DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.97 **中图分类号**：TM614 **文献标志码**：A

抑制直驱风机故障恢复后暂态过电压的协调控制策略

张德勇[1](中国电源学会学生会员)，朱国荣[1](中国电源学会高级会员)，李悦功[1]，
冯 凯[1]，陆江华[2]，王 茜[1]
(1.武汉理工大学自动化学院，武汉 430070；2.武汉科技大学信息科学与工程学院，武汉 430081)

摘要：直驱风机在故障穿越恢复阶段，无功电流延迟撤回会导致风电机组在故障恢复后出现暂态过电压，影响并网系统安全稳定运行。为了抑制该暂态过电压，建立直驱风机电磁暂态模型，定量分析暂态过电压出现机理，提出了一种三阶段协调控制策略。阶段一优化故障穿越期间有功、无功电流，减小故障恢复前、后的有功与无功功率变化量；阶段二引入机端电压变化率辅助准确识别故障结束标志，加快无功电流回撤速度；阶段三控制风电机组按比例吸收无功电流，消除已累积的无功盈余。此外，搭建了基于MATLAB/Simulink和Speedgoat的仿真平台，验证了所提策略对故障恢复后暂态过电压的抑制效果。仿真与实验结果表明，相较于传统控制策略，该策略能够在不削弱风电机组无功支撑能力的条件下，使暂态过电压下降9.3%。

关键词：直驱风机；低电压穿越；无功控制；暂态过电压；协调控制策略

Coordinated Control Strategy for Suppressing Transient Overvoltage after Fault Recovery of Direct-drive Wind Turbine

ZHANG Deyong[1], *Student Member*, *CPSS*, ZHU Guorong[1], *Senior Member*, *CPSS*, LI Yuegong[1],
FENG Kai[1], LU Jianghua[2], WANG Qian[1]
(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: During the fault recovery phase of a direct-drive wind turbine, the delayed withdrawal of reactive current leads to transient overvoltage of the turbine after the fault recovery, which affects the safe and stable operation of the grid-connected system. In order to suppress the transient overvoltage, an electromagnetic transient model for the direct-drive wind turbine is established, the mechanism of transient overvoltage occurrence is quantitatively analyzed, and a three-stage coordinated control strategy is proposed. The first stage optimizes the active/reactive current during fault ride-through to reduce the active/reactive power fluctuations before and after fault recovery; the second stage introduces the rate of change of terminal voltage to assist in accurately identifying the fault clearance and accelerating the reactive current withdrawal speed. The third stage controls the wind turbine to proportionally absorb reactive power, eliminating the accumulated reactive power surplus. Furthermore, a simulation platform based on MATLAB/Simulink and Speedgoat is built to verify the suppression effect of the proposed strategy on the transient overvoltage after fault recovery. Simulation and experimental results show that, compared with traditional control strategies, this strategy reduces transient overvoltage by 9.3% without sacrificing the reactive power support capability of the wind turbine.

Keywords: Direct-drive wind turbine; low-voltage ride-through (LVRT); reactive power control; transient overvoltage; coordinated control strategy

收稿日期：2024-11-25；**修回日期**：2024-12-30，2025-01-18；
录用日期：2025-01-24；**网络首发日期**：2025-03-05
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52407217)；广西科技重大专项资助项目(AA23062066)；湖北省重点研发计划资助项目(2023BAB208)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52407217; Guangxi Science and Technology Major Program under the grant AA23062066; Hubei Key R&D Program Projects under the grant 2023BAB208

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出和持续推进，风电场在电力系统中的渗透率逐渐增大[1-2]。风电汇集地区通常输电线路阻抗较大，电网强度较弱，当发生交流故障后，存在暂态过电压问题，继而引发风机大规模脱网[3]，影响并网系统的稳定运行。根据并网导则规定，在低电压穿越 LVRT(low-voltage ride-through)阶段，风电机组需要向电网提供无功支撑。在故障恢复阶段，由于无功电流延迟撤回，导致端口出现暂态过电压，严重时会超过风电机组的耐压值，发生高电压脱网[4]。因此，抑制该暂态过电压是有意义的。

已有相关文献分析了暂态过电压问题出现的机理及影响因素。暂态过电压程度受多个因素影响，如风电机组有功、无功控制，有功恢复速率和无功电流系数，系统短路比，系统阻抗比等[5-6]。除此之外，在交流故障清除后，由于风电机组的机端电压存在相位突变，而锁相环需要经过一段时间才能跟踪上该相位变化，在这期间风电机组锁相不准确，破坏了基于电压空间矢量定向的有功与无功解耦条件，风电机组增发无功电流，导致暂态过电压[7-8]。文献[9]指出在高压直流送端系统中，近区交流故障会导致换流站及近区电压迅速降低，直流电流减小，交流故障清除后低压限流环节限制了直流电流恢复，滤波器发出的大量盈余无功也会造成近区暂态过电压。

针对暂态过电压的抑制手段和措施，主要可以分为改进控制策略和加装硬件设备 2 类。文献[10]基于机端电压的解析公式实时计算出无功电流指令值，实现自适应的无功电流控制，稳定机端电压，但该策略需要获取系统实时准确的电网等值参数，不仅存在一定难度，还会带来新的控制延时；针对控制延时导致的无功电流延迟回撤，文献[11]提出计及虚拟磁链的永磁同步发电机 PMSG(permanent magnet synchronous generator)机组控制策略，通过无功电流控制器在故障状况下对机组无功电流进行补偿，可以控制机组超前吸收无功功率，抑制暂态过电压；文献[12]采用自适应搜索算法优化比例积分 PI(proportional integral)环节参数，达到暂态过电压幅值抑制效果；在加装硬件设备方面，文献[13-14]在并网侧分别配置了静止无功发生器 SVG(static var generator)和同步调相机来实现过电压的抑制，虽然适用性更广，但增加了额外的成本。综上所述，基于改进控制策略的暂态过电压抑制手段虽然具有一定的效果，但未能充分发挥风电机组在故障恢复阶段对暂态过电压的抑制能力；而增加相关的抑制设备又会导致成本上升。

因此，本文以永磁同步风机为研究对象，定量分析了暂态过电压的机理，推导了机端过电压与机组各参数之间的关系，并根据该特性，提出一种分阶段控制策略。所提策略将原有的 LVRT 过程分为 3 个阶段：阶段一提出有功、无功电流的优化措施，在满足并网导则前提下，尽可能减少无功电流注入；阶段二提出采用机端电压和机端电压上升率的双重标志来精确识别故障结束标志，加快无功电流回撤；阶段三控制逆变器按比例吸收盈余无功，进一步抑制机端电压超调。此外，通过 MATLAB/Simulink 仿真和基于 Speedgoat 的实时仿真平台验证了所提策略可以显著抑制故障后的暂态过电压。

1 LVRT 故障恢复阶段暂态过电压机理分析

经典的直驱风机发电并网系统拓扑结构如图 1 所示，下文均以此为研究对象，探讨故障恢复阶段的暂态过电压机理与抑制措施。PMSG 的网侧变流器经过 690 V/35 kV 箱式变压器升压，然后经输电线路接入 35 kV/220 kV 升压变压器并入电网。图中：R_{T}、X_{T} 分别为 35 kV 线路电阻和电抗；R_{L}、X_{L} 分别为 220 kV 线路电阻和电抗；U_{W} 为机端电压实际值；U_{g} 为电网电压。假设故障穿越期间直流母线电压在撬棒电路作用下保持稳定，电流内环带宽远高于外环，变流器输出电流可以有效跟踪参考值，此时可以将风电机组网侧变流器看作受控电流 源[15]。在此基础上，将机组以外的电路进行等效处理[16]，即可得到风电送端网络的简化等效电路，如图 2 所示。

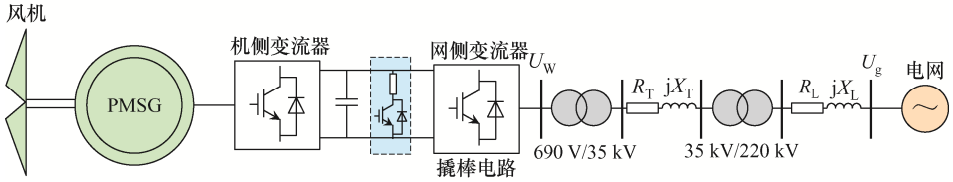


图 1　直驱风机发电并网系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of direct-drive wind turbine grid-connected power generation system

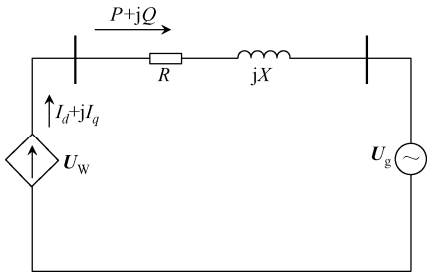


图 2　直驱风机发电并网系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of direct-drive wind turbine grid-connected power generation system

图 2 中：I_d、I_q 分别为 PMSG 输出电流 $\boldsymbol{I}$ 的 d、q 轴分量，$\boldsymbol{I}=I_d+\mathrm{j}I_q$；$P$、$Q$ 分别为注入电网的有功功率、无功功率；R、X 分别为系统戴维南等效电阻和电抗；$Z=R+\mathrm{j}X$ 为风电机组机端至电网的戴维南等效阻抗。由图 2 可得，PMSG 的机端电压关系可以表示为

$$U_W=\boldsymbol{I}Z+U_g \tag{1}$$

以 U_W 所在方向为 d 轴，建立同步旋转的 dq 坐标系，则风电机组机端电压矢量关系如图 3 所示。图中：φ 为机端电压的相位；U_{gd} 为 $\boldsymbol{U}_g$ 在 d 轴上的投影；U_{gq} 为 $\boldsymbol{U}_g$ 在 q 轴上的投影；$\boldsymbol{U}_W=U_{Wd}+\mathrm{j}U_{Wq}$，其中 $U_{Wq}=0$。

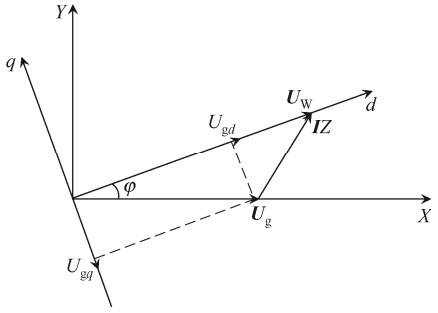


图 3　风电机组机端电压矢量关系

Fig. 3 Terminal voltage phasor relationship of wind turbine

采用电压定向控制，将电网电压矢量定向在同步坐标系的 d 轴上后，风电机组输出功率与 d、q 轴电流的关系可表示为

$$\begin{cases} P=\dfrac{3}{2}I_dU_{Wd} \\ Q=-\dfrac{3}{2}I_qU_{Wd} \end{cases} \tag{2}$$

结合图 3 的矢量关系，将 $\boldsymbol{I}=I_d+\mathrm{j}I_q$、$Z=R+\mathrm{j}X$ 代入式(1)，并分离实部和虚部可得

$$U_W=U_g\cos\varphi+I_dR-I_qX \tag{3}$$

$$0=U_g\sin\varphi-I_dX-I_qR \tag{4}$$

将式(3)和式(4)化简，可得 U_W 关于 U_g、有功电流 I_d、无功电流 I_q、R 和 X 的关系式为

$$U_W=I_dR-I_qX+\sqrt{U_g^2-(I_dX+I_qR)^2} \tag{5}$$

根据式(5)，假设 I_d 和系统各参数 R、X、U_g 已知，可以得到 U_W 关于 I_q 的函数关系表达式，对式(5)求 I_q 的偏导可得

$$\frac{\partial U_W}{\partial I_q}=\frac{-R(I_dX+I_qR)}{\sqrt{U_g^2-(I_dX+I_qR)^2}}-X \tag{6}$$

在 LVRT 过程中，式(6)中的 I_q 满足 $-I_{Nmax}<I_q<0$，I_d 满足 $0<I_d<I_{Nmax}$，其中 I_{Nmax} 为逆变器最大限制电流；R、X 均大于 0，新能源送出系统的线路中 $X\gg R$。此外，可以得到 U_W 关于 I_q 的偏导数恒为负值，即单调递减，I_q 越大(即发出无功电流越少)，U_W 暂态过电压幅值越小。

同理，可以推导出 U_W 关于 I_d 的函数关系表达式，对式(5)求 I_d 的偏导可得

$$\frac{\partial U_W}{\partial I_d}=\frac{R\sqrt{U_g^2-(I_dX+I_qR)^2}-X(I_dX+I_qR)}{\sqrt{U_g^2-(I_dX+I_qR)^2}} \tag{7}$$

式(7)中，U_W 对 I_d 偏导数的正、负由分子正、负决定，将式(4)代入式(7)分子中化简可得

$$\frac{\partial U_{\mathrm{W}}}{\partial I_d}=\frac{U_{\mathrm{g}}(R\cos\varphi-X\sin\varphi)}{\sqrt{U_{\mathrm{g}}^2-(I_dX+I_qR)^2}} \tag{8}$$

式(8)中，R、X 和 U_{g} 均大于 0，且 $X\gg R$，可得 U_{W} 关于 I_d 的偏导数恒为负值，即单调递减，I_d 越大(即发出有功电流越多)，U_{W} 暂态过电压幅值越小。

2 分阶段协调控制的暂态过电压抑制策略

2.1 暂态过电压动态过程分析

传统的风电机组 LVRT 控制策略仅以 U_{W} 和 0.900 p.u.的大小关系作为切换标志，一般分为 LVRT 和稳态控制 2 个阶段，因在故障恢复阶段仍保持 LVRT 控制发出无功电流，产生大量无功盈余，从而引起严重的机端暂态过电压问题。本文所提风电机组的 LVRT 和故障恢复过程机端电压曲线如图 4 所示，根据控制切换逻辑将这个过程分为 3 个阶段，并对每个阶段进行具体分析。

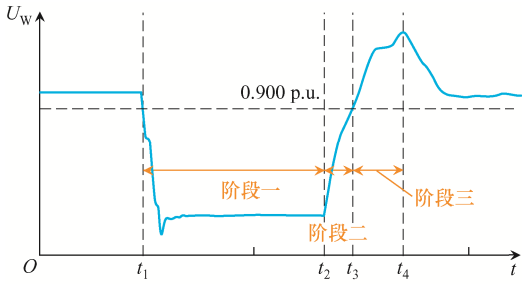


图 4 风电机组 LVRT 和故障恢复过程机端电压曲线

Fig. 4 Terminal voltage curves of wind turbine in LVRT and fault recovery process

当系统发生短路故障，机端电压跌落，风机网侧变流器进入 LVRT 阶段(阶段一)，输出无功功率来支撑电网电压。阶段一控制期间，通过优化无功电流和有功电流参考值，降低故障清除后的过电压，同时避免降低 LVRT 期间的无功输出能力。在故障清除后，当电压未恢复至 0.900 p.u.时(阶段二)，利用阶段二的控制策略准确识别故障结束时刻，提前回撤无功电流，减少无功盈余，从而衰减过电压。当电压达到 0.900 p.u.时(阶段三)，设计了新的无功电流系数，控制风电机组吸收无功盈余，以进一步抑制暂态过电压。具体控制流程如图 5 所示，其中：U_{N} 为额定电压；δ 为电压变化率阈值，设 δ=20；τ 为电压变化率下降阈值，设 τ=−20。

考虑到本文的三阶段协调控制策略需要实时准确地检测机端电压幅值，本文采用文献[17]提出的电网电压正负序分量快速检测算法，该算法基于复最小二乘法，在含有高次谐波和随机噪声的情况下可以快速准确地检测出电压的正负序分量幅值和相角。

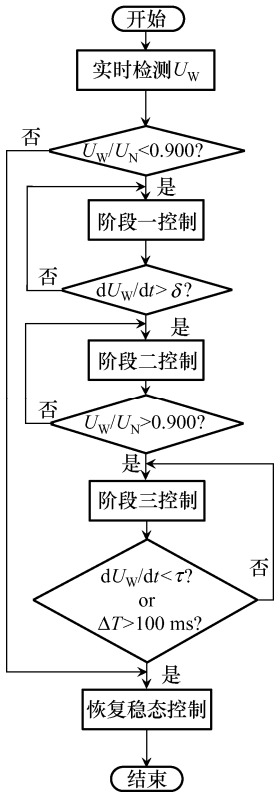


图 5 三阶段协调控制策略流程

Fig. 5 Flow chart of three-stage coordinated control strategy

2.2 LVRT 期间有功、无功电流优化

根据电网规范[18]，当风机进入 LVRT 阶段时，风电机组应具备向电网提供动态无功支撑的能力。发出的无功电流满足

$$\begin{cases} I_{q\mathrm{LVRT}}=K_{\mathrm{LVRT}}\left(0.900-\dfrac{U_{\mathrm{W}}}{U_{\mathrm{N}}}\right)I_{\mathrm{N}} \\ I_{q\mathrm{LVRT,pu}}=\dfrac{I_{q\mathrm{LVRT}}}{I_{\mathrm{N}}} \end{cases} \tag{9}$$

式中：$I_{q\mathrm{LVRT}}$ 为 LVRT 期间风电机组注入的无功电流实际值；K_{LVRT} 为无功电流系数，通常 $1.5\leqslant K_{\mathrm{LVRT}}<3.0$；$I_{\mathrm{N}}$ 为额定电流；$I_{q\mathrm{LVRT,pu}}$ 为无功电流标幺值。

由第 1 节分析可得，U_{W} 对 I_q 的偏导数恒为负数，即单调递减，I_q 越大(即发出无功电流越少)，暂态过电压幅值越小。因此在满足并网导则要求的前提下，设置 K_{LVRT} 为最小值 1.5，既可以降低暂态过电压，又保证了机组的无功支撑能力。设阶段一无功电流参考值 $I_{q\mathrm{ref,pu,1}}$ 为

$$I_{q\mathrm{ref,pu,1}}=1.5\left(0.900-\frac{U_{\mathrm{W}}}{U_{\mathrm{N}}}\right) \tag{10}$$

而通过第 1 节分析可知，故障期间 I_d 越大，故障恢复阶段暂态过电压幅值越小。另外，受限于风电变流器的容量，故障期间发出的电流应小于 I_{Nmax}，本文取 $I_{\mathrm{Nmax}}=1.1I_{\mathrm{N}}$，则阶段一有功电流参考值 $I_{d\mathrm{ref,pu,1}}$ 满足

$$I_{d\mathrm{ref,pu,1}}\leqslant\sqrt{1.1^2-I_{q\mathrm{ref,pu,1}}^2} \tag{11}$$

同时，考虑到风电功率的随机性可能导致故障穿越期间输出功率较小的情况，此时故障穿越期间输出有功功率应小于等于故障前稳态下的有功功率 P_{Norm}，则 $I_{d\mathrm{ref,pu,1}}$ 还应满足

$$I_{d\mathrm{ref,pu,1}}\leqslant\frac{2P_{\mathrm{Norm}}}{3U_{\mathrm{W}d}I_{\mathrm{N}}} \tag{12}$$

综合考虑上述两点后的 $I_{d\mathrm{ref,pu,1}}$ 为

$$I_{d\mathrm{ref,pu,1}}=\min\left[\sqrt{1.1^2-I_{q\mathrm{ref,pu,1}}^2},\frac{2P_{\mathrm{Norm}}}{3U_{\mathrm{W}d}I_{\mathrm{N}}}\right] \tag{13}$$

2.3 准确识别故障结束标志的双重判据

传统 LVRT 控制策略的退出标志是检测到 $U_{\mathrm{W}}>0.900$ p.u.时，将策略从 LVRT 控制切换到稳态控制，切换时刻为图 6 中的 t_3 时刻。实际上，在 t_{clear} 时刻风机故障已经清除，在(t_{clear},t_3)时段内，U_{W} 逐渐恢复到 0.900 p.u.，风机仍保持 LVRT 阶段的控制，按比例发出动态无功电流，这部分无功盈余会导致故障恢复后的暂态过电压。这段时间机组产生的无功盈余 Q_{excess} 可以通过对(t_{clear},t_3)时段内的 d 轴电压和无功电流积分得到，即

$$Q_{\mathrm{excess}}=\int_{t_{\mathrm{clear}}}^{t_3}\frac{3}{2}u_{\mathrm{W}d(t)}\left|i_{q(t)}\right|\mathrm{d}t \tag{14}$$

式中，$u_{\mathrm{W}d(t)}$和 $i_{q(t)}$分别为(t_{clear},t_3)时段内的 d 轴电压和无功电流，$u_{\mathrm{W}d(t)}$始终大于 0，则 $Q_{\mathrm{excess}}>0$。

因此，本节提出利用机端电压上升率作为辅助判据。当 $U_{\mathrm{W}}<0.900$ p.u.时，利用电压上升率来反映故障清除时的电压幅值上升特征，构成故障结束检测判据，以此加快准确识别故障结束的标志。当系统检测识别到此标志时，立即结束 LVRT 阶段的控制，进入阶段二的控制策略。

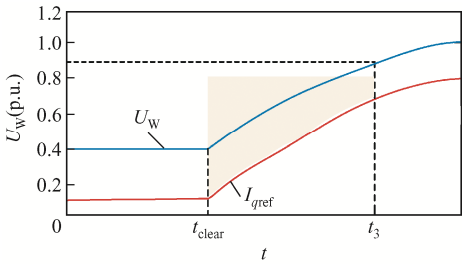


图 6　故障清除时刻机端电压和无功电流示意

Fig. 6 Schematic of terminal voltage and reactive current at fault clearing instant

在大扰动下，一旦电压变化率超过某一阈值，则可认为故障清除，风电机组故障状态检测判据为

$$\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{W}}}{\mathrm{d}t}>\delta \tag{15}$$

若测得 $\mathrm{d}U_{\mathrm{W}}/\mathrm{d}t$ 满足式(15)，则可以认为系统故障此刻已经清除，进入阶段二控制。为了防止在此阶段继续增发无功，设置阶段二无功电流参考值 $I_{q\mathrm{ref,pu,2}}=0$，有功电流参考值 $I_{d\mathrm{ref,pu,2}}$ 恢复到稳态阶段的控制，即

$$\begin{cases}I_{q\mathrm{ref,pu,2}}=0\\ I_{d\mathrm{ref,pu,2}}=(U_{\mathrm{dc,ref}}-U_{\mathrm{dc}})\left(k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{i}}}{s}\right)\end{cases} \tag{16}$$

式中：$U_{\mathrm{dc,ref}}$为直流电压参考值；U_{dc}为直流电压实际值；k_{p}为电压外环比例系数；k_{i}为电压外环积分系数；s 为拉普拉斯算子。

2.4 电压正常区无功回撤策略

阶段二的结束标志是检测到 $U_{\mathrm{W}}>0.900$ p.u.，此时 U_{W} 已经恢复到正常水平。在常规的电压正常水平下的控制策略为单位功率因数控制，无功功率为 0，

故在 0.900~1.100 p.u.的电压区间内产生一个无功控制的“空白区间”。如果在这一阶段风电机组不作出任何响应或不施加无功控制，则会失去抑制暂态过电压的机会。虽然 $I_{q\text{ref,pu,2}}$=0，但是实际无功电流是经过 PI 环节和解耦环节得到的，存在一定的动态响应时间，即仍然有少量无功盈余在阶段二累积。因此，有必要在阶段三中提出消除该部分无功盈余的措施，主动抑制暂态过电压。

本节所提电压正常区无功电流回撤策略具体是指：在阶段三中，引入新的无功电流系数 $K_{\text{stage,3}}$，通过实时检测 U_{W} 的有效值，动态改变该区间的无功电流指令，使风电机组在此阶段动态吸收无功功率，本质上也是消除上个阶段累积的无功盈余。阶段三无功电流参考值 $I_{q\text{ref,pu,3}}$ 可表示为

$$I_{q\text{ref,pu,3}} = K_{\text{stage,3}}\left(\frac{U_{\text{W}}}{U_{\text{N}}} - 0.900\right) \tag{17}$$

式(17)中，$K_{\text{stage,3}}$ 越大，风电机组在该阶段吸收的无功电流越多，越有利于降低故障恢复阶段的暂态过电压。然而，该无功电流需要满足风机网侧变流器无功电流极限的限制，式(2)已经给出了 PMSG 的有功和无功功率与 d 轴电流和 q 轴电流之间的关系，整理可得

$$I_{q\max} = \sqrt{1.1^2 - \left(\frac{2P_{\text{Norm}}}{3U_{\text{W}d}I_{\text{N}}}\right)^2} \tag{18}$$

式中，$I_{q\max}$ 为风机的无功电流极限值。

为了满足无功电流极限的限制，避免电流指令超出变流器电流极限，$K_{\text{stage,3}}$ 应满足 $I_{q\text{ref,pu,3}}<I_{q\max}$，可求得 $K_{\text{stage,3}}$ 同时满足不超过无功电流极限和吸收无功要求的最大值。

当出现暂态过电压峰值，U_{W} 第一次回落时，电压变化率由正变为负，该特性可以作为阶段三的结束标志之一。同时，为了防止暂态过电压超调平缓导致结束标志无法可靠识别，增设 U_{W} 正常区间持续时间的判断条件。当进入阶段三控制后，计时开始，若 U_{W} 维持在 0.900~1.100 p.u.的持续时间 ΔT 超过 100 ms，即可认为电网电压已恢复正常。当满足以上 2 个条件之一时，便可结束阶段三的控制。结束条件可以表示为

$$\begin{cases} \mathrm{d}U_{\text{W}}/\mathrm{d}t < \tau \\ \quad \text{or} \\ \Delta T > 100\ \text{ms} \end{cases} \tag{19}$$

3 仿真与实验验证

3.1 基于 MATLAB/Simulink 的三阶段协调控制策略仿真分析

为了验证本文所提策略对抑制故障恢复阶段暂态过电压的有效性，在 MATLAB/Simulink 中搭建本文提及的 PMSG 交流并网系统仿真模型，其中，风机模型采用平均模型。本文采用由单台容量为 2.00 MW 的风机聚合而成的风电场，风电场容量为 200.00 MW，2.00 MW 风电机组参数见表 1。设置交流电网在 1.0 s 时发生三相交流短路故障，故障持续时间为 500 ms，1.5 s 时故障清除，电网电压设置跌落幅度为 0.400 p.u.。

表 1 2.00 MW 风电机组参数

Tab. 1 Parameters of 2.00 MW wind turbine

参数	数值
额定电压 U_{N}/V	690
额定容量 S_{N}/MW	2.0
直流母线额定电压 U_{dcN}/V	1 200
电压外环比例系数 k_{p}	20
电压外环积分系数 k_{i}	100
电流内环比例系数 k_{ip}	1.8
电流内环积分系数 k_{ii}	10
电网频率 f/Hz	50
额定风速 v/(m·s^{-1})	12
转矩 T_{m}/(N·m)	848 826
网侧滤波电感 L_{g}(p.u.)	0.115 4

为验证所提策略的有效性，本文设置了 4 组场景进行对比研究。场景 1：默认传统控制策略，LVRT 阶段无功电流系数为 1.5，有功电流参考值为 0；场景 2：阶段一控制策略；场景 3：阶段一控制策略叠加阶段二控制策略；场景 4：三阶段协调控制策略。

4 种场景下的故障恢复阶段暂态过电压如图 7 所示。可以看出：场景 1 的传统控制策略不能有效

抑制过电压，其暂态过电压幅值为 1.114 p.u.；在场景 2 和场景 3 下，机端电压幅值分别降低至 1.039 p.u.和 1.024 p.u.，验证了所提策略的有效性；相比之下，场景 4 运用所提三阶段协调控制策略后，暂态过电压幅值仅为 1.010 p.u.，较传统控制策略下降了 9.3%，抑制效果显著。

4 种场景下的故障恢复阶段无功电流和无功功率分别如图 8 和图 9 所示。可以看出，场景 4 在故障清除瞬间(1.5 s)立即切换控制策略，在阶段二维持无功电流为 0 的控制。由于 PI 控制的固有动态特性，阶段二仍有部分盈余无功，如图 8 所示，因此在阶段三控制下风电机组吸收部分无功盈余，如图 9 所示，实现了故障恢复阶段暂态过电压的有效抑制，验证了本文所提策略的有效性。

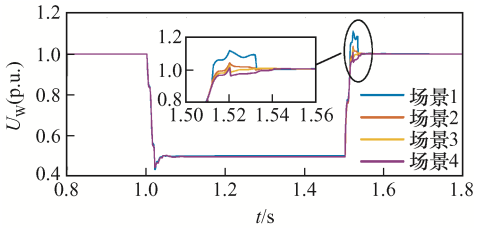


图 7　4 种场景下的故障恢复阶段暂态过电压

Fig. 7 Transient overvoltage in fault recovery phase for four scenarios

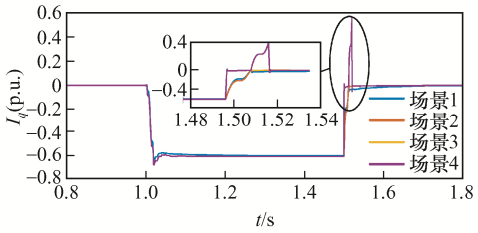


图 8　4 种场景下的故障恢复阶段无功电流

Fig. 8 Reactive current in fault recovery phase for four scenarios

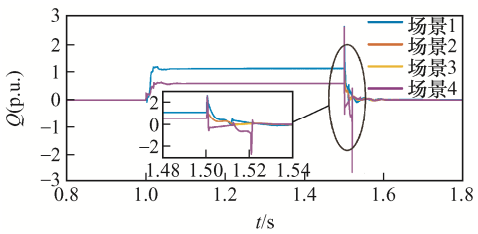
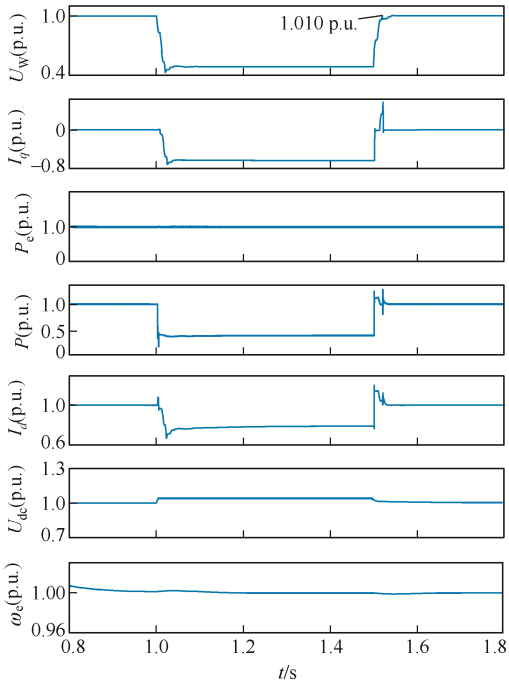


图 9　4 种场景下的故障恢复阶段无功功率

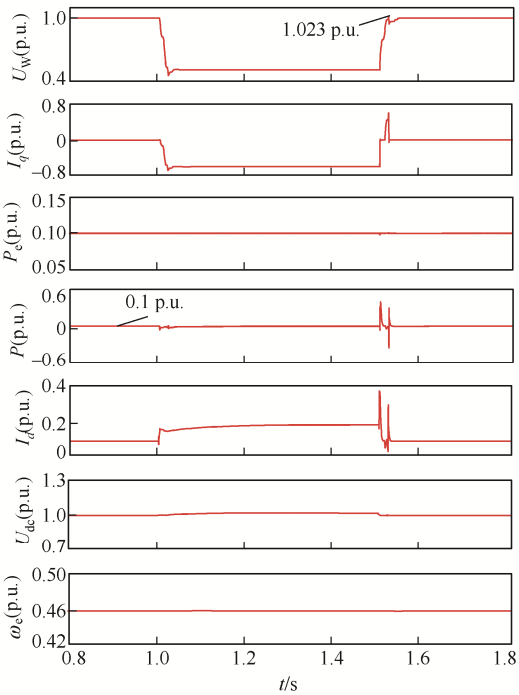
Fig. 9 Reactive power in fault recovery phase for four scenarios

3.2　不同运行工况下仿真对比分析

保持其他参数不变，设置风电机组运行在 2 种不同工况下：额定工况 2.00 MW 与 0.20 MW。分析不同风力发电功率的影响，仿真结果如图 10 所示。



(a) 2.00 MW工况下



(b) 0.20 MW工况下

图 10　2 种不同运行工况下的仿真结果

Fig. 10 Simulation results under two different operating conditions

2 种工况下的无功功率一致，验证了本文所提策略在不同运行工况下的适用性。2.00 MW 运行工况下，LVRT 阶段机组 P 为 0.4 p.u.，机侧转子转速 ω_e 保持 1.00 p.u.不变，机侧发出电磁功率 P_e 不变，造成机侧与网侧的功率不平衡，直流母线上卸荷电路工作将 U_{dc} 限制在 1.040 p.u.；0.20 MW 运行工况下，在稳态和故障暂态阶段有功功率均保持 0.1 p.u.，ω_e 保持 0.46 p.u.不变，则机侧与网侧功率基本维持在平衡状态，卸荷电路未投入工作，U_{dc} 维持在 1.000 p.u.附近。2.00 MW 运行工况下，LVRT 阶段发出有功电流为 0.79 p.u.，低于稳态下有功电流，而 0.20 MW 运行工况下，LVRT 阶段发出的有功电流约为 0.20 p.u.，大于稳态下有功电流，验证了式(13)有功电流整定策略的有效性。2 种工况下的故障恢复阶段暂态过电压分别为 1.010 p.u.和 1.023 p.u.，验证了所提控制策略在不同运行工况下均可有效抑制暂态过电压，进一步验证了 LVRT 阶段有功电流越大，机端暂态过电压幅值越小。

3.3 基于 Speedgoat 实时仿真平台实验验证

本文基于Speedgoat 的 Performance Real-Time Target Machine 实时仿真平台验证所提控制策略，仿真平台如图 11 所示。

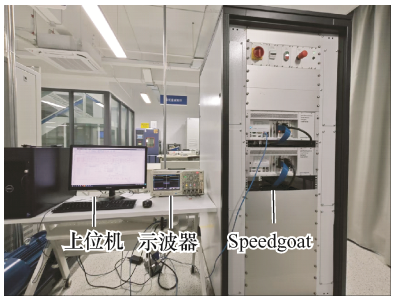
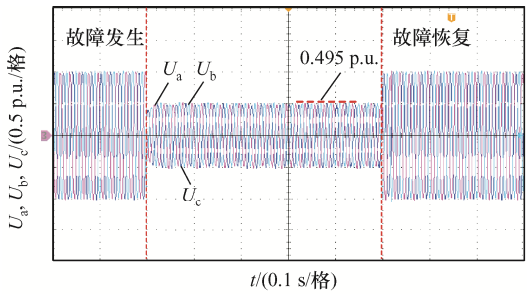


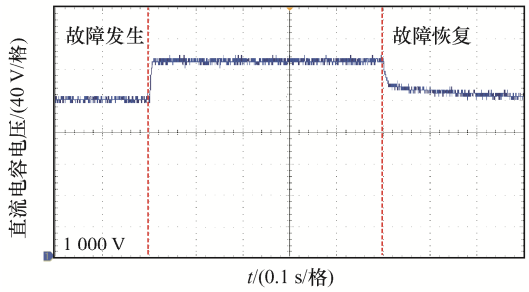
图 11 Speedgoat 实时仿真平台示例

Fig. 11 Example of Speedgoat real-time simulation platform

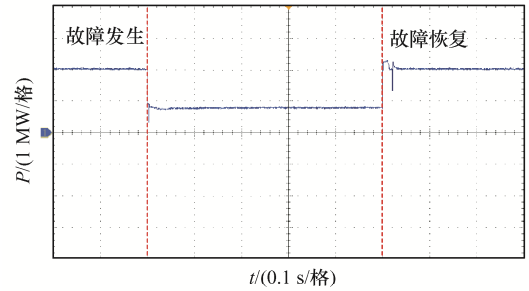
系统在本文所提策略下的整体运行状态如图 12 所示。故障发生后，电网电压跌落，如图 12(a)所示，系统检测到故障进入 LVRT。直流电容电压如图 12(b)所示，在撬棒电路工作和 LVRT 阶段的控制下，基本维持在额定值 1 200 V 附近。故障期间，P 从额定值 2.00 MW 跌落至 0.75 MW，如图 12(c)所示，且风电机组发出一定无功功率支撑电网电压，如图 12(d)所示，在故障清除后，风电机组及时回撤无功并吸收部分无功功率。图 12(a)输出的三相电压波形在故障恢复阶段未发生明显过电压，验证了本文所提策略对抑制故障恢复暂态过电压的有效性。



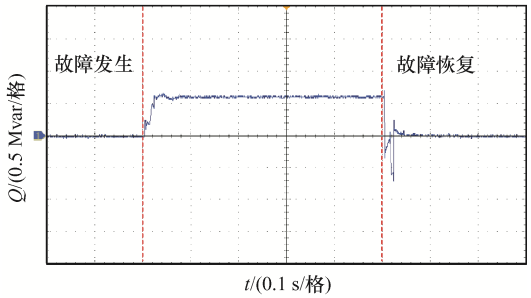
(a) 网侧输出电压



(b) 直流电容电压



(c) 有功功率

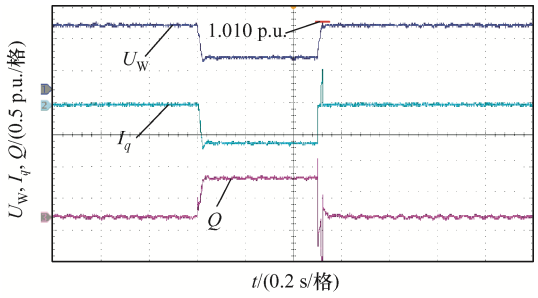


(d) 无功功率

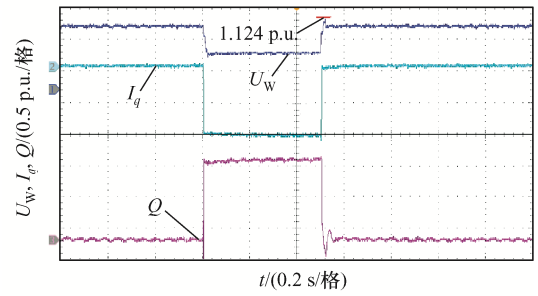
图 12 三阶段协调控制策略下系统运行状态

Fig. 12 System operation status under three-stage coordinated control strategy

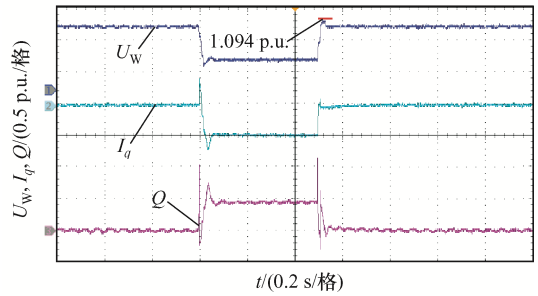
为了与现有暂态过电压控制策略进行对比，本文设置了 2 个对照组，分别是文献[13]电流内环和电压外环优化的控制策略和文献[11]计及虚拟磁链的 PMSG 控制策略，3 种不同策略下的系统运行状态如图 13 所示。



(a) 本文策略



(b) 文献[13]控制策略



(c) 文献[11]控制策略

图 13　3 种不同控制策略下的系统运行状态

Fig. 13 System operation status under 3 different control strategies

由图 13 可知，文献[13]和文献[11]控制策略下的恢复阶段暂态过电压分别为 1.124 p.u.和 1.094 p.u.，而本文策略下的暂态过电压仅为 1.010 p.u.。相较于文献[13]控制策略，本文策略可以更好地抑制暂态过电压；相较于文献[11]控制策略，本文策略不仅在抑制暂态过电压方面表现更优，且在 LVRT 阶段可以发出更多的无功电流来支撑电网电压。此外，本文策略相较于其他 2 种策略的优势还在于 1.5 s 时刻故障清除后，可以及时回撤无功电流至 0，并按比例吸收部分无功电流，抵消无功盈余量，如图 13(a)所示。因此，半实物实验平台进一步验证了本文所提策略在抑制暂态过电压方面取得了更优的效果。

4　结语

为抑制暂态过电压，本文通过构建 PMSG 电磁暂态模型，分析了永磁直驱风电系统 LVRT 后故障恢复暂态过电压产生机理，并将 LVRT 全过程分为 3 个阶段，提出了三阶段协调控制策略。阶段一在满足风机并网导则的前提下，以最大限度降低暂态过电压为目标优化有功、无功电流指令；阶段二通过所提双重判据准确识别故障结束标志，防止无功盈余；阶段三自适应按比例吸收多余无功电流，降低暂态过电压。MATLAB/Simulink 仿真分析和基于 Speedgoat 的实时仿真平台验证表明，本文所提策略可以显著抑制暂态过电压，并且与传统控制策略对比，在本文策略控制下的暂态过电压下降了 9.3%，仅为 1.010 p.u.，进一步验证了该策略的可行性和有效性。

参考文献：

[1] 张锋, 陈武晖, 康佳乐, 等. 双馈风电场故障穿越控制策略对风火打捆系统暂态稳定性影响及提升控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(3): 717-729, 743.
Zhang Feng, Chen Wuhui, Kang Jiale, et al. Research on the effect of fault ride-through control strategy of doubly-fed wind farms on transient stability of wind-fire bundling system and enhancement control strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 717-729, 743. (in Chinese)

[2] 黄晟, 凌吉莉, 魏娟, 等. 大规模风电机群服役质量调控方法研究综述[J]. 电工技术学报, 2025, 40(10): 3274-3300.
Huang Sheng, Lin Jili, Wei Juan, et al. Review of service quality regulation methods for large-scale wind farm clusters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

2025, 40(10): 3274-3300. (in Chinese)

[3] 苏福清, 匡洪海, 钟浩. 基于 AG-MOPSO 的含风电配电网无功优化[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 192-199.
Su Fuqing, Kuang Honghai, Zhong Hao. Reactive power optimization of wind power distribution network based on AG-MOPSO [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 192-199. (in Chinese)

[4] 郭文花, 沈顺群, 刘凯. 用于 DR-HVDC 系统连接的海上风电场电网形成控制方法[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 179-188.
Guo Wenhua, Shen Shunqun, Liu Kai. Offshore wind farm grid-formation control method for connection of DR-HVDC system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 179-188. (in Chinese)

[5] 贾俊川, 金一丁, 赵兵, 等. 风机低电压穿越控制对系统暂态过电压的影响及优化[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 526-533.
Jia Junchuan, Jin Yiding, Zhao Bing, et al. Impact analysis and performance optimization of LVRT control of wind turbine on transient overvoltage of power system [J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 526-533. (in Chinese)

[6] 周莹坤, 谢恒, 孙华东, 等. 新能源机组低电压穿越控制参数对机端工频过电压的影响[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1907-1916.
Zhou Yingkun, Xie Heng, Sun Huadong, et al. Influence of renewable energy low voltage ride-through control parameters on overvoltage [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1907-1916. (in Chinese)

[7] 田颢璟, 孙大卫, 刘辉, 等. 短路故障清除时刻直驱风电机组机端暂态过电压研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 247-256.
Tian Haojing, Sun Dawei, Liu Hui, et al. Research on transient overvoltage of PMSG terminal at fault clearing time [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(1): 247-256. (in Chinese)

[8] 孙大卫, 吴林林, 刘辉, 等. 弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4777-4786.
Sun Dawei, Wu Linlin, Liu Hui, et al. Effect of the low voltage ride through characteristics on PMSG terminal transient voltage in weakly-synchronized gird [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4777-4786. (in Chinese)

[9] 屠竞哲, 张健, 刘明松, 等. 考虑风机动态特性的大扰动暂态过电压机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 197-205.
Tu Jingzhe, Zhang Jian, Liu Mingsong, et al. Mechanism analysis of transient overvoltage with large disturbance considering dynamic characteristics of wind generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 197-205. (in Chinese)

[10] 曹斌, 郑子萱, 刘鸿清, 等. 基于无功电流补偿的直驱风机故障后过电压抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(9): 166-174.
Cao Bin, Zheng Zixuan, Liu Hongqing, et al. Post-fault overvoltage suppression strategy for direct-drive wind turbine based on reactive current compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(9): 166-174. (in Chinese)

[11] 李光辉, 王伟胜, 何国庆, 等. 风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(三): 送端风电机组暂态过电压抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5079-5088.
Li Guanghui, Wang Weisheng, He Guoqing, et al. Commutation failure of UHVDC system for wind farm integration(part Ⅲ): Transient overvoltage suppression measures of wind powers in sending terminal grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5079-5088. (in Chinese)

[12] 赵学明, 李永丽, 孙广宇, 等. 换相失败对含风电场的交直流混联系统送端过电压的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3666-3673.
Zhao Xueming, Li Yongli, Sun Guangyu, et al. Effect of commutation failure on the overvoltage on rectifier station in AC/DC hybrid power system with wind farms [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3666-3673. (in Chinese)

[13] 孔铖铖. 新能源汇集区域暂态过压抑制的 SVG 控制策略优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
Kong Chengcheng. Research on the optimization of SVG control strategy of transient over-repression in the new energy convergence area [D]. Beijing: North China Electric

Power University, 2022. (in Chinese)

[14] 刘增训, 李晓飞, 刘建琴. 含调相机的高压直流送端换流站无功协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3857-3865.
Liu Zengxun, Li Xiaofei, Liu Jianqin. HVDC converter station reactive power coordinated control strategy with synchronous condenser [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3857-3865. (in Chinese)

[15] He Xiuqiang, Geng Hua. PLL synchronization stability of grid-connected multiconverter systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 830-842.

[16] Zou Ming, Wang Yan, Zhao Chengyong, et al. Integrated equivalent model of permanent magnet synchronous generator based wind turbine for large-scale offshore wind farm simulation [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(5): 1415-1426.

[17] 刘义成, 张学广, 景卉, 等. 电网电压正负序分量快速检测算法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 217-222.
Liu Yicheng, Zhang Xueguang, Jing Hui, et al. Fast detection algorithm of grid voltage positive and negative sequence components [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 217-222. (in Chinese)

[18] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19963.1—2021 风电场接入电力系统技术规定 第1部分：陆上风电[S]. 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. GB/T 19963.1—2021 Technical specification for connecting wind farm to power system—Part 1: On shore wind power [S]. 2021.



张德勇

作者简介：

张德勇(2000—　)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：新能源并网及控制，电力系统主动支撑技术。E-mail：zhangdeyong@whut.edu.cn。

朱国荣(1975—　)，女，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：新能源并网及控制，电力系统主动支撑技术，电力电子可靠性。E-mail：zhgr_55@whut.edu.cn。

李悦功(1994—　)，男，博士研究生。研究方向：新能源并网及控制，电力系统主动支撑技术。E-mail：happyyue1994@whut.edu.cn。

冯凯(1993—　)，男，博士研究生。研究方向：构网型频率主动支撑，电力电子可靠性。E-mail：fkfwsful@163.com。

陆江华(1989—　)，男，通信作者，博士，讲师。研究方向：无线充电技术及其应用，新能源并网及控制，电力系统主动支撑技术。E-mail：jianghualu@wust.edu.cn。

王茜(1990—　)，女，博士，讲师。研究方向：锂离子电池技术，电力电子系统可靠性评估与设计。E-mail：qiw@whut.edu.cn。

(责任编辑：耿越)