

高渗透率逆变型分布式发电对 电力系统暂态稳定和电压稳定的影响

庄慧敏¹, 巨辉¹, 肖建²

(1. 成都信息工程学院控制工程学院, 四川 成都 610225; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为研究大规模逆变型分布式发电对电力系统暂态和电压稳定性的影响, 借助PSCAD/EMTDC仿真软件, 以一个12母线测试系统为研究对象, 建立电力系统和逆变型DG的动态模型。通过暂态仿真和理论分析, 重点研究了不同渗透率DG对主同步发电机最大转速偏差和转速偏离频率的影响, 分析了不同控制模式的DG在故障前(稳态)、故障期间和故障后对母线电压的影响。研究表明: 渗透率越高, 逆变型DG对系统暂态稳定性的负作用越大, 但电压控制的逆变型DG能明显改善系统电压的稳定性。

关键词: 分布式发电; 高渗透率; 控制模式; 动态模型; 暂态稳定; 电压稳定

Impacts of inverter interfaced distributed generations with high penetration level on power system transient and voltage stability

ZHUANG Hui-min¹, JU Hui¹, XIAO Jian²

(1. School of Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to investigate the impacts of large scale DGs on the power system transient and voltage stability, the dynamic models of the power system and DGs in a 12-bus test system are modeled in detail by PSCAD/EMTDC software. And then through simulation and theory analysis, the impact of the DGs with different penetration level on the maximum rotor speed deviation and the rotor speed deviation frequency of the main synchronous generators are studied, and the impact of the DGs with different control models on the power system bus voltages, before a fault (steady state), during a fault and after a fault is analyzed. The research results show that the inverter interfaced DGs have a more negative impact on the power system transient stability with the penetration level increasing, but the voltage controlled inverter interfaced DGs significantly improve the voltage in the power system buses after fault clearances.

Key words: distributed generation; high penetration level; control mode; dynamic model; transient stability; voltage stability

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)17-0084-06

0 引言

传统的电力系统由大规模中心电站发电, 通过输、配电网供给用户。而分布式发电(DG)在经济、技术和环境方面具有独特的优势, 因此, 它与大电网相结合已成为21世纪电力工业的发展方向^[1]。分布式发电单元主要连接在配电网侧。与大规模的集中发电站相比, 小规模DG单元一般不会对输电系统产生影响。所以在目前的电力系统稳定性研究中, 通常将DG单元视为负的负荷, 不考虑它们的暂态特性和控制器模型。然而, 当大电网接纳大量的大容

量DG时, 它们的影响不再局限于配电网, 而是将影响整个系统, 即, 整个电力系统的动态特性将受到重大影响。另一方面, 为了实现经济性, 现代电力系统经常运行在重负荷条件下, 对系统的稳定性造成了不利影响。因此, 须考虑DG的不同渗透率和系统的动态特性, 准确评估DG对电力系统稳定性的影响, 为电力规划决策提供依据。

IEEE Std 1547.2—2008提供了两种分布式发电的分类方法。其中, 按并网接口和功率变换的不同, 分布式发电技术分为同步型分布式发电机、异步型分布式发电机和逆变器型分布式发电机。由于逆变

器型分布式发电机应用较多, 本文只研究这类DG对系统稳定性的影响。

目前, 关于含DG的配电网无功优化和DG对配电网电压稳定及静态稳定的影响的研究^[2-8]比较多, 而关于高渗透率DG接入对输电系统稳定性影响的文献较少。文献[9]采用小信号稳定分析法研究了高渗透率光伏分布式发电对输电系统电压稳定的影响。文献[10-11]研究了DG对电力系统暂态稳定性的影响。然而这些文献都是将逆变器型DG视为理想的有功、无功源, 忽略逆变器的控制系统, 且只是针对某一测试系统进行简单仿真, 而没有对仿真结果进行理论分析。

本文借助PSCAD/EMTDC软件, 基于一个12母线测试系统, 建立含高渗透率DG电力系统的动态模型, 通过仿真和理论分析着重讨论DG对电力系统暂态稳定性和电压稳定的影响。

1 电力系统模型

为了研究 DG 对电力系统稳定性的影响, 采用图 1 所示的 12 母线测试系统。发电机及其励磁系统和调速系统的动态模型及参数取自文献[12]。负荷采用恒阻抗模型, 消耗的有功、无功功率如式 (1) 和式 (2)。

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (2)$$

稳定性分析时, 一般对输电系统进行详细地建模, 配电网仅由供电系统与配电馈线间的主要母线上负荷表示。当把 DG 接入系统时, 通常把它和本地负荷接在配电网侧。最复杂的方法是详细建立配电馈线模型。而简单的方法是: 扩展当前模型, 引入等效的负荷与分布式发电机, 如图 2 所示。本文假设: 未来的负荷增长可通过增加相应的 DG 出

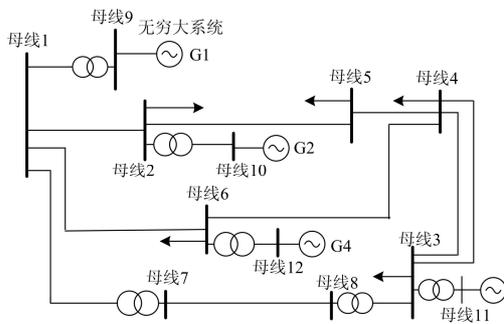


图 1 12 母线测试系统示意图

Fig. 1 Diagram of 12-bus power system

力得到满足。这样, 稳态情况下输电线路的潮流将保持不变。然而, 暂态情况下, 增加的 DG 和负荷将与电力系统中的主同步发电机相互作用, 造成系统的暂态特性发生变化。

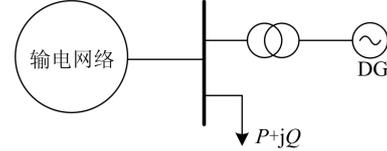


图 2 连接 DG 单元的配电系统模型

Fig. 2 Distribution system model with connection of DGs

DG 的渗透率定义为: 所有 DG 单元发出的有功功率之和与系统负荷总的有功需求之比, 即按式 (3) 计算。

$$P_{dg} = \frac{\sum P_{dg}}{\sum P_L} \times 100\% \quad (3)$$

2 分布式发电机模型

逆变型 DG 模型采用三相全桥电压源逆变器, 如图 3 所示。逆变器的开关视为理想开关, 基于 SPWM 策略运行。

电力系统的动态模型通常采用 dq0 同步旋转坐标系, 并网逆变器作为系统的一部分, 在 dq0 坐标系下的模型^[13]为

$$v_d = Lp i_d - L\omega i_q + v_{m0} \quad (4)$$

$$v_q = Lp i_q + L\omega i_d$$

式中: v_d 、 v_q 分别为逆变器端电压的 d 轴、q 轴分量, i_d 、 i_q 为逆变器输出电流的 d 轴、q 轴分量; p 为微分算子; v_{m0} 是电网相电压幅值。

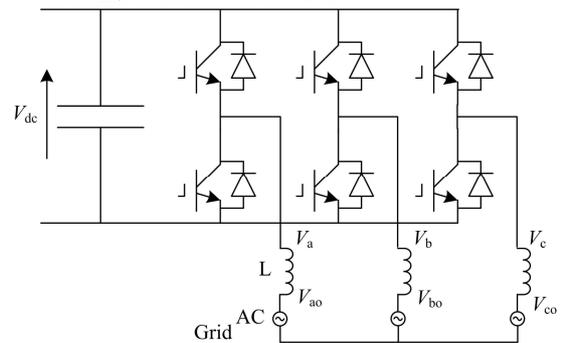


图 3 三相全桥电压源逆变器电路示意图

Fig. 3 Circuit diagram of three phase full bridge voltage source inverter

为了实现 d、q 轴变量的解耦, 定义变量 dv_d 、 dv_q 如下:

$$\begin{aligned} dv_d &= pi_d = \omega i_q + \frac{v_d - v_{m0}}{L} \\ dv_q &= -\omega i_d + \frac{v_q}{L} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)代入式(4)得:

$$\begin{aligned} v_d &= -L\omega i_q + v_{m0} + Ldv_d \\ v_q &= L\omega i_d + Ldv_q \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可以实现电流的解耦控制,如图4所示。

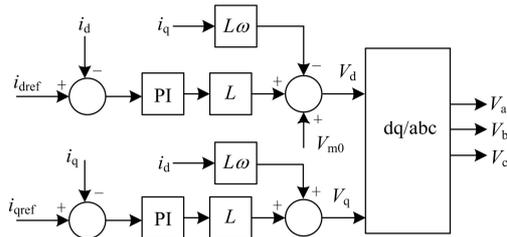


图4 三相全桥电压源逆变器电路示意图

Fig. 4 Circuit diagram of three phase full bridge voltage source inverter

由 $v_q=0$ 得到逆变器输出的有功、无功功率为

$$\begin{aligned} P &= 1.5v_d i_d \\ Q &= 1.5v_d i_q \end{aligned} \quad (7)$$

这样控制电流分量就直接调整了相应的功率。故在电流控制器前添加两个PI控制器就可实现功率(P-Q)控制,如图5所示。本文取输电电流的上限值为额定值的1.3倍。

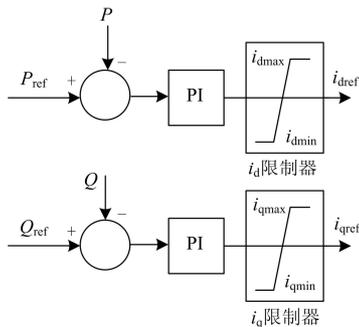


图5 功率控制模块示意图

Fig. 5 Block diagram of the added PQ controller

DG不仅在发电中起重要作用,还可为系统提供一些辅助功能,如频率调节、电压控制、无功支持、潮流控制等。因此,当DG配备了频率和电压控制器时,有必要研究它们对系统的影响。为实现电压控制,可在电流控制的q轴分量前添加一个PI控制器,如图6所示。

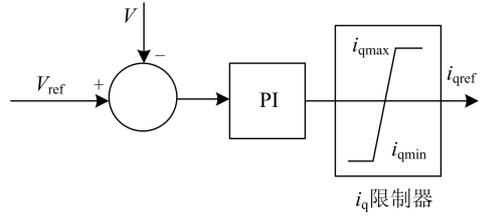


图6 电压控制模块示意图

Fig. 6 Block diagram of the added voltage ontroller

频率控制可采用下垂控制法,其有功功率的参考值由下式^[13]得到。

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{1}{m}(\omega - \omega_0) \\ P_{ref} &= P_0 + \Delta P \end{aligned} \quad (8)$$

式中: ω 、 ω_0 分别是电网频率的测量值和额定值; m 为频率下垂系数(本文取为0.05); P_0 是逆变器在额定频率下输出的额定有功功率。

3 分布式发电对电力系统暂态和电压稳定的影响

3.1 暂态和电压稳定

描述发电机转子运动的动态方程—发电机转子运动方程是电力系统暂态稳定性分析的最重要方程^[12]。所有参数采用标么值,则方程为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H}(P_m - P_e - D\omega) \quad (9)$$

式中: P_m 是输入机械功率; P_e 是输出电磁功率; H 、 D 分别是惯性系数和阻尼系数。系统故障期间 P_m 恒定,故 P_e 对主同步发电机转速偏差的影响最大,所以主同步发电机的输出电磁功率是暂态稳定性分析的最有影响力的参数^[12]。为了分析系统暂态稳定性,本文将分析故障期间增长负荷与不同渗透率DG的相互作用、相互作用对主同步发电机输出电磁功率的影响及对转速最大偏差的影响,讨论不同渗透率DG对主同步发电机转速偏移频率的影响。

电压稳定性定义为正常运行条件下或遭受扰动后系统所有母线电压维持在允许范围内的能力。造成电压不稳定的主要因素是系统不能满足无功功率的需求^[14]。本文将研究不同控制模式的DG在故障期间和故障前后对母线电压的影响。

3.2 逆变型 DG 对电力系统稳定性的影响

为了研究逆变型 DG 对电力系统稳定性的影响,在测试系统的每个负荷母线处通过一台变压器引入一台逆变发电机(如图2所示)。研究三种运行状态:①基本运行状态:没有 DG,负荷不增加;②DG20%:负荷增加 20%,调节 DG 的输出功率满

足负荷的增加量, 即 DG 渗透率为 20%; ③DG40%: 渗透率为 40%。考虑三种故障: ①母线 4 与 6 间的输电线发生三相接地故障, 故障点靠近发电机 G4, 因此故障后 G4 的转速偏差最大; ②母线 2 与 5 间的输电线发生三相接地故障, 故障点靠近发电机 G2, 因此故障后 G2 的转速偏差最大; ③母线 3 与 4 间的输电线发生三相接地故障, 故障点靠近发电机 G3, 因此故障后 G3 的转速偏差最大。所有故障在发生 150 ms 后, 通过跳开故障线路清除故障。并假设故障期间, 所有主发电机和 DG 保持与系统的连接。

当逆变器采用电流控制策略时, 主同步发电机 (G2—G4) 的转速仿真曲线如图7~图9所示。

由图7~图9看出: ①随着渗透率的增加, 主同步发电机的转速偏差最大值增加。这是因为: 故障期间, DG输出的有功电流恒定, 则输出的有功功率按母线压降成比例的减少; 另一方面, 增加负荷所消耗的功率按母线压降的平方成比例地减少。这样, 增加负荷所消耗的有功功率的总减少量比逆变型 DG输出有功的减少量大, 所以增加渗透率, 主发电机的电磁功率下降, 根据式(9)可知最大转速偏差

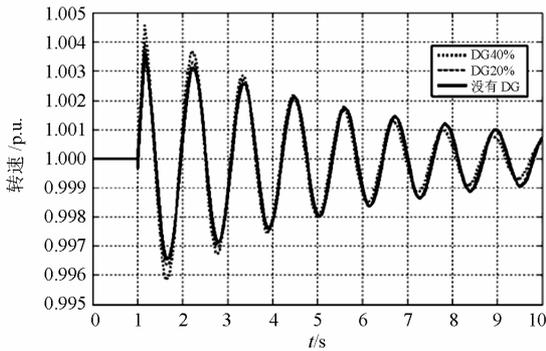


图7 故障①发生时G4转速曲线

Fig. 7 Rotor speed deviation of G4 for the fault①

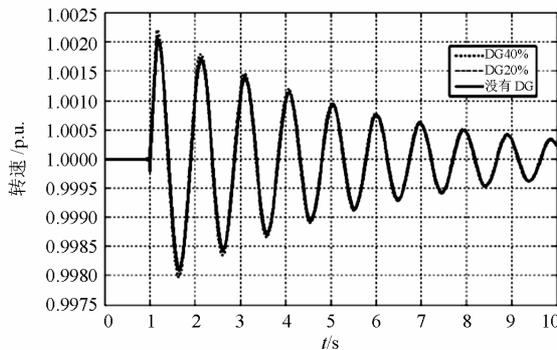


图8 故障②发生时G2转速曲线

Fig. 8 Rotor speed deviation of G2 for the fault②

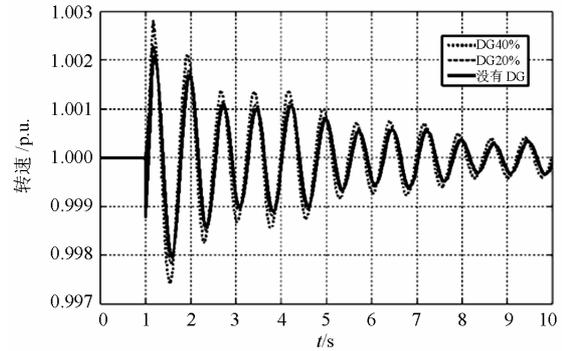


图9 故障③发生时G3转速曲线

Fig. 9 Rotor speed deviation of G3 for the fault③

增加。②G3对最大转速偏差的影响比G2、G4大。这是由于G3靠近负荷中心, 故增加渗透率的影响更大。③主同步发电机转速变化频率并没有随渗透率的改变而改变。

图10是20%DG状态下发生故障“③”后, 主同步发电机G3的转速在逆变器不同控制模式(电流控制、P-Q控制、V-f控制)下的仿真曲线。由图看出: 电流控制模型下的转速偏差量最小。正如前面所述, 电流控制模式下DG输出的有功功率在故障期间减少; 但P-Q控制下DG输出的有功功率在故障期间保持恒定; 三相接地故障期间, 系统频率几乎不变, 根据式(8)可知, $\Delta P=0$, 即 $P_{ref}=P_0$, 故V-f控制模式下, 频率控制器的行为与有功控制器一样, 保持P不变。所以, 与电流控制相比, P-Q和V-f控制模式下, 主同步发电机发出的 P_e 减少更多, 最大转速偏差相应地成比例增加。

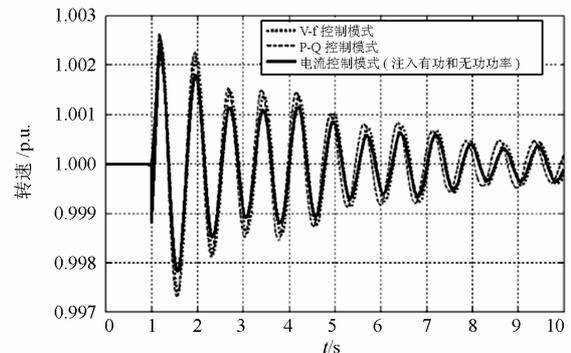


图10 故障③发生时G3在不同控制模式下的转速曲线

Fig. 10 Rotor speed deviation of G3 in different control modes for the fault③

图11是故障“①”发生后, 当和母线4连接的DG(P-Q控制模式)距母线4的距离 l 分别为1 km、5 km、10 km时, 主同步发电机G4的转速仿真曲线。由图看出: DG距母线4较近时, 主同步发电

机 G4 的转速偏差较大。但 DG 距母线 4 的距离增加对主发电机最大转速偏差量的影响不是很明显。这是因为，随着距离的增加，线路损耗增加，DG 传输到母线端的功率将减少，故障期间对主发电机的转速偏差影响也将减弱。但通常情况下线路损耗要求在一定的范围内，由此产生的影响不是很明显。

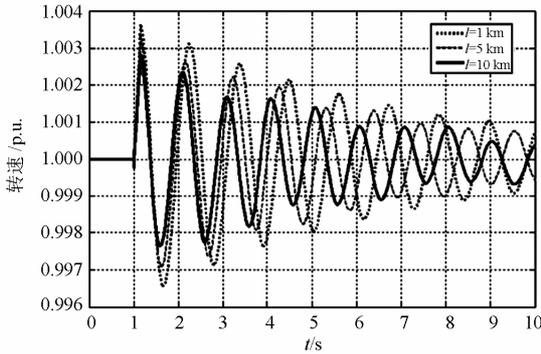


图11 不同距离下故障①发生时G4转速曲线

Fig. 11 Rotor speed deviation of G4 according to the different distance l for the fault ①

图12是故障“①”发生后，母线4在三种运行状态（基本运行状态、20%DG且只提供有功功率 P 、20%DG且提供 P 和无功功率 Q ）下的电压仿真曲线。由图可见：基本运行状态与注入 P 、 Q 状态下的电压是一样的。因为这两种运行状态下，输电线路中的 P 、 Q 潮流一样。但只有 P 注入系统时，稳态电压下降。因为增加负荷消耗的无功功率 Q 由主同步发电机提供，故输电线路中的无功潮流增加，由输电线路的 $Q-V$ 曲线可知，线路末端电压会下降。

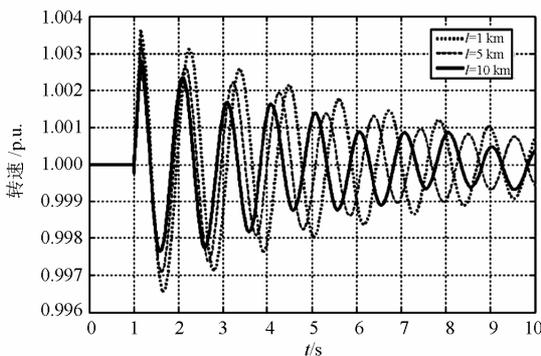


图12 故障①发生时母线4的电压曲线

Fig. 12 Voltage of bus 4 for the fault ①

图13是故障“①”发生后，母线4在三种控制模式下的电压仿真曲线。由图可知：故障前稳态电压及故障期间的电压降落在三种控制模式下是一样的，但故障清除后，V-f控制模式下电压恢复得更好。

这是因为，故障清除后，电压控制器很快增加了DG的无功输出，导致电压增加更多。故V-f控制模式的DG对系统电压的恢复起积极的作用。

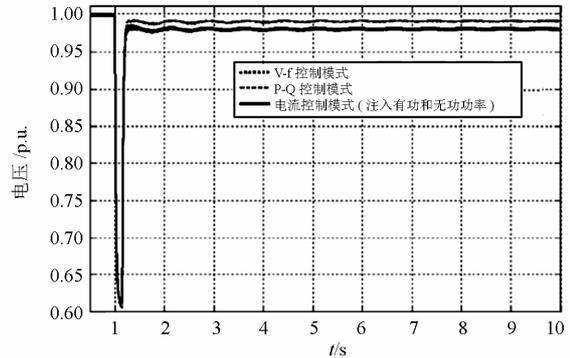


图13 故障①发生时母线4在不同控制模式下的电压曲线

Fig. 13 Voltage of bus 4 in different control modes for the fault ①

4 结论

为了研究高渗透率分布式发电对电力系统暂态和电压稳定性的影响，本文借助仿真软件 PSCAD/EMTDC，以 12 母线测试系统为对象，建立了主同步发电机及逆变型分布式发电机的动态模型，针对 DG 的不同渗透率及不同控制模式进行了动态仿真，并对仿真结果进行了理论分析，得到如下结论：

- 1) 主同步发电机的最大转速偏差随着DG渗透率增加而增大，其中P-Q和V-f控制模式的负面影响比电流控制模式的更大。
- 2) 电压控制的DG对故障后系统电压的恢复起积极作用，明显改善电压稳定性。
- 3) 靠近负荷中心的 DG 对主同步发电机的影响最大。

参考文献

[1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望—试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-12.
 ZHOU Xiao-xin, CHEN Shu-yong, LU Zong-xiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-12.

[2] 程杉, 陈民铀, 黄薏宸. 含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 45-50.
 CHENG Shan, CHEN Min-you, HUANG Yi-chen. Multi-objective reactive power optimization of

- distribution system penetrated with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 45-50.
- [3] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-173.
ZHANG Li, XU Yu-qin, WANG Zeng-ping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-173.
- [4] 张勇军, 翟伟芳, 林建熙. 分布式发电并网的网损影响评价指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 134-137.
ZHANG Yong-jun, ZHAI Wei-fang, LIN Jian-xi. Study on power loss evaluation index of the DG's accessing to the networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 134-137.
- [5] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 91-96.
ZHANG Li-mei, TANG Wei, ZHAO Yun-jun, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-96.
- [6] 邝国毅. 分布式电源接入对配电网电压暂降影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
KUANG Guo-yi. Studies on the effect of plug in of distributed generations on voltage sag of distributed network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [7] 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 Ling-dong, WANG Qun-jing, 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.
- [8] 王晓寰, 张纯江. 分布式发电系统无缝切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 217-222.
WANG Xiao-huan, ZHANG Chun-jiang. Study of control strategy for seamless transfer of grid-connected distributed generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 217-222.
- [9] DONNELLY M K, DAGLE J E, TRUDNOWSKI D J, et al. Oscillatory stability analysis with high penetrations of large-scale PV generation[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65: 420-429.
- [10] REZA M, SCHAVEMAKER P H, SLOOTWEG J G, et al. Impacts of distributed generation penetration levels on power systems transient stability[C] // IEEE Power Eng Soc General Meet, 2009, 2(21): 50-55.
- [11] SLOOTWEG J G, KLING W L. Impacts of distributed generation on power system transient stability[J]. IEEE Power Eng, 2012, 5(11): 162-167.
- [12] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
KUNDUR P. Power system stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [13] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
ZHANG Jian-hua, HUANG Wei. Micro grid operation control and protection technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [14] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power system voltage stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2014-04-27; 修回日期: 2014-07-31

作者简介:

庄慧敏(1976-), 女, 工学博士, 讲师, 主要从事电力系统稳定分析与控制方面的研究工作; E-mail: zhmcyj@163.com

巨辉(1962-), 男, 教授, 主要从事智能控制方面的研究工作;

肖建(1950-), 男, 博导, 教授, 主要从事自动化控制方面的研究工作。