

基于优化滑模控制的 DD-PMSG 并网逆变器不平衡暂态 高电压故障穿越

许成, 周羽生, 周文晴, 郭顺

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114)

摘要:为解决电网不平衡高电压易导致直驱永磁风电机组发生脱网事故的问题,提出了应用滑模控制、虚拟同步电机技术和正、负序电压电流双闭环 PWM 控制相结合的优化策略。通过对网侧电压电流在 dq 坐标系下正、负序解耦,在非对称故障下建立序分量电流和功率的关系,计算得出正、负序电流指令值,控制有功减少系统的频率波动,调节无功支撑并网点电压恢复;将电流内环输出作为电压外环部分控制量的输入,对电流内环 PI 控制优化成滑模控制,增强并网逆变器的稳定性。仿真实验表明优化控制方法的有效性。提高了永磁直驱风电并网系统在不平衡高电压时故障穿越能力和运行稳定性。

关键词: 直驱风电机组; 高电压穿越; 非对称故障; 虚拟同步技术; 滑模控制

Unbalanced Transient High Voltage Fault Ride-through of DD-PMSG Grid-connected Inverter Based on Optimal Sliding Mode Control

XU Cheng, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, GUO Shun

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and
Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: For solving the problem that the unbalanced high voltage of the power grid easily leads to off grid accidents of direct-drive permanent magnet wind turbine, the optimal strategy in combination of sliding mode control, virtual synchronous generator technology and the positive and negative sequence voltage and current double closed-loop PWM control is proposed. By decoupling the positive and negative sequences of the grid-side voltage and current in the dq coordinate system, the relationship between the sequential component current and power under asymmetrical faults is set up, the command values of the positive and negative sequence currents is obtained by calculation, the active power is controlled to reduce the frequency fluctuation of the system, and the reactive power is regulated to support the voltage recovery at the grid-connected point. The output of the current inner-loop is taken as the input to the part of the voltage outer-loop control, the inner-loop PI control of the current is optimized into sliding-mode control so to enhance stability of the grid-connected inverter. The simulation experiment shows the effectiveness of the optimized control method. The fault ride through ability and operation stability of the permanent magnet direct drive wind power grid connected system in case of unbalanced high voltage are improved.

Keywords: direct-drive wind turbine; high voltage ride-through; asymmetric fault; virtual synchronization technology; sliding mode control

0 引言

随着新能源占比和风电渗透率不断提高,电力

系统的安全稳定运行面临着新的挑战^[1-6]。近年来,针对风电机组在电压故障下的穿越(voltage ride through, VRT)进行了大量研究,尤其在低电压穿越

(low voltage ride through, LVRT)方面取得了一定的研究成果。然而在不对称故障、电力网络参数或负荷不对称引起的不平衡高电压穿越(unbalanced high voltage ride through, UHVRT)方面的研究尚不多见。电力系统运行中,大容量单相负载的切出、单相接地故障时会发生电网三相不平衡电压升高,或大电容补偿器突然接入也将造成电网电压升高^[7]。风电场低电压故障穿越时,因无功补偿协调不同步导致无功过剩,引起并网点电压骤升可导致风机脱网^[8]。采用高压直流输电系统,由直流系统发生闭锁或换相失败造成风机高电压脱网也时常发生^[9-10]。因此对风力发电系统高电压穿越问题,尤其是不平衡高电压故障穿越能力尚需进一步研究和提高。

目前有关风电机组高电压穿越控制,可以按机侧、直流母线、网侧及相应的辅助设备3个不同控制区域分类:文献[11]采用无源阻尼与转子侧变流器协调控制,来消除双馈异步风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)在高电压穿越时转子电流和电磁转矩的冲击,同时抑制转子过电压;文献[12]运用转子回路实际电流的反馈量,抵消转子直流分量来实现抑制转子过电流,在功率平衡基础上计算并考虑变流器的限值电流得到所需的控制电流参考值,避免了直流母线过电压,实现了DFIG高电压穿越控制;文献[13]为解决永磁直驱风电机组(direct-drive permanent magnet synchronous generator, DD-PMSG)的传统控制策略在HVRT期间存在超速脱网问题,提出桨距角控制来抑制转子转速上升的方法。上述方法都是基于风电机组的机侧控制方法来实现高电压穿越。尽管不同机组类型在高电压故障的暂态特性有所不同,但直流母线上都存在功率不平衡,引起直流母线过电压现象。文献[14-15]提出利用超级电容储能系统(super capacitor energy storage system, SCESS)吸收直流母线环节的不平衡功率,提高DD-PMSG的高电压穿越能力;文献[16]提出基于模拟预测控制、滑模控制等控制理论方法,提出基于模型预测控制与超级电容储能系统协调控制,最大化利用风机自身提供的无功电流,实现直流母线过电压的有效抑制;文献[17]提出基于超级电容储能装置和变直流母线电压参考值的方法,并运用滑模控制器的二阶非线性自抗扰滑模控制器,来提高直流母线电压的响应性能,表明了直驱风电系统深度高电压穿越控制的有效性;文献[18-19]提出一种改进线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)技术,提

高直流母线电压的稳定性;文献[6, 20]分析了网侧逆变器的可控区,应用直流母线电压参考值自适应调节算法,提高并网逆变器的高电压穿越控制能力;文献[21]基于虚拟同步电机技术设计了直驱永磁风机高、低电压连续故障穿越策略;文献[22]运用网侧变流器无功电流优化策略,增加机组无功动态支撑能力。

然而上述研究大多涉及三相对称的高电压故障,对不平衡暂态高电压故障的控制研究不足。本文探讨DD-PMSG如何实现三相不平衡高电压穿越问题,先应用虚拟同步电机(virtual synchronous generator, VSG)技术控制有功和调节无功,减少系统的频率波动和支撑并网点电压恢复。再通过对网侧逆变器电压电流在dq坐标系下正负序解耦,进而采用序分量电压、电流双闭环PWM控制,来实现不平衡高电压穿越。为进一步优化控制效果,最后在传统的负序分量PI控制的基础上,采用优化的滑模控制方法,增强了直驱永磁风电系统的不平衡高电压故障穿越能力。

1 机组控制策略

1.1 机侧变流器控制策略

永磁直驱同步风力发电机组(DD-PMSG)的发电机通过背靠背变流器与电网连接,机侧变流器(machine-side converter, MSC)采用控制最大电流的方式,使PMSG在输出相同电磁转矩的情况下,定子电流直流分量 i_{sd} 最小,即令 $i_{sd}=0$,电机发出最大转矩^[23]。PMSG的电压方程在旋转坐标 d 、 q 轴下可以化简为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s L_{sq} i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s L_{sd} i_{sd} + \omega_s \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 、 L_{sd} 、 L_{sq} 分别为发电机 d 轴、 q 轴方向上的电压、电流分量、电感值; ω_s 、 ψ_f 分别为永磁电机同步角速度和转子磁链。采取双闭环控制策略,机侧变流器控制策略见图1。

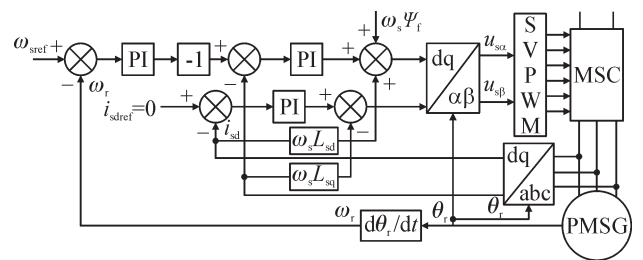


图1 机侧变流器控制策略
Fig. 1 Control strategy of generator side converter

1.2 网侧逆变器功率调节

对网侧逆变器(grid-side converter, GSC)建立虚拟同步电机(VSG)的有功、无功调节控制^[24]。虚拟同步电机的机械转矩、电磁转矩分别用有功功率参考值、电磁功率、角频率表示;将虚拟同步电机的虚拟电势、输出的无功功率和机端电压建立联系。得到VSG的有功调节和无功调节的数学方程式为

$$\begin{cases} \frac{P_{\text{ref}}}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega} + D(\omega_0 - \omega) = J \frac{d\omega}{dt} \\ Q_{\text{ref}} - Q_e = K \frac{d(E - e_n)}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{ref} 、 P_e 分别为有功功率参考值和虚拟同步电机输出的电磁功率; Q_{ref} 、 Q_e 分别为无功功率参考值和输出的无功功率;根据式(2)建立VSG的有功和无功控制结构见图2。

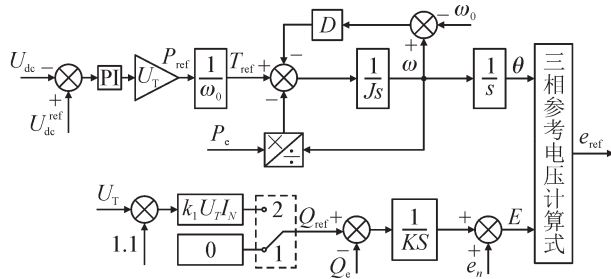


图2 虚拟同步电机控制框图

Fig. 2 Control block diagram of virtual synchronous generator

图中: U_r 为并网点检测电压标幺值; I_N 为风电机组额定电流; k_1 为动态无功电流比例系数; U_{dc} 为直流母线电压; J 和 D 分别为虚拟同步电机的虚拟转动惯量和阻尼系数; ω 和 ω_0 分别为虚拟同步电机的角频率和电网的角频率; E 和 e_n 分别为虚拟电势和额定电压; K 为积分系数。其有功控制是经虚拟同步电机虚拟机械转矩 T_m 调节来实现的,通过调节有功功率的参考值与电磁功率实际值比较,来控制变流器输出电压相位角 θ 和实现对频率的稳定控制,模仿传统同步发电机通过机械转矩调节有功输出和频率控制。虚拟电势 E 则是通过无功功率和无功功率的设定值比较来实现调节,模仿同步发电机通过调节励磁实现无功输出和电压的调节。通过 E 和 θ 实现电压合成,得到虚拟同步电机参考电压 e_{ref} 为

$$e_{\text{ref}} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \sin(\theta) \\ E \sin(\theta - 2\pi/3) \\ E \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 电网电压不平衡分析

直驱永磁同步发电机组并网运行时,由于网侧

逆变器通常采用三相无中线并网方式,当电网电压出现不平衡跃升时,无需考虑零序电压、电流分量,只需考虑正序和负序电压、电流分量即可。将并网点电压、电流通过瞬时对称分量法(instantaneous symmetry component method, ISCM)和克拉克变换(clarke transformation)得到 $\alpha\beta$ 两相静止坐标表示,再通过向量的形式,将负序分量统一到正序同步旋转坐标系下,公式为

$$u_g = u_{g\alpha}^+ + ju_{g\beta}^+ + u_{g\alpha}^- + ju_{g\beta}^- = (u_{gd}^+ + ju_{gq}^+)e^{j\omega_0 t} + [(u_{gd}^- + ju_{gq}^-)e^{-j2\omega_0 t}]e^{j\omega_0 t} \quad (4)$$

$$i_g = i_{g\alpha}^+ + ji_{g\beta}^+ + i_{g\alpha}^- + ji_{g\beta}^- = (i_{gd}^+ + ji_{gq}^+)e^{j\omega_0 t} + [(i_{gd}^- + ji_{gq}^-)e^{-j2\omega_0 t}]e^{j\omega_0 t} \quad (5)$$

式中: $u_{g\alpha}^+$ 、 $u_{g\beta}^+$ 、 $u_{g\alpha}^-$ 、 $u_{g\beta}^-$ 、 $i_{g\alpha}^+$ 、 $i_{g\beta}^+$ 、 $i_{g\alpha}^-$ 、 $i_{g\beta}^-$ 为两相静止坐标系下的正、负序电压和电流; u_{gd}^+ 、 u_{gq}^+ 、 u_{gd}^- 、 u_{gq}^- 、 i_{gd}^+ 、 i_{gq}^+ 、 i_{gd}^- 、 i_{gq}^- 为正、负序同步旋转坐标系下的电压、电流。根据瞬时功率理论,网侧逆变器复功率为^[25]

$$S = \frac{3}{2} u_g^* i_g = P_g + jQ_g \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_g = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega_0 t) + P_{s2} \sin(2\omega_0 t) \\ Q_g = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega_0 t) + Q_{s2} \sin(2\omega_0 t) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_{c2} \\ P_{s2} \\ Q_0 \\ Q_{c2} \\ Q_{s2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{gd}^+ & u_{gq}^+ & u_{gd}^- & u_{gq}^- \\ u_{gd}^- & u_{gq}^- & u_{gd}^+ & u_{gq}^+ \\ u_{gq}^+ & -u_{gd}^+ & -u_{gq}^- & u_{gd}^- \\ u_{gd}^+ & -u_{gq}^+ & u_{gd}^- & -u_{gq}^- \\ u_{gq}^- & -u_{gd}^- & u_{gq}^+ & -u_{gd}^+ \\ -u_{gd}^- & -u_{gq}^- & u_{gd}^+ & u_{gq}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd}^+ \\ i_{gq}^+ \\ i_{gd}^- \\ i_{gq}^- \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: P_0 、 P_{c2} 、 P_{s2} 分别为有功功率的平均值和有功功率二次谐波余弦、正弦峰值; Q_0 、 Q_{c2} 、 Q_{s2} 分别为无功功率的平均值、无功功率二次谐波余弦、正弦峰值。由逆变器输出的瞬时功率可知,当并网点出现不平衡电压跃升后,负序分量在正序同步旋转坐标系下表现为2倍频交流量,将会影响网侧逆变器的正常工作,造成并网电能质量的下降。若想通过公式(8)的 i_{gd}^+ 、 i_{gq}^+ 、 i_{gd}^- 、 i_{gq}^- 来实现对 P_0 、 P_{c2} 、 P_{s2} 、 Q_0 、 Q_{c2} 、 Q_{s2} 控制,以减小功率的振荡,需要对网侧逆变器控制策略进一步研究。

3 基于序分量的虚拟同步电机功率调节

为进一步分析网侧逆变器在电网不平衡高压的控制方式,上文已运用虚拟同步电机技术实现

对有功功率和无功功率控制,下文将进一步建立序分量控制策略。网侧逆变器的正、负序分量在 dq 旋转坐标系下的电路方程为

$$\begin{cases} e_d^+ = u_{gd}^+ - L \frac{di_{gd}^+}{dt} - Ri_{gd}^+ + \omega_0 Li_{gq}^+ \\ e_q^+ = u_{gq}^+ - L \frac{di_{gq}^+}{dt} - Ri_{gq}^+ - \omega_0 Li_{gd}^+ \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} e_d^- = u_{gd}^- - L \frac{di_{gd}^-}{dt} - Ri_{gd}^- - \omega_0 Li_{gq}^- \\ e_q^- = u_{gq}^- - L \frac{di_{gq}^-}{dt} - Ri_{gq}^- + \omega_0 Li_{gd}^- \end{cases} \quad (10)$$

式中: e_d^+ 、 e_d^- 、 e_q^+ 、 e_q^- 分别为网侧逆变器端口电压在 dq 坐标系下的正、负序分量; i_{gd}^+ 、 i_{gd}^- 、 i_{gq}^+ 、 i_{gq}^- 分别为正、负序在 dq 坐标系下电流指令值。网侧逆变器序分量 PI 控制的系统框图见图 3。在忽略滤波电容电流时,逆变器输出电流和电网电流相等。为实现电流与功率的协调控制,需计算正、负序电流的指令值。

当系统正常运行时,网侧无负序分量,由式(9)

在复频域转化下^[26]可以计算出电网正常运行状态下的电流指令值为

$$\begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{R^2 + (\omega_0 L)^2} \begin{bmatrix} R(e_d^* - u_{gd}^+) + \omega_0 L(e_q^* - u_{gq}^+) \\ R(e_q^* - u_{gq}^+) - \omega_0 L(e_d^* - u_{gd}^+) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, e_d^* 、 e_q^* 为虚拟同步电机计算的参考电压指令值。此时负序电流为零代入公式(8)得

$$\begin{bmatrix} P_{s2} \\ P_{c2} \\ Q_{s2} \\ Q_{c2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{gq}^- & -u_{gd}^- & -u_{gq}^+ & u_{gd}^+ \\ u_{gd}^- & u_{gq}^- & u_{gd}^+ & u_{gq}^+ \\ u_{gq}^- & -u_{gd}^- & u_{gq}^+ & -u_{gd}^+ \\ -u_{gd}^- & -u_{gq}^- & u_{gd}^+ & u_{gq}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{gq}^- & -u_{gd}^- \\ u_{gd}^- & u_{gq}^- \\ u_{gq}^- & -u_{gd}^- \\ -u_{gd}^- & -u_{gq}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \end{bmatrix} \quad (12)$$

直驱永磁同步风力发电机组(DD-PMSG)为实现电压骤升故障期间风机不脱网运行,需进一步分析其故障时暂态特性。DD-PMSG 在高电压故障

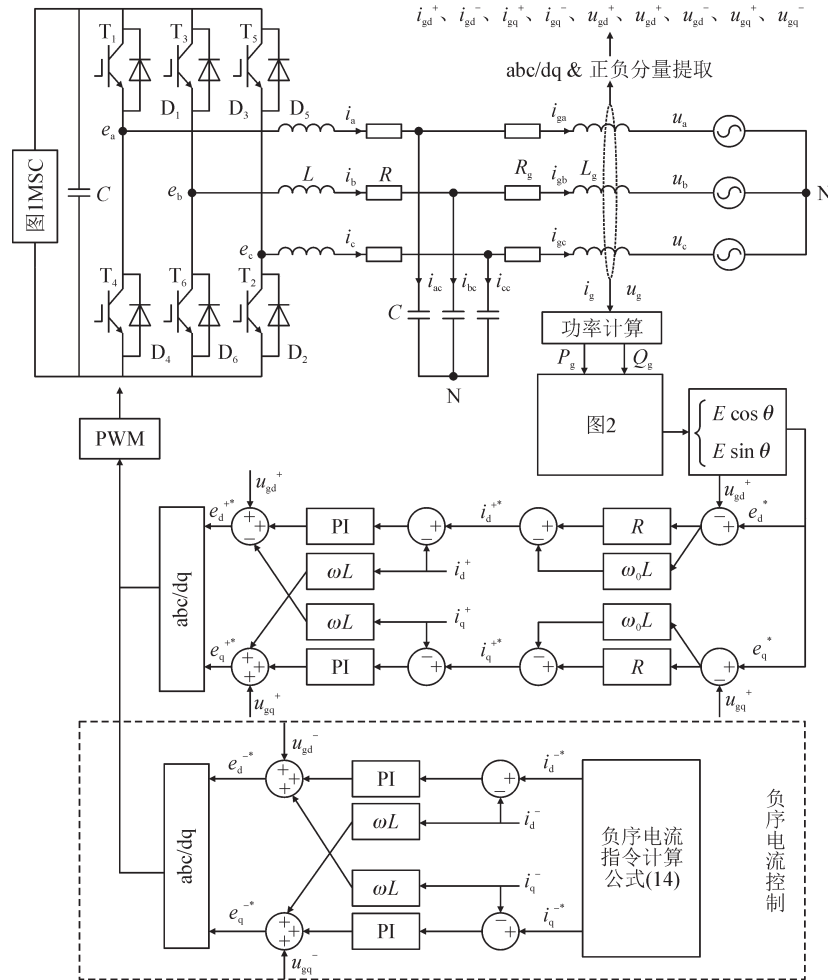


图3 网侧逆变器序分量PI控制的系统框图

Fig. 3 Block diagram of system for PI control of the sequential component of the grid-side inverter

瞬间,风机变桨系统来不及调整,注入到变流器的功率不变,此时将直流母线、机侧变流器和风机可等效成一个恒功率电源。如果 DD-PMSG 要想实现高电压故障穿越,此时就需要控制网侧逆变器在故障状态下运行,并且遵循“优先保有功后发无功”的原则。在不平衡高电压故障下,逆变器输出功率中存在 2 倍频谐波功率,同时也会引起直流母线电容电压发生 2 倍频波动,可以通过谐波器消除负序分量给直流母线电容电压带来的影响。为保持高电压故障穿越时有功的稳定输出和动态无功的支撑,以下推导基于负序分量控制的电流指令值,为使有功输出稳定,需要使有功功率二倍频分量 P_{c2} 、 P_{s2} 为零。将 P_{c2} 、 P_{s2} 为零代入式(8)联合式(12)得

$$\begin{bmatrix} u_{gq}^- & -u_{gd}^- \\ u_{gd}^- & u_{gq}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -u_{gq}^+ & u_{gd}^+ \\ u_{gd}^+ & u_{gq}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

将式(13)进一步计算出负序电流指令值为

$$\begin{bmatrix} i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{u_{gq}^+ u_{gq}^- + u_{gd}^+ u_{gd}^-}{(u_{gd}^+)^2 + (u_{gq}^+)^2} & -\frac{u_{gq}^+ u_{gd}^- + u_{gd}^+ u_{gq}^-}{(u_{gd}^+)^2 + (u_{gq}^+)^2} \\ -\frac{u_{gd}^+ u_{gq}^- + u_{gq}^+ u_{gd}^-}{(u_{gd}^+)^2 + (u_{gq}^+)^2} & -\frac{u_{gd}^+ u_{gd}^- + u_{gq}^+ u_{gq}^-}{(u_{gd}^+)^2 + (u_{gq}^+)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \end{bmatrix} \quad (14)$$

再将式(11)代入式(14)中得

$$\begin{bmatrix} i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{u_{gq}^+ u_{gq}^- + u_{gd}^+ u_{gd}^-}{(u_{gd}^+)^2 + (u_{gq}^+)^2} & -\frac{u_{gq}^+ u_{gd}^- + u_{gd}^+ u_{gq}^-}{(u_{gd}^+)^2 + (u_{gq}^+)^2} \\ \frac{u_{gd}^+ u_{gq}^- + u_{gq}^+ u_{gd}^-}{(u_{gd}^+)^2 + (u_{gq}^+)^2} & -\frac{u_{gd}^+ u_{gd}^- + u_{gq}^+ u_{gq}^-}{(u_{gd}^+)^2 + (u_{gq}^+)^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R(e_d^* - u_{gd}^+) + \omega_0 L(e_q^* - u_{gq}^+) \\ R(e_q^* - u_{gq}^+) - \omega_0 L(e_d^* - u_{gd}^+) \end{bmatrix} \frac{1}{R^2 + (\omega_0 L)^2} \quad (15)$$

基于序分量控制框图如图 3 所示。首先应用虚拟同步电机实现对有功和频率、无功和电压调节,再通过正、负序电压、电流双闭环控制生成虚拟同步电机参考电压指令值进行 PWM 脉宽调制,从而控制逆变器在不平衡高电压时保持功率稳定输出。

4 优化滑模控制

如图 3 基于传统 PI 控制的序分量控制,其已经能较好地实现不平衡暂态高电压穿越,为进一步增强网侧逆变器对电压突变瞬间的适应能力,对负序分量的电压、电流双闭环控制策略进行优化改进。利用滑模控制在参数变化与外部扰动下控制稳定性更加优越的特性,将图 3 中电流内环的输出量作

为电压外环部分控制量的输入,将电流内环的传统 PI 控制优化成滑模控制,从而进一步提高并网逆变器运行的稳定性。由式(10)选状态变量 $[e_d^-, e_q^-]^T$ 、输出变量 $[i_d^-, i_q^-]^T$ 、输入变量 $[i_d^+, i_q^+]^T$, 则负序电流的系统表达式为

$$\begin{cases} \dot{i}_d^- = \frac{di_d^-}{dt} = L^{-1}(u_d^- - e_d^- + Ri_d^- - \omega_0 Li_q^-) \\ \dot{i}_q^- = \frac{di_q^-}{dt} = L^{-1}(u_q^- - e_q^- + Ri_q^- + \omega_0 Li_d^-) \end{cases} \quad (16)$$

设置负序电流滑模控制器,线性滑模面表达式为

$$S = C_1 \dot{i}_d^- + C_2 \dot{i}_q^- + C_3 \operatorname{sgn} \Delta i_d^- + C_4 \operatorname{sgn} \Delta i_q^- \quad (17)$$

$$\Delta i_d^- = i_d^- - i_d^{*-}$$

$$\Delta i_q^- = i_q^- - i_q^{*-}$$

$C_i > 0, i=1, 2, 3, 4$, sgn 是符号函数,根据滑模面设计如下控制策略,则能保证系统在有限时间趋于稳定:

$$\Delta e_d^- = e_d^- - e_d^{*-} = R \Delta i_d^- + L \dot{i}_d^{*-} - C_3 \operatorname{sgn} \Delta i_d^- \quad (18)$$

$$\Delta e_q^- = e_q^- - e_q^{*-} = R \Delta i_q^- + L \dot{i}_q^{*-} - C_4 \operatorname{sgn} \Delta i_q^-$$

$\dot{i}_d^{*-}$ 、 $\dot{i}_q^{*-}$ 为微分估计值,取 Lyapunov 函数 $V = \frac{S^2}{2}$,

根据 Lyapunov 稳定性判定定理 $\dot{V} = s\dot{s} \leq -L^{-1}|s| < 0$ 。V 在有限时间内收敛于零,保证 S 在有限时间内收敛于零,从而实现电流偏差趋于零。

5 仿真分析

为验证直驱永磁风电并网系统在不平衡高电压穿越控制方案的有效性,应用 Matlab/Simlink 进行仿真实验,实验参数见表 1。

表 1 实验参数设置
Table 1 Experimental parameters settings

系统参数	数值	系统参数	数值
额定容量/MW	2.5	交直流电感/mH	0.835
定子相电阻/W	0.78	转子永磁铁磁链/Wb	0.4
极对数	32	网侧额定电压/V	690
滤波电感/H	0.05	滤波电阻/W	0.01
直流母线电容/F	0.04	直流电压/V	1 200
额定频率 f_N /Hz	50	网侧 PI 控制器 K_p/K_i	0.5/3

以发生单相暂态过电压为例,仿真分析了两组不同程度的暂态高电压故障情况。实验组 1:网侧逆变器在正常工作状态下运行 2 s 后,A 相电压骤升为 1.15 p.u.,经过 1 s 后再恢复到额定电压,见图 4(a)。

传统 1.15 p.u. PI 控制实验结果见图 4。仿真实验波形显示,当网侧逆变器遇到不平衡电压骤升时,网侧逆变器引入 VSG 控制后,再通过序分量电流控制。其有效地控制有功平衡和频率稳定,且在暂态高电压期间提供动态无功支撑。

如图 4(b)中故障高电压发生和消除时刻,有功功率波动幅值在 $\pm 10\% P_n$ 范围内,波动幅值大于零,波动时间短暂;在电压升高期间,输出有功功率波动幅值满足在 $\pm 5\% P_n$ 范围内。频率波形图 4(c)显示:当故障高电压发生和消除时刻,频率波动幅值

在 $\pm 0.2\%$ 范围内,在电压升高期间能够快速恢复到电网工频且频率波动在 $\pm 0.1\%$ 范围内,波动幅度和时间极短。无功波形图 4(d)中,当网侧遇到不平衡三相电压骤升时,动态无功快速响应支撑电网电压恢复;自网侧电压突变开始,无功支撑电压恢复响应时间小于 40 ms,且在电压故障期间,持续注入感性无功支撑电网电压恢复。当系统电压水平恢复正常后,网侧逆变器向电网保持稳定的有功功率的输出,无功输出为零。正常并网状态下在单位功率因数下运行,满足正常并网功率传输的要求。

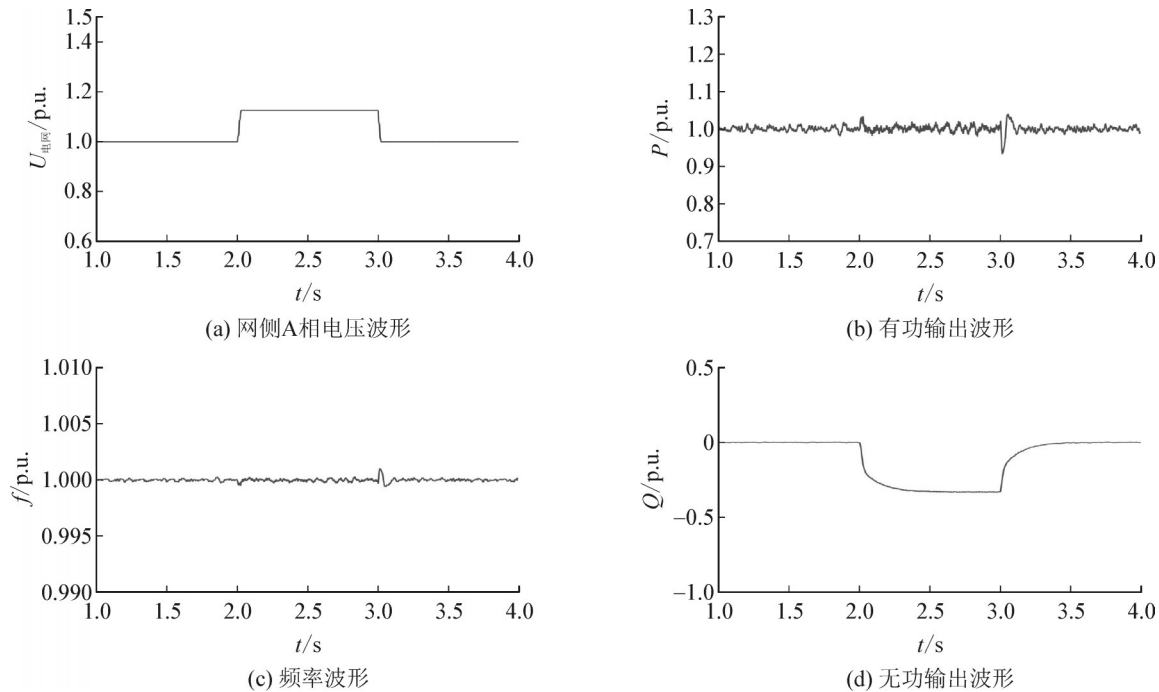


图4 电压为 1.15 p.u. PI 控制仿真结果
Fig. 4 PI control simulation results at the voltage of 1.15 p.u.

实验组 2:网侧逆变器在正常工作状态下运行 2 s 时,使 A 相电压骤升 1.3 p.u.并持续 1 s 后再恢复到额定电压,如图 5(a)所示。实验波形分别给出传统序分量 PI 控制和滑模控制结果,实验结果见图 5 和图 6。当网侧逆变器由传统的 PI 控制优化为滑模控制后,能更好地控制有功平衡和频率稳定,无功调节随电压变化更迅速。

图 5(c)在电压升高时刻及电压恢复正常时刻,有功功率波动相较于实验组一图 4(b)波动变大,但波动时间极其短暂;故障高电压发生和消除时刻,有功功率波动幅值在 $\pm 30\% P_n$ 范围内;在电压骤升至恢复正常的时间段,输出有功功率波动幅值满足在 $\pm 6\% P_n$ 范围内。频率波形图 5(d)显示:在电压骤升和恢复时刻,频率波动幅度在 $\pm 0.5\%$ 内且波动时间极短;在电压升高期间,波动幅度在 $\pm 0.2\%$ 范围内。无功波形如图 5(e),动态无功快速响应支撑

电网电压恢复。可见对于不同程度暂态过电压,网侧逆变器控制有功和无功功率的波动在合理范围,同时频率满足并网要求。

图 6 表示将网侧逆变器的负序分量优化为滑模控制后的仿真结果。网侧逆变器同样在正常工作运行 2 s 后,A 相电压骤升为 1.3 p.u.,经过 1 s 后再恢复到额定电压。数据统计结果见表 2。有功波形图 6(b)相较于图 5(c),在电压骤升和恢复瞬间波动幅度分别降低了 1.7% 和 1.2%,在电压升高期间,输出有功功率波动幅度减小了 3.4%,波动幅度明显得到改善。频率波形图 6(c)相较于图 5(d),在电压升高和恢复瞬间,频率波动幅度分别减少了 0.04% 和 0.12%;在电压升高期间,波动幅度减少了 0.029%,频率也更加稳定。无功波形如图 6(d)和图 5(e),对比可见动态无功快速响应可以支撑电网电压快速恢复,局部波动较小且故障时刻响应速度

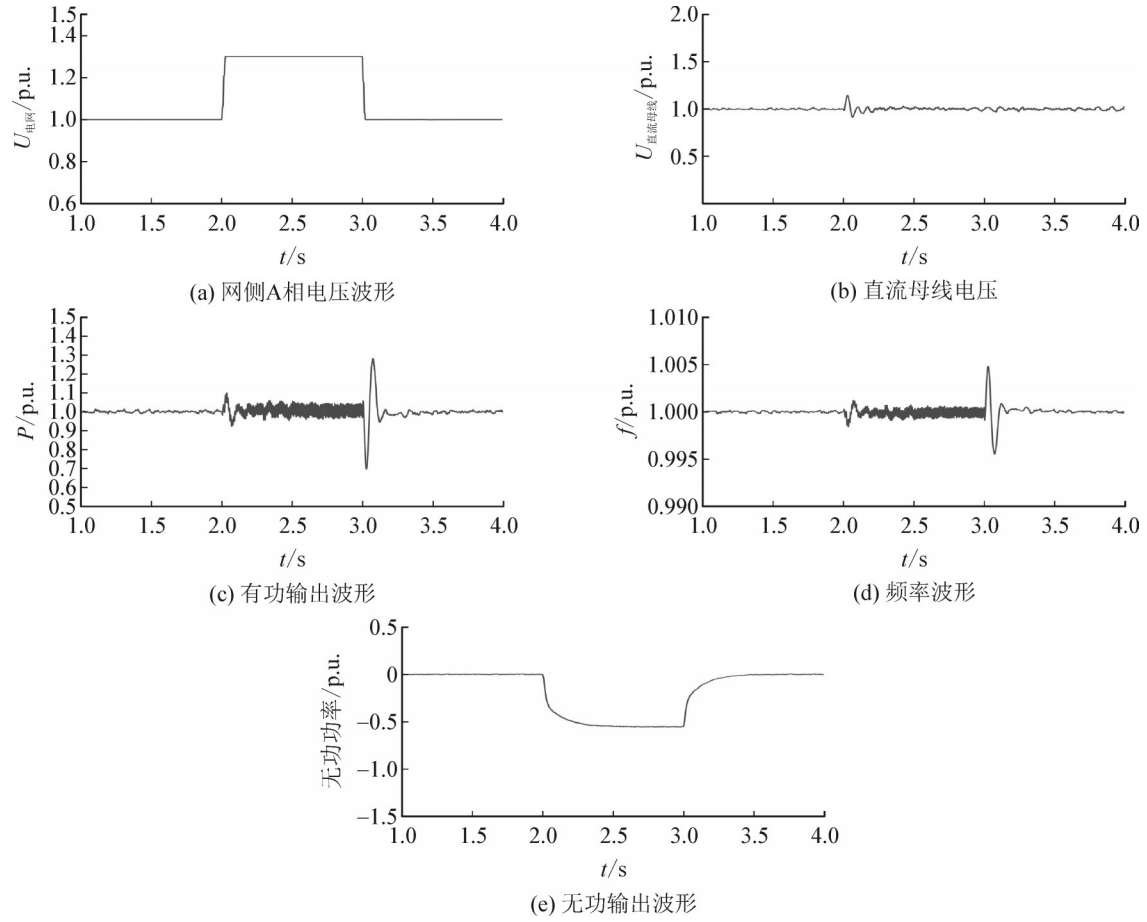


图5 电压为1.3 p.u. PI控制仿真结果
Fig. 5 PI control simulation results at the voltage of 1.3 p.u.

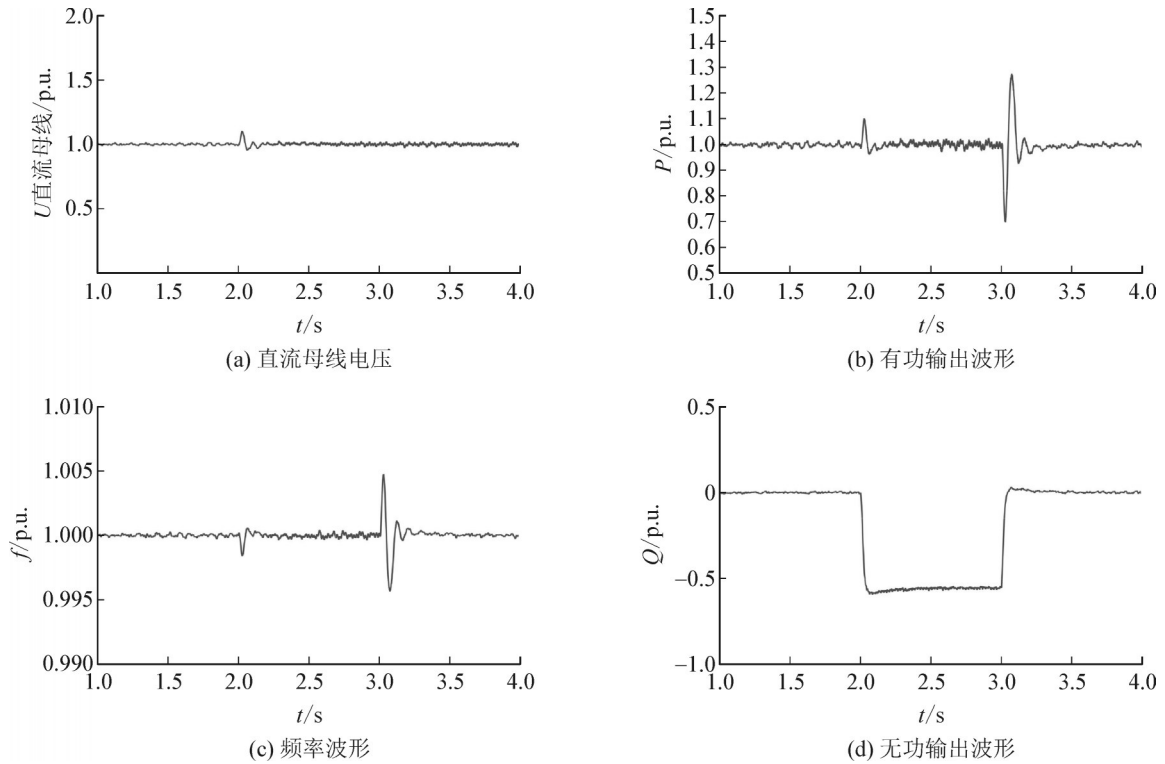


图6 电压为1.3 p.u.滑模控制仿真结果
Fig. 6 Sliding mode control simulation results at voltage of 1.3 p.u.

更快。可见优化滑模控制相较传统控制,有功、无功、频率波动更小,进一步提高了并网的稳定性。

表2 不同控制方式数据比对
Table 2 Comparison of data at different control modes

控制方式	t/s	有功波动/%	频率波动/%
PI控制	2	10.8	0.160
	2~3	5.4	0.079
	3	28.9	0.480
滑模控制	2	9.1	0.120
	2~3	2.0	0.050
	3	27.7	0.360

6 结语

针对直驱永磁风电机组在电网电压出现不平衡暂态高电压时存在能量不平衡及功率波动问题,提出了一种基于序分量的网侧逆变器优化滑模控制策略。首先运用虚拟同步电机技术实现有功与频率、无功与电压调节,然后通过正、负序电压电流双闭环控制,以虚拟同步电机参考电压指令值进行PWM脉宽调制,从而控制逆变器在不平衡高电压状况下功率的稳定输出和直流母线电压的稳定;对电流内环PI控制优化成滑模控制,将电流内环的输出量作为电压外环部分控制量的输入,有效增强了抗不平衡暂态高电压的暂态冲击的能力,提高了永磁直驱风电并网系统在不平衡高电压时故障穿越能力和运行稳定性。

参考文献

[1] 杨大业,项祖涛,马世英,等. 新能源接入系统暂态过电压产生机理及主要影响因素[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(3):127-134.
YANG Daye, XIANG Zutao, MA Shiyong, et al. Mechanism and main influencing factors of transient over-voltage in new energy access system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 127-134.

[2] 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.

[3] 徐式蕴,孙华东,王姝彦,等. 高比例电力电子电力系统过电压(2)——交流对称故障下暂时工频过电压机理[J/OL]. 中国电机工程学报:1-13[2024-02-27].
XU Shiyun, SUN Huadong, WANG Shuyan, et al. Overvoltage of the power system integrated with high proportion of power electronics equipment (II)—Mechanistic analysis of

transient power frequency overvoltage caused by AC symmetrical fault[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-13[2024-02-27].

[4] 郑晗,降低高电压风险的双馈风电机组低电压穿越参考功率整定[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(4):161-168.
ZHENG Han. Low voltage ride-through reference power setting for doubly-fed induction generator to reduce high-voltage risk[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 161-168.

[5] 魏娟,黎灿兵,黄晟,等. 大规模风电场高电压穿越控制方法研究综述[J/OL]. 上海交通大学报:1-27[2023-07-12].
WEI Juan, LI Canbing, HUANG Sheng, et al. Review on high voltage ride-through control method of large-scale wind farm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: 1-27[2023-07-12].

[6] 郑重,耿华,杨耕. 新能源发电系统并网逆变器的高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1463-1472.
ZHENG Zhong, GENG Hua, YANG Geng. High voltage ride-through control strategy of grid-connected inverter for renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1463-1472.

[7] 邹欣,李晖,赵晟凯,等. 直驱风电场高电压穿越控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(1):191-198.
ZOU Xin, LI Hui, ZHAO Shengkai, et al. Study on high voltage ride-through control strategy of direct-drive wind farm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 191-198.

[8] 孙华东,许涛,郭强,等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报,2019,39(21):6183-6191.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in great britain power grid on August 9th, 2019 and its Enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.

[9] 金一丁,贺静波,李光辉,等. 风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(二):送端风电机组暂态无功电压特性与作用机理分析[J]. 中国电机工程学报,2022,42(13):4738-4748.
JIN Yiding, HE Jingbo, LI Guanghui, et al. Commutation failure of UHVDC system for wind farm integration (part II): characteristics and mechanism analysis of transient reactive power and voltage of wind powers in sending terminal grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4738-4748.

[10] 秦世耀,姜蓉蓉,刘晋,等. UHVDC闭锁引发风电场暂态过电压分析及HVRT协调控制[J]. 电力自动化设备,

- 2020,40(6):63-69.
- QIN Shiyao, JIANG Rongrong, LIU Jin, et al. Transient overvoltage analysis of wind farm with UHVDC block and HVRT coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 63-69.
- [11] ZHOU Changping, WANG Zhen, XIN Huanhai, et al. A PQ coordination based model predictive control for DFIG high-voltage ride through[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(1): 254-263.
- [12] 蔡振华, 黎灿兵, 阳同光, 等. 基于转子电流反馈与功率不平衡响应的高电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 123-130.
- CAI Zhenhua, LI Canbing, YANG Tongguang, et al. High voltage ride-through control strategy based on rotor current feedback and power imbalance response[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 123-130.
- [13] 王健, 张津瑞, 蔡婷婷, 等. 基于桨距角控制的永磁风电机组高电压穿越控制策略[J]. 电气自动化, 2024, 46(1): 63-65.
- WANG Jian, ZHANG Jinrui, CAI Tingting, et al. High voltage ride through control strategy for permanent magnet wind turbine based on pitch angle control[J]. Electrical Automation, 2024, 46(1): 63-65.
- [14] 孙谊嫒, 南东亮, 张公生. 含超级电容储能的直驱永磁风电机组高电压穿越控制策略[J]. 电气传动, 2018, 48(10): 48-52.
- SUN Yiqian, NAN Dongliang, ZHANG Gongsheng. High voltage ride through control strategy of direct-drive permanent magnet wind turbine with super capacitor energy storage[J]. Electric Drive, 2018, 48(10): 48-52.
- [15] 薛易, 吴立涵, 李天意, 等. 超级电容储能的直驱风机高电压穿越控制策略[J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33(3): 451-456.
- XUE Yi, WU Lihan, LI Tianyi, et al. High voltage ride through control strategy for direct drive fan with supercapacitor energy storage[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2023, 33(3): 451-456.
- [16] WEI Juan, LI Canbing, WU Qiwei, et al. MPC-based DC-link voltage control for enhanced high-voltage ride-through of offshore DFIG wind turbine[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 126: 106591.
- [17] 樊志宇, 田桂珍, 刘广忱, 等. 基于自抗扰控制的直驱风电系统高电压穿越控制策略[J/OL]. 高电压技术: 1-15 [2024-01-22].
- FAN Zhiyu, TIAN Guizhen, LIU Guangchen, et al. High voltage ride through control strategy for direct drive wind power systems based on self disturbance rejection control[J]. High voltage Engineering: 1-15 [2024-01-22].
- [18] 张梦阳, 刘毅力, 朱晓龙, 等. 基于自抗扰技术的直驱风机高电压穿越控制策略[J]. 分布式能源, 2023, 8(5): 1-9.
- ZHANG Mengyang, LIU Yili, ZHU Xiaolong, et al. High voltage ride through control strategy of PMSGs based on active disturbance rejection control technology[J]. Distributed Energy, 2023, 8(5): 1-9.
- [19] 周雪松, 郭帅朝, 马幼捷, 等. 基于改进自抗扰的交流系统直流母线电压波动抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 68-78.
- ZHOU Xuesong, GUO Shuaichao, MA Youjie, et al. DC bus voltage fluctuation suppression strategy of a converter system based on improved active disturbance rejection[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 68-78.
- [20] ZOU Xudong, ZHU Donghai, HU Jiabing, et al. Mechanism analysis of the required rotor current and voltage for DFIG-based WTs to ride-through severe symmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7300-7304.
- [21] 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.
- [22] 王德胜, 颜湘武, 刘辉, 等. 基于动态无功支撑的全功率变流风电机组高电压穿越改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 957-967.
- WANG Desheng, YAN Xiangwu, LIU Hui, et al. High voltage ride through improved control of full power converter wind turbines based on dynamic reactive power support[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 957-967.
- [23] 黄肖琪, 周羽生, 周文晴, 等. 基于储能和无功优化的直驱机组海上风电场低电压穿越策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 57-64.
- HUANG Xiaoqi, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Low voltage ride through strategy of the D-PMSG offshore wind power farm based on energy storage and reactive power optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 57-64.
- [24] 朱子民, 张锦芳, 常清, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑柔直系统的送端自适应VSG控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 211-221.
- ZHU Zimin, ZHANG Jinfang, CHANG Qing, et al. Adaptive VSG control strategy of sending end for large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized support VSC-HVDC system[J]. Electric Power, 2024, 57(5): 211-221.
- [25] 杨航, 周羽生, 许振华, 等. 基于储能和序分量控制的直驱永磁风电系统非对称故障穿越研究[J]. 电力系统保护

与控制,2022,50(2):60-68.

YANG Hang, ZHOU Yusheng, XU Zhenhua, et al. Asymmetric fault ride-through of a direct-drive permanent magnet wind power system based on the control of energy storage and sequence components[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 60-68.

[26]汪怡秀,王辉,郑玢鑫,等. 基于VSG的电网电压不平衡下并网逆变器控制策略[J]. 可再生能源, 2022, 40(5): 696-702.

WANG Yixiu, WANG Hui, ZHU Binxin, et al. Control strategy of grid-connected inverter based on VSG under un-

balanced grid voltage[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(5): 696-702.

作者简介:

许成(1996—),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电及并网技术。E-mail:163219576@qq.com。

周羽生(1965—),男,教授,通信作者,研究方向为新能源发电与电网安全等。

周文晴(1993—),女,博士研究生,研究方向为新能源电力技术及其灾变防治。

郭顺(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电网安全与融冰防灾。

《电力电容器与无功补偿》2024 年 6 期广告单位

1	上海思源电力电容器有限公司	封面	11	西安金叶电力科技有限公司	前插 7
2	山东哈大电气有限公司	封二	12	陕西凯瑞宏星电器有限公司	前插 8
3	合容电气股份有限公司	封三	13	新程(辽宁)电力电容器科技有限公司	前插 9
4	西安高压电器研究院股份有限公司(业务)	封底	14	杭州精诚电力设备有限公司	前插 10
5	深圳市紫宸激光设备有限公司	前插 1	15	辽宁芯峻电气有限公司	前插 11
6	温州市凯泰特种电器有限公司	前插 2	16	深圳市三和电力科技有限公司	前插 12
7	桂林明富金属股份有限公司	前插 3	17	日新电机(无锡)有限公司	前插 13
8	陕西泰普瑞电工技术有限公司	前插 4	18	西安高压电器研究院股份有限公司(认证中心)	前插 14
9	赛晶科技集团有限公司	前插 5	19	东莞市东和电子制程有限公司	前插 15
10	山东海源泰和电气有限公司	前插 6	20	西安唯实输配电技术有限公司	前插 16