

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.05.018

高渗透率分布式光伏电源接入线路停电检修反孤岛技术

张健¹, 李允博², 郭鹏¹, 李衡¹, 杨兰均^{2,3}, 张庆如²

(1. 国网陕西省电力有限公司宝鸡供电公司, 陕西 宝鸡 721004; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049;

3. 西咸新区麦特能自动化设备有限公司, 西安 712000)

摘要: 随着分布式光伏电源在配电网中渗透率逐渐提高, 在进行分布式光伏电源接入线路停电检修时断开系统电源, 分布式光伏电源与负荷形成孤岛系统的可能性增大, 严重威胁检修人员的人身安全。针对以上问题, 从检修人员角度出发, 分析了检修人员在进线端能够采取的接入负荷和模拟短路故障两种措施的可行性, 检修人员在进线端接入容性负荷可以低成本、可靠地使线路中孤岛运行的分布式光伏电源退出运行, 从而保障检修人员的人身安全。

关键词: 分布式光伏电源; 配电网; 孤岛效应; 停电检修

Anti-islanding Technology for Power Outage Maintenance of Distribution Network Connected with High-penetration Distributed Photovoltaic Generation

ZHANG Jian¹, LI Yunbo², GUO Peng¹, LI Heng¹, YANG Lanjun^{2,3}, ZHANG Qingru²

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Baoji Power Supply Company, Shannxi Baoji 721004,

China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Xixian New Area Maiteng Automation Equipment Co., Ltd., Xi'an 712000, China)

Abstract: With the gradual increase of the penetration rate of distributed photovoltaic generation in the distribution network and in case of disconnecting the system power supply during power outage maintenance of distribution network lines with distributed photovoltaic generation, the possibility of distributed photovoltaic generation and loads forming an island system increases, which poses a serious threat to the safety of maintenance staff. In response to the above problems, the feasibility of such two measures as access to the load and simulation of short-circuit faults at the line incoming end which can be taken by the maintenance staff is analyzed from the perspective of maintenance staff. Access to the capacitive load by the maintenance staff at the line incoming end can reduce the cost, reliably make distributed photovoltaic generation operating in islands in the line out of operation, thus ensuring the safety of maintenance personnel.

Keywords: distributed photovoltaic generation; distribution network; island effect; power outage maintenance

0 引言

近年来, 由于化石能源燃烧所带来的一系列气候变化问题和污染环境等问题, 以光伏发电等新能源替代传统化石能源成为未来的发展方向^[1-3]。分布式光伏电源接入配电网容量的增加, 对传统配电网管理提出了新的挑战, 孤岛效应成为一个突出的问题^[4-6]。当配电网进行停电检修切断系统电源时, 分布式光伏电源与负荷组成的孤岛系统仍使线路电压

维持在较高水平, 严重威胁检修人员的人身安全^[7-8]。

针对孤岛效应问题, 大量学者开展了孤岛检测和防孤岛保护的研究。现阶段, 孤岛检测方法分为通信式孤岛检测、被动式孤岛检测和主动式孤岛检测3类^[9-10]。通信式孤岛检测通过通信方式获取电网断路器状态实现孤岛检测^[11-12]。通信式孤岛检测方法虽然没有动作盲区, 但是通信装置的建立有较高的成本。被动式孤岛检测是当电网电压幅值正常范围或者频率在正常范围之外时, 分布式光伏电

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 国网陕西省电力有限公司科技项目(SGSNBJ00FXJS2311237)。

源自动退网^[13-15]。被动式孤岛检测方法不需要额外增加设备或增加控制回路,但是当分布式光伏电源输出功率与负荷功率近似匹配时,孤岛状态下电网电压幅值和频率变化不大,被动式孤岛检测方法存在动作盲区。主动式孤岛检测是分布式光伏电源光伏逆变器主动向电网施加扰动量或谐波等。检测分布式光伏电源是否处在孤岛运行状态,分为频率/功率扰动法和阻抗法两种^[16]。频率/功率扰动法通过在光伏逆变器控制回路注入扰动量使孤岛状态下的电网电压频率或幅值能够偏移出正常范围从而检测出孤岛状态^[17-20]。阻抗法通过向电网注入特定频率的谐波进行阻抗检测从而判断是否处在孤岛状态^[21-23]。主动式孤岛检测方法没有动作盲区,但是目前不是所有分布式光伏电源都具有主动式孤岛检测功能,而是只具备被动式孤岛检测功能。

对于具有被动式孤岛检测和主动式孤岛检测的分布式光伏电源,在进行配电网线路停电检修时,分布式光伏电源可以自行退网,而对于只具有被动式孤岛检测的光伏逆变器,在进行配电网线路停电检修时,如果负荷和光伏逆变器功率近似匹配,分布式光伏电源因被动式孤岛检测存在动作盲区而不退网,持续运行在孤岛状态,使电网电压仍维持在 10 kV 左右,虽然这种情况发生的条件比较极端,一旦发生将严重威胁检修人员的人身安全。

针对不确定分布式光伏电源都具有主动式孤岛检测的情况或者已知有分布式光伏电源只具有被动式孤岛检测的情况,通过在线路进线端采取措施,使光伏逆变器可靠退网,保护检修人员人身安全。在线路进线端可能采取的措施包括接入负荷和模拟短路故障。以下分析了接入负荷和模拟短路故障的可能性,对比了其成本和可行性。本文从检修人员的角度出发,分析了检修人员在线路进线端可以采取的接入负荷和模拟短路故障两种措施的可行性,对比了接入阻性负荷、感性负荷和容性负荷的成本以及接入负荷和模拟短路故障对分布式光伏电源的影响,得到了检修人员在进线端接入容性负荷可以低成本、可靠地使线路中孤岛运行的分布式光伏电源退出运行的结论,有效保障了检修人员的人身安全。

1 孤岛效应产生机理

如图 1 所示分布式光伏电源接入 10 kV 配电网系统,当配电网跳闸或进行线路检修时,断开系统电源,分布式光伏电源继续并网运行向负荷供电,

分布式光伏电源与负荷组成孤岛运行系统,由此产生孤岛效应。图中 R_{L1} 、 L_{L1} 、 R_{L2} 、 L_{L2} 为 10 kV 线路等效阻抗, C_{C1} 、 C_{C2} 为 10 kV 线路对地等效电容,负荷为 RLC 等效并联阻抗,配电网系统电源提供的功率为 $P_s + jQ_s$,分布式光伏电源提供的功率为 $P_{PV} + jQ_{PV}$,负荷消耗的功率为 $P_{load} + jQ_{load}$ 。

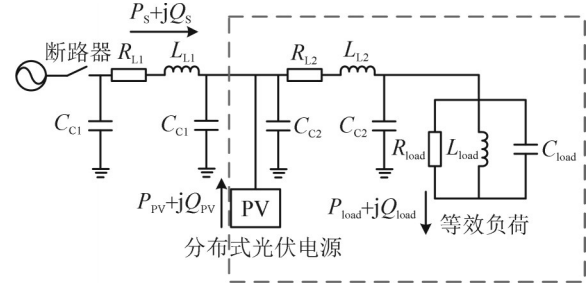


图1 分布式光伏电源接入配电网孤岛效应示意图
Fig.1 Schematic diagram of island effect of access of distributed photovoltaic generation to the distribution network

在配电网正常运行情况下,根据功率守恒,忽略线路对地等效电容的影响,系统电源有功功率、分布式光伏电源有功功率、负荷有功功率关系为

$$P_s + P_{PV} = P_{load} = \frac{U^2}{R_{load}} \quad (1)$$

系统电源无功功率、分布式光伏电源无功功率、负荷无功功率关系为

$$Q_s + Q_{PV} = Q_{load} = \omega C_{load} U^2 - \frac{U^2}{\omega L_{load}} \quad (2)$$

式中: U 为负荷电压; ω 为系统角频率。

当配电网跳闸或进行线路检修时,断开系统电源,分布式光伏电源继续并网运行向负荷供电,分布式光伏电源与负荷组成孤岛运行系统,分布式光伏电源有功功率和负荷有功功率关系为

$$P_{PV} = P'_{load} = \frac{U'^2}{R_{load}} \quad (3)$$

分布式光伏电源有功功率和负荷有功功率关系为

$$Q_{PV} = Q'_{load} = \omega' C U'^2 - \frac{U'^2}{\omega' L} \quad (4)$$

式中: P'_{load} 为孤岛状态下负荷有功功率; Q'_{load} 为孤岛状态下负荷无功功率; U' 为孤岛状态下负荷电压; ω' 为孤岛状态下系统角频率。

一般情况下,负荷功率和分布式光伏电源输出功率不匹配, U' 和 ω' 会偏移出电网电压幅值和频率的正常范围,分布式光伏电源通过被动式孤岛检测即可检测出孤岛状态而退网。在特殊情况下,孤岛状态下 U' 和 ω' 与正常运行下的 U 和 ω 相同,进入被动式孤岛检测的动作盲区,存在如下关系:

$$\begin{cases} U' = U \\ \omega' = \omega \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{PV} = P_{load} \\ Q_{PV} = Q_{load} \end{cases} \quad (6)$$

即正常运行状态下负荷的功率完全由分布式光伏电源提供,负荷与分布式光伏电源功率完全匹配。而分布式光伏电源一般工作在单位功率因数状态,因此 $Q_{PV} = 0$,那么 RLC 负荷存在如下关系:

$$\omega C_{load} U^2 - \frac{U^2}{\omega L_{load}} = 0 \quad (7)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{L_{load} C_{load}}} \quad (8)$$

对于我国电力系统,电网电压正常频率为 50 Hz,即负荷 RLC 等效并联阻抗的谐振频率为 50 Hz 时,负荷与分布式光伏电源功率完全匹配,孤岛状态下电压幅值和频率不变,被动式孤岛检测不动作。

2 接入负荷

分布式光伏电源被动式孤岛检测的范围是:电网电压幅值的正常范围为 0.93~1.07 p.u.,频率的正常范围为 49.3~50.5 Hz,当分布式光伏电源检测到电网电压幅值或频率不在正常范围后,判断为孤岛状态后动作,分布式光伏电源退出运行。因此,从检修人员的角度,对于不确定分布式光伏电源都具有主动式孤岛检测的情况或者已知有分布式光伏电源只具有被动式孤岛检测的情况,可以通过在线路进线端接入负荷使孤岛状态的电网电压幅值或频率偏移出正常范围,从而使分布式光伏电源的被动式孤岛检测动作。检修人员在线路进线端投入 10 kV 高压开关从而接入负荷,10 kV 高压开关投入、接入负荷之后孤岛状态的电网电压幅值或频率偏移出正常范围,被动式孤岛检测在 2 s 内检测出孤岛状态而动作,被动式孤岛检测动作时间是在开关动作之后计算的,因此不受开关动作时间的影响。为了方便说明,以下以分布式光伏电源输出功率 1 MW、负荷功率 $P_{load} = 1$ MW、容性功率 $Q_C = 0.1$ Mvar 感性功率 $Q_L = -0.1$ Mvar 为例。

2.1 接入阻性负荷

在线路进线端接入阻性负荷见图 2,阻性负荷阻值为 R_T ,由式(3)和式(6)可得,接入阻性负荷后,孤岛状态下分布式光伏电源有功功率为

$$P_{PV} = \frac{U^2}{R_{load}} = \frac{U'^2}{R_{load} // R_T} \quad (9)$$

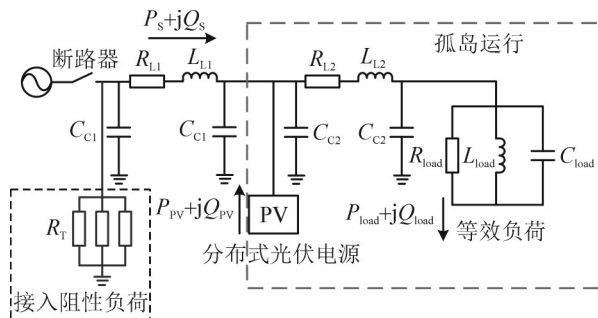


图2 在线路进线端接入阻性负荷
Fig. 2 Access of resistive load to the incoming end of the line

由于 $R_{load} // R_T < R_{load}$,那么根据式(9)接入阻性负荷后负荷电压 $U' < U$,分布式光伏电源并网点电压近似等于负荷电压 U' ,那么当线路进线端接入负荷阻值 R_T 合适时,可以使分布式光伏电源并网点电压幅值下降到正常范围之外,即电压幅值小于 0.93 p.u.,此时 R_T 和 R_{load} 的关系为

$$\frac{R_{load} // R_T}{R_{load}} = \frac{U'^2}{U^2} < 0.93^2 \quad (10)$$

以分布式光伏电源输出功率 1 MW、负荷功率 $P_{load} = 1$ MW、容性功率 $Q_C = 0.1$ Mvar、感性功率 $Q_L = -0.1$ Mvar 为例, $R_{load} = 100 \Omega$ 。代入式(10)得:

$$R_T < \frac{0.93^2}{1 - 0.93^2} R_{load} = 640.19 \Omega \quad (11)$$

由式(11)可得,对于分布式光伏电源接入总容量为 1 MW 的配电网,在进线端接入阻值小于 640.19 Ω 的阻性负荷后,能够使孤岛状态下电网电压幅值小于 0.93 p.u.,分布式光伏电源被动式孤岛检测能够检测出孤岛状态而退网。但是接入阻性负荷的电阻值较小且需耐压 10 kV,这样的电阻显然是不现实的。

2.2 接入感性负荷

在线路进线端接入感性负荷见图 3,感性负荷电感值为 L_T ,由式(4)和式(6)可得,接入感性负荷后,孤岛状态下电网电压角频率公式为

$$\omega' C_{load} U^2 - \frac{U^2}{\omega' L_{load}} - \frac{U^2}{\omega' L_T} = 0 \quad (12)$$

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{L_{load} C_{load}} + \frac{1}{L_T C_{load}}} \quad (13)$$

根据式(13)可得,当接入感性负荷电感值合适时,可以使分布式光伏电源并网点电压频率上升到正常范围之外,即电压频率大于 $f_{max} = 50.5$ Hz,此时 L_T 和 L_{load} 关系为

$$\sqrt{\frac{1}{L_{load} C_{load}} + \frac{1}{L_T C_{load}}} > 2\pi f_{max} \quad (14)$$

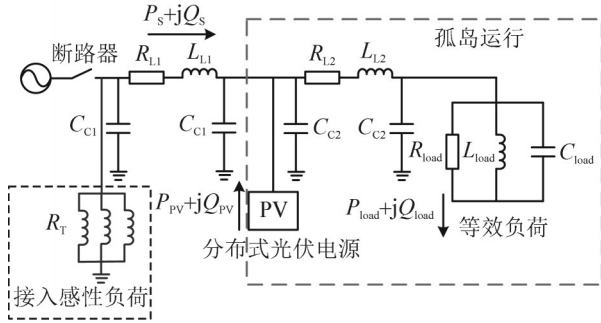


图3 在线路进线端接入感性负荷

Fig. 3 Access of inductive loads to the incoming end of the line

以分布式光伏电源输出功率 1 MW、负荷功率 $P_{\text{load}}=1 \text{ MW}$ 、容性功率 $Q_C=0.1 \text{ Mvar}$ 、感性功率 $Q_L=-0.1 \text{ Mvar}$ 为例, $L_{\text{load}}=3.183 \text{ H}$ 。代入式(14)解得接入感性负荷电感值 L_T 为

$$L_T < \frac{1}{\left[(2\pi f_{\text{max}})^2 - \frac{1}{L_{\text{load}} C_{\text{load}}} \right] C_{\text{load}}} = 158.36 \text{ mH} \quad (15)$$

由式(11)可得,对于分布式光伏电源接入总容量为 1 MW 的配电网,在进线端接入电感值小于 158.36 mH 的感性负荷后,能够使孤岛状态下电网电压频率大于 50.5 Hz,分布式光伏电源被动式孤岛检测能够检测出孤岛状态而退网。但是耐压 10 kV 的电感较少且成本较高。

2.3 接入容性负荷

在线路进线端接入容性负荷,如图 4 所示,感性负荷电容值为 C_T ,由式(4)和式(6)可得,接入容性负荷后,孤岛状态下电网电压角频率公式为

$$\omega' C_{\text{load}} U^2 - \frac{U^2}{\omega' L_{\text{load}}} + \omega' C_T U^2 = 0 \quad (16)$$

$$\omega' = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{load}} (C_{\text{load}} + C_T)}} \quad (17)$$

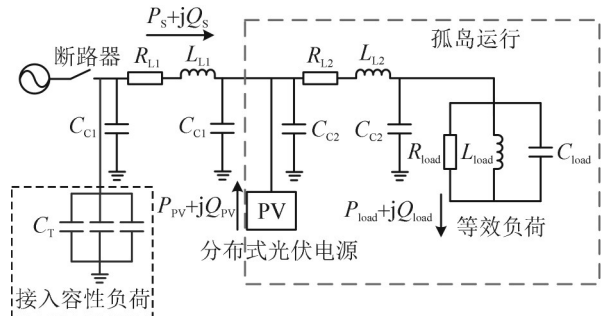


图4 在线路进线端接入容性负荷

Fig. 4 Access of capacitive load to the incoming end of the line

根据式(17)可得,当接入容性负荷电容值合适时,可以使分布式光伏电源并网点电压频率下降到正常范围之外,即电压频率小于 $f_{\text{min}}=49.3 \text{ Hz}$,此时

C_T 和 C_{load} 存在如下关系:

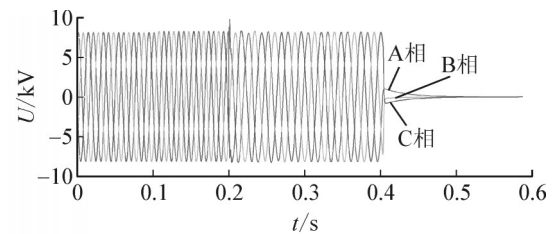
$$\frac{1}{\sqrt{L_{\text{load}} (C_{\text{load}} + C_T)}} < 2\pi f_{\text{min}} \quad (18)$$

以分布式光伏电源输出功率 1 MW、负荷功率 $P_{\text{load}}=1 \text{ MW}$ 、容性功率 $Q_C=0.1 \text{ Mvar}$ 、感性功率 $Q_L=-0.1 \text{ Mvar}$ 为例, $C_{\text{load}}=3.183 \text{ }\mu\text{F}$ 。代入式(18)解得接入感性负荷电容值 C_T 为

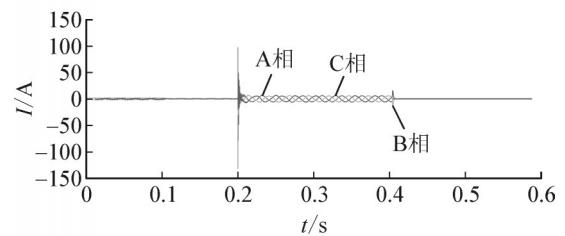
$$C_T > \frac{\frac{1}{(2\pi f_{\text{min}})^2} - L_{\text{load}} C_{\text{load}}}{L_{\text{load}}} = 91 \text{ nF} \quad (19)$$

由式(19)可得,对于分布式光伏电源接入总容量为 1 MW 的配电网,在进线端接入电容值大于 91 nF 的容性负荷后,能够使孤岛状态下电网电压频率小于 49.3 Hz,分布式光伏电源被动式孤岛检测能够检测出孤岛状态而退网。额定电压 10 kV、 μF 级高压电容成本较低,较易选取合适的电容值用于在线路进线端接入容性负荷。

在 Matlab/Simulink 中建立分布式光伏电源接入 10 kV 配电网系统仿真模型,在仿真时间的 0.1 s 断开系统电源,在仿真时间的 0.2 s 在线路进线端接入电容值 C_T 为 3 μF 容性负荷,分布式光伏电源并网点电压和输出电流波形见图 5,在进线端接入容性负荷后分布式光伏电源并网点电压频率下降到 38.47 Hz,分布式光伏电源被动式孤岛检测检测出孤岛状态,在 0.2 s 后退出运行,分布式光伏电源退出运行后电网电压在 0.1 s 后降为零。



(a) 分布式光伏电源并网点电压波形



(b) 分布式光伏电源输出电流波形

图5 分布式光伏电源并网点电压和输出电流波形

Fig. 5 Voltage and output current waveform of distributed photovoltaic generation PCC

因此,检修人员可以通过在线路进线端接入容性负荷使孤岛状态下电网电压频率下降到分布式光伏电源被动式孤岛检测可以动作的范围,使孤岛状态的

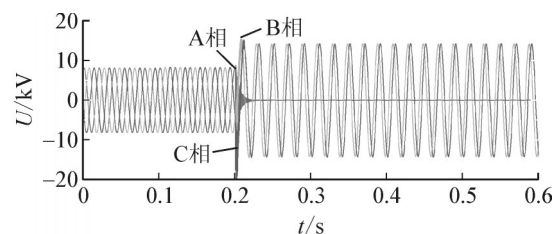
分布式光伏电源退出运行,保障检修人员的人身安全,接入容性负荷的电容值按照式(18)和式(19)计算得到。

3 模拟短路故障

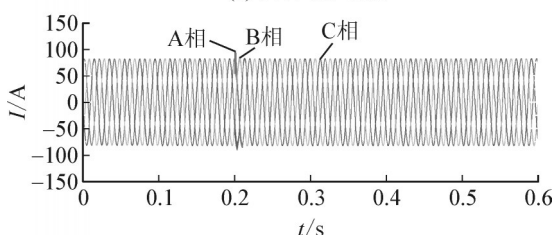
除了在线路进线端接入负荷之外,检修人员能够采取的措施还包括在线路进线端模拟短路故障,根据分布式光伏电源并网的技术规定,具有低电压穿越能力的光伏逆变器在并网点跌落到0时在0.15 s后脱网,在并网点电压跌落到0.2 p.u.时0.625 s后脱网,在0.2~0.9 p.u.时在2 s后脱网,因此光伏逆变器在短路故障后最长脱网时间为2 s,可以通过在线路进线端模拟短路故障,使光伏逆变器自行退网。检修人员通过在线路进线端投入10 kV高压开关从而模拟短路故障,10 kV高压开关投入、模拟短路故障之后,光伏逆变器并网点电压跌落,在开关投入之后经过最长脱网时间自行退网。以下分析了模拟单相接地故障和模拟三相短路故障的可行性。

3.1 模拟单相接地故障

由于10 kV系统一般为中性点不接地系统,且分布式光伏电源依据不改变系统接地方式的原则选用 Δ/Y_n 升压变压器接入公共电网,10 kV侧为 Δ 接法,400 V侧为 Y_n 接法,因此分布式光伏电源进入孤岛状态后,在线路进线端模拟单相接地故障时,10 kV中性点不接地系统的零序电流很小,分布式光伏电源接入点低压侧电压变化很小,分布式光伏电源并网点电压几乎不变。在Matlab/Simulink分布式光伏电源接入10 kV配电网系统仿真模型进行仿真,在0.1 s断开系统电源,0.2 s在线路进线端模拟单相接地故障,负荷电压电流波形见图6,分布式光伏电源并网点电压波形见图7。



(a) 负荷电压波形



(b) 负荷电流波形

图6 负荷电压电流波形

Fig. 6 Waveform of load voltage and current

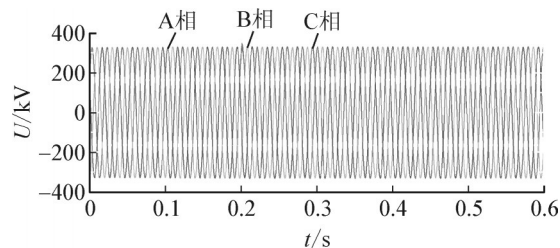


图7 分布式光伏并网点电压波形(低压侧)

Fig. 7 Voltage waveform of distributed photovoltaic generation at PCC (Low voltage side)

根据以上分析和仿真结果可以看出,分布式光伏电源和负荷进入孤岛状态后,在线路进线端模拟单相接地故障后,分布式光伏电源接入点低压侧电压变化很小,没有跌落到0.9 p.u.以下,不足以使分布式光伏电源退网。

3.2 模拟三相短路故障

当分布式光伏电源和负荷进入孤岛状态后,在线路进线端模拟三相短路故障,分布式光伏电源和负荷孤岛系统三相短路故障网络见图8。

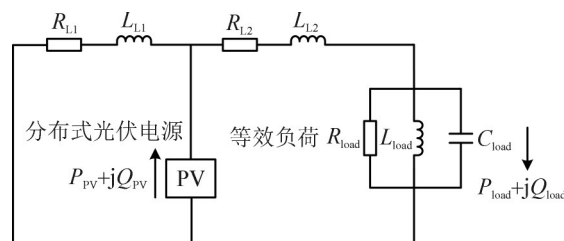


图8 分布式光伏电源和负荷孤岛系统三相短路故障网络

Fig. 8 Three-phase circuit fault network of distributed photovoltaic generation and load island system

假设分布式光伏电源和负荷孤岛系统三相短路后能够正常运行,分布式光伏电源在并网点电压发生跌落后进入低电压穿越状态,低电压穿越期间分布式光伏电源输出无功功率^[24],根据瞬时功率理论和分布式光伏电源低电压穿越控制策略,低电压穿越期间分布式光伏电源输出的无功功率为

$$Q_{PV} = \frac{3}{2} U I_q^* \quad (20)$$

式中: I_q^* 为分布式光伏电源逆变器无功电流参考值。

那么根据功率守恒,无功功率关系为

$$\omega' C_{load} U^2 - \frac{U^2}{\omega' L_{load}} + Q_L = \frac{3}{2} U I_q^* \quad (21)$$

式中: Q_L 为线路阻抗消耗的无功功率。

通过求解方程(21)发现,只有当 ω' 取非常大时方程才成立,超过了分布式光伏电源的输出范围,因此,分布式光伏电源和负荷进入孤岛状态后,在线路进线端模拟三相短路故障,分布式光伏电源会直接因输出不满足条件而直接退出运行。

在 Matlab/Simulink 分布式光伏电源接入 10 kV 配电网系统仿真模型进行仿真,在 0.1 s 断开系统电源,0.2 s 在线路进线端模拟三相短路故障,分布式光伏电源并网电压波形和输出电流见图 9,在线路进线端模拟三相短路故障后分布式光伏电源已不能稳定输出,在实际运行中会直接退出运行。

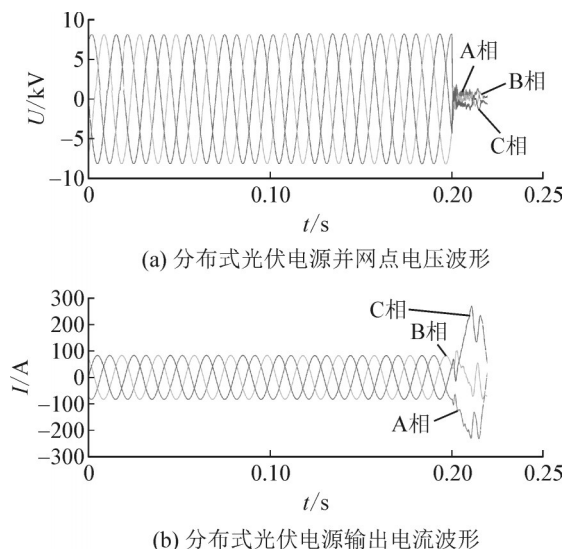


图9 分布式光伏电源并网点电压和输出电流波形
Fig. 9 Voltage and output current waveform of distributed photovoltaic generation at PCC

通过以上分析,分布式光伏电源与负荷进入孤岛状态后,可以通过在线路进线端模拟三相短路故障使分布式光伏电源退网,由于逆变器惯性很小,在线路进线端短路之后电网电压水平会立即降低,分布式光伏电源逆变器输出电流参考值增大,达到分布式光伏电源逆变器允许输出最大电流,分布式光伏电源进入限流,在线路进线端模拟三相短路故障对分布式光伏电源存在一定影响,相比之下在线路进线端接入容性负荷对分布式光伏电源影响较小。

4 结语

本文从检修人员的角度出发,分析了检修人员在线路进线端可以采取的接入负荷和模拟短路故障两种措施的可行性,得到以下结论:

1)在线路进线端接入阻性负荷能够使分布式光伏电源并网点电压幅值小于正常范围而由被动孤岛检测检测出孤岛状态后退出运行;在线路进线端接入感性负荷能够使分布式光伏电源并网点电压频率大于正常范围而由被动孤岛检测检测出孤岛状态后退出运行;在线路进线端接入容性负荷能够使分布式光伏电源并网点电压频率小于正常范围而由被动孤岛检测检测出孤岛状态后退出运行。但是接入容性负荷的成本远小于接入阻性负

荷和感性负荷。

2)在线路进线端模拟单相接地故障分布式光伏电源并网点电压变化很小不足以由被动孤岛检测检测出孤岛状态后退出运行;在线路进线端模拟三相接地故障分布式光伏电源因不能维持孤岛运行而退出运行。

3)在线路进线端模拟三相接地故障会使分布式光伏电源的逆变器输出最大电流进入限流,对分布式光伏电源逆变器有一定影响,而在线路进线端接入容性负荷对分布式光伏电源影响较小。在线路进线端接入容性负荷是检修人员进行分布式光伏电源接入线路停电检修时的最优解。

参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [2] 陈国平,董昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5505.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505.
- [3] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6254-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6254-6259.
- [4] 陈巧地,张兴,李明,等. 基于阻抗辨识的下垂控制并网逆变器孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(7):123-129.
CHEN Qiaodi, ZHANG Xing, LI Ming, et al. Impedance identification based islanding detection method for grid-connected inverter with droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 123-129.
- [5] 赵禹灿,姜旭,孙福寿,等. 基于谐波特性的光伏孤岛与低电压穿越同步检测方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(3):41-50.
ZHAO Yuan, JIANG Xu, SUN Fushou, et al. Simultaneous detection method for photovoltaic islanding and low-voltage-ride-through based on harmonic characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 41-50.
- [6] 李军,张威,张玉琼,等. 基于XGBoost算法的并网光伏

- 系统智能孤岛检测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(3): 144-149.
- LI Jun, ZHANG Wei, ZHANG Yuqiong, et al. Intelligent islanding detection method for grid-connected photovoltaic system based on XGBoost algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3): 144-149.
- [7] 陶维青, 王乐勤, 顾芝瑕, 等. SVD和神经网络在孤岛检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 28-34.
- TAO Weiqing, WANG Leqin, GU Zhixia, et al. Application of SVD and neural network in islanding detection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 28-34.
- [8] 杨恢东, 吴浪, 李心茹, 等. 改进的周期主动频移式孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 50-55.
- YANG Huidong, WU Lang, LI Xinru, et al. An improved islanding detection method based on alternate active frequency drift[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 50-55.
- [9] 戴志辉, 何静远, 于礼瑞, 等. 基于谐波电压突变的无功功率扰动孤岛检测法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(3): 10-20.
- DAI Zhihui, HE Jingyuan, YU Lirui, et al. Island detection method of reactive power disturbance based on harmonic voltage mutation[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(3): 10-20.
- [10] 张军, 张新慧, 彭克, 等. 基于零序电压正反馈控制的多分布式电源孤岛检测方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3040-3050.
- ZHANG Jun, ZHANG Xinhui, PENG Ke, et al. Multi-distributed generation island detection method based on zero-sequence voltage positive feedback control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3040-3050.
- [11] 刘晟源, 林振智, 李金城, 等. 电力系统态势感知技术研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 229-239.
- LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, LI Jincheng, et al. Review and prospect of situation awareness technologies of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 229-239.
- [12] 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.
- 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.
- [13] MOTTER D, VIEIRA J C M. Improving the islanding detection performance of passive protection by using the under-voltage block function[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 184: 106293.
- [14] 吕干云, 吴启宇, 吴晨媛, 等. 基于双向谐波电压变动的光伏并网孤岛检测[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 194-199.
- LYU Ganyun, WU Qiyu, WU Chenyuan, et al. Islanding detection of grid-connected PV system based on bi-direction voltage harmonic variation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 194-199.
- [15] 邓聪, 江亚群, 黄纯. 基于不同次数谐波下品质因数一致性的孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 204-210.
- DENG Cong, JIANG Yaqun, HUANG Chun. Islanding detection method based on consistency of quality factor under different harmonic orders[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 204-210.
- [16] 徐化博, 陈羽, 徐丙垠, 等. 基于信号同步注入的多源配网阻抗测量防孤岛保护方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-19 [2024-03-21].
- XU Huabo, CHEN Yu, XU Bingyin, et al. Anti-islanding protection method for multi-source distribution network impedance measurement based on signal synchronization injection[J/OL]. Proceeding of the CSEE: 1-19 [2024-03-21].
- [17] POURBABAK H, KAZEMI A. Islanding detection method based on a new approach to voltage phase angle of constant power inverters[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(5): 1190-1198.
- [18] CHEN X, LI Y. An islanding detection method for inverter-based distributed generators based on the reactive power disturbance[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2016, 31(5): 3559-3574.
- [19] 王晓寰, 张旭东, 郭红强. 基于相位簇扰动的下垂控制并网逆变器孤岛检测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1728-1738.
- WANG Xiaohuan, ZHANG Xudong, GUO Hongqiang. Islanding detection of droop controlled grid connected inverter based on phase cluster disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1728-1738.
- [20] 宋立新, 刘斯琦, 张楠楠. 参数自适应AFDPF算法的光伏并网系统孤岛检测[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(2): 102-109.
- SONG Lixin, LIU Siqi, ZHANG Nannan. Island detection for photovoltaic grid-connected systems based on parameter adaptive AFDPF algorithm[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(2): 102-109.
- [21] 谢少军, 季林, 许津铭. 并网逆变器电网阻抗检测技术综述[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 320-326.
- XIE Shaojun, JI Lin, XU Jinming. Review of grid impedance estimation for grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 320-326.

- [22]叶林,苗丽芳,苏剑,等.基于阻抗特性的IIDG孤岛保护与故障穿越协调运行方法[J].电力系统自动化,2017,41(18):67-73.

YE Lin, MIAO Lifang, SU Jian, et al. Impedance characteristics based coordinated operation method for islanding protection and fault ride-through of inverter interfaced distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017;41(18), 67-73.

- [23]LIU Menghu, ZHAO Wei, WANG Qing, et al. Compatibility issues with irregular current injection islanding detection methods in multi-DG units equipped with grid-connected transformers[J]. IEEE transactions on power electronics, 2022. 37(3):3599-3616.

- [24]乔一达,吴红斌,吴通华,等.含逆变型分布式电源的配电网分区域电流保护[J].电工技术学报,2022,37(S1):134-144.

QIAO Yida, WU Hongbin, WU Tonghua, et al. A partitioned current protection scheme of distribution network

with inverter interfaced distributed generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1):134-144.

作者简介:

张健(1992—),男,助理工程师,主要从事电力系统及其自动化研究工作。E-mail:243415280@qq.com。

李允博(1999—),男,硕士生,主要从事有源配电网研究工作。E-mail:liyunbo@stu.xjtu.edu.cn.

郭鹏(1977—),男,主要从事电力系统及其自动化研究工作。E-mail:gopng@163.com。

李衡(1988—),男,主要从事电力系统及其自动化研究工作。E-mail:870602614@qq.com。

杨兰均(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事新型电力系统和脉冲功率技术研究工作。E-mail:yanglj@mail.xjtu.edu.cn。

张庆如(2000—),男,硕士生,主要从事配电网仿真研究工作。E-mail:18335798325@stu.xjtu.edu.cn。

(上接第75页)

作者简介:

都磊(1983—),女,工程师,从事电力系统继电保护工作。

周东杰(1983—),男,高级工程师,主要从事继电保护领域嵌入式硬件平台研究。E-mail:xjtc_zhoudongjie@126.com。

郝慧贞(1982—),女,高级工程师,主要从事电力系统继电保护工作。E-mail:hhz1030@163.com。

牟涛(1981—),男,高级工程师,主要从事电力系统继电保护工作。E-mail:mutao_12@163.com。