

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210095

计及发电单元故障特性差异的光伏电站短路电流计算模型

韩伟¹, 刘素梅², 肖超¹, 刘尧¹, 宋闯¹, 王泽彭²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 光伏电站占比持续增加使电网故障特性发生根本性改变, 电网保护整定计算中电源仍采用电压源串联电抗的传统短路计算模型已不再适用, 如何建立可刻画实际光伏电站故障特征的短路计算模型具有重要意义。为此, 通过揭示场站内光伏发电单元故障行为特性差异规律, 探明了主导发电单元短路电流贡献迥异的主导因素, 提出了基于暂态运行控制模式差异性的发电单元分群方法, 进一步推导给出了适用于对称与不对称故障的光伏电站统一短路电流计算模型。最终, 结合实际光伏电站运行数据, 对比分析短路电流模型理论计算结果与详细电磁暂态仿真试验结果, 验证了所推导模型的正确性。研究结果能为含光伏电站电网保护整定计算提供模型支撑。

关键词: 光伏电站; 故障电流计算; 故障特性差异; 故障分析; 整定计算

Steady short-circuit calculation model for a photovoltaic station considering different generation units' fault characteristics

HAN Wei¹, LIU Sumei², XIAO Chao¹, LIU Yao¹, SONG Chuang¹, WANG Zepeng²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the increasing penetration of PV stations, the connected grid's fault characteristics are fundamentally changed. As a result, the equivalent model (both voltage source and reactance that are connected in series) of traditional generators cannot be applied for calculating the protection settings of a power grid with large-scale PV stations. It is of great significance to build the fault current calculation model of PV stations based on their fault characteristics. In this paper, the difference algorithms of different generation units' fault characteristics are revealed in the PV stations. The main factors influencing the fault current contribution difference of the generation units are explored. A clustering method is proposed on the basis of the difference algorithms of the generation units' transient control modes. Further, a unified model for calculating the current contribution from a PV station is deduced under symmetrical and asymmetrical faults. Finally, using practical PV stations' operating data, both theoretical analysis calculation results and PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation results are compared and analyzed. These results verify the correctness of the proposed fault current calculation model. The research will provide support for studying the protection setting calculation of power grid with PV station.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 52170221000U) and the Science and Technology Project of Henan Electric Power Company (No. SGHADK00DWJS2000186).

Key words: photo-voltaic station; fault current calculation; fault characteristics difference; fault analysis; setting calculation

0 引言

近年来, 随着越来越多光伏电站相继投运, 其

在电网中渗透率越来越高, 使得电网故障特性发生根本性改变, 已有电力系统故障分析计算方法将不再适用^[1-3]。然而, 实际通常忽略光伏电站的影响或将光伏电站视为同步发电机处理, 导致所得故障分析计算结果与实际电网故障特征存在较大出入^[4-6]。如何建立可刻画实际发电单元集群系统故障特征的

基金项目: 国网总部科技项目资助(52170221000U); 河南省电力公司科技项目资助(SGHADK00DWJS2000186)

光伏电站短路计算模型成为当前电力系统领域面临的关键问题之一^[7]。

通过建立每个光伏电池发电单元及所接集电系统电磁暂态模型,获得的光伏电站详细模型,可全面准确地反映光伏电站故障暂态特性^[8]。但是,详细模型过于复杂,并不适用于电力系统故障分析与计算。目前多数研究基于光伏电站内所有发电单元故障特性基本一致的假设,分析发电单元故障穿越控制响应特性基础上,基于单一光伏发电单元故障暂态特性建立整个光伏电站的短路计算模型^[9-12]。而实际上,由于受光照度、故障后电压跌落程度等影响,站内不同空间处光伏发电单元的故障特性存在差异^[13-14]。这会导致现有光伏电站短路计算模型无法真实反映实际系统短路电流变化特性。

了解站内不同光伏发电单元故障特性差异规律是研究光伏电站短路计算模型的基础。然而,目前多数文献^[15-19]仍集中于分析光伏发电单元在不同故障阶段的暂态行为特性,进一步揭示其主要影响因素。光伏发电单元本身故障行为特性差异规律与光伏电站内不同空间位置处发电单元故障暂态特性差异规律相比存在较大差别。但是,目前有关站内不同光伏发电单元故障特性差异规律及其表征方法的研究较少。

实际上,因站内不同空间位置处光伏发电单元并网逆变器控保系统暂态响应不同,各单元故障特性存在差异^[20-21]。从电网故障分析计算角度看,由于场站内光伏发电单元并网逆变器控保系统暂态响应特性是未知的,给计及不同发电单元故障特性差异的光伏电站故障分析计算模型研究带来一定难度。

为此,本文通过揭示站内光伏发电单元故障特性差异规律,利用故障分析已知量对故障特性差异规律进行表征,从而提出光伏电站内发电单元分群方法,进一步推导建立适用于对称与不对称故障的光伏电站统一短路电流计算模型,最终结合实际现场运行数据,通过仿真实验与理论计算分析对所建立模型进行了验证。

1 站内发电单元故障特性差异规律分析

揭示光伏电站内不同发电单元故障特性差异规律是研究建立光伏电站短路电流计算模型的基础。这里首先分析不同故障场景下光伏发电单元的暂态行为特性。光伏发电单元的典型拓扑结构如图1所示,发电单元先经过DC/DC斩波器进行电压变换,之后利用逆变器将其与电网相连。

图1中DC/AC逆变器能对光伏发电单元本身与电网起到有效隔离解耦作用。不同故障场景下,

光伏发电单元故障暂态行为特性主要由逆变器控制保护系统的响应特性决定。任意故障下,逆变器交直流侧电压、电流以及功率之间关系式为

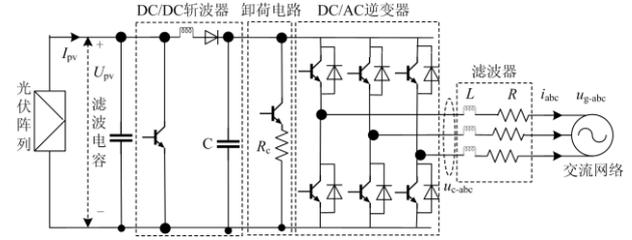


图1 光伏发电单元典型拓扑结构

Fig. 1 Typical topology of photo-voltaic power generation unit

$$\begin{cases} \mathbf{U}_g^p = \mathbf{R}\mathbf{I}^p + L\frac{d\mathbf{I}^p}{dt} + j\omega_g L\mathbf{I}^p + \mathbf{U}_c^p \\ \mathbf{U}_g^n = \mathbf{R}\mathbf{I}^n + L\frac{d\mathbf{I}^n}{dt} - j\omega_g L\mathbf{I}^n + \mathbf{U}_c^n \\ U_{dc}C\frac{dU_{dc}}{dt} = P_{pv} - P_g \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{U}_g^p 和 \mathbf{U}_g^n 为光伏发电单元并网点正序、负序电压矢量; \mathbf{U}_c^p 和 \mathbf{U}_c^n 为逆变器出口处正序、负序交流电压矢量; \mathbf{I}^p 和 \mathbf{I}^n 为流过逆变器的正序、负序交流电流矢量; \mathbf{R} 为考虑开关器件死区效应、滤波电感上等值电阻的综合等值电阻; L 为滤波器等值电感; ω_g 为电网角频率; P_{pv} 表示光伏发电单元输出到逆变器直流侧的功率,其大小主要由光照强度决定; P_g 为经逆变器送入电网的有功功率; U_{dc} 为直流电压; C 为直流电容。

式(1)中 \mathbf{U}_c^p 和 \mathbf{U}_c^n 主要由逆变器的控制回路决定,控制回路由直流电压外环和交流电流内环构成。其中,直流电压外环的输出为内环电流PI控制器(控制逆变器交流侧正序有功电流分量)提供参考输入,电流内环多采用双DQ控制。对应控制方程为

$$\begin{cases} \mathbf{U}_c^{p*} = -(k_{ip} + k_{ii}/s)(\mathbf{I}^{p*} - \mathbf{I}^p) + \mathbf{U}_g^p - j\omega_g L\mathbf{I}^p \\ \mathbf{U}_c^{n*} = -(k_{ip} + k_{ii}/s)(\mathbf{I}^{n*} - \mathbf{I}^n) + \mathbf{U}_g^n + j\omega_g L\mathbf{I}^n \\ i_d^{p*} = (k_{vp} + k_{vi}/s)(U_{dc}^* - U_{dc}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{I}^{p*} 、 \mathbf{I}^{n*} 为逆变器正序、负序交流电流的参考值,为了确保对称与不对称故障期间光伏发电单元始终仅输出正序电流,所以通常设置 $\mathbf{I}^{n*} = i_d^{n*} + j i_q^{n*} = 0 + j0$; U_{dc}^* 为直流电压参考值; k_{ip} 、 k_{ii} 、 k_{vp} 、 k_{vi} 分别为电流环、电压环PI控制器的比例、积分增益; $-j\omega_g L\mathbf{I}^p$ 和 $j\omega_g L\mathbf{I}^n$ 为电流内环控制回路的前馈解耦项,以实现 d 轴和 q 轴电流分量解耦控制。另外,按照我国光伏电池故障穿越运行期间向电网提供无功功率支撑的要求^[22-23],逆变器交流侧正序无功电流分量应为

$$i_q^{p*} = 1.5(0.9 - \gamma)I_N \quad 0.2 \text{ p.u.} \leq \gamma \leq 0.9 \text{ p.u.} \quad (3)$$

式中: $\gamma = |U_g^p|/U_{gN}$ 为光伏发电单元并网点正序电压跌落系数, U_{gN} 为光伏电池并网点额定电压; I_N 为流过逆变器的额定电流。

结合式(1)一式(3)可知, 电网短路故障下, 并网点电压 U_g ($U_g = U_g^p e^{j\omega_g t} + U_g^n e^{-j\omega_g t}$) 迅速改变, 但逆变器出口处电压 U_c 并不随之迅速改变, 导致流过滤波器的电流快速增大, 该电流极有可能超出逆变器最大允许电流值(尤其在不对称故障情况下)。此情况下, 逆变器控制回路中电流限幅环节发生作用, 流过逆变器的实际电流受限, 等于其最大允许电流值。

另外, 若逆变器输出电流受限或者该电流增大的速率小于并网点电压减小的速率时, 逆变器送出到电网的功率 P_g 将减小。光伏发电单元输入到逆变器直流侧的功率变化速率大于交流侧功率变化速率, 导致交直流侧功率不平衡, 直流电压将以较快速度上升。为同时保障故障期间直流电压维持在允许范围之内, 直流卸荷电路会投入, 实现平衡逆变器交直流侧功率。

通过上述分析可知, 不同故障场景下光伏发电单元的暂态行为特性有所不同, 可看作由两个环节综合作用形成: 1) 故障暂态运行控制模式, 它主要由控制/保护策略的动作时序决定。任意故障下光伏发电单元的运行控制模式包括仅逆变器持续控制、故障期间电流限幅环节与卸荷电路投入两种。2) 确定暂态运行控制模式下多时间尺度的暂态响应过程, 它主要受发电单元运行控制参数影响, 对于运行控制参数不同的发电单元来说, 即使处于相同暂态运行控制模式, 所呈现的故障暂态特性存在差异。如逆变器持续控制模式下, 光伏发电单元故障暂态特性由不同带宽的直流电压和交流电流控制回路主导, 这些回路的控制参数直接影响发电单元暂态响应特性。

本文拟着重面向整定计算需求, 开展光伏电站短路计算模型研究, 由于整定计算对象多为后备保护, 后备保护动作时间通常为故障后 0.3 s 及以上, 而在电网故障穿越要求约束下, 故障 0.3 s 后光伏发电单元故障响应过程基本达到稳定。然而, 光伏发电单元故障稳态电流与其故障暂态运行控制模式紧密相关, 而与确定暂态运行控制模式下多时间尺度的暂态响应过程弱相关。以下将通过揭示不同故障场景下光伏电站内发电单元暂态运行控制模式差异规律, 建立光伏电站短路电流计算模型。

2 光伏电站内发电单元分群方法

实际光伏电站由多个发电单元组成, 发电单元首先经电缆(或架空线路)汇集后接入汇集母线, 之后经架空线路接入升压变电站。站内发电单元在空间位置上不规则分散分布, 它们感受到的故障电压与光照度等均存在一定差异, 导致故障期间站内发电单元的暂态运行控制模式复杂多变。基于暂态运行控制模式差异规律研究站内发电单元分群方法, 是推导建立光伏电站短路电流计算模型的基础。

结合前述分析可知, 故障暂态运行控制模式主要由逆变器控制/保护策略的动作时序决定。而从电网故障分析整定计算角度看, 站内光伏发电单元暂态运行控制模式的差异性与电流限幅环节是否发生作用直接相关。

任意对称与不对称故障下, 因站内光伏发电单元始终仅输出正序电流, 所以第 i 个光伏发电单元输出到电网的平均有功和无功功率表达式为(逆变器通常采用电网电压定向于 d 轴的矢量控制策略)

$$\begin{cases} P_{g-i}^0 = \frac{3}{2} u_{gd-i}^p i_{d-i}^p \\ Q_{g-i}^0 = \frac{3}{2} u_{gd-i}^p i_{q-i}^p \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{g-i}^0 、 Q_{g-i}^0 分别表示第 i 个光伏发电单元输出的平均有功与无功功率分量, 根据现有低电穿越规范, 光伏发电单元的无功功率支撑要求与其并网点的电压跌落程度直接相关; u_{gd-i}^p 表示第 i 个光伏发电单元并网点正序电压的 d 轴分量; i_{d-i}^p 、 i_{q-i}^p 分别表示光伏发电单元提供的正序电流的 d 轴与 q 轴分量。通过整理式(4), 可以得到

$$\sqrt{(i_{d-i}^p)^2 + (i_{q-i}^p)^2} = \frac{\sqrt{(P_{g-i}^0)^2 + (Q_{g-i}^0)^2}}{\sqrt{(u_{gd-i}^p)^2}} = \frac{S_{g-i}^0}{\gamma_i U_{gN-i}} \quad (5)$$

式中, $S_{g-i}^0 = \sqrt{(P_{g-i}^0)^2 + (Q_{g-i}^0)^2}$ 为故障期间第 i 个光伏发电单元向电网提供的平均视在功率。结合式(1)和式(3), 故障下直流卸荷电路与电流限幅环节尚未发生作用情况下, 第 i 个光伏发电单元向电网提供的平均有功与无功功率分量还可表示为

$$\begin{cases} P_{g-i}^0 = P_{pv-i} \\ Q_{g-i}^0 = (2.25(0.9 - \gamma_i)\gamma_i U_{gN-i} I_{N-i})/\sqrt{3} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6), 可得到光伏电站内不同发电单元电流限幅环节作用与否的判据为

$$\begin{cases} \alpha_i = 0 & I_{\text{lim-}i} - \sqrt{P_{\text{pv-}i}^2 + 0.56((0.9\gamma_i - \gamma_i^2)S_{\text{gN-}i})^2} / \gamma_i U_{\text{gN-}i} > 0 \\ \alpha_i = 1 & I_{\text{lim-}i} - \sqrt{P_{\text{pv-}i}^2 + 0.56((0.9\gamma_i - \gamma_i^2)S_{\text{gN-}i})^2} / \gamma_i U_{\text{gN-}i} \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\alpha_i = 0$ 表示第 i 个光伏发电单元的电流限幅环节不发生作用, $\alpha_i = 1$ 表示发生作用。

站内发电单元分群时, 首先根据当地典型夏日或冬日的光照度变化规律, 确定出光伏发电单元输出功率 $P_{\text{pv-}i}$, 结合式(3)和式(5), 利用式(9)对站内光伏发电单元进行等值。

$$I_{\text{fi}} = \begin{cases} \sqrt{P_{\text{pv-}i}^2 + 0.56((0.9\gamma_i - \gamma_i^2)S_{\text{gN-}i})^2} / \gamma_i U_{\text{gN-}i} & \alpha_i = 0 \\ I_{\text{lim-}i} & \alpha_i = 1 \end{cases} \quad (8)$$

利用式(8), 光伏电站输出电流为零时, 设定并网点故障电压值初始值, 对含光伏电站的实际电力系统进行反复迭代计算, 在设置的计算精度下得到站内每个光伏发电单元并网点电压的跌落系数。从而结合式(7)实现对光伏电站内发电单元进行分群, 具体分群算法流程如图2所示。

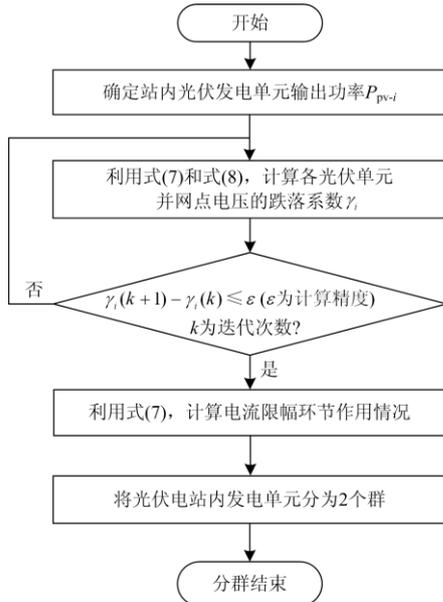


图2 光伏电站内发电单元分群算法流程图

Fig. 2 Flow chart for dividing into power generation units installed in a PV station

对于故障分析与继电保护整定计算研究来说, 光照度(与 $P_{\text{pv-}i}$ 直接相关)、并网点正序故障电压均为已知量, 前述分群方法将它们作为分群指标, 一定程度上避开了实际电网故障分析计算时逆变器暂态控制响应特性无法获知的难题, 为建立光伏电站短路电流计算模型提供了可能。

3 光伏电站故障电流计算模型

假设光伏电站内共 n 个 PV 发电单元, 利用前述分群方法对发电单元进行分群后, 发电单元可分为 2 个群, 其中一个群中包含 m 个光伏发电单元(电流限幅环节均发生作用), 另一群包含剩余 $n-m$ 个发电单元(电流限幅环节尚未发生作用)。根据该分群结果, 结合式(8)可得到对称和不对称故障下光伏电站的统一短路电流计算模型。

$$I_f = \sum_{i=1}^{n-m} \sqrt{P_{\text{pv-}i}^2 + 0.56((0.9\gamma_i - \gamma_i^2)S_{\text{gN-}i})^2} / \gamma_i U_{\text{gN-}i} + \sum_{h=1}^m I_{\text{lim-}h} \quad (9)$$

式中, 电流限幅值 $I_{\text{lim-}h}$ 、额定视在功率 $S_{\text{gN-}i}$ 和额定电压 $U_{\text{gN-}i}$ 均由站内发电单元的型号决定, 发电单元型号一致情况下, 这些变量的取值是相同的, 它们通常可以从相应型号的说明书中获取。光伏发电单元提供的功率 $P_{\text{pv-}i}$ 主要跟光照度有关, 若光伏电站所处地形条件较平坦, 不考虑云遮挡情况可认为站内发电单元感受到的光照度是相同的, 即站内所有发电单元的 $P_{\text{pv-}i}$ 是相同的, 其可根据光伏电站当地典型夏日或冬日的光照度变化规律确定。并网点处电压跌落系数 γ_i 主要由站内发电单元的空间电气分布距离(拓扑结构)决定, 其取值可在前述分群方法中得到。

分析式(9)发现, 站内发电单元型号已知的情况下, 本文所提对称与不对称短路电流计算模型主要与光照度、发电单元感受到的正序电压跌落系数有关, 而这些量在电网故障分析继电保护相关研究中通常为已知量, 这可有效避免逆变器暂态控制响应特性未知带来的难题。

另外, 现有研究均简单地将光伏电站视为恒流源(电流大小由逆变器电流限幅值决定)或者受控电流源(电流大小由光伏输出功率和并网点电压跌落程度决定), 这并不能够真实反映电网故障下光伏电站实际短路电流的变化规律。相比之下, 本文所提光伏电站短路电流计算模型考虑了站内不同空间位置发电单元处于不同暂态运行控制模式的差异性, 可更为准确地反映电网对称与不对称故障下光伏电站的短路电流变化特性。

4 模型验证

为了验证本文所提稳态短路电流计算模型的正确性, 结合河南省某光伏电站的运行数据, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建如图3所示的含光伏电站电网

的详细电磁暂态模型。同时, 基于 Matlab 编写了相应的故障分析计算程序, 将所得计算结果与详细电磁暂态模型的试验结果进行对比分析。

图 3 中包含 2 条汇集母线, 汇集母线通过架空线路接入 10 kV/110 kV 升压站(变压器型号为 SZ11-40000/110), 每条汇集母线(10 kV)上接有 4 条汇集电缆, 每条汇集电缆上接有 8 个光伏发电单元, 每个光伏发电单元容量为 0.5 MW。汇集电缆的型号为 ZR-YJV22-10/3×400, 相邻光伏发电单元之间距离为 0.5 km。架空线路的型号为 JKLYJ-10-120, 长度为 10 km。系统在最大运行方式下的等值阻抗为 $j0.287 \Omega$, 最小运行方式下的等值阻抗为 $j0.351 \Omega$ 。

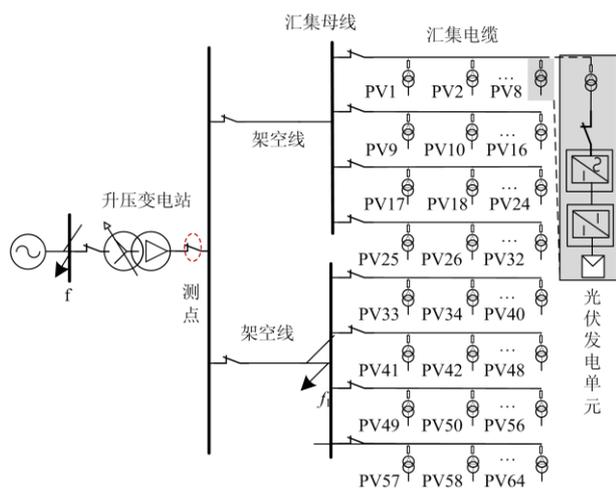


图 3 含光伏电站的电网拓扑结构

Fig. 3 Topology of power grid with PV station

4.1 分群方法验证

光伏电站内所有发电单元型号一致, 且假设输出功率均为 0.8 p.u., $t = 0.5$ s 时在 f 处(升压变压器高压侧母线处)发生两相接地短路故障, 表 1 为分别基于 PSCAD 电磁仿真数据和基于所提分群方法 Matlab 理论计算得到的分群结果。

表 1 光伏电站分群 PSCAD 试验结果与 Matlab 计算结果
Table 1 PV station clustering results based on the PSCAD test and the Matlab calculation

	群1(限幅环节作用)	群2(限幅环节未作用)
PSCAD 试验结果	PV25-PV64, PV1-PV4, PV9-PV12, PV17-PV20	PV5-PV8, PV13-PV16, PV21-PV24
Matlab 计算结果	PV25-PV64, PV1-PV3, PV9-PV11, PV17-PV19	PV4-PV8, PV12-PV16, PV20-PV24

由表 1 可知, 本文所提分群方法得到的分群结果与根据光伏电站电磁暂态仿真运行数据得到分群结果基本一致, 仅发电单元 PV4、PV12、PV20 的

分群结果存在差异, 这是由于在前述故障场景下这些发电单元的暂态运行模式处于电流限幅环节发生作用与未发生作用的边界区域, 而利用 Matlab 进行分群理论计算过程中不可避免地会有数据近似计算。

图 4 所示为基于 PSCAD 的光伏电站短路电流瞬时值变化曲线(图 3 中测点处)与利用本文所提短路电流计算模型得到的短路电流幅值曲线。从图中可以看出, 光伏发电单元馈出的稳态故障电流幅值的理论计算结果与试验结果基本一致。在故障稳态阶段, 因基于 PSCAD 的光伏电站短路电流变化曲线中包含一些高次谐波量, 使得其与利用本文所提短路电流计算模型得到的短路电流幅值相比有一定误差。在忽略高次谐波影响下, 试验值与理论计算之间误差仅为 3.1% 左右。

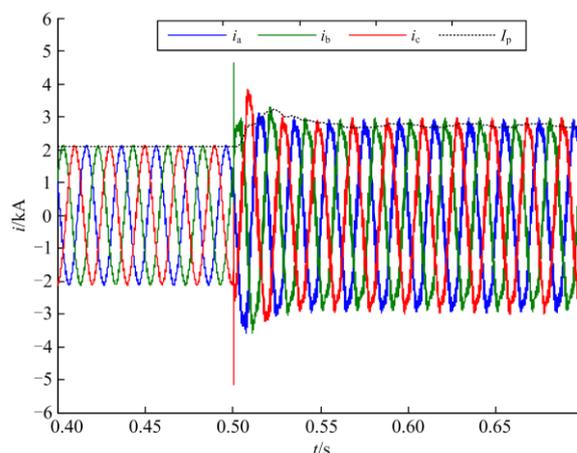


图 4 光伏电站短路电流瞬时值与幅值变化曲线

Fig. 4 Tested instantaneous values and theoretical peak values of short-circuit current provided by PV station

4.2 光伏电站短路电流验证

假设 $t = 0.5$ s 时升压变电站高压母线 f 处发生三相短路和两相相间短路, 站内光伏发电单元工作于不同功率输出情况下, 对比分析由本文推导的短路电流计算模型得到的理论计算值与基于 PSCAD 详细电磁暂态模型得到的试验值, 相应数据结果如表 2 所示。

通过对比可以发现, 当站内发电单元输出功率均为 0.9 p.u. 时, 故障期间所有发电单元的电流限幅环节均发生作用, 本文所提光伏电站稳态短路电流计算模型、传统恒流源模型的理论计算结果与电磁暂态仿真试验结果之间的误差较小, 最大误差仅为 -4.17%; 而在其他功率输出情况下, 由于站内发电单元的电流限幅环节并未全部发生作用, 传统恒流源模型得到的理论计算结果与光伏电站短路电流试验值相比存在较大误差, 最大达到了 56.52%, 而由

本文所提短路电流计算模型得到的理论计算结果的相对误差相对较小, 相对误差在±5%范围内, 这表明本文所提短路电流计算模型通过考虑发电单元暂

态运行控制模式的差异性, 能够精确体现光伏电站的稳态短路电流变化特性。

表 2 不同功率情况下光伏电站馈出的短路电流试验值与计算值

Table 2 Experimental test value and theoretical calculation value of the short-circuit current provided by PV station under different power outputs

结果	PV1—PV64 输出功率		PV1—PV32、PV33—PV64 输出功率		PV1—PV32、PV33—PV64 输出功率	
	0.9 p.u.		分别为 0.5 p.u.、0.6 p.u.		分别为 0.9 p.u.、0.7 p.u.	
	$I_f^{(3)}$	$I_f^{(2)}$	$I_f^{(3)}$	$I_f^{(2)}$	$I_f^{(3)}$	$I_f^{(2)}$
试验结果	5.57 kA	5.52 kA	4.72 kA	3.68 kA	5.02 kA	5.06 kA
本文所提模型计算结果	5.76 kA	5.29 kA	4.58 kA	3.56 kA	5.19 kA	4.92 kA
本文所提模型相对误差	-3.41%	-4.17%	-2.97%	-3.26%	3.39%	-2.78%
传统恒流源模型计算结果	5.76 kA	5.76 kA	5.76 kA	5.76 kA	5.76 kA	5.76 kA
传统恒流源模型相对误差	-3.41%	-4.35%	22.03%	56.52%	14.74%	13.83%

5 结论

针对基于单一光伏发电单元故障特性的光伏电站短路计算模型所存在的问题, 本文首先详细分析了影响站内光伏发电单元故障暂态行为特性差异的主要因素, 从电网故障分析计算角度揭示了站内不同空间位置处光伏发电单元稳态短路电流差异性, 主要与故障暂态运行控制模式(即并网逆变器电流限幅环节作用与否)有关, 结合故障下逆变器电流限幅环节的作用机理, 利用光伏发电单元输出功率和并网点正序故障电压, 表征了光伏电站内不同发电单元故障暂态运行控制模式的差异性。

在此基础上, 提出基于故障暂态运行控制模式差异性的光伏发电单元分群方法, 从而推导出适用于对称与不对称故障的光伏电站故障稳态电流计算模型。经试验验证, 所推导模型理论计算相对误差在±5%范围内。研究结论表明: 所建立模型可全面表征光伏电站的实际故障电流变化特征, 为光伏电站接入电网保护整定计算研究提供模型支撑。

参考文献

[1] 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.

[2] 龚永智, 陶晔, 许传敏, 等. 考虑风电机组馈入电流的风电场汇集线路保护整定计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 128-135.
GONG Yongzhi, TAO Ye, XU Chuanmin, et al. Relay protection setting calculation of wind farm collector lines

considering wind turbine increased short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 128-135.

[3] HE J H, LIU L, DING F F, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.

[4] JONES K W, POURBEIK P, KOBET G, et al. Impact of inverter based generation on bulk power system dynamics and short-circuit performance[R]. New York: IEEE PES Industry Technical Support Task Force, 2018.

[5] GUO W M, MU L H, ZHANG X. Fault models of inverter-interfaced distributed generators within a low-voltage microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 453-461.

[6] MAHAMED B, FLETCHER J E. The equivalent models of grid-forming inverters in the sequence domain for the steady-state analysis of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2876-2887.

[7] MAHAMED B, FLETCHER J E. Trends in the protection of inverter-based microgrids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(20): 4511-4522.

[8] 潘学萍, 张源, 鞠平, 等. 太阳能光伏电站等效建模[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1173-1178.
PAN Xueping, ZHANG Yuan, JU Ping, et al. Equivalent modeling for photovoltaic power station[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1173-1178.

[9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王同文, 徐靖东, 邵庆祝, 等. 光伏发电系统非计划孤岛问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 173-180.
- WANG Tongwen, XU Jingdong, SHAO Qingzhu, et al. Research on non-scheduled islanding supplied by photovoltaic power generations[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 173-180.
- [12] CARPINELLI G, BRACALE A, CARAMIA P, et al. Three-phase photovoltaic generators modeling in unbalanced short-circuit operating conditions[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 113: 941-951.
- [13] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.
- HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.
- [14] 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 distribution network considering LVRT control strategy of grid-connected photovoltaic station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 92-99.
- [15] 黄涛, 王胜利, 谢华, 等. 光伏逆变器短路电流 3 次谐波及其对保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 99-108.
- HUANG Tao, WANG Shengli, XIE Hua, et al. Analysis of third harmonic current of photovoltaic inverter and its influence on protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 99-108.
- [16] 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.
- [17] HAJ-AHMED M A, ILLINDALA M S. The influence of inverter-based DGs and their controllers on distribution network protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2928-2937.
- [18] ABDEL-KHALIK A S, ELSEROUGI A A, MASSOUD A M, et al. Fault current contribution of medium voltage inverter and doubly-fed induction-machine-based flywheel energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 4(1): 58-67.
- [19] OON K H, TAN C, BAKAR A H A, et al. Establishment of fault current characteristics for solar photovoltaic generator considering low voltage ride through and reactive current injection requirement[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 92: 478-488.
- [20] 邵庆祝, 杨畅, 谢民, 等. 基于 RTDS 的光伏接入配电网故障特征研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 1-8.
- SHAO Qingzhu, YANG Chang, XIE Min, et al. Research on fault characteristics of distributed photovoltaic system in distributed network based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 1-8.
- [21] 刘慧媛, 肖繁, 张哲, 等. 新能源电源接入不平衡配电网的短路计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 177-189.
- LIU Huiyuan, XIAO Fan, ZHANG Zhe, et al. Short-circuit calculation method for unbalanced distribution network with integration of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 177-189.
- [22] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 2012.
- [23] SHAH P, SINGH B. Low-voltage ride-through operation of grid interfaced solar PV system enabling harmonic compensation capabilities[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(12): 2100-2113.

收稿日期: 2021-01-23; 修回日期: 2021-05-13

作者简介:

韩伟(1975—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 1976628@qq.com

刘素梅(1981—), 女, 通信作者, 副教授, 主要研究方向为新能源电力系统控制与保护; E-mail: smliu@bjfu.edu.cn

肖超(1988—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为高压直流输电系统保护与控制。E-mail: sngcet@163.com

(编辑 许威)