

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190433

光伏发电系统非计划孤岛问题的研究

王同文¹, 徐靖东², 邵庆祝¹, 谢民¹, 俞斌¹, 李雪冬³, 杨畅⁴

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230061; 2. 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; 3. 北京中恒博瑞数字电力科技有限公司, 北京 100085; 4. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 被动式反孤岛保护在现场应用广泛, 但存在较大的动作死区, 无法完全区分孤岛效应与暂态电压跌落, 因此反孤岛保护无法与光伏的低电压穿越控制形成有效的配合。针对一起配电网孤岛案例, 分析了孤岛产生的机理, 对基于电压和频率检测的被动式反孤岛保护的适用性进行了评估。通过建立基于 PSCAD 的光伏孤岛仿真模型, 分析了从故障发生到孤岛产生的过程中电压和频率的暂态特性, 揭示了现场保护动作特性与孤岛效应的关系, 给出了基于传统配电网的保护应对建议。

关键词: 分布式光伏; 反孤岛保护; 暂态特征; 保护适应性

Research on non-scheduled islanding supplied by photovoltaic power generations

WANG Tongwen¹, XU Jingdong², SHAO Qingzhu¹, XIE Min¹, YU Bin¹, LI Xuedong³, YANG Chang⁴

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China; 3. Beijing Join Bright Digital Power Technology CO., LTD., Beijing 100085, China; 4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Passive anti-islanding protections have been widely used in field, but all of them have dead zone of protection operation. On this account, islanding effect cannot completely be distinguished from transient voltage sags. Therefore, the anti-islanding protection cannot effectively cooperate with the low voltage traversing control of photovoltaics. In this paper, the mechanism of islanding is analyzed, and the applicability of passive anti-islanding protections based on voltage and frequency detection is evaluated. The transient characteristics of voltage and frequency during the process from fault to islanding are analyzed by establishing a PSCAD-based photovoltaic islanding simulation model. The relationship between the operation characteristics of field protection and islanding effect is revealed, and the protection countermeasures based on traditional distribution network are proposed.

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 power generation; anti-islanding protection; transient characteristics; adaption of relay protection

0 引言

光伏电源作为一种可再生能源, 具有布置灵活, 不受地域限制, 适用于分布式接入电网等优势, 因此在新能源电源规划建设中受到青睐。在太阳能资源较为丰富的地区, 光伏在新能源电源中所占比例逐年递增; 尤其在乡镇级的电网中, 由于扶贫光伏

的大量建设, 加之本地负荷较小, 光伏电源发电容量大于本地负荷的情况普遍存在^[1]。随着光伏大规模接入配电网, 由此所引起的系统安全稳定问题也随之而来^[2-3]。孤岛现象就是由于新能源电源大规模接入负荷侧所带来的电网运行新问题^[4-5]。电力孤岛的形是由于自然或人为因素造成某一供电区域失去系统电源时, 由该区域的分布式电源继续向负荷供电, 从而形成一个独立不可控的自给式供电区域^[6]。孤岛可以分为计划孤岛和非计划孤岛^[7-8]。

近年来由于智能配电网成为新的研究热点, 国

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)

内外学者围绕基于智能电网的自愈进行了大量的研究。含分布式能源的配电网自愈技术主要包含电网正常运行的重构优化、故障前的预判控制以及故障后基于重构技术的快速恢复^[9-12]，计划孤岛的概念已被包含其中。而非计划孤岛是配电网发展到目前阶段的特殊情况^[13]，非计划孤岛对故障恢复后电网的安全稳定运行和电能质量，以及负荷侧用电设备和运维人员的人身安全都将造成不利的影 响。孤岛效应的影响因素存在于多个方面，本文将结合现场的实际案例，研究基于光伏逆变器的非计划孤岛产生的原因，分析保护在孤岛产生过程中的动作特性，讨论反孤岛策略的有效性，并给出预防光伏非计划孤岛的 建议及措施。

1 孤岛效应的机理

1.1 孤岛效应产生的条件

严格意义上讲，电力孤岛边界条件就是反孤岛保护的死区边界。如图 1 所示光伏接入的配网系统，当 110 kV 线路 L1 发生线路故障时，其系统侧线路保护动作，跳开断路器 B1。由于反孤岛保护存在一定的检测死区，图中虚线区域便有可能形成一个由光伏电源单独供给的电力孤岛。

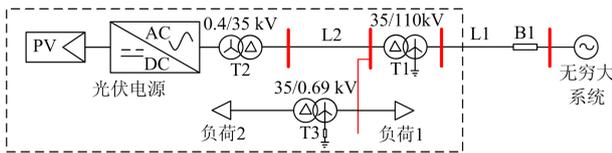


图 1 分布式光伏接入的配电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distribution network with distributed photovoltaic power generation

在系统未形成孤岛之前，图中潮流满足式(1)，即假定系统内不存在无功补偿装置，则负荷 1、2 所需的有功 P_{load} 、无功 Q_{load} 由光伏电源和系统电源共同提供。

$$\begin{cases} P_{load} = P_{pv} + P_s \\ Q_{load} = Q_{pv} + Q_s \end{cases} \quad (1)$$

当断路器 B1 断开时，如果式(1)中系统提供的有功 P_s 、无功 Q_s 很小，可近似为 0，即光伏电源的输出功率与本地负荷相互匹配，则可以形成一个持续运行的孤岛。此时孤岛内各节点电压及频率可维持在正常运行的允许范围内。

1.2 负荷对于孤岛的影响

当如图 1 所示的非计划孤岛形成后，必然满足负荷阻抗角 φ_{load} 与光伏电源的功率因数角 φ_{pv} 相等。若认为光伏电源工作在单位功率因数下，将孤岛内

负荷等效为 RL_C 并联电路，则孤岛系统的谐振角频率满足式(2)。

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \approx 100\pi \quad (2)$$

式中， Q 为孤岛简化为 RL_C 并联电路的品质因数。

当满足 $R < \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时发生谐振，其表达满足式(3)。

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \approx \frac{\omega_0 L}{R} \quad (3)$$

由式(2)可以看出，当认为电网中电阻值很小，即 $R \approx 0$ 时，孤岛满足近似工频谐振的条件如式(4)所示。

$$\frac{1}{LC} \approx (100\pi)^2 \quad (4)$$

2 反孤岛保护及其有效性评估

2.1 反孤岛保护概述

国内外学者对于反孤岛保护做了大量的研究，常用的反孤岛保护方法可以分为三大类^[14]，即被动法、主动法以及基于通信的远方跳闸保护。近年来又有新的方法不断被提出，大致可以分为复合算法和智能算法两大类。被动式防孤岛保护一般是基于并网点的电气量，诸如频率、电压、谐波等，通过检测其变化率或变化量，构成保护判据^[15-17]。此类保护的优点是算法简单、易于实现；缺点是抗扰动能 力差，且存在较大的保护死区，对于一些极端情况无法保证可靠性。

主动式反孤岛保护的基本思想为，通过单独向电网注入信号或扰动，抑或改变控制环节通过逆变器向电网注入扰动，根据并网点所采集到的阻抗、频率、电压等电气量信息来判断系统对于此扰动的响应是否满足保护动作条件，以此构成保护的判据^[18-20]。此类方法相对于被动式反孤岛保护，可靠性高，但实现原理相对复杂，注入的信号对于电网而言相当于扰动，如果分布式电源在电网中的渗透率过高，基于逆变器的信号注入法可能导致防孤岛保护自身可靠性及灵敏度的降低，同时也可能会危及电网的安全稳定运行。

基于通信的反孤岛保护的基本原理是将变电站出口开关或分布式光伏上游的开关通过通信构成连锁跳闸回路，由上游开关连锁跳闸光伏电源的并网开关^[21]。对于传统配电网而言，此类方法需要建设独立的通信通道，加大了投资成本；而对配电网自动化水平高的局部电网，可以直接借用自动化系统的通信通道，不存在额外的投资，理论上不存在死

区, 可靠性高且易于实现。

复合算法^[22-24]是在已有反孤岛保护方法的基础上, 运用优化算法, 对多种方法的判据进行融合求解。智能算法^[25-26]是运用支持向量机、神经网络以及决策树等深度学习算法, 对孤岛特征进行筛选和判别。

2.2 被动式反孤岛保护适用性评估^[27-28]

目前新能源电源发展迅速, 尤其是在以扶贫光伏为主的分布式光伏的接入容量已经超过本地负荷水平。而我国配电网自动化水平普遍较低, 尤其在以扶贫光伏为主的乡镇电网中, 多使用被动式的反孤岛保护策略, 极易出现反孤岛检测失效的情况。

图2为图1的简化示意图, 将负荷等效为图中RLC并联电路, R_1 , L_1 和 R_2 , L_2 分别表示线路的电阻和电感。为简化分析, 忽略线路阻抗, 即认为光伏公共并网点的电压与等效的负荷电压一致。同时, 认为负载的感性及容性支路中不存在电阻。认为光伏逆变器工作在单位功率因数下, 由此可列写形成孤岛前后并网点的电压与有功功率的关系。

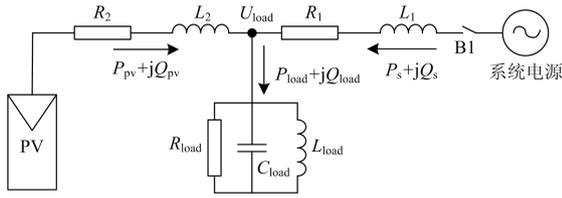


图2 光伏孤岛示意图

Fig. 2 Schematic diagram of islanding supplied photovoltaic power generation

$$U'_{load} = U_{load} \left(1 + \frac{P_s}{P_{pv}} \right) \quad (5)$$

式中, U'_{load} 为孤岛前正常运行时的负荷电压。由于故障后, 基于电压检测的反孤岛保护盲区为 (U_{min}, U_{max}) , 因此式(5)满足在电压定值上下限范围内波动, 便可形成一个稳定运行的孤岛, 即负荷与光伏电源所能够提供的有功满足式(6)。

$$\frac{U'_{load}}{U_{max}} - 1 < \frac{P_s}{P_{pv}} < \frac{U'_{load}}{U_{min}} - 1 \quad (6)$$

同样, 假设负荷的无功均由系统提供, 则孤岛形成前的无功不匹配方程为式(7)所示。

$$\frac{Q_s}{P_{pv}} = \frac{U'_{load}{}^2 \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right)}{P_{pv}} = \frac{P_{load} Q \left(\frac{f'}{f} - \frac{f}{f'} \right)}{P_{pv}} \quad (7)$$

负荷有功与电压的关系按照图2可以列写孤岛

形成前后表达式为 $P_{load} R = U'_{load}{}^2$ 、 $P_{pv} R = U_{load}^2$, 并代入式(7)中得

$$\frac{Q_s}{P_{pv}} = \frac{U_{load}^2 Q \left(\frac{f'}{f} - \frac{f}{f'} \right)}{U'_{load}{}^2} \quad (8)$$

式中: f' 为孤岛形成后负荷并联谐振的频率; f 为实际电网频率; 负荷品质因素 $Q = R \sqrt{\frac{C}{L}}$ 。则通过代入基于频率的反孤岛检测的频率上下限得

$$\frac{U'_{load}{}^2 Q \left(\frac{f_{min}}{f} - \frac{f}{f_{min}} \right)}{U_{max}^2} < \frac{Q_s}{P_{pv}} < \frac{U'_{load}{}^2 Q \left(\frac{f_{max}}{f} - \frac{f}{f_{max}} \right)}{U_{min}^2} \quad (9)$$

由以上式(6)和式(9)可以确定基于电压和频率的被动反孤岛的動作死区, 即形成孤岛的边界条件。

3 孤岛事件的仿真及分析

3.1 孤岛事件过程描述

2018年6月20日16时07分, 220 kV 甲站110 kV 出线C相发生单相接地故障, 距离I段、零序I段保护动作跳闸, 故障电流17.9 A, 故障测距3.6 km。此线路连接某110 kV 终端变电站A站。单相接地故障后75 ms, A站#2主变高间隙过流保护动作, #2主变高压侧110 kV 分段800、900, 中压侧3002和低压侧402开关跳闸, 系统一次接线图详见图3。随后A站110 kV 备自投动作, 联切35 kV 小电源进线、永强线3020、#1吴源线3021、#2吴源线3023, 合110 kV 正白线896开关, #1主变、35 kV I段、10 kV I段母线恢复供电。

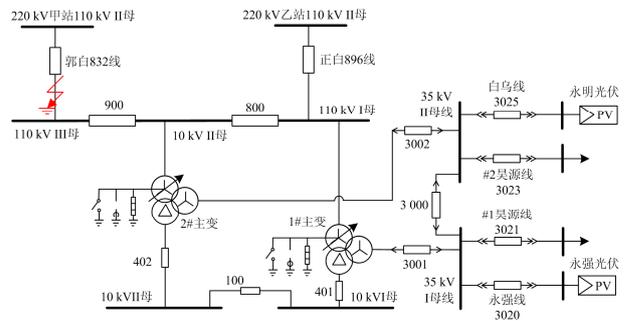


图3 110 kV A站一次接线图

Fig. 3 Schematic diagram of 110 kV A substation

A站为终端变电站, 110 kV 郭白线未配置进线开关。故障发生时, 郭白线带A站全部负荷, 白正线处于热备用状态; A站35 kV及10 kV 母线均分裂运行。在故障发生前, A站供电区域的两个光伏

电站输出功率分别为, 永强光伏 17.95 MW, 永明光伏 6.18 MW, 分别通过 35 kV 白乌线和永强线接入。A 站本地负荷共计 22.63 MW, 全站通过 110 kV 向系统倒送功率 1.5 MW。

表 1 给出故障发生后系统内相关保护动作的时序, 所有事件发生在同一分钟内, 因此时间栏只给出秒钟信息。其中光伏相关保护动作时间与站内保护对时存在不同步的问题, 表中给出的光伏保护动作时间为比对站内故障录波后的修正时间。

表 1 保护动作时序表

Table 1 Protection action timing table

编号	时间	事件	动作值	定值
T ₁	13' 503	郭白 832 线 C 相接地故障	—	—
T ₂	13' 524	832 开关保护接地距离 I 段动作(重合闸停用)	3.6 Ω	2.6 Ω
T ₃	13' 526	832 开关零序过流 I 段动作	17.9 A	12.6 A
T ₄	13' 599	A 站 2 号主变高压侧中性点间隙击穿	—	自产 9.2 V 外接 16.0 V
T ₅	14' 101	2 号主变保护高后备保护高间隙过流动作, 跳开 800、900、3002、402 开关	15.5 A	2.5 A/0.5 s
T ₆	14' 546	永明光伏低压 I 段动作, 跳开 3025 开关	60.3 V	见表 2
T ₇	16' 078	永强光伏频率滑差启动	—	见表 2
T ₈	16' 242	备自投启动, 电压恢复	30 V	—

3.2 保护动作分析

此次事件中的甲站与 A 站构成的 110 kV 系统为中性点接地系统, 接地点在甲站一侧, A 站两台 110 kV 主变中性点均不接地。当单相接地故障发生保护动作后, 故障点与 A 站 110 kV 侧构成了中性点不接地系统, 其零序等值电路图如图 4 所示。

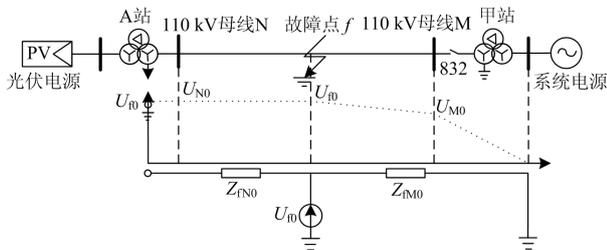


图 4 110 kV 故障电网零序等值电路图

Fig. 4 Zero sequence equivalent circuit diagram of the 110 kV fault power grid

故障点至 A 站的零序阻抗为无穷大, 则故障点的零序电压由故障点至甲站的主变及线路参数决定, 忽略故障点的接地电阻, 其表达式如式(10)所示。

$$U_{f0} = U_{\varphi} \frac{Z_{fM0}/Z_{fM1}}{2 + Z_{fM0}/Z_{fM1}} \quad (10)$$

式中: U_{φ} 为故障前的相电压; Z_{fM0} 、 Z_{fM1} 分别为甲站至故障点的零序阻抗和正序阻抗。对于接地系统, 一般认为 $k_0 = Z_{fM0}/Z_{fM1} < 3$ 。发生单相接地故障时, 非故障相的电压与 k_0 的关系如式(11)^[24]。当 $k_0 \rightarrow \infty$ 时, 中性点不接地系统的中性点电位抬升至相电压, 非故障相电压升至线电压。

$$\begin{cases} k_0 < 1, & \text{故障后非故障相电压下降} \\ k_0 = 1, & \text{故障前后非故障相电压不变} \\ k_0 > 1, & \text{故障后非故障相电压升高} \end{cases} \quad (11)$$

对于架空线路, 一般有 $k_0 \approx 3 \sim 5.5$; 对于变压器而言, k_0 的值取决于其连接组别、接线形式及中性点的接地方式, 一般认为 $k_0 \ll 1$ 。本案例中, 故障线路型号为 LGJ-300, 根据甲站变压器接线形式, 可以估算 $k_0 \approx 1.9$, 代入式(10)可得故障发生后, 故障点的零序电压 $U_{f0} = U_{N0} = 30.94 \text{ kV}$; 后经 24 ms 甲站保护动作使故障与系统隔离, 但负荷侧有大容量的光伏电源支撑系统电压, 导致在甲站出线开关跳开后, A 站中性点电压迅速抬升至相电压, 即 $U_{N0} = 63.51 \text{ kV}$ 。

A 站主变高压中性点保护配置为间隙与避雷器并联。避雷器作用是限制中性点的雷电过电压, 间隙是限制中性点的工频及谐振过电压, 两者需要配合。间隙距离的调整策略为, 在避雷器残压下及在有效接地系统里中性点工频稳态和暂态过电压作用下不动作, 而在相电压下动作。因此可以判断, A 站在故障发生后中性点间隙击穿的 96 ms 时间里, 间隙动作正确。A 站间隙击穿后空气被电离, 绝缘强度大大降低从而形成续流, 此时 A 站 110 kV 侧成为中性点有效接地系统, 非故障相电压迅速跌落。现场 110 kV 母线电压录波如图 5 所示, 表 1 中各重要时刻已在图 5 中标出, 可以看出图 5 中故障波形与上文分析完全吻合。

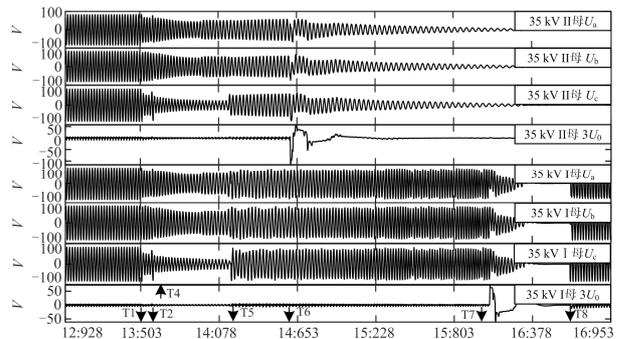


图 5 A 站 35 kV 母线电压现场故障录波图

Fig. 5 On-site fault recording of 35 kV bus voltage of station A

35 kV 两条母线分裂运行, 母线电压由永强、永明两条光伏分别支撑。由于永明光伏容量相对偏小, 35 kV II 母电压在形成孤岛运行后一直维持较低水平。通过分析故障录波, II 母 C 相电压于 13" 486 低于额定电压的 90%, 光伏进入低穿模式。此后母线电压持续降低, 经过 617 ms 电压低于 20%, 光伏退出低穿模式。同时, 低电压保护启动, 又经延时 0.5 s 后低电压跳闸, 跳闸时电压维持在额定电压 60% 左右。通过以上分析, 永明光伏保护动作逻辑基本正确。永强光伏通过频率反孤岛跳闸, 由于现场录波数据不包含电网频率, 需通过仿真进行验证。

3.3 孤岛成因的仿真分析

通过前文分析可知, 光伏孤岛形成的边界条件取决于反孤岛保护的策略及定值盲区。在本事件中, 上级开关跳开后, 对于 A 站而言故障点并未消除, 由于 A 站负荷区域内光伏渗透率较高, 支撑各母线电压维持在正常水平持续运行, 故障点由光伏电源反向提供故障电流, 造成 A 站#2 主变中性点电压抬升, 最终导致间隙过流动作。本文中光伏所使用的反孤岛及电压频率紧急控制定值如表 2 所示。

表 2 反孤岛装置定值表

Table 2 Anti-island protection setting table

名称	电压定值		频率定值	
	低压	过压	低频	过频
定值 1	70 V/0.5 s	130 V/0.5 s	47.5 Hz/0.2 s	51.0 Hz/0.2 s
定值 2	68 V/0.5 s	110 V/0.5 s	47.0 Hz/0.5 s	51.0 Hz/0.5 s

根据表中定值, 通过式(6)和式(9)求出 A 站被动式反孤岛的保护区, 这里电网的品质因数取 2, 如图 6 所示。图中阴影区域即为基于电压、频率检测的反孤岛理论死区区间; 其中的圆形区域为 A 站孤岛产生时的运行区域。由图中可以看出, 相对于有功的差额, 孤岛能够产生的关键因素在于无功的就地平衡。事实上, 孤岛内有功功率不平衡必然造成孤岛区域内的电压波动, 这将导致光伏阵列偏离最大功率点, 光伏总的输出功率也会随之下降。因此, 对于光伏电源大于本地负荷的情况, 计及光伏自身运行特性的反孤岛死区边界将会更宽。

图 6 给出的是被动防孤岛保护的静态边界, 作为一种简化分析的方法, 忽略了电网内部的线路分布参数、光伏控制等因素的影响。为研究故障引起孤岛时频率等电气量的暂态过程, 对故障过程进行推演, 在 PSCAD 中搭建图 3 的数字仿真模型^[29]。模型中两个光伏逆变电源的主要参数相同, 其中 LCL 滤波器并网控制也均为电压外环及电流内环的双环控制方式, 如图 7 所示。其中, 滤波器的主要参数为 $L = 0.28 \text{ mH}$, $L_g = 0.07 \text{ mH}$, $C = 200 \mu\text{F}$,

$R_c = 0.039 \Omega$; 电压外环控制参数为 $K_{vp} = 2$ 、 $K_{vi} = 0.01$; 电流内环控制参数为 $K_{ip} = 1$ 、 $K_{ii} = 0.05$ 。图中 U_{dc_ref} 、 i_{d_ref} 、 i_{q_ref} 分别为直流母线参考电压及 dq 轴的参考电流。

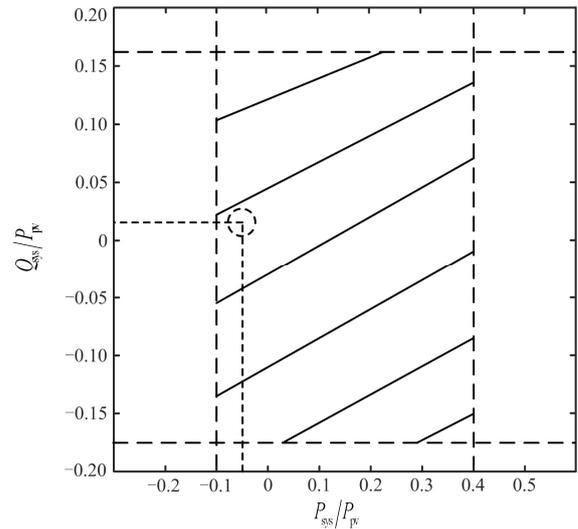


图 6 A 站被动式反孤岛保护动作死区评估图

Fig. 6 Dead zone assessment map of passive anti-islanding protection in station A

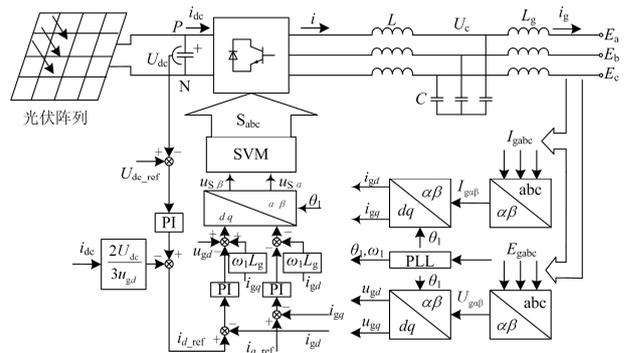


图 7 光伏电源并网控制逻辑图

Fig. 7 Logic diagram of grid-connected control of photovoltaic power supply

图 8 为通过 PSCAD 仿真得到现场故障录波设备未监测的电气量波形图, 仿真过程还原了现场故障以及保护动作的顺序。仿真波形按照图 5 中 12:928 至 15:228 时间段内保护动作时序, 模拟了孤岛运行的暂态过程。由图 8 可以看出, 35 kV I 母 II 母仿真电压暂态特性与故障录波中 35 kV 母线电压变化相吻合, 说明仿真波形的有效性。图中 0.105 s 时故障发生, 0.066 s 后 832 号断路器跳闸, 此时仿真得到 #2 主变中性点工频暂态过电压幅值最大值为 91.743 kV, 换算有效值为 64.882 kV, 仿真结果

与上节的计算值非常接近。在 2#主变高压中性点间隙未击穿前, 1#主变中性点工频暂态过电压波形与 2#主变完全重合, 说明中性点间隙击穿具有一定的随机性。2#主变高压中性点间隙击穿后, 由于弧电阻的存在, 两台主变中性点依然存在一定水平的电压, 1#主变中性点电压相对 2#主变略高, 其有效值维持在 13.076 kV 左右, 且在 2#主变间隙过流动作, 切除故障小电流时, 1#主变中性点再次出现操作暂态过电压, 瞬时值高达 80.055 kV。

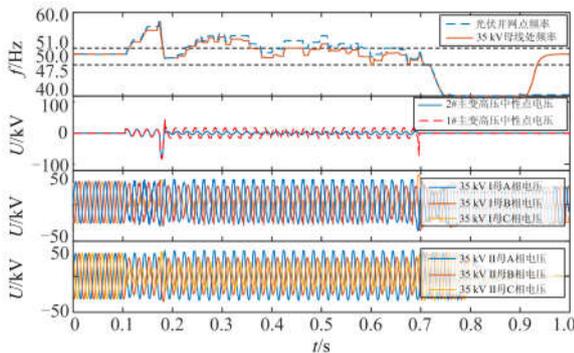


图 8 主要电气量仿真波形图

Fig. 8 Simulation waveform of main electrical quantities

系统孤岛产生后, 系统频率暂态变化过程如图 8 所示。当故障发生时, 负荷侧频率上升, 最高达到 58 Hz 左右, 随后上级主电源与故障隔离, A 站通过供电区域内的光伏电源与故障点形成孤岛运行。此过程中, 由于区域内无功接近平衡, 系统频率自由振荡的范围一直维持在定值区间附近, 且定值带有不小于 0.2 s 的延时, 因此并未满足保护动作条件, 图 8 中给出了反孤岛频率的定值区间。仿真于 0.7 s 跳开 800、900、3002、402 断路器, 此时孤岛的拓扑结构改变, 导致频率的暂态平衡被打破, 频率急剧下降, 穿越定值区间。因此, 永强光伏于 2#主变中性点过流保护动作后, 频率滑差启动, 最终切除光伏电源。但根据修正后的动作时间来看, 永强光伏反孤岛频率保护动作时间过长, 需要根据相关导则, 现场验证其频率反孤岛保护的可靠性和正确性。

4 结论

本文根据一起由上级线路故障引起的光伏孤岛运行的案例, 讨论了光伏孤岛产生的机理和边界条件, 对被动原理的反孤岛保护进行了分析, 得到以下结论。

1) 本文中所涉及的故障孤岛的情况, 将对孤岛变电站主变中性点绝缘造成威胁, 加速主变中性点

的绝缘老化, 影响主变的安全运行。

2) 基于被动式反孤岛保护的配电网, 光伏孤岛形成的两个要素是局部区域功率的平衡以及被动式反孤岛保护的检测死区。

3) 被动式反孤岛保护存在较大的保护死区, 无法完全区分故障与孤岛的情况。因此由于孤岛效应而发生系统电压跌落时, 分布式光伏电源进入低电压穿越运行模式, 对系统电压起到支撑作用, 反而使得系统可以长时间维持在孤岛运行状态。

4) 应在分布式电源渗透率高的变电站内, 独立配置可靠的主动式反孤岛保护, 保护出口为跳开所有光伏进线。

5) 对于分布式光伏接入容量大于变电站供电区域负荷的情况, 应按照双端电源的情况来配置 110 V 线路保护, 重合闸应增加检无压策略, 防止在重合时对系统及设备造成冲击。

非计划孤岛问题是分布式电源与配电网自动化水平发展不均衡的特殊阶段所产生的特殊问题, 随着配电网自动化水平的提高, 此问题将得到有效解决。现阶段需对传统配电网及其保护进行改造, 以应对孤岛问题可能对负荷设备及人身安全造成的危害。

参考文献

- [1] 蒋克勇. 金寨县风电光伏在配电网下的规划研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
JIANG Keyong. Study of wind power and photovoltaic power of Jinzhai under the distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [2] 李佳琪, 陈健, 张文, 等. 高渗透率光伏配电网中电池储能系统综合运行控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 437-446.
LI Jiaqi, CHEN Jian, ZHANG Wen, et al. Integrated control strategy for battery energy storage systems in distribution networks with high photovoltaic penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 437-446.
- [3] 张红丽, 刘福锁, 李威, 等. 高渗透率光伏接入电网暂态电压失配风险及切负荷方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 158-164.
ZHANG Hongli, LIU Fusuo, LI Wei, et al. Transient voltage mismatch risk and load shedding control method with high permeability photovoltaic power grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 158-164.
- [4] 孙鹏伟, 张野, 张帆, 等. 光伏电站进孤岛后系统稳定性风险量化评估[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 93-97.

- SUN Pengwei, ZHANG Ye, ZHANG Fan, et al. System stability risk analysis after PV plants drop into island operation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 87-91.
- [5] 胡博, 王昕, 郑益慧, 等. 基于萤火虫优化算法的分布式发电设备容量分配及配电网孤岛划分[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 21-26.
- HU Bo, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Calculation of isolated island partition and distributed generator capacity based on firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 21-26.
- [6] MEKHILEF S, RAHIM N A. Implementation of grid-connected photovoltaic system with power factor control and islanding detection[C] // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), June 20-25, 2004, Aachen, Germany: 1409-1412.
- [7] 王志涛, 武志刚, 高厚磊, 等. 重合闸与低电压穿越相配合的有源配电网故障恢复方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 81-87.
- WANG Zhitao, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. A fault recovery scheme cooperating with reclosing and LVRT for active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 81-87.
- [8] 孙洁, 王增平, 王英男, 等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 56-62.
- SUN Jie, WANG Zengping, WANG Yingnan, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 56-62.
- [9] 王成山, 聂耸, 徐瑞林, 等. 分布式电源接入对配电网网络重构影响分析[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2014, 47(3): 189-194.
- WANG Chengshan, NIE Song, XU Ruilin, et al. Analysis on the impact of DG on distribution network reconfiguration[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2014, 47(3): 189-194.
- [10] 周淦, 解慧力, 郑柏林, 等. 基于混合算法的配电网故障重构与孤岛运行配合[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 136-142.
- ZHOU Quan, XIE Huili, ZHENG Bolin, et al. Hybrid algorithm based coordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 136-142.
- [11] 李振坤, 赵向阳, 朱兰, 等. 智能配电网故障后自愈能力评估[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 789-796.
- LI Zhenkun, ZHAO Xiangyang, ZHU Lan, et al. Evaluation of self-healing ability for smart distribution network after failure[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 789-796.
- [12] LI J, MA X, LIU C, et al. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3021-3029.
- [13] KAMALI S, AMRAEE T, BATHAEE S M T. Prediction of unplanned islanding using an energy based strategy[J]. IET Generation, Transmission Distribution, 2016, 10(1): 183-191.
- [14] 贾科, 宣振文, 林瑶琦, 等. 基于Adaboost算法的并网光伏发电系统的孤岛检测法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1106-1113.
- JIA Ke, XUAN Zhenwen, LIN Yaoqi, et al. An islanding detection method for grid-connected photovoltaic power system based on Adaboost algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1106-1113.
- [15] 任昭重. 基于并网点特征谐波测量的分布式发电孤岛检测研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2015.
- REN Zhaozhong. Research on islanding detection for distributed generation based on the characteristics harmonic measurement at PCC[D]. Hefei: Anhui University, 2015.
- [16] 王小立, 温靖华, 袁飞, 等. 基于频率-功率因数角组合判据的新型孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 100-105.
- WANG Xiaoli, WEN Jinghua, YUAN Fei, et al. A new anti-islanding detecting method based on combined criterion of frequency and power-factor angle[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 100-105.
- [17] JANG S I, KIM K H. An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 745-752.
- [18] CHEN Xiaolong, LI Yongli. An islanding detection algorithm for inverter-based distributed generation based on reactive power control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4672-4683.
- [19] ROSTAMI A, JALILIAN A, HAGH M T, et al. Islanding detection of distributed generation based on rate of change of exciter voltage with circuit breaker switching strategy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 954-963.

- [20] 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.
- [21] 余运俊, 王鹤官, 范文奕, 等. 基于滑模移频法的光伏发电并网系统孤岛检测混合算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(8): 32-37.
YU Yunjun, WANG Heguan, FAN Wenyi, et al. Mixed islanding detection method for grid-connected photovoltaic system based on slip-mode frequency shift method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(8): 32-37.
- [22] 孙振奥, 杨子龙, 王一波, 等. 适用于分布式多逆变器系统的混合孤岛检测法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3590-3597, 3378.
SUN Zhen'ao, YANG Zilong, WANG Yibo, et al. A hybrid islanding detection method for distributed multi-inverter systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3590-3597, 3378.
- [23] FAQHRULDIN O N, EL-SAADANY E F, ZEINELDIN H H, et al. A universal islanding detection technique for distributed generation using pattern recognition[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1985-1992.
- [24] 戈阳阳, 马少华, 李洋, 等. 基于混沌特性的微电网孤岛检测技术[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3453-3458.
GE Yangyang, MA Shaohua, LI Yang, et al. Microgrid islanding detection based on chaotic property[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3453-3458.
- [25] 张沛超, 陈琪蕾, 李仲青, 等. 具有增量学习能力的智能孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 83-89.
ZHANG Peichao, CHEN Qilei, LI Zhongqing, et al. Intelligent islanding detection method with incremental learning capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 83-89.
- [26] 方万良, 李建华, 王建学. 电力系统暂态分析[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [27] 姚丹. 分布式发电系统孤岛效应的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
YAO Dan. Research on islanding of distributed generation system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [28] 龙鑫. 光伏发电系统并网的孤岛特征及反孤岛策略的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
LONG Xin. Research on islanding's characteristics and anti-islanding strategy of grid-connected photovoltaic power generation system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [29] 郑堃, 周林, 张前进, 等. 数字控制下光伏并网逆变器稳定性分析及参数优化设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1802-1813.
ZHENG Kun, ZHOU Lin, ZHANG Qianjin, et al. Stability analysis and parameter optimization design of photovoltaic grid-connected inverter under digital control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1802-1813.

收稿日期: 2019-04-18; 修回日期: 2019-06-13

作者简介:

王同文(1981—), 男, 博士, 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

徐靖东(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源的控制与保护。E-mail: xjd_xjtu@xjtu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)