

DOI: 10.7667/PSPC160533

分布式光伏电站接入低压配电网系统暂态电压稳定性研究

李升, 姜程程, 赵之瑜, 李子瑜

(南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 运用 Matlab SPS 建立了分布式光伏电站接入 0.4 kV 低压配电网的典型系统仿真模型。运用时域仿真法考察了光伏电站接入配电网的电缆线路在发生短路、闪络以及断线故障时对光伏电站出口母线暂态电压稳定性的影响。当电缆线路发生短路和断线故障时, 光伏电站出口母线会发生电压幅值不断增大的电压失稳现象。而当电缆线路发生闪络故障时, 投入重合闸可使光伏电站出口母线电压快速恢复。当光照强度发生大幅度突降时, 光伏电站出口母线电压幅值会发生跌落, 电压跌落程度主要取决于正常运行时光伏有功出力的大小。一般而言, 当光伏出力为数十 kW 及以下时, 光强突降并不会导致光伏电站出口母线电压发生失稳或崩溃。

关键词: 分布式光伏电站; 低压配电网; 暂态电压稳定; 故障; 光照强度

Study of transient voltage stability for distributed photovoltaic power plant integration into low voltage distribution network

LI Sheng, JIANG Chengcheng, ZHAO Zhiyu, LI Ziyu

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: A typical system simulation model of distributed photovoltaic power station is established by using MATLAB SPS, which is connected to 0.4 kV low voltage distribution network. The effects on PV power station exit bus transient voltage stability when short circuit, flashover and disconnection faults occur in cable lines, after PV has connected into the distribution network, are investigated by using time domain simulation method. When short-circuit and disconnection fault of cable line occurred, the PV power station exit bus voltage amplitude will increase continuously and lost stability. However, when flashover fault has occurred, inputting reclosure can make the PV power station exit bus voltage recover quickly. When light intensity has greatly dropped, PV power station exit bus voltage amplitude will drop, whose degree is mainly determined by the magnitude of active power output in normal operation. Generally, when PV output has tens of kilowatts and below, light dump won't lead to PV power station exit bus voltage unstable or collapse.

This work is supported by the Open Research Fund of Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network (No. XTCX201613), the Jiangsu University Brand Specialty Construction Project (No. PPZY2015A031), the Science Research Innovation Foundation of Nanjing Institute of Technology (No. CKJB201208) and the Jiangsu University Postgraduate with Major Degree Innovation Project (No. SJLX15_0731).

Key words: distributed photovoltaic power station; low voltage distribution network; transient voltage stability; fault; light intensity

0 引言

在能源互联网指导意见发布和能源行业转型升级的背景下, 发展利用分布式光伏发电对于加快能

基金项目: 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目 (XTCX201613); 江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (PPZY2015A031); 南京工程学院科研创新基金面上项目 (CKJB201208); 江苏省高校专业学位研究生创新计划项目 (SJLX15_0731)

源结构调整、实现可持续发展具有重要的意义^[1-5]。分布式光伏发电是以分散方式在用户附近建设的, 单个并网点总装机容量在数 kW 至 6 MW 之间的光伏发电项目, 一般接入 10 kV 及以下电压等级的配电网。建筑物屋顶光伏发电是典型的分布式光伏电站项目。分布式光伏发电能够充分利用太阳能资源, 有效减少化石能源的消耗, 具有节能环保、因地制宜、灵活分布的特点^[6-8]。随着当前我国能源互联网发展模式的不断推进, 分布式光伏发电在未来将具有广阔的应用前景^[9-10]。

分布式光伏发电打破了传统电源单向供电的格局,且出力受天气影响较大,其接入将不可避免给配电网电压、频率、电能质量和调度运行等带来影响,其中包括对配电网电压稳定性的影响^[11-12]。文献[13]研究了分布式电源在不同接入容量下的电压和负荷 PV 特性,并对比不同无功控制策略对系统电压稳定性的影响。文献[14-15]结合 PU 曲线探讨了配电网发生电压崩溃的机理,利用灵敏度分析方法研究了分布式电源接入对系统电压稳定性的影响。文献[16]定义了低压配电网电压失稳实用标准,分析了不同扰动情况下分布式光伏发电接入配电网电压稳定性问题。文献[17]基于 PVGS 模型得出提高光伏发电并网系统电压稳定性的方法。文献[18]提出通过逆变器与电网交换无功功率的方法提高系统的电压稳定性。文献[19]基于微分代数系统对采用电力电子接口的光伏、风电等新能源并网系统的暂态电压稳定性进行了研究。

本文以一个分布式光伏电站接入 0.4 kV 低压配电网为例,研究其在电缆线路发生短路、断线及闪络等各种扰动下的光伏电站出口母线暂态电压稳定问题,并分析光照强度大幅度突降对系统暂态电压稳定性的影响。

1 暂态电压稳定性简介

电力系统暂态电压稳定性是指系统遭受大扰动(如短路或断线故障、失去电源等)后在 5~10 s 时间范围内系统所有母线维持稳定电压的能力^[20-21]。当受天气变化影响光照强度突降导致光伏电站有功出力大幅突降时,相当于失去电源,因此也可归为大扰动条件。暂态电压稳定性可用常规的时域仿真程序进行分析,但需计及各元件详细的动态特性和调节控制系统的动态作用。

国家电网公司和南方电网公司均给出了暂态电压失稳实用判据和标准,即暂态过程中母线电压下降持续低于限定值的时间不超过规定的时间范围。对于 220 kV 及以上中枢点母线,电压限定值一般为 0.75 p.u.,当系统遭受大扰动后,中枢点母线电压持续低于规定的电压限定值,则可认为该母线电压失稳。变电站的 10 kV 母线,根据运行经验,电压限定值下限可设定为 0.8 p.u.,上限可设定为 1.2 p.u.,即系统遭受扰动后,变电站 10 kV 母线电压持续低于 0.8 p.u.或持续高于 1.2 p.u.,可认为电压失稳。而 0.4 kV 低压配电母线电压限定值下限可设定为 0.9 p.u.^[16],上限可设定为 1.1 p.u.,这是由于 0.4 kV 低压感应电动机允许电压偏差一般不能超过 $\pm 10\%$ 的缘故。

2 分布式光伏电站接入低压配电网系统模型

接入 0.4 kV 低压配电网的分布式光伏电站容量一般在 8~400 kW 左右。如图 1 所示,现设一个额定容量为 15 kW 的分布式光伏电站经过一条电缆线路接入 0.4 kV 低压配电网,光伏电站在本地就近供电给一个静态负荷和一个三相感应电动机。电缆线路阻抗 $R+jX$ 为 $0.096+j0.015 \Omega$;配电网侧母线 Bus 1 和光伏电站出口母线 Bus 2 的电压分别为 \dot{U}_1, \dot{U}_2 ;光伏电站发出的功率为 $P_{pv}+jQ_{pv}$,三相感应电动机吸收的功率为 P_M+jQ_M ,静态负荷(恒电阻负荷)消耗的有功功率为 P_S 。配电网流入 Bus 2 的功率为 P_2+jQ_2 ,当光伏电站有功出力 P_{pv} 富余时, $P_2 < 0$ 。

运用 Matlab 自带的电力系统仿真模块集 SPS (SimPowerSystems)建立分布式光伏电站仿真模型并按图 1 所示接入 0.4 kV 低压配电网。光伏电站仿真模型考虑了光照强度及环境温度对光伏有功出力的影响,并采用了 MPPT 最大功率点跟踪算法^[22],经过逆变和 LC 滤波环节后输出有功和无功功率。Bus 1 电压 U_1 在仿真时维持 400 V 不变,相角取 0° ;静态负荷额定电压为 400 V,额定功率为 2 kW;三相感应电动机额定电压为 400 V,额定容量为 7.5 kW。

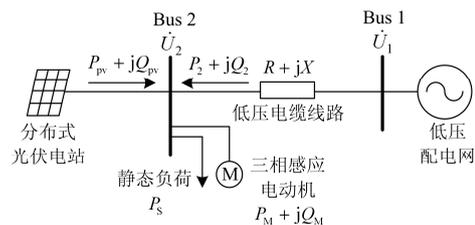


图 1 分布式光伏电站接入低压配电网

Fig. 1 Distributed photovoltaic grid-connected system

3 电缆故障对暂态电压稳定性的影响

电缆线路的常见故障主要有各种原因造成绝缘下降而导致击穿的短路故障、外力破坏导致的断线故障以及工艺问题造成的电缆接头或终端闪络性故障等。

3.1 电缆发生短路故障

电缆短路故障一般是由绝缘击穿引起,属于永久性故障,因此当继电保护动作将线路跳闸后,不可投入重合闸,此时电网失电,若光伏电站出力与本地负荷匹配,则光伏电站按孤岛方式运行。现讨论当电缆线路发生短路故障时光伏电站出口母线 Bus 2 的电压变化情况。

仿真时设置光伏发电系统的两个输入量:光照

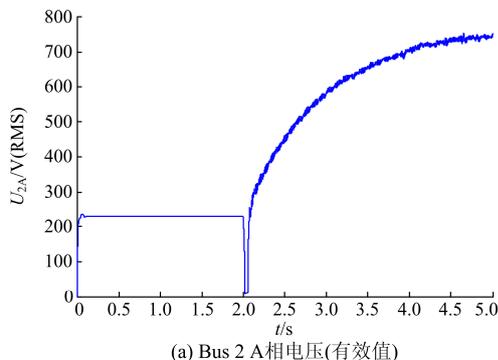
强度为 1500 W/m^2 , 环境温度为 30° ; 设定电动机的机械功率 P_m 为 5 kW 。系统正常运行时, 光伏电站发出的有功功率 P_{pv} 约为 $11.8\sim 14 \text{ kW}$, 无功功率 Q_{pv} 约为 $-1.9\sim 2.5 \text{ kvar}$, Bus 2 的 A 相电压有效值约为 231.6 V , 电动机吸收的有功功率 P_M 约为 $5.23\sim 5.475 \text{ kW}$ 、无功功率 Q_M 约为 $4.06\sim 4.295 \text{ kvar}$; 由于电动机吸收的有功功率较小, 配电网供给 Bus 2 的有功功率 P_2 为负值, 约为 $-6.65\sim -4.50 \text{ kW}$, 供给 Bus 2 的无功功率 Q_2 约为 $1.7\sim 6 \text{ kvar}$; 电动机转速 ω_m 为 152.96 r/min , 电磁转矩 T_e 为 $32.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

设时间 $t=2 \text{ s}$ 时, 电缆线路中点发生三相短路故障, 2.05 s 继电保护动作从两端断开电缆线路清除故障。图 2 为 Bus 2 的 A 相电压、配电网供给 Bus 2 的功率、电动机吸收功率及光伏电站出力的变化曲线。由图 2(a)、(c)可知, 短路发生后, Bus 2 母线电压 U_2 急剧下降, 从而使电动机转速和电磁转矩急剧下降, 电动机发生堵转, 吸收的有功功率 P_M 下降至 0 值附近。如图 2(b)所示, 由于短路故障发生后继电保护装置动作使电缆线路断开, 配电网供给 Bus 2 的功率为 0, 因此有

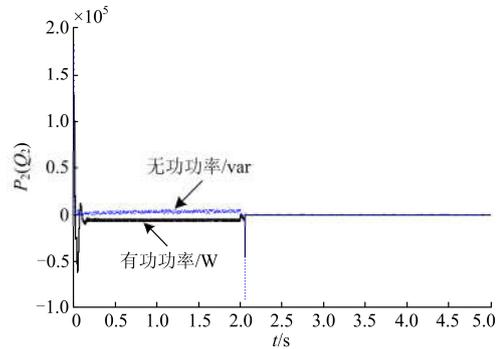
$$P_{pv} = P_S + P_M = \frac{U_2^2}{R_S} + P_M \quad (1)$$

式中, R_S 是静态负荷电阻, 保持恒定值。

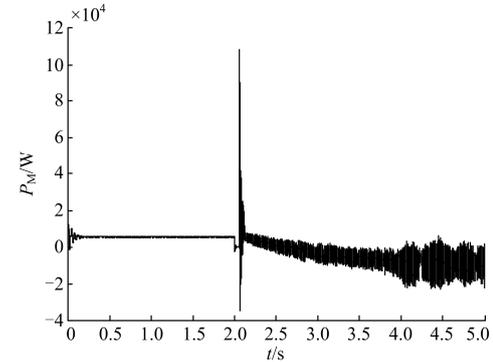
由图 2(a)、(c)、(d)可知, 当电缆线路被继电保护装置动作切除后, 由于光伏电站能够承担负荷功率需求(电动机机械功率 P_m 为 5 kW), “大马拉小车”, Bus 2 电压 U_2 迅速得到恢复, 电动机吸收的有功功率 P_M 发生短暂的大幅振荡, 之后开始减小欲恢复正常。由于光照强度和环境温度不变, 光伏电站的有功出力 P_{pv} 竭力保持不变, 由式(1)可知, P_M 开始减小将会导致静态负荷消耗的有功功率 P_S 变大, 从而其端电压 U_2 被抬高, 之后形成恶性循环, P_M 越来越小、 U_2 越来越高。如图 2(a)所示, 显然 U_2 失去了稳定, 如不采取相应的保护措施, 电动机将被烧毁。



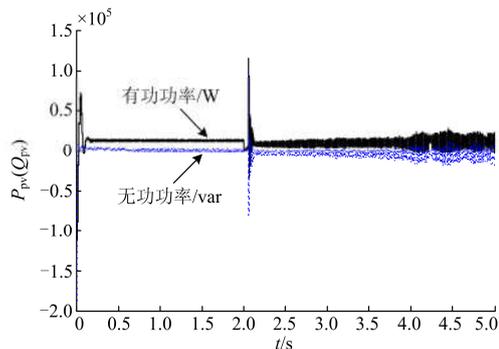
(a) Bus 2 A相电压(有效值)



(b) 配电网供给Bus 2的功率



(c) 电动机吸收的有功功率



(d) 光伏电站有功、无功出力

图 2 发生短路时系统各电量变化曲线

Fig. 2 Variation curves of all kinds of electric quantities when short-circuit fault occurred

3.2 电缆发生闪络故障

根据实际运行经验, 电缆线路发生短路故障的几率较低, 但电缆接头处易发生闪络故障造成绝缘临时性击穿而导致线路跳闸, 此时应可投入重合闸。

现设置 $t=2 \text{ s}$ 时, 电缆线路配电网侧发生三相短路故障(模拟发生闪络性故障), 2.05 s 继电保护动作从两端断开电缆线路清除故障, 2.55 s 重合闸动作重新投入线路; 电动机额定容量取 7.5 kW (P_m 取 5 kW)。图 3 为 Bus 2 的 A 相电压变化曲线, 可知 Bus 2 电压在电缆线路重合后能够迅速恢复为故障发生前的电压值。

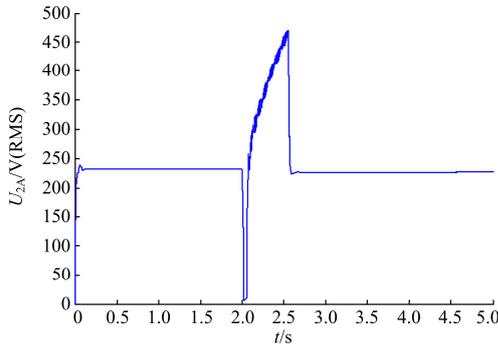


图3 发生闪络故障时电压变化曲线

Fig. 3 $t-U$ curve when flashover fault occurred

3.3 电缆发生断线故障

设置 $t=2$ s时, 电缆线路中点处发生断线故障, 图4为Bus 2 A相电压变化曲线, 可知 U_2 经过短暂振荡后也持续爬高而失去了稳定, 其原因类似电缆线路发生短路故障后切除线路后的情况。

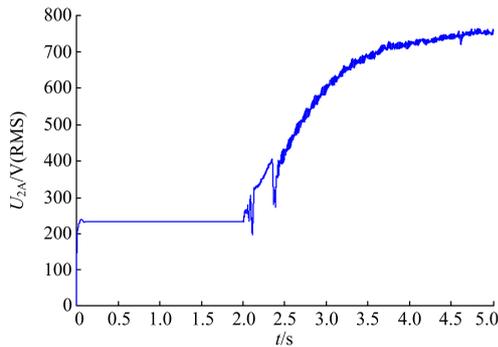


图4 发生断线故障时电压变化曲线

Fig. 4 $t-U$ curve when disconnection fault occurred

4 光照强度突降对暂态电压稳定性的影响

分布式光伏电站容量相对较小, 因此当光照强度突然发生大幅度降落时, 对母线电压的影响势必也很小。如图1所示, 设负荷总功率为 $P+jQ$ 并假设保持不变, U_1 保持不变, U_2 为光伏电站投入运行时的线路末端电压, 则有

$$U_1 = U_2 + \frac{(P - P_{pv})R + (Q - Q_{pv})X}{U_2} \quad (2)$$

设 U'_2 为光伏强度突降为0时的线路末端电压 ($U'_2 < U_2$), 则有

$$U_1 = U'_2 + \frac{PR + QX}{U'_2} \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可得

$$U_2 - U'_2 = \frac{P_{pv}R + Q_{pv}X}{U_2} + (PR + QX)\left(\frac{1}{U'_2} - \frac{1}{U_2}\right) \quad (4)$$

由于电缆线路电抗 X 值较小且光伏电站无功出力 Q_{pv} 在0值附近, 且本算例分布式光伏电站有功出力 P_{pv} 较小, 因此 U'_2 和 U_2 相差不大, 可得电压跌落值的估算公式为

$$\Delta U_2 = U_2 - U'_2 \approx \frac{P_{pv}R}{U_2} \quad (5)$$

可按式(5)估算出当光照强度突降为0时, Bus 2电压 U_2 的跌落值, 从而进一步判断母线Bus 2维持电压稳定的能力。由式(5)可知, U_2 跌落值主要取决于光伏电站有功出力 P_{pv} , 光伏电站安装容量越大, 则最大有功出力值也越大, 从而电压跌落值也会越大, 越不利于电压稳定。

现设图1所示系统中配电网端电压维持在400 V不变, 当 $t=2$ s时, 光照强度由 1500 W/m^2 突降至 0.01 W/m^2 。图5为电动机额定容量为7.5 kW(电动机 P_m 取5 kW)时的Bus 2的A相电压变化曲线, 稳定运行后, U_2 相电压约为231.6 V, 当光照强度突降系统恢复稳定后, 相电压恢复为229.8 V, 在额定相电压值90%以上, 因此Bus 2母线电压未失稳。可得电压跌落值为 $(231.6 - 229.8) \times \sqrt{3} \text{ V} = 3.12 \text{ V}$ (线电压); 而按式(5)计算可得: $\Delta U_2 \approx 14\,000 \times 0.096 / (231.6 \times \sqrt{3}) = 3.35 \text{ V}$ (线电压), 可知估算值和实际跌落值非常接近。

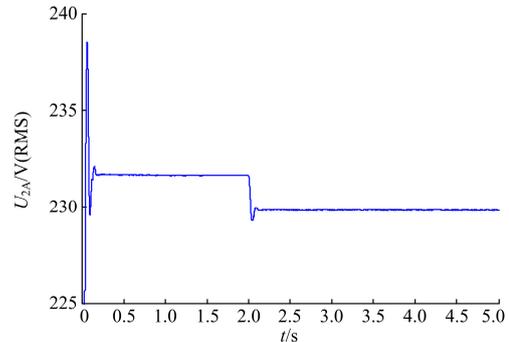


图5 光照强度突降时电压变化曲线

Fig. 5 $t-U$ curve when light intensity greatly dropped

若分布式光伏电站额定容量为400 kW(可接入0.4 kV低压配电网的最大容量), 电动机额定容量为110 kW, 机械功率取100 kW, 配电网侧电压 U_1 仍保持400 V不变, 当光照强度由 1000 W/m^2 突降至 0 W/m^2 时, Bus 2的A相电压由248 V跌落至198 V, 低于90%额定相电压值, 此时光伏电站出口母线电压发生失稳。电压实际跌落值为 $(248 - 188) \times \sqrt{3} \text{ V} = 86.6 \text{ V}$ (线电压); 而估算值为 $400\,000 \times 0.096 / (248 \times \sqrt{3}) = 89.4 \text{ V}$ (线电压), 两者非常接近。

5 结论

本文对分布式光伏电站接入配电网典型系统的暂态电压稳定性问题进行了探讨,运用Matlab SPS建立了分布式光伏电站接入配电网典型系统的仿真模型,并分别设置了电缆线路发生短路故障、闪络故障、断线故障以及光照强度大幅度突降等扰动情况,考察对光伏电站出口母线暂态电压稳定性的影响,可得以下结论:

1) 当光伏电站接入配电网的低压电缆线路发生三相短路导致电网失电从而使光伏发电系统孤岛运行时,在光伏电源和负荷(包括电动机负荷和静态负荷)的共同作用下,负荷母线(也即光伏电站端母线)会发生电压不断升高的电压失稳现象。电缆断线故障发生后的现象也类似短路故障。光伏并网逆变器可采用一旦监测到电网失电即停止工作的控制策略,以免过高的电压损坏用电设备。

2) 当电缆线路发生闪络故障导致跳闸时,若投入重合闸重合线路,可使电压恢复至闪络发生前的正常值。一般0.4 kV低压电缆线路并不安装重合闸,但针对10 kV及以上电缆线路,此项仿真结果可供运行参考。

3) 光照强度发生大幅度变化、突降为0时,对于本文提及的分布式光伏电站接入低压配电网的典型系统,可按公式(5)估算其出口母线电压跌落值,从而判别系统的暂态电压稳定性。一般而言,数十kW及以下容量的分布式光伏电站,当光照强度发生大幅度突降时,不足以引起光伏电站出口母线电压发生失稳或崩溃现象。只有分布式光伏电站有功出力 P_{pv} 较大(数百kW及以上)时,才有可能发生电压失稳现象。

参考文献

- [1] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [2] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [3] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3014-3022.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022.
- [4] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [5] 黄惠兰, 陈强, 李刚. 低品位能源发电系统研究进展[J]. 热力发电, 2015, 44(8): 8-13.
HUANG Huilan, CHEN Qiang, LI Gang. Research progress in low grade energy generation systems[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(8): 8-13.
- [6] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [7] FLETCHER S, MEAH K, ULA S. Simulation and analysis of a solar photovoltaic generation system for voltage support in a distributed generation scheme[C] // Proceedings of the Region 5th Technical Conference. Fayetteville, AR: IEEE, 2007: 284-288.
- [8] 张先勇, 舒杰, 吴昌宏, 等. 一种海岛分布式光伏发电微电网[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 55-61.
ZHANG Xianyong, SHU Jie, WU Changhong, et al. Island microgrid based on distributed photovoltaic generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 55-61.
- [9] 孙秋野, 王冰玉, 黄博南, 等. 狭义能源互联网优化控制框架及实现[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4571-4580.
SUN Qiuye, WANG Bingyu, HUANG Bonan, et al. The optimization control and implementation for the special energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4571-4580.
- [10] 王以笑, 崔丽艳, 雷振锋, 等. 分布式光伏电站区域智能调控系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 118-122.
WANG Yixiao, CUI Liyan, LEI Zhenfeng, et al. Research on the regional intelligent regulating system of distributed PV station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 118-122.
- [11] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation

- on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [12] 刘琳. 光伏电站有功功率优化分配[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 104-108.
LIU Lin. Active power control in photovoltaic power plants[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 104-108.
- [13] 李题印, 韩永强, 胡晓琴, 等. 分布式发电接入电网的静态电压稳定特性及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 8-13.
LI Tiyin, HAN Yongqiang, HU Xiaoqin, et al. Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 8-13.
- [14] 张谦, 廖清芬, 唐飞, 等. 计及分布式电源接入的配电网静态电压稳定性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 42-48.
ZHANG Qian, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Steady state voltage stability assessment method of distribution network considering inter-connection of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 42-48.
- [15] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.
LI Bin, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88.
- [16] 李升, 高鹏, 陈银娣, 等. 分布式光伏发电并网系统电压稳定性研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(3): 188-190.
LI Sheng, GAO Peng, CHEN Yindi, et al. Study of voltage stability for distributed photovoltaic grid-connected system[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(3): 188-190.
- [17] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.
CHEN Quan, LI Lingdong, WANG Qunjing, et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.
- [18] FAZELI M, EKANAYAKE J B, HOLLAND P M, et al. Exploiting PV inverters to support local voltage — a small-signal model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 453-461.
- [19] 陈磊, 刘永奇, 戴远航, 等. 电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 15-21.
CHEN Lei, LIU Yongqi, DAI Yuanhang, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of new energy source with power electronic interface[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 15-21.
- [20] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 翻译组, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [21] TAYLOR C W. 电力系统电压稳定[M]. 王伟胜, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [22] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于PSCAD/EMTDC的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

收稿日期: 2016-04-15; 修回日期: 2016-05-24

作者简介:

李升(1973-), 男, 博士研究生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为大电网及新能源并网系统电压稳定及控制; E-mail: lisheng_njit@126.com

姜程程(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式光伏电源并网系统电压稳定性。

(编辑 魏小丽)