

光伏电站进孤岛后系统稳定性风险量化评估

孙鹏伟, 张野, 张帆, 杨健, 李俊杰

(直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东 广州 510530)

摘要:光伏电站进入孤岛后可能导致系统的稳定性风险,特别是在电网故障导致光伏电站非计划进孤岛且孤岛检测装置未能及时动作的情况下。为了评估该风险,首先对功率差额、光伏渗透率和电机惯性影响光伏电站非计划进孤岛后系统短时间内稳定特性的机理进行了理论分析。随后,建立了光伏电站的电磁暂态模型,并据此在PSCAD/EMTDC上搭建了含光伏电站的大理电网模型,通过软件仿真验证了理论分析的结论。最后,提出了光伏电站进孤岛后系统稳定性风险量化评估指标和方法,为稳定性风险的评估提供了理论依据。

关键词:光伏电站;非计划孤岛;稳定性风险;电磁暂态仿真;量化评价指标

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)06-0087-05

0 引言

我国光照资源丰富,近些年来由于政策扶持,光伏发电产业快速发展。光伏发电系统根据规模和分布方式分为大型集中式和小型分布式两种。前者容量较大,通常可达兆瓦级别,一般并入110 kV或220 kV电网^[1-2];后者容量相对较小,一般并入10 kV以下配电网。

电网发生故障导致断路器动作后,光伏电站有可能和近区电源以及负荷一起进入孤岛系统,这种非计划孤岛可能会对电力设备和运行人员的安全造成危害^[3-4]。通常光伏并网逆变器会配置孤岛检测装置,然而现用的孤岛检测算法均存在盲区和响应延迟,检测稳定性不高^[5-8]。光伏电站非计划进孤岛后,检测装置可能难以识别孤岛状态,或者由于装置的响应延迟,光伏电站短时间内将保持原来的控制模式继续对孤岛内的负荷供电,存在严重的稳定性风险。文献[9]给出了若干含分布式发电的孤岛安全性评估标准,但在实际运行中这些标准的判定计算复杂,耗时较长,且类似“易于恢复”这样的标准难以量化,不能满足简单快速判别孤岛系统稳定性的要求。

本文首先分析了光伏电站进孤岛后稳定性风险的相关影响因素,随后基于之前学者在光伏建模方面的研究成果,在PSCAD/EMTDC上搭建了含光伏电站的改进版大理电网电磁暂态模型,并通过各种工况仿真验证了理论分析的结论。最后,提出了含光伏电站的孤岛系统稳定性风险量化评价指标,可用于简单快速地对稳定性风险做出评估。

收稿日期:2018-07-09;修回日期:2018-08-14

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(CSGTR-K163012)

1 光伏电站进入孤岛后的频率及电压稳定性分析

在非计划进孤岛且孤岛判别装置未及时动作的情况下,光伏电站将会继续对孤岛系统内的负荷供电,此时孤岛系统可能存在频率和电压稳定性风险。孤岛系统内电机转子的运动方程如下:

$$T_J \frac{d\omega^*}{dt} = \frac{P_s^* - P_L^* - P_D^*}{\omega^*} \quad (1)$$

式中:上标*代表标么值; P_s 为孤岛系统内电源提供的有功功率; P_L 为孤岛内有功负荷; P_D 为线路及电机阻尼损耗; ω 为电机机械转速,其变化将引起系统频率改变; T_J 为孤岛系统等效惯性时间常数。

由式(1)可知,光伏电站进入孤岛后,如果存在有功功率不平衡,系统内的电机转子转速将会发生变化,系统频率也会随之变化。如果有功功率差额较小,发电机组调速系统可以将系统频率调节到一个新的稳态;但如果有功功率差额超过了发电机的调节范围,孤岛系统将会发生频率失稳。对于含光伏电站的孤岛系统,由于光伏出力波动性大,难以提供持续稳定的有功功率输出,因此更容易出现源荷有功功率差额较大的现象。

另一方面,进入孤岛的瞬间,即使有功功率差额较小,如果系统惯性时间常数过小,系统频率也有可能失稳。光伏电站的惯性时间常数近似为0,孤岛系统的惯性主要来自于同步发电机和负荷侧的感应电机,故:

$$T_J = \frac{\sum_{i=1}^n T_{J,i} S_i}{S_B} \quad (2)$$

式中: S_i 和 $T_{J,i}$ 分别为第*i*台电机的额定容量和惯

性时间常数; S_B 为基准容量, 此处取 $100 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。

对于光伏渗透率为 100% 的孤岛系统, 在进入孤岛瞬间微小的有功功率差额就可能导致频率的失稳。如果要降低系统的稳定性风险, 孤岛内须含有电机, 且 T_J 越大, 频率稳定性越好。

除了频率稳定性以外, 还须考虑电压稳定性。光伏电站接入电网以后, 并网点电压如下^[10]:

$$U_s = U + \frac{(P_s - P_L)R + (Q_s - Q_L)X}{U} \quad (3)$$

式中: Q_s 为孤岛系统内电源提供的无功功率; Q_L 为无功负荷; U 为电网电压; U_s 为并网点电压; R, X 分别为并网线路的电阻、电抗。

系统进入孤岛后, 电网不再为孤岛系统提供电压支撑, 由式(3), 电压能否保持稳定与功率差额有关。对于并入 110 kV 电压等级的集中式光伏电站, 输电线路电阻较小, 可以认为电压稳定性仅与无功功率差额有关。对于并入配电网的分布式光伏, 由于配电线路电阻较大, 此时有功功率差额也会影响电压稳定性。光伏逆变器在并网模式下通常采用 PQ 控制, 且一般无功功率参考值取 0, 不具备电压支撑能力。进入孤岛后, 如果孤岛判别装置失效, 光伏逆变器仍然在 PQ 控制模式下, 则不能为孤岛系统提供电压支撑, 此时对于光伏渗透率为 100% 的孤岛系统, 其电压通常都会失稳。

综上所述, 光伏电站进入孤岛后频率稳定性与有功功率差额、光伏渗透率和系统等效惯性时间常数有关。电压稳定性与无功功率差额和光伏渗透率有关; 对于配电网来说, 电压稳定性还可能和有功功率差额有关。

2 光伏电站电磁暂态建模

为了研究光伏电站非计划进孤岛后系统短时间内的稳定特性, 首先对光伏电站进行电磁暂态建模。本文中光伏电站采用两级式光伏并网系统, 由光伏阵列、逆变器、交流电路和控制电路 4 部分组成^[11], 其优点是宽范围直流输入, 交流侧并网电压灵活、效率高^[12]。

光伏阵列的 $U-I$ 输出特性如下^[13-14]:

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{U}{C_2 U_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} \quad (4)$$

其中:

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}\right) \quad (5)$$

$$C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \right]^{-1} \quad (6)$$

式中: I_{sc} 为短路电流; U_{oc} 为开路电压; I_m 为最大功率点电流; U_m 为最大功率点电压。

最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 控制的目的是在光照和温度等条件变化的情况下改变阵列的输出电压, 使其工作在最大功率点处, 尽可能提高光伏电池的效率。通常使用 boost 变换电路来实现 MPPT, 将光伏阵列的实际输出电压和 U_{mppt} 进行比较, 经过比例环节后, 采用脉冲宽度调制 (power width modulation, PWM) 控制绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 的导通和关断。目前, 根据算法的特征和具体实现过程, 可将 MPPT 方法分为 3 大类^[15-18]:

(1) 基于参数选择方式的间接控制法, 主要有恒电压跟踪法、开路电压比例系数法等;

(2) 基于采样数据的直接控制法, 如扰动观察法、电导增量法等;

(3) 基于现代控制理论的人工智能控制法, 如模糊逻辑控制法、神经网络法等。

其中, 直接控制法因为速度快、精度高, 在光伏建模中最为常用。本文采用扰动观察法。

逆变器的控制采用基于电网侧电压定向的向量控制方案, 实现网侧有功功率和无功功率的解耦控制。目前并网逆变器的控制策略以具有内外环结构的双环控制方式为主, 在并网状态下通常采用 PQ 控制, 无功功率参考值一般取为 0。

3 仿真分析

首先在 PSCAD/EMTDC 上搭建光伏电站模型, 其中每个光伏阵列的额定出力为 100 kW。每个光伏阵列均经过 boost 电路和并网逆变器连接到 180 V 交流母线, 随后经 2 级变压器升压到 35 kV 后并入大理电网, 如图 1 所示。

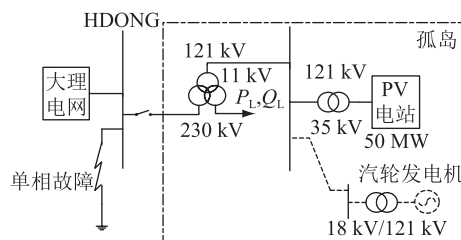


图 1 仿真模型示意图
Fig.1 Simulation model

本文只关注系统进孤岛后 3 s 内的稳定特性, 因此假定温度和光照在仿真过程中保持不变。仿真进行到 3 s 时大理电网 220 kV HDONG 母线发生单相故障, 0.1 s 后断路器动作导致光伏电站和附近电网进入孤岛, 孤岛判别装置未动作, 并网逆变器

保持 PQ 控制方式。

文章设置了 7 种不同的仿真工况,具体参数见表 1,工况 1、2、3 仿真结果如图 2 所示。

表 1 仿真工况参数
Tab.1 Parameters of simulation conditions

工况	光伏电站有功出力/MW	孤岛内有功负荷/MW	孤岛内无功负荷/Mvar	光伏渗透率/%
1	50	45	0	100
2	50	10	0	100
3	50	45	10	100
4	10	90	0	11
5	50	90	0	56
6	70	90	0	77.8
7	50	90	0	56

工况	孤岛内同步发电机数/台	同步发电机惯性时间常数/s	同步发电机额定容量/(MV·A)
1	0		0
2	0		0
3	0		0
4	1	10.5	100
5	1	10.5	100
6	1	10.5	100
7	1	5	100

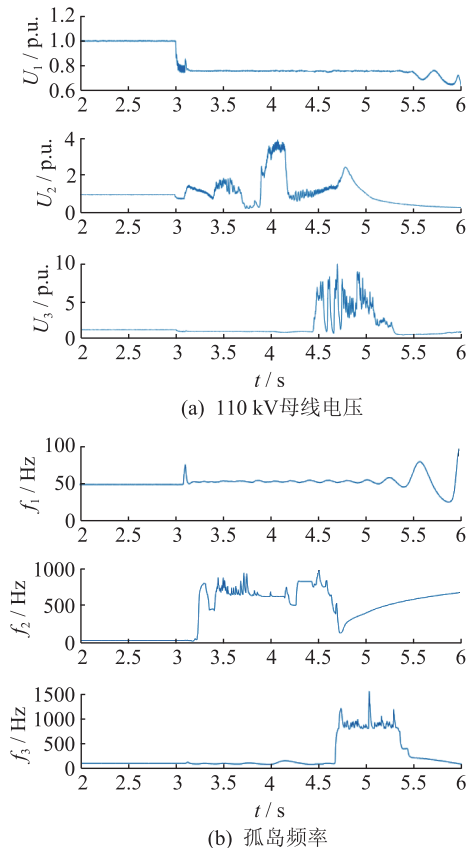


图 2 工况 1、2、3 的仿真结果
Fig.2 Simulation results of operating conditions 1,2,3

比较工况 1 和工况 2 的仿真结果可以看出:虽然两种工况下系统最终都失稳了,但从失稳的时间和程度可以看出工况 1 的稳定性风险要小于工况 2。说明光伏电站非计划进孤岛后,源荷有功功率相差越大,孤岛系统频率稳定风险越高。

对比工况 1 和工况 3 的仿真结果可以看出:虽然两种工况下系统最终都失稳了,但从失稳的时间和程度同样可以看出工况 1 的稳定性风险要小于工况 3。说明孤岛系统内源荷无功功率差额较大时,系统电压稳定性风险增加。同时电压失稳导致光伏有功出力和有功负荷变化,造成频率失稳。

综合工况 1、2、3 的仿真结果可以看出,当孤岛系统光伏渗透率为 100% 时,系统必然会失稳。为了分析光伏渗透率对孤岛系统稳定性的影响,设置了工况 4、工况 5 和工况 6。仿真结果如图 3 所示。

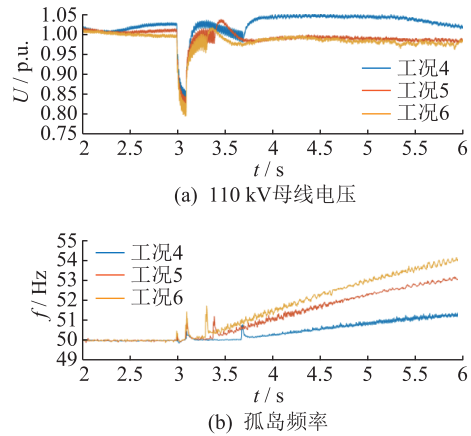


图 3 工况 4、5、6 的仿真结果

Fig.3 Simulation results of operating condition 4,5,6

由图 3 可以看出,当孤岛内含有同步发电机时,由于同步发电机的励磁调节作用,交流系统电压可以保持稳定。工况 4、5、6 的孤岛系统频率在 6 s 时分别为 51.4 Hz,53.2 Hz 和 54.3 Hz,可见光伏渗透率越低,孤岛系统的频率越稳定。

最后,为了研究等效惯性时间常数对孤岛系统稳定性的影响,在仿真中设置了工况 7。仿真结果如图 4 所示。

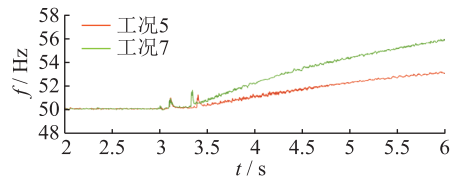


图 4 工况 5 和工况 7 的仿真结果

Fig.4 Simulation results of operating condition 5 & 7

从图 4 可以看出,同步发电机的惯性时间常数越大,孤岛系统的频率稳定特性越好。

4 含光伏的孤岛系统稳定性风险量化指标

由上文分析和仿真可知,光伏电站非计划进孤岛后孤岛系统短时间内的稳定特性与源荷有功、无功功率差值、光伏渗透率以及系统内电机惯性时间常数有关。为了进一步量化评估稳定性风险,本文引入了含光伏发电的孤岛系统稳定性风险量化指标,其表达式如下:

$$I_{risk} = \frac{e^A}{(1-\alpha)T_J^*} \quad (7)$$

$$A = \frac{(P_s - P_L)^2 + (Q_s - Q_L)^2}{S_s S_L} \quad (8)$$

$$T_J^* = \frac{T_J}{T_J^{ref}} \quad (9)$$

式中: S_s 是孤岛系统内电源容量; S_L 为负荷容量; α 为光伏渗透率; T_J^* 为系统等效惯性时间常数标幺值; T_J^{ref} 为系统等效惯性时间常数参考值,取 10 s。

I_{risk} 的分母反映光伏渗透率和同步发电机惯性时间常数对孤岛系统稳定性风险的影响。分子使用自然指数一方面是为了防止 I_{risk} 的分子恒等于 0, 难以体现分母中的参数对量化指标的影响, 另一方面是因为孤岛内源荷的有功功率差值和无功功率差值对孤岛系统稳定性风险的影响较为显著。 I_{risk} 越大, 孤岛系统稳定性风险越大。

将第 3 节中的 7 种仿真工况带入式(7), 计算 I_{risk} , 结果见表 2。

表 2 各种工况下的稳定性风险量化指标
Tab.2 Stability risks quantitative I under the previous eight operating conditions

工况	I_{risk}	是否失稳	6 s 时孤岛系统频率/ Hz
1	∞	是	90.2
2	∞	是	>100
3	∞	是	>100
4	1.07	否	51.4
5	2.16	否	53.2
6	4.29	否	54.3
7	4.55	否	56.1

由表 2 可知, I_{risk} 可以很好地反映光伏电站非计划进孤岛后短时间内孤岛系统的稳定性风险。 I_{risk} 值越大, 系统稳定性风险越高。一般来说, 当功率没有差额, 即 A 为 0, α 接近于 0 时, 系统稳定性最好, 此时 I_{risk} 值在 1 附近, 孤岛系统频率偏离 50 Hz 的幅度小, 电压稳定后进入孤岛前的数值范围。当 I_{risk} 大于 2 时, 进入孤岛 3 s 后系统频率偏离超过 ± 3 Hz。当孤岛系统内 α 等于 1 时, I_{risk} 为无穷大, 表明系统一定会失稳。

5 结论

本文通过理论分析和电磁暂态仿真表明, 光伏电站非计划进孤岛后, 孤岛内源荷有功、无功功率差值、光伏渗透率以及同步发电机惯性时间常数都会对孤岛系统的频率和电压稳定性产生影响, 功率差额越大、光伏渗透率越高、同步发电机惯性越小时, 孤岛系统稳定性风险越高。据此, 本文给出了含光伏发电的孤岛系统稳定性风险量化指标, 并将仿真的 7 种工况代入其中, 结果表明该指标可以反映光伏电站非计划进孤岛后短时间内孤岛系统的稳定性风险。量化指标值越大, 风险越高, 指标等于 1 时系统稳定性最好。

参考文献:

- [1] 赵伟然, 李光辉, 何国庆, 等. 光伏电站经 VSC-DC 并网拓扑及其控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(11):41-45.
ZHAO Weiran, LI Guanghui, HE Guoqing, et al. Topology of connecting photovoltaic power station to power grid via VSC-HVDC and its control strategy[J]. Power System Technology, 2012, 36(11):41-45.
- [2] 许崇新. 大型光伏电站接入系统继电保护研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
XU Chongxin. Research on protection of power grid with large photovoltaic power station [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [3] 赵子琼. 分布式光伏发电系统孤岛检测技术的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
ZHAO Ziqiong. Research on islanding detection of distributed photovoltaic power generation system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [4] 陆以军, 侯梅毅. 基于同步发电机的分布式电源孤岛检测方法研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2):66-70.
LU Yijun, HOU Meiyi. Research on islanding detection method for DG based on synchronous generator [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(2): 66-70.
- [5] 谢东, 张兴, 曹仁贤. 参数自适应 SFS 算法多逆变器并网孤岛检测技术[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21):89-95.
XIE Dong, ZHANG Xing, CAO Renxian. Islanding detection technology for multiple grid-connected inverters based on adaptive parameters SFS algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21):89-95.
- [6] 刘芙蓉, 王辉, 康勇, 等. 滑模频率偏移法的孤岛检测盲区分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2):178-182.
LIU Furong, WANG Hui, KANG Yong, et al. Non-detection zone of slip-mode frequency shift method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 178-182.
- [7] 蒋燕, 张艳, 张祖丽, 等. 基于组合决策的孤岛检测技术在微电网中的应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(3):66-70.
JIANG Yan, ZHANG Yan, ZHANG Zuli, et al. Applications of

- islanding detection based on combined decision in microgrid [J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2012, 31(3):66-70.
- [8] 刘健, 崔德民, 李晓博. 常见孤岛检测盲区描述方法[J]. *山东电力技术*, 2013, 196(6):39-42.
- LIU Jian, CUI Demin, LI Xiaobo. Review of common methods for islanding non-detection zones [J]. *Shandong Electric Power Technology*, 2013, 196(6):39-42.
- [9] 王杰, 张振. 分布式发电条件下孤岛划分及运行控制的研究[J]. *江苏电机工程*, 2010, 29(6):11-16.
- WANG Jie, ZHANG Zhen. Research on island partition and operation control with distributed generation [J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2010, 29(6):11-16.
- [10] 赵伟然, 汪海蛟, 李光辉, 等. 分布式光伏并网电压和功率因数协调控制策略[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(6):20-26.
- ZHAO Weiran, WANG Haijiao, LI Guanghui, et al. Voltage and power factor coordination control for distributed photovoltaic integration [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(6):20-26.
- [11] 石振刚. 并网光伏发电系统对配电网影响的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2011.
- SHI Zhengang. Research of impact of grid-connected photovoltaic power generation system on distribution network [D]. Beijing:North China Electric Power University, 2011.
- [12] 郭勇, 李勇, 皇甫星星, 等. 两级式光伏发电系统低电压穿越控制策略研究[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(6):7-13.
- GUO Yong, LI Yong, HUANGFU Xingxing, et al. Research on LVRT control strategy of two-stage PV power system [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(6):7-13.
- [13] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. *太阳能学报*, 2001(4):409-412.
- SU Jianhui, YU Shijie, ZHAO Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2001(4):409-412.
- [14] BRANO V L, CIULLA G. An efficient analytical approach for obtaining a five parameters model of photovoltaic modules using only reference data [J]. *Applied Energy*, 2013, 111:894-903.
- [15] 李娟, 孙莹. 光伏发电 MPPT 控制方法研究综述[J]. *机电一体化*, 2013(2):13-18.
- LI Juan, SUN Ying. Study of maximum power point tracking control methods for photovoltaic power generation [J]. *Mechatronics*, 2013(2):13-18.
- [16] ESRAM T, CHAPMAN P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(2):439-449.
- [17] SERA D, MATHE L, KERKES T, et al. On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, 3(3):1070-1078.
- [18] 黄周林, 武剑, 栗秋华. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J]. *高电压技术*, 2008(6):1145-1154.
- HUANG Zhoulin, WU Jian, LI Qihua, et al. Survey of maximum power point tracking techniques for photovoltaic array [J]. *High Voltage Engineering*, 2008(6):1145-1154.

作者简介:



孙鹏伟

孙鹏伟(1992—),男,硕士,助理工程师,从事柔性直流输电技术和光伏发电并网技术研究工作(E-mail: sunpw@csg.cn);

张野(1986—),男,博士,工程师,从事微电网技术研究工作;

张帆(1987—),男,硕士,工程师,从事新能源发电技术研究工作。

System Stability Risk Quantitative Analysis After PV Plants Drop Into Island Operation

SUN Pengwei, ZHANG Ye, ZHANG Fan, YANG Jian, LI Junjie

(State Key Laboratory of HVDC (China Southern Power Grid Co., Ltd. Research Institute), Guangzhou 510080, China)

Abstract: There are stability risks after PV plants drop into island operation, especially in case of unintentional islanding caused by grid faults and the islanding-state detection device fails. In order to estimate those risks, firstly, the paper theoretically analyzes the influence of three factors (power difference, PV permeability and motor inertia) on the stability characteristics of the island system in a short time after PV unintentionally dropped into island operation. Then the electromagnetic transient model of the PV station is established. According to that, the modified Dali Grid integrated with a PV station is modeled in PSCAD/EMTDC, verifying the theoretical analysis conclusions by simulation. Finally, quantitative stability risk index and method about PV station dropping into islanding are proposed according to the simulation results, which provide the theoretical basis for the stability risk estimation.

Key words: PV station; unintentional islanding; stability risk; electromagnetic transient simulation; quantitative stability risk index

(编辑 胡昊明)