



基于储能与风机协调控制的电压故障穿越策略

林毅 唐雨晨 陈浔俊 黄海 孙峰洲 江全元

A Voltage Ride-through Control Based on Coordination Between Energy Storage and Wind Turbine

LIN Yi, TANG Yuchen, CHEN Xunjun, HUANG Hai, SUN Fengzhou, JIANG Quanyuan

引用本文:

林毅, 唐雨晨, 陈浔俊, 等. 基于储能与风机协调控制的电压故障穿越策略[J]. 现代电力, 2023, 40(5): 788–796. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0089

LIN Yi, TANG Yuchen, CHEN Xunjun, et al. A Voltage Ride-through Control Based on Coordination Between Energy Storage and Wind Turbine[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(5): 788–796. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0089

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0089>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

带混合储能的光伏并网系统功率协调控制策略研究

Research on Power Coordination Control Strategy of Photovoltaic Grid-connected System with Hybrid Energy Storage
现代电力. 2019, 36(1): 37–44 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I1/37>

基于直流电压信号的光储系统协调控制策略

Coordination Control Strategy of Photovoltaic Energy Storage System Based on DC Voltage Signal
现代电力. 2020, 37(3): 285–293 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0549>

基于虚拟同步发电机控制技术的能量路由器交直流协调控制

AC/DC Coordinated Control of Power Router Based on Virtual Synchronous Generator Control Technology
现代电力. 2019, 36(2): 33–39 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I2/33>

双馈风电系统连接柔直电网电压频率协调控制策略

A Coordinated Control Strategy of Voltage and Frequency for Doubly-fed Wind Power Generation System Connected to Flexible HVDC Grid
现代电力. 2023, 40(4): 427–433 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0370>

虚拟同步双馈风机对同步机作用路径及低频振荡影响分析

Analysis of Impact of DFIG-based Wind Turbines with Virtual Synchronous Control on the Action Path and Low Frequency Oscillation of Synchronous Generator
现代电力. 2021, 38(3): 237–247 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0260>

含混合储能的独立微电网多时间尺度协调控制策略

Multi-time Scale Coordination Control Strategy of Isolated Microgrid With Hybrid Energy Storage
现代电力. 2020, 37(1): 74–82 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2018.1410>

基于储能与风机协调控制的电压故障穿越策略

林毅¹, 唐雨晨¹, 陈浔俊², 黄海³, 孙峰洲¹, 江全元²

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建省福州市 350000; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 3. 国网福建省电力有限公司, 福建省福州市 350000)

A Voltage Ride-through Control Based on Coordination Between Energy Storage and Wind Turbine

LIN Yi¹, TANG Yuchen¹, CHEN Xunjun², HUANG Hai³, SUN Fengzhou¹, JIANG Quanyuan²

(1. State Grid Fujian Economic Research Institute, Fuzhou 350000, Fujian Province, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China; 3. State Grid Fujian Electric Power Co. Ltd., Fuzhou 350000, Fujian Province, China)

摘要: 针对风电机组电压穿越问题, 提出一种基于储能与风机转子协调控制的电压故障穿越控制方法。利用风电机组转子惯量响应配合储能功率响应, 调节故障期间风机的输出有功功率, 进而减少储能装置所需补偿功率与容量, 同时保证风电机组并网电压维持在正常水平, 从而提高风电机组电压故障穿越能力。最后, 在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建双馈感应发电机和永磁同步电机模型, 分别对电压对称跌落、不对称跌落与电压抬升进行仿真验证。仿真结果证明了所提故障穿越控制方法的有效性。

关键词: 储能; 协调控制; 双馈感应发电机; 永磁同步发电机; 电压穿越

Abstract: In allusion to the voltage ride through of wind power generating units, a voltage fault ride-through control method based on the coordinated control of energy storage and rotor of wind turbines was proposed. By use of rotor inertia response of the wind turbine generating unit cooperated with power response of energy storage the active power output of wind power generating units during the fault was regulated and then the compensation power and the capacity required by the energy storage device was reduced, meanwhile it was ensured that the grid-connected voltage of the wind turbine generating unit was maintained at the normal level, thus the voltage fault ride-through ability of wind turbine generating units was improved. Finally, by using of MATLAB/Simulink platform the model of doubly-fed induction generator (abbr. DFIG) and permanent magnet synchronous generator (abbr. PMSG) were constructed, and the simulation validation on symmetrical voltage sag, asymmetrical voltage sag and voltage rise was performed. Simulation results show that the proposed fault ride-through control method is effective.

Keywords: energy storage; coordinated control; doubly-fed induction generator; permanent magnet synchronous generator; voltage ride through

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0089

0 引言

随着新能源的快速发展, 接入电网的风电场规模不断增大, 装机比例不断提高。然而, 风力资源因其波动性和随机性, 直接导致风机出力具有不确定性, 会对电网产生包括频率、电压稳定性影响, 危及电网安全稳定运行。因此, 我国针对风电场发电并网制定了相应的风电运行准则, 其中, 在风机并网中考察风机并网性能的一项重要指标便是风机电压故障穿越能力。根据电网电压故障类型, 可以分为: 低电压穿越^[1-2]、高电压穿越^[3-7]以及连续穿越^[8]。

目前, 大部分风电机组一般通过配置撬棒保护疏导故障时的不平衡功率^[8-10]。但撬棒保护存在一系列缺点: 首先, 撬棒保护启动后, 风机转子转速控制以及风机无功控制将失效; 其次, 连续多次的故障穿越将导致撬棒保护频繁动作, 可能使散热电阻因过热而失效; 三是风机不平衡功率将被消耗为热能而无法得到有效利用。

随着储能技术应用场景不断增加, 在风电并网系统中的配置储能设备^[11-12], 消纳风机系统发生电压穿越的不平衡能量, 为风机电压穿越故障提供了一种解决思路。文献^[11]在传统低电压穿

越控制策略的基础上，利用转子储能的方式存储电网故障时产生的不平衡功率。但是，其电压跌落幅度只有 40%，不能应对更深的电压跌落。文献 [12] 基于储能型动态电压恢复器，采用非线性自适应控制提高了风机低电压穿越能力。文献 [13] 指出低电压穿越期间，锁相环 (phase locked loop, PLL) 的不稳定扰动将导致风电并网系统的不稳定振荡，但该文献储能仅是对系统作电流源处理。文献 [14] 分析了储能系统接入的混合风电场非对称电网故障时的等效阻抗。文献 [15] 采用模糊控制的方法利用转子储能的方式提高了风电机组在电网非对称故障下风机的低电压穿越能力，但是储能设备与风机转子之间没有采用协调控制，导致储能设备设计容量较大。文献 [16-17] 利用储能与风机之间协调控制，调整风机有功功率输出，但是比例系数并未得到明确。文献 [18-20] 在永磁同步风力发电机的中间直流环节接入储能装置，用以储存故障期间直流侧电容上的不平衡能量。文献 [18] 基于模糊控制原理，提出一种计及风机运行工况的经济优化储能的低电压穿越控制策略。文献 [19] 考虑在高风速条件下，风机转子惯性储

能容量较低，通过减载技术调整风机机侧变换器输出。

为克服现阶段风电机组电压故障穿越存在的缺陷，本文提出了一种基于储能与风转子协调控制的风电电压穿越控制方法，在文献 [16] 的基础上进一步明确风电机组转子惯量响应与储能响应的比例协调关系，利用储能配合风机转子惯量响应，补偿故障期间风机不平衡功率，进而提高风电机组的电压穿越能力。

1 系统结构

图 1 为本文研究的基于储能的风电机组并网结构示意图，风电机组为双馈感应发电机组 (doubly fed induction generator, DFIG) 和永磁同步发电机组 (permanent magnet synchronous generator, PMSG)，其中双馈发电机具体包含风轮、齿轮箱、感应电机、转子侧变换器 (rotor side converter, RSC)、网侧变换器 (grid side converter, GSC) 以及相应的控制系统。永磁同步发电机组包含机侧变换器和网侧变换器。系统储能装置 (energy storage, ES) 具体包含直流侧储能单元、储能并

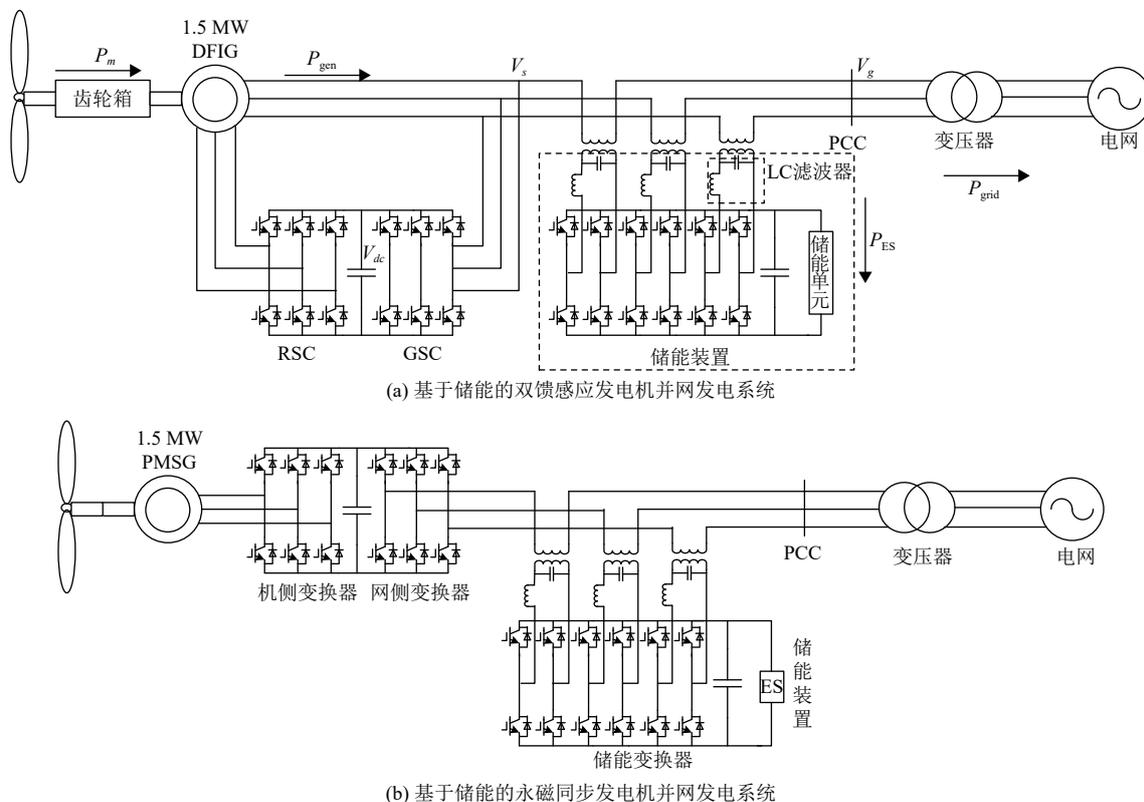


图 1 基于储能的风力发电并网系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grid-connected wind power generation system based on energy storage

网逆变器、LC滤波器；储能单元用于故障期间不平衡能量的吸收与释放，保证风机端电压维持在正常水平；储能并网逆变器采用三个单相变换器结构；LC滤波器以串联变压器的方式接入电网。

双馈感应风机中的网侧变换器的主要任务有两个：一是风机中间直流环节的电容电压控制；二是网侧变换器输出的无功功率控制。其中直流环节的稳态控制是风电机组正常运行与控制的关键。基于电网电压定向时，网侧变换器的电压方程可表示为：

$$\begin{cases} u_{gd} = -r_g i_{gd} - L_g \frac{di_{gd}}{dt} + \omega_1 L_g i_{gq} + u_{sd} \\ u_{gq} = -r_g i_{gq} - L_g \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_1 L_g i_{gd} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $u_{gd}, u_{gq}, i_{gd}, i_{gq}$ 是网侧变换器输出电压、电流的 dq 轴分量； r_g, L_g 是网侧变换器等效电阻、电感。

双馈感应风力发电机网侧变换器输送至电网的功率方程：

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} u_{sd} i_{gd} \\ Q_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_{gq} \end{cases} \quad (2)$$

永磁同步风力发电机网侧变换器输出的有功功率与无功功率可以表示为：

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_{gd} i_{gd} + u_{gq} i_{gq}) = \frac{3}{2} u_{gd} i_{gd} \\ Q = \frac{3}{2} (u_{gd} i_{gq} - u_{gq} i_{gd}) = -\frac{3}{2} u_{gd} i_{gq} \end{cases} \quad (3)$$

风机中间直流环节的动态电压方程为：

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{dc} - I_{load} \quad (4)$$

式中： C_{dc} 是风机中间侧直流电容； I_{dc} 是转子侧变换器输出直流电流； I_{load} 是网侧变换器输入直流电流。

正常情况下，转子侧变换器按照最大功率跟踪进行控制。其输出的有功、无功功率参考值可表示为：

$$\begin{cases} P_s^* = \frac{P_m}{1-s} \\ Q_s^* = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： P_m 为风力机在风速确定时传送至发电机的最大功率； s 为转差率。需要注意的是，永磁同步发电机转差率为 0。

2 基于储能与风机转子的比例协调控制

2.1 协调控制策略原理

图 2 给出了本文所提协调控制策略示意图。在并网点电压正常情况下，风电机组的转子侧变换器用于实现风电机组的最大功率跟踪功能和转子侧输出有功无功的解耦控制，网侧变换器用于实现对直流侧电压的稳定控制及网侧有功无功的解耦控制，储能装置不动作；电网故障导致电压突变时，启动风电机组-储能装置协调控制策略，将风电机组捕获的风能部分转化为转子旋转动能，补偿一部分不平衡功率，减少风电机组端口输出

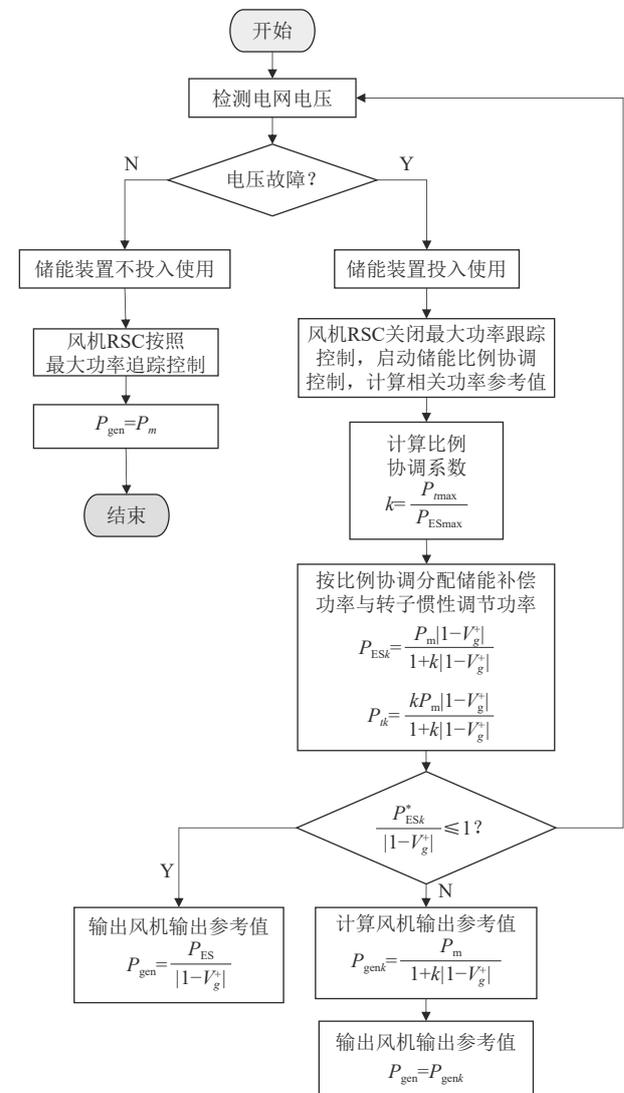


图 2 储能与风机转子的比例协调控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of proportional coordinated control of energy storage and wind turbine rotor

的有功功率，以降低储能装置所需容量。

如图 2 所示，基于储能的风电机组电压故障穿越协调控制主要由以下步骤实现：

1) 检测当前电网电压，判断电网是否发生故障。根据判断结果，切换风机 RSC 控制策略。具体为：电网电压正常情况下，储能装置不投入使用，风机 RSC 有功输出按照最大功率跟踪控制；电网故障时，储能装置投入使用，风机 RSC 关闭最大功率跟踪控制，启动风机机组-储能装置协调控制策略。

2) 基于储能与风机转子惯性调节的比例协调控制，计算比例协调系数，用于故障期间储能补偿功率与风机转子惯性调节功率的协调分配，实现储能-风机协调控制。

3) 计算储能装置吸收/释放功率参考值、风机转子惯性调节功率参考值，根据功率平衡关系，计算当前风机输出有功功率参考值。

4) 根据储能能量管理策略^[6]，判断给出最终故障期间风机 RSC 的有功功率参考值。

5) 返回步骤 1)，直至故障结束，风机完成电压穿越。

2.2 故障期间风机有功功率参考值

根据图 2 所示的协调控制策略风机有功输出参考值的计算流程。首先电网故障发生后，记 P_{grid} 为电网吸收的有功功率， P_{ES} 为储能响应吸收/释放的有功功率， P_t 为转子惯量调节吸收/释放的有功功率， P_{gen} 为风机机端输出功率。则故障期间，风机输出功率平衡表达为：

$$P_m = P_t + P_{\text{ES}} + P_{\text{grid}} \quad (6)$$

根据储能型动态电压调节器特性，设故障后风机并网点电压正序分量标么值为 V_g^+ ，则储能响应功率可由式 (7) 计算得到。

$$P_{\text{ES}} = (1 - V_g^+) P_{\text{gen}} \quad (7)$$

若故障期间风机机组输出功率保持不变时，风机机组输出功率和注入电网之间的不平衡功率完全由储能装置吸收，将导致储能补偿功率较大，所需储能装置容量增加，进而增大储能成本。

本文考虑风机转子及叶片具有较大惯性，在电网电压故障时，可利用风机的转动惯量吸收/释放部分不平衡功率，以减少储能需求。故障过程中，转子角速度变化可表示为：

$$P_m - P_{\text{gen}} = J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_t \quad (8)$$

式中： J 为风机转子转动惯量； ω 为转子旋转角速度。

其次，记储能响应及转子惯量调节功率的协调比例为 k ，即 $P_{\text{ES}} = kP_t$ ，可得故障穿越期间，风机输出有功功率、储能功率、转子惯性调节功率分别为：

$$\begin{cases} P_{\text{gen}k} = \frac{P_m}{1+k} \left| \frac{1-V_g^+}{1-V_g^+} \right| \\ P_{\text{ES}k} = \frac{P_m}{1+k} \left| \frac{1-V_g^+}{1-V_g^+} \right| \\ P_{tk} = \frac{kP_m}{1+k} \left| \frac{1-V_g^+}{1-V_g^+} \right| \end{cases} \quad (9)$$

最后，由公式 (9) 计算所得的风机输出有功功率参考值经过储能单元的能量管理策略^[6]后，最终得到故障期间风电机组输出的有功功率参考值 (标么值) 为：

$$P_{\text{gen}}^* = \min \left\{ \left| \frac{P_{\text{ES}k}^*}{1-V_g^+} \right|, 1 \right\} \quad (10)$$

2.3 储能与风机转子的比例协调系数

储能装置最大功率 P_{ESmax} 及功率分配系数 k 通过以下方式确定。

电网电压发生最严重故障，即电网电压三相对称跌落为零时，电网可吸收的功率降为零，此时储能装置吸收的功率最大。考虑风机转子的极限转速为 ω_m ；运行初始转速为 ω_0 ；惯性时间常数 $H = \frac{J\omega_N^2}{2S}$ ， S 为额定视在功率， ω_N 为额定转速，零电压穿越时间 t 。以风机转子转速不超过极限为约束条件，有：

$$P_{\text{ESmax}} = P_{\text{gen}} \geq P_m - \frac{J(\omega_m^2 - \omega_0^2)}{2t} \quad (11)$$

同时，考虑在所提控制策略下，风电机组能够平稳实现低电压穿越的条件为：风机转子惯量响应储能应小于其最大可存储的转子动能，故有：

$$P_{t\text{max}} = \frac{J(\omega_m^2 - \omega_0^2)}{2t} \quad (12)$$

由此，储能与转子惯性调节的不平衡功率比例 k 由最大风机转子惯性调节功率 $P_{t\text{max}}$ 与最大储能功率 P_{ESmax} 确定：

$$k = \frac{P_{tmax}}{P_{ESmax}} \quad (13)$$

3 仿真结果

在 Matlab/Simulink 中搭建双馈异步风机与永磁同步风机仿真模型。双馈异步风机与永磁同步风机额定容量为 1.5MW，储能按照 30% 额定容

表 1 DFIG 仿真参数

Table 1 Simulation parameters of DFIG

参数名称	数值	参数名称	数值
风速	12m/s	额定功率	1.5MW
额定电压	575V	定子电阻	0.023 pu
定子漏感	0.18 pu	转子电阻	0.016 pu
转子漏感	0.16 pu	时间常数	5 s

表 2 PMSG 仿真参数
Table 2 Simulation parameters of PMSG

参数名称	数值	参数名称	数值
风速	12m/s	额定功率	1.5MW
额定电压	690V	定子电阻	0.027 pu
定子漏感	0.513 pu	磁链	1.19 pu
转子漏感	0.513 pu	时间常数	5.02 s

量进行配置。风机具体参数由表 1 与表 2 分别给出。分别对影响较严重的三相对称故障、发生概率较高的单相故障及电压对称升高故障，按照国家电网公司电压穿越标准进行仿真。

3.1 三相对称电压跌落故障

首先，按照国家风电并网准则 [1] 中的低电压穿越标准对电网电压发生三相对称跌落故障进行

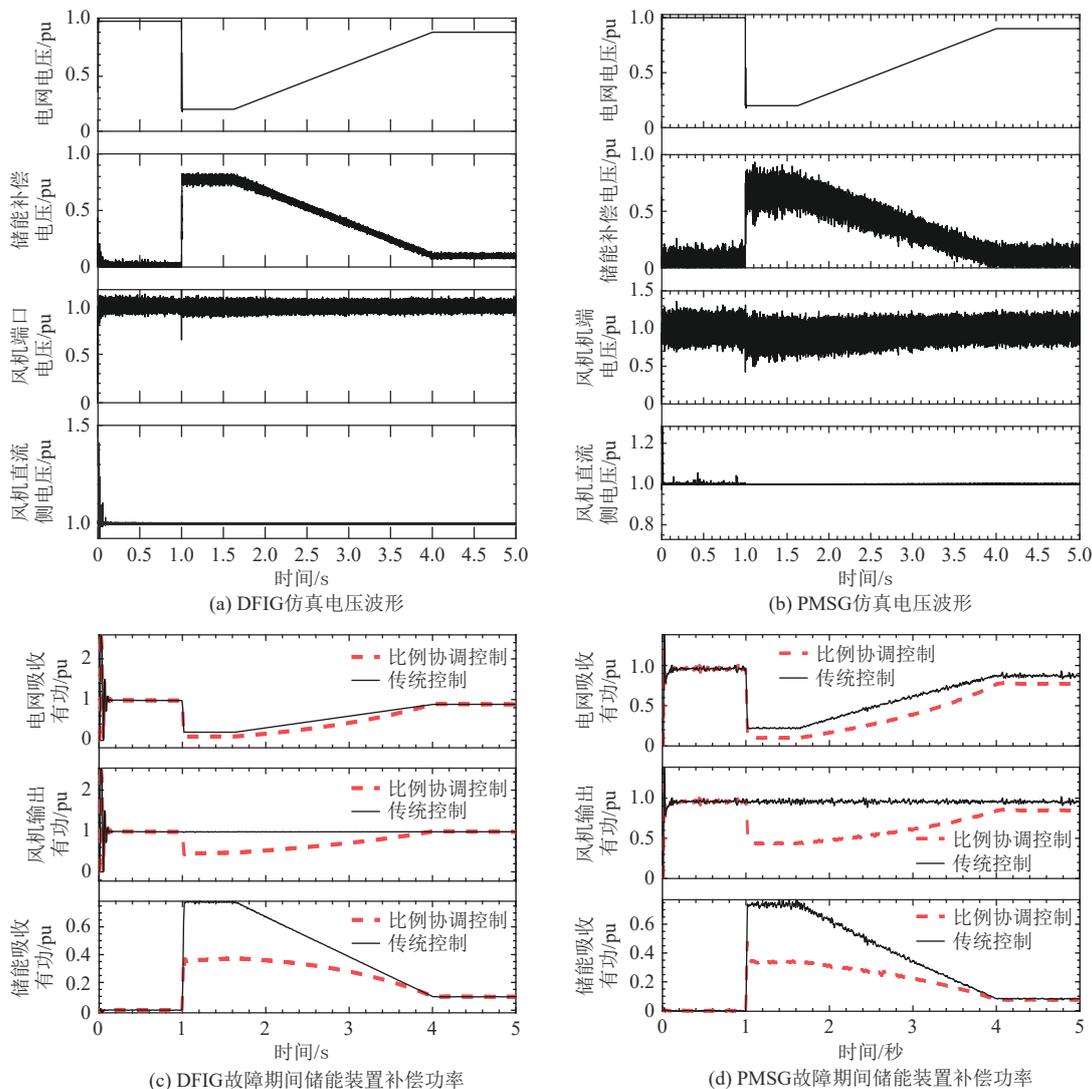


图 3 电压三相对称跌落故障穿越仿真结果

Fig. 3 Simulation waveforms of three-phase symmetrical voltage sag

仿真。仿真波形如图 3 所示。1 s 时故障开始，电网电压跌落至 0.2 pu，持续 625 ms，然后开始恢复，在 4 s 时电网电压恢复至 0.9 pu。故障期间储能变换器对并网点电压进行完全补偿，使风机机端电压始终维持在正常水平。

一方面，通过调节转子转速，实现不平衡功率与转子动能间的转换，从而调节风机输出的有功功率。故障开始时 DFIG 机端输出的有功功率骤降为 0.375 pu 左右，并随着电网电压的恢复而上升，而未采用比例协调控制的风机输出始终按照最大功率跟踪策略进行控制。另一方面，储能吸收剩余不平衡功率，大小为 0.375 pu。PMSG 仿真结果与 DFIG 结果类似。

由上述分析可知，本文所提协调控制策略能

够减少故障期间储能装置的补偿功率与所需容量，在双馈异步风机应用场景中，其最大补偿功率能减小 53.12%；在永磁直驱同步风机应用场景中，最大补偿功率能减少 53.33%。

3.2 单相电压跌落故障

单相故障是电力系统中最普遍的故障类型，对本文所研究系统进行 a 相电压跌落故障仿真。图 4 给出了 a 相电压按照国家电网公司低电压穿越标准变化时的仿真波形图。故障期间，DFIG 应用场景下风机输出有功功率下降至 0.8 pu，储能所需补偿最大功率仅为 0.18 pu；PMSG 场景下风机输出有功功率下降至 0.7 pu，储能所需最大功率为 0.16 pu。

对比未采用协调控制策略，其最大功率能减

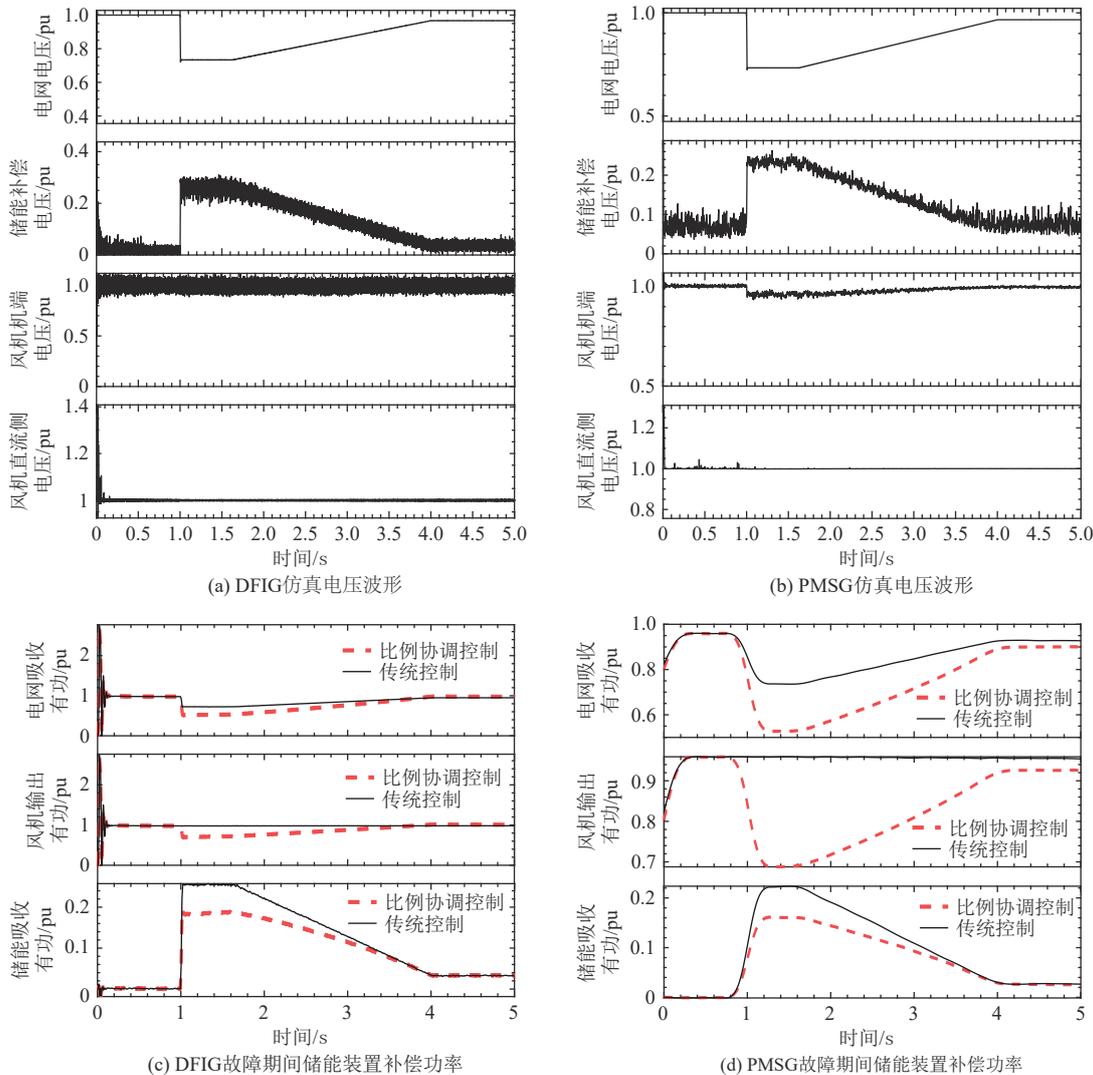


图 4 电压单相不对称跌落故障穿越仿真结果

Fig. 4 Simulation waveforms of voltage ride-through cause by single phase asymmetrical voltage sag

小 27.45%；在永磁直驱同步风机应用场景中，最大功率能减少 37.25%。

3.3 三相对称电压抬升故障

对风电机组并网电压上升至 1.3 pu，持续 200ms 进行仿真。仿真波形如图 5 所示。在 0.3 s 时电网电压升高至 1.3 pu，持续时间为 200 ms。此时在 DFIG 场景下储能变换器发出的功率为 0.23 pu，以满足两侧的功率平衡；PMSG 场景下储能所需补偿功率为 0.17 pu。风电机组同样不受高电压故障的影响，保持正常运行。

同时，对比未采用比例协调控制策略的仿真结果，其最大补偿功率能减小 22.80%；在永磁直驱同步风机应用场景中，最大补偿功率能减少 25%。

综上所述，本文基于储能与风机转子的比例

协调控制策略可以提升风电故障穿越能力，帮助风机实现低电压和高电压穿越，从而提升风电电压安全稳定水平。同时，如表 3 所示，所采用的比例协调控制策略能够充分利用转子转速调节对不平衡功率进行补偿，进而降低储能装置所需容量。

4 结论

本文基于储能与风机转子惯性的比例协调控制策略，在电网电压故障期间，风电机组和电网之间的不平衡功率由储能装置吸收。同时采用风电机组转子惯量和储能装置之间的协调控制策略，一方面通过机械惯性实现不平衡电能与风机转子的旋转动能之间的转换补偿，减少风机输出至电网的有功功率，从而减少了储能装置所需的补偿功率和容量。在双馈异步风机应用场景中，低电

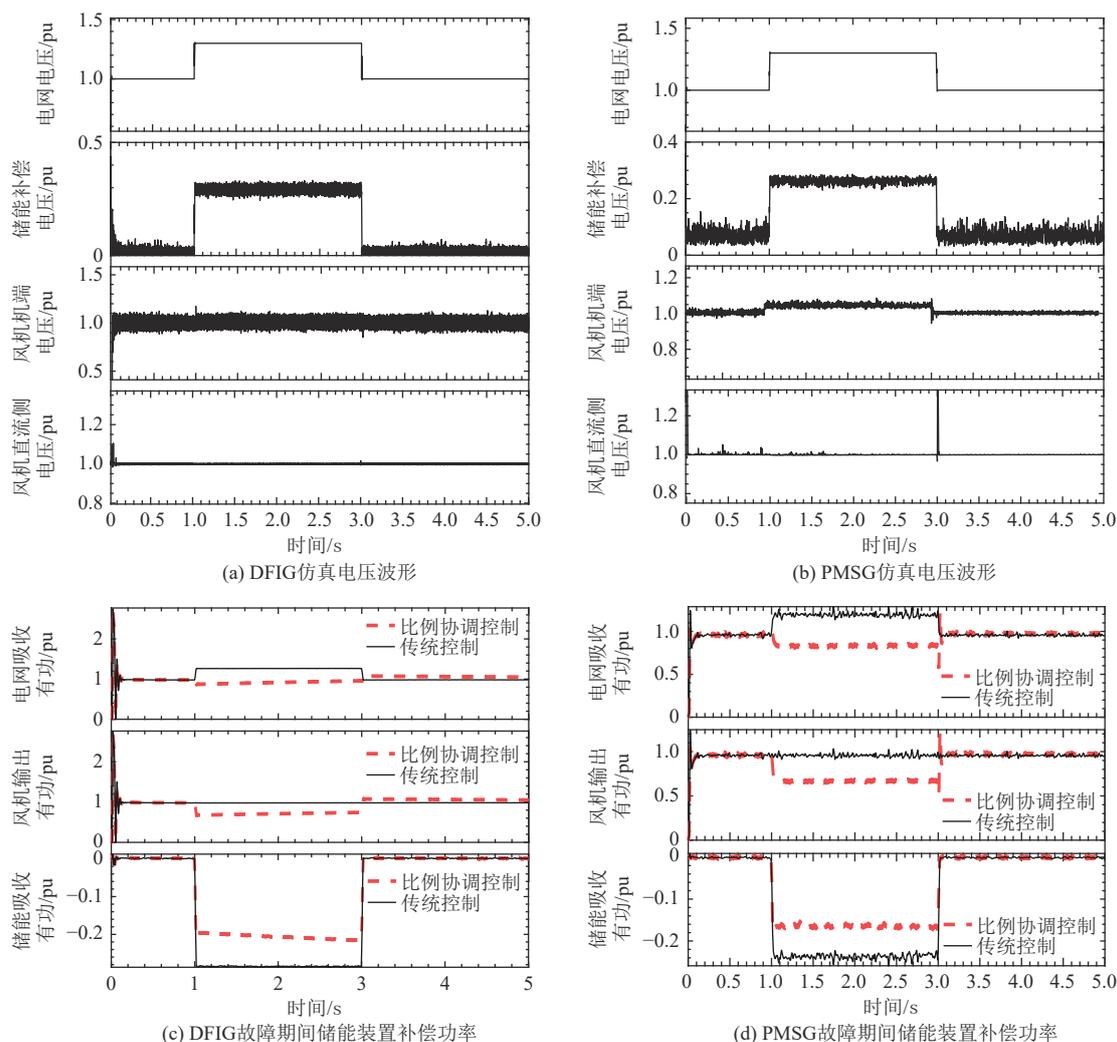


图 5 电压抬升故障穿越仿真结果

Fig. 5 Simulation waveforms of voltage ride-through caused by voltage rise fault

表 3 储能所需补偿最大有功功率 (标么值) 对比
Table 3 Comparison of the required maximum compensated active power for energy storage (pu value)

故障类型		协调控制	传统控制	对比/%
对称低电压穿越	DFIG	0.375	0.8	53.12
	PMSG	0.35	0.8	53.33
单相低电压穿越	DFIG	0.18	0.26	27.45
	PMSG	0.16	0.22	37.25
对称电压抬升	DFIG	0.23	0.3	22.80
	PMSG	0.17	0.3	25

压穿越故障期间, 基于储能与转子惯性的协调控制能较无协调控制的传统策略减少 53% 的补偿功率, 高电压穿越则能减少 22.8% 的储能补偿功率; 在永磁同步风机应用场景中, 低电压穿越能减少 53.33% 的储能补偿功率, 而在高电压穿越中, 则减少 25% 的补偿功率。

另一方面, 进一步明确了风电机组转子惯性调节功率与储能补偿功率的比例协调关系及具体比例系数, 即采用最大转子惯性调节功率与最大储能补偿功率之比作为协调分配依据。因此该策略能够保证风电机组在并网发生电压故障时的正常运行, 从而提高风电机组电压故障穿越的能力。

致 谢

本文得到了国网福建省电力有限公司科技项目 (52130N210008) 的资助, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] 王雪梅, 王艺博, 刘雨桐, 等. 基于虚拟电抗的主动支撑型新能源机组低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2022: 1-21.
WANG Xuemei, WANG Yibo, LIU Yutong, *et al.* Low voltage ride through control method of actively supported new energy unit based on virtual reactance[J]. *Power System Technology*, 2022: 1-21 (in Chinese).
- [2] 姚骏, 陈西寅, 夏先锋, 等. 含飞轮储能单元的永磁直驱风电系统低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 38-44.
YAO Jun, CHEN Xiyin, XIA Xianfeng, *et al.* A low voltage ride-through control strategy for direct-driven permanent magnet wind power generation system with fly-wheel energy storage unit[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(13): 38-44 (in Chinese).
- [3] 周昌平, 汪震, 甘德强, 等. 双馈风机并网系统高电压穿越控制策略稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7415-7426.
ZHOU Changping, WANG Zheng, GAN Deqiang, *et al.* Stability analysis of high voltage ride through control strategy for DFIG integrated system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(20): 7415-7426.
- [4] 李少林, 王伟胜, 王瑞明, 等. 双馈风电机组高电压穿越控制策略与试验[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 76-82.
LI Shaolin, WANG Weisheng, WANG Ruiming, *et al.* Control strategy and experiment of high voltage ride through for DFIG-based wind turbines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(16): 76-82 (in Chinese).
- [5] 孙丽玲, 王艳娟. 电网电压对称骤升时DFIG暂态电流分析及限流电阻阻值优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(07): 123-129.
SUN Liling, WANG Yanjuan. Transient current analysis and current limiting resistance optimization of DFIG under symmetric voltage swell[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(07): 123-129 (in Chinese).
- [6] 李曼, 王冰, 曲立楠, 等. 基于暂态功率特性调整无功电流的高电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(06): 59-66.
LI Man, WANG Bing, QU Linan, *et al.* Control strategy of high voltage ride through for adjusting reactive current based on transient power characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(06): 59-66 (in Chinese).
- [7] 郭强, 王鹤, 聂永辉, 等. 考虑恢复暂态过程的直驱发电系统低电压穿越模型参数解耦辨识方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3430-3440.
GUO Qiang, WANG He, NIE Yonghui, *et al.* Decoupling identification method of low-voltage ride-through model parameters of direct drive power generation system considering recovery transient process[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(10): 3430-3440 (in Chinese).
- [8] 王德胜, 颜湘武, 贾焦心, 等. 永磁直驱风机基于虚拟同步技术的高、低电压连续故障穿越策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2164-2174.
WANG Desheng, YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, *et al.* High/low voltage continuous fault ride through strategy of PMSGs based on virtual synchronization technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(6): 2164-2174 (in Chinese).
- [9] 周步祥, 董申, 林楠, 等. 计及撬棒电路的双馈风电机组二次骤升故障穿越特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 152-159.
ZHOU Buxiang, DONG Shen, LIN Nan, *et al.* Analysis of

- double-fed wind turbine's secondary high voltage ride-through characteristics considering the crowbar circuit[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 152–159(in Chinese).
- [10] 姜惠兰, 范中林, 陈娟. 动态调整转子撬棒阻值的双馈风电机组低电压穿越方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(1): 125–131.
JIANG Huilan, FAN Zhonglin, CHEN Juan. Low voltage ride-through method of DFIG based wind turbines by dynamically adjusting crowbar resistance of rotor[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(1): 125–131(in Chinese).
- [11] 杨艺云, 肖静, 张阁, 等. 永磁直驱风机低电压穿越协调控制策略[J]. *电气传动*, 2017, 47(07): 43–49.
YANG Yiyun, XIAO Jing, ZHANG Ge, *et al.* Coordinated low voltage ride through control strategy for permanent magnet direct drive wind turbine[J]. *Electric Drive*, 2017, 47(07): 43–49(in Chinese).
- [12] YAN L, CHEN X, ZHOU X, *et al.* Perturbation compensation based nonlinear adaptive control of ESS-DVR for the LVRT capability improvement of wind farms [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(13): 1500–1507.
- [13] LIU J, YAO W, FANG J, *et al.* Stability analysis and energy storage-based solution of wind farm during low voltage ride through[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 101: 75–84.
- [14] YAO J, LI J, GUO L, *et al.* Coordinated control of a hybrid wind farm with PMSG and FSIG during asymmetrical grid fault[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 95: 287–300.
- [15] 黄可, 高锋阳, 杜强, 等. 一种永磁直驱风力发电系统不对称电网故障下低电压穿越方法[J]. *电机与控制应用*, 2017, 44(03): 96–101+15.
HUANG Ke, GAO Fengyang, DU Qiang, *et al.* A low voltage ride through strategy for directly-driven wind turbine with direct-drive permanent magnet synchronous generator under asymmetric fault[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2017, 44(03): 96–101+15(in Chinese).
- [16] 许建兵, 江全元, 石庆均. 基于储能型DVR的双馈风电机组电压穿越协调控制[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(04): 14–20.
XU Jianbing, JIANG Quanyuan, SHI Qingjun. Coordinated control of voltage ride through for DFIG wind turbine system using energy-based DVR[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(04): 14–20(in Chinese).
- [17] WESSELS C, GEBHARDT F, FUCHS F W. Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(2): 807–815.
- [18] KIM C, KIM W. Coordinated fuzzy-based low-voltage ride-through control for PMSG wind turbines and energy storage systems[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 105874–105885.
- [19] KIM C, KIM W. Low-voltage ride-through coordinated control for PMSG wind turbines using de-loaded operation[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 66599–66606.
- [20] KIM C, KIM W. Enhanced low-voltage ride-through coordinated control for PMSG wind turbines and energy storage systems considering pitch and inertia response[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 212557–212567.

收稿日期: 2022-03-21

作者简介:

林毅(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网及电网规划, E-mail: liny-02@qq.com;

唐雨晨(1990), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、新能源及储能运行控制, E-mail: h0980164@163.com;

陈浔俊(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源电力系统分析与运行控制, E-mail: cxjpgl11@163.com;

江全元(1975), 男, 博士, 教授, 通信作者, 研究方向为电力系统高性能计算, E-mail: jqy@zju.edu.cn。