

计及控制切换延时及电压跌落检测影响的逆变型 新能源电源故障暂态电流解析计算

郑 涛¹, 陈 颖¹, 李紫肖¹, 艾静雯¹, 周泽昕², 王兴国²

(1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘 要: 目前针对逆变型新能源故障特性的研究均认为故障后电压外环立即闭锁, 忽略了低电压穿越控制切换延时及电压跌落检测的影响, 因此与实际的电流波形存在一定的误差。针对该问题, 首先分析了电压跌落幅值检测模块导致低电压穿越控制延时投入的机理, 然后基于电压暂态变化过程, 将故障电流全过程明确划分为 4 个阶段, 重点针对电流参考值变化的暂态第 2 阶段, 基于“区间分段”的思想对故障电流分段线性化计算, 最终建立起计及控制切换延时及电压跌落检测影响的故障暂态分阶段的电流解析计算模型。所提故障电流解析计算波形与 MATLAB/Simulink 的仿真波形基本相符, 验证了所提故障电流解析计算模型的准确性与有效性, 可为后续逆变型新能源并网系统的继电保护适应性与新原理的研究提供参考。

关键词: 逆变型新能源电源; 低电压穿越; 电压跌落检测; 控制切换延时; 对称故障; 暂态电流分阶段建模

Analytical Calculation of Fault Transient Current of IIREG Considering the Effects of Control Switching Delay and Voltage Drop Detection

ZHENG Tao¹, CHEN Ying¹, LI Zixiao¹, AI Jingwen¹, ZHOU Zexin², WANG Xingguo²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The current studies on the fault characteristics of inverter-based new energy sources all consider that the voltage outer ring is blocked immediately after faults, ignoring the influences of the switching delay of low-voltage ride-through(LVRT) control and the voltage dip detection, thus there is a certain error with the actual current waveform. To address this problem, the mechanism of the voltage dip amplitude detection module leading to the LVRT control delay input is first analyzed. Then based on the voltage transient change process, the whole process of fault current is clearly divided into four stages. This paper focuses on the second stage of the transient current reference value change, and based on the idea of “interval segmentation”, the fault current is linearized in segments; finally, a fault transient current analytical calculation model is established, which considers the influences of the control switching delay and voltage dip detection. The waveforms of the proposed fault current analytical calculation basically match with the simulation waveforms of MATLAB/Simulink, which verifies the accuracy and validity of the proposed fault current analytical calculation model, and provides a reference for the subsequent research on the adaptability of relay protection and the new principle of the inverter-type new energy grid-connected system.

Key words: inverter interfaced renewable energy generator; low voltage ride-through; voltage drop detection; control switching delay; symmetry fault; staged modeling of transient currents

0 引言

近年来, 为解决全球变暖及能源消耗日益加剧

的问题, 我国愈发重视并大力发展太阳能、风能等新能源发电技术^[1-3]。随着以永磁直驱风机和光伏电源为代表的逆变型新能源电源(inverter interfaced renewable energy generator, IIREG)在电网渗透率的不断提高^[4], 大量电力电子设备接入系统, 使得 IIREG 的故障短路电流呈现出幅值受限、非工频含

基金资助项目: 国家自然科学基金(U2166205)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (U2166205).

量丰富等区别于传统同步发电机的特性^[5-6], 这对传统电网的继电保护性能提出了新的挑战^[7]。因此, 深入研究 IIREG 的短路电流特性并准确刻画短路电流解析计算模型, 对分析其对电网继电保护的影响及改进保护性能具有重要的现实意义。

现有关于 IIREG 单机故障特性的研究经历了从定性分析到定量解析的过程。在定性分析方面, 早期研究主要依据仿真结果总结得到 IIREG 故障特征的一般规律, 定性分析影响故障电流的主导因素^[8-11], 其结论的可信度取决于模型的准确性, 未考虑低电压穿越控制的影响且无法从理论层面定量揭示故障特性, 存在一定的局限性。在定量解析方面, 又可分为时域解析与频域解析。在时域分析上, 文献[12-14]忽略故障暂态过程, 计及低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)控制策略及并网逆变器限流的影响, 将 IIREG 等效为压控流源模型, 定量分析了其稳态故障特性; 进一步地, 文献[15-17]考虑故障暂态过程中电流内环控制器的响应特性, 通过联立并网逆变器的电路拓扑方程与电流内环控制方程构建故障暂态电流的解析模型; 考虑到故障期间直流母线电压的波动对逆变器输出电流的影响, 文献[18-19]通过联立并网逆变器交直流侧的功率平衡方程和电压外环控制方程, 对故障后仍处于双闭环控制下的 IIREG 建立了故障暂态电流时域解析模型, 但其 LVRT 控制投入以电流达到限幅值为条件, 不符合国家电网公司标准规范的新能源电源并网导则。在频域分析上, 文献[20-21]以故障后 LVRT 控制立即投入为前提, 基于电流内环的传递函数模型, 建立了故障暂态电流的解析模型。

上述故障电流的理论分析均基于故障后 LVRT 控制立即投入且电流参考值发生阶跃突变的场景。实际上, LVRT 控制模块中的电压跌落幅值检测环节^[22-23]会导致控制系统中检测到的电压跌落幅值存在暂态变化的过程, 从而产生控制切换延时^[24], 该延时使得电网发生故障后并网逆变器需经过短暂的时间闭锁电压外环, 投入 LVRT 控制, 此时电流参考值与检测到的电压跌落幅值有关, 随之呈现出暂态变化而非忽略电压检测解析计算方法下的阶跃变化, 影响了故障暂态电流解析计算模型的准确性。

针对上述问题, 本文基于新能源并网准则, 在三相短路故障场景下分析了电压幅值检测模块对 LVRT 控制延时投入的影响机理, 并与不考虑延时与电压检测影响的故障电流计算场景对比得到低电

压穿越特性的差异性; 以故障后控制策略切换时刻、电压检测幅值达到稳态时刻为时间节点, 将 IIREG 的故障全过程明确定义并划分为 4 个故障阶段, 针对其中 3 个暂态阶段故障电流的影响因素进行分析, 进而求解各阶段故障暂态电流的解析表达式。基于“区间分段”^[25]的思想, 重点针对电流参考值暂态变化阶段的故障电流进行解析, 最终建立起计及控制切换延时及电压跌落检测(以下简称“延时及检测”)影响的故障暂态分阶段电流解析计算模型。在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建含 IIREG 的并网仿真模型, 将忽略该延时及电压跌落检测影响的故障电流解析表达式与本文所提计及控制切换延时及电压跌落检测影响的表达式作对比, 以验证所提故障电流解析计算模型的准确性与有效性。

1 逆变型新能源电源运行控制策略及电压跌落检测导致控制切换延时的机理

1.1 运行控制策略

IIREG 并网系统主要由新能源电源、直流侧电容、并网逆变器等组成。图 1 所示为 IIREG 的三相并网拓扑结构, 其中 U_{dc} 为直流侧电容电压; C 为直流母线电容; u_{abc} 为逆变器端口电压; e_{abc} 为并网点(point of common coupling, PCC)电压; L 与 R 分别为逆变器端口到 PCC 点之间的等效电感与电阻。

由图 1 可知, 并网逆变器的功率平衡方程式为:

$$P_0 - U_{dc} C \frac{dU_{dc}}{dt} = P_g \quad (1)$$

式中: P_0 为逆变型新能源电源输出的有功功率, 由于直流侧电容的隔离作用, 通常认为故障前后该功率保持恒定不变; 忽略逆变器的功率损耗, P_g 为逆变器交流侧输出的有功功率。

并网逆变器通常采用基于电网电压定向的矢量控制方式, 在 dq 轴旋转坐标系下, 令 d 轴方向与正序电网电压矢量方向一致^[26], 此时 q 轴电压 e_q 为 0, 逆变器输出有功功率和无功功率方程式为:

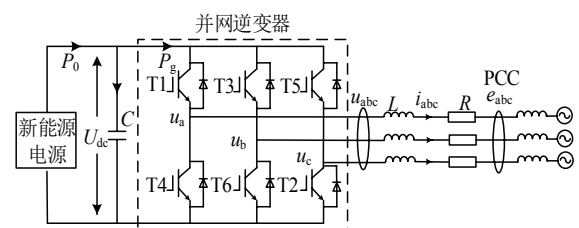


图 1 IIREG 并网拓扑结构图

Fig.1 Grid-connected structure of IIREG

$$\begin{cases} P_g = \frac{2}{3}(e_d i_d + e_q i_q) = \frac{2}{3}e_d i_d \\ Q_g = \frac{2}{3}(e_q i_d - e_d i_q) = -\frac{2}{3}e_d i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: e_d 、 e_q 分别为 PCC 电压的 dq 轴分量; i_d 、 i_q 分别为逆变器交流侧输出的 dq 轴电流。

1.1.1 并网控制策略

稳态运行时, 并网逆变器采用电压电流双闭环控制策略, 运行在单位功率因数下, 其控制方程为:

$$\begin{cases} i_d^* = (U_{dc}^* - U_{dc}) \left(K_{VP} + \frac{K_{VI}}{s} \right) \\ i_q^* = 0 \\ u_d = e_d + Ri_d - \omega_0 Li_q + \left(K_{IP} + \frac{K_{II}}{s} \right) (i_d^* - i_d) \\ u_q = e_q + Ri_q + \omega_0 Li_d + \left(K_{IP} + \frac{K_{II}}{s} \right) (i_q^* - i_q) \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_d^* 、 i_q^* 为内环 dq 轴电流的参考值; U_{dc}^* 为直流母线电压参考值; u_d 、 u_q 分别为逆变器桥臂电压的 d 、 q 轴分量; K_{VP} 、 K_{VI} 和 K_{IP} 、 K_{II} 分别为电压外环和电流内环 PI 控制器的比例、积分系数; ω_0 为工频角频率。

1.1.2 低电压穿越控制策略

电网故障期间, 当控制系统检测到电压跌落时 IIREG 需为电网提供无功支撑。图 2 所示为稳态运行控制策略与 LVRT 控制策略切换结构框图。

由图 2 可知, 若 LVRT 控制器检测到 PCC 电压 e_{abc} 下降至保护阈值, 则立即输出故障信号“1”, 同时闭锁电压外环, 控制切换。其中在 LVRT 控制器中, PCC 电压 e_{abc} 需经过电压检测模块^[23-24]积分滤波及测量后得正序电压跌落幅值 $U_{PCC,f}$, 并进行幅值的比较以判断是否满足 LVRT 控制切换的幅值跌落条件, 存在一定的电压检测延时。

根据 LVRT 控制策略要求^[27], 并网逆变器在故障期间的有功和无功电流参考值为:

$$\begin{cases} i_q^* = \begin{cases} 2(0.9 - U_{PCC,f}), 0.2 \leq U_{PCC,f} \leq 0.9 \\ I_{max}, U_{PCC,f} < 0.2 \end{cases} \\ i_d^* = \min\left(\frac{P_0}{U_{PCC,f}}, \sqrt{(I_{max})^2 - (i_q^*)^2}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_{max} 为逆变器允许通过的最大电流; $U_{PCC,f}$ 为电压跌落检测幅值。

1.2 电压跌落检测延时对 LVRT 特性的影响分析及故障全过程阶段的划分

基于上述分析, 由于并网点三相电压 e_{abc} 需经 LVRT 控制模块中坐标变换、积分滤波、幅值计算等环节的变换检测后得正序电压幅值, 因此故障后

控制环节的检测电压幅值并非瞬时跌落的阶跃变化, 而是存在暂态变化的过程。与不计延时及电压检测过程的对比示意图如图 3 所示。

图 3 中的实线为计及延时及检测影响的电压幅值变化, t_1 为控制策略切换时刻, t_2 为电压检测幅值达稳态值 U_f 时刻; 虚线为不计延时及检测影响的电压幅值变化, 在 t_0 故障时刻发生阶跃突变为即为恒定值。

根据式(4)可知, 内环 dq 电流参考值随检测电压 $U_{PCC,f}$ 的变化呈现暂态过程而非瞬时变化。图 4 所示为计及延时及检测影响和不计延时及检测影响的对比示意图。

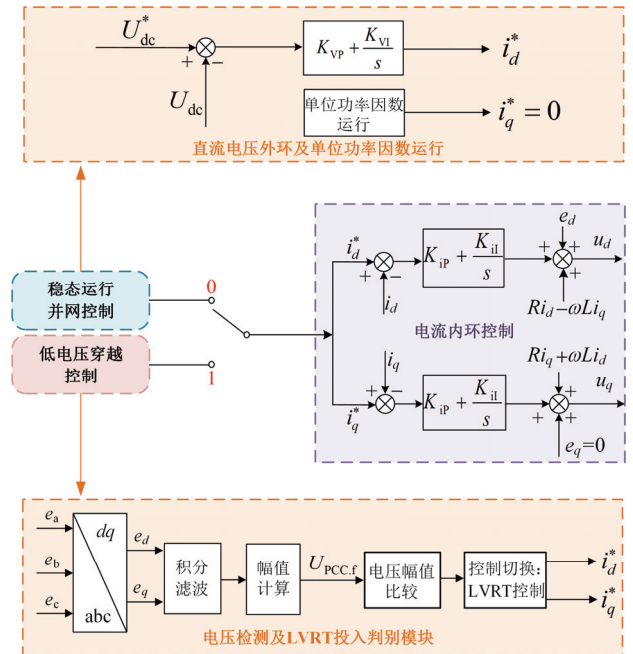


图 2 稳态运行控制策略与 LVRT 控制策略切换结构图

Fig.2 Control strategy switching diagram of steady-state operation and LVRT control strategy for grid-connected system

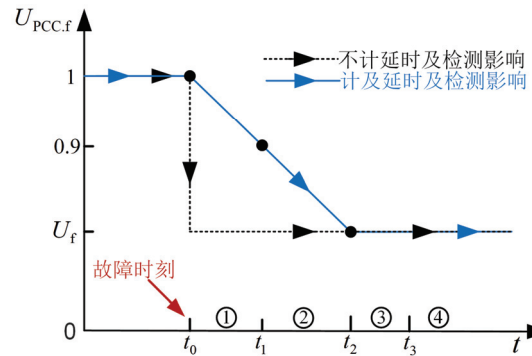


图 3 计及延时及电压跌落检测与不计延时及电压跌落检测的检测电压跌落幅值变化对比图

Fig.3 Comparison chart of detected voltage sag considering and without considering the delay and voltage sag detection

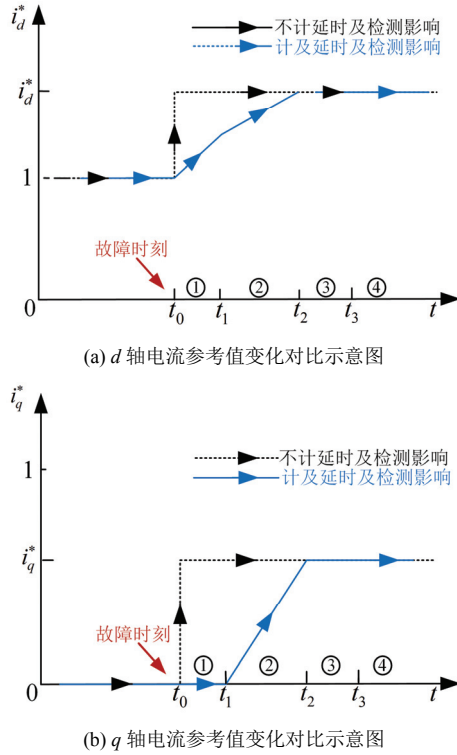


图4 计及延时及检测与不计延时及检测的dq电流参考值变化对比示意图

Fig.4 Comparison of dq current reference value considering and without considering the delay and voltage sag detection

可以看到, 本文所提解析方法考虑了实际控制系统的电压跌落检测导致控制切换延时, 因此在 $t_0 \sim t_1$ 期间控制系统中检测电压未达到并网点额定电压的 90%, 即控制切换阈值, 此时 d 轴电流因直流母线电压的波动而增大, q 轴电流仍为零; 在 t_1 时刻切换至 LVRT 控制后, dq 轴电流参考值随检测电压幅值的变化呈现暂态变化, 并在 t_2 时刻达稳定值, 经过电流内环控制器短暂的响应过程后在 t_3 时刻进入故障稳态阶段。而不计延时及检测影响的解析方法认为故障后 PCC 电压瞬时跌落并切换至 LVRT 控制, 电流参考值 i_{dq}^* 随之阶跃变化。

综上, 基于上述逆变器 LVRT 控制切换延时及电压跌落检测对短路电流影响的分析, 将电流从故障暂态至故障稳态的全过程划分为 4 个阶段(3 个故障暂态阶段及 1 个故障稳态阶段), 具体如下:

①代表 LVRT 控制未响应暂态阶段(故障第 1 阶段), $t_0 \sim t_1$ 期间控制系统中检测电压未达到控制切换阈值 0.9, IIREG 仍为电压电流双闭环控制。

②代表电压检测暂态阶段(故障第 2 阶段), t_1 时刻切换至 LVRT 控制后, 由于电压跌落检测幅值

随时间变化, 故电流参考值 i_{dq}^* 根据 LVRT 控制策略随检测电压幅值暂态变化。

③代表 PI 跟踪暂态阶段(故障第 3 阶段), $t_2 \sim t_3$ 期间代表输出电流实现 PI 跟踪过程的暂态阶段, 该阶段电压检测幅值达到稳态, 电流参考值也随之达稳定值, 而 IIREG 输出电流 i_{dq} 为实现控制目标而处于暂态变化。

④代表故障稳态阶段(故障第 4 阶段), 即经过内环 PI 控制器短暂的暂态响应时间后最终输出电流达到稳定值, 在 t_3 时刻进入故障稳态。

其中, 故障第 1 阶段及第 2 阶段的响应时间主要与电压幅值检测时间有关, 而电压检测模块及故障场景等因素的差异性均会影响幅值检测的时间, 故障第 3 阶段的响应时间主要与控制参数的设计有关, 不同并网系统模型的控制参数及运行性能有所区别, 响应时间也有所不同。

2 计及电压跌落检测导致控制切换延时的故障电流解析计算

2.1 控制未响应暂态阶段(故障第 1 阶段)电流解析计算模型

相较于电压外环, 电流内环具有较高的响应速度^[25], 因此 IIREG 在控制未响应阶段的故障暂态电流由外环主导。

故障发生时直流母线电压受到逆变器两侧输出功率的不平衡的影响而波动变化, 其波动量直接影响逆变器输出电流。根据式(1)的功率守恒关系及电容的储能特性可得直流母线电压的方程式为:

$$\frac{1}{2}C(U_{dc}^2 - U_{dc}^{*2}) = \int_{t_0}^{t_1} (P_0 - P_g) dt \quad (5)$$

若故障前后直流母线电压分别为 U_{dc0} 、 U_{dc1} , 对式(5)进行变形简化得直流母线电压的波动量为:

$$\Delta U_{dc} = U_{dc1} - U_{dc0} = U_{dc} - U_{dc}^* = \frac{\int_{t_0}^{t_1} (P_0 - P_g) dt}{CU_{dc}^*} \quad (6)$$

结合式(2)和式(3), 对式(6)两端取关于时间的 2 阶导数并求解可得直流母线电压故障分量的时域表达式为:

$$\Delta U_{dc}(t) = M_1 e^{-\alpha t} \sin(\beta t) \quad (7)$$

式中: M_1 代表直流母线电压变化量的峰值; α 为衰减时间常数; β 为由控制及物理参数确定的角频率。式(7)中各参数表达见附录 A 中的表 A1。

假设故障前后 d 轴电流分别为 i_{d0} 、 i_{d1} , 忽略

电流内环的响应, 由式(3)和式(6)可得频域下 d 轴电流的故障分量如式(8)所示:

$$\Delta i_d = i_{d1} - i_{d0} = (U_{dc1} - U_{dc0}) \left(K_{VP} + \frac{K_{VI}}{s} \right) \Delta U_{dc} \left(K_{VP} + \frac{K_{VI}}{s} \right) \quad (8)$$

结合式(7)进一步解得时域下 d 轴电流故障分量的表达式为:

$$\Delta i_d(t) = K_{VP} \Delta U_{dc}(t) + K_{VI} \int \Delta U_{dc}(t) dt = M_2 e^{-\alpha t} \sin(\beta t - \zeta_1) \quad (9)$$

式中: M_2 代表有功电流故障分量的峰值; ζ_1 是在公式代入计算推导过程中得出的相位角。式(9)中各参数的表达见附录 A 中的表 A2。

由此可得故障第 1 阶段 IIREG dq 轴电流的表达式如式(10)所示:

$$\begin{cases} i_{df}(t) = \frac{P_0}{e_d} + \Delta i_d(t) \\ i_{qf}(t) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

以 A 相为例, 式(11)所示为经过 Park 反变换可得暂态第 1 阶段故障电流解析表达式^[16]:

$$i_{Af1}(t) = \frac{P_0}{e_d} \cos(\omega_0 t + \alpha_0) + \frac{M_2 e^{-\alpha t}}{2} \sin(\omega_1 t - \zeta_1 + \alpha_0) + \frac{M_2 e^{-\alpha t}}{2} \sin(\omega_2 t - \zeta_1 - \alpha_0) \quad (11)$$

式中: α_0 为故障前的初相角; ω_1 、 ω_2 为由控制及物理参数确定的角频率, ω_1 、 ω_2 的具体表达式见附录 A 中的表 A3。

2.2 电压检测暂态阶段(故障第 2 阶段)电流解析计算模型

2.2.1 基于“区间分段”的电流参考值解析

由于 LVRT 控制电压检测环节含有积分滤波模块, 因此 PCC 电压骤降的阶跃信号经控制器检测输出可近似为斜坡信号, 又经取点实验拟合, 可用一次函数 $U_{PCC,f}(t) = At + B$ 近似拟合电压跌落的暂态变化过程。

将该电压函数代入到式(4)中可以得到 d 、 q 电流参考值随时间变化的函数表达式为:

$$i_q^*(t) = \begin{cases} 2(0.9 - At - B), & 0.2 \leq U_{PCC,f} \leq 0.9 \\ I_{\max}, & U_{PCC,f} < 0.2 \end{cases} \quad (12)$$

$$i_d^*(t) = \begin{cases} \frac{P_0}{At + B}, & U_x \leq U_{PCC,f} \leq 0.9 \\ \sqrt{I_{\max}^2 - (i_q^*(t))^2}, & U_{PCC,f} < U_x \end{cases} \quad (13)$$

式中: U_x 为逆变器达到逆变器限流约束条件的边界电压值^[27], 当 $I_{\max} = 1.5I_N$ 时, $U_x = 0.7$ (标么值), I_N 为逆变器正常稳态运行时的额定电流。

在电流参考值处于暂态变化期间时, 逆变器输出的故障电流也在控制系统的作用下跟随控制目标不断变化。为简化对该暂态过程的求解, 采用“区间分段”的思想对电流参考值的变化曲线进行拟合。首先将电流参考值变化的暂态过程进行等区间划分, 每个小区间上电流参考值的连续变化用若干个阶跃变化等效替代, 进而在每个小区间上分别考虑逆变器输出电流跟踪控制目标的暂态变化过程, 进而对暂态电流进行解析计算, 最终求得在电流参考值整个连续变化过程中的故障电流解析表达式。

基于上述思路, 以故障时 PCC 电压跌落至边界电压 U_x 以上为例, 对电压检测暂态阶段的故障电流进行理论分析求解。

图 5 所示为对电压跌落检测延时暂态过程等区间划分的示意图。

图 5 中 T_0 与 T_n 分别代表划分区间的起点与终点, 分别对应了 LVRT 控制投入时刻和电压跌落暂态过程结束趋于稳态的时刻。

将图 5 中从 T_1 到 T_n 过程中对应的电压代入到式(12)与式(13)中, 可得 d 轴电流参考值在各时刻对应的数值 i_{d0}^* 到 i_{dn}^* 与 q 轴电流参考值在各时刻对应的数值 i_{q0}^* 到 i_{qn}^* , 如图 6 所示。

由图 6 可得, 采用“区间分段”的方式, 用若干个区间的阶跃函数来逼近 d 、 q 轴电流的原函数, 通过针对每个小区间中电流参考值阶跃变化的场景对故障电流进行求解, 进而对每个区间上的电流进行叠加, 从而实现对故障第 2 阶段电压跌落暂态过程中故障电流的解析建模。

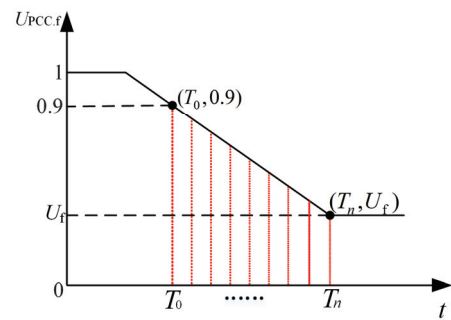
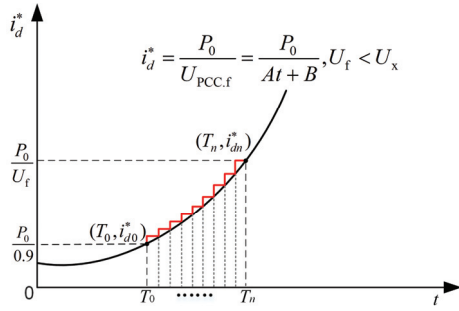
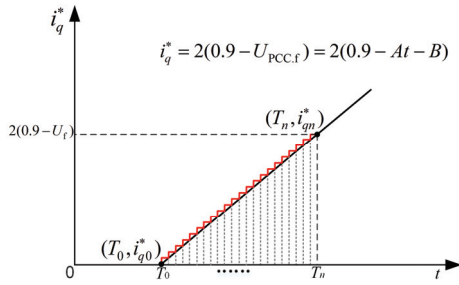


图 5 电压跌落暂态过程区间划分示意图

Fig.5 Schematic diagram of voltage dip transient process interval division

(a) d 轴电流参考值区间划分等效替代图(b) q 轴电流参考值区间划分等效替代图图 6 dq 轴电流参考值区间划分等效替代图Fig.6 Equivalent substitution diagram of dq -axes current reference value's interval division

2.2.2 第 2 阶段故障电流解析计算模型的建立

不考虑控制切换延时与电压跌落检测影响的场景下,故障后 LVRT 控制立即投入,电流参考值瞬时变化为 LVRT 控制策略给定值,即 2.2.1 节中电流参考值“区间分段”后单个区间的场景,首先对单区间故障电流进行解析。图 7 所示为电流内环的频域传递函数模型。

由图 7 可得电流内环闭环传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{\Delta i_d^*}{\Delta i_d} = \frac{sK_{ip} + K_{il}}{s^2L + sR + sK_{ip} + K_{il}} \quad (14)$$

按照典型 I 型系统设计的电流内环可等效为一阶惯性环节^[28],得到电流参考值阶跃变化时的 d 轴故障电流分量的表达式为:

$$\Delta i_d = G_c(s)(i_{d1}^* - i_{d0}^*) = (i_{d1}^* - i_{d0}^*) \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \omega_c} \right) \quad (15)$$

式中: i_{d0}^* 与 i_{d1}^* 分别为图 6 中 T_0 时刻与 T_1 时刻的 d 轴电流参考值; ω_c 为截止角频率,一般设置电流内环的控制参数使之满足 $\omega_c = 10\omega_0$ 以使其控制响应最佳。 ω_c 的表达式见附录 A 中的表 A4。

对式(15)进行拉普拉斯反变换可得时域下单区间暂态响应电流表达式为:

$$i_{df}(t) = i_{d0}^* + \Delta i_d(t) = i_{d0}^* + (i_{d1}^* - i_{d0}^*)(1 - e^{-\omega_c t}) = i_{d1}^* - (i_{d1}^* - i_{d0}^*)e^{-\omega_c t} \quad (16)$$

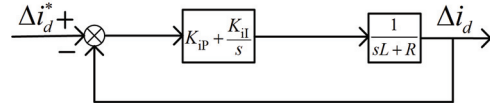


图 7 电流内环简化传递函数模型

Fig.7 Simplified control block diagram of current inner loop

图 6 中每个小区间上的故障暂态电流可依据式(16)进行解析计算。通过对每个区间上的电流进行叠加,可得式(17)所示的故障第 2 阶段电压跌落暂态过程中的 d 、 q 轴电流表达式为:

$$i_{dqf}(t) = \begin{cases} i_{dq1}^* - (i_{dq1}^* - i_{dq0}^*)e^{-\omega_c t}, & T_0 \leq t < T_1 \\ i_{dq2}^* - (i_{dq2}^* - i_{dq1}^*)e^{-\omega_c t}, & T_1 \leq t < T_2 \\ \vdots \\ i_{dq(n-1)}^* - (i_{dq(n-1)}^* - i_{dq(n-2)}^*)e^{-\omega_c t}, & T_{n-2} \leq t < T_{n-1} \end{cases} \quad (17)$$

经坐标变换,将 dq 两相旋转坐标系下的电流转换到 ABC 三相坐标系下,得到电压检测暂态阶段 A 相的故障电流表达式为:

$$i_{Af2}(t) = \sqrt{i_{df}^2(t) + i_{qf}^2(t)} \cos(\omega_0 t + \theta_0 + \varphi_{n-1}) \quad (18)$$

式中: θ_0 为初相角; $\varphi_{n-1} = \arctan(i_{q(n-1)}^* / i_{d(n-1)}^*)$, 为每个区间电流参考值阶跃变化后的相角。

2.3 PI 跟踪暂态阶段(故障第 3 阶段)电流解析计算模型

故障第 3 阶段逆变器仍处于 LVRT 运行模式,电压跌落检测幅值已达稳定值,故此时电流参考值达到稳定值,而 IIREG 的输出电流仍未完全跟踪上电流参考值,处于故障暂态跟踪阶段。

该阶段的暂态解析模型满足 2.2.1 节所分析的电流参考值单区间阶跃条件,仅考虑内环 PI 控制器的暂态响应,根据 2.2.2 节的求解可得其暂态响应电流表达式为:

$$i_{dqf}(t) = i_{dn}^* - (i_{dn}^* - i_{d(n-1)}^*)e^{-\omega_c t} \quad (19)$$

根据 Park 反变换可得式(20)所示的故障第 3 阶段 A 相的故障电流解析表达式。

$$i_{Af3}(t) = \sqrt{i_{df}^2(t) + i_{qf}^2(t)} \cos(\omega_0 t + \theta_0 + \varphi_n) \quad (20)$$

2.4 故障稳态阶段(故障第 4 阶段)电流解析计算模型

第 4 阶段即故障稳态阶段,该阶段逆变器输出电流已完全跟踪上电流参考值,达到稳定值,电流由 LVRT 控制策略给定,与电压跌落程度有关,可等效为压控流源模型。故障稳态阶段电流模型的研究现已较为成熟,此处不再赘述。

2.5 故障暂态全过程电流解析计算模型

综上,计及控制切换延时及电压跌落检测过

程, 将 IIREG 故障暂态电流特性划分为不同响应阶段进行刻画, 以 A 相为例, 得到具体解析计算模型为:

$$i_{Af(t)} = \begin{cases} i_{Af1(t)}, & t_0 < t < t_1 \\ i_{Af2(t)}, & t_1 \leq t < t_2 \\ i_{Af3(t)}, & t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (21)$$

3 故障电流解析计算模型仿真验证

为验证本文所提计及电压跌落检测导致控制切换延时的故障电流解析计算模型的准确性, 在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建如图 8 所示的 IIREG 并网仿真模型。

图 8 可得, 逆变型新能源电源通过箱变接入电压等级为 35 kV 的母线 A 处, 再经主变接于电压等级为 110 kV 的母线 B 和 C 处, 电气设备及控制系统等具体参数详见附录 B 的表 B1。仿真中设置在 0.25 s 时刻送出线路 k 点发生永久性三相短路故障。

3.1 计及控制切换延时与电压跌落检测影响解析计算结果的验证

分别以电压标幺值(基准值为 PCC 电压 35 kV)跌落至 0.8 及 0.4 为例, 观察不同电压跌落程度时故障电流阶段性变化的差异性以验证所提故障电流理论解析计算结果的正确性。

3.1.1 电压标幺值跌落至 0.8

此时经过 9 ms 的短暂延时后切换至 LVRT 控制。根据式(10)、式(17)和式(19)可以得到 dq 轴电流参考值的计算曲线如图 9 中的上下圈画虚线所示, 其中上下 2 条实线分别为 d 轴和 q 轴实际输出波形, 可以看到理论分析的 d、q 轴故障电流解析波形与实际仿真输出波形基本一致。

由图 9 可得, 故障发生后的 9 ms 内, 电压标幺值幅值从 1 降落到 0.9, 未切换至 LVRT 控制, 因此该阶段的 d 轴电流主要受直流母线电压波动的影响, 呈现出缓慢上升的趋势, 而 q 轴电流仍为 0; 切换至 LVRT 控制后, dq 轴电流随电压跌落检测幅值的下降而呈现暂态上升的趋势, 最终达到稳态值。

为验证本文所提理论解析方法的正确性以及不计延时及检测过程解析方法的差异性, 以 A 相为例, 将上述 2 种解析方法得到的图像与实际仿真波形作对比, 如图 10 所示。

图 10 中, 实线为实际仿真波形, 虚线与点画线分别为本文所提解析方法与不计延时及电压跌落检测场景的解析方法所得波形。由图 10 可得, 在故

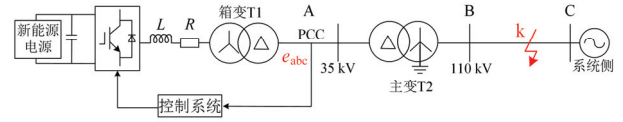


图 8 含 IIREG 系统的仿真模型结构图

Fig.8 Structure diagram and simulation model of power network with IIREG

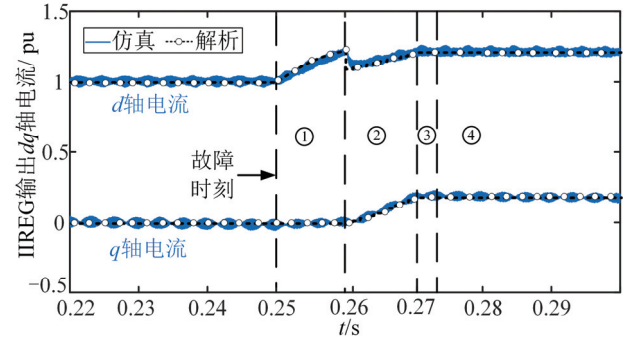


图 9 计及延时及检测过程电压标幺值跌落至 0.8 时 dq 轴电流波形拟合

Fig.9 Waveform of dq-axis fault current fitting under the voltage per unit value drops to 0.8 considering delay and voltage detection

障发生后的电压检测暂态降落过程的 20 ms (0.25~0.27 s)内, 本文解析波形与不计电压跌落检测过程的解析波形在幅值和相角方面存在着较大的差异, 这是由于不计延时及检测过程的解析波形无延时导致提前到达稳态值, 而本文解析波形与仿真波形基本相符; 当电压达到稳态值时, 由于 d、q 参考值相同, 因此两波形没有太大差异, 均与仿真波形相符。

为进一步量化分析本文所提解析计算方法的准确性, 分别对故障后 30 ms 内本文所提计及延时的解析方法、不计延时的解析方法与仿真值的误差进行分析。在这里选取故障后 30 个离散时刻(k_{ms} , 其中 $k=1, 2, \dots, 30$)计算各电流量的瞬时误差, 误差计算式为:

$$\sigma_k = |i_{sim}(k) - i_{cal}(k)| / |i_{sim}(k)| \quad (22)$$

式中: σ_k 为瞬时误差; i_{sim} 为电流仿真值; i_{cal} 为电流解析计算值, 误差计算结果如附录 B 的图 B1 所示。

由误差计算结果可得, 在故障后电压暂态降落的 20 ms 内, 不计延时及电压跌落检测过程的解析方法与仿真波形存在较大的误差, 其中误差最大的点在故障发生时刻以及 LVRT 控制切换时刻, 误差超过了 20%, 这是由控制切换时延和电流参考值暂

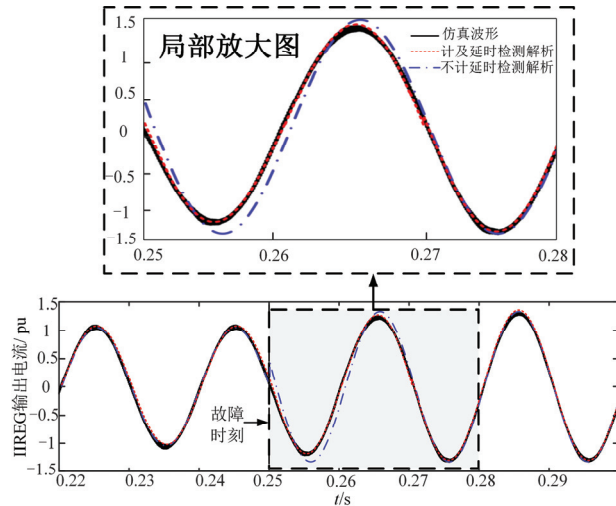


图10 电压标幺值跌落至0.8时本文计及延时及电压跌落检测与不计延时及检测过程A相电流波形拟合对比图

Fig.10 Contrast of waveform phase A fault current fitting under the voltage per unit value drops to 0.8 considering and without considering delay and voltage detection

态变化引起的;而当电压降落达到稳态后,两解析方法与仿真波形误差较小,误差控制在2%左右。对比不计检测过程的解析方法,在故障发生后的30 ms内,每个瞬间时刻上所提方法电流误差均显著降低。

3.1.2 电压标幺值跌落至0.4

此时经过4 ms的短暂延时后切换至LVRT控制。 d 、 q 轴电流参考值计算曲线如图11中的上下两条圈画虚线所示,其中上下2条实线分别为 d 轴和 q 轴实际输出波形,理论分析的 dq 轴故障电流解析波形实际仿真输出波形与基本一致。

由图11可得,由于电压跌落程度较深,因此电压标幺值幅值故障发生后的4 ms内即从1降落到0.9,并且由于直流母线上的功率不平衡关系加深,直流母线电压迅速上升导致该阶段的 d 轴电流上升幅度变大,而 q 轴电流不受影响仍为0;切换至LVRT控制后,在电流未达到限幅值之前, d 、 q 轴电流随电压跌落检测幅值的下降而暂态上升,电流达到限幅值之后,由于采用无功优先的模式,因此 q 轴电流继续上升,而 d 轴电流受限,呈现下降趋势,最终达到稳态值。

以A相为例,将不计控制切换延时及电压跌落检测过程影响的电流解析计算方法和本文所提故障电流解析计算方法与仿真输出图像作波形对比与误差分析,其中波形对比图像如图12所示,误差计算

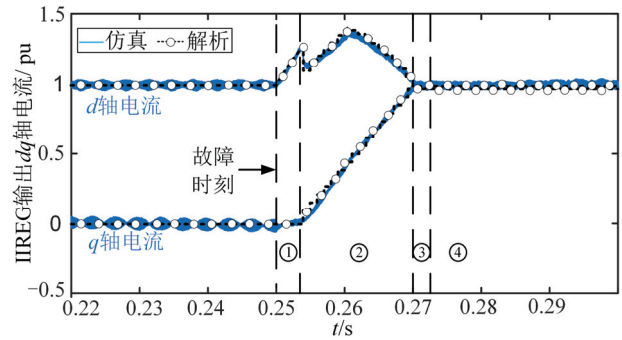


图11 计及延时及检测过程电压标幺值跌落至0.4时 dq 轴电流波形拟合

Fig.11 Waveform of dq -axis fault current fitting under the voltage per unit value drops to 0.4 considering delay and voltage detection

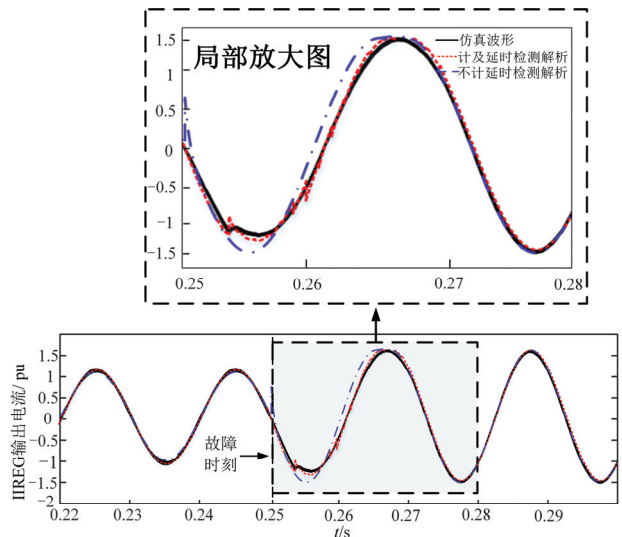


图12 电压标幺值跌落至0.4时本文计及延时及电压跌落检测与不计延时及检测过程的A相电流波形拟合对比图

Fig.12 Contrast of waveform phase A fault current fitting under the voltage per unit value drops to 0.4 considering and without considering delay and voltage detection

结果如附录B的图B2所示。

由误差分析结果可知,与电压跌落较浅(标幺值为0.8时)相比,故障发生后不计延时及检测过程的解析方法与实际波形的误差明显增大,最高可达35%,而本文所提解析方法误差在5%左右,与仿真波形吻合程度更高,验证了本文理论分析计算结果的正确性及有效性。

4 结论

本文针对含IIREG的并网系统,考虑控制切换

延时及电压跌落检测的影响, 建立了对称故障时 IIREG 故障暂态全过程的电流解析模型。主要结论如下:

1) 以故障后控制策略切换时刻、电流参考值达到稳态时刻为时间节点, 将 IIREG 的故障全过程定义并划分为 4 个阶段, 其中包括 3 故障暂态阶段和 1 个故障稳态阶段, 明确了电压检测延时对故障电流的影响机理。

2) 通过分析 3 个暂态阶段故障电流的主导因素, 最终得到故障发生后暂态到稳态全过程逆变器输出电流分阶段的时域解析表达式。

3) 针对本文所提分阶段的理论分析方法, 将计及控制切换延时及电压跌落检测过程的解析波形与不计该延时及检测过程影响的解析波形进行拟合对比, 并对故障后 30 ms 的电流瞬时误差进行定量计算分析, 验证了所提暂态分阶段电流理论解析计算方法的正确性与有效性。

本文以三相对称短路故障为例, 建立了计及控制切换延时及电压跌落检测影响的分阶段故障暂态电流解析计算模型, 针对不对称故障情况下正负序分离等复杂因素对故障暂态各阶段电流的影响, 后续将开展进一步的研究工作。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] 潘永生, 王智冬, 王栋, 等. 基于锁相环同步控制的双馈风机弱电网接入稳定性分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 170-177.
PAN Ersheng, WANG Zhidong, WANG Dong, et al. Stability analysis of phase-locked loop synchronized DFIGs in weak grids[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 170-177.
- [2] TSIOMAS E, JABBOUR N, KOSEOGLOU M, et al. Enhanced sizing methodology for the renewable energy sources and the battery storage system in a nearly zero energy building[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10142-10156.
- [3] 宋晓通, 师芊芊, 巨云涛, 等. 综合能源系统低碳规划与运行研究述评[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1053-1066.
SONG Xiaotong, SHI Qianqian, JU Yuntao, et al. Review on low-carbon planning and operation of integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1053-1066.
- [4] 韩博文, 王钢, 李海峰, 等. 含逆变型分布式电源配电网的新型纵联保护方案[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3453-3462.
HAN Bowen, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Novel pilot protection scheme for distribution networks with inverter-interfaced distributed generators[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3453-3462.
- [5] 马铭遥, 熊鹏博, 孟雪松, 等. 基于光伏并网逆变器直流过压故障的暂态分析及故障成因定位[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 187-197.
MA Mingyao, XIONG Pengbo, MENG Xuesong, et al. Transient analysis and fault cause location of DC overvoltage fault based on photovoltaic grid connected inverter[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 187-197.
- [6] 贾科, 顾晨杰, 毕天姝, 等. 大型光伏电站汇集系统的故障特性及其线路保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 189-198.
JIA Ke, GU Chenjie, BI Tianshu, et al. Fault characteristics and line protection within the collection system of a large-scale photovoltaic power plant[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 189-198.
- [7] 袁志昌, 郭佩乾, 刘国伟, 等. 新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1473-1488.
YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1473-1488.
- [8] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [9] 缪希仁, 赵丹, 刘晓明, 等. 含分布式电源配电网短路保护研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3006-3019.
MIAO Xiren, ZHAO Dan, LIU Xiaoming, et al. A research review of short-circuit protection in distribution network with distributed generation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3006-3019.
- [10] 栗然, 高起山, 刘伟. 直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 153-158.
LI Ran, GAO Qishan, LIU Wei. Characteristics of direct-driven permanent magnet synchronous wind power generator under symmetrical three-phase short-circuit fault[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 153-158.
- [11] 江艺宝, 于佳乐, 赵浩然, 等. 新型电力系统电磁暂态并行仿真关键技术及展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 3145-3160.
JIANG Yibao, YU Jiale, ZHAO Haoran, et al. Key technologies and prospects for electromagnetic transient parallel simulation in new power systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3145-3160.
- [12] 贾祺, 严干贵, 李泳霖, 等. 多光伏发电单元并联接入弱交流系统的稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 14-20.
JIA Qi, YAN Gangui, LI Yonglin, et al. Stability analysis of multiple paralleled photovoltaic power generation units connected to weak AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 14-20.
- [13] 谭会征, 李永丽, 陈晓龙, 等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 31-37, 52.
TAN Huizheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generator with low-voltage ride-through capability on short circuit current of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 31-37, 52.
- [14] FISCHER M, MENDONÇA A. Representation of variable speed full conversion Wind Energy Converters for steady state short-circuit calculations[C]//Proceedings of the PES T&D 2012. Orlando, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [15] 刘素梅, 毕天姝, 王晓阳, 等. 具有不对称故障穿越能力逆变型新能源电源故障电流特性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 66-73.
LIU Sumei, BI Tianshu, WANG Xiaoyang, et al. Fault current characteristics of inverter interfaced renewable energy generators with asymmetrical fault ride-through capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 66-73.
- [16] 宋国兵, 常仲学, 王晨清, 等. 直驱风机三相短路电流特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10): 1-7.
SONG Guobing, CHANG Zhongxue, WANG Chenqing, et al. Three-phase fault current characteristics of permanent magnet synchronous generator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015,

- 49(10): 1-7.
- [17] 匡晓云, 方 煜, 关红兵, 等. 适用于含新能源逆变电源网络的全时域短路电流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 113-122. KUANG Xiaoyun, FANG Yu, GUAN Hongbing, et al. Full-time domain short circuit current calculation method suitable for power network with inverter-interfaced renewable energy source[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 113-122.
- [18] 徐可寒, 张 哲, 刘慧媛, 等. 光伏电源故障特性研究及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 359-371. XU Kehan, ZHANG Zhe, LIU Huiyuan, et al. Study on fault characteristics and its related impact factors of photovoltaic generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 359-371.
- [19] 申全宇, 杨忠礼, 宋国兵, 等. 一种含变流器电力元件的短路电流计算方法[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 24-31. SHEN Quanyu, YANG Zhongli, SONG Guobing, et al. Short-circuit current computation method for electric elements with converter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(4): 24-31.
- [20] ZHANG Q, LIU D, LIU Z, et al. Fault modeling and analysis of grid-connected inverters with decoupled sequence control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(6): 5782-5792.
- [21] 孔祥平, 袁宇波, 黄浩声, 等. 光伏电源故障电流的暂态特征及其影响因素[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2444-2449. KONG Xiangping, YUAN Yubo, HUANG Haosheng, et al. Fault current transient features and its related impact factors of PV generator[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2444-2449.
- [22] 马 聪, 高 峰, 田 昊, 等. 适用于并网系统低电压穿越的电压检测算法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 122-127. MA Cong, GAO Feng, TIAN Hao, et al. A voltage detection method for low voltage ride through of grid-connected system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 122-127.
- [23] KUMSUWAN Y, SILLAPAWICHARN Y. A fast synchronously rotating reference frame-based voltage sag detection under practical grid voltages for voltage sag compensation systems[C]//Proceedings of the 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. Bristol, UK: IEEE, 2012: 1-5.
- [24] PEI J X, YAO J, LIU Y, et al. Modelling and transient synchronization stability analysis for PLL-based renewable energy generator considering sequential switching schemes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 2165-2179.
- [25] 郭云飞. 纯方位角目标跟踪理论与应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. GUO Yunfei. Theory and application research on bearing only target tracking[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2007.
- [26] 张 兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 143-146. ZHANG Xing, CAO Renxian. Solar photovoltaic power generation and inverter control[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2011: 143-146.
- [27] 焦彦军, 梁 宵, 蒋晨阳. 计及 LVRT 控制策略的光伏电站并网配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 92-99. JIAO Yanjun, LIANG Xiao, JIANG Chenyang. Failure analysis method in distribution network considering LVRT control strategy of grid-connected photovoltaic station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 92-99.
- [28] 孔祥平, 张 哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74. KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.



ZHENG Tao
Ph.D., Professor

郑 涛

1975—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事电力系统继电保护研究工作
E-mail: zhengtao@necpu.edu.cn



CHEN Ying
Corresponding author

陈 颖(通信作者)

1998—, 女, 硕士生
主要从事新能源电力系统保护与控制工作
E-mail: 1449668537@qq.com

收稿日期 2023-12-14 修回日期 2024-03-27 编辑 陈 蔓

附录 A

表 A1 式(7)中各参数表达式及其含义

Table A1 Parameter expression and meaning in equation (7)

参数表达式	参数含义
$M_1 = \frac{2P_0(1-e_d)}{u_{dc}^* C \sqrt{4K_{vp}(e_d / CU_{dc}^*) - K_{v1}^2(e_d / CU_{dc}^*)^2}}$	M_1 代表直流母线电压变化量的峰值。
$\alpha = \frac{K_{vp}(e_d / CU_{dc}^*)}{2}$	α 为衰减时间常数。
$\beta = \frac{\sqrt{4K_{v1}(e_d / CU_{dc}^*) - K_{vp}^2(e_d / CU_{dc}^*)^2}}{2}$	β 为由控制及物理参数确定的角频率。

表 A2 式(9)中各参数表达式及其含义

Table A2 Parameter expression and meaning in equation (9)

参数表达式	参数含义
$M_2 = M_1 \sqrt{\frac{K_{v1}}{e_d / CU_{dc}^*}}$	M_2 代表有功电流故障分量的峰值。
$\zeta_1 = \arctan \frac{2\sqrt{4K_{v1}\delta - K_{vp}^2\delta^2}}{3K_{vp}\delta}$	ζ_1 是在公式代入计算推导过程中得出的相位角。

表 A3 式(11)中各参数表达式及其含义

Table A3 Parameter expression and meaning in equation (11)

参数表达式	参数含义
$\omega_1 = \beta + \omega_0$	ω_1 为由控制及物理参数确定的角频率。
$\omega_2 = \beta - \omega_0$	ω_2 为由控制及物理参数确定的角频率。

表 A4 式(15)中各参数表达式及其含义

Table A4 Parameter expression and meaning in equation (15)

参数表达式	参数含义
$\omega_c = \frac{sK_{ip} + K_{il}}{sL + R}$	ω_c 为截止角频率，一般设置电流内环的控制参数使之满足 $\omega_c = 10\omega_0$ 以使其控制响应最佳。

附录 B

表 B1 并网仿真模型参数

Table B1 Simulation model parameters of grid-connected

system			
参数	数值	参数	数值
额定容量/MVA	0.25	内环控制参数 K_{il}	20
外环控制参数 K_{vp}	1	变压器 T1 变比	0.38/35
外环控制参数 K_{v1}	100	变压器 T2 变比	35/110
内环控制参数 K_{ip}	0.16	直流母线电容/ μF	5000

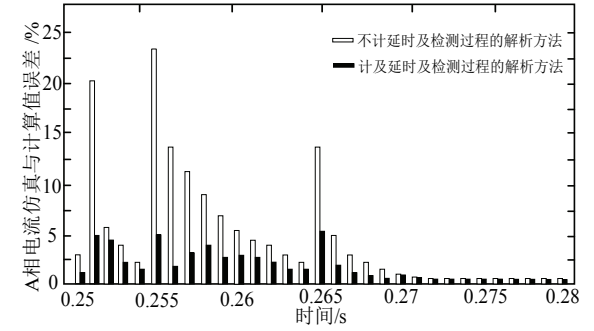


图 B1 电压标幺值跌落至 0.8 时不计延时及检测过程解析方法

与本文所提计及延时及检测过程方法的计算误差对比图

Fig. B1 Contrast of the calculation error between the method

without considering delay and voltage detection and the pro-

posed method when the voltage per unit value drops to 0.8

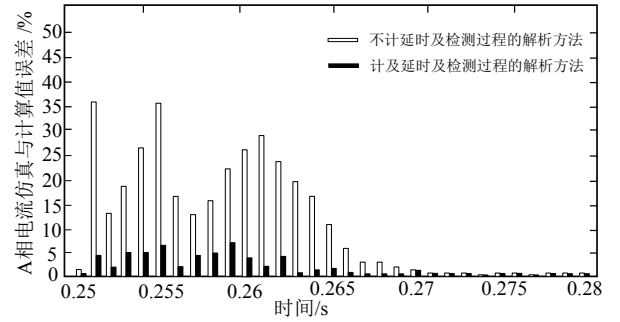


图 B2 电压标幺值跌落至 0.4 时不计延时及检测过程解析

方法与本文所提计及延时及检测过程方法的计算误差对比

Fig. B2 Contrast of the calculation error between the method

without considering delay and voltage detection and the pro-

posed method when the voltage per unit value drops to 0.4