



风储系统风电功率平抑与故障穿越的新型复合功率控制策略

王腾 张新燕 何星柱 王亚东 程叶凡 黄全伟 田云

A New Composite Power Control Strategy for Wind Power Stabilization and Fault Ride-through of Wind Storage System

WANG Teng, ZHANG Xinyan, HE Xingzhu, WANG Yadong, CHENG Yefan, HUANG Quanwei, TIAN Yun

引用本文:

王腾, 张新燕, 何星柱, 等. 风储系统风电功率平抑与故障穿越的新型复合功率控制策略[J]. 现代电力, 2023, 40(6): 863–871. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0112

WANG Teng, ZHANG Xinyan, HE Xingzhu, et al. A New Composite Power Control Strategy for Wind Power Stabilization and Fault Ride-through of Wind Storage System[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(6): 863–871. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0112

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0112>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于储能与风机协调控制的电压故障穿越策略

A Voltage Ride-through Control Based on Coordination Between Energy Storage and Wind Turbine
现代电力. 2023, 40(5): 788–796 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0089>

平抑风电波动的混合储能系统自适应控制策略

Adaptive Control Strategy of Hybrid Energy Storage System for Mitigating Wind Power Fluctuations
现代电力. 2020, 37(6): 646–653 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2019.0949>

考虑储能荷电状态平抑风电功率的抛物线规则变滤波时间常数方法

Parabola Regular Variable Filtering Time Constant Method Considering Energy Storage SOC State to Smooth Wind Power
现代电力. 2020, 37(5): 518–525 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0133>

储能协助风电机组参与电网调频控制策略研究

Energy Storage Assists Wind Turbines to Participate in Grid Frequency Regulation Control Strategy Research
现代电力. 2022, 39(5): 537–546 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0179>

基于灰色预测和低通滤波的风电平抑策略

Wind Power Stabilization Strategy Based on Grey Prediction and Low-pass Filtering
现代电力. 2023, 40(3): 295–302 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0349>

海上风电集群与火电打捆外送系统低电压穿越特性

Low Voltage Ride Through Characteristics of Bundled Transmission System with Offshore Wind Power Cluster and Thermal Power
现代电力. 2022, 39(6): 739–748 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0345>

风储系统风电功率平抑与故障穿越的 新型复合功率控制策略

王腾^{1,2}, 张新燕¹, 何星柱¹, 王亚东¹, 程叶凡¹, 黄全伟², 田云²

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830017;

2. 国网乌鲁木齐供电公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830011)

A New Composite Power Control Strategy for Wind Power Stabilization and Fault Ride-through of Wind Storage System

WANG Teng^{1,2}, ZHANG Xinyan¹, HE Xingzhu¹, WANG Yadong¹, CHENG Yefan¹, HUANG Quanwei²,
TIAN Yun²

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;

2. State Grid Urumqi Power Supply Company, Urumqi 830011, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

摘要: 为解决风电机组在风电功率平抑和故障穿越 2 方面的不足, 针对基于混合储能的直驱风力发电系统, 提出一种同时兼顾风电功率平抑和故障穿越的复合功率控制策略。一方面, 提出具有功率误差反馈环的改进型二阶滤波功率分配方法, 实时修正超级电容和蓄电池储能的功率响应指令, 提高目标功率分配精度的同时改善跟踪控制效果, 实现风电功率平抑的同时延长储能介质使用寿命; 另一方面, 提出网侧变流器 (grid side convertor, GSC) 和混合储能共同作用的复合功率控制策略, 实时修正各控制量的功率响应指令并快速清除直流母线上的冗余功率, 提高风电机组的故障穿越能力, 使风电系统基本不受电网故障的影响。

关键词: 混合储能; 直驱风电机组; 风电功率平抑; 故障穿越; 复合功率控制

Abstract: To remedy the shortage of wind turbine in wind power leveling and fault ride-through, in allusion to direct drive wind power generation system based on hybrid energy storage a compound power control strategy, which considered both wind power leveling and fault ride-through simultaneously, was proposed. On the one hand, an improved second-order filtered power allocation method with power error feedback loop was proposed to realtime revise the power response command of super capacitor and battery storage to increase the target power al-

location accuracy meanwhile the tracking control effect could be improved, thus the wind power leveling was realized at the same time the service life of energy storage medium was prolonged. On the other hand, a compound power control strategy, in which the grid side convertor acted together with hybrid energy storage, was put forward to realtime revise the power response command of each control quantity and quickly remove the redundant power of the DC bus, so that the fault ride-through capability of wind turbines was improved to make the wind power system basically not affected by grid faults.

Keywords: hybrid energy storage; direct drive wind turbine; wind power leveling; fault ride-through; compound power control

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0112

0 引言

全球能源危机和环境污染的问题日益严重, 为了实现“双碳目标”, 具有可再生及绿色环保等特点的新能源发电技术得到快速发展, 其中, 风能因其储量大、效率高和技术最成熟的特点受到广泛关注^[1]。然而, 随着高比例风电的电网渗透率, 风电系统与电网之间的耦合关系也越来越紧密^[2-3]。风电输出功率的波动性、间歇性和不确定性将会恶化电网的电能质量并对其运行稳定性产生较大影响, 不利于风电的大规模并网及开发利用^[4-5]; 与此同时, 风电机组在电网故障期间存在一系列的暂态过程, 将降低其并网安全性甚至

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51667018); 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目 (2021D01C044)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51667018); Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region Funded Project (2021D01C044)。

发生脱网现象^[6]。

针对上述问题,相关学者进行了研究并取得了一些进展。

1) 风电功率平抑方面。

储能系统因其响应速度快、控制灵活等特点广泛应用于风电并网系统的功率和能量补偿。文献[7-8]通过采用一阶低通滤波算法分别将目标补偿功率分配给蓄电池和超级电容储能,但该算法的跟踪控制和功率分配精度较差;文献[9]采用基于滑动平均滤波的频谱分析法平抑风电功率波动,该方法的储能系统功率分配缺乏实时性导致跟踪平抑效果不佳;文献[10]提出一种基于元模型优化算法的混合储能双层优化配置方法,实现了混合储能系统经济最优的情况下仍具有较好的风电平抑效果;文献[11]采用二阶滤波的混合储能功率分配方法,改善了传统滤波算法的频率截止特性,实现了对目标功率较为合理的分配。然而,该方法仍然存在实时跟踪控制效果较差和功率分配精度较低的问题。

2) 故障穿越方面。

根据我国《风电场接入电力系统技术规定》,风电机组应在电网发生故障时不脱网连续运行^[12]。如何提高风电机组故障穿越能力是亟待解决的关键问题。文献[13]提出一种基于旋转备用加直流侧储能的风储联合控制策略,实现了直驱风电机组的频率调节并提高了故障穿越能力,控制过程复杂不易实现;文献[14-15]针对双馈风力发电系统,提出一种可提高电网故障穿越能力的协调控制策略以稳定直流母线电压,然而忽略了风电波动功率的影响;文献[16]在分析直驱永磁风电机组暂态运行特性的基础上,提出一种高电压故障穿越的控制策略,可有效恢复直流母线故障电压。可见,电网故障期间风电机组保持安全并网运行的关键在于是否能够快速清除直流母线处的不平衡功率,维持直流母线电压稳定。

综上所述,现阶段大多数研究仅考虑了风电机组在风电功率平抑或故障穿越单一方面的性能分析,如何同时兼顾二者并进行协调控制对提高系统整体性能具有重大现实意义。

为此,本文针对基于混合储能的直驱风力发电系统,提出一种同时兼顾风电功率平抑和故障穿越的复合功率控制策略。在风电功率平抑方面,提出具有功率误差反馈环的改进型二阶滤波功率

分配方法,实现对目标功率精确跟踪与分配的同时优化储能介质的充放电控制,最终达到风电功率平抑效果的同时延长储能介质使用寿命;在故障穿越方面,提出网侧变流器(grid side convertor, GSC)和混合储能共同作用的复合功率控制策略,GSC在故障检测环动作后进入无功补偿模式恢复直流母线故障电压,达到阈值后将限值功率信号反馈至混合储能系统,由混合储能消纳直流母线处的剩余不平衡功率,稳定直流母线电压,使风电机组在故障期间不脱网运行。

1 风储联合发电系统结构

本文研究的基于混合储能的直驱风力发电系统结构如图1所示,风电系统由采用最大功率跟踪控制的直驱风力发电机组构成,通过“交-直-交”环节直接接入交流母线。混合储能系统采用蓄电池储能和超级电容储能的组合形式^[17-18],各储能介质分别由双向DC-DC变换器接入直流母线,直流母线经DC-AC并网变流器接至带有联络线的交流电网。

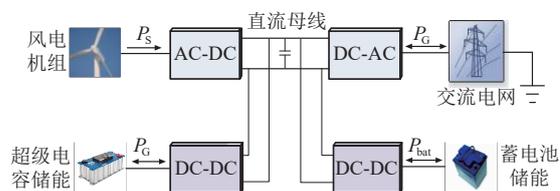


图1 基于混合储能的直驱风力发电系统结构

Fig. 1 Structure of direct drive wind power generation system based on hybrid energy storage

根据图1所示系统的能量流动,且忽略系统中的能量损耗,可得到系统的功率平衡关系为

$$P_G = P_S + P_{bat} + P_{sc} \quad (1)$$

式中: P_G 为风电并网功率; P_S 为风电输出功率; P_{bat} 为蓄电池储能响应功率指令; P_{sc} 为超级电容储能响应功率指令。

分析可知,通过风电机组与混合储能系统的复合功率控制可实现系统功率平衡。

2 风电功率平抑与故障穿越新型复合功率控制策略

2.1 风电功率平抑与故障穿越原理分析

2.1.1 风电功率平抑

风电输出功率的随机性和波动性使风电并网

运行稳定性降低，严重时会影响电力系统的安全运行，危及电网正常供电^[19]。混合储能系统可消纳不同频段的风电输出波动功率，维持直流母线 2 端功率平衡，使风电系统友好并网运行，功率补偿关系如式 (2) 所示

$$\Delta P = P_S - P_G = P_{\text{hess}} \quad (2)$$

式中： ΔP 为堆积在直流母线处的不平衡功率； P_S 为风电输出功率； P_G 为并网功率； P_{hess} 为混合储能目标功率。当 $\Delta P < 0$ 时，混合储能系统释放能量，为电网提供并网功率缺额；当 $\Delta P > 0$ 时，混合储能系统吸收能量，消纳风电冗余功率。混合储能系统合理地充放电控制，可有效平抑风电并网波动功率。

2.1.2 故障穿越

故障穿越的目的是防止故障期间机组器件的过电压过电流引发的风机脱网^[13]。对于全功率风机变流器而言，直流母线电压稳定是故障穿越成功的关键。

$$\begin{cases} \Delta P = P_S - P_G = \frac{1}{2} C_{\text{dc}} \frac{dU_{\text{dc}}^2}{dt} \\ P_G = 1.5 E_g I_{\text{gd}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： C_{dc} 为直流并联电容； U_{dc} 为直流母线电压； E_g 为电网电压； I_{gd} 为电网电流 d 轴分量。电网发生故障时，电网电压 E_g 跌落，由于故障时功率传输受变流器容量限制， I_{gd} 不能同比增大，导致并网功率 P_G 减少，而风机侧由于变换器的隔离作用，输出功率 P_S 几乎不变，则故障期间直流母线 2 端功率失衡，即 $P_S \neq P_G$ ，不平衡功率在直流侧堆积，造成直流母线电压异常波动。可见，故障穿越的关键在于采用合理的控制策略平衡直流母线侧的冗余功率。

2.2 新型复合功率控制策略

针对基于混合储能的直驱风力发电系统，本文提出一种同时兼顾风电功率平抑与故障穿越的复合功率控制策略，控制总图如图 2 所示。

2.2.1 机侧变流器控制策略

机侧变流器 (rotor side convertor, RSC) 采用基于转子磁场定向的矢量控制，将 d 轴定位于转子磁链方向， q 轴滞后，当永磁同步发电机 (permanent magnet synchronous generator, PMSG) 稳定运行时，发电机电磁转矩 T_e 及输出功率 P_S 的表达式为

$$\begin{cases} T_e = 1.5 P \psi I_{\text{sq}} \\ P_S = T_e \omega_r \end{cases} \quad (4)$$

式中： P 为发电机极对数； ψ 为磁链； I_{sq} 为定子电流 q 轴分量； ω_r 为发电机旋转角速度。采用功率外环、电流内环的双闭环控制策略实现风电机组最大功率追踪。在 ω_r 恒定情况下，通过控制 I_{sq} 可以动态调节发电机转速和转矩，进而实现对 PMSG 发电功率的快速调节。

2.2.2 网侧变流器控制策略

网侧变流器 (grid side convertor, GSC) 采用基于电网电压定向的矢量控制，将旋转 dq 坐标系 d 轴定向于电网电压矢量方向，此时 $E_{\text{gd}} = E_g$ ， $E_{\text{gq}} = 0$ ，则 GSC 输出功率表达式为

$$\begin{cases} P_G = 1.5 E_g I_{\text{gd}} \\ Q_G = -1.5 E_g I_{\text{gq}} \end{cases} \quad (5)$$

式中： P_G 为 GSC 输出有功功率； Q_G 为 GSC 输出无功功率； E_g 为电网电压； I_{gd} 和 I_{gq} 分别为电网电流的 d 轴和 q 轴分量，分别控制 I_{gd} 和 I_{gq} 可以实现 P_G 和 Q_G 的解耦控制。通过直流母线电压外环、电网电流内环的 GSC 双闭环控制策略可以有效维持直流母线电压稳定，并实现对目标值的快速追踪。

本文在 GSC 双闭环控制中加入一个新型故障检测反馈环，即通过电压检测模块监测到故障电压后发出故障信号，分别反馈至 GSC 电流内环控制的前级故障电流计算模块和 RSC 控制环，逻辑控制如图 3 所示。其中，由于故障时功率传输受变流器容量限制，电网电流的 d 轴分量参考值 I_{gd}^* 的表达式可表示为

$$I_{\text{gd}}^* = \sqrt{I_{\text{glim}}^2 - I_{\text{gq}}^2} \quad (6)$$

式中： I_{glim} 为变流器最大电流限值。将由式 (6) 计算所得电网电流的 d 轴分量参考值与直流母线电压外环所得对应参考值进行比较，取 2 者较小值作为电网电流的 d 轴分量给定值，反馈至电流内环控制后经脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 得到脉冲信号，实时调节 GSC 并网输出功率。同时，当 RSC 收到故障信号，功率计算模块将 GSC 输出的功率最大值反馈至 RSC 功率外环和混合储能功率分配环，从而实时修正发电机输出功率和混合储能目标响应功率，减小故障功率在直流母线处的堆积。所提新型故障检测反馈环将 GSC、RSC 和混合储能系统的功率信息紧

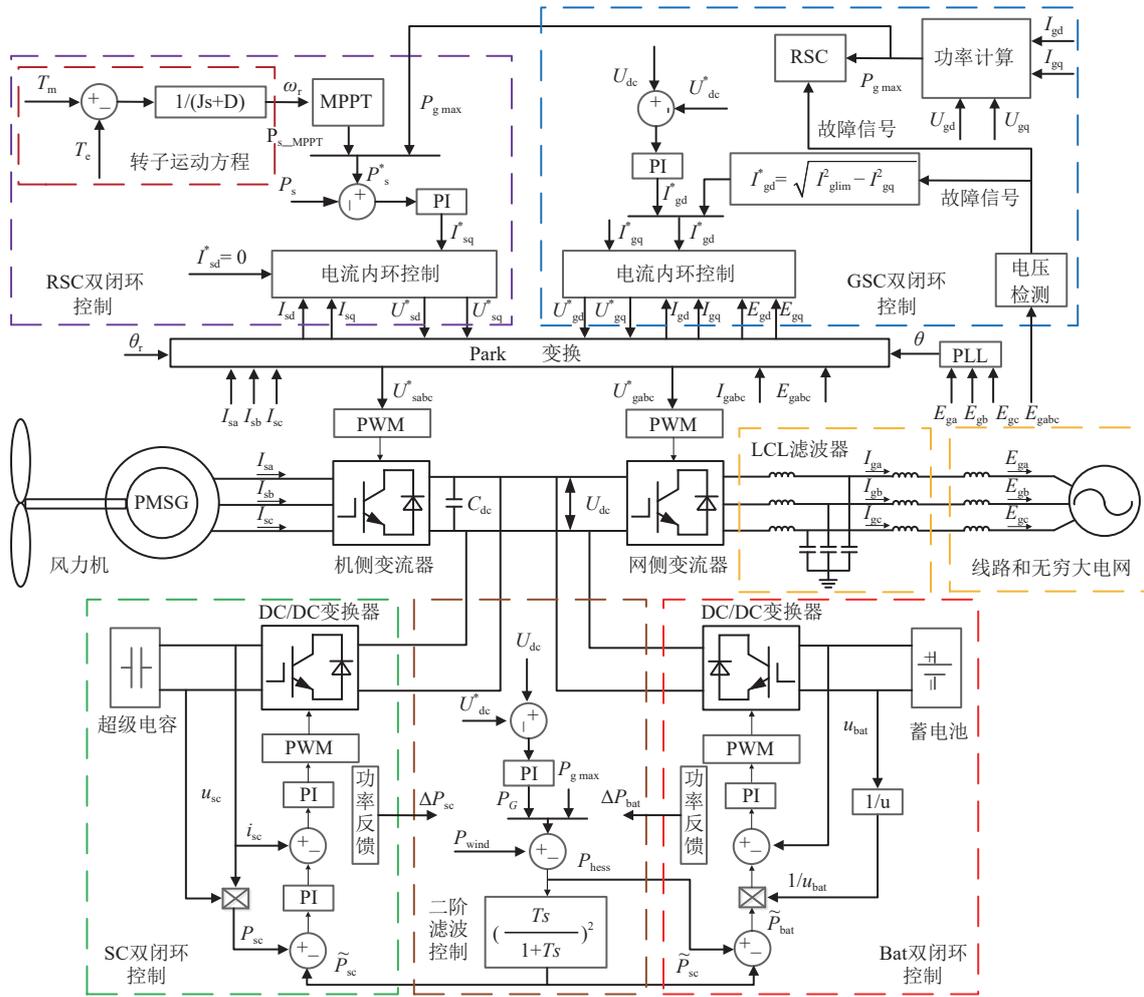


图 2 新型复合功率控制策略总图

Fig. 2 General drawing of new composite power control strategy

密连接，形成整机系统实时动态调控结构环，有效提升机组故障穿越能力。

2.2.3 改进型二阶滤波功率控制策略

传统一阶低通滤波器对目标功率指令的跟踪控制效果较差，功率分配精度较低，影响其在响应功率指令时的工作性能，最终降低对目标波动功率的平抑能力，甚至损害储能介质的使用寿命^[11]。因此，本文提出一种具有功率误差反馈环的改进型二阶滤波功率分配策略，基于一阶滤波传递函数，且考虑到输出响应的积分可等效于串联积分环节 1/s，构造二阶滤波传递函数，然后在传统混合储能功率分配方法的基础之上，增加 2 个功率误差前馈环节，即超级电容功率误差反馈环节和蓄电池功率误差反馈环节，具体论证过程如下：

首先，通过采取蓄电池和超级电容储能的实

际输出电压、电流，可得其实际响应功率分别为

$$\begin{cases} P_{bat}^{real} = U_{bat}^{real} \cdot I_{bat}^{real} \\ P_{sc}^{real} = U_{sc}^{real} \cdot I_{sc}^{real} \end{cases} \quad (7)$$

然后，上式所得实际响应功率与目标响应功率的差可得到其功率误差为

$$\begin{cases} \Delta P_{bat} = P_{bat} - P_{bat}^{real} \\ \Delta P_{sc} = P_{sc} - P_{sc}^{real} \end{cases} \quad (8)$$

最后，将所得功率误差反馈至混合储能目标响应功率，可得到修正后的混合储能目标响应功率的实际值为

$$P_{hess}^{real} = P_{hess} - (\Delta P_{bat} + \Delta P_{sc}) \quad (9)$$

综合联立式 (7) — (9) 并结合图 2 中构造的二阶滤波功率分配过程，则可得到改进型二阶滤波传递函数如式 (10) (11) 所示

$$\tilde{P}_{sc}(s) = \left(\frac{Ts}{1+Ts} \right)^2 \cdot [P_{hess}(s) - (\Delta P_{sc} + \Delta P_{bat})] \quad (10)$$

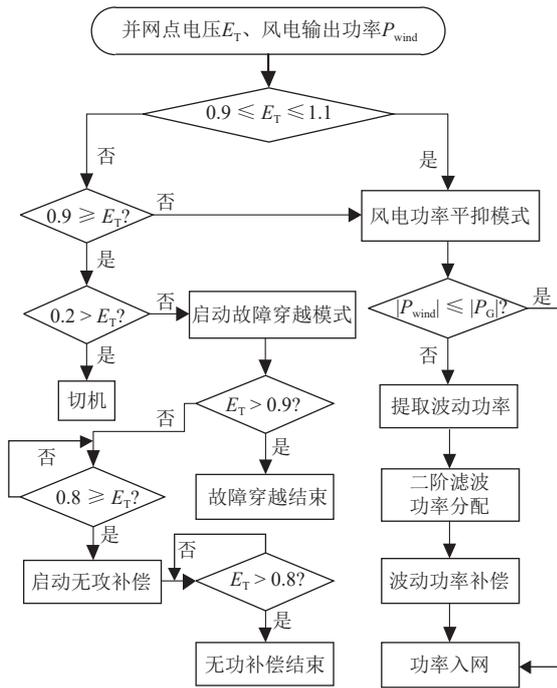


图 3 GSC 逻辑控制流程图

Fig. 3 Flowchart of GSC logic control

$$\tilde{P}_{bat}(s) = P_{hess}(s) - \tilde{P}_{sc}(s) = \frac{1 + 2Ts}{(1 + Ts)^2} \cdot [P_{hess}(s) - (\Delta P_{sc} + \Delta P_{bat})] \quad (11)$$

式中： \tilde{P}_{sc} 为本文改进型二阶滤波功率控制策略下超级电容储能的响应功率指令； \tilde{P}_{bat} 为该控制策略下蓄电池储能的响应功率指令；其中，超级电容储能响应高频波动功率指令，剩余低频分量为蓄电池储能的响应功率指令。可见，混合储能目标功率响应值由功率反馈环实时更新，经改进型二阶高通滤波环节得到超级电容及蓄电池的响应功率指令，可有效改善传统控制方法对目标响应功率的跟踪控制与分配精度。

综合分析可知，系统正常运行时，混合储能主要用于风电功率平抑，使风电功率平滑入网；系统发生故障时，混合储能主要用于配合 GSC 完成风电机组故障穿越，通过将 GSC 的故障反馈信号引入改进型二阶滤波功率分配环节，实时修正混合储能的目标功率指令，对实际目标功率具有更好的追踪控制效果，快速清除直流母线上的故障功率，保障系统安全稳定运行。

3 仿真验证

3.1 风电功率平抑仿真验证

针对本文所提新型复合功率控制策略的风电

功率平抑功能，设定传统一阶低通滤波功率分配方法为对比仿真对象进行验证分析。其中，混合储能系统各储能介质的容量配置根据文献 [20] 所示方法确定：蓄电池储能的额定功率设置为 200 kW，容量配置为 1 MW·h；超级电容储能则根据其自身特点，按照蓄电池的 1% 进行容量配置，为 0.01 MW·h，且假定超级电容储能总是能够满足系统的功率响应需求，两者的荷电状态（state of charge, SOC）初始值均设置为 0.6，即工作于最佳容量区间。

为验证风电功率平抑效果，本文以新疆某风电场容量为 2 MW 的单台风机某日 24 h 实际有功功率为仿真数据，则风电功率波形如图 4 所示。

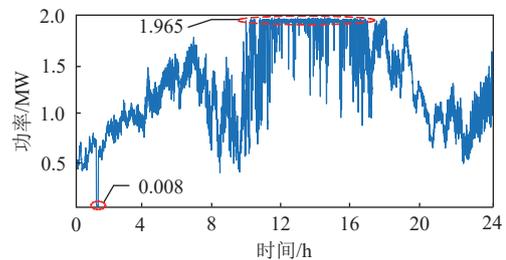


图 4 风电日输出有功功率

Fig. 4 Daily output active power of wind power

由图 4 可知，该风机日输出有功功率波动较为剧烈，波动功率的覆盖区间为 0.008~1.965 MW，应采取合理的功率平抑策略，否则将影响风电机组并网运行的稳定性。

分析图 5 所示对比曲线可知，2 种方法均能满足风电功率平抑目标，有效降低功率波动程度，使平滑的风电功率并入电网。但本文所提新型控制策略的功率平抑效果明显优于传统方法，且对原始风电功率的跟踪控制效果更佳，更能精确地满足并网要求。

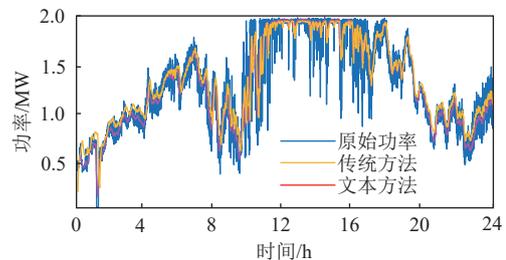


图 5 风电波动功率平抑效果对比曲线

Fig. 5 Contrast curve of leveling effect of wind power fluctuation

根据我国颁布的《风电场接入电力系统技术规定》标准可进行容量换算，符合本文仿真实验

数据的风电功率平抑标准为：1 min 时间尺度下风电功率波动量应小于 0.20 MW；10 min 时间尺度下风电功率波动量应小于约 0.67 MW。

分析图 6 可知，1 min 和 10 min 时间尺度的风电功率波动量均未超出其对应的限值标准，即可以认为经本文控制方法平抑后的风电功率达到了既定标准。

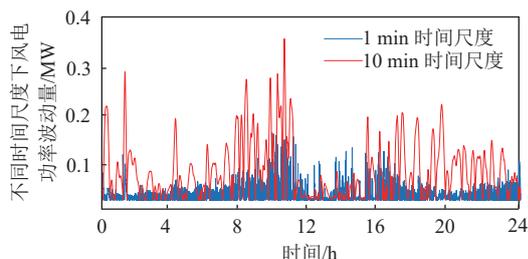


图 6 不同时间尺度下风电功率波动量变化曲线

Fig. 6 Variation curves of wind power fluctuations under different time scales

由图 7 可知，由于本文在改进型二阶滤波功率控制中加入功率反馈环的作用，超级电容储能快速响应高频段的波动功率，达到短时迅速的平抑效果；蓄电池储能则响应剩余低频段的波动功率，以实现波动功率的持续补偿。

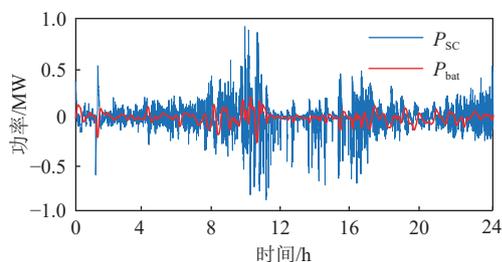


图 7 混合储能各介质的功率响应曲线

Fig. 7 Power response curve of each medium of hybrid energy storage

根据图 8 所示 2 者的 SOC 曲线变化可知，超级电容 SOC 变化幅度较大，作为前级功率补偿承担更多快速变化的波动功率，可用容量在其限制范围内得到充分利用；蓄电池 SOC 变化幅度较小，仅补偿剩余变化缓慢的波动功率，可减少蓄电池的充放电次数，满足风电功率平抑的同时延长蓄电池的使用寿命。

综合分析图 5—8 可知，相比于传统方法，本文所提具有功率误差反馈环的改进型二阶滤波功率控制策略不仅能够实现对目标功率的精确跟踪与分配，也优化了储能介质的充放电控制，最终

达到更好的风电功率平抑效果的同时延长储能介质使用寿命。

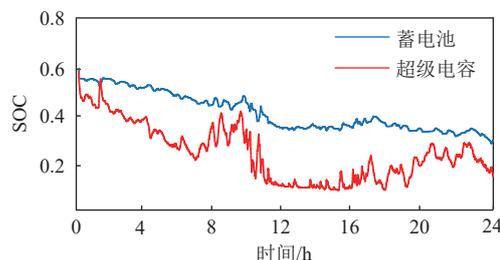


图 8 混合储能各介质 SOC 曲线

Fig. 8 SOC curves of each medium for hybrid energy storage

3.2 故障穿越仿真验证

为验证本文所提新型复合功率控制的故障穿越功能的有效性，在 3.1 节的基础上设计仿真模型，为了实验效果明显且易于分析，将直驱风机的单机容量设置为 50kW，故障类型以三相电网电压跌落为例进行仿真验证。具体参数见表 1。

表 1 故障穿越仿真参数

Table 1 Simulation parameters of fault ride-through

参数	数值	参数	数值
风机容量/kW	50	Bat额定容量/kW·h	25
风机额定电压/V	380	SC额定容量/kW·h	0.25
直流母线电压/V	800	电网频率/Hz	50
直流母线电容/mF	40	I_{glim}/pu	1.1

实验设置：风机于 0.3s 进入稳态并运行于高功率模式，0.8s 时：设置幅度为 50% 的三相电网电压跌落故障，1.2s 时故障切除。

图 9 所示为传统控制方法下故障穿越仿真波形图，分析可知，由于 GSC 运行于单位功率因数模式，无功电流参考值始终为零，投入故障后，电网电压发生跌落，为了维持直流母线电压稳定，有功电流参考值迅速升高并达到阈值，导致有功功率发生短暂振荡后由 1 pu 降落至 0.65 pu，母线电压失去稳压作用后发生波动并迅速抬升，当达到母线电压阈值时缓冲装置将投入使用，但传统的卸荷电阻难以达到稳定波动电压的平抑效果，必将导致风电机组故障穿越失败并触发切机保护，最终脱离电网。

图 10 为本文新型复合功率控制下的仿真波形，与传统方法对比分析可知，由于改进型 GSC 控制策略和混合储能控制策略的复合功率控制，有功

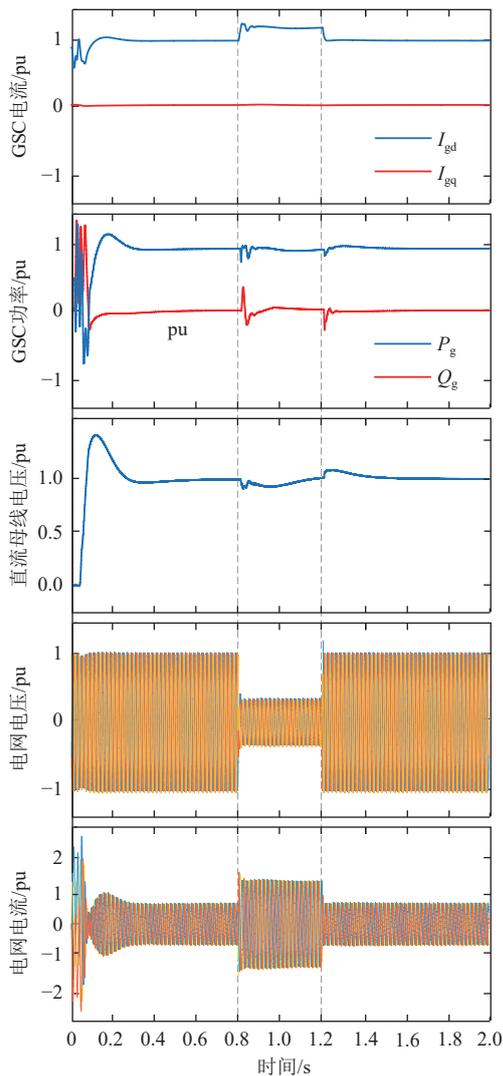


图 9 传统控制方法下故障穿越仿真结果

Fig. 9 Fault ride-through simulation results under traditional control methods

电流仅在故障投入和切出时发生微小变化且并未达到限流值，无功电流提供了短时的无功补偿，有功功率仅受到微小的故障影响后仍保持较为稳定的输出。超级电容和蓄电池储能结合 GSC 复合功率控制策略，通过合理的充放电控制迅速消纳堆积在直流母线处的不平衡功率，起到了明显的稳压作用，直流母线电压始终处于允许范围（1.1 pu）以内，风电机组仍可安全并网运行，故障穿越效果明显优于传统控制方法。

综合分析图 9 和图 10 可知，在本文所提新型复合功率控制策略的协调下，故障期间的不平衡功率由 GSC 和混合储能系统共同完成平抑任务，可有效改善传统控制方法下的故障穿越效果。

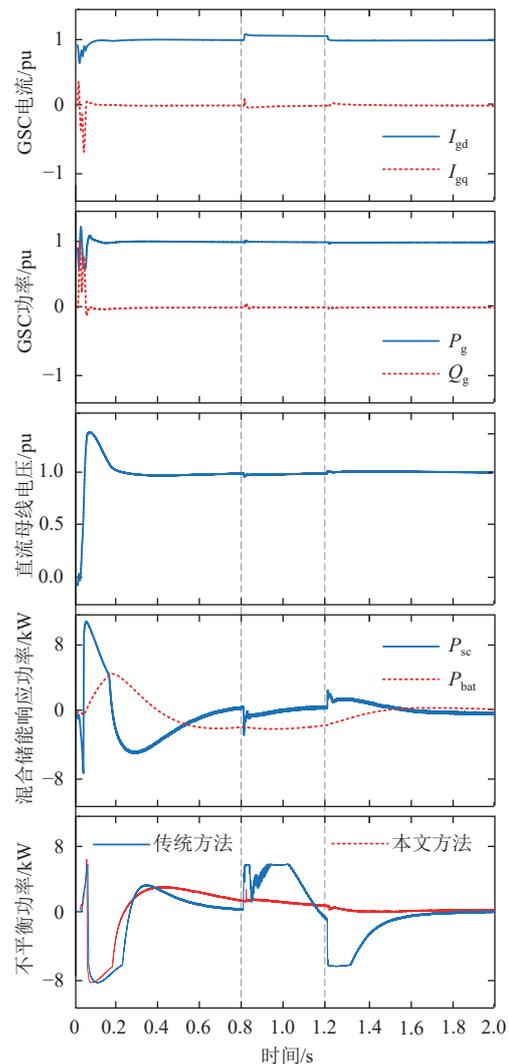


图 10 新型复合功率控制下故障穿越仿真结果

Fig. 10 Fault ride-through simulation results under new composite power control

4 结论

1) 针对风电功率平抑，本文提出的改进型二阶滤波功率分配策略，与传统方法相比，可实现对波动功率的精确跟踪和分配，风电功率平抑效果更好的同时延长储能介质使用寿命。

2) 针对故障穿越，本文提出的 GSC 和混合储能共同作用的复合功率控制策略，可有效平抑故障期间的不平衡功率，维持直流母线电压稳定，使系统基本不受故障影响，较传统控制方法具有更好的故障穿越能力。

3) 基于混合储能的直驱风力发电系统复合功率控制策略，提高了直驱风电机组的并网稳定性及系统的整体响应能力，下一步工作将围绕风

储系统离/并网切换控制策略展开研究。

参考文献

- [1] 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.
WU Jie, DING Ming. Hybrid energy storage and wind power fluctuation control strategy using adaptive wavelet packet decomposition[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(3): 7-12(in Chinese).
- [2] 杜佳耘, 雷勇, 李永凯, 等. 基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略[J]. *现代电力*, 2021, 38(1): 51-59.
DU Jiaying, LEI Yong, LI Yongkai, *et al.* Hybrid energy storage power allocation strategy based on parameter-optimized variational modal decomposition[J]. *Modern Electricity*, 2021, 38(1): 51-59(in Chinese).
- [3] 李卿, 杨国华, 唐浩, 等. 考虑蓄电池SOC安全范围的混合储能平抑风光功率波动策略[J]. *现代电力*, 2018, 35(3): 84-89.
LI Qing, YANG Guohua, TANG Hao, *et al.* A hybrid energy storage strategy for smoothing out scenic power fluctuations considering battery SOC safety range[J]. *Modern Electricity*, 2018, 35(3): 84-89(in Chinese).
- [4] 陈谦, 陈霄逸, 金字清, 等. 基于混合储能的大型风电场优化控制[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(4): 70-76.
CHEN Qian, CHEN Xiaoyi, JIN Yuqing, *et al.* Optimal control of large wind farms based on hybrid energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(4): 70-76(in Chinese).
- [5] 马速良, 马会萌, 蒋小平, 等. 基于Bloch球面的量子遗传算法的混合储能系统容量配置[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(3): 592-599.
MA Suliang, MA Huimeng, JIANG Xiaoping, *et al.* Capacity configuration of hybrid energy storage system based on Bloch sphere quantum genetic algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(3): 592-599(in Chinese).
- [6] 王玉梅, 黄清军, 朱东海, 等. 计及变换器输出电压约束的双馈风电机组故障电流特性分析[J]. *电网技术*, 2021, 45(11): 4233-4242.
MA Yumei, HUANG Qingjun, ZHU Donghai, *et al.* Analysis of fault current characteristics of DFIG considering converter output voltage constraints[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4233-4242(in Chinese).
- [7] 程志江, 李永东, 谢永流, 等. 带超级电容的光伏发电微网系统混合储能控制策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(10): 2739-2745.
CHENG Zhijiang, LI Yongdong, XIE Yongliu, *et al.* Hybrid energy storage control strategy for photovoltaic power generation microgrid system with super capacitors[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 2739-2745(in Chinese).
- [8] 田桂珍, 卢栋, 刘广忱, 等. 基于零相位低通滤波器的混合储能平抑直驱风电机组功率波动控制策略的研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(6): 72-78.
TIAN Guizhen, LU Dong, LIU Guangchen, *et al.* Research on the control strategy of hybrid energy storage based on zero-phase low-pass filter to stabilize the power fluctuation of direct-drive wind turbines[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(6): 72-78(in Chinese).
- [9] 靳雯皓, 刘继春, 刘俊勇. 平抑风电功率波动的新型储能系统控制策略[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(24): 78-87.
JIN Wenhao, LIU Jichun, LIU Junyong. A new energy storage system control strategy to suppress wind power fluctuations[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2018, 55(24): 78-87(in Chinese).
- [10] 何俊强, 师长立, 马明, 等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(7): 157-167.
HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, *et al.* A two-tier optimal configuration method for hybrid energy storage system based on meta-model optimization algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(7): 157-167(in Chinese).
- [11] 李学斌, 刘建伟. 采用二阶滤波的混合储能系统实时功率分配方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(5): 1650-1657.
LI Xuebin, LIU Jianwei. Real-time power distribution method for hybrid energy storage system using second-order filtering[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1650-1657(in Chinese).
- [12] 冯子木, 孙国强, 滕德红, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述[J]. *电力工程技术*, 2021, 196(2): 75-85.
FENG Zimu, SUN Guoqiang, TENG Dehong, *et al.* Review of low voltage ride through research on permanent magnet direct drive wind turbines[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 196(2): 75-85(in Chinese).
- [13] 颜湘武, 王德胜, 隗小雪, 等. 风电机组故障穿越与频率调节风储联合控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(17): 5911-5923.
YAN Xiangwu, WANG Desheng, KUI Xiaoxue, *et al.* Research on the combined control strategy of wind turbine fault ride-through and frequency adjustment wind storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(17): 5911-5923(in Chinese).
- [14] 李咸善, 叶浪, 程杉. 基于混合储能系统的双馈风力发电

- 系统直流电压控制策略[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(8): 3141–3146.
- LI Xianshan, YE Lang, CHENG Shan. DC voltage control strategy of doubly-fed wind power generation system based on hybrid energy storage system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(8): 3141–3146(in Chinese).
- [15] 甄永赞, 苏宁赛, 李美林. 适用于高/低电压穿越的双馈风机协同控制策略及其稳定技术研究[J]. *电网技术*, 2021, 45(1): 39–49.
- ZHEN Yongzan, SU Ningsai, LI Meilin. Research on cooperative control strategy and stability technology of doubly-fed fans suitable for high/low voltage ride through[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(1): 39–49(in Chinese).
- [16] 卢一菲, 陈冲, 金成日, 等. 直驱永磁风电机组高电压穿越协调控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(15): 50–60.
- LU Yifei, CHEN Chong, JIN Chengri, *et al.* High voltage ride through coordinated control strategy of direct drive permanent magnet wind turbines[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(15): 50–60(in Chinese).
- [17] SHEN Junyi, KHALIGH A. A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2015, 3(01): 223–231.
- [18] GAO Xueping, FU Lijun. SOC optimization based energy management strategy for hybrid energy storage system in vessel integrated power system[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 54611–54619.
- [19] 王博, 詹红霞, 张勇, 等. 考虑风电不确定性的风蓄火联合优化经济调度研究[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(1): 93–100.
- WANG Bo, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, *et al.* Research on combined optimization of economic dispatch of wind and fire considering the uncertainty of wind power[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(1): 93–100(in Chinese).
- [20] 杨水丽, 李建林, 惠东, 等. 用于跟踪风电场计划出力的电池储能系统容量优化配置[J]. *电网技术*, 2014, 38(6): 1485–1491.
- YANG Shuili, LI Jianlin, HUI Dong, *et al.* Capacity optimization configuration of battery energy storage system used to track planned output of wind farms[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(6): 1485–1491(in Chinese).

收稿日期: 2022-04-06

作者简介:

王腾(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与并网技术, E-mail: 1536842882@qq.com;

张新燕(1964), 女, 博士, 教授, 通信作者, 研究方向为电力系统及其自动化、新能源发电与并网技术, E-mail: xjcxzy@126.com;

何星柱(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电技术, E-mail: 289374779@qq.com;

王亚东(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: 2724397883@qq.com;

程叶凡(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: 2985724332@qq.com;

黄全伟(1996), 男, 学士, 研究方向为电力系统运行与维护, E-mail: 763436362@qq.com;

田云(1997), 男, 学士, 研究方向为电力系统运行与维护, E-mail: 694283512@qq.com。