第41卷 第8期 太 阳 能 学 报 Vol. 41, No. 8
2020年8月 ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA Aug., 2020

文章编号:0254-0096(2020)08-0060-07

# 固定储能配比对风电基地外送输电容量的影响分析

杨修宇[1]，段士伟[2]，安 军[2]，晏 锋[3]，柴仁勇[3]，龚 伟[4]

（1. 华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206；
2. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学)，吉林 132012；
3. 国网赣西供电公司，新余 338025；4. 国网江西省电力有限公司，南昌 330077）

**摘 要**：从储能系统平抑控制策略和运行方式2方面，探究固定储能配比对风电集中外送输电容量规划的经济性影响。首先对不同控制策略、不同运行方式的平抑风电功率波动效果进行对比分析；其次使用平抑后的风电功率优化规划风电基地外送输电容量；最后，依据外送输电容量优化规划结果，探究不同控制策略、不同运行方式下对外送输电工程的经济性影响。算例表明平抑效果较佳的控制策略对输电容量改善明显，相同控制策略下储能系统在集中运行方式下更能显著改善储能的工作效率，并提高外送输电工程效益。

**关键词**：风力发电；储能；带阻滤波；低通滤波；风电功率波动；输电容量

**中图分类号**：TM715 **文献标志码**：A

## 0 引 言

大力发展风力发电是应对气候恶化、传统能源枯竭的重要举措之一，中国风资源丰富，截至2019年底，风电累计装机容量为210 GW，新增并网容量为25.74 GW。目前已规划和建设了10个千万千瓦级的风电基地，大规模集中外送仍是中国风电开发的主要模式之一。然而，风电功率的强波动性、不确定性以及低能量密度等特性给大规模风电并网运行的安全性与外送输电通道的经济性都来了巨大挑战[1]。

储能系统具有功率吞吐功能，能够平抑风电功率波动，提升大规模可再生能源并网运行安全性，同时也能降低风电功率对输电容量的依赖。目前风电+储能的开发模式备受推崇，储能系统与风电配套示范项目相继实施，如张北的风光储电站、卧牛石的5 MW×2 h的全钒液流电池储能电站、日本北海道的配套储能电站等。随着储能技术经济性的持续改善，假设未来大规模风电基地内每个风电场出口都配置一定储能，储能系统在不同控制策略、不同运行方式下对风电功率波动平抑效果也不尽相同，对风电基地外送输电通道规划方案的经济性也会产生一定影响。因此，探究储能系统在不同控制策略、不同运行方式下对外送输电工程的经济性影响具有一定工程意义[2]。

目前，国内外关于储能系统对风电功率平抑的应用展开了广泛研究，主要集中在风电功率波动平抑策略与储能容量优化配置两方面。文献[3]采用低通滤波和高通滤波结合的控制策略，对超导电磁储能系统充放电功率进行控制，从而达到对风电功率波动的平抑效果。文献[4]通过将指数平滑控制策略与储能结合对风电功率波动进行平抑，从而达到风电并网要求。文献[5]在风电波动平抑中，利用经济概论方法确定混合储能的容量。文献[6]在满足风电并网标准的情况下，对比分析不同控制算法对风电功率波动的影响以及储能容量的最优配置问题。文献[7]提出一种用于松弛调峰瓶颈的储能容量优化配置控制策略，通过大规模的储能系统实现对负荷的削峰填谷，分析储能系统的使用寿命、投资成本对容量配置的影响，进而使电网具有更多的向下调节容量来接纳风电。文献[8]提出以对风电功率进行平

**收稿日期**：2019-02-26
**基金项目**：国家重点研发计划(2016YFB0900100)；国家自然科学基金(U1766204)
**通信作者**：杨修宇(1986—)，男，博士研究生、实验师，主要从事高比例可再生能源电力系统规划方面的研究。yangxiuyu2011@163.com

滑控制为目的的 BESS 控制策略，同时对储能容量需求进行优化计算。

综上，在风电场固定储能配置的背景下，风电功率平抑前、后对风电基地外送输电容量需求的影响定量分析鲜有研究。为此，本文在固定储能配比下，分析储能在不同控制策略、不同运行方式下对风电基地外送输电容量的影响，为合理配置风电外送输电容量提供参考。

# 1　储能控制策略与运行方式

## 1.1　风电功率波动评价指标

风电功率波动评价指标有利于风力发电并网完全运行定量分析。中国对风电功率并网提出了技术标准 GB/Z 19963—2005[9]，如表 1 所示。

**表1　中国风电并网标准**

Table 1　Standards of grid connected wind power in China

| 风电装机容量/MW | 有功功率变化最大限值/MW | |
|---|---|---|
| | 10 min | 1 min |
| <30 | 10 | 3 |
| 30～150 | 装机容量/3 | 装机容量/10 |
| >150 | 50 | 15 |

假设风电数据采样间隔为 $T$，数据总数为 $N$，装机容量为 $P_N$，将数据分为 $m$ 个周期来计算，则风电在第 $k$ 个周期的最大波动量为：

$$\Delta P_{k,\max}=\mathrm{Max}\left(P_{k,\max}-P_{k,\min}\right) \tag{1}$$

式中，$P_{k,\max}$ ——第 $k$ 个周期内最大的风电功率值，MW；$P_{k,\max}$ ——第 $k$ 个周期内最小的风电功率值，MW。

风电功率平均值为：

$$P_{\mathrm{ave}}=\sum_{i=1}^{N}P_i\Big/N \tag{2}$$

风电功率波动率为：

$$\rho(t)=\frac{\Delta P_{k,\max}}{P_N}\times 100\% \tag{3}$$

平稳性指标为：

$$E=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}\left|\frac{P_{i+1}-P_i}{P_N\times T}\times 100\%\right|,\ i=1,2,\cdots,N-1 \tag{4}$$

式中，$P_i$ ——第 $i$ 时刻的风电功率，MW；$E$ ——风电功率的不平稳程度，$E$ 越大表明波动越大，曲线越不平滑；反之，波动越小，曲线越平滑。

## 1.2　储能的控制策略

储能系统不同的平抑策略对风电功率波动平抑效果不同，为验证不同策略平抑后对外送输电容量的影响，在此选择低通滤波与带阻滤波 2 种控制策略。

### 1.2.1　基于低通滤波算法的控制策略

1 阶低通滤波算法（简称 1 阶滤波算法，low-pass filtering algorithm，LFA）具有操作简单、可靠性高、便于工程实现的优点。采用 1 阶低通滤波算法对风电功率波动进行平抑，风电出力曲线更加平滑，进而满足风电并网要求。设低通滤波的截止频率为 $f_c$，低通滤波算法的输入量为风电场输出功率 $P_{\mathrm{wind}}(i)$，输出量为 $P_g(i)$，则输出与输入的关系为：

$$P_g(i)=\frac{\tau}{\tau+T_c}\times P_g(i)+\frac{T_c}{\tau+T_c}\times P_{\mathrm{wind}}(i) \tag{5}$$

式中，$T_c$ ——平抑控制周期；$\tau$ ——系统的时间常数，$\tau=1/(2\pi f_c)$。

从式(5)可看出，$i$ 时刻的输出量 $P_g(i)$ 不仅与 $i$ 时刻的状态量 $P_{\mathrm{wind}}(i)$ 有关，还与前一时刻的输出量 $P_g(i-1)$ 有关。时间常数$\tau$越大，$P_g(i)$ 与 $P_g(i-1)$ 越相似，平滑效果越好，但输出结果越偏离 $P_g(i)$。

### 1.2.2　基于带阻滤波的控制策略

带阻滤波控制策略的原理是能通过大多数频率分量，但将某些范围的频率分量衰减到极低水平。风电功率波动各频段中存在对电力系统频率调节的敏感频段，利用储能系统滤除风电功率中对应频段的风电功率，以达到更好平抑风电功率波动的目的[10]，则风电场的输出功率与平抑后注入电网的功率的关系为：

$$\begin{aligned}P_{o(k)}=&\frac{1+\alpha}{2}P_{w(k)}-\beta(1+\alpha)P_{w(k-1)}+\frac{1+\alpha}{2}P_{w(k-2)}+\\&\beta(1+\alpha)P_{o(k-1)}-\alpha P_{o(k-2)}\end{aligned} \tag{6}$$

式中，$P_{w(k)}$ ——风电场 $k$ 时刻的输出功率，MW；$P_{o(k)}$ ——经过滤波器平抑后 $k$ 时刻的输出功率，MW；$\alpha$、$\beta$ ——带阻滤波器的相关参数，其中滤波器的输出与参数 $\alpha$、$\beta$ 紧密相关。

## 1.3　储能的运行方式

风电基地内每个风电场出口均配置 10%的储能系统（储能功率为装机容量的 10%，容量为储能功率×2 h），系统拓扑如图 1 所示。然而，储能不同运行方式对风电基地集中外送风电功率较大影响。

### 1.3.1 分散运行方式

各风电场出口的储能只负责本风电场输出功率是否满足并网要求，即风电场 1 的储能只对 $P_{g1}$ 负责，所有的风电场输出功率平抑后叠加集中并入电网，此储能运行方式本文称之为“分散运行”。

1.3.2 集中运行方式

风电基地内部所有储能系统依据风电基地汇聚点功率 $P_\Sigma$ 的波动情况集中控制，即所有储能系统统一对各风电场输出功率叠加后的功率 $P_\Sigma$ 是否满足并网需求负责，此运行方式称之为“集中运行”。

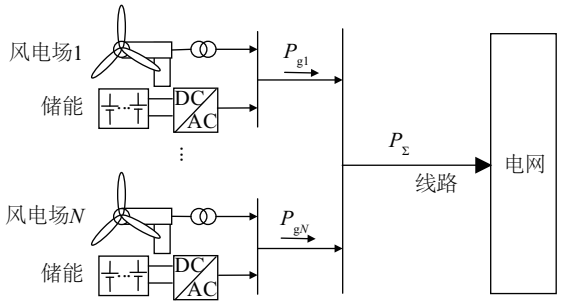



图1 风电基地储能配置拓扑图

Fig. 1 Topology of wind power base with energy storage system configuration

## 2 风电集中外送输电容量优化模型

利用风电功率持续曲线能准确刻画风电基地输出功率的长期波动特征，储能系统不同控制策略、不同运行方式得到的风电基地整体输出功率持续曲线不同。为此，构建综合考虑输电收益、输电建设投资和因输电阻塞导致的弃风损失的输电容量优化模型，分析固定储能配比下不同控制策略、不同运行方式对输电容量的影响。此优化模型以规划目标年内的输电工程综合收益最大为目标[11]：

$$\max_{0\leqslant P_{\text{line}}\leqslant P_N} C_{\text{sum}} = I(P_{\text{line}}) - C(P_{\text{line}}) - L(P_{\text{line}}) \tag{7}$$

式中，$C_{\text{sum}}$ ——风电外送输电工程全回收周期综合收益；$I(P_{\text{line}})$ ——回收周期内的输送风电电量的收益；$C(P_{\text{line}})$ ——输电工程线路投资费用；$L(P_{\text{line}})$ ——回收周期内因可能的输电阻塞造成的弃风损失，以上网补偿风电企业使其利益不受损；$P_{\text{line}}$ ——风电外送输电规划容量；$P_N$ ——风电场群的额定装机容量。

基于风电功率持续曲线输电收益、弃风损失以及输电投资等相关变量求解如下。

### 2.1 回收周期内的输电收益

$$I(P_{\text{line}}) = W_1 \times k_1 \times T \tag{8}$$

式中，$T$ ——输电投资静态回收周期；$W_1$ ——由输电通道外送的风力发电量；$k_1$ ——电网公司输送的单位风电电量的单价。

$W_1$ 的具体求解方法如式(9)所示：

$$W_1 = P_{\text{line}} T_{\text{line}} + \int_{T_{\text{line}}}^{T_{\text{end}}} P(t)\mathrm{d}t \tag{9}$$

式中，$P(t)$ ——风电场的持续出力曲线；$T_{\text{line}}$ 为风电功率大于 $P_{\text{line}}$ 的持续时间；$T_{\text{end}}$ ——风电功率总的持续时间，如图2所示。

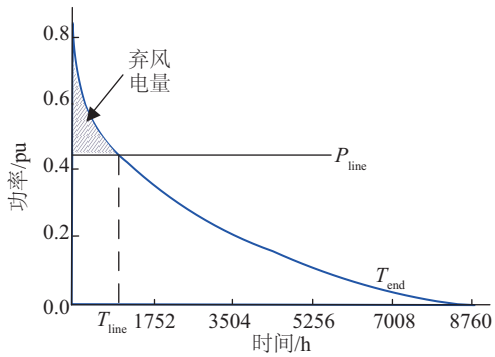



图2 输电容量与风电功率持续曲线作用关系

Fig. 2 Relationship between transmission capacity and wind power curve

### 2.2 因输电阻塞造成的弃风损失

$$L(P_{\text{line}}) = W_2 \times k_2 \times T \tag{10}$$

式中，$W_2$ ——因输电阻塞产生的弃风电量；$k_2$ ——电网公司补偿风电企业阻塞弃风损失的单位价格(通常为上网电价)。

### 2.3 输电线路投资成本

$$C(P_{\text{line}}) = P_{\text{line}} \times k_3 \tag{11}$$

式中，$k_3$ ——输电线路单位投资成本。

## 3 算例分析

本文以东北某风电基地15个风电场实测数据作为分析对象，数据采样周期为1 a，时间间隔5 min，总装机容量为2013 MW。通过对比分析不同控制策略下不同运行方式的平抑效果，并在此基础上对外送输电容量进行优化规划，探究在不同运行策略、不同控制方式下对外送输电工程的经济性影响。

### 3.1 储能平抑风电功率波动效果分析

3.1.1 同一策略下不同运行方式的平抑效果

在此需要说明，风电功率平抑结果对比的都是风电基地总体功率，即储能系统分散运行是将各风电场平抑后的风电功率进行累加得到总体功率；集中运行是将各风电场的输出功率累加，而后进行平抑。

1)基于低通滤波原理的控制策略

本文中储能的配置已经确定，滤波频率的选取需要考虑储能的充分利用与平抑时长。截止频率过高，储能将不能够充分利用；截止频率过低，储能虽能够充分利

用，但不能全天候平抑风电功率。因此，经过大量数据分析得出截止频率 $f_c=1/1800$ 。采用低通滤波策略分别以分散运行方式与集中运行方式对风电功率进行平抑，平抑结果如图 3 所示。从图 3 可看出，平抑后的风电功率波动性更小，有明显的平滑效果，且与分散式并网相比，集中式并网平抑效果更好、平抑曲线更加平滑。

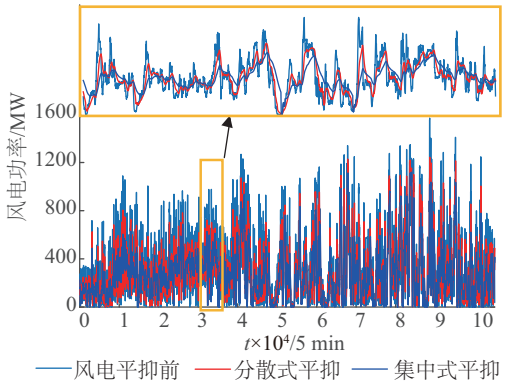



图3　低通滤波策略下平抑前后的风电功率

Fig. 3　Wind power before and after smoothing under low-pass filtering strategy

2）基于带阻滤波原理的控制策略

带阻滤波可以调节系统中的敏感频段，滤除对应频段的风电功率，敏感频段的确定参照文献[10]，为达到储能的充分利用且不存在过冲过放的前提下，对应的数字滤波器参数 $a=0.7265$，$\beta=0.9956$ 。对比分析风电不同并网方式下的平抑效果。图 4 表示 2 种储能运行方式下平抑前后风电功率曲线。从图 4 同样可看出，集中式平抑效果优于分散式平抑效果。

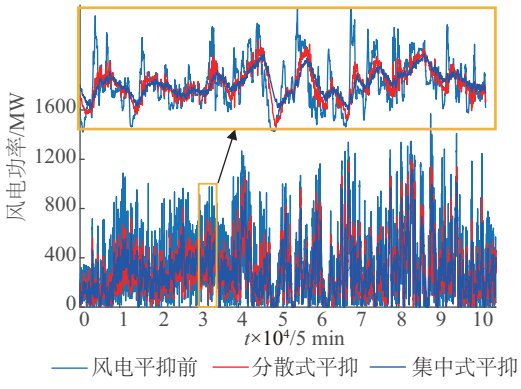



图4　带阻滤波策略下平抑前后的风电功率

Fig. 4　Wind power before and after smoothing under band-stop filter strategy

3.1.2　不同策略下集中式平抑的效果对比

在相同的并网约束条件下，获取不同平抑控制策略在集中运行方式下风电功率平抑效果对比，如图 5 所示。2 种平抑策略平抑后的波动指标，如表 2 所示。从图 5 可看出，带阻滤波策略下风电功率高频波动仍存在，但波动幅值明显下降；而低通滤波策略下的风电功率更加光滑，但波动振幅并未显著变化。究其原因，带阻滤波策略对风电功率波动中间频段加以平抑，因此对采样间隔 5 min 的最大波动量作用明显，从表 2 中也可明显看出 10 min 尺度下各波动指标，带阻滤波平抑策略优于低通滤波平抑策略。

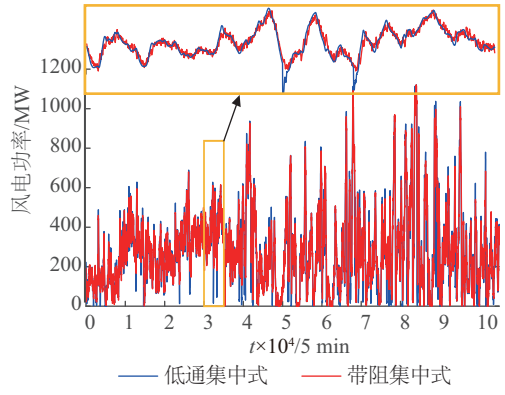



图5　不同控制策略下集中式平抑曲线

Fig. 5　Centralized suppression curve under different control strategies

**表2　不同控制策略下风电功率波动情况**

Table 2　Wind power fluctuations under different control strategies

| 波动指标 | 低通集中式 | 带阻集中式 |
|---|---|---|
| $P_{ave}$ | 201.4882 | 186.5781 |
| $\rho_{max}$ | 0.0253 | 0.0238 |
| $E$ | 0.0000841 | 0.0000391 |

## 3.2　不同运行策略控制方式对输电容量的影响

3.2.1　计算条件

1）在外送输电容量的规划中，电网公司送出风电电量的单价为 $k_1=60$ 元/MWh；弃风补偿电量单价为 $k_2=600$ 元/MWh；线路投资系数 $k_3=1$ 万元/(MW·km)；线路长度 $l=200$ km。

2）为便于分析，将 1 阶低通滤波平抑策略命名为方法 1，带阻滤波平抑策略为方法 2，未经平抑的风电功率命名为方法 3，而后分别进行输电容量优化并作对比分析。

图 6 表示不同控制策略集中运行方式下风电基地持续功率曲线。该曲线可较好地描述风电功率的

变化趋势,能作为风电基地外送输电容量规划的依据。

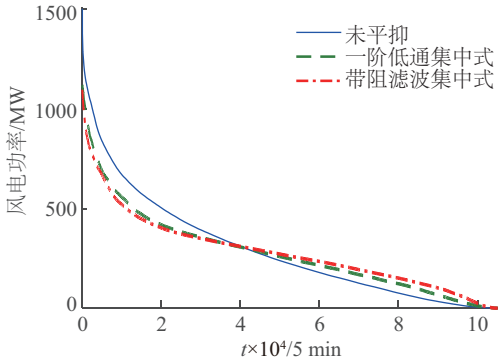
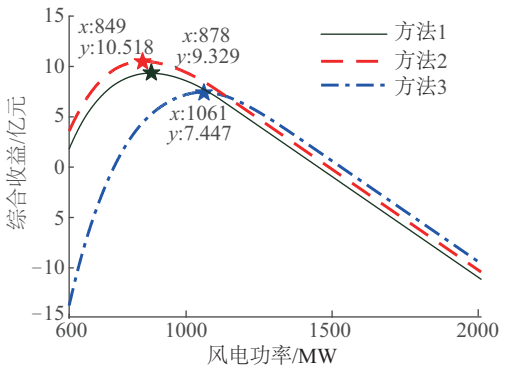



图6 不同运行方式下风电场的持续出力曲线

Fig. 6 Wind power annual duration curve of wind farm under different operating modes



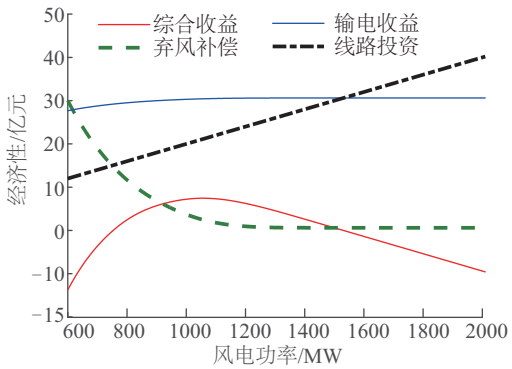

b. 3种方法优化的综合收益对比

图7 各变量变化趋势与3种方法综合收益对比

Fig. 7 Comparison of trends of various variables and comprehensive income of three methods

3.2.2 算例结果

利用风电集中外送输电容量优化模型对未经平抑的风电基地输出功率进行输电容量优化,如图 7 所示.从图 7a 可看出,随着外送输电容量的增加,输电线路投资线性增长,输电收益先增加,当输电容量达到风电功率最大值时,输电收益保持不变;弃风补偿损失,先减小而后为 0 保持不变,进而综合收益先增加,增加至最优点后随之减小,原因是输电线路投资增加带来的综合收益下降。因此,理论上存在一个最优的外送容量,使得风电场群输电工程的综合收益达到最大,并且各方面达到最优。同理,可求出另外 2 种方法的外送输电容量以及规划目标模型中的成本与收益,表 3 为每个方法中最优的规划模型。可看出,同一种策略下集中式的外送输电容量更低、收益高。在不同控制策略下,方法 2 的集中式运行方式综合收益更高。方法 2 的最优外送输电容量为 849 MW,综合收益为 10.518 亿元,比方法 3 低 212 MW,比方法 1 低 29 MW,输电线路成本明显降低,且方法 2 的综合收益也最高,比方法 3 高出 3.07 亿元,比方法 1 高 1.189 亿元,图 7b 所示。




a. 方法3中各变量随输电容量增长的变化趋势

**表3 各方法下的规划目标模型的参数统计表**

Table 3 Parameter statistics table of planned model under each method

| 方法 | 运行方式 | 外送容量/MW | 线路成本/亿元 | 弃风补偿/亿元 | 输电收益/亿元 | 综合收益/亿元 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 分散式 | 980 | 19.6 | 1.867 | 30.138 | 8.671 |
| | 集中式 | 878 | 17.56 | 1.977 | 28.866 | 9.329 |
| 2 | 分散式 | 968 | 19.36 | 2.026 | 30.354 | 8.968 |
| | 集中式 | 849 | 16.98 | 2.076 | 29.574 | 10.518 |
| 3 | 无储能 | 1061 | 21.22 | 1.772 | 30.439 | 7.447 |

## 4 结 论

以固定比例为风电场配置储能系统,将明显改善风电输出功率波动性。同时,对大规模风电基地外送通道输电工程效益产生一定影响,本文探究了储能系统的平抑控制策略以及运行方式对风电基地集中外送经济性影响,得出以下结论:

1)由于各风电场存在时空差异性,风电功率累加时呈现出平滑效应,所以在满足并网约束的条件下,集中运行方式平抑效果更佳。

2)算例表明,储能采取不同平抑策略对外送输电通道规划产生不同经济性影响,因此选取恰当的运行策略,有利于提高储能工作效率,并改善外送通道的经济性。

[参考文献]

[1] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网

的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报，2010，30(25)：1-9.
ZHANG L Y，YE T L，XIN Y Z，et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE，2010，30(25)：1-9.

[2] MIRANBEIGI M，IMAN-EINI H. Hybrid modulation technique for grid-connected cascaded photovoltaic systems[J]. IEEE transactions on industrial electronics，2016，63(12)：7843-7853.

[3] CAO Y J，LI Q，TAN Y，et al. A comprehensive review of energy internet：basic concept，operation and planning methods，and research prospects[J]. Journal of modern power systems and clean energy，2018，6(3)：399-411.

[4] 谢桦，孟顺. 基于指数平滑法的平抑风电功率波动储能控制策略[J]. 北京交通大学学报(自然科学版)，2014，38(5)：123-127.
XIE H，MENG S. An energy control strategy based on exponential smoothing method for smoothing wind power fluctuations[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (natural science edition)，2014，38(5)：123-127.

[5] WANG X Y，YUE M，MULJADI E，et al. Probabilistic approach for power capacity specification of wind energy storage systems[J]. IEEE transactions on industry applications，2014，50(2)：1215-1224.

[6] 孙玉树，唐西胜，孙晓哲，等. 风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(S1)：88-97.
SUN Y S，TANG X S，SUN X Z，et al. Research on energy storage capacity allocation method for smoothing wind power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE，2017，37(S1)：88-97.

[7] YOSHIMOTO K，NANAHARA T，KOSHIMIZU G. Analysis of data obtained in demonstration test about battery energy storage system to mitigate output fluctuation of wind farm [C]//Proceedings of 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium Integration of Wide-scale Renewable Resources into the Power Delivery System，Calgary，AB，Canada，IEEE，2009：1-5.

[8] 严干贵，冯晓东，李军徽，等. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报，2012，32(28)：27-35.
YAN G G，FENG X D，LI J H，et al. Optimization of energy storage system capacity for relaxing peak load regulation bottlenecks[J]. Proceedings of the CSEE，2012，32(28)：27-35.

[9] GB/Z 19963—2005，风电场接入电力系统技术规定[S].
National Standardization Guidance Document of the People's Republic of China GB/Z 19963—2005. Wind farm access to power system technical regulations[S]，2006.

[10] 黄亚峰，穆钢，刘嘉. 基于带阻滤波原理的风电场功率波动平抑策略研究[J]. 太阳能学报，2012，33(7)：1073-1079.
HUANG Y F，MU G，LIU J. Research on power fluctuation strategy for wind farm based on band-stop filter principle[J]. Acta energiae solaris sinica，2012，33(7)：1073-1079

[11] 穆钢，崔杨，严干贵. 确定风电场群功率汇聚外送输电容量的静态综合优化方法[J]. 中国电机工程学报，2011，31(1)：15-19.
MU G，CUI Y，YAN G G. A static optimization method to determine integrated power transmission capacity of clustering wind farms[J]. Proceedings of the CSEE，2011，35(1)：15-19.

# INFLUENCE OF FIXED ENERGY STORAGE PROPORTION ON WIND POWER TRANSMISSION CAPACITY

Yang Xiuyu[1], Duan Shiwei[2], An Jun[2], Yan Feng[3], Chai Renyong[3], Gong Wei[4]

(1. *School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *China*;
2. *Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin* 132012, *China*;
3. *State Grid Jiangxi Power Supply Company, Xinyu* 338025, *China*; 4. *State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang* 330077, *China*)

**Abstract**: In this paper, the economic impact of fixed energy storage ratio on wind power centralized transmission capacity planning is explored based on EES's suppression control strategy and operation mode. Firstly, the effects of different control strategies and operating modes on suppressing fluctuations of wind power are contrast and analyzed. Then, transmission capacity of the wind power base is planned and optimized by using the suppressed wind power curve. Finally, based on the planned and optimized transmission capacity, these different strategies and modes described previously influencing on the economy of the transmission project are further explored. The result shows that the control strategy with better suppression effect can increase the transmission capacity obviously and the centralized operation ESS under the same control strategy can significantly improve the efficiency of the energy storage as well as the income of the transmission project.

**Keywords**: wind power; energy storage; band stop filters; low pass filters; wind power fluctuations; transmission capacity