

考虑置信水平的混合储能平抑风电波动

马 瑞, 李 浩, 吴震宇

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:针对储能平抑风电成本过高的问题,提出一种考虑置信水平的混合储能平抑风电波动新方法。首先对比在不同时间常数下混合储能对典型日风电出力波动的平抑效果,得到储能参考功率,采用经验模态分解(EMD)将储能参考功率分解成一系列本征模态函数(IMF);然后利用瞬时频率—时间曲线混叠最少将储能参考功率划分为功率型高频储能配置和能量型低频储能配置,基于储能成本对其进行合理选型;最后对湖南某风电场实际运行工况进行算例仿真,仿真结果表明:考虑置信水平后,储能平抑风电波动所需要的容量和功率明显降低。

关 键 词:置信水平;混合储能系统;平抑风电;经验模态分解;储能配置

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.004 中图分类号:TM614 文章编号:1673-9140(2022)01-0035-06

Wind power fluctuations suppression with hybrid energy storage considering the confidence level

MA Rui, LI Hao, WU Zhenyu

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: For the purpose to reduce the cost on energy storage for smoothing wind power fluctuation, this paper proposes a new method which selects a hybrid energy storage with certain confidence level to smooth wind power fluctuations. Firstly, comparing the smoothing effect of mixed energy storage for the fluctuation of typical daily wind power output with different time constants, and the reference power of energy storage is obtained. Then, the empirical mode decomposition (EMD) is utilized to decompose the energy storage reference power into a series of intrinsic mode function (IMF). According to the least alias in the instantaneous frequency-time curve, the energy storage reference power is divided into a power type high-frequency energy storage configuration and an energy-type low-frequency energy storage configuration. A reasonable energy storage type is then chosen based on energy storage cost on this basis. Finally, the actual operation condition of a wind farm in Hunan is simulated. It shown that the capacity and power required for energy storage to smooth wind power fluctuations is significantly reduced after considering the confidence level.

Key words: confidence level; hybrid energy storage system; smoothing wind power; empirical mode decomposition; energy storage configuration

自 21 世纪以来,能源问题已经成为世界性的难题。随着越来越多的新能源被发现,传统能源枯竭的问题有望得到解决,但是新能源发电由于其出力

的间歇性和随机性,很难直接被电网利用,加入储能装置能有效地解决这一问题^[1-2]。

目前,储能参与风电等新能源的消纳场景日益

增多,其运行原理主要有差额补充、波动平抑分析和经济特性优化(即经济性评估)这3大类。文献[3]根据入网风电和储能系统时间与空间上的相关特性以及风火储联动协调,构建了考虑风储系统功率传递与能量时空多维度输移特性、储能系统能量周期性循环与功率能量转移守恒规律、风火储系统互动耦合特征影响并兼顾其功率调节与能量输移双重效用的容量多指标优化配置数学模型;文献[4]中的储能配置方法将储能运行的动作时机和动作深度作为边界条件;文献[5]通过讨论电池储能(battery energy storage system, BESS)参与电网一、二次调频的实现方法,提出了与火电机组具备同等调频能力的 BESS 优化配置方法;文献[6]提出了一种滑动平均与经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)共同参与的混合储能(hybrid energy storage system, HESS)功率和容量配置方法,并且考虑了全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)以及风电场的经济效益,通过净效益最高寻求最优的储能配置;文献[7]提出了一种利用 HESS 缓解短期和长期波动的风电过滤方法,并通过基于小波变换方法进行混合储能的优化配置;文献[8]利用多场景随机规划与序贯蒙特卡洛模拟方法对风电场内储能系统优化配置,并考虑了储能寿命损耗。

以上文献在风电波动平抑周期内对风电波动率明显偏高的单一时刻也进行了相应储能配置,极大地浪费了储能设备投资。基于此,本文提出一种考虑置信水平的混合储能平抑风电波动新方法。首先对比在不同时间常数下混合储能对典型日风电出力波动的平抑效果,得到储能参考功率;然后采用 EMD 将储能参考功率分解成一系列本征模态函数(intrinsic mode function, IMF),利用瞬时频率—时间曲线混叠最少将储能参考功率划分为功率型高频储能配置和能量型低频储能配置,基于储能成本对其进行合理选型;最后对湖南某地风电场实际数据进行算例仿真。仿真结果表明:考虑置信水平后,储能平抑风电波动所需要的容量和功率明显降低。

1 考虑风电波动率置信水平的出力平抑方法

本文通过低通滤波方法进行风电波动平抑,将风电出力的低频分量注入电网,其原理如图 1 所示。

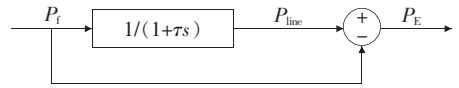


图 1 一阶低通滤波

Figure 1 First-order low-pass filtering

并网功率为

$$P_{\text{line}} = \frac{1}{1 + \tau s} P_f \quad (1)$$

式中 τ 为时间常数; P_f 为风电的输出功率。

将式(1)离散化处理,一个模拟周期时长为 Δt , 当模拟时段为 $t_k = k \Delta t$ 时^[12], 并网联络线第 k 时刻功率为

$$P_{\text{line}(k)} = \frac{\tau}{\Delta t + \tau} P_{\text{line}(k-1)} + \frac{\Delta t}{\Delta t + \tau} P_{f(k)} \quad (2)$$

式中 $P_{f(k)}$ 为风电第 k 时刻的输出功率; $P_{\text{line}(k-1)}$ 为并网联络线第 $k-1$ 时刻功率。

由式(2)分析可知,当前时刻的并网功率受到通过前一时刻的并网功率和当前时刻的风电功率共同影响,但相邻时刻间的并网功率又存在一定相似之处,从而达到平滑并网功率,保障电能质量的作用。

传统风电波动率是风电出力曲线波动率全部小于设定值,而对于不同置信水平下风电波动率则以不同的概率小于功率波动率设定值。其中概率定义为

$$p = \frac{N_x}{N} \times 100\% \quad (3)$$

式中 p 为置信水平数值; N_x 为平抑周期内波动率小于设定值的时段个数; N 为平抑周期内的时段数。

2 考虑置信水平的储能功率配置方法

2.1 考虑置信水平的储能参考功率求取

风电出力的低频部分直接供给电网,高频部分由储能吸收或释放,则 k 时刻的储能补偿功率为

$$P_{E0(k)} = P_{f(k)} - P_{\text{line}(k)} = \frac{\tau}{\Delta t + \tau} (P_{f(k)} - P_{\text{line}(k-1)}) \quad (4)$$

式(4)为储能功率求取方程,以储能放电功率为负,充电功率为正,不同置信水平下的功率求取是通过改变时间常数 τ 实现的,如何选取合适的 τ 成了关键。

2.2 混合储能系统功率分配

本文通过 EMD 分解储能功率需求,根据频率一时间曲线中相邻 IMF 的模态混叠最少进行分配^[6]。将产生的高、低频信号分量分别作为功率型、能量型储能的参考功率,即

$$P_h = \sum_{i=1}^j I_{MF_i} \quad (5)$$

$$P_l = \sum_{i=j+1}^n I_{MF_i} \quad (6)$$

式中 P_h 为高频部分,作为功率型储能的参考部分; P_l 为低频部分,作为能量型储能的参考部分; j 为 $1 \sim n$ 的正整数。

2.3 储能周期电量平衡

由于本文是根据典型日为依据进行一天的储能配置,一个周期内储能的初始状态必须一致,所以在一天之内储能充电与放电电量之和必须为零,又由于储能电量 $E = P \cdot T$,即求一天之内功率之和为零。

$$\Delta P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_{E_0}(k) \quad (7)$$

$$P'_E(k) = P_{E_0}(k) - \Delta P \quad (8)$$

$$P'_{line}(k) = P_{line}(k) + \Delta P \quad (9)$$

式中 ΔP 为储能功率平移量; $P'_E(k)$ 为第 k 时刻储能修正功率; $P'_{line}(k)$ 为第 k 时刻联络线修正功率。其中, $k = 1, 2, \dots, N$ 。

则储能修正功率为

$$P'_{EN} = \max [P'_E(k)] \quad (10)$$

3 考虑风电波动率置信水平的储能容量配置方法

3.1 充放电量计算

由风电波动率不同置信水平下的参考功率求取储能的充放电电量,即

$$E[k] = \sum_0^N P'_E[k] \cdot \frac{T_s}{3600}, k = 0, 1, \dots, N \quad (11)$$

式(11)中除以 3600 是将时间换算成小时,从而使得到的电量单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

3.2 额定容量计算

储能系统剩余的能量不断变化,一般通过系统的荷电状态来表示系统剩余能量水平,荷电状态

(state of charge, SOC)计算方法为

$$S = S_0 + \frac{E[n]}{E_N} \quad (12)$$

式中 S 为储能系统实时荷电状态; S_0 为储能系统初始荷电状态; E_N 为储能系统额定容量。充电时,系统增加能量, $E[n]$ 为正,剩余能量增多, SOC 增大;放电时,系统能量减少, $E[n]$ 为负,剩余能量减小, SOC 降低。

设储能系统荷电状态最大和最小允许值分别为 S_{\max} 和 S_{\min} , 则

$$S_{\max} - S_0 \leq \frac{\max\{E[n]\}}{E_N} \quad (13)$$

$$S_0 - S_{\min} \geq \frac{\min\{E[n]\}}{E_N} \quad (14)$$

取满足以上条件的最小 E_N , 求得:

$$E_N = \frac{\max\{E[n]\}}{S_{\max} - S_0} \quad (15)$$

$$E_N = \frac{\min\{E[n]\}}{S_0 - S_{\min}} \quad (16)$$

求解可得:

$$E_N = \frac{\max\{E[n]\} + |\min\{E[n]\}|}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (17)$$

3.3 初始状态确定

通过将式(13)、(14)中右侧相等,即可求得初始荷电状态为

$$S_0 = \frac{\min\{E[n]\} S_{\max} - \max\{E[n]\} S_{\min}}{\min\{E[n]\} - \max\{E[n]\}} \quad (18)$$

通过储能参考功率值能够将储能能量变化的正向最大值与负向最大值求出,从而确定储能系统 SOC 的边界范围,通过 SOC 的边界范围能够得到储能的最小额定容量,进而求得储能初始状态。将储能系统调整在该初值状态,即可满足整个周期内的储能系统充放电需求。

4 混合储能选型模型

本文利用费用现值法,假定储能系统总寿命期为 Y_r a, 基准折现率为 I , 储能元件更新置换次数为 n , 建立储能的全寿命周期成本模型。

1) 初始投资成本。

$$C_1 = \frac{I(1+I)^{Y_r}}{(1+I)^{Y_r} - 1} (C_{ps} P'_E + C_{es} E_N) \quad (19)$$

式中 C_{ps} 为单位储能功率成本; C_{es} 为单位储能容量成本。

2)更新替换成本。

$$C_2 =$$

$$\sum_{k=1}^n \frac{I(1+I)^{Y_r}}{(1+I)^{Y_r} - 1} (C_{rep} P'_E + C_{rec} E_N) \quad (20)$$

式中 $C_{rep}(k)$ 为储能更新替换单位功率成本;

$C_{rec}(k)$ 为储能更新替换单位容量成本。

3)辅助设备成本。

$$C_3 = \frac{I(1+I)^{Y_r}}{(1+I)^{Y_r} - 1} (C_{bop} P'_E + C_{boe} E_N) \quad (21)$$

式中 C_{bop} 为储能单位功率的辅助设备成本; C_{boe}

为储能单位功率的辅助设备成本。

4)运行维护成本。

$$C_4 = \frac{I(1+I)^{Y_r}}{(1+I)^{Y_r} - 1} (C_{omp} P'_E + C_{ome} E_N) \quad (22)$$

式中 C_{omp} 为单位储能功率运行维护成本; C_{ome} 为

单位储能功率运行维护成本。

5)设备回收价值。

$$C_5 = \alpha \frac{I(1+I)^{Y_r}}{(1+I)^{Y_r} - 1} (C_1 + C_2 + C_3) \quad (23)$$

式中 α 为回收利益系数,在 3%~5%之间。

综上,全寿命周期成本为

$$C_{LCC} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 - C_5 \quad (24)$$

5 算例分析

仿真使用的数据为湖南某风电场数据,A 风电场工程建设规模为 50 MW,安装 25 台单机容量为 2 MW 的风电机组,取 2016 年某日 96 点风电出力数据进行分析,本文规定波动率平抑标准为 30 min 波动率低于 10%,未平抑之前最大波动率达到了 59%。低通滤波的关键是寻找到合适的时间常数 τ ,本文通过对典型日风电出力进行傅立叶频谱分析来寻找最优时间常数 τ ,所得典型日频谱曲线如图 2 所示。由图 2 可知,A 风电场典型日风电出力的频率变化主要集中在 $1.16 \times 10^{-5} \sim 5.67 \times 10^{-4}$ 。

根据风电场典型日出力频谱,从低频到高频依次选取几组时间常数,不同时间常数下风电出力平抑效果相差明显,如图 3 所示。由图 3 可知,当截止

频率为 1/39 000 Hz 时,风电波动率达到规定要求。图 3 中不同截止频率下的波动率如表 1 所示。由表 1 可知,当时间常数为 103.45 min 时,波动率才能够满足要求,此时由程序求得储能修正后的参考功率为 26.65 MW,其 EMD 分解波形如图 4 所示。

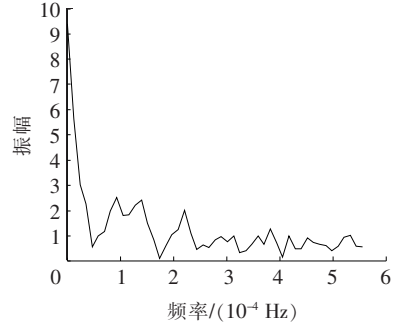


图 2 A 风电场典型日风电出力频谱

Figure 2 A wind farm typical wind power output spectrum

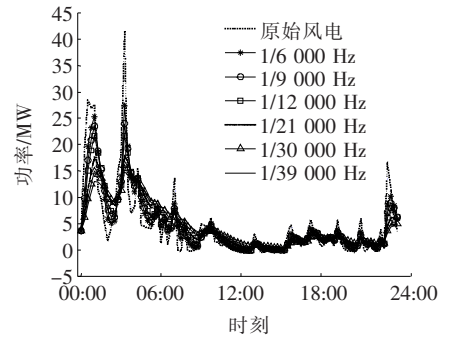


图 3 不同截止频率下的入网功率

Figure 3 Different cut-off frequencies into the network power

表 1 不同截止频率下的波动率

Table 1 Time constants and volatility at different cut-off frequencies

频率 f /Hz	时间常数 τ /min	波动率
1/6 000	15.91	0.321 0
1/9 000	23.87	0.267 6
1/12 000	31.83	0.228 9
1/21 000	55.70	0.158 9
1/30 000	79.58	0.121 5
1/39 000	103.45	0.983 0

I_{MF} 瞬时频率—时间曲线如图 5 所示,由图 5 可知, I_{MF3} 与 I_{MF4} 几乎没有重合部分,因此将 I_{MF1} 到 I_{MF3} 分为高频部分功率型储能参考功率, I_{MF4} 到 I_{MF6} 为低频部分能量型储能参考功率。

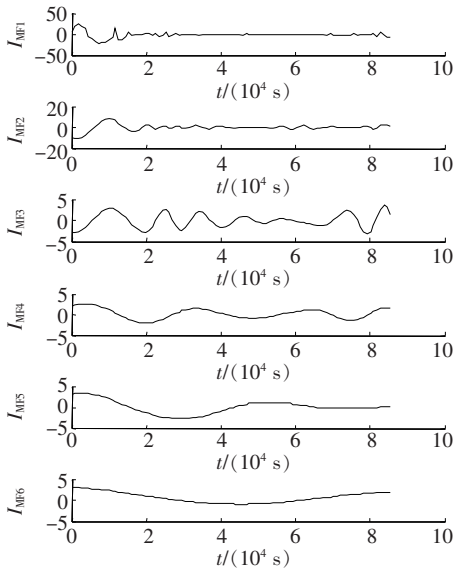


图 4 全部 I_{MF} 曲线

Figure 4 All I_{MF} curves

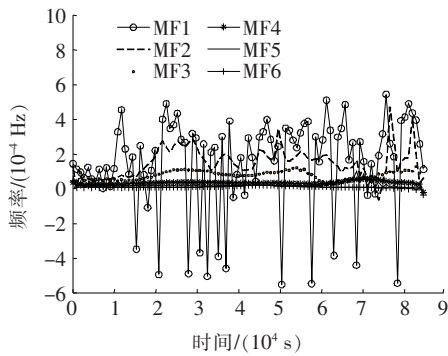


图 5 IMF 瞬时频率—时间曲线

Figure 5 IMF instantaneous frequency-time curve

从以上分析中难以分辨哪一种储能配置更加合理,因此本文提出了 4 种配置方案:配置 1,锂离子电池单独运行;配置 2,锂离子电池与超级电容器共同运行;配置 3,锂离子电池和超导磁共同运行;配置 4,锂离子电池与飞轮储能共同运行。配置方案的功率与容量分布情况如表 2 所示。为验证哪一种配置方案更加合理,可以通过其成本之间的差异进行选取,储能全周期寿命为 10 a。将其带入混合储能选型模型,所得的成本情况如表 3 所示。

由表 3 可知,4 种储能方式中锂离子电池与超级电容器的组合成本最低,所以本文采用锂离子电池与超级电容器的混合储能方式。其中,锂离子电池作为能量型储能系统,超级电容器作为功率型储能系统。同理可以求得不同置信水平下的混合储能功率和容量如表 4 所示。

表 2 不同配置方式下储能功率与容量

Table 2 Energy storage power and capacity under different configurations mode

配置	功率/kW	容量/(kW·h)	初始 SOC
1	23.98	41.87	0.48
2	7.95	32.85	0.15
	21.57	41.61	0.73
3	7.95	32.85	0.15
	22.25	39.03	0.72
4	7.95	32.85	0.15
	21.57	41.61	0.73

表 3 不同配置方式下的储能成本

Table 3 Energy storage cost under

different configurations		亿元	
配置	成本	配置	成本
1	1.746 5	3	3.419 7
2	1.174 9	4	1.887 4

表 4 不同置信水平下储能功率和容量

Table 4 Energy power and capacity at different confidence levels

置信水平/%	类型	功率/MW	容量/(MW·h)	初始 SOC
84.38	能量	1.61	8.30	0.150 0
	功率	13.25	16.83	0.648 5
87.50	能量	3.92	12.18	0.150 0
	功率	14.51	25.29	0.652 6
90.63	能量	2.21	13.27	0.150 0
	功率	17.96	26.57	0.645 4
93.75	能量	5.97	26.95	0.150 0
	功率	18.77	36.05	0.733 3
96.88	能量	7.09	28.86	0.150 0
	功率	20.84	40.46	0.736 1
100.00	能量	7.95	32.85	0.150 0
	功率	21.57	41.62	0.732 8

由表 4 可知,在不同置信水平下,能量型储能系统的初始 SOC 均为 0.15,是由于能量型储能在周期内最小充电电量为 0,由式(18)可知其值不变。功率型储能系统的初始 SOC 也变化不大,置信水平在 84.38%、87.50%和 90.63%时都趋于 0.65 变化;置信水平在 93.75%、96.88%和 100%时都趋于

0.73。整体而言,能量型储能初始 SOC 相对较低,功率型储能初始 SOC 相对较高。储能功率与容量基本都是随着置信水平的增大而增大,仅当置信水平从 87.50%变化到 90.63%时,能量型储能系统功率有所降低,这与混合储能功率分配有关。

6 结语

本文在研究混合储能平抑风电的过程中考虑了置信水平,从而得出以下结论。

1)通过幅频特性曲线选择截止频率能够在相同储能配置下使风电更为平滑。

2)适当的减小置信水平可以降低储能配置的容量和功率。

3)依据储能成本进行储能选型可使储能配置更加经济,更加客观。

考虑置信水平的混合储能平抑风电波动能以实现较小的投资成本获得最大化的平滑效果,为今后储能参与新能源消纳提出了新的解决思路,具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 邵宁,张慧媛,王子琪,等. 区域电网分布式储能选址定容规划[J]. 高压电器,2020,56(8):52-58.
GAO Ning,ZHANG Huiyuan,WANG Ziqi,et al. Planning for site selection and capacity determination of distributed energy storage in regional power grid[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(8):52-58.
- [2] 桑丙玉,王德顺,杨波,等. 平滑新能源输出波动的储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3700-3706.
SANG Bingyu,WANG Deshun,YANG Bo,et al. Optimized energy storage configuration for smoothing new energy output volatility[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3700-3706.
- [3] 郭壮志,洪俊杰,孟安波. 基于多维度动态协调的大规模并网风电储能容量多指标优化配置策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):161-168.

- GUO Zhuangzhi,HONG Junjie,MENG Anbo,et al. Multi-indicator optimal allocation strategy for large-scale grid-connected wind energy storage capacity based on multi-dimensional dynamic coordination[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):161-168.
- [4] 黄际元,李欣然,曹一家,等. 考虑储能参与快速调频动作时机与深度的容量配置方法[J]. 电工技术学报,2015,30(12):454-464.
HUANG Jiyuan,LI Xinran,CAO Yijia,et al. Capacity allocation considering the timing and depth of energy storage for fm operation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(12):454-464.
- [5] 丁冬,杨水丽,李建林. 辅助火电机组参与电网调频的 BESS 容量配置[J]. 储能科学与技术,2014,3(4):302-307.
DING Dong,YANG Shuili,LI Jianli,et al. Auxiliary thermal power unit to participate in power system frequency modulation bess capacity configuration[J]. Energy Storage Science and Technology,2014,3(4):302-307.
- [6] 张晴,李欣然,杨明. 净效益最大的平抑风电功率波动的混合储能容量配置方法[J]. 电工技术学报,2016,31(14):40-48.
ZHANG Qing,LI Xinyan,YANG Ming,et al. The net benefit of the maximum balance of wind power fluctuations of hybrid energy storage capacity allocation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(14):40-48.
- [7] JIANG Quanyuan,HONG Haisheng. Wavelet-Based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Transactionson Power Systems,2013,28(2),1363-1372.
- [8] 吴玮坪,胡泽春,宋永华. 结合随机规划和序贯蒙特卡洛模拟的风电场储能优化配置方法[J]. 电网技术,2018,42(4):1055-1062.
WU Weiping,HU Zechun,SONG Yonghua. Optimal sizing of energy storage system for wind farm combining the stochastic programming and the sequential monte carlo simulation method[J]. Power System Technology,2018,42(4):1055-1062.