

文章编号: 2095-2163(2023)05-0107-08

中图分类号: TM614

文献标志码: A

平滑风功率波动的储能配置及控制算法综述

王远路, 杨超

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 风速的不稳定性导致了风机发电功率的波动性, 需要将风功率波动平抑到限制要求内才能使风电安全并网, 本文针对现有研究关于配置储能来平抑风电出力的功率波动进行了文献综述。首先, 介绍了储能系统分类及各类储能的功率特性, 并基于不同时间尺度下的风功率平抑要求进行储能选型; 然后, 评述了平抑策略中的控制算法和能量管理方法, 详细分析了求取并网期望功率的几种重要控制算法及各自的关键参数; 最后, 梳理了储能系统的容量配置方法及涉及的求解算法。文末, 对容量配置和控制算法作了简要总结, 对研究方向进行了展望。

关键词: 功率波动; 储能选型; 控制算法; 容量配置

Review of energy storage configuration and control algorithms for smoothing wind power fluctuations

WANG Yuanlu, YANG Chao

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] The instability of wind speed leads to the fluctuation of wind power. Only when the fluctuation of wind power is reduced to the limit, can the wind power be connected to the grid safely. In this paper, the existing studies on the deployment of energy storage to smooth the power fluctuations of wind power output are reviewed. Firstly, the classification of energy storage system and the power characteristics of all kinds of energy storage are introduced, and the energy storage types are selected based on the requirements of wind power suppression at different time scales; Then, the control algorithms and energy management methods in the suppression strategy are reviewed, and the energy storage selection is carried out based on the requirements of wind power smoothness at different time scales; Finally, the capacity calculation methods of energy storage system and related solving algorithms are discussed. At the end of the paper, the capacity calculation methods and control algorithms are briefly summarized and the research direction is prospected.

[Key words] power fluctuation; energy storage selection; control algorithm; capacity configuration

0 引言

为实现“30·60”双碳目标, 中国将加快推进能源转型, 创建以新能源为主的新型电力系统^[1]。能源转型在生产端主要依靠大力发展风力和光伏等可再生能源逐步替代化石能源, 预计到2060年, 风力发电和太阳能发电的装机总量将由2020年的5.35亿千瓦增至40亿千瓦, 新能源发电占全国发电机组装机容量的比例则是由24.3%提升至50%以上^[2]; 在终端能源消费中则需要实现大范围的电能替代, 预计到2060年电能在中国的终端用能占比将由当前的28%提升至60%^[3]。与此同时, 2021年的美国

德州大停电事故警醒人们高渗透率的新能源接入会威胁电网的安全稳定^[4]。因为风速有着间歇性和不确定性, 而风电机组的输出功率为风速的3次幂函数, 导致风功率产生极强的波动性^[5]。风功率波动会造成电网频率偏差、波形畸变以及电压波动与闪变等问题, 因此需要采取措施将风功率波动调节到限制范围内才可安全并网。现有研究针对风功率波动的平抑策略主要有风电机组改进控制与储能系统辅助控制两类方法。文献[6-8]分别通过变桨控制、旋转动能控制及直流母线电压控制来对机组运行进行改进, 从而平抑风功率波动, 这些策略平抑风功率波动的同时却也牺牲了风能捕获效率, 属于低

作者简介: 王远路(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 风电场储能容量配置; 杨超(1971-), 女, 学士, 副教授, 主要研究方向: 配电网规划及电能质量管理。

通讯作者: 杨超 Email: 785622539@qq.com

收稿日期: 2022-06-17

风能利用型平抑策略;储能系统辅助控制通过控制储能设备双向吞吐电能达到平滑风电机组输出功率波动的目的,这种情况下风电场的实际并网功率为风机总输出功率和储能装置输出功率之和。由于储能辅助控制不影响风电机组本身的最大功率跟踪控制运行,称其为高风能利用型平抑策略^[9]。于是采用储能系统平滑风功率波动成为近年来研究的热点,本文从储能选型、控制算法和容量配置这三方面对相关文献进行了综述。

1 储能选型

针对不同装机容量规模的风电场,中国2021年最新颁布的《风电场接入电力系统技术规定》对风功率在1 min和10 min两个时间尺度下规定了功率波动限制。对于储能类型的选取,需分析该风电场的功率波动是更集中于短时间尺度(1 min以下)还是长时间尺度(数min到数10 min),再结合各类型储能的功率特性选择能够满足充放电要求的储能技术。

1.1 储能类型介绍

根据电能被转换为其它能量形式的不同,可以

表1 常见储能类型的功率特性指标

Tab. 1 Power characteristic indexes of common energy storage types

存储功能	储能类型	功率密度(W/l)	能量密度(Wh/l)	响应时间	容量范围(MWh)	循环次数
能量型储能	抽水蓄能	0.5~1.5	0.27~1.5	min	200~500	30~60 a
	压缩空气	0.5~2	30~60	s~min	200~1 000	~
	铅酸电池	10~400	50~100	ms	18~100	~
	锂电池	1 500~10 000	200~500	ms~s	0.25~25	1 000~10 000
	钠硫电池	140~180	200~350	ms~s	8~245	>2 000
	液流电池	0.5~25	20~70	ms	0.05~0.5	5~20 a
功率型储能	飞轮储能	5 000~15 000	20~80	ms~s	0.025~5	>20 000
	超级电容	15 000~50 000	10~30	1~20 ms	10 ⁻⁶ ~0.005	>100 000
	超导储能	1 000~5 000	0.2~6	1~5 ms	0.015~0.1	>100 000

1.2 短时间尺度的波动平抑

短时间尺度的风功率波动频率较快但是幅值较小,需要储能快速响应、频繁地充放电,多采用功率密度大、可循环次数多的功率型储能进行平抑。文献[16]把风功率波动对电网的影响模拟成了一单机对无穷大系统的功率振荡,超导磁储能装置补偿风功率的作用相当于抑制无穷大系统功率振荡的能力;文献[17]采用一种串并联型超级电容器储能系统平抑风力发电机组的有功功率波动,其设计的有功功率控制器的控制信号为来自储能设备接入点的有功功率偏差;文献[18]把多个飞轮储能单元并联在交流母线上组成飞轮储能阵列,利用该储能阵列实时补偿风功率中的高频分量来抑制风电场输出功

把储能技术分为电化学储能、电磁储能和物理储能3类^[10]。电化学储能常见的有铅酸蓄电池、锂离子电池、钠硫电池和液流电池等电池储能技术。电池储能便于根据需求灵活地配置功率容量。全球电池储能现有装机规模超16.3 GW,以8.5%的占比在所有储能的装机规模中居第二位,且其规模正爆发式提升中^[11]。当前,中国已经投入运行的抽水蓄电站超40座,总容量达639万kW^[12]。电磁储能包括超导磁储能和超级电容储能,都具有极快的响应速度和高循环次数。前者电能转换效率高、寿命长,但是超导材料高昂的成本制约了其大范围使用^[13];后者成本也比较大,但是由于其具有非常大的功率密度,所以广泛地用其平滑短时高频的功率波动。物理储能有抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能,前二者常用于长时间尺度的可再生能源存储、系统备用等,由于地理条件要求高和响应时间过长,这两种储能不适于平滑风功率波动。飞轮储能功率密度高、环保无污染,适合平滑高频风功率波动。另外,从功率特性角度可将储能分为功率型储能和能量型储能。综合文献[14~15]归纳出了反映储能功率特性的关键技术特征,见表1。

率的波动。

1.3 长时间尺度的波动平抑

长时间尺度的风功率波动幅值大但是变化比较平缓,需要容量大、能量密度高的能量型储能进行平抑,多采用各种类型的电池储能。文献[19]使用镍铬蓄电池储能系统来平滑风力柴油混合动力系统的有功功率输出;文献[20]选择造价低、可100%深度放电的钒氧化还原液流电池储能,建立了钒液流电池充放电的数学模型,对储能的功率控制是对AC/DC双向功率变换器的解耦控制实现的;文献[21]针对电池储能系统平滑风电输出的研究,设计了3种电池储能运行策略,综合考虑平滑效果及平抑成本,确定最优运行策略。

1.4 多时间尺度的波动平抑

要使平滑效果满足多时间尺度下的限制要求, 需要储能系统既能频繁充放电平滑高频波动分量, 又能具有较大容量平滑能量较大的低频波动分量。常采用能量型和功率型储能组合而成的混合储能系统 (HESS) 平抑多时间尺度下的风电场输出功率波动。HESS 能够低速和高速响应, 相较于单一储能 (ESS) 对风功率平抑具备更好的平滑性能^[22]。文献[23]建立了以蓄电池和飞轮储能组合成的 HESS, 采用集中式方法将其配备于风电场出口处平滑风电场输出功率; 文献[24]采用全钒液流电池和超级电容组成 HESS, 将 HESS 连接三电平直驱式同步风力发电机, 仿真验证了其平滑风电场出力波动的良好性能; 文献[25]采用锂离子电池和超级电容器组成 HESS 平滑风电输出, 仿真实验表明经该储能系统平抑后的风电输出满足 1 min 和 30 min 两个时间尺度的波动率限制要求。

2 控制算法

储能平滑风功率波动的简化流程如图 1 所示。 P_{wind} 为风电机组输出的原始风功率; P_{ref} 为风功率并网期望值, 是原始风功率中的稳定变化部分; ΔP_{ref} 为储能系统充放电期望值, 是原始风功率中的波动功率部分; ΔP 为储能系统的实际输出; P_{out} 为经过储能系统平抑之后的实际并网功率, 也称为风储联合系统的输出功率。

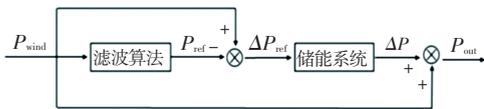


图 1 平滑风功率波动的简化流程

Fig. 1 Simplified process for smoothing wind power fluctuations

2.1 风电并网期望功率的获取

根据原始风功率分解出风电并网期望值, 本质是一种“滤波”, 可以采用多类型的滤波算法来求取。本文着重分析了一阶低通滤波法、小波变换和小波包分解以及模型预测控制。

2.1.1 一阶低通滤波

一阶低通滤波法的原理是原始风电功率经过一阶滤波环节即可得到并网期望功率, 如图 2 所示。关键在于滤波时间常数 T 的确定, 增大 T 能增强平抑效果, 使得并网期望功率更平滑, 但是也会增大储能容量配置, 反之亦然。该方法分为定时间常数 (定 T) 与变时间常数 (变 T) 两类。

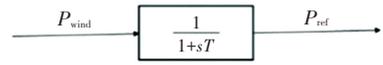


图 2 一阶低通滤波

Fig. 2 First order low pass filtering

2.1.1.1 定时间常数

文献[26]采用定 T 控制的一阶低通滤波器, 设计了同时考虑飞轮储能剩余容量和风功率平抑效果的优化控制; 文献[27]采用一阶滤波算法求取风电场并网功率期望值, 分析了基于不同 T 值下的风功率平滑效果; 文献[28]采用不同 T 值的两个一阶低通滤波器分别控制 HESS 中蓄电池组和超级电容器两类储能。定 T 方法在分解中存在响应延迟的问题, 对风功率特性的变化不敏感。所以定 T 的一阶滤波器很少采用, 更多需要采取各种方式实时调整 T 增强平滑效果。

2.1.1.2 变时间常数

文献[29]依据系统实测的储能电池 SOC 来实时分段分级地调整一阶低通滤波器的 T 。在文中的实验情景下, 定 T 控制下 SOC 的变化范围达 44% ~ 95%, 这一数值在变 T 控制下则为 19% ~ 84%; 文献[30]设计了一维云模型控制器, 实时调整一阶低通滤波器的 T , 在风功率的波动率较大时增加 T 的值, 快速增强储能的平抑能力, 在风功率的波动率变小时使 T 减小, 及时降低储能系统出力。

2.1.2 小波变换和小波包分解

小波变换可将连续信号分解成若干频率不同的子信号。其分解过程为: 把原始信号分解为低频部分的逼近信号和高频部分的细节信号, 之后每次分解总是只对低频部分进行类似分解。小波包分解可以在每层同时分解低频和高频部分分量, 其分解流程可以理解成是完全 2 叉树结构。两种分解过程的示意图如图 3 和图 4 所示, S 为原始风功率, 经两种方法分解后得到的风电并网期望功率都为 $S_{(3,0)}$ 。两种方法的关键点都在于确定最优分解层数和小波基的选择。

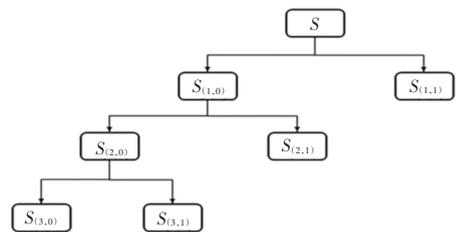


图 3 小波变换示意图

Fig. 3 Wavelet transform diagram

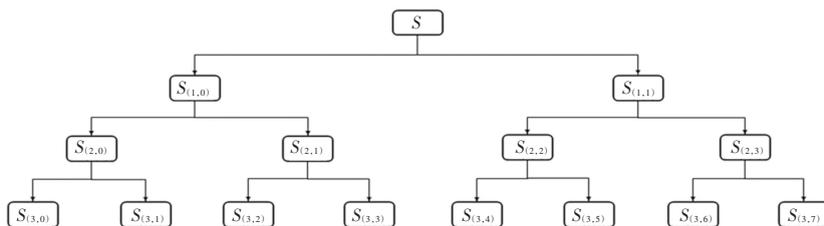


图4 小波包分解示意图

Fig. 4 Schematic diagram of wavelet packet decomposition

2.1.2.1 小波变换

文献[31]使用小波变换分解风电场输出功率信号,所需的风电并网期望功率为多次分解后得到的最低频信号,其余频次的则是需要储能系统平抑的波动功率部分;文献[32]提出了一种基于熵权法的多目标决策算法对小波基函数进行优化选择。首先,利用不同的小波基对原始风功率进行小波分解到最优层数,提出6种选择评价指标;其次,采用熵权法进行小波基优选;最后,选择计算速度与滤波效果都更好的DB6小波。

2.1.2.2 小波包分解

由于小波变换只对上一层分解后的低频信号进行分解,不能掌握高频部分的细节信息,尤其不利于储能分配时在高频部分寻找频率分界点。相较于小波变换,小波包分解则更精细,但是也增大了分解过程中的计算量。文献[33]采用DB9小波将风功率信号进行8层小波包分解,低频信号 $S_{(8,0)}$ 的幅值及变化情况接近原始风功率信号,将其作为并网功率期望值,剩下的幅值在0附近波动的高频信号则被接入储能系统进行平抑;文献[34]通过判断最后一层分解所得的最低频功率信号是否满足风电并网波动率限制标准来确定最优分解层数,当最低频信号不满足风电并网标准时则加深小波包分解层数;文献[35]选择了DB6小波对风电出力信号进行了6层小波包分解,由于高频部分的非平稳信号 $S_{(6,1)}$ 至 $S_{(6,63)}$ 能量低,无法用1阶和2阶常规统计量表征其特征,于是采用高阶统计量分析63个高频信号的特征值,再用支持向量机将这些高频信号分类交由HESS中两类储能分别平抑。

2.1.3 模型预测控制(MPC)

MPC的核心是滚动预测、预先控制:在当前时刻的状态 $x(k)$,根据当前时刻和未来 M 个时刻的约束求取未来 $k+1$ 到 $k+M$ 时刻的控制指令,然后把第 $k+1$ 时刻的指令值应用于控制系统,在下一时刻更新状态 $x(k+1)$,重复该过程。MPC求取风电并网期望功率是最优控制与现实工况中不确定性的折

中策略,所得输出可能不是全局最优解,但是在多变的工程环境中MPC求得的次优解,相比限制理想条件下的最优解能更好地实现实时控制。

文献[36]应用MPC算法平滑风功率,建立了如式(1)和式(2)的状态空间模型。

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -T_c \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} r(k) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, T_c 为储能系统控制周期;扰动变量 r 为原始风功率 P_{wind} ;控制变量 u 为储能系统充放电功率 P_{es} 。

将储能荷电状态 SOC_{es} 和风电并网功率 P_g 作为状态变量。为了实现状态更新及反馈,输出变量也设定为 SOC_{es} 和 P_g 。

考虑 P_{es} 和 SOC_{es} 的约束限制以及 P_g 波动率限制,求解出控制指令 $u(k)$ 、 $u(k+1)$ 、 \dots 、 $u(k+M)$ 。

文献[37]提出了一种基于MPC的电池储能系统,对风功率波动进行实时平抑。对于MPC控制器的输入由当前时刻的原始风功率信号、被储能平抑后的风功率历史数据和当前时刻储能荷电状态3个量组成,输出为期望并网风功率;文献[38]针对并网风电功率波动越限的问题,提出了采用MPC控制的HESS消纳波动功率。采用基于ELM风功率预测的方法由风速信息预测出前瞻周期内的风电场原始功率预测值。由于MPC控制在整个前瞻控制时段内考虑了未来时间段的风速,所以这是一种超前控制。

2.1.4 其它控制算法

除了以上控制算法,还有卡尔曼滤波、经验模态分解、变分模态分解、滑动平均滤波和加权移动平均滤波等方法。

卡尔曼滤波(KF)能很好地解决传统低通滤波

器的时延问题,文献[39]提出了一种 Takagi-sugeno 型模糊逻辑辅助的卡尔曼滤波算法(FKF)来平滑瞬时功率波动。经验模态分解(EMD)可以将一段完整的风功率信号分解成若干固有模态函数,文献[40]采用 EMD 将原始风功率分解,提取平稳的并网期望功率。变分模态分解(VMD)可以把功率信号分解成一系列频率由低到高的子模态,相较于 EMD,VMD 可以一定程度上解决分解过程中的模态混叠现象和特征频率不清的问题,文献[41]结合自适应滑动平均滤波和 VMD,实现风功率平抑。滑动平均滤波是求取 t 时刻附近 N 个时段的实测风功率作为 t 时刻的期望并网功率,文献[42]取 N 为 30 min,求得风电目标出力,并设计了一种基于蒙特卡洛模拟的 BESS 运行策略。加权移动平均法是对每个时刻的风电出力和移动平均项数 N 都配置权重, t 时刻的风电并网期望功率为 t 时刻前 $N - 1$ 个时刻的实测风功率的加权平均值,文献[43]采用基于加权移动平均滤波算法的储能系统平滑策略,实时调整权重系数和滤波带宽 N ,可以很好地解决风功率的骤变问题。

2.2 储能系统的能量管理

2.2.1 储能初始功率分配

将原始风功率与并网期望功率作差即可得到高频波动功率,即储能系统的期望充放电功率。对储能系统内部的功率分配,分单储能系统和混合储能系统。单储能系统重在研究各储能单元的分配策略;混合储能系统则需要将高频波动功率继续分解后再根据频率特性分配给不同类型的储能进行平抑,再分解的过程重点在于寻找合适的分频点。

2.2.1.1 单储能系统功率分配

文献[44]提出了一种对电池储能系统中各储能单元进行实时功率分配的方法,首先根据各储能单元 SOC 占比分配初始功率,再根据各储能单元初始 SOC 进行功率修正,使得 SOC 趋同;文献[45]中储能装置由多个参数相同的飞轮储能单元并联构成,设计了主从控制模式的充放电控制方法,对各储能单元按比例分配充放电功率。

2.2.1.2 HESS 功率分配

文献[46]采用频谱分析的方法分解储能系统参考功率,实现功率分配。对原始风功率进行滑动平均滤波后,得到的波动功率进行傅里叶变换,得到各分量的频率和幅值,考虑年均综合成本最小为目标函数确定分频点,通过分频点将波动功率划分成两个补偿频段。结合储能类型的功率特性,高频功率波动被超级电容器平抑,低频功率波动被蓄电

池平抑;文献[47]采用 VMD 将波动功率分解为多个单分量信号,通过 Hilbert 变换得到波动功率的时频谱,对时间积分计算得到各分量信号的边际谱,通过边际谱就可以找到分频点,将波动信号分成高频信号和低频信号。

2.2.2 能量状态反馈控制

实际运行过程中要避免储能过充过放,因此需要制定恰当的策略将储能的能量状态(SOC)反馈到功率分配环节,也就是要对初始功率分配实时调整。能量状态反馈控制保证了储能平抑波动,控制长期运行的有效性,可以延长储能的循环使用周期。

由于超级电容的剩余容量正比于其端电压,于是文献[48]用超级电容的端电压来表征其剩余容量,通过对超级电容端电压的预先控制,结合端电压与充放电状态变化修正超级电容和电池的充放电功率。在能量状态反馈控制中最常使用的方法是模糊控制,文献[49]利用 VMD 将储能系统总功率分配给两种储能设备,再考虑两种储能的 SOC,引入模糊控制的方法实时调整超级电容和电池的输入输出功率,仿真显示该方法可以防止储能 SOC 越限,延长储能电池的使用寿命;文献[50]设计了基于模糊控制的反馈机制,实时调节低通滤波器的时间常数 T ,使得储能电池平滑风功率波动的同时也时刻保持其 SOC 处于最优范围,所设计的模糊控制器输入为电池 SOC 和风机的输出功率变化值 ΔP ,输出为 T 。

3 容量配置

储能容量配置过小不能保证风机输出功率的波动率被平滑到并网限制要求以内,而鉴于经济成本又不能随意配置容量很大的储能系统,所以容量配置的目的是以尽量小的储能容量达到风功率波动平抑要求。常见的储能容量配置方法有理论计算法、仿真分析法和模型优化法。

3.1 理论计算法

文献[51]通过离散小波分解风功率波动信号,将其分解成高、中、低 3 个频段分别配置储能平抑。分别选择补偿各频段波动功率的储能额定功率为周期内的补偿功率最大值,考虑充放电效率以及 SOC 限制,计算补充高、中、低频波动功率所需的储能额定容量。文献[52]寻找频率分界点划分高频的风功率波动部分,采用蓄电池和超级电容器分别消纳,划分得出的次高频和最高频波动功率。利用 Matlab 工具箱中的高斯逼近法拟合两种储能的功率概率密度函数,求解储能的容量配置。

3.2 仿真分析法

文献[53]中设定 BESS 的容量和功率都超额配置,接着输入模拟各种工况的典型风功率信号,使得被 BESS 平滑后的风功率符合并网要求,长周期仿真并记录数据;最后基于仿真数据确定 BESS 的额定功率和容量。文献[54]给出了在确定光照及风速的情况下计算 HESS 中两种储能的功率及容量配置的子算法,利用蒙特卡洛模拟法随机产生多场景仿真所需的若干组光照强度和风速数据,仿真统计分析了 HESS 在不同累积概率水平下的容量配置。

3.3 模型优化法

文献[55]通过模型优化法求解储能容量配置,以储能系统成本最小为目标函数,约束条件则为平滑后的波动分量方差和绝对值均值限制、储能充放电时间和次数限制等;采用映射于 Bloch 球面的量子遗传算法得到包含 4 个变量的最优解:超级电容的功率、容量和电池的功率、容量。由于在建模时仅以储能投入成本最小为目标,比较片面。文献[56]则提出以设备的全寿命周期成本(LCC)最小为目标函数,LCC 是指储能系统在整个寿命周期内耗用的总成本,包括购置成本、运维成本和处置成本。在约束条件的设定上特别提出了一个负荷缺电率限值要求,以保证独立风光发电系统的供电可靠性,最后采用改进粒子群算法求解优化问题。文献[57]在储能容量配置的过程中加入了储能选型环节,比较了 9 种 HESS 组合方案的储能综合成本,选取综合成本最低的储能组合。构建了以综合成本最低为目标函数的优化模型,采用粒子群算法求解出储能系统的最优容量配置。

综上,理论算法从技术理论层面计算出储能配置容量,但是理论推导过程比较困难,而且既没考虑实际运行中的工况变化也没考虑所配置储能系统的经济效益。仿真分析法基于大量的历史运行数据制定控制方案并且仿真验证,该方法配置的储能可以满足各种不确定性场景中风功率波动平抑的功能性要求,但是依旧没考虑经济效益。模型优化法全面分析了储能系统的经济性,针对不同侧重目标建立求解模型,层次清晰、更符合实际工程需求,但是难点在于对模型的求解非常依赖智能算法的优劣性,特别是多目标函数的模型难以求解。

4 结束语

4.1 总结

储能选型是基础,重在考虑功率特性是否满足

平抑要求;控制算法是关键,主要兼顾平滑效果和保护储能系统长期运行;容量配置将多采用模型优化法,综合考虑平抑要求和经济性甚至能实现多目标的要求。由于储能配置的各个环节存在关联性,通过分析现有文献研究,本文总结性提出了一种系统性地针对平抑风功率波动的储能配置方法流程,如图 5 所示。

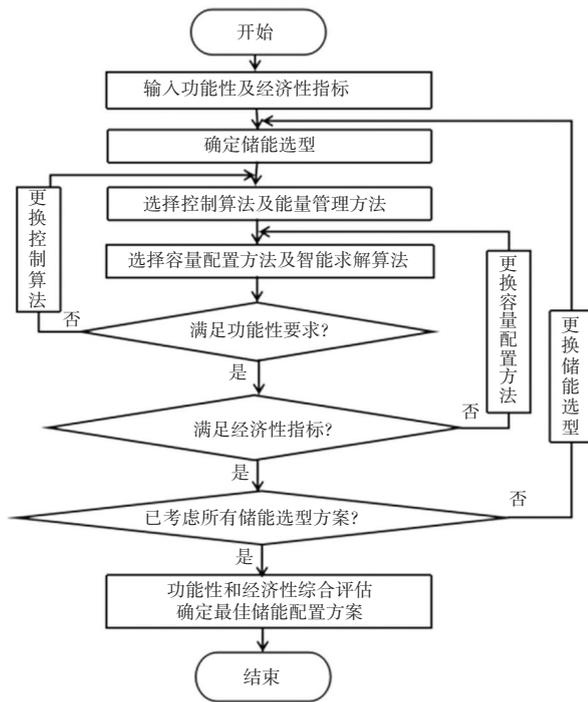


图 5 平滑风功率波动的储能配置流程

Fig. 5 Energy storage configuration process of smooth wind power fluctuations

4.2 展望

随着新能源渗透率的提高,风功率平抑更多需要满足多时间尺度下的波动率限制要求,且工程实际中的多项技术经济指标单储能系统难以全部满足,所以由能量型和功率型储能组合成的 HESS 将会得到越来越广泛的应用。HESS 能够充分利用功率性能互补的两类储能技术各自的优势,保护储能系统延长其使用寿命、达到更好的平滑效果和节省储能成本。

风电场储能容量配置的现有研究大多专注于较为单一的应用功能,很少有面对综合多种应用目标的储能系统研究。实际上储能在新能源发电侧可以承担多种辅助功能,比如快速调频、新能源出力计划跟踪、谐波谐振抑制等等,有必要加强对多目标集成的风储系统的协调管理控制和容量配置研究,以满足风储系统多时间尺度和多需求下的功率平衡,提升其经济性和稳定性。

参考文献

- [1] 舒印彪. 发展新型电力系统 助力实现“双碳”目标[J]. 中国电力企业管理, 2021, 1(7): 8-9.
- [2] 孔力, 裴玮, 饶建业, 等. 建设新型电力系统促进实现碳中和[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 522-528.
- [3] 国网能源研究院. 中国能源电力发展展望[EB/OL]: (2021-12-08) [2022-02-08] <https://power.in-en.com/html/power-2400568.shtml>.
- [4] 王伟胜. 美国德州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4033-4043.
- [5] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [6] 廖勇, 何金波, 姚骏, 等. 基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 71-77.
- [7] ABEDINI A, MANDIC G, NASIRI A. Wind power smoothing using rotor inertia aimed at reducing grid susceptibility [J]. International journal of power electronics, 2008, 1(2): 227-247.
- [8] UEHARA A, PRATAP A, GOYA T, et al. A coordinated control method to smooth wind power fluctuations of a PMSG-Based WECS [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2): 550-558.
- [9] 邢小文, 孟洪民, 谢利理. 大惯量风力发电系统功率波动平抑控制策略综述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(1): 31-38.
- [10] 孙玉树, 杨敏, 师长立, 等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 80-89.
- [11] Adna Z. Amin. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030[EB/OL]. International Renewable Energy Agency (IRENA): October 2017, <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricitystorage-and-renewables-costs-and-markets>.
- [12] 韩冬, 赵增海, 严秉忠, 等. 2021 年中国抽水蓄能发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(5): 1-4, 104.
- [13] 管俊, 高赐威. 储能技术在抑制风电场功率波动方面的研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(4): 48-53.
- [14] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12 [2022-06-16].
- [15] 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, 369.
- [16] 崔林, 文劭宇, 程时杰. 超导磁储能系统抑制风力发电功率波动的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2008(1): 24-30.
- [17] 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(4): 1-4.
- [18] 陈玉龙, 武鑫, 滕伟, 等. 用于风电功率平抑的飞轮储能阵列功率协调控制策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 600-608.
- [19] SEBASTIAN R, ALZOLA R. Effective active power control of a high penetration wind diesel system with a Ni Cd battery energy storage [J]. Renewable Energy, 2010, 35(5): 952-965.
- [20] 李国杰, 唐志伟, 聂宏展, 等. 钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 115-119, 125.
- [21] 张新松, 袁越, 郑源, 等. 用于风功率波动平抑的储能运行策略对比分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2797-2805.
- [22] 乔亮波, 张晓虎, 孙现众, 等. 电池-超级电容器混合储能系统研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 98-106.
- [23] 迟英新, 赵志刚, 徐洪伟, 等. 风电系统中飞轮和蓄电池混合储能的控制策略[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2022, 18(1): 12-19.
- [24] 任永峰, 胡宏彬, 薛宇, 等. 全钒液流电池-超级电容混合储能平抑直驱式风电功率波动研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2127-2134.
- [25] JIANG Q Y, HONG H S. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.
- [26] BINGCHANG N, SOURKOUNIS C. Control strategies for energy storage to smooth power fluctuations of wind parks [C]// MELECON. 2010-2010. 15th. IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. 2010: 973-978.
- [27] PAATERO J V, LUND P D. Effect of energy storage on variations in wind power [J]. Wind Energy, 2005, 8(4): 421-441.
- [28] JIA H, FU Y, ZHANG Y, et al. Design of hybrid energy storage control system for wind farms based on flow battery and electric double-layer capacitor [M]. Power and Energy. Engineering. Conference (APPEEC), 2010. Asia-Pacific. 2010: 1-6.
- [29] 谢俊文, 陆继明, 毛承雄, 等. 基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 96-102.
- [30] 江水明. 平抑风电功率储能装置控制策略研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [31] 李捷, 杨霖. 基于小波变换与机会约束规划的风电储能容量配置[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(2): 37-42.
- [32] 洪海生. 应用于平抑风电功率波动的多类型储能系统容量配置与协调控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [33] 韩晓娟, 陈跃燕, 张浩, 等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 8-13, 24.
- [34] 吴杰, 丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 7-12.
- [35] 陈洁, 詹仲强. 高阶统计量与小波包分解在风氢混合储能系统中的应用[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3286-3294.
- [36] 孙玉树, 张国伟, 唐西胜, 等. 风电功率波动平抑下的 MPC 双储能控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 571-578.
- [37] 洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平抑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 103-109.
- [38] 孙近文. 大中型风电场混合储能系统优化配置及先进控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [39] LI X. Fuzzy adaptive Kalman filter for wind power output smoothing with battery energy storage system [J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(5): 340-347.
- [40] 孙承晨, 袁越, San Shing CHOI, 等. 基于经验模态分解和神经网络的微网混合储能容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 19-26.
- [41] 焦东东, 陈洁, 方圆, 等. 基于变分模态分解下利用混合储能平抑风电出力波动的控制策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 14-19, 30.
- [42] 张新松, 顾菊平, 袁越, 等. 基于电池储能系统的风功率波动平抑策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4752-4760.
- [43] 丁明, 吴建锋, 朱承治, 等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 22-29.