

基于故障串电流反向突变判据的光伏阵列 线间故障保护方案

孙 旻^{1,2}, 曾 伟^{1,2}, 陈 波^{1,2}, 王冠南^{1,2}, 彭春华³, 高 波³

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096;

2. 江西省新能源电力系统运行控制重点实验室, 江西 南昌 330096;

3. 华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:光伏阵列发生线间故障时故障电流较小,过电流保护无法有效清除故障。提出一种基于光伏串输出电流反向突变特性的光伏阵列线间故障保护方案。基于光伏串输出电流-电压曲线定性分析了光伏阵列发生线间故障时输出电压、电流的变化特性,得到光伏阵列线间故障下光伏串输出电流反向减小特征。通过光伏串等效电路模型,建立了光伏串输出电流与光伏串故障电池数量之间的量化关系。以最小故障电池数量的电流突变为阈值,提出了基于故障电流反向突变的保护判据。该保护判据可快速准确地定位光伏阵列中的故障串,且只需要测量光伏串的输出电流信号以及光伏阵列输出的电压信号,保护配合只需要跳闸信号。最后,通过时域仿真以及现场测试有效验证了所建立判据的准确性以及所提出的保护方案的正确性。

关键词:光伏发电;光伏阵列线间故障;故障电流;反向突变;继电保护

中图分类号:TM615;TM77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202308021

0 引言

为应对当前逐渐加剧的能源短缺以及气候变化问题,新能源发电在电力系统中的应用得到了快速发展^[1]。而其中光伏(photovoltaic, PV)发电由于其价格低、易实现等优点被广泛应用在输配电系统中^[2]。光伏阵列中的故障分析是提高光伏发电系统可靠性和安全性的一项基本任务^[3]。若缺乏适当的保护,则光伏阵列中的故障可能会损坏光伏模块和电缆,并导致直流电弧危害甚至火灾隐患。例如,位于加利福尼亚州贝克斯菲尔德的光伏电站由于多点接地故障引起了火灾^[4]。除了接地故障,加利福尼亚州某大型光伏电站的光伏阵列中的线间故障也被报道导致了火灾隐患^[5]。此外,光伏阵列中的故障可能会导致大量能量损失。据统计,在英国的家用光伏系统中,光伏系统故障导致的年度能量损失占比估计高达18.9%^[6]。因此,有效地检测光伏阵列中的故障并设计相应的保护动作方案对于提升光伏发电系统的安全稳定性以及效率具有重要的意义。

光伏阵列通常采用过流保护,通过加装熔丝在保护光伏组件出现过流现象时进行保护^[7-8]。当光

伏阵列发生接地故障时,产生的大电流使得过流保护装置能够有效地动作并断开故障电路。然而,当光伏阵列中出现的故障并非接地故障,而是发生在光伏阵列两点之间的故障,即线间故障时,故障电流较小,导致过流保护无法清除故障^[9-10]。由于故障无法及时清除,可能引发光伏发电站起火、直流电弧等危险事故。因此,工程中需要设计新的保护方案以便有效地切除光伏阵列的线间故障。

目前,关于光伏阵列线间故障检测与保护已有一些研究,主要采用的方法包括能量损失法^[11-12]、 I - V 曲线分析法^[13]、电压-电流波形法^[14]等。能量损失法,如改进的 K 最邻近算法^[11]、过数值统计方法^[12]等的主要原理是通过计算光伏阵列整体输出的能量理论值与实际值的差距来判断其是否发生故障。然而,定义能量变化需要精确的光伏阵列模型以及环境参数,而这些在实际的光伏发电系统中难以获取。 I - V 曲线分析法能够反映光伏阵列发生故障时的电压、电流和功率的变化信息进而诊断光伏阵列中的故障^[13],该方法在光伏阵列故障诊断中具有一定的优势,但直接利用 I - V 曲线进行故障诊断需要逆变器退出运行,影响光伏系统的可靠性。电压-电流波形法是更为直接的一种方法,其利用电压、电流的波形特征进行故障分析,且不受环境参数的影响,但该方法需要明晰光伏阵列中不同故障下的波形特征。上述方法均较为复杂,因此需要一种简单有效的光伏阵列线间故障保护方案。

本文提出一种新的光伏阵列线间故障保护方案:通过光伏阵列的等效电路建立光伏阵列输出电

收稿日期:2022-09-19;修回日期:2023-06-05

在线出版日期:2023-08-25

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5400-202323225A-1-1-ZN);江西省急需紧缺海外人才项目(20223BCJ25031)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China Headquarters(5400-202323225A-1-1-ZN) and Jiangxi Province Urgently Needed Overseas Talent Projects(20223BCJ25031)

流、电压的关系;通过 I - V 曲线定性分析光伏阵列线间故障下电流、电压的变化趋势,由此量化光伏阵列线间故障串的输出电流出现反向突变的判据;基于此判据,设计了一套光伏阵列线间故障保护动作方案,该方案只需测量光伏串输出电流以及光伏阵列输出电压,具有较强的工程实用性。仿真结果验证了本文所提判据和保护方案的有效性。

1 光伏发电系统及光伏阵列线间故障

典型的并网光伏发电系统如附录 A 图 A1 所示,其主要包括光伏阵列、DC / DC 变换器、DC / AC 逆变器、滤波器、电气连接布线和保护装置(如过流保护装置和接地故障保护设备^[15])。光伏电源模块由一定数量的光伏电池板串并联组成,进而形成光伏阵列,光伏阵列输出的直流电压通过 DC / DC 变换器实现升压,从而提供 DC / AC 逆变器的直流侧电容电压。DC / DC 变换器的开关函数由最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)确定^[16]。DC / AC 逆变器通常采用双环控制,即外环控制直流侧电容电压以及逆变器输出的无功功率(通常为 0),内环控制逆变器交流侧输出电流,其中内环控制环节通常采用 dq 控制和比例-积分(proportional integral, PI)控制器。DC / AC 逆变器前端的 LCL 滤波器用于滤除逆变器开关引起的高次谐波。

光伏发电系统中的光伏阵列是模块化且可扩展的,因此可通过逐步构建适应不断增长的电力需求。通常,光伏阵列按比例进行扩展:串联组装 m 个光伏模块以构建光伏组串;然后并行使用 n 个光伏组串构建具有 $m \times n$ 个光伏模块的光伏阵列,如图 A1 所示。

光伏阵列线间故障可以分为串内故障和串间故障 2 类,见附录 A 图 A2。串内故障为同一串光伏电池的线路两点之间短接,见图 A2 中的红色曲线。光伏阵列中发生串内故障时,只有故障串的部分光伏电池被短接,其他串不受影响。串间故障为不同光伏串的线路两点之间短接,见图 A2 中的蓝色曲线。值得注意的是,由于物理距离较近,光伏阵列中的电池模块电气特性基本可视为相同,因此,在不同串的不同电位点发生短接不会造成电压、电流变化。短接的两点必须是不同电位的两点,在此情况下,串间故障会导致至少 2 串光伏电池组件出现异常。

2 基于故障串电流反向突变的判据

光伏阵列(或者光伏串)的等效电路如图 1 所示。图中: I_{ph} 为光伏电池模块受光照产生的电流; I_{vd} 为二极管 V_D 的反向电流; R_{sh} 、 R_s 分别为等效并联、串联电阻; I_{sh} 为等效并联电阻的反向电流; V_{pv} 和 I_{pv} 分别为光伏阵列整体输出的电压、电流。

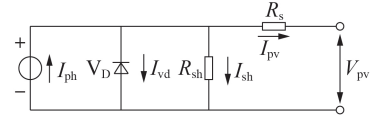


图1 光伏阵列(光伏串)等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit of PV array(PV string)

根据图 1 可以得到光伏阵列输出的电流、电压关系如式(1)所示。

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{vd} - I_{sh} = I_{ph} - I_{vd0} \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{\tau k T N_s / q}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I_{vd0} 为二极管反向的饱和电流; τ 为二极管的理想因子; q 为电子电荷; k 为玻尔兹曼常数; N_s 为串联的光伏电池个数; T 为光伏电池的温度。 R_s 较小而 R_{sh} 较大,故式(1)可以简化为:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{vd0} \left(e^{\frac{V_{pv}}{\tau k T N_s / q}} - 1 \right) \quad (2)$$

由式(2)可得到光伏电池组件输出的功率为:

$$P_{pv} = V_{pv} \left[I_{ph} - I_{vd0} \left(e^{\frac{V_{pv}}{\tau k T N_s / q}} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

根据式(3)可以得到光伏电池组件输出的 I - V 、 P - V 曲线用于分析光伏阵列故障时电流、电压特征。

2.1 光伏阵列串内故障

光伏阵列串内故障会造成串内 1 个或者多个光伏发电模块短接。故障串由于损失部分光伏电池,其开路电压下降。假设在故障的瞬间,光伏阵列的光照、温度等环境因素均不发生变化,则故障串的开路电压变化可以由式(4)表达。

$$V'_{oc} = (N_s - N_f) V_{oc} / N_s \quad (4)$$

式中: V'_{oc} 为故障后故障串 I - V 曲线的开路电压; V_{oc} 为光伏阵列原始的开路电压; N_f 为被短接的电池数量。

由式(4)可看出,当发生串内故障后,故障串的开路电压减小。同时,由于光伏电池块串联,故障串 I - V 曲线的短路电流不变。则光伏阵列发生串内故障时,光伏阵列(串)的 I - V 曲线变化见图 2。图中: V_m 为最大功率点电压;0—3 为被短接的电池数量。由图 2 可知,当发生串内故障但还未检测到故障点前, I - V 曲线下移,由于 MPPT 算法未能检测到故障,由 MPPT 决定的工作点电压故障后短时间内不变化,即电压变化值接近 0,而光伏串发生短接时,其输出的

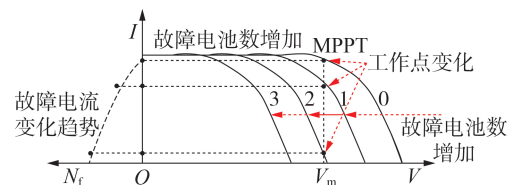


图2 光伏阵列串间故障下的 I - V 曲线变化

Fig.2 Variation of I - V curves under inter-string fault in PV arrays

功率减小,则可知输出的电流减小。被短接的电池数量越多,光伏串的输出电流下降越大。同时,故障发生后较短时间内,环境因素变化较小,光生电流因此几乎不变。因此,根据式(2)可以得到光伏串中 N_f 个电池短接时的输出电流突变量 ΔI_{pv} ,如式(5)所示。

$$\Delta I_{pv} = I_{vd0} e^{\frac{V_{pv}}{\tau k T (N_s - N_f)/q}} - I_{vd0} e^{\frac{V_{pv}}{\tau k T N_s / q}} \quad (5)$$

式(5)中,光伏阵列的最大功率点工作电压可由光照、温度等条件确定,因此根据式(5)可计算出不同数量电池故障时的故障光伏串输出电流变化。按照式(5)计算光伏串中只有1个电池故障(即 $N_f=1$)时的输出电流,即最小的故障电流突变量,并将其设定为整定值 ΔI_{pv_set} ,若电流突变量等于或者超过整定值,则说明有1个或者多个电池被短接,判断光伏阵列出现故障。综上所述,可得到保护判据为:

$$\begin{cases} \Delta I_{pv} \geq \Delta I_{pv_set} \\ |\Delta V_{pv}| \leq 0.005 V_{pv0} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta V_{pv} = V'_{pv} - V_{pv0} \quad (7)$$

式中: ΔV_{pv} 为光伏阵列输出电压变化量;0.005为实际工程中约0.5%的电压测量误差; V_{pv0} 为故障前光伏阵列输出电压; V'_{pv} 为故障发生后的电压值。根据式(8)计算整定值 ΔI_{pv_set} ,当故障电流反向突变超过整定值,且光伏阵列输出电压不变时,保护动作应该跳开故障串开关。

$$\Delta I_{pv_set} = (1 - \alpha) \left(I_{vd0} e^{\frac{V_{pv}}{\tau k T (N_s - 1)/q}} - I_{vd0} e^{\frac{V_{pv}}{\tau k T N_s / q}} \right) \quad (8)$$

式中: α 为保护整定值的裕度,可根据工程实际取为5%~10%。

2.2 光伏阵列串间故障

光伏阵列串间故障与串内故障不同。以图A1中的光伏串1、2之间发生串间故障为例,故障发生后光伏串1、2的开路电压和短路电流均发生变化。为便于说明,现假设光伏串1的最高电位点(图A2中 V_{11} 正电位点)与光伏串2的非最高电位点(图A2中 V_{21} 负电位、 V_{22} 负电位等)短接。短接点电位相差越多,错位短接的电池数量越大。由于光伏串1的高电位点与光伏串2的低电位点短接,因此故障后光伏串1的开路电压减小,光伏串2的开路电压增大。则参照串内故障,光伏串1、2之间发生串间故障时,光伏串1、2的 I - V 曲线如附录A图A3所示。由图可见,光伏串1的电流会减小,而光伏串2的电流会增加。光伏串1的故障特征与串内故障情况下相同,因此其输出电压、电流满足式(6),光伏串1由保护动作切除。实际中光伏串切除两极,则光伏串1的正、负极均被切除,因此在切除光伏串1后,光伏串2将不存在故障回路,其可正常运行。故本文只需关注电流反向突变故障,光伏阵列串间故障判据同式(6)。

3 基于故障串电流反向突变判据的线间故障保护方案

1)在实际工程中,按照式(9)以1 ms的步长迭代计算每串光伏串的突变量。

$$\Delta I_{pv} = I'_{pv} - I_{pv0} \quad (9)$$

式中: I_{pv0} 、 I'_{pv} 分别为故障前、后电流值。

2)由于上述分析中忽略了图A1中等效串联、并联电阻的影响,计算得到的最小电流突变量可能存在误差,因此在实际的保护整定中,可以增加一定的裕度,将式(6)修改为式(10)所示的串内故障判据。

$$\begin{cases} \Delta I_{pv} \geq (1 - \alpha) \Delta I_{pv_set} \\ |\Delta V_{pv}| \leq 0.005 V_{pv0} \end{cases} \quad (10)$$

本文的保护方案以光伏阵列中的光伏串为单元,在光伏组件出现电流反向突变时,保护动作切除故障串,光伏阵列线间故障的保护动作逻辑为:按照式(7)~(9)分别计算各光伏串的输出电压、整定值、电流突变量。若计算结果满足式(10)所示的判据,则保护动作跳开故障串开关。上述光伏阵列线间故障的保护动作逻辑如附录A图A4所示。

4 仿真分析

本章通过Simulink平台仿真验证本文所提光伏阵列线间故障判据和保护动作逻辑。根据图A1的系统结构图搭建10×4光伏阵列的光伏发电系统。系统的主要参数值如附录B表B1所示。

4.1 光伏阵列线间故障特征判据验证

仿真中设置光伏串1中出现串内故障。光伏阵列中串内1个电池模块短接时的电压、电流如图3所示。由图可知,当光伏串内1个电池模块短接时,故障串的电流减小,而非故障串的电流几乎不变,因此光伏阵列整体输出的电流也减小。光伏阵列输出的电压在短接时出现暂态后恢复原来的稳态值,因此在发生部分电池短接后,光伏组件的整体输出稳态

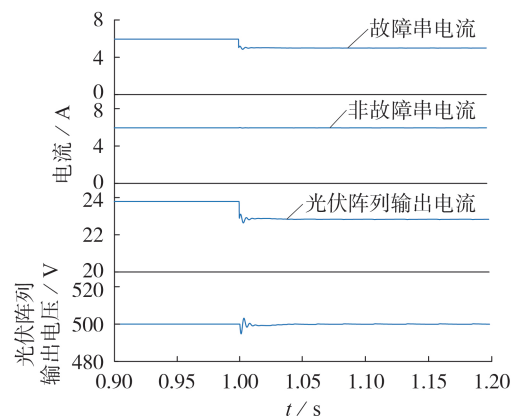


图3 光伏串内1个电池短接时的电压、电流波形

Fig.3 Voltage and current waveforms of PV array with one battery short circuit

电压不变,与第2章所分析的故障后光伏阵列输出电压不变的分析一致。

在仿真中,设定的串间故障是光伏串1的1号电池正电位与光伏串2的1号(形成1个电池错位短接)或者2号电池(形成2个电池错位短接)负电位进行短接。图4给出了在不同光伏串之间出现1个电池错位短接情况的电压、电流波形。由图可知,当只有1个电池错位短接时,光伏串1的电流下降,而光伏串2的电流在故障后上升,光伏组件的整体输出电压稳态值不变。上述结果与第2章分析得到的串间故障特征相符,也验证了串内线间故障与串间线间故障具有相同的特征。

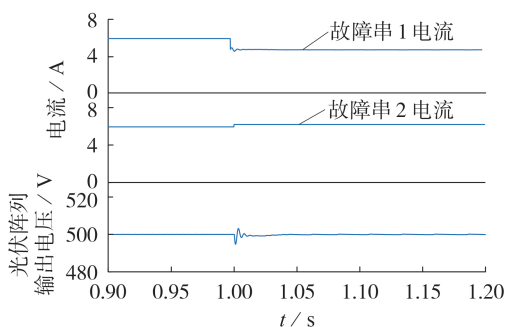


图4 光伏阵列串间1个电池错位短接情况下的电压、电流波形

Fig.4 Voltage and current waveforms of PV array with one battery cross-connected between two PV strings

4.2 保护方案仿真验证

将第3章所提出的保护动作逻辑应用于所仿真的光伏发电系统的串内故障。在仿真时,在光伏串1中设置串内故障,并对1个光伏电池短接进行仿真。当光伏串内出现1个电池短接时,由于保护检测到故障电流下降,保护判断达到动作条件,图5展示了串内1个电池短接情况下的电压、电流波形。由图可知:故障发生后,故障串电流下降;在故障发生后10 ms,保护动作断开故障串(此处保护动作时间考虑3 ms左右暂态过程以及3~5 ms的时间裕度,最终选取为10 ms),而故障串电流变为0。在此过程

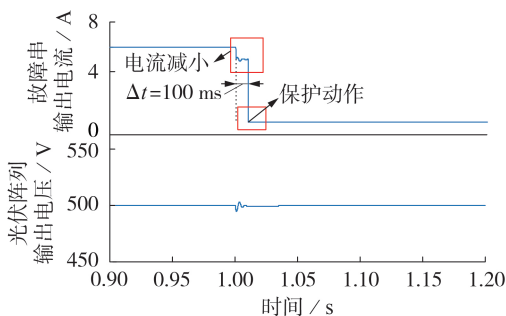


图5 光伏阵列串内故障下的电压、电流波形

Fig.5 Voltage and current waveforms under inner-string fault in PV arrays

中,光伏组件整体输出的电压虽有暂态变化,但其稳态值不受影响。上述分析验证了本文所提保护方案的可行性。

5 现场测试验证

利用江西省电力科学研究院光伏保护实验平台验证前文所述的光伏阵列故障特征。验证所用的光伏阵列由16块光伏电池块组成,可以形成16块电池串联的光伏串。光伏串的输出电流以及输出电压流入到汇流箱,通过录波软件记录电流、电压波形。现场的实验设置如附录B图B1所示。不同数量电池短接时的电流、电压录波附录B图B2所示。由图可知,其故障特征与仿真结果有所不同,即电压、电流暂态过程较短,电压波动非常小,能够满足电压门槛设定的条件。测试结果表明,当光伏电池串中只有1个电池短接时,故障后数毫秒内,电压不变化,而电流由5.167 A下降至4.799 A。当光伏电池串6个电池短接时,故障光伏串的电流由3.189 A下降到0.089 A。实际保护在故障后12 ms发出动作信号。这一结果验证了前文理论分析以及仿真中所得到的电压不变、电流减小的结论的正确性。

6 结论

本文通过数学分析提出了一种基于电流反向突变判据的光伏阵列线间故障保护方案。仿真与现场实验数据验证了故障特征以及保护方案的准确性。本文的主要结论为:当光伏阵列发生线间故障时,故障串的电流不一定增大,而可能减小甚至反向,此类故障电流由于绝对值小而不易被检测,给光伏发电系统的安全稳定造成隐患;光伏阵列发生串内、串间故障时故障串输出的电流、电压判据相同,即故障串的输出电流减小,而光伏阵列输出的稳态电压保持不变,因此可按照串内故障进行保护整定;仿真与测试证明了本文所得故障特征和所提保护方案的准确性,当检测到光伏串出现线间故障时,保护动作;本文所提保护方案可有效完善光伏阵列故障的保护,使得不易被察觉的线间故障能够被检测并且清除故障电路,具有工程实用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘中建,周明,李昭辉,等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术与惯量需求评估综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(12): 1-11,53.
LIU Zhongjian,ZHOU Ming,LI Zhaohui,et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(12):1-11,53.
- [2] 张明锐,陈喆旸. 一种基于最小均衡差的光伏阵列重构方案[J]. 电力自动化设备,2021,41(2):33-38.

- ZHANG Mingrui, CHEN Zheyang. Reconfiguration scheme of photovoltaic array based on minimum equalization difference [J]. Electric Power Automation Equipment 2021, 41(2):33-38.
- [3] 顾崇寅, 徐潇源, 王梦圆, 等. 基于CatBoost算法的光伏阵列故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(2):105-114.
- GU Chongyin, XU Xiaoyuan, WANG Mengyuan, et al. CatBoost algorithm based fault diagnosis method for photovoltaic arrays [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2):105-114.
- [4] ALAM M K, KHAN F H, JOHNSON J, et al. PV faults: overview, modeling, prevention and detection techniques [C]// IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2011:7.
- [5] FALVO M C, CAPPARELLA S. Safety issues in PV systems: design choices for a secure fault detection and for preventing fire risk [J]. Case Studies in Fire Safety, 2015, 3:1-16.
- [6] FIRTH S K, LOMAS K J, REES S J. A simple model of PV system performance and its use in fault detection [J]. Solar Energy, 2010, 84(4):624-635.
- [7] 乔苏朋, 杨艳, 陈世群, 等. 光伏阵列故障检测方法综述[J]. 电气技术, 2021, 22(7):1-6.
- QIAO Supeng, YANG Yan, CHEN Shiqun, et al. Review on photovoltaic array diagnosis methods [J]. Electrical Engineering, 2021, 22(7):1-6.
- [8] PILLAI S, NATARAJAN R. A compatibility analysis on NEC, IEC, and UL standards for protection against line-line and line-ground faults in PV arrays [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2019, 9(3):864-871.
- [9] 王尧, 张彦风, 牛峰, 等. 光伏直流电弧电磁辐射特性分析与测量方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14):2913-2921.
- WANG Yao, ZHANG Yanfeng, NIU Feng, et al. Characterization and measurement method of DC arc electro-magnetic radiation for photovoltaic systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14):2913-2921.
- [10] ZHAO Ye, DE PALMA J F, MOSESIAN J, et al. Line-line fault analysis and protection challenges in solar photovoltaic arrays [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9):3784-3795.
- [11] HARROU F, TAGHEZOUT B, SUN Ying. Improved KNN-based monitoring schemes for detecting faults in PV systems [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2019, 9(3):811-821.
- [12] DHIMISH M, HOLMES V, MEHRDADI B, et al. Simultaneous fault detection algorithm for grid connected photovoltaic plants [J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(12):1565-1575.
- [13] 甘雨涛, 吴振辉, 陈志聪, 等. 基于LoRa和自适应神经网络模糊推理系统的光伏阵列故障诊断系统[J]. 电气技术, 2020, 21(8):80-86.
- GAN Yutao, WU Zhenhui, CHEN Zhicong, et al. Fault diagnosis system of photovoltaic array based on LoRa and adaptive network based fuzzy inference system [J]. Electrical Engineering, 2020, 21(8):80-86.
- [14] 杨佳威, 闫正兵, 李剑锋, 等. 基于序差和的光伏阵列故障分类方法[J]. 控制工程, 2020, 27(8):1425-1428.
- YANG Jiawei, YAN Zhengbing, LI Jianfeng, et al. Photovoltaic array fault classification method based on sum of ranking differences [J]. Control Engineering of China, 2020, 27(8):1425-1428.
- [15] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2003.
- ZHAO Wei. Research on grid-connected photovoltaic system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.
- [16] 周林, 武剑, 栗秋华, 等. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008, 34(6):1145-1154.
- ZHOU Lin, WU Jian, LI Qiu-hua, et al. Survey of maximum power point tracking techniques for photovoltaic array [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6):1145-1154.

作者简介:

孙 旻(1970—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为分布式电源并网稳定分析与控制(E-mail: zysyw@163.com)。(编辑 任思思)

Line-line fault protection scheme of PV array based on current reverse mutation criterion of fault PV string

SUN Min^{1,2}, ZENG Wei^{1,2}, CHEN Bo^{1,2}, WANG Guannan^{1,2}, PENG Chunhua³, GAO Bo³

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy Integrated Power System, Nanchang 330096, China;

3. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The fault current is small when line-line fault occurs in the photovoltaic (PV) array, and overcurrent protection cannot effectively clear the fault. A PV array line-line fault protection scheme based on the reverse mutation characteristics of PV string output current is proposed. The characteristics of the PV string's output voltage and current under PV array line-line fault are qualitatively analyzed, which shows that the current will reversely decrease under PV array line-line fault. Then, based on the equivalent circuit model of PV string, the quantitative relationship between the output current and the number of the faulty battery is established. Setting the current reduction for one faulty battery as the threshold, a current reverse mutation criterion of fault PV string is proposed, which can effectively locate the fault string of PV array and only need to measure the output current signal of the PV string and the output voltage signal of the PV array. Meanwhile, the protection cooperation only need trip signal. The correctness of the theoretical analysis of the proposed criterion and the effectiveness of the proposed relay protection scheme are verified by time-domain simulations and field test.

Key words: PV power generation; PV array line-line fault; fault current; reverse mutation; relay protection

附录 A

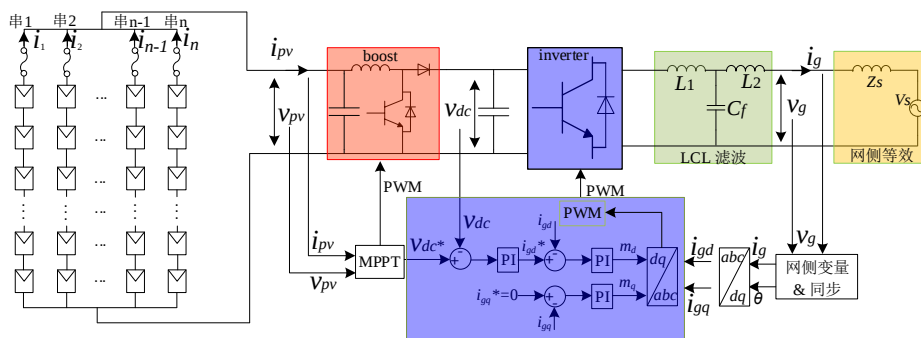


图 A1 典型光伏发电系统示意图

Fig.A1 Schematic diagram of typical PV system

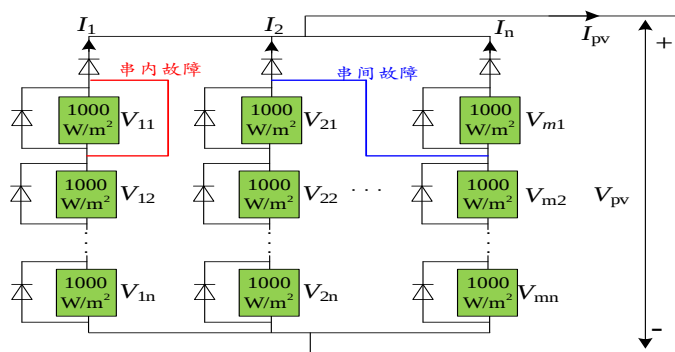


图 A2 光伏阵列的 2 种线间短路示意图

Fig.A2 Schematic diagram of two types of line-line fault in PV array

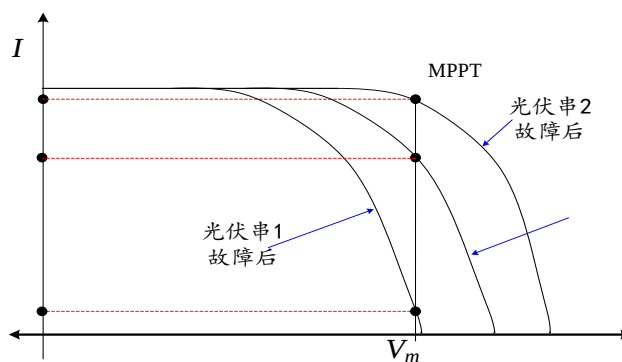


图 A3 光伏阵列串间故障的 \$I-V\$ 曲线变化

Fig.A3 Variations of \$I-V\$ curve of PV string under cross-string faults

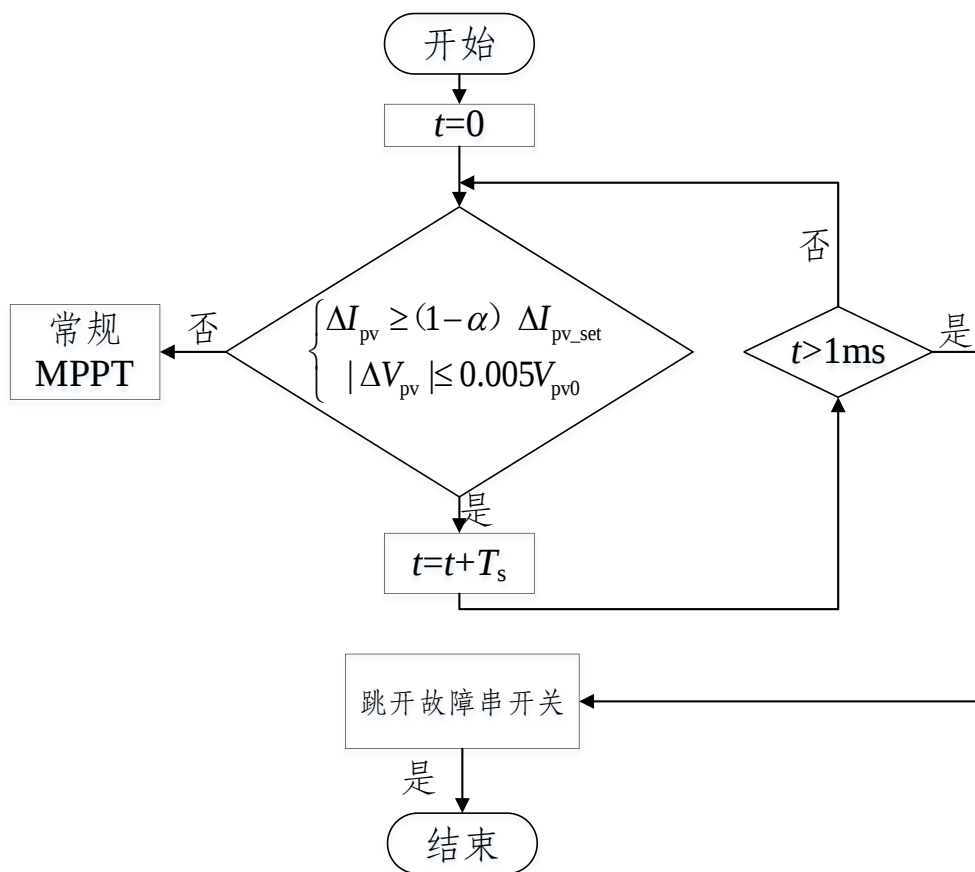


图 A4 光伏阵列线间故障的保护动作逻辑
Fig.A4 Protection action logic of line-line fault of PV array

附录 B

表 B1 光伏发电参数

Table B1 Parameters of the PV system			
参数	数值	参数	数值
最大功率 $P_{\max}/W$	315.07	Boost 电容器 $C_{\text{boost}}/\mu F$	100
开路电压 V_{oc}/V	64.6	Boost 电感 L_{boost}/mH	5
短路电流 I_{sc}/A	6.14	逆变器电容 $C_{inv}/\mu F$	50
最大功率点电压 V_m/V	54.7	滤波器电感 L_f/mH	0.05
最大功率点电流 I_m/A	5.76	滤波器电容 $C_f/\mu F$	160
光照强度 W/m^2	1000	温度 $T/^{\circ}C$	25

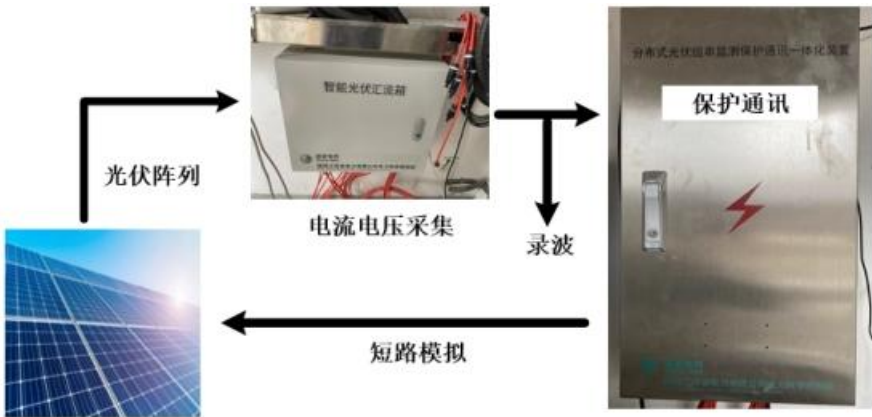
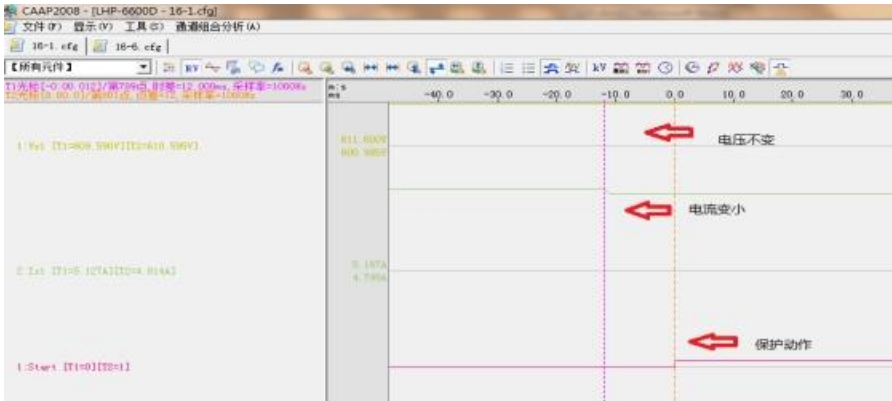
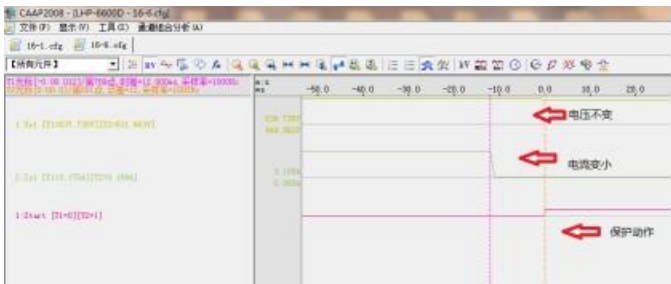


图 B1 光伏阵列线间故障测试系统示意图

Fig.B1 Schematic diagram of test system for line-line fault



(a) 16 光伏电池串短接 1 电池



(b) 16 光伏串电池短接 6 电池

图 B2 光伏串线间故障电流电压波形

Fig.B2 Voltage and current waveforms of a PV string under inner-string faults