

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231133

主动支撑电网的双馈风电场故障功率协调控制方法

欧阳金鑫, 张澳归, 余建峰, 王建, 叶之琪

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 风电持续开发建设使同步发电机渗透率降低, 电力系统抗扰能力不断下降。双馈风电场(doubly-fed wind farm, DFWF)内部故障后, 双馈风电机组(doubly-fed wind turbine, DFWT)的切除导致电力系统出现功率缺额, 可能威胁系统安全稳定运行。为此, 利用故障期间 DFWT 机械功率与电磁功率不平衡累积的暂态能量, 提出了主动支撑电网的双馈风电场故障功率协调控制方法。分析了 DFWF 内部故障特征, 提出了故障全过程功率协调控制的思想。推导了 DFWF 内部故障下 DFWT 的转速解析表达式, 分析了 DFWT 暂态能量的特征并给出了最大暂态能量的计算方法。在此基础上, 给出了 DFWT 功率支撑控制参考值与功率支撑控制时间的计算方法, 并提出了 DFWT 故障功率协调控制策略。算例表明, DFWF 故障功率协调控制可利用暂态能量最大限度地提供功率支撑, 降低 DFWF 内部故障对电力系统的影响。

关键词: 风电场; 双馈风电机组; 集电线故障; 有功控制; 暂态能量

Coordinated fault power control method for doubly-fed wind farms with active grid support

OUYANG Jinxin, ZHANG Aogui, YU Jianfeng, WANG Jian, YE Zhiqi

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The development of wind power has led to a decrease in the penetration rate of synchronous generators, resulting in a reduction in power system resilience. In the case of an internal fault of a doubly-fed wind farm (DFWF), the removal of a doubly-fed wind turbine (DFWT) may cause a power shortage, posing a threat to its safe operation. In light of this, a fault power coordination control method for doubly-fed wind turbines is proposed to actively support the grid by using the transient energy accumulated by the mechanical and electromagnetic power imbalance of the DFWT during the fault. This paper analyzes the characteristics of the DFWF internal fault, proposes the idea of fault full process power coordination control, derives the analytical expression of DFWT speed under DFWF internal fault, analyzes the characteristics of DFWT transient energy, and provides a calculation method for the maximum transient energy. Subsequently, the calculation methods for control reference values of the DFWT and power support time are given and a DFWT fault power coordination control strategy is proposed. The algorithm demonstrates that DFWF fault power coordination control can use transient energy maximally to supply power support and reduce the impact of DFWF internal faults in the power system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877018).

Key words: wind farm; doubly-fed wind turbine; collector failure; active control; transient energy

0 引言

随着风电装机容量持续增大, 同步发电机(synchronous generator, SG)装机比例逐渐减少, 电力

系统的抗干扰能力不断降低^[1]。双馈风电机组(doubly-fed wind turbine, DFWT)是风力发电的主力机型。双馈风电场(doubly-fed wind farm, DFWF)集电线故障后, 保护动作切除整条集电线上的 DFWT, 导致电网功率缺额。SG 功率调节速度存在限制, 特别是随着 SG 渗透率的降低, 仅依赖 SG 可能难以弥补 DFWF 内部故障引起的电网功率缺额。DFWF

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877018); 重庆市研究生科研创新项目资助(CYB22019)

内部故障引起电网功率缺额可能导致频率波动甚至越限, 引发 DFWT 脱网和电网安控系统动作, 扩大故障影响。随着风电场装机容量的不断扩大, 亟需有效的功率支撑手段, 以降低 DFWF 内部故障后电力系统的安全风险。

DFWT 能够通过虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制模拟 SG 的机电特性, 使 DFWT 有功功率随目标虚拟量的变化而改变, 进而为电网提供功率支撑^[2-3]。文献[4]用 VSG 虚拟功率计算电流参考指令并引入协调系数对其修正, 实现不平衡电网下 VSG 多模式协调控制; 文献[5]提出一种基于虚拟惯性控制的 DFWF 协调控制参数设定方法, 改善 DFWT 功率响应的动态特性; 文献[6]对虚拟功率的幅频特性进行了分析和校正, 提出一种改进 VSG 控制策略; 文献[7]提出一种以 SG 调频为主、DFWT 调频为辅的联合控制策略, 但 SG 响应速度较慢, 难以迅速支撑电网功率; 文献[8]构建了多调频资源协调控制的快速频率响应参数设置方法, 但为追求经济性 DFWT 常运行于最大功率追踪(maximum power point tracking, MPPT)点附近, 在 DFWF 内部故障等大扰动场景下可额外提升的有功功率不足。由于 VSG 控制牺牲转子动能为电网提供功率支撑, VSG 控制下 DFWT 功率上调范围有限, 可能难以平抑电网功率缺额。

储能系统具有能量时移、快速响应等特点, 是提升新能源主动支撑能力的重要技术手段^[9], 文献[10]提出了一种改善风电场紧急功率支撑能力的储能最佳分配方案, 但是储能造价较高, 难以与风电装机容量相匹配^[11]。近年来, DFWT 的功率备用运行受到关注。通过调整 DFWT 运行于非最优转速, 可预留功率备用为电网提供紧急支撑。文献[12]分析了风电场限功率运行对二次调频指标及风电极限穿透功率的影响, 建立了电网备用优化模型; 文献[13]计及可再生能源出力和市场价格的不确定性, 提出太阳能发电站与风电场备用协调策略; 文献[14]提出了预留容量的改进 MPPT 曲线控制; 文献[15]提出超速与桨距角协调控制方法, 通过降低 DFWT 有功输出以提高备用容量, 但故障期间 DFWT 转速上升, 转速恢复后需再次降低转速才能提高机组输出功率, 长时间的转速恢复难以满足快速功率支撑的需求。文献[16]通过预测节点失衡功率, 对输配耦合电力系统进行协同优化调度, 但 DFWF 内部故障时, 故障集电线上的 DFWT 因故障切除而退出运行, 电网需要更大的备用容量。此外, 功率备用控制无法最大限度地利用风能, 造成资源浪费, 实用性存在一定制约。

在 DFWF 内部故障期间, DFWT 机械功率与电磁功率不平衡, 不平衡功率导致转子加速^[17], 转子动能的变化产生新的暂态能量。为此, 本文提出了一种在 DFWF 内部故障下利用 DFWT 暂态能量主动为电网提供功率支撑的新方法。通过对故障下 DFWT 转速特性的解析, 刻画 DFWT 暂态能量; 通过在故障期间控制 DFWT 有功功率, 调节暂态能量以在故障切除后支撑电网有功功率; 通过 DFWT 暂态能量与 SG 转子旋转动能配合, 最大限度地补偿 DFWF 内部故障切除后电网功率缺额, 降低电力系统安全风险。本文的主要内容包括: 分析了 DFWF 内部故障的特征, 提出了故障全过程功率协调控制的思想; 分析了 DFWT 内部故障期间转速特性, 提出了 DFWT 暂态能量计算方法; 进而提出了利用暂态能量的功率协调控制策略; 最后通过仿真验证了所提策略的有效性。

1 故障全过程功率协调控制思想

1.1 DFWF 故障特征

DFWT 由风轮机、双馈异步风力发电机、背靠背变流器及其控制系统构成。发电机定子直接连接电网, 转子经过背靠背变流器与电网相连^[1]。通过风轮机捕获风能, 并由齿轮箱驱动与高速轴连接的感应电机旋转产生电能, 从定子和背靠背变流器 2 条通道向电网传输电能。当正常运行时网侧变流器一般运行在高功率因数整流模式, 并为转子侧变流器提供恒定的直流母线电压。转子侧变流器通过控制转子电流和电压, 实现 DFWT 的变速恒频运行以及定子有功和无功功率的解耦控制。

风电场通常采用辐射状接线方式, 多台风电机组并联接入集电线。集电系统汇集的电流经升压站后送入电网。双馈风电场并网系统如图 1 所示。图 1 中的 DFWF 内共有 p 条集电线, 每条集电线接有 q 台 DFWT。当集电线发生短路故障时, DFWT 机端电压跌落。在低电压期间, 转子变流器通过调整转子励磁电流调节 DFWT 的输出功率^[18]。当电压跌落较小、转子电流未达到限幅时, DFWT 为电网提供无功功率的同时, 可通过提升转子有功电流提升有功功率。但是, DFWT 转子耐受电流较小, 受转子电流限幅的影响, 绝大多数故障条件下机端电压跌落均造成 DFWT 有功功率的降低, 进而导致电网功率缺额^[19]。

风电场通常在集电线出口配置保护。当集电线发生故障时由出口断路器切除故障, 集电线上的 DFWT 随之退出, 加剧电网功率缺额。如图 1 所示, 集电线 j 故障后, 电压跌落使 DFWF 输出功率降低。

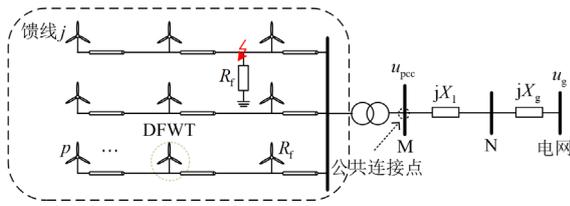


图 1 双馈风电场并网系统
Fig. 1 DFIG grid-connected system

故障切除后，集电线 j 的 q 台 DFWT 被切除，进一步降低 DFWF 输出功率。增发 SG 有功功率可弥补电网功率缺额，虚拟惯量控制、下垂控制等附加控制策略也可使 DFWT 具有一定的功率支撑能力。但是，SG 增发功率受功率调节速度限制，难以快速弥补功率缺额。DFWT 的脱网也使风电场有功备用量下降，无法提供充足的有功功率支撑。

1.2 故障全过程功率协调思想

在 DFWF 内部故障下，DFWT 电磁功率降低。过剩的机械功率导致转子加速，转子旋转动能增加积蓄暂态能量。在转子侧变流器定转矩或定转速控制作用下，故障切除后暂态能量随转速减小不断被消耗。在故障切除后，短时增加 DFWT 有功输出加快转速的恢复，可利用转子暂态能量为电网提供短时功率支撑。通过 DFWF 功率支撑与 SG 一次调频的协调，可最大限度地平抑故障后电网功率缺额，避免系统频率越限。DFWF 所需积蓄的暂态能量由功率参考值与频率支撑时间决定。DFWF 积蓄的暂态能量则与故障期间各 DFWT 的机械功率与电磁功率的不平衡量相关。因此，应有效协调故障期间和故障切除后 DFWT 的有功功率，避免 DFWF 内部故障的影响扩大。

DFWF 内部故障全过程功率协调原理如图 2 所示。其中， t_0 为故障发生时刻， t_2 为故障切除时刻， t_3 为功率支撑控制退出时刻。在 DFWF 内部故障期间，在 Crowbar 保护退出后，通过调整非故障集电线各 DFWT 有功控制参考值，调节 DFWF 电磁功率与机械功率的不平衡水平，从而调整故障期间 DFWT 的转子转速，改变 DFWF 的暂态能量，以满足故障切除后功率支撑的需求。故障期间 DFWT 的有功控制参考值由故障切除后 DFWF 支撑功率所需暂态能量决定。所需暂态能量越大，故障切除时刻的转速应越大，故障期间 DFWT 有功控制参考值越小。故障切除后所需的暂态能量决定于电网功率缺额和 SG 的功率调节速度。为避免频率越限，故障切除后，DFWF 功率下调的速率应与 SG 一次调频过程中的功率调节速度相匹配，DFWF 增发功率持续时间应等于 SG 可完全弥补功率缺额所需时间。

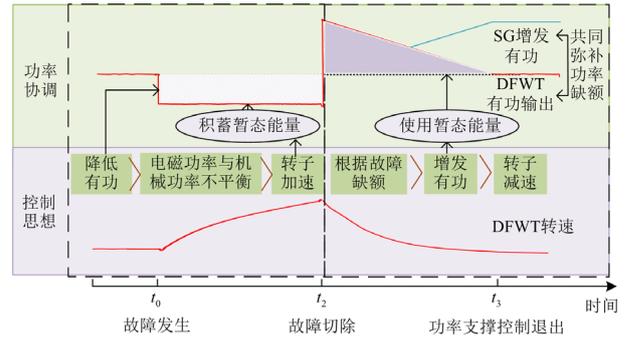


图 2 故障全过程功率协调原理

Fig. 2 Principle of fault full process power coordination

检测到风电场集电线发生故障时，计算初始功率缺额在故障期间的变化情况。结合切除故障造成的功率缺额，计算电网最大功率缺额，从而确定 DFWF 所需提供的功率。受转子侧变流器电流限制的影响，故障切除后 DFWT 有功控制参考值不能超过最大允许电流对应的最大有功功率。同时，故障期间 DFWT 可积蓄的最大暂态能量受最大转速的限制。因此，根据最大允许电流和最大转速约束，判断仅利用 DFWF 能否弥补电网功率缺额。若 DFWF 能够弥补电网功率缺额，则根据所需提供的功率确定故障切除后非故障集电线各 DFWT 的有功控制参考值。若 DFWF 不能弥补电网功率缺额，根据转子电流限制与最大转速限制确定故障切除后的 DFWT 有功控制参考值，利用 DFWF 最大限度地提供功率支撑，并辅以切负荷手段。然后，根据故障切除后的 DFWF 的功率参考值计算所需提供的暂态能量，从而确定故障期间各 DFWT 的有功控制参考值。

2 双馈风电机组暂态能量计算方法

DFWT 的转轴与转子通过传动链连接，转子运动方程^[1]为

$$2H_{w,i} \frac{d\omega_{r,i}}{dt} = \frac{P_{m,i} - P_{e,i}}{\omega_{r,i}} \quad (1)$$

式中： $H_{w,i}$ 为第 i 台 DFWT 单质块等效惯性时间常数； $P_{m,i}$ 为第 i 台 DFWT 的机械功率； $P_{e,i}$ 为第 i 台 DFWT 的电磁功率； $\omega_{r,i}$ 为第 i 台 DFWT 的转子角速度； t 为时间。

故障后的定子磁链与 Crowbar 投入后的转子磁链均与定子电压保持动态耦合关系，将二者的动态方程代入定转子磁链方程，可推导出转子故障磁链表达式。将故障下的定、转子磁链代入定转子磁链方程，可推导出 Crowbar 投入期间 DFWT 定子短路

电流。Crowbar 退出后, 转子电流方程为电流内环控制和转子绕组形成的二阶系统响应方程, 求解该微分方程并代入故障下的磁链方程, 可推导出无功功率支撑期间的定子短路电流, 进而推导出故障期间 DFWT 的定子功率^[20], 如式(2)所示。

$$P_{sf,i} = \begin{cases} \frac{U_{sf,i}^2}{\sigma_i L_{s,i} \sqrt{\tau_{sc,i}^2 + \omega_{s,i}^2}} \left(\tau_{sc,i} - \frac{\tau_{rc,i} (\tau_{rc,i} \tau_{sc,i} - \omega_{p,i} \omega_{s,i}) L_{m,i}^2}{L_{s,i} L_{r,i} \sqrt{\tau_{rc,i}^2 + \omega_{p,i}^2}} \right) + \\ K_1 f_1(t) e^{-\tau_{sc,i}(t-t_0)} \left[1 - \frac{\tau_{rc,i} L_{m,i}^2 (\tau_{rc,i} - \tau_{sc,i})}{L_{s,i} L_{r,i} \sqrt{(\tau_{rc,i} - \tau_{sc,i})^2 + \omega_{rf,i}^2}} \right] - \\ \frac{K_1 \tau_{rc,i} L_{m,i}^2 \omega_{rf,i} f_2(t) e^{-\tau_{sc,i}(t-t_0)}}{L_{s,i} L_{r,i} \sqrt{(\tau_{rc,i} - \tau_{sc,i})^2 + \omega_{rf,i}^2}}, & t_0 < t \leq t_1 \\ \frac{1.5 L_{s,i}}{L_{m,i}} (0.9 - U_{sf,i}) U_{sf,i} I_{N,i} - \frac{U_{sf,i}^2}{\omega_{s,i} L_{m,i}} + \\ K_3 \omega_{rf,i} f_3(t) e^{-\tau_{s,i}(t-t_1)} - \\ K_2 e^{-\tau_{s,i}(t-t_1)} \sin \omega_{s,i}(t-t_1), & t > t_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, K_1 、 K_2 、 K_3 、 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $f_3(t)$ 为推导过程中的系数, 可表示为式(3)。

$$\begin{cases} K_1 = \frac{(U_{sf,i} - U_{s0,i}) U_{sf,i}}{\sigma_i L_{s,i} \sqrt{\tau_{sc,i}^2 + \omega_{s,i}^2}} \\ K_2 = \frac{(U_{sf,i} - U_{s0,i}) U_{sf,i}}{\omega_{s,i} L_{s,i}} \\ K_3 = \frac{L_{m,i}^2 U_{sf,i} (U_{sf,i} - U_{s0,i})^2}{\sigma_i L_{s,i}^2 L_{r,i}} \Bigg/ \\ \sqrt{(\tau_{s,i}^2 - \omega_{s,i}^2 + (\tau_{r,i} + \tau_{p,i}) \tau_{s,i} + \tau_{i,i})^2 + \omega_{s,i}^2 (2\tau_{s,i} + \tau_{r,i} + \tau_{p,i})^2} \\ f_1(t) = \tau_{sc,i} \cos \omega_{s,i}(t-t_0) - \omega_{s,i} \sin \omega_{s,i}(t-t_0) \\ f_2(t) = \omega_{s,i} \cos \omega_{s,i}(t-t_0) + \tau_{sc,i} \sin \omega_{s,i}(t-t_0) \\ f_3(t) = (\tau_{s,i}^2 - \omega_{s,i}^2 + (\tau_{r,i} + \tau_{p,i}) \tau_{s,i} + \tau_{k,i}) \sin \omega_{s,i}(t-t_1) + \\ \omega_{s,i} (2\tau_{s,i} + \tau_{r,i} + \tau_{p,i}) \cos \omega_{s,i}(t-t_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{sf,i}$ 为故障期间第 i 台 DFWT 的定子功率; $U_{sf,i}$ 为故障后第 i 台 DFWT 定子电压幅值; σ_i 为第 i 台 DFWT 的漏磁系数, $\sigma_i = 1 - L_{m,i}^2 / L_{s,i} L_{r,i}$; $U_{s0,i}$ 为故障前第 i 台 DFWT 定子电压的幅值; $L_{s,i}$ 、 $L_{r,i}$ 、 $L_{m,i}$ 分别为第 i 台 DFWT 定、转子电感和励磁电感; $\tau_{sc,i}$ 为第 i 台 DFWT 在 Crowbar 投入后定子绕组的衰减时间常数, $\tau_{sc,i} = R_{s,i} / \sigma_i L_{sc,i}$, 其中 $L_{sc,i} = L_{s,i} - j\omega_{rf,i} L_{m,i}^2 / (R_{rc,i} + j\omega_{rf,i} L_{r,i})$; $R_{s,i}$ 、 $R_{r,i}$ 、 $R_{c,i}$ 分别为第 i 台 DFWT 的定子、转子电阻和卸荷电阻,

$R_{rc,i}$ 为推导过程中系数, $R_{rc,i} = R_{r,i} + R_{c,i}$; t_0 为集电线故障时刻; t_1 为 Crowbar 退出时刻; $\omega_{rf,i}$ 为故障期间第 i 台 DFWT 的转子角速度; $\tau_{rc,i}$ 为第 i 台 DFWT 在 Crowbar 投入后转子绕组衰减时间常数, $\tau_{rc,i} = R_{rc,i} / \sigma_i L_{r,i}$; $\omega_{p,i}$ 为第 i 台 DFWT 转差角速度; $\omega_{s,i}$ 为第 i 台 DFWT 的同步角速度; $\tau_{s,i}$ 为第 i 台 DFWT 的定子绕组衰减时间常数, $\tau_{s,i} = R_{s,i} / \sigma_i L_{s,i}$; $\tau_{r,i}$ 为第 i 台 DFWT 的转子绕组衰减时间常数, $\tau_{r,i} = R_{r,i} / \sigma_i L_{r,i}$; $\tau_{i,i}$ 、 $\tau_{p,i}$ 为推导过程中系数, $\tau_{i,i} = k_{i,i} / \sigma_i L_{r,i}$ 、 $\tau_{p,i} = k_{p,i} / \sigma_i L_{r,i}$, 其中 $k_{p,i}$ 、 $k_{i,i}$ 分别为第 i 台 DFWT 转子侧变流器内环 PI 控制器比例系数和积分系数; $I_{N,i}$ 为第 i 台 DFWT 的额定运行电流。

电磁功率为定子绕组和网侧变流器发出的有功功率之和。根据式(1)与式(2)可得故障下的转速动态方程如式(4)所示。

$$\frac{d\omega_{rf,i}}{dt} = \begin{cases} \frac{U_{sf,i}^2}{\sigma_i \omega_{s,i} L_{s,i} \sqrt{\tau_{sc,i}^2 + \omega_{s,i}^2}} \left(\frac{\tau_{sc,i}}{2H_{w,i}} - \frac{\tau_{rc,i} (\tau_{rc,i} \tau_{sc,i} - \omega_{p,i} \omega_{s,i}) L_{m,i}^2}{2H_{w,i} L_{s,i} L_{r,i} \sqrt{\tau_{rc,i}^2 + \omega_{p,i}^2}} \right) + \\ \frac{K_1 f_1(t) e^{-\tau_{sc,i}(t-t_0)}}{2H_{w,i}} \left(\frac{1}{\omega_{s,i}} - \frac{\tau_{rc,i} L_{m,i}^2 (\tau_{rc,i} - \tau_{sc,i})}{\omega_{s,i} L_{s,i} L_{r,i} \sqrt{(\tau_{rc,i} - \tau_{sc,i})^2 + \omega_{rf,i}^2}} \right) - \\ \frac{K_1 \tau_{rc,i} L_{m,i}^2 \omega_{rf,i} f_2(t) e^{-\tau_{sc,i}(t-t_0)}}{2H_{w,i} \omega_{s,i} L_{s,i} L_{r,i} \sqrt{(\tau_{rc,i} - \tau_{sc,i})^2 + \omega_{rf,i}^2}} + \\ \frac{P_{m,i}}{2H_{w,i} \omega_{rf,i}}, & t_0 < t \leq t_1 \\ \frac{1.5 L_{s,i}}{2H_{w,i} \omega_{s,i} L_{m,i}} (0.9 - U_{sf,i}) U_{sf,i} I_{N,i} - \frac{U_{sf,i}^2}{2H_{w,i} \omega_{s,i}^2 L_{m,i}} + \\ \frac{P_{m,i}}{2H_{w,i} \omega_{rf,i}} + \frac{e^{-\tau_{s,i}(t-t_1)}}{2H_{w,i} \omega_{s,i}} \cdot \\ [K_3 \omega_{rf,i} f_3(t) - K_2 \sin \omega_{s,i}(t-t_1)], & t > t_1 \end{cases} \quad (4)$$

故障后 DFWT 机械功率与电磁功率之间的不平衡功率造成转子加速^[20]。转子的旋转动能变化量等于暂态能量, 可写为

$$W_{tr,i} = \frac{J_i}{2p_i^2} (\omega_{rf,i}^2 - \omega_{0,i}^2) \quad (5)$$

式中: $W_{tr,i}$ 为第 i 台 DFWT 在故障期间随转速变化而积蓄的暂态能量; p_i 为第 i 台 DFWT 的极对数; J_i 为第 i 台 DFWT 的转动惯量; $\omega_{0,i}$ 为第 i 台 DFWT 的初始转速。

故障切除后, 转子侧变流器切换功率控制参考

值, 转速动态方程可写为

$$2H\omega_{s,i} \frac{d\omega_{rf,i}}{dt} - \frac{\omega_{s,i} P_{m0,i}}{\omega_{rf,i}} + U_{s0,i} e^{-\tau_{s,i}(t-t_{cut})} \times \frac{(K_2 f_4(t) - \omega_{rf,i} K_3 f_5(t))}{U_{sf,i} [1 + (k_{p,i} U_{s0,i})^2]} - \frac{1}{[1 + (k_{p,i} U_{s0,i})^2]} \times \left(\frac{k_{p,i} U_{s0,i}^2 U_{sf,i}}{\omega_{s,i} L_{s,i}} + k_{p,i}^2 U_{s0,i}^2 P_{ref,af,i} - k_{p,i} U_{s0,i} Q_{s2,i}^* \right) = 0 \quad (6)$$

式中: $P_{m0,i}$ 为第 i 台 DFWT 的初始机械功率; $P_{ref,af,i}$ 为故障切除后第 i 台 DFWT 的有功控制参考值; $Q_{s2,i}^*$ 为集电线故障切除后第 i 台 DFWT 的定子无功控制参考值, 通常设置为零; t_{cut} 为故障切除时刻; 参数 $f_4(t)$ 、 $f_5(t)$ 分别为

$$f_4(t) = k_{p,i} U_{s0,i} \cos \omega_{s,i}(t - t_{cut}) - \sin \omega_{s,i}(t - t_{cut}) \quad (7)$$

$$f_5(t) = (\tau_{s,i}^2 - \omega_{s,i}^2 + \tau_{re,i} \tau_{s,i} + \tau_k) \cdot \sin \omega_{s,i}(t - t_{cut}) + \omega_{s,i} (2\tau_{s,i} + \tau_{r,i} + \tau_{p,i}) \cdot [\cos \omega_{s,i}(t - t_{cut}) + k_{p,i} U_{s0,i} \sin \omega_{s,i}(t - t_{cut})] - k_{p,i} U_{s0,i} [\tau_{s,i}^2 - \omega_{s,i}^2 + (\tau_{r,i} + \tau_{p,i}) \tau_{s,i} + \tau_{k,i}] \cos \omega_{s,i}(t - t_{cut}) \quad (8)$$

由于故障切除后转速动态方程是关于转速的一阶非线性微分方程, 且与功率控制参考值相关, 采用改进欧拉法可求解故障切除后的转速。根据上一时刻的近似目标值, 计算下一时刻的预估目标值, 然后利用校正方程计算当前时刻的近似目标值, 直至求出故障切除后的转速最大值。迭代求解的初始转速为故障切除后转子转速 ω_{raf0} , 迭代初始时间应为故障切除时刻。根据式(6), $k+1$ 时刻的预估转速为

$$\tilde{\omega}_{rf(k+1),i} = \omega_{rf(k),i} + h * F[t_{(k)}, \omega_{rf(k),i}] \quad (9)$$

式中: $\tilde{\omega}_{rf(k+1),i}$ 为第 i 台 DFWT 在 $k+1$ 时刻的预估转速; $\omega_{rf(k),i}$ 为第 i 台 DFWT 在故障切除后 k 时刻的转速; h 为采样间隔; 函数 $F[t_{(k)}, \omega_{rf(k),i}]$ 如式(10)所示。

$$F[t_{(k)}, \omega_{rf(k),i}] = \frac{P_{m0,i}}{2H\omega_{w,i} \omega_{rf(k),i}} - \frac{U_{s0,i} e^{-\tau_{s,i}(t_{(k)} - t_{(k-1)})} (K_2 f_4(t_{(k)}) - \omega_{rf(k)} K_3 f_5(t_{(k)}))}{2H\omega_{w,i} \omega_{s,i} U_{sf,i} [1 + (k_{p,i} U_{s0,i})^2]} + \frac{k_{p,i} U_{s0,i}^2 \left(\frac{U_{sf,i}}{\omega_{s,i} L_{s,i}} + k_{p,i} P_{ref,af,i} - \frac{Q_{s2,i}^*}{U_{s0,i}} \right)}{2H\omega_{w,i} \omega_{s,i} [1 + (k_{p,i} U_{s0,i})^2]} \quad (10)$$

式中: $t_{(k)}$ 为校正后 k 时刻; $t_{(k+1)}$ 为校正后 $k+1$ 时刻。

根据式(9), 可得校正后 $k+1$ 时刻的近似转速

$\omega_{rf(k+1),i}$ 为

$$\omega_{rf(k+1),i} = \omega_{rf(k),i} + \frac{h}{2} * \{F[t_{(k)}, \omega_{rf(k),i}] + F[t_{(k+1)}, \tilde{\omega}_{rf(k+1),i}]\} \quad (11)$$

比较 k 时刻与其相邻两个时刻近似转速的大小, 判断是否满足式(12)。

$$\omega_{rf(k),i} > \omega_{rf(k-1),i} \quad \text{and} \quad \omega_{rf(k),i} > \omega_{rf(k+1),i} \quad (12)$$

当式(12)成立时, $\omega_{rf(k)}$ 即为转速最大值, 记为

ω_{rfm} 。否则, 利用式(11)计算下一时刻的近似转速, 直至解出转速最大值 ω_{rfm} 。将 ω_{rfm} 代入式(5), 可得故障后转子存储的最大暂态能量 $\Delta W_{tm,i}$ 为

$$\Delta W_{tm,i} = \frac{J_i}{2p_i^2} (\omega_{rfm,i}^2 - \omega_{0,i}^2) \quad (13)$$

由于故障持续时间小于转速时间尺度, 在故障期间 DFWT 转子将始终处于加速状态, 有功电流控制参考值越小, 转子的加速空间越大, 转子存储的暂态能量也越大。故障后有功控制参考值越大, 机械功率与电磁功率的不平衡程度越小, 暂态能量消耗越快。

3 双馈风电机组功率协调控制策略

故障切除后的功率缺额由故障初始功率缺额、故障期间频率响应导致的 SG 功率变化量以及切除故障引起的 DFWF 功率损失组成。初始功率缺额由故障下 DFWT 有功功率降低量与过渡电阻消耗的功率量组成。由 DFWT 输出有功功率变化和过渡电阻消耗导致的初始功率缺额 ΔP_{f1} 为

$$\Delta P_{f1} = P_{DFWF,inf} - \sum_{i=1}^n P_{ref,f,i} - \sum_{j=1}^m P_{f,j} + \frac{U_f^2}{R_f} \quad (14)$$

式中: $P_{DFWF,inf}$ 为故障前 DFWF 输出功率; $P_{ref,f,i}$ 为故障期间非故障集电线上第 i 台 DFWT 有功控制参考值; $P_{f,j}$ 为故障集电线上第 j 台 DFWT 有功控制参考值; m 为故障集电线上 DFWT 总数; n 为 DFWF 中非故障集电线上 DFWT 总数; U_f 为故障瞬间故障点电压幅值, 由于集电线压降较小, 因此可由 DFWF 低压母线电压计算; R_f 为过渡电阻, 可由故障定位确定^[21]。

初始功率缺额导致系统频率下降, SG 因惯性响应调整输出功率, 从而影响故障切除时刻的功率缺额。SG 功率变化量可根据初始功率缺额利用系统频率响应(system frequency response, SFR)模型确定。SG 功率变化量与故障持续时间有关。故障持续时间越短, SG 功率变化量越小, 故障切除瞬间

的电网功率缺额越大。由于故障切除时间无法确定, 为了最大限度地避免频率越限, 以主保护动作时刻为故障切除时刻, 确定功率支撑需求, 故障切除前一瞬间的系统频率变化率 $df(t_2^-)/dt$ 如式(15)所示。

$$\frac{df(t_2^-)}{dt} = \frac{R\Delta P_{f1}}{DR + K_m} \begin{bmatrix} \omega_d \alpha e^{-\zeta\omega_n t_2} \cos(\omega_d t_2 + \varphi) \\ -\zeta\omega_n \alpha e^{-\zeta\omega_n t_2} \sin(\omega_d t_2 + \varphi) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: R 为系统等效调差系数; ω_d 为振荡角频率; D 为系统等效阻尼系数; K_m 为机械功率增益; ζ 为阻尼比; φ 为系统频率响应函数初始相位角; ω_n 、 α 为推导过程中的系数, $\omega_n = \sqrt{(DR + K_m)/2HRT_R}$, $\alpha = \sqrt{(1 - 2T_R\zeta\omega_n + T_R^2\omega_n^2)/(1 - \zeta^2)}$, 其中 T_R 为再热时间常数, H 为系统等效惯性时间常数。

故障切除前一瞬间可能出现的最大电网功率缺额 $\Delta P_{f2,\max}(t_2^-)$ 为^[22]

$$\Delta P_{f2,\max}(t_2^-) = 2 \frac{H}{f_N} \cdot \frac{df(t_2^-)}{dt} \quad (16)$$

式中, f_N 为系统额定频率。

切除故障导致集电线上的 DFWT 退出运行, 故障切除后一瞬间可能出现的最大电网功率缺额 $\Delta P_{f3,\max}$ 为

$$\Delta P_{f3,\max} = \Delta P_{f2,\max}(t_2^-) + \sum_{j=1}^m P_{f,j} \quad (17)$$

故障切除后, 切换非故障集电线的 DFWT 有功控制参考值, 使其与 SG 所增发功率共同弥补功率缺额。为了弥补电网功率缺额, 故障切除后第 i 台 DFWT 所需增发有功功率 $\Delta P_{\text{ill},af,i}(t)$ 为

$$\Delta P_{\text{ill},af,i}(t) = [\Delta P_{f3,\max} - R_{\text{su}}(t - t_2)] \frac{S_{N,i}}{\sum_{i=1}^n S_{N,i}} \quad (18)$$

式中: $t_2 \leq t \leq t_2 + \Delta t_{\text{af}}$, 其中 Δt_{af} 为功率支撑控制时间; R_{su} 为电网中 SG 的功率调节速度; $S_{N,i}$ 为第 i 台 DFWT 额定容量。

故障切除后 DFWT 提供功率支撑的时间与 SG 一次调频的功率调节速度相配合。在 SG 增发功率可弥补电网功率缺额后, DFWT 恢复至 MPPT 控制, 电网恢复至正常运行。为了弥补电网功率缺额, 所需 DFWT 功率支撑控制时间 $\Delta t_{\text{ill},af}$ 为

$$\Delta t_{\text{ill},af} = \frac{\Delta P_{f3,\max}}{R_{\text{su}}} \quad (19)$$

为了弥补电网功率缺额, 第 i 台 DFWT 所需积蓄的暂态能量 $W_{\text{tr,ill},i}$ 为

$$W_{\text{tr,ill},i} = \int_{t_2}^{t_2 + \Delta t_{\text{ill},af}} \Delta P_{\text{ill},af,i}(t) dt \quad (20)$$

故障切除后, DFWT 定子电压迅速上升。当电压超过高电压穿越启动的门槛电压时, DFWT 应注入感性无功电流以支撑电压恢复。故障切除后第 i 台 DFWT 转子侧 q 轴电流参考值 $I_{\text{rq},af,i}$ 设置为

$$I_{\text{rq},af,i} = \begin{cases} K_d \frac{L_{s,i}}{L_{m,i}} (U_{s,af,i} - U_{\text{H,TH}}) I_n - \frac{U_{s,af,i}}{\omega_{s,i} L_{m,i}}, & U_{s,af,i} > U_{\text{H,TH}} \\ 0, & U_{s,af,i} < U_{\text{H,TH}} \end{cases} \quad (21)$$

式中: K_d 为无功增益系数, 通常为 1.5; $U_{\text{H,TH}}$ 为高电压穿越启动的门槛电压, 通常为 1.1 p.u.^[21]; $U_{s,af,i}$ 为故障切除后第 i 台 DFWT 定子电压幅值。

故障切除后 DFWT 最大可增发有功功率 $\Delta P_{\text{max},af,i}$ 受感性无功电流影响, 可写为

$$\Delta P_{\text{max},af,i} = \frac{L_{m,i}}{L_{s,i}} \frac{3U_{s,i}}{2} \sqrt{I_{\text{r,max},i}^2 - I_{\text{rq},af,i}^2} - P_{\text{DFWT,inf},i} \quad (22)$$

式中: $I_{\text{r,max},i}$ 为第 i 台 DFWT 转子侧变流器最大允许电流; $P_{\text{DFWT,inf},i}$ 为故障前第 i 台 DFWT 输出功率。

最大转速限制下第 i 台 DFWT 可积蓄的最大暂态能量 $W_{\text{tr,lim},i}$ 为

$$W_{\text{tr,lim},i} = \frac{J_i}{2p_i^2} (\omega_{\text{lim},i}^2 - \omega_0^2) \quad (23)$$

式中, $\omega_{\text{lim},i}$ 为第 i 台 DFWT 最大允许转速。转子转速超过最大允许转速时, 叶片等关键部件的承载压力会增加, 机械部件可能会出现疲劳破坏、位移等故障。

在风电场内部故障条件下 DFWT 功率协调控制策略如图 3 所示。

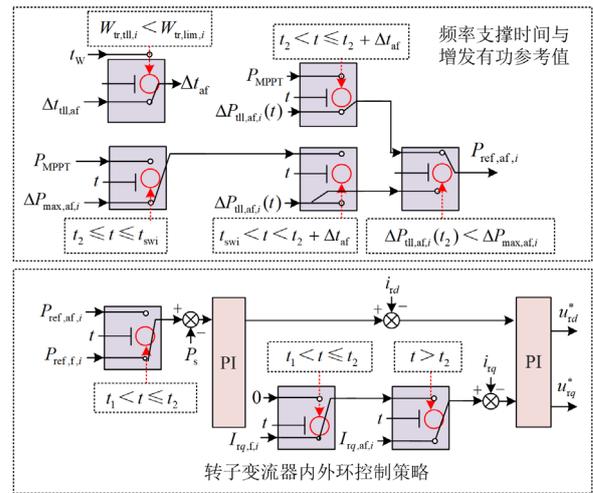


图 3 DFWT 功率协调控制策略

Fig. 3 Power coordination control strategy of DFWT

图3中: P_{MPPT} 为DFWT在MPPT控制下的有功功率; i_{rd} 为DFWT转子变流器 d 轴电流; u_{rd}^* 、 u_{rq}^* 分别为DFWT转子变流器 d 、 q 轴电压参考值。

随着SG逐渐增发功率,DFWT所需增发有功功率逐渐下降,因此故障切除瞬间DFWT所需增发有功功率 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t_2)$ 设置为所需增发功率的最大值。若 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t_2) < \Delta P_{\text{max},af,i}$ 且 $W_{\text{tr},tl,i} < W_{\text{tr},lim,i}$, 则仅利用DFWT可弥补电网功率缺额。故障切除后第 i 台DFWT增发的有功功率参考值 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t)$ 设置为 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t)$, 功率支撑控制时间 Δt_{af} 设置为 $\Delta t_{\text{tl},af}$ 。若 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t_2) > \Delta P_{\text{max},af,i}$ 且 $W_{\text{tr},tl,i} > W_{\text{tr},lim,i}$, 最大转子电流限制下故障切除后一段时间内DFWT无法弥补电网功率缺额。此时,在 $t_2 \leq t \leq t_{\text{swi}}$ 期间 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t)$ 设置为 $\Delta P_{\text{max},af,i}$, 在 $t_{\text{swi}} < t < t_2 + \Delta t_{\text{af}}$ 期间 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t)$ 设置为 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t)$, 功率支撑控制时间 Δt_{af} 仍设置为 $\Delta t_{\text{tl},af}$, 利用DFWT最大限度地补偿电网功率缺额,在频率越限时通过切负荷避免频率进一步失稳。 t_{swi} 为最大转子电流限制下DFWT能够弥补电网功率缺额的临界时刻,根据式(18)和式(22),可得

$$t_{\text{swi}} = \frac{\Delta P_{\text{f3,max}}(t_2^-)}{R_{\text{su}}} - \frac{\sum_{i=1}^n S_{N,i} \Delta P_{\text{max},af,i}}{S_{N,i} R_{\text{su}}} + t_2 \quad (24)$$

当 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t_2) < \Delta P_{\text{max},af,i}$ 且 $W_{\text{tr},tl,i} > W_{\text{tr},lim,i}$ 时,最大转速限制下DFWT积蓄的最大暂态能量无法满足故障切除后的功率需求。此时,故障期间DFWT按照最大转速积蓄暂态能量, $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t)$ 设置为 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t)$ 。在暂态能量全部消耗后DFWT切换至MPPT控制,从而尽可能地弥补电网功率缺额。功率支撑控制时间为最大暂态能量消耗所需时间,最大暂态能量消耗所需时间计算方法为

$$\Delta t_{\text{af}} = \frac{W_{\text{tr},lim,i}}{W_{\text{tr},tl,i}} \Delta t_{\text{tl},af} \quad (25)$$

第 i 台DFWT增发的有功功率参考值为

$$\Delta P_{\text{ref},af,i}(t) = \Delta P_{\text{ref},af,i}(t) \quad t_2 < t < t_2 + \Delta t_{\text{af}} \quad (26)$$

若 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t_2) > \Delta P_{\text{max},af,i}$ 且 $W_{\text{tr},tl,i} > W_{\text{tr},lim,i}$, 最大转子电流限制与最大转速限制使DFWT支撑功率与支撑时间均不能满足电网需求。为了避免转子电流越限,在 $t_2 \leq t \leq t_{\text{swi}}$ 期间 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t)$ 设置为 $\Delta P_{\text{max},af,i}$, 在 $t_{\text{swi}} < t < t_2 + t_{\text{w}}$ 期间 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t)$ 设置为 $\Delta P_{\text{ref},af,i}(t)$; 为了避免转速越限,设置 Δt_{af} 为 t_{w} , 从而最大限度地减小切负荷量。

故障期间,DFWT定子电压跌落。若电压低于

一定值,DFWT应输出容性无功功率以支撑电压恢复。故障期间第 i 台DFWT转子侧 q 轴电流参考值 $I_{\text{rq},f,i}$ 为

$$I_{\text{rq},f,i} = \begin{cases} K_d \frac{L_{s,i}}{L_{m,i}} (U_{\text{L,TH}} - U_{\text{sf},i}) I_n - \frac{U_{\text{sf},i}}{\omega_{s,i} L_{m,i}}, & U_{\text{sf},i} < U_{\text{L,TH}} \\ 0, & U_{\text{sf},i} > U_{\text{L,TH}} \end{cases} \quad (27)$$

式中, $U_{\text{L,TH}}$ 为低电压穿越启动的门槛电压,通常为 0.9 p.u. [23]。

故障期间,考虑低电压穿越控制时,最大电流限制下第 i 台DFWT最大有功功率 $P_{\text{max},f,i}$ 为

$$P_{\text{max},f,i} = \sqrt{\left(\frac{3X_{m,i}}{2X_{s,i}} U_{\text{sf},i} I_{\text{rmax}} \right)^2 - \left(Q_{s,f,i} + \frac{3U_{\text{sf},i}^2}{2X_s} \right)^2} \quad (28)$$

式中: $X_{m,i}$ 、 $X_{s,i}$ 分别为第 i 台DFWT的励磁电抗与定子侧电抗; $Q_{s,f,i}$ 为考虑低电压穿越时DFWT的无功功率,可表示为

$$Q_{s,f,i} = \begin{cases} \frac{3L_{m,i} U_{\text{sf},i} \psi_{\text{sm},i}}{2L_{s,i}} - \frac{3L_{m,i} U_{\text{sf},i}}{2L_{s,i}} I_{\text{rq},f,i}, & U_{\text{sf},i} < U_{\text{L,TH}} \\ 0, & U_{\text{sf},i} > U_{\text{L,TH}} \end{cases} \quad (29)$$

式中, $\psi_{\text{sm},i}$ 为第 i 台DFWT的定子磁链。

为满足故障切除后DFWT增发的有功功率与功率支撑控制时间的需求,第 i 台DFWT故障切除瞬间的转子转速 $\omega_{\text{rf},t_2,i}$ 应为

$$\omega_{\text{rf},t_2,i} = \sqrt{\frac{2p_i^2}{J_i} \int_{t_2}^{t_2 + \Delta t_{\text{af}}} \Delta P_{\text{ref},af,i}(t) dt + \omega_{0,i}^2} \quad (30)$$

为使转子充分加速,故障期间需下调DFWT有功功率。考虑最大电流限制,故障期间第 i 台DFWT的有功功率参考值 $P_{\text{ref},f,i}$ 可表示为

$$P_{\text{ref},f,i} = \min \left\{ P_{m,i} + \frac{\omega_{0,i}^2 - \omega_{\text{rf},t_2,i}^2}{H_{w,i} \Delta t_{\text{f}}}, P_{\text{max},f,i} \right\} \quad (31)$$

式中: $P_{m,i}$ 为第 i 台DFWT的机械功率; Δt_{f} 为故障持续时间。

当最大电流限制下的有功功率小于转子加速所需的有功功率时,故障期间的有功控制参考值由无功功率决定,转子中积累的暂态能量超出有功支撑需求。故障切除后的有功控制不受低电压穿越控制的影响,在DFWT退出功率支撑控制后,多余的暂态能量将随转速恢复而逸散。

故障期间,故障集电线的DFWT功率控制参考值由规程确定。故障期间DFWT有功功率的降低将

造成初始功率缺额增加, 但是由于故障切除后非故障集电线的 DFWT 功率能够恢复, 因此故障期间提升暂态能量不会造成故障切除后电网功率缺额增加。

4 算例分析

在 Matlab/Simulink 中建立如图 4 所示仿真模型。DFWF 包括 3 条集电线, 每条集电线上有 3 台 DFWT。DFWT 额定容量为 1.5 MW, 额定电压为 575 V; 定子电阻为 0.023 p.u., 转子电阻为 0.016 p.u., 定子漏电感为 0.18 p.u., 转子漏电感为 0.16 p.u., 磁化电感为 2.9 p.u.。DFWF 经 20 km 联络线接于 220 kV 母线上, 再分别接入负荷、SG1 与 SG2。在 $t = 3\text{ s}$ 时集电线 1 发生三相短路故障, 故障位置为集电线距升压变 11 km 处。故障过渡电阻为 $11\ \Omega$ 。在 $t = 3.5\text{ s}$ 时, 故障由集电线保护切除。SG 功率调节速度为 1.8 MW/s。方法 1 为本文所提控制方法, 故障期间若电压低于 0.9 p.u., DFWT 进入低电压穿越控制; 故障切除后若电压高于 1.1 p.u., DFWT 进入高电压穿越控制, 无功增益系数为 1.5。方法 2 在故障切除后尽快进行功率恢复以缓解功率缺额, 无功控制策略与方法 1 一致。不同风速下风机的初始转速不同, 转子可加速程度存在差异, 故障期间可积蓄暂态能量不同。此外, 不同风速下 DFWT 有功输出不同, 故障切除后的功率缺额也不同。因此, 设置不同风速, 通过对比两种方法以验证本文所提控制方法的有效性。

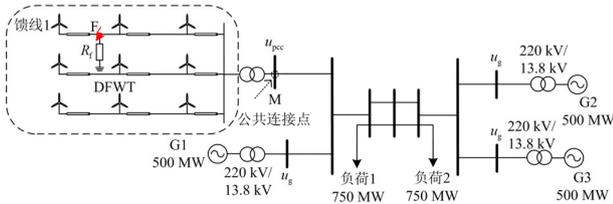


图 4 仿真模型

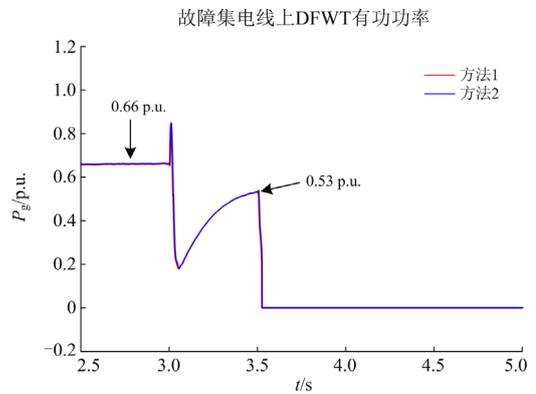
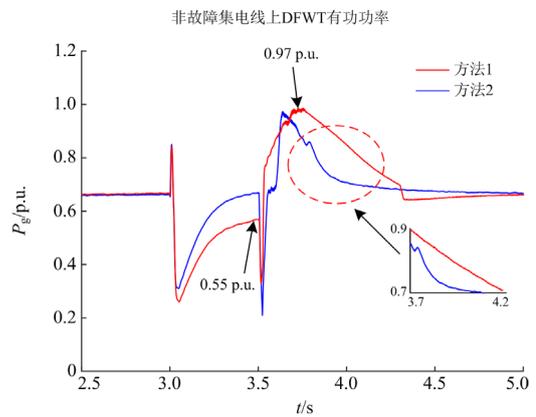
Fig. 4 Simulation model

1) 场景 1

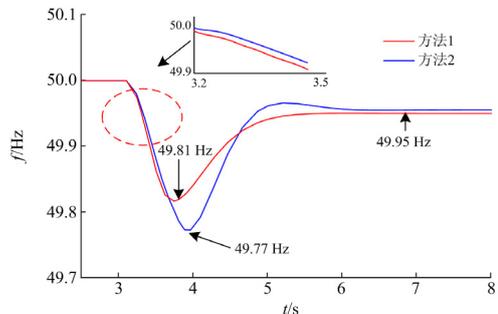
当风速为 12 m/s 时, DFWT 初始运行功率为 0.66 p.u., 最大可增发有功功率为 1.19 p.u., 可积蓄的最大暂态能量为 $1.273 \times 10^6\text{ J}$, 仅利用 DFWT 可弥补电网功率缺额。方法 1 中, 故障期间非故障集电线上 DFWT 有功控制参考值为 0.55 p.u., 无功控制参考值均为 0.22 p.u.。故障切除后非故障集电线上 DFWT 有功控制参考值为 $0.97 - 1.18(t - 3.5)\text{ p.u.}$, 提供功率支撑控制时间为 0.82 s。方法 2 中, 故障期间无功控制参考值为 0.22 p.u.。故障切除后非故障集电线上 DFWT 有功控制参考值设置为初始值 0.66 p.u.。

DFWF 输出功率、非故障集电线上 DFWT 转速、系统频率、风电场 PCC 处电压以及集电线电流如图 5 所示。红色实线为方法 1, 蓝色实线为方法 2。

如图 5(a)所示, 方法 1 下故障期间非故障集电线上 DFWT 有功功率恢复稳定至 0.55 p.u., 低于方法 2 下故障期间有功稳定值 0.65 p.u., 故障集电线上 DFWT 有功功率恢复稳定至 0.29 p.u.。故障切除后, 非故障集电线上 DFWT 有功功率上升至 0.97 p.u., 并在 0.82 s 后下降至正常运行时的功率, 与控制参考值基本保持一致, 提供了短时的功率支撑。方法 2 下有功功率在故障切除后迅速恢复至初始值 0.66 p.u., 由于转子动能释放, 造成有功功率短时提



(a) DFWT有功功率



(b) 频率

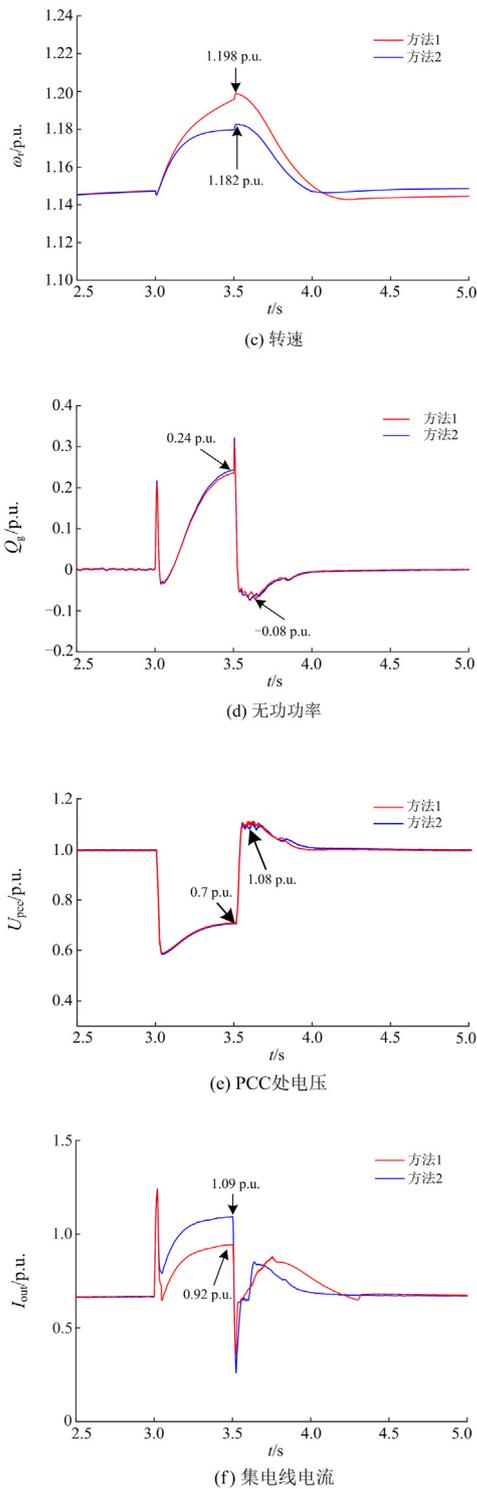


图5 风速为 12 m/s 时两种方法的对比

Fig. 5 Comparison of two methods at a wind speed of 12 m/s

升，并随着转子能量的消耗逐渐恢复至初始值。与方法 1 相比，方法 2 有功输出较低，功率提升持续时间较短，功率支撑效果欠佳。

如图 5(b)所示，受惯性影响，系统频率延时响应，在 3.1 s 开始下降。故障切除后，方法 1 下的 DFWF 额外提供了 0.82 s 的有功支撑，系统功率迅速达到平衡；而方法 2 受 SG 功率调节速度限制，系统功率存在缺额，系统频率不断下降，使得两种方法下的频率差异增加。方法 1 下的最小暂态频率为 49.81 Hz，稳态频率为 49.95 Hz；方法 2 下的最小暂态频率为 49.77 Hz，最终恢复至 49.95 Hz。方法 1 下的最大暂态频率偏差更小，说明本文所提控制方法可以改善系统频率暂态特性。

如图 5(c)所示，故障期间有功降低使 DFWT 转速不断增加，方法 1 下的非故障集电线上 DFWT 初始转速由 1.145 p.u.加速至 1.198 p.u.；方法 2 加速至 1.182 p.u.，方法 1 转速更高，可积蓄满足功率支撑需求的暂态能量。在故障切除后，方法 1 设置有功控制参考值高于初始值，参与功率支撑，暂态能量迅速消耗，0.82 s 后转速恢复至初始值；方法 2 在有功恢复后转速自行缓慢恢复。为积蓄暂态能量，方法 1 在故障期间降低 DFWT 有功功率，扩大了非故障集电线上 DFWT 在故障期间的无功可控范围。

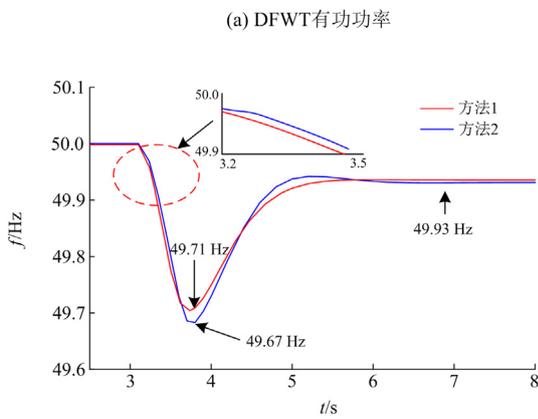
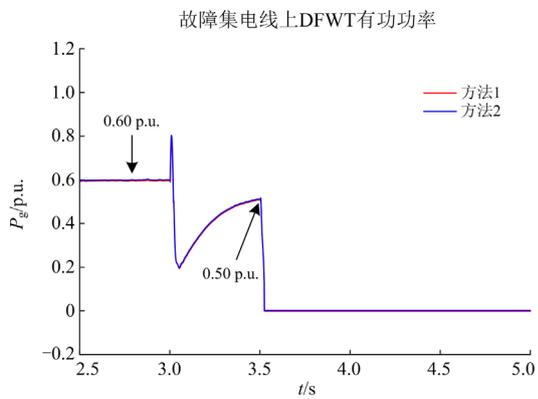
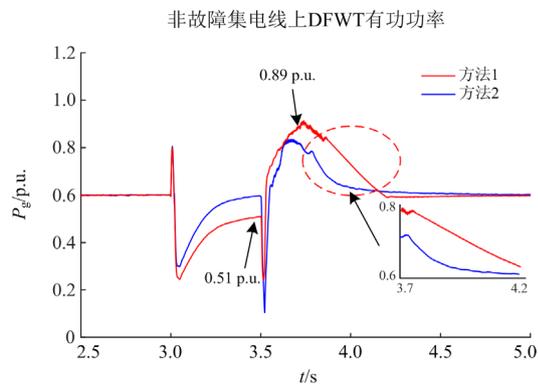
图 5(d)中，在 3~3.5 s 期间进行低电压穿越控制，DFWT 输出无功功率支撑电压，释放无功功率最大值为 0.24 p.u.。3.5 s 之后进入高电压穿越控制，DFWT 吸收无功功率，吸收无功功率最大值为 0.08 p.u.。图 5(e)中，3 s 时 PCC 处电压因故障跌落，在低电压穿越控制下逐渐恢复，并在 3.5 s 时恢复至 0.7 p.u.。故障切除后，DFWT 电压骤升，最大电压为 1.08 p.u.，高电压穿越控制有效地避免了电压越限。图 5(f)中，故障期间方法 1 与方法 2 均进行低电压穿越控制， q 轴无功电流上升。由于故障期间方法 1 通过下调 d 轴有功电流以降低 DFWT 有功功率，因此故障期间方法 1 的电流值低于方法 2 的电流值。方法 1 下集电线电流最大值为 0.92 p.u.，方法 2 下集电线电流最大值为 1.09 p.u.，两种控制方法下变流器均未被限流。

2) 场景 2

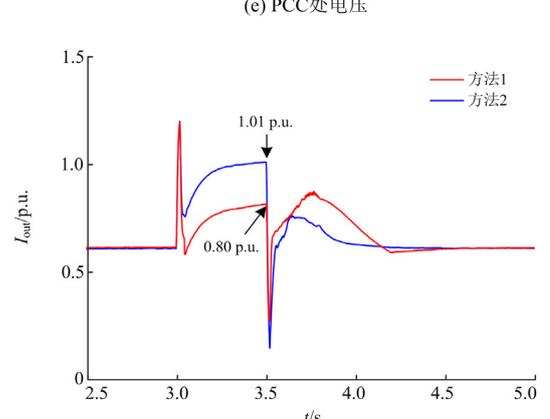
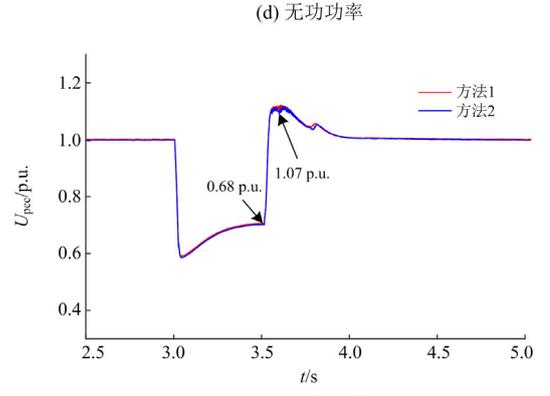
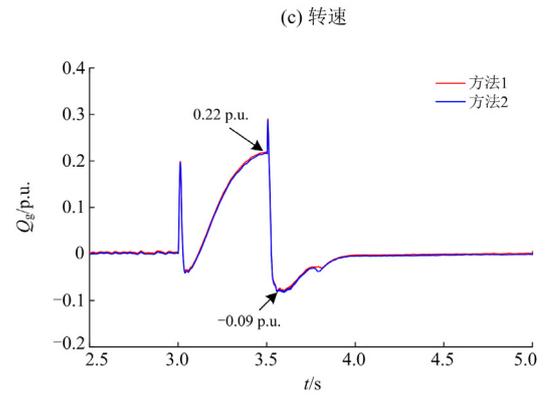
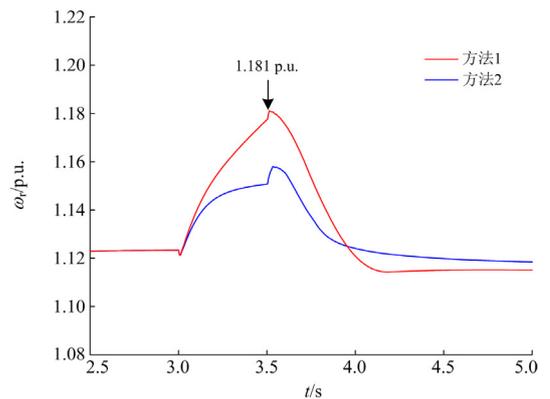
当风速为 10.5 m/s 时，DFWT 初始运行功率为 0.60 p.u.，最大可增发有功功率为 1.20 p.u.，可积蓄的最大暂态能量为 1.799×10^6 J，仅利用 DFWF 可弥补电网功率缺额。方法 1 中，故障期间非故障集电线上 DFWT 有功控制参考值为 0.51 p.u.，无功控制参考值均为 0.2 p.u.。故障切除后非故障集电线上 DFWT 有功控制参考值为 $0.89 - 1.71(t - 3.5)$ p.u.，提供功率支撑控制时间为 0.52 s。方法 2 中，故障期间无功控制参考值为 0.2 p.u.。故障切除后非故障集电线上 DFWT 有功控制参考值设置为初始值 0.6 p.u.。

DFWF 输出功率、非故障集电线上 DFWT 转速、系统频率、风电场 PCC 处电压以及集电线电流如图 6 所示。

如图 6(a)所示, 方法 1 下故障期间非故障集电线上 DFWT 有功功率恢复稳定至 0.51 p.u., 低于方法 2 下故障期间有功稳定值 0.59 p.u., 与图 5(a)相比初始值偏差程度更大。这是由于场景 2 下的风速更小, 因此故障期间需设置更小的有功控制参考值使转子充分加速, 储存足够的暂态能量; 故障集电线上 DFWT 有功功率恢复稳定至 0.24 p.u.。故障切除后, 非故障集电线上 DFWT 有功功率上升至 0.89 p.u., 并在 0.52 s 后下降至正常运行时的功率, 提供了短时的功率支撑。图 6(b)中, 方法 1 下系统



(a) DFWT有功功率



(c) 转速

(d) 无功功率

(e) PCC处电压

(f) 集电线电流

图 6 风速为 10.5 m/s 时两种方法的对比
Fig. 6 Comparison of two methods at a wind speed of 10.5 m/s

在 3.95 s 达到最小暂态频率 49.71 Hz, 在 4.9 s 时恢复至稳态值 49.93 Hz, 说明利用暂态能量, 在中低风速下仍能提升 DFWT 有功功率控制值使其弥补功率缺额, 有效避免频率越限。方法 2 在 3.92 s 达到最小暂态频率 49.67 Hz, 最终恢复至 49.93 Hz。

图 6(c)中, 方法 1 下非故障集电线上 DFWT 由初始转速 1.122 p.u. 上升至最大转速 1.181 p.u., 相较于图 5(c)上升程度更大, 用于功率支撑的暂态能量也更多。场景 2 下的机械转矩更小, 导致功率支撑时转速下降速度较场景 1 更快。方法 2 下转速在故障期间上升至 1.15 p.u., 故障切除后, 由于非故障集电线上 DFWT 存在功率恢复阶段, 转速在该阶段中进一步上升至 1.158 p.u., 接着逐渐恢复至初始值。图 6(d)中, 故障期间 DFWT 释放无功功率的最大值为 0.22 p.u., DFWT 吸收无功功率的最大值为 0.09 p.u.。图 6(e)中, PCC 处电压在 3~3.5 s 期间逐渐恢复, 在 3.5 s 时恢复至 0.68 p.u.。故障切除瞬间出现无功功率短时超调, 导致 PCC 处电压的短时抬升, 最大电压为 1.07 p.u., 后续逐渐恢复至额定值。图 6(f)中, 故障期间方法 1 的集电线电流最大值为 0.80 p.u., 方法 2 下集电线电流最大值为 1.01 p.u., 两种控制方法下变流器均未被限流。

5 结论

随着 DFWT 渗透率水平的不断提高, 电力系统的抗干扰能力逐渐下降。DFWF 内故障后, 随着故障集电线上 DFWT 被切除, 系统将面临严重的功率缺额问题, 利用故障期间转子加速积蓄的暂态能量, 可在故障切除后为系统提供功率支撑。为此, 本文提出了故障全过程功率协调控制的思想, 在故障期间下调 DFWT 有功以积蓄暂态能量, 使该部分能量参与故障切除后的有功功率支撑; 分析了故障期间 DFWT 转速特性, 建立了故障期间转速动态方程; 提出了 DFWT 暂态能量计算方法, 利用暂态能量支撑电网有功; 提出了故障全过程有功无功控制量计算方法, 并提出了故障全过程双馈风电机组功率控制策略。本文所提方法能充分利用因转子加速而储存的暂态能量, 迅速弥补电网功率缺额, 有效地抑制了系统频率越限, 降低了电力系统安全风险。但故障期间积蓄的暂态能量能否满足故障切除后频率支撑需求, 还受 DFWT 初始运行状态、故障严重程度、风电渗透率等因素的影响。若 DFWF 无法弥补电网功率缺额, 需利用暂态能量最大限度地补偿电网功率缺额, 在频率越限时通过切负荷避免频率进一步失稳。

参考文献

- [1] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1672-1694.
WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1672-1694.
- [2] XU Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. A reactive power sharing strategy of VSG based on virtual capacitor algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7520-7531.
- [3] XU Yunyang, NIAN Heng, HU Bin, et al. Impedance modeling and stability analysis of VSG controlled type-IV wind turbine system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3438-3448.
- [4] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下虚拟同步机的多模式协调策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4274-4285.
PAN Zixun, YANG Xiaofeng, ZHAO Rui, et al. Multi-mode coordination control of virtual synchronous generator under unbalanced power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4274-4285.
- [5] LIU Bi, ZHAO Junbo, HUANG Qi, et al. Nonlinear virtual inertia control of WTGs for enhancing primary frequency response and suppressing drivetrain torsional oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4102-4113.
- [6] 王彤, 邢其鹏, 李鸿恩, 等. 计及虚拟惯量控制的 DFIG 等效惯量在线评估与响应特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 52-59.
WANG Tong, XING Qipeng, LI Hongen, et al. Online evaluation and response characteristics analysis of equivalent inertia of a doubly-fed induction generator incorporating virtual inertia control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 52-59.
- [7] 杨德健, 许益恩, 高洪超, 等. 计及转速平滑恢复的双馈风电机组自适应频率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 172-179.
YANG Dejian, XU Yien, GAO Hongchao, et al. Self-adaptive frequency control scheme of a doubly-fed induction generator with smooth rotor speed recovery[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 172-179.
- [8] 孙晓强, 刘鑫, 程林, 等. 基于多调频资源协调控制的西北送端大电网新能源快速频率响应参数设置方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1760-1765.
SUN Xiaoqiang, LIU Xin, CHENG Lin, et al. Parameter setting of rapid frequency response of renewable energy sources in northwest power grid based on coordinated control of multi-frequency regulation resources[J]. Power

- System Technology, 2019, 43(5): 1760-1765.
- [9] 张东辉, 康重庆, 卢洵, 等. 高比例新能源系统中储能配置规模论证[J]. 南方电网技术, 2022, 16(4): 3-11.
ZHANG Donghui, KANG Chongqing, LU Xun, et al. Demonstration on the scale of energy storage deployment in high-proportion new energy power system[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 3-11.
- [10] XIONG Linyun, YANG Shaobo, HUANG Sunhua, et al. Optimal allocation of energy storage system in DFIG wind farms for frequency support considering wake effect[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2097-2112.
- [11] 赵海岭, 王维庆, 李笑竹, 等. 发电侧多主体投资低碳综合微网氢储能的演化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 49-62.
ZHAO Hailing, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, et al. Evolution strategy of low carbon integrated microgrid hydrogen energy storage with multi-agents investment on the power generation side[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 49-62.
- [12] 邹屹东, 钱晶, 张文英, 等. 基于 CPSOGSA 算法的风光-小水电微电网负荷频率最优 H₂/H ∞ 鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 42-51.
ZOU Yidong, QIAN Jing, ZHANG Wenyong, et al. Optimal H₂/H ∞ robust control for the load frequency of a microgrid including wind power-photovoltaic-small hydropower based on CPSOGSA[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 42-51.
- [13] 方宇晨, 赵书强. 聚光型太阳能电站与风电场联合优化运行及竞价策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 39-49, 372.
FANG Yuchen, ZHAO Shuqiang. Joint optimal operation and bidding strategies of concentrating solar power plants with wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 39-49, 372.
- [14] FELIPE W, JOE H, JUAN J. A fundamental study of applying wind turbines for power system frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1496-1505.
- [15] 叶林, 任成, 赵永宁, 等. 超短期风电功率预测误差数值特性分层分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 108-116.
YE Lin, REN Cheng, ZHAO Yongning, et al. Stratification analysis approach of numerical characteristics for ultra-short-term wind power forecasting error[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 108-116.
- [16] LI Zhengshuo, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Generalized master-slave-splitting method and application to transmission-distribution coordinated energy management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5169-5183.
- [17] LIU Juelin, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Coordinated control parameter setting of DFIG wind farms with virtual inertia control[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122(12): 106167.
- [18] 丁一凡, 季亮, 常潇, 等. 不对称电压跌落下虚拟同步机改进低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 76-85.
DING Yifan, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Improved low voltage ride-through control strategy of a virtual synchronous generator during unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 76-85.
- [19] MOHAMED N, AHMED E, TAMOU N. Improving low-voltage ride-through capability of a multimegawatt DFIG based wind turbine under grid faults[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 102-114.
- [20] OUYANG Jinxin, YU Jianfeng, CHEN Jiyu, et al. A novel modeling and emergency control method of transient energy of DFIG-based wind turbine under grid fault[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 151:109184.
- [21] 马彦飞. 基于双端电气量的过渡电阻计算方法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
MA Yanfei. Study of transition resistance calculation method based on two terminals' time-domain signals[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [22] SHI Qingxin, LI Fangxing, CUI Hantao. Analytical method to aggregate multi-machine sfr model with applications in power system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 1-11.
- [23] 中国机械工业联合会. 风力发电机组一故障电压穿越能力测试规程: GB/T 36995—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
China Machinery Industry Federation. Wind turbines—test procedure of voltage fault ride through capability: GB/T 36995—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

收稿日期: 2023-09-01; 修回日期: 2023-12-14

作者简介:

欧阳金鑫(1984—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 从事新能源电力系统、交直流混联电力系统故障分析、保护与控制研究; E-mail: jinxiy@163.com

张澳归(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统保护与控制技术; E-mail: 379278078@qq.com

余建峰(1994—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统保护与控制技术。E-mail: jianfengyu@foxmail.com

(编辑 魏小丽)