构	3-6-1
	网络学习速率	0.25
	控制参数调整速率	$\eta_p=0.2, \eta_i=0.15$
	动量因子	0.05
SMES	额定容量/(kW·h)	0.5
	额定功率/kW	100
	磁体电感/H	40
	直流侧电压/V	1200
	直流侧电容/mF	4
VRB	额定容量/(kW·h)	16
	额定功率/kW	200
	单体电池串联个数	800

表 B2 HESS 的 SOC 分区设置

Table B2 SOC partition set of HESS

储能	$S_{SOC,min}$	$S_{SOC,down}$	$S_{SOC,up}$	$S_{SOC,max}$
SMES	0.20	0.35	0.65	0.80
VRB	0.30	0.40	0.60	0.70