

基于 EMD 与模型预测控制算法的风电功率平抑

张家军¹, 陈杰¹, 常喜强², 李霞¹, 毛吾兰·买买提依明¹, 徐鹏¹, 杨艳磊¹

(1. 国网乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:随着能源短缺问题日益突出, 可再生能源得到了广泛开发和利用。风、光等可再生能源受自然环境非均匀性和非稳态性影响, 其输出功率也呈现很强的时变性, 并入电网后会产生系统的电压和频率波动等一系列电能质量问题。储能系统可以作为能量缓冲装置, 平抑可再生能源输出功率, 以达到并网标准。提出用混合储能系统平抑可再生能源发电波动的方法, 并给出了能量分配方式及储能充放电控制方法。最后, 用某风电场的实际数据为例, 以蓄电池和超级电容储能构成的混合储能系统平抑风电波动, 仿真结果证明, 所提方法的技术合理性和经济实用性。

关键词:混合储能; 模型预测; 经验模态分解; 风功率平抑; 风电消纳

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)02-0038-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210208

Wind Power Fluctuation Stabilization Based on EMD and Model Predictive Control Algorithm

Zhang Jiajun¹, Chen Jie¹, Chang Xiqiang², Li Xia¹, Maowulan Maimaitiyiming¹, Xu Peng¹, Yang Yanlei¹

(1. State Grid Urumqi Electric Power Supply Company, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: With the increasingly prominent problem of energy shortage, renewable energy has been widely developed and utilized. Renewable energy such as wind and light is affected by the non-uniformity and instability of natural environment, and its output power also presents a strong time-varying nature. After being integrated into the power grid, it will cause a series of power quality problems such as the fluctuation of system voltage and frequency. The energy storage system can be used as an energy buffer device to stabilize the output power of renewable energy to meet the grid-connected standards. A method of using a hybrid energy storage system to stabilize the fluctuation of renewable energy generation is proposed, and the energy distribution method and the control method of energy storage charge and discharge are given. Finally, tanking the actual data of a wind farm for example, the hybrid energy storage system composed of battery-supercapacitor energy storage stabilizes wind power fluctuations. The simulation results prove the technical rationality and economic practicability of the proposed method.

Key words: hybrid energy storage; model prediction; empirical mode decomposition (EMD); wind power stabilization; wind power consumption

0 引言

开发利用可再生能源是应对能源问题的有效手段。而可再生能源的消纳是制约可再生能源发展的关键因素之一^[1-2]。风能、太阳能等可再生能源会实时地受到气候、季节、地形、区域等诸多因素的影响, 故其输出往往伴随着随机、不稳定、间歇性等特点, 当一定规模的可再生能源发电并网后对电网的电能质量带来了不利影响^[3-4]。研究增强可再生能

源发电输出功率稳定性的方法及减小可再生能源发电对电网电能质量的影响, 对发展可再生能源战略具有重要意义^[5]。

储能技术可将电能储存起来, 在需要时释放, 以平抑可再生能源发电的功率, 保证电能的持续稳定输出, 增加电网对可再生能源发电的接纳能力。文献[6-7]将蓄电池和超级电容同时引入到发电系统中构成混合储能系统, 用能量密度较高的蓄电池储能平抑能量高、变化慢的低频波动, 用功率密度大的超级电容储能平抑能量低、变化快的高频波动。

目前,已有多种平抑风电输出功率波动平抑的控制策略。文献[8]采用低滤波器的控制方法,并且用储能的实时荷电状态(state of charge, SOC)来计算滤波的时间常数,以输出功率波动为控制目标,在利用模糊控制对储能的功率进行分配;但是以低滤波器为基础的控制算法对功率波动的平抑效果不佳。文献[9]利用小波包分解将输出功率分解出低频部分和低频部分信号,然后结合统计分析和支持向量机辨别出功率波动的超限部分,控制风氢混合储能系统;但上述的小波分解、卡尔曼滤波、一阶滤波等平抑算法在实时控制方面存在局限性。文献[10]利用超级电容和储能电池的能量密度和功率密度的特点,根据储能电池的荷电状态,将控制过程分为优化控制层和协调控制层来保证储能系统的整体充放能力。模型预测控制(model predictive control, MPC)算法具有提前预测、优先控制等特点,且实时性较好^[11]。

以上文献充分说明储能技术能够平抑风电场的输出功率。下面构造以经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法为基础对储能能量进行分配,用能量密度高但功率密度低的蓄电池储能平抑低频功率波动,用能量密度低但功率密度高的超级电容平抑高频功率波动。以 MPC 算法作为平抑控制策略,以储能使用量最小为控制目标,对混合储能系统的充放电进行分配和控制,以达到在储能功率约束、储能系统荷电状态约束以及并网功率波动约束下,平抑风电场的并网功率,减小并网功率冲击。最后,用某风电场一天的实际输出功率数据验证所提方法的可行性和有效性。

1 混合储能平抑风电波动模型构建

利用混合储能技术对风电功率波动平抑是一种有效手段^[12-14]。风电混合储能发电系统包括双馈风力发电机组、混合储能系统和混合储能发电系统。风电混合储能系统结构如图 1 所示。

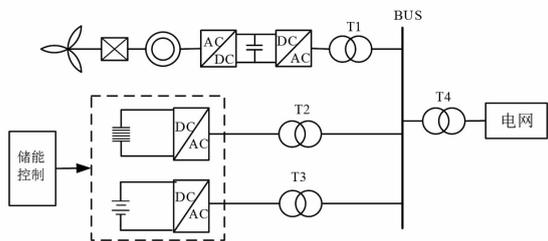


图 1 混合储能平抑风电、波动系统结构

当电网消纳不了风电时,可将富余的电能分配给储能系统用于储能。系统由风力发电系统、混合储能系统、功率分配控制器及连接线组成。当风电过剩时,能量由母线流向混合储能系统;当风电不足时,能量由混合储能系统流向母线并供给电网。混合储能系统由蓄电池储能和超级电容储能构成。蓄电池储能响应速度较慢,但其可储存容量大,蓄电池储能承担低频的功率波动。而超级电容储能响应速度快,适用于频繁充放电,超级电容承担高频的功率波动。储能系统能对风电的输出功率达到“削峰填谷”的效果,使其输入电网的功率更加平滑。

2 混合储能平抑风电波动优化控制策略

2.1 经验模态分解原理

经验模态分解是一种无须选择基函数就能够自适应地将原始信号分解成一组固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)的线性组合,分解后的信号能够突显出原始信号的局部特征。

在 EMD 分解中,所有的模态函数均满足两个条件:1)在整个数据序列中,极值点数和过零点相等或者相差为 1;2)在整个数据序列中,信号的局部极大值和局部极小值构成的包络线关于时间轴对称,即其均值为 0。

EMD 分解的流程如下:

1)寻找信号的所有极大值点和极小值点,对极大值点做插值形成上包络线,对极小值点做插值形成下包络线。

2)计算出上、下包络线的均值 m ,用原始信号 $s(t)$ 减去 m ,求出中间信号 $h(t)$ 。

$$h(t) = s(t) - m \quad (1)$$

3)然后判断 $h(t)$ 是否满足 IMF 的条件,如不满足,则对 $h(t)$ 重复步骤 1、步骤 2,直到满足 IMF 的条件,就得到第 1 个 IMF 信号 $c_1(t)$ 。

$$c_1(t) = h(t) \quad (2)$$

4)用原始信号减去第 1 个 IMF 分量,得到第 1 个剩余信号 $r_1(t)$ 。

$$r_1(t) = s(t) - c_1(t) \quad (3)$$

将 $r_1(t)$ 作为新的原始信号,重复步骤 1 至步骤 4,然后分解出剩下的模态分量 c_2, c_3, \dots ,直至剩余信号呈现为单调时完成分解,并将其记为剩余分量 $r(t)$ 。

综上,经验模态分解可把信号 $s(t)$ 分解为一组

模态函数 $c_i(t)$ 和一个剩余分量 $r(t)$ 的线性组合, 表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (4)$$

式中: $c_i(t)$ 为信号中各振荡模态分量; $r(t)$ 为信号中的剩余分量。

2.2 优化控制及其约束

模型预测控制 (MPC) 算法能够根据历史信息和现有输入来提前对输出作出预测, 能够实现提前预测、优先控制。该方法具有较好的实时性, 因此将其作为功率平抑控制方法。MPC 主要由状态空间模型和滚动时域策略两部分组成^[15]。

风电并网功率与风电场输出功率、储能功率的关系为

$$P_g(k) = P_{es}(k) + P_w(k) \quad (5)$$

式中: $P_g(k)$ 为在 k 时刻的并网功率; $P_{es}(k)$ 为在 k 时刻的储能功率; $P_w(k)$ 为在 k 时刻的风电发出功率。

则在 $k+1$ 时刻储能系统的荷电状态为

$$S_{es}(k) = S_{es}(k) - \frac{T_c P_{es}(k)}{C_{es}} \quad (6)$$

式中: $S_{es}(k)$ 为 k 时刻的荷电状态; C_{es} 为储能容量; T_c 为控制周期。

1) 状态空间模型: 将并网功率 P_g 和荷电状态 S_{es} 作为状态变量 x_1 和 x_2 ; 储能功率 P_{es} 作为控制量 u ; 风电实际发出 P_w 作为扰动量 r ; 下一时刻的并网功率 P_g 和荷电状态 S_{es} 作为输出 y_1 和 y_2 。构建状态空间表达式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -T_c \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} r(k) \\ \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

2) 滚动时域策略: 首先, 利用式(7)的状态空间模型对 $k+M$ ($M=1, 2, 3, \dots$) 时刻的输出 P_g 和 S_{es} 进行预测, 再结合二次规划对每个控制时域的输出结果进行优化, 即可得到相应的功率控制指令。然后将其转化为优化模型求解。其中, 以各优化周期内储能使用量最少作为优化的目标函数, 如式(8)所示。

$$J = \min \left(\sum_{m=k}^{k+M} P_{es}^2(m) \right) \quad (8)$$

并且同时需要满足储能功率约束、对风电并网功率波动率 γ 的限制和储能荷电状态约束, 即约束

条件为

$$\begin{cases} P_{es_min} \leq P_{es}(m) \leq P_{es_max} \\ \frac{P_{g_max}(m) - P_{g_min}(m)}{P_{rated}} \leq \gamma \\ 0.1 \leq S_{es}(m) \leq 0.9 \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{es_max} 和 P_{es_min} 分别为储能功率能达到的上下限; P_{g_min} 和 P_{g_max} 分别为并网功率的最小值和最大值; P_{rated} 为风电的装机额定功率。

3 算例分析

选取某风电场一日的实际功率数据为研究对象, 采样时长为 1440 min, 采样率为 1 min, 装机容量为 200 MW。图 2 为某风电场实际输出功率的波形图。

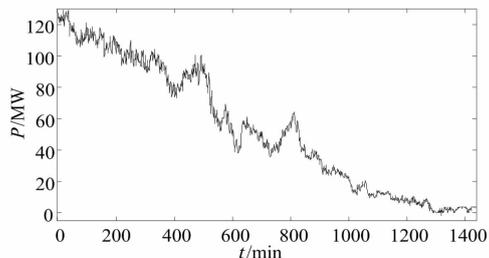


图2 风电实际输出功率

3.1 平抑策略

根据式(9)的约束条件, 以 1 min 波动率 $\leq 2\%$ 和 30 min 波动率 $\leq 7\%$ 作为风电并网波动率限制, 储能功率约束 P_{es} 取 9 MW, 储能 SOC 范围为 0.1 ~ 0.9, 采用模型预测控制算法对该风电功率曲线进行平抑, 平抑后的风电功率如图 3 所示。

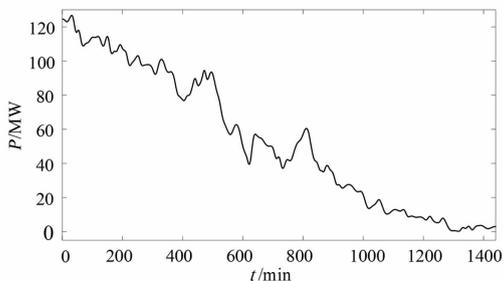


图3 平抑后的风电输出功率

可以看出, 平抑后的风电功率波动较为平滑, 平抑后的 1 min 和 30 min 的波动率分别如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可知, 平抑后的波动率大幅度降低, 平抑后的 1 min 的最大波动率为 1.19%, 30 min 的最大波动率为 6.17%。满足并网要求的平抑后

1 min 波动率 $\leq 2\%$, 30 min 波动率 $\leq 7\%$ 。

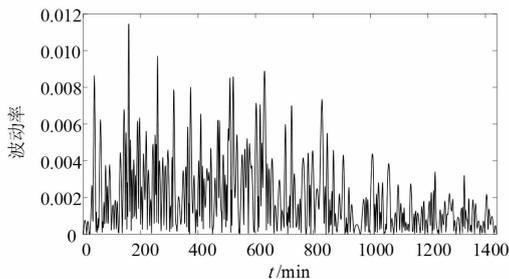


图4 平抑后 1 min 的波动率

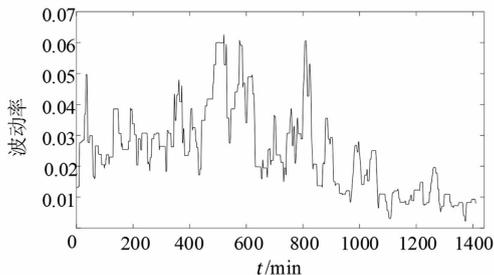


图5 平抑后 30 min 的波动率

3.2 能量分配

蓄电池储能可储存容量大,充放电响应较慢,承担了波动的低频功率指令;而超级电容充放电响应时间在数毫秒到几十分钟,承担了波动频繁的高频功率指令。算例结果也符合蓄电池储能和超级电容的性能特点,储能的能量分配如图6、图7所示。

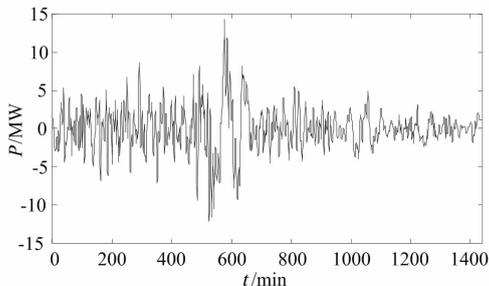


图6 蓄电池储能承担的功率

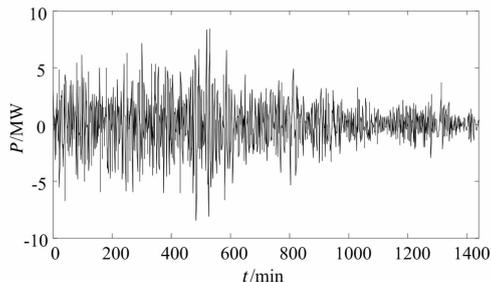


图7 超级电容储能承担的功率

4 结语

风电具有的随机性与波动性,使其在并网时给

大电网在电压、频率的稳定性及可靠性上带来了巨大的挑战。储能系统可以作为能量缓冲装置,能够弥补风电等可再生能源发电的波动性和间歇性,使其输出更容易调度和可控,减小对电网电能质量的影响。前面构造的以EMD算法来对功率做预处理,将其分解为低频部分和高频部分,然后结合实时性较好的模型预测控制算法控制功率指令,对风电功率进行平抑。对实际风电场数据的仿真结果论证了该方法可以有效平抑风电场输出功率,明显提升风力发电的稳定性,减小对电网的冲击,为可再生能源的大规模开发利用提供了技术支持。

参考文献

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017, 37(1): 1-9.
- [2] 盛四清,邱昊,张文朝,等. 考虑稳态和动态有功平衡约束的新能源消纳综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(10): 51-56.
- [3] Jiang Quanyuan, Hong Haisheng. 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.
- [4] Zhang Y X, Dong Z Y, Luo F J, et al. Optimal Allocation of Battery Energy Storage Systems in Distribution Networks with High Wind Power Penetration[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(8): 1105-1113.
- [5] 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.
- [6] 张野,郭力,贾宏杰,等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 36-41.
- [7] 张国驹,唐西胜,齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
- [8] Basit A, Hansen A D, Altin M, et al. Compensation Active Power Imbalances in Power System with Large-scale Wind Power Penetration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 229-237.
- [9] 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.
- [10] 邹见效,戴碧蓉,彭超,等. 基于荷电状态分级优化的

混合储能风电功率平抑方法[J]. 电力系统自动化, 2013,37(24):1-5.

[11] 孙玉树,张国伟,唐西胜,等. 基于风电波动平抑的储能配置影响因素[J]. 高电压技术,2018,44(10):3407-3416.

[12] 王战栋,赵丰刚. 基于 PLC 的风力发电混合储能系统控制方法研究[J]. 四川电力技术,2019,42(3):18-21.

[13] 丁明,吴杰,张晶晶. 面向风电平抑的混合储能系统容量配置方法[J]. 太阳能学报,2019,40(3):593-599.

[14] 江全元,龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. 电网技术,2015,39(12):3360-3368.

[15] 孙玉树,李星,唐西胜,等. 应用于微网的多类型储能多级控制策略[J]. 高电压技术,2017,43(1):181-188.

作者简介:

张家军(1993),男,硕士,主要从事输电线路运行检修工作;

陈杰(1991),男,工程师,主要从事输电线路运行检修工作;

常喜强(1976),男,教授级高级工程师,主要从事电网运行管理工作。

(收稿日期:2020-11-18)

=====

(上接第 32 页)

建设资源节约型、环境友好型社会,推动绿色发展、高质量发展贡献电网力量。

3)超前规划,加快特高压电网建设,打造多元融合高弹性四川电网,充分发挥大电网的优化配置资源的平台作用,统筹电源负荷两端,提高用能效率,以承载大规模可再生能源接入和用电负荷的不断增长。一方面,推进建设“新三直”和金上一湖北±800 kV 特高压直流工程,加快论证攀西等新能源富集地区网架加强和外送方案,围绕甘孜、阿坝水电富集区和成都等负荷中心构建阿坝—成都东—天府南—甘孜 1000 kV 交流特高压环网,并建设天府南—重庆双回 1000 kV 线路向重庆电网延伸;另一方面,利用“大云物移智链”等技术手段赋能电网,挖掘设备能力,释放电网潜力,丰富调剂手段,引导“源网荷储”多能互联、柔性互动、弹性平衡,积极建设完备的市场机制,疏导灵活性资源建设,在提高电网安全水平的同时大幅提升运行效率。

4)深入开展大规模新能源并网、高比例电动汽车接入对电力系统影响机理、源端水风光储和终端分布式储能协同、低惯量系统稳定性、弹性电网探索应用和电网安全、经济、高效运行等研究。通过技术和管理手段,保障电力系统在新能源、电动汽车、储能配置、交直流协同等灵活性资源及不确定性影响下的安全经济运行。

6 结 语

能源低碳转型的关键是电力转型,电力是能源系统碳减排的主力,对中国实现碳排放目标起决定性作用。四川电力可通过推动能源生产低碳化、能

源消费电气化及电网降损等措施,为四川及全国实现“碳中和”贡献力量。同时,随着大规模清洁能源和新型用电设施广泛接入,电力系统的规划、运行将面临全新挑战,需要从技术与经济、市场与政策等方面开展研究。

参考文献

[1] 国网能源院. 全球能源分析与展望[M]. 北京:中国电力出版社,2020.

[2] 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所. 中国能源革命进展报告(2020)[M]. 北京:石油工业出版社.

[3] 彭博新能源财经. 中国 2060 碳中和目标初步解读:漫长路、塑全球[OL]. <http://www.es.cn.com/news/show-1104320.html>.

[4] 黄碧斌,张运洲,王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J]. 中国电力,2020,53(1):1-9.

[5] Ferrari N, Mancuso L, Burnard K, et al. Effects of Plant Location on Cost of CO₂ Capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2019,90:102783.

[6] 张运洲,鲁刚,王芑,等. 能源安全新战略下能源清洁化率和终端电气化率提升路径分析[J]. 中国电力,2020,53(2):1-8.

[7] 李依风,李树德,倪逸林. 电网六氟化硫温室气体减排参与碳市场策略[J]. 资源节约与环保,2016(11):121-122.

[8] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):85-91.

作者简介:

叶强(1982),男,硕士,高级工程师,从事能源电力规划、电力市场、能源经济等领域研究。

(收稿日期:2021-01-25)