

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181619

基于 RTDS 的光伏接入配电网故障特征研究

邵庆祝¹, 杨畅², 谢民¹, 王同文¹, 丁津津³, 于洋¹, 徐靖东⁴

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230061; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601;

4. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049)

摘要: 随着光伏在配电网渗透率的不断提高, 光伏电源故障特征的研究对于配电网的保护控制尤为重要。通过建立光伏并网系统的暂态模型, 研究了分布式光伏电源的暂态特性并给出了其电磁暂态全电流方程。利用实际光伏并网控制器, 搭建了基于 RTDS 仿真平台的实时混合仿真系统, 通过该系统验证了具有低电压穿越能力的单极式光伏在不同故障情况下的暂态全过程, 分析了不对称故障下分布式光伏电源低电压穿越期间的谐波特性。通过理论分析和实验验证全面阐述了光伏电源的故障特征, 为光伏接入配电网的故障电流计算及保护整定提供了参考依据。

关键词: 分布式光伏; 电压型变流器; 电磁暂态特征; RTDS; 电压不平衡度

Research on fault characteristics of distributed photovoltaic system in distributed network based on RTDS

SHAO Qingzhu¹, YANG Chang², XIE Min¹, WANG Tongwen¹, DING Jinjin³, YU Yang¹, XU Jingdong⁴

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China;

4. State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: With the increasing penetration of photovoltaic in distribution network, the research on the fault characteristics of photovoltaic is particularly important for the protection and control of distribution network. By establishing the transient model of distributed photovoltaic generator, the power characteristics of distributed photovoltaic generator under the fault condition are analyzed and the equation of electromagnetic transient current is given. A control-in-the-loop simulation system based on an actual photovoltaic controller is built on the RTDS simulation platform. Through this platform, it verifies the transient process of the unipolar photovoltaic generator with low voltage ride through capability in different fault conditions. The current harmonic characteristics of the distributed photovoltaic generator are also analyzed under asymmetric faults. The fault characteristics of photovoltaic are comprehensively expounded through theoretical analysis and experimental verification, which provides a reference for the calculation of fault current and the protection setting of photovoltaic access to distribution network.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902900) and Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. (No. 52120017001G).

Key words: distributed photovoltaic generator; voltage source converter; electromagnetic transient characteristics; RTDS; voltage imbalance

0 引言

随着分布式光伏在配电网系统的渗透率不断提高, 当系统发生故障时, 由光伏电源提供的短路电

流也在不断增大, 这必然会对原有保护的可靠性和灵敏度造成影响^[1-4]。针对逆转型分布式电源的短路电流特性及其在故障期间提供短路电流的能力, 国内外学者进行了大量的研究。文献[5-6]通过数字仿真分析了并网光伏在不同故障情况下的短路电流特性, 总结了光伏在不同接入点及出力条件下提供短路电流的能力。基于光伏电源的短路特征, 探讨了

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFB0902900); 国网安徽省电力有限公司科技项目资助(52120017001G)

分布式光伏接入对于配电网故障定位的适应性问题, 并指出当分布式光伏接入容量不大于 25% 时, 传统配电网故障定位规则均能满足要求。文献[7-9]给出了基于恒功率控制和低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)电流约束条件下的逆变型分布式电源故障分析方法, 给出不同故障条件下逆变型电源的等值策略。文献[10]建立了基于 crowbar 低穿策略的逆变型分布式电源数字仿真模型, 探讨了其在不同故障条件下的短路电流暂态特性。文献[11]分析了逆变器型分布式电源的短路电流特性, 将故障电流划分为两个阶段: 在故障初期, 短路电流遵循指数形式迅速升高, 其时间常数 t_d 与滤波器的截止频率、故障前的运行电流和最大输出电流有关; 在经历 t_d 时间后, 故障电流将受控制策略影响, 直接跃升至最大限值。文献[12]总结了目前行业内含电力电子设备的电力系统保护的研究成果, 指出了电网故障的电磁及机电暂态过程均受到电力电子设备控制策略及系统拓扑的影响, 提出了系统故障监测与恢复和电力电子设备控制协同的继电保护研究新思路。

但目前对于光伏短路电流暂态特性存在不同的说法。部分学者认为光伏短路电流的暂态过程不存在或可以忽略^[13], 而部分学者认为光伏短路电流的暂态特性与控制策略有关^[14]。以上分析的仿真结果均基于纯数字模型, 与实际光伏电源的故障特性存在必然差异。对于光伏电源短路电流的提供能力,

部分学者认为按照 1.2~1.5 倍的额定电流计算, 忽略了作为电力电子设备的光伏逆变器在超出极限输出时自身保护对于实际输出特性的影响, 且鲜有实际的运行数据支撑。

本文基于变流器平均值模型, 研究了短路电流暂态求解方法, 并给出了光伏电磁暂态过程的全电流表达式。同时, 搭建了基于实际光伏控制器的 RTDS 混合仿真平台, 研究了具有低电压穿越能力的单极式光伏在不同故障情况下的暂态全过程; 并在不对称故障情况下, 针对低电压穿越期间的谐波特性进行了分析; 探讨了光伏变流器并网电流的畸变率与电压不平衡度的关系。

1 分布式光伏等效暂态模型及控制

1.1 分布式光伏系统暂态模型

分布式光伏的建模主要包含五个部分: 光伏电池阵列、斩波电路、直流母线及卸荷电路、变流器以及滤波器, 如图 1 所示。就光伏结构而言, 斩波电路用于双极式结构的并网光伏。小型光伏电源以单极式为主, 因此建模时可以不考虑斩波电路。

假定三相参数完全相同, 可以对三相电压电流进行 dq 分解, 以获得不随时间变化的参量, 便于控制系统的控制。在采用 d 轴定向矢量控制时, 可以列出在同步转速为 ω_1 的 dq 旋转坐标系中, 变流器的数学模型如式(1)所示。

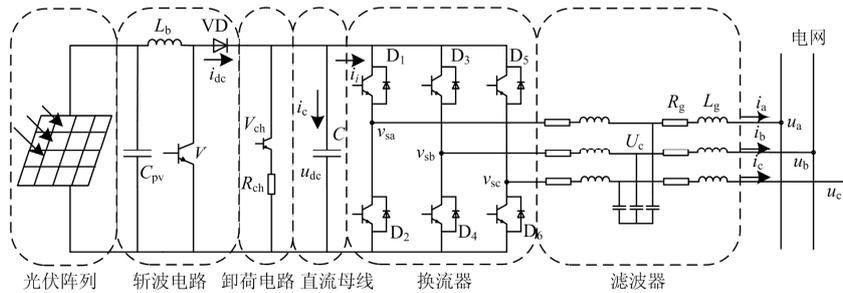


图 1 分布式并网光伏的典型拓扑结构

Fig. 1 Typical topology of distributed grid-connected photovoltaic generator

$$\begin{cases} U_g = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_1 L_g i_{gq} + v_{sd} \\ 0 = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_1 L_g i_{gd} + v_{sq} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (S_d i_{gd} + S_q i_{gq}) - i_{load} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_g 为电网相电压幅值; i_{gd} 、 i_{gq} 是光伏并网系统的输出电流分别在 dq 轴的分量; v_{sd} 、 v_{sq} 为变流器出口电压的 dq 轴分量; S_d 、 S_q 为开关函数的

dq 轴分量。

1.2 光伏控制策略

目前, 光伏变流器的并网控制一般为恒功率控制模式, 采用电压外环及电流内环的双环控制方式。同时, 为了实现式(1)中 i_{gd} 、 i_{gq} 的解耦控制, 可以采用前馈补偿的方法, 其输出的参考值数学表达式分别如式(2)、式(3)所示。

$$i_{gd}^* = -\frac{2u_{dc}}{3u_{gd}} i_{dc} + \left(K_{vp} + \frac{K_{vi}}{s} \right) (u_{dc}^* - u_{dc}) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{gd}^* \\ v_{gq}^* \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} v_{sd}' \\ v_{sq}' \end{bmatrix} - R_g \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} + \omega_1 L_g \begin{bmatrix} i_{gd} \\ -i_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{gd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} v_{sd}' \\ v_{sq}' \end{bmatrix} = \left(K_{ip} + \frac{K_{ii}}{s} \right) \begin{bmatrix} i_{gd}^* - i_{gd} \\ i_{gq}^* - i_{gq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

直流母线参考电压 u_{dc}^* 为给定控制参数, 其控制目标是保证直流母线电压稳定在给定参考值。外环输出为电流内环提供 d 轴参考电流 i_{gd}^* 。其中, K_{ip} 、 K_{ii} 、 K_{vp} 、 K_{vi} 分别为内外环的比例、积分系数。对于系统而言, 采用恒功率控制变流器可以等效为电流源。控制器通过控制 IGBT 的导通角来维持直流母线的电压稳定, 从而实现变流器两侧系统的功率平衡。在稳态运行时, 变流器在单位功率因数下运行, 当需要光伏变流器提供无功支撑时, 可以直接给定电流内环的无功参考值 i_{gq}^* , 以实现 LVRT 期间的无功支撑。

2 光伏电源的暂态特性分析

由于电力电子设备相比于同步机电源, 其惯性系数很小, 暂态特性主要是由保护及控制策略响应性能所决定^[15], 相当于一个受控源。因此, 在对含有大规模分布式光伏电源的配电网进行短路电流计算时, 若完全采用等效短路阻抗的计算方法, 将给计算结果带来巨大的偏差。因此, 需要对光伏电源的短路暂态特性进行分析研究。

这里以电网发生电压对称跌落为例, 对光伏系统的暂态特性进行分析。变流器的实际稳态输出由其控制回路给定。当电网的运行方式改变时, 基于原有电气参数的控制参考值将不能满足期望的输出目标, 此时变流器的运行状态也将随之偏离期望工作点。而控制回路的作用就是及时调整输出参考值, 使变流器回到预设的工作状态, 这就相当于为变流器增加了一个阻尼, 使其运行在预设的稳定域内。

图 2 为电压型变流器的平均值电路^[16-17], 其中 h 为 VSC 的开关函数。由控制器生成输出电压参考

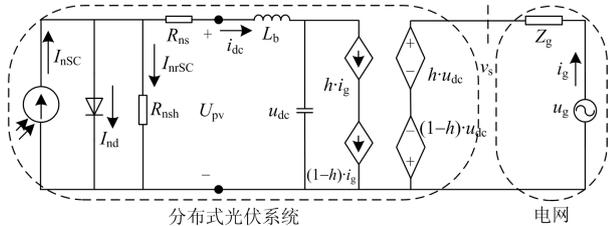


图 2 分布式光伏通用平均值电路

Fig. 2 Universal average circuit of distributed photovoltaic generator

信号 u_{dq}^* , 通过控制 VSC 交流侧电压来实现并网电流的调节。因此, 当在 t_0 时刻并网点电压瞬间跌落时, 若认为电压外环参数不变, 即 d 轴参考输出不变, 则 u_{dq}^* 不变, 可认为 v_s 在故障时刻没有突变, 而输出电流存在调节过程, 因此在故障的暂态过程中可以把 VSC 近似看作一个受控电压源。

由电网故障电压提供的故障电流可以简化为 RL 电路的正弦电压响应, 如式(5)所示。

$$\Delta i_g = \Delta I_{fg \max} \cos(\omega t + \varphi) - \Delta I_{fg \max} e^{-(R_g/L_g)t} \cos \varphi \quad (5)$$

式中, $\Delta I_{fg \max}$ 为电网故障电压在光伏接入回路产

生的故障电流最大值, 可用公式 $\Delta I_{fg \max} = \frac{\sqrt{2}I_g^*}{Z_g^*}$ 估

算, 其中 Z_g^* 为回路阻抗的标么值。因此, 故障时全电流为故障前的正常运行电流与故障分量电流的叠加, $i_{fg} = i_g + \Delta i_g$ 。

以 L 型滤波器为例, 则故障时光伏电流内环的输出控制图如图 3 所示。

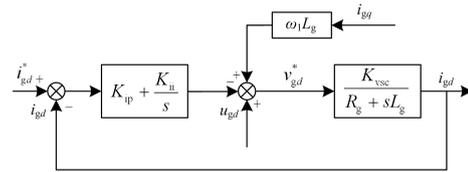


图 3 电流内环 d 轴控制框图

Fig. 3 Current inner loop d -axis control block diagram

其中 K_{vsc} 为 VSC 的增益, 可得电流内环 d 轴输入 i_{gd}^* 与输出 i_{gd} 的闭环传递函数, 如式(6)所示。

$$G_{ii}(s) = \frac{K_{vsc} K_{ip}}{L_g} \frac{s + K_{ii} / K_{ip}}{s^2 + s(K_{ip} K_{vsc} + R_g) / L_g + K_{ii} K_{vsc} / L_g} \quad (6)$$

以上传递函数的形式可以分解为一个 PI 调节的 I 阶系统与一个典型的 II 阶系统, 其中 I 阶系统的积分时间常数为 $1/K_{ii}$, 典型二阶系统的阻尼比 ξ 和自然振荡频率 ω_n 分别为

$$\begin{cases} \xi = (K_{ip} K_{vsc} + R) / (2\sqrt{K_{vsc} K_{ii} L_g}) \\ \omega_n = \sqrt{K_{vsc} K_{ii} / L_g} \end{cases} \quad (7)$$

若系统为欠阻尼, 即 $\xi \in (0, 1)$, 取静态误差带 $\Delta = 0.02$, 则调整时间为

$$t_s = \frac{4.4}{\xi \omega_n} \quad (8)$$

若取 $\omega_n = 10\omega_1$, $\xi \in [0.5, 0.9]$, 则 t_s 取值约为 1.5~2.8 ms, 即电流内环调整的暂态过程持续时间为

2 ms 左右。并网控制器通过跟踪并网点电流来调整 VSC 的端口电压 v_s ，因此故障时刻 VSC 并网输出的暂态电流是包含 $\Delta i_{gd,q}$ 与 Δi_g 的函数，其中 $\Delta i_{gd,q} = i_{gd,q}^* - i_{gd,q}$ 。故障暂态电流涉及多个量的耦合求解。由于电力电子设备的惯性系数小，在故障发生的很短时间内，可以近似认为输出的电流由 Δi_g 占主导。

由以上分析可以看出，分布式光伏在故障时的暂态及稳态过程受到以下因素的影响：(1) 故障发生时，光伏的运行工况；(2) 并网点电压跌落深度；(3) 变流器最大限幅及相关保护动作特性；(4) 光伏控制器的控制性能。

3 分布式光伏控制在环故障仿真

3.1 基于 RTDS 控制在环的分布式光伏系统

在设计实际控制器时，需要考虑到控制器的阶次选取，以很好地响应系统电网的暂态变化。当控制器阶次较高时，将增加控制器的制造成本及控制难度；当阶次较低时，对于系统暂态变化的控制将

出现振荡，无法收敛。由于分布式光伏的故障特性受到自身控制保护参数的影响，因此为真实反映光伏的暂态特性。本文借助 RTDS 实时仿真系统，搭建了基于现场实际光伏控制器的控制在环并网光伏仿真系统，如图 4 所示。

本文采用国内某厂商的光伏控制器与 RTDS 形成闭环控制仿真系统，其接线示意图见图 4。光伏并网控制器的主要功能模块有：MPPT 模块、VSC 控制及保护功能模块、并网控制模块、通信功能模块等。其中，MPPT 模块的功能是计算参考直流电压，以保证光伏运行在最大功率点处；VSC 控制模块的功能是通过双环控制算法为变流器提供 dq 轴的参考电压；VSC 保护模块是预设变流器交流侧最大输出电流值及直流母线最大电压值，以控制 VSC 的开关脉冲的开、闭锁及 chopper 的投切。并网控制模块的功能是负责监视并网点的电压，并向直流母线预充电，建立初始的直流工作电压，以保证 IGBT 的使能条件；通信模块的功能是与上位机进行通信。各环节的输入输出量如表 1 所示。

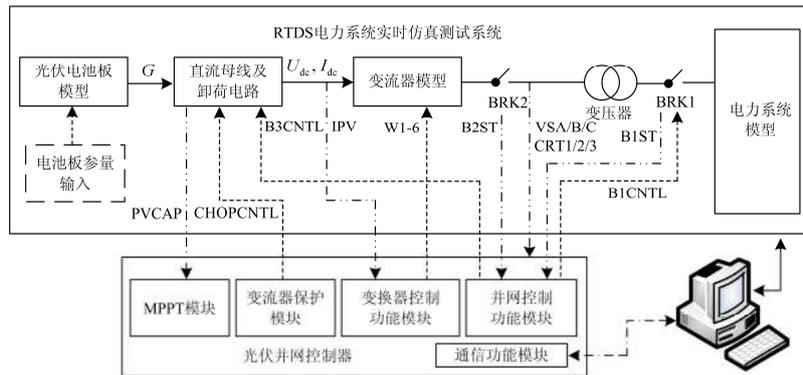


图 4 基于 RTDS 的光伏控制在环仿真系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of photovoltaic control in-loop simulation system based on RTDS

表 1 RTDS 光伏仿真系统控制参数表

Table 1 Control parameters of RTDS photovoltaic simulation system

变量性质	变量描述	变量名	通道变比
模拟量输出	网侧三相电压	VSA/B/C	0.69 kV/5 V
	网侧三相电流	CRT1/2/3	2.5 kA/5 V
	直流母线电压	PVCAP	3 kV/5 V
	直流母线电流	IPV	2 kV/5 V
	变流器网侧触发脉冲 chopper 触发脉冲	W1-6 CHOPCNTL	—
数字量输入	网侧接触器控制命令	B1CNTL	—
	机侧接触器控制命令	B2CNTL	—
	预充电合闸脉冲	B3CNTL	—
数字量输出	网侧接触器开关位置	B1ST	—
	机侧接触器开关位置	B2ST	—

3.2 光伏故障仿真分析

RTDS 仿真平台电网一次系统如图 5 所示。

仿真系统中光伏电源通过一台 Yd11 变压器接入 35 kV 系统，一次系统拓扑如图 5 所示，系统主要设备及控保参数如表 2 所示。故障前光伏以额定方式运行。

(1) 对称故障

故障类型为三相短路，故障位置设置在 Line1 的中点，故障触发角度为 A 相 45°，故障三相过渡电阻为 1 Ω，电压跌落至 0.2 p.u.。根据 LVRT 的要求，将故障持续时间设置为 200 ms^[18]。LVRT 过程中 q 轴的给定参考值为 400 A。

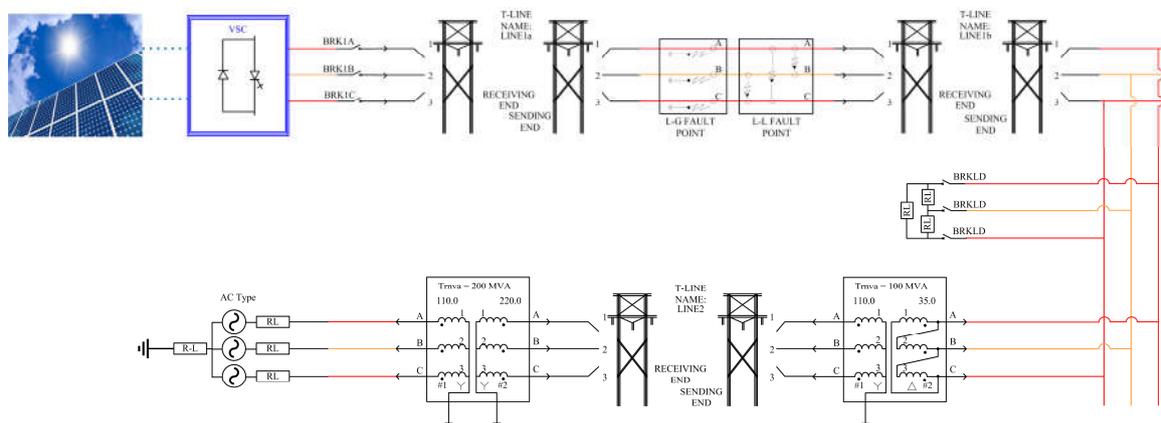


图 5 基于 RTDS 的含光伏电源配电网仿真系统图

Fig. 5 RTDS-based simulation system for photovoltaic power distribution network

表 2 系统参数表

Table 2 System parameter

设备名称	主要参数及取值
光伏阵列	光伏容量: 0.57 MW; 直流母线电压: 0.66 V。
滤波器	$L_1=1.5$ mH, $L_2=0.5$ mH, $C=2\ 500$ μ F, $R_c=0.039$ Ω 。
线路	线路长度: 15 km; 阻抗参数: 正序阻抗 $0.13+j0.358$ Ω /km, 零序阻抗 $0.13+j1.253$ Ω /km。
无穷电源	正序阻抗为 0.238 Ω , 零序阻抗为 0.503 Ω 。
保护参数	脉冲闭锁电流限值: $1.5I_N$ chopper 动作及恢复值: 830 V/ 850 V

由图 6 可以看出, VSC 出口短路电流分为三个阶段: 第 I 阶段为故障发生时刻 $0.102\ 2$ s 至 $0.104\ 6$ s, 此时 a 相电流迅速升高至 2.452 kA; 第 II 阶段为 $0.104\ 6$ s 至 $0.128\ 1$ s, 此时由于 VSC 输出电流超过保护设定值, 控制器迅速闭锁了 VSC 的导通触发脉冲, 经一小段续流后电流回落至零, 但此时 VSC 并未退出运行, 依然处于并网状态; 第 III 阶段为 $0.128\ 1$ s 以后至故障恢复, 此时 VSC 的并网控制检测到公共并网点电压依然满足 LVRT 条件, 立即驱动 VSC 并网, 并运行于 LVRT 状态; 第 IV 阶段为故障恢复, 系统正常运行。需要指出的是, 由于故障恢复瞬间系统三相同步时出现过电压及高频暂态分量, 导致光伏输出异常, 并网电流升高至自身保护动作值, 光伏控制器再次短时闭锁脉冲。

第一阶段, 由于故障发生时刻 VSC 的开关管处于正常导通状态, 断口电压迅速跌落, 电气量的采集、运算存在微小延时, 且控制系统自身存在一定的调节时间 t_s 。故障初始阶段, 系统对于变化量的阻尼较小, 控制系统无法及时调整 IGBT 的导通状态, 短路电流急剧增大, 此阶段的故障电流无法通过控制进行迅速抑制, 此结果与前文的分析基本一

致。在第三阶段, 由于光伏的并网点电压过低, 导致大部分功率无法正常输出, VSC 工作在非正常状态, 向系统输出的谐波电流也随之增大。在故障持续过程中, 直流母线电压迅速升高, 并达到 chopper 的动作定值, chopper 间歇性投入。因此, 直流母线电压和电流与 chopper 的动作特性一致, 呈现波动性。由于此时并网点电压过低, 系统的有功及无功输出很低。

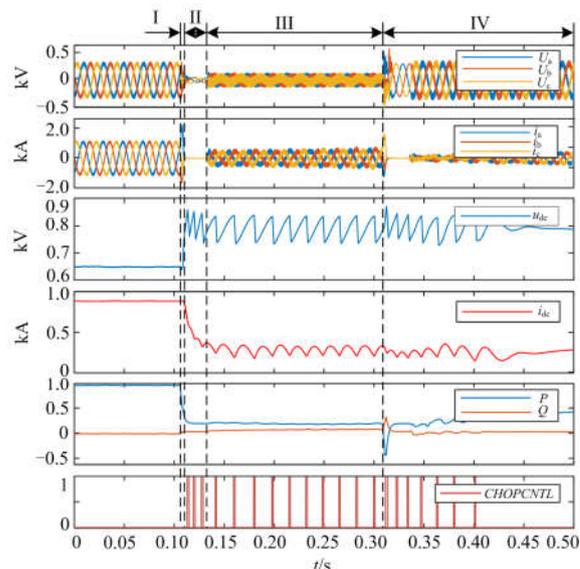


图 6 三相故障时光伏主要电气量暂态波形

Fig. 6 Transient waveform of main electrical quantity of photovoltaic generator in three-phase fault

图 7 给出了不同输出功率下, 光伏故障电流峰值的变化情况以及根据式(5)计算所得故障电流。可以看出, 由于计算忽略了并网电阻且按照单位功率因数计算, 估算故障电流与仿真故障电流趋势与数值十分接近。故障峰值电流约为稳态运行电流的 2~3 倍。光伏输出的故障电流峰值随功率的升高而

上升。说明光伏的故障电流与故障的类型和自身运行方式存在对应关系。

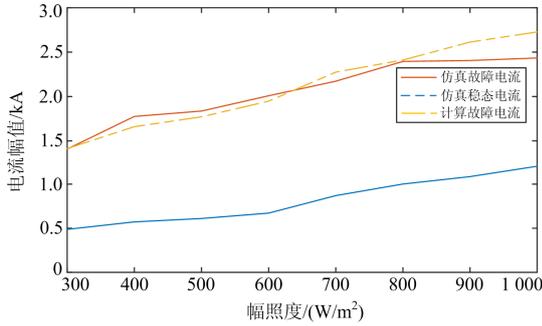


图 7 电压跌落 20%时不同辐照度下的短路电流幅值
Fig. 7 Short-circuit current amplitude at different irradiances when the voltage drops by 20%

(2) 不对称故障

两相故障：故障类型为 CA 相间短路，故障位置设置在 Line1 的中点，故障触发角度为 A 相 45°，故障两相过渡电阻为 1 Ω，故障持续时间 200 ms。故障期间采用 LVRT 控制，*q* 轴无功给定输出参考值为 400 A。

由图 8 可以看出，当发生不对称故障时，由于并网变压器连接组别为 Yd，高压侧 CA 相故障反映到光伏侧星接绕组为 A 相故障。由于三相的严重不平衡，在 LVRT 过程中，光伏输出三相电流不平衡，且存在很大谐波。由于光伏系统采用三相三线制，不平衡电流中不存在零序分量，只需考虑负序分量的影响^[19]。故障时较大的负序电流通过 VSC 导通的桥臂流入直流侧，导致直流母线电压出现 2 倍频

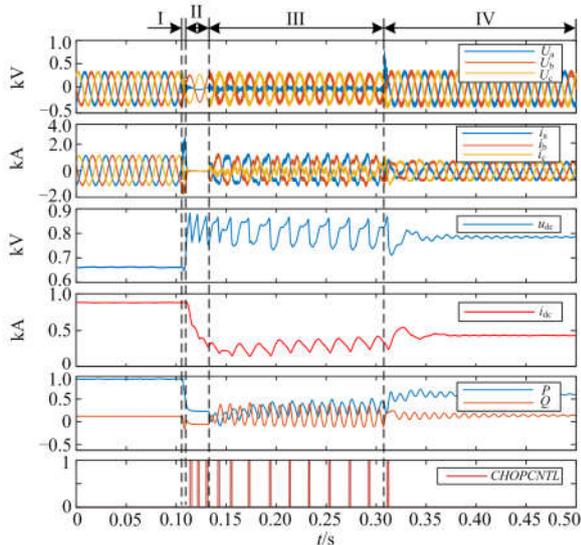


图 8 CA 两相故障时光伏主要电气量暂态波形
Fig. 8 Transient waveform of main electrical quantity of photovoltaic generator in CA two-phase fault

的波动。因此，电压外环输出的 *d* 轴有功参考电流 i_{gd}^* 也随之波动。从而导致有功、无功的输出均存在较大的波动。此外，由于 chopper 的投切策略是保证直流母线电压不高于保护允许值，因此直流母线电压的波动与 chopper 的动作也存在对应关系。

单相故障：故障类型为 A 相接地故障，故障位置设置在线路 1 的中点，故障触发角度为 A 相 45°，故障过渡电阻为 1 Ω，故障持续时间 200 ms。

由图 9 可以看出，在小电流故障情况下，故障时刻的电压暂态过程对于光伏的输出无影响。故障持续过程中，光伏运行输出正常，小电流故障对于光伏的工作不构成影响。

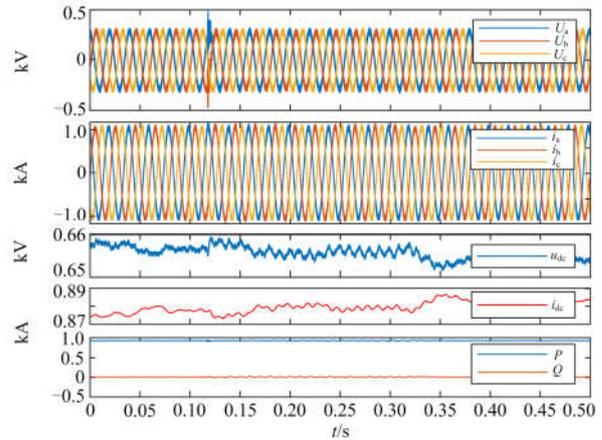


图 9 小电流故障光伏主要电气量波形
Fig. 9 Photovoltaic main electrical quantity waveform of small current fault

3.3 三相不平衡下的光伏电源特性分析

在实际运行中，当电网三相电压不平衡时，基于电网电压定向的坐标变换将引入不平衡分量的影响。由于流过光伏系统的不平衡电流只包含负序分量，因此式(1)中直流侧电压模型的表达式为

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} S_{dq+}^+ \\ S_{dq-}^- \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{gdq+}^+ & i_{gdq-}^- e^{j2\omega t} \\ i_{gdq-}^- & i_{gdq+}^+ e^{-j2\omega t} \end{bmatrix} - i_{load} \quad (9)$$

式中：上标“+/-”符号表示正负序同步旋转坐标系；下标“+/-”符号表示正负序分量。三相不平衡引起的直流母线电压二次波动即是由式中含 $e^{\pm j2\omega t}$ 的项所引起的^[20]。由于直流母线电压同时作为电压外环的输入参考，从而导致了电流内环 *d* 轴电流输入参考的波动，最终使得并网电流中出现 3 次谐波，并以此相互影响叠加^[21]。

本文所使用的控制器在不平衡度抑制方面采用 PR 控制，该策略不需要正负分离控制，但控制效果受到频率波动的影响。由上文的仿真结果可以看出，

在电网三相电压不平衡高于正常运行允许值(负序不平衡电压 $\leq 4\%$)的情况下以及直流母线电压大幅波动时, 基于该控制策略的光伏系统将会向电网注入一定含量的谐波。图 10 给出了图 8 中光伏并网电流 2~13 次谐波的实时含量分析。由图 10 可以看出, 在 LVRT 过程中, 光伏并网电流以 2 次和 3 次谐波为主, 最大分别达到 16.22% 和 15.96%, 此外 3 至 7 谐波含量也相对较高。在故障发生及恢复时, 系统电压的暂态过程导致光伏并网电流畸变严重。

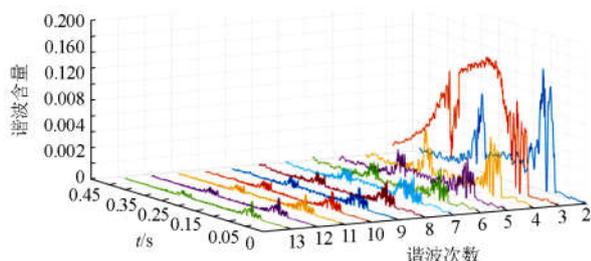


图 10 低电压穿越过程中光伏谐波的含量

Fig. 10 Photovoltaic harmonic content during LVRT

图 11 给出了 CA 相间故障 LVRT 过程中, 并网点电压各不平衡度下电流总谐波畸变率(THD)的变化情况。在正常运行允许的电压不平衡度下, 光伏的输出谐波可以满足要求。但随着电压不平衡度的逐渐升高, 光伏的负序电流抑制效果随之劣化。

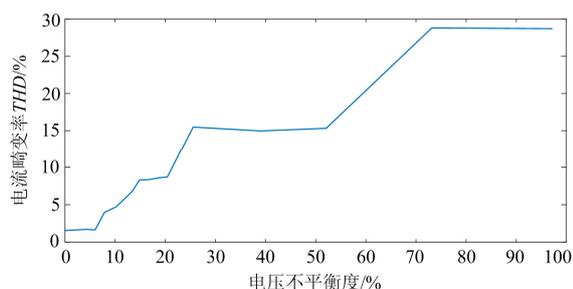


图 11 电压不平衡度与电流畸变率关系图

Fig. 11 Relationship between voltage imbalance and current distortion rate

4 结论

本文通过理论分析及混合仿真研究了具有 LVRT 能力的并网光伏系统的暂态特性, 分析了光伏电源提供短路电流的能力并给出了解析表达式, 全面探讨了光伏电源在故障情况下的输出特性。通过建立基于 RTDS 的控制环混合仿真系统, 验证了基于 LVRT 策略的电磁暂态全过程, 得到如下结论。

1) 与传统同步机电源不同, 光伏电源的暂态过程主要与自身控保策略及并网点的网络参数有关。短路电流幅值大小与 VSC 的运行状态及故障时电

压跌落程度有关。

2) 在并网点电压跌落初期, 短路电流突然增大, 此时系统存在延时以及控制系统的调节时间, 约为 1.5~2 ms, 此阶段的短路电流可以等效为一个 RLC 网络的阶跃响应。

3) 对于单极式光伏而言, 当发生不对称故障光伏进入低电压穿越模式时, 由于光伏电源的全部功率无法送出, 光伏直流母线电压会随之升高, 同时由于负序电流分量的影响, 将产生 2 倍频的波动。卸荷电路动作导致直流母线电压产生波动, 直流母线的电压波动将造成并网交流侧的谐波。

4) 由于在光伏一次电路拓扑中存在负序电流通路。因此, 在不平衡故障期间, 需要通过正负的分离控制来抑制系统的负序分量。基于 PR 谐振策略的不平衡电流抑制不需要对正负序分量进行分离, 减少了算法的计算量, 但是当系统负序电压不平衡度增大时, 其抑制效果将会受到影响。

参考文献

- [1] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfang, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [2] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154.
WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [3] 冯爱成, 王宝华, 单馨. 含光伏电源配电网的自适应距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 141-147.
FENG Aicheng, WANG Baohua, SHAN Xin. Photovoltaic power distribution network in adaptive distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 141-147.
- [4] 高亮, 郎陈杰, 夏能弘. 分布式电源并网条件下配电网继电保护方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 149-155.
GAO Liang, LANG Chenjie, XIA Nenghong. Design of relay protection scheme of distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 149-155.
- [5] 刘健, 林涛, 同向前, 等. 分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2080-2085.

- LIU Jian, LIN Tao, TONG Xiangqian, et al. Simulation analysis on influences of distributed photovoltaic generation on short-circuit current in distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2080-2085.
- [6] 刘健, 林涛, 李龙, 等. 分布式光伏接入情况下配电自动化系统的适应性[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 7-12.
- LIU Jian, LIN Tao, LI Long, et al. Adaptability of distribution automation systems to photovoltaic installation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 7-12.
- [7] 吴争荣, 王钢, 李海峰, 等. 计及逆变型分布式电源控制特性的配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 92-96, 108.
- WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Fault characteristics analysis of distribution networks considering control scheme of inverter interfaced distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 92-96, 108.
- [8] 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, 13.
- 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, 13.
- [9] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.
- PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [10] 毕天姝, 刘素梅, 薛安成, 等. 逆变型新能源电源故障暂态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 165-171.
- BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault characteristics of inverter-interfaced renewable energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 165-171.
- [11] PLET C A, GRAOVAC M, GREEN T C, et al. Fault response of grid-connected inverter dominated networks[C] // IEEE PES General Meeting, July 25-29, 2010, Providence, RI, USA: 1-8.
- [12] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
- SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [13] 徐丙垠, 李天友, 薛永瑞, 等. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [14] 刘健, 同向前, 张小庆, 等. 配电网继电保护与故障处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [15] 陈新, 张旸, 王赞程. 基于阻抗分析法研究光伏并网逆变器与电网的动态交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4559-4567.
- CHEN Xin, ZHANG Yang, WANG Yuncheng. A study of dynamic interaction between PV grid-connected inverters and grid based on the impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4559-4567.
- [16] BACHA S, MUNTEANU I, BRARCU A I. Power electronic converters modeling and control[M]. London: Springer, 2014.
- [17] NIMPITIWAN N, HEYDT G T, AYYANAR R, et al. Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 634-641.
- [18] 分布式电源接入配电网技术规定: NB/T 32015—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- Technical rule for distributed resources connected to distribution network: NB/T 32015—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [19] 赵紫龙, 吴维宁, 王伟. 电网不对称故障下直驱风电机组低电压穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 87-91.
- ZHAO Zilong, WU Weining, WANG Wei. A low voltage ride through technology for direct-drive wind turbines under unbalanced voltage dips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 87-91.
- [20] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [21] 丁杰. 电网不平衡条件下 LCL-VSR 控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- DING Jie. Control schemes for LCL-VSR under unbalanced supply voltage conditions[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011.

收稿日期: 2018-12-31; 修回日期: 2019-02-17

作者简介:

邵庆祝(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护技术; E-mail: shqzuser@163.com

杨畅(1996—), 男, 通信作者, 学士, 研究方向为光伏的接入与控制。E-mail: yangchang1996@yeah.net

(编辑 许威)