

基于动态量测量的电压失稳性判据研究

马兆兴¹, 李洪美¹, 万秋兰², 柴艳莉¹

(1. 江苏师范大学电气工程及自动化学院, 江苏 徐州 221116; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 广域测量系统的发展和应用于电压稳定性的在线监测奠定了基础。研究基于动态量测量的电压稳定性判别成为新的挑战。在综合分析 $P-V$ 曲线和 $V-Q$ 曲线特性的基础上, 解释了电力系统电压失稳的机理并提出了一种跟踪动态量测量的判断扰动后电力系统电压是否失稳的判据。所提判据依据扰动后母线电流、功率及有功和无功的变化规律判断电压是否失稳; 该判据原理清晰, 计算简捷。EPRI-36 节点系统不同工况下数值仿真结果验证了所提判据的正确性和有效性。

关键词: 电压稳定; 相量测量单元; 电力系统; 功率电流曲线; 失稳判据

Study on voltage instability criterion based on dynamic measurement

MA Zhao-xing¹, LI Hong-mei¹, WAN Qiu-lan², CHAI Yan-li¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The development and applications of wide-area measurement system provide great potential for online assessment of voltage stability in power system. The study of voltage stability is considered as new challenge based on dynamic measurement. Power system voltage instability mechanism is explained based on character of P-V curve and V-Q curve, and the criterion is given that be able to estimate voltage instability by following dynamic measurement. The criterion can be used to estimate voltage instability according to the trend of change of current, power, active power and reactive power after disturbance. Moreover, the criterion has the characters of clearness in principle and convenience in application. Efficiency and correctness of analysis methods and criterion of voltage instability that proposed in this paper are verified with numerical simulation examples under different conditions.

This work is supported by Excellent Doctor Scientific Research Support Project of Jiangsu Normal University (No. 9212814103).

Key words: voltage stability; PMU; power system; power-current curve; instability criterion

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0030-06

0 引言

近年来, 欧美等国家多个大型电力系统相继发生的多起电压持续偏低、电压崩溃事件, 电压稳定问题也逐渐成为国际电工学界关注的焦点, 这也推动了该问题的研究, 到目前为止已经取得了非常大的进展。

电力系统的动态行为包含许多复杂的非线性机电振荡现象, 其研究电压稳定的方法也是多种多样。就系统中电压失稳的判定问题的研究, 许多学者提出了不同的理论和实际方法, 但对该问题的研究仍然是开放性的。有些学者从负荷特性的角度间

接或直接地研究电压稳定^[1]; 基于利亚普诺夫稳定理论, 用分岔理论在平衡点处特征值来分析电压稳定是一种传统方法^[2-3], 但该方法对扰动大小的应用有局限性。文献[4]讨论了分析电压稳定的静态、动态方法, 并比较了在不同工况下动静态分析方法的结果; 文献[5]用等值和求解奇异值来分析电压稳定, 但需要取关键的等效参数; 文献[6]在 PMU 测量数据的基础上, 给出了一种算法以探测电压不稳定; 文献[7]用局部量测量估算电压稳定裕度; 文献[8]针对小扰动, 基于分岔理论给出了电压失稳性分析方法。总体上, 有些判据和分析方法或多或少会有应用上的局限性, 难以适应实际系统的要求^[9-14]。

PMU 技术在电力系统中的广泛应用, 促进了在线监测系统的形成和发展^[15-16], 尤其是近年来 PMU

基金项目: 江苏师范大学优秀博士科研支撑项目(9212814103)

技术的发展为在线数据的获得提供了可能。文献[17]提出了基于母线处功率电流的变化判别电压是否失稳的判据。如何利用广域测量系统的数据对系统电压失稳^[18]进行分析和监测具有非常重要的意义。文献[19]计及感应电动机负荷, 提出了负荷母线的在线电压稳定指标。文献[20]基于局部相量测量, 给出一种电压不稳定指标。

本文综合分析 $P-V$ 和 $V-Q$ 曲线特性, 解释了电力系统电压失稳的机理, 并给出了一种判断扰动后电力系统电压是否失稳的判据。该判据依据扰动后母线电流、功率及有功和无功的变化规律判断电压是否失稳。EPRI-36 节点系统在不同工况下的仿真结果验证了该判据的有效性。

1 电力系统电压稳定性分析

根据国内外学者在电力系统电压稳定领域的研究可知, 电压稳定与负荷需求和系统向负荷节点供电能力之间的平衡有密切的关系。电压稳定性, 是指系统在满足负荷功率需求的前提下, 维持负荷电压在其容许范围内的能力。当系统具有这种能力时系统电压稳定, 反之就是系统电压失稳。图 1 为电力系统戴维南等值功率传输图。

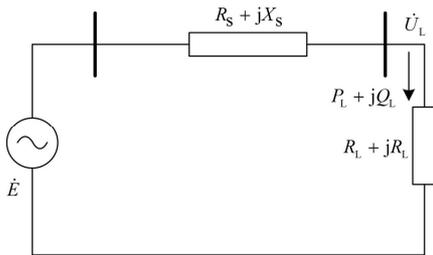


图 1 简单交流电路模型

Fig. 1 Circuit of simple AC model

通常用 $P-V$ 曲线“鼻尖”处的极限功率值作为电压失稳点, 它既缺乏稳定性理论的支持也无法解释电压失稳的并发过程。然而 $V-Q$ 曲线特性却能解释电压失稳的并发过程, 即越过 $V-Q$ 曲线(见图 4)的极限点后, 无功功率随着电压的降低反而升高。 $V-Q$ 曲线特性支持了电压稳定主要是由于无功失衡而造成的解释。如果能证明 $P-V$ 曲线与 $V-Q$ 曲线同时达到极限点, 那么用 $P-V$ 曲线作为电压失稳的机理就可得到解释。以下的证明就是基于此出发点。

证明: 图 1 为电力系统戴维南等值电路。

结合图 1, 线路阻抗表示如下:

$$R_s + jX_s = |Z_s| e^{j\varphi} \quad (1a)$$

$$Y = \frac{1}{Z_s} \quad (1b)$$

负荷阻抗表示为

$$R_L + jX_L = |Z_L| e^{j\beta} \quad (1c)$$

电源电压表示为

$$\dot{E} = |E| e^{j\delta} \quad (1d)$$

负荷电压表示为

$$\dot{U}_L = |U| e^{j\alpha} \quad (1e)$$

负荷节点网络注入负荷点处有功功率和无功功率分别表示如下:

$$P = \frac{|U||E|}{|Z_s|} \cos(\varphi + \alpha - \delta) - \frac{|U|^2}{|Z_s|} \cos \varphi \quad (2a)$$

$$Q = \frac{|U||E|}{|Z_s|} \sin(\varphi + \alpha - \delta) - \frac{|U|^2}{|Z_s|} \sin \varphi \quad (2b)$$

将式(2)化简整理, 得

$$\left(P + \frac{U^2}{Z_s} \cos \varphi \right)^2 + \left(Q + \frac{U^2}{Z_s} \sin \varphi \right)^2 = \left(\frac{EU}{Z_s} \right)^2 \quad (3)$$

以式(3), 建立函数:

$$f(U) = \left(P + \frac{U^2}{Z_s} \cos \varphi \right)^2 + \left(Q + \frac{U^2}{Z_s} \sin \varphi \right)^2 - \left(\frac{EU}{Z_s} \right)^2 = 0 \quad (4)$$

把式(4)化简, 可以写成为关于 U^2 的二次多项式:

$$f(U^2) = (U^2)^2 + \left(\frac{2PZ_s \cos \varphi + 2QZ_s \sin \varphi}{-E^2} \right) U^2 - E^2 \quad (5)$$

$$(U^2)^2 + (P^2 + Q^2)Z_s^2 = 0$$

由于 $U^2 \geq 0$, 式(5)对应的解 U^2 值一定非负, 所以含 U^2 的二次多项式图形应如图 2 所示, 其中左图为二次曲线图形, 右图为对应的 $P-V$ 曲线。

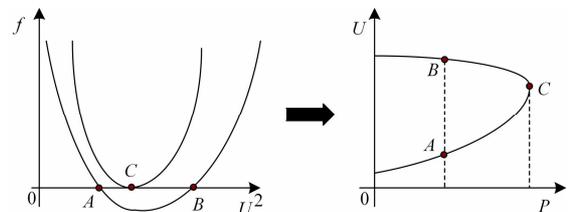


图 2 电压功率变化

Fig. 2 Voltage and active power

由式(5), 据韦达定理, 有

$$\Delta = b^2 - 4ac = E^4 - 4Z_s^2 (P \sin \varphi - Q \cos \varphi)^2 - 4E^2 Z_s (P \cos \varphi + Q \sin \varphi) \quad (6)$$

式(6)大于零时, 由解的存在性, 式(5)对应的 U^2

存在两个解，分别为图 3 中 A、B 点，分别对应于 P-V 曲线上 A、B 低值解和高值解(图 2 右图中)；若不断增大功率 P、Q，式(6)的值也发生变化，直至为零，此时对应式(5)中的 U² 只有一个解，对应图 2 中 C 点。也有式(5)二次方程对称轴为 E² - 2Z_s(P cos φ + Q sin φ)，则当功率参数 P、Q 逐渐增大的过程中，对称轴逐渐左移，对应的高值解也逐渐降低。

由以上分析，含 U² 的二次方程若存在二个解时，对应图 2 右侧图中的两个解；若仅存在一个解时，对应图 2 右侧图中一个解，此时 Δ = b² - 4ac = 0，由此解得电压值为

$$U^2 = \frac{E^2 - 2PZ_s \cos \varphi - 2QZ_s \sin \varphi}{2} \quad (7)$$

式(7)对应电压值则为 P-V 曲线的极限点对应电压值。由 P、Q 分别为 U 的隐函数，对式(4)求关于 U 的偏导 ∂f(U)/∂U，得

$$P \frac{\partial P}{\partial U} + \frac{U^2 \cos \varphi}{Z_s} \cdot \frac{\partial P}{\partial U} + \frac{2PU}{Z_s} \cos \varphi + \frac{2U^3}{Z_s^2} + Q \frac{\partial Q}{\partial U} + \frac{U^2 \sin \varphi}{Z_s} \frac{\partial Q}{\partial U} + \frac{2QU}{Z_s} \sin \varphi - \frac{E^2 U}{Z_s^2} = 0 \quad (8)$$

在式(7)对应状态时，相应值有 ∂P/∂U=0，由式(8)可得

$$2 \frac{UP \cos \varphi}{Z_s} + \frac{2U^3}{Z_s^2} + Q \frac{\partial Q}{\partial U} + \frac{U^2 \sin \varphi}{Z_s} \frac{\partial Q}{\partial U} + \frac{2UQ \sin \varphi}{Z_s} - \frac{E^2 U}{Z_s^2} = 0 \quad (9)$$

将式(7)的电压值代入式(9)，可解得到在该状态下，当 ∂P/∂U=0 时，是否也有 ∂Q/∂U=0。若在该状态下能解得 ∂Q/∂U=0，则 P-V 曲线和 V-Q 曲线功率传输极限点对应的电压值相等；若在该状态下解得 ∂Q/∂U≠0，则 P-V 曲线和 V-Q 曲线功率传输极限点对应的电压值并不相等。把式(7)代入式(9)，解得

$$\frac{\partial Q}{\partial U} = 0 \quad (10)$$

由式(10)结果得到，在相应状态下，有 ∂P/∂U=0 时，当且仅当 ∂Q/∂U=0。由此证得当 ∂P/∂U=0 时，也有 ∂Q/∂U=0，即 P-V 曲线和 V-Q 曲线功率传输极限点对应的电压值相等。证毕。

图 3 给出了相应于图 1 的母线电压、电流和功率的变化关系。在功率极限点的左侧，负荷通过增大电流提高功率，此时位于电压稳定区域；功率越过极限点，情况与之相反，负荷电流增大获得功率反而减小，电压不断下降，此时位于不稳定区域。

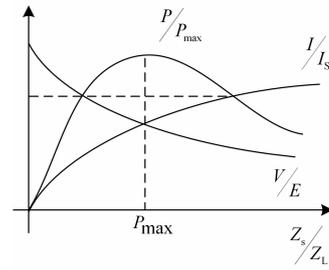


图 3 母线电压、电流和功率的变化关系

Fig. 3 Relation of load voltage, current and power

上述分析是以 P-V 曲线为基础，然而造成电压崩溃的并发过程利用 P-V 曲线目前还难以解释。

综合考虑 P-V 曲线(图 3)和 V-Q 曲线(图 4)的特性，可得到比较完整的电压失稳解释：当电力系统有功越过极限功率点后，电压不断下降，当电压的下降值越过无功功率极限点后致使无功不断上升，于是电压进一步下降导致无功负荷更为上升，这样形成了恶性反馈，最终导致电压失稳直至崩溃。因此在有功越过功率极限点的同时其电压下降越过无功的极限点，本节已证明有功和无功是同时到达极限点。导致电压即失稳乃至崩溃。综合 P-V 和 V-Q 曲线的特性可以解释电压失稳的并发过程。

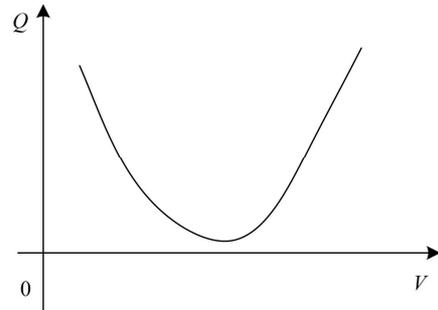


图 4 V-Q 曲线

Fig. 4 V-Q curve

2 电压失稳性判据分析

本节基于大量电压失稳仿真算例发现，在失稳过程中，不仅母线电压、功率不断下降、电流不断上升，其变化完全遵循图 3 的各曲线变化规律，同时，在此期间无功功率却随电压下降而不断上升。

基于上述电压失稳过程中物理量变化规律的分析，因此识别电压失稳的母线量测量主要有：电压、电流、有功和无功。在判据中，无功和有功的变化可用它们的比值反映即 tan φ。由于 P-V 曲线和 V-Q 曲线反映的都是静态特性，而电压失稳是一个动态过程。在动态过程中，受扰动和自动装置动作的影

响, 功率曲线将会发生跳变。为了计及这一影响, 因此考虑判据的启用应在扰动结束和自动装置动作后, 本节将避开时间设定在 0.25 s, 即扰动后 0.25 s 开始采集判据的量测量。

本节给出电压失稳判据为

判据: 扰动结束 0.25 s 后, 根据监测或计算得到的电流、功率等各量满足关系式: $I_{k+1} - I_k > \varepsilon$ & $P_k - P_{k+1} > \varepsilon$ & $\tan \varphi_{k+1} - \tan \varphi_k > \varepsilon$, 并持续时间大于或等于 0.1 s; 则电压失稳。 ε 为一个非常小的正数, 可以取 $\varepsilon=0.001$ 。

上述判据更能反映电压失稳的机理而不需人为设置电压门槛值。

3 数值仿真分析

以 8 机 EPRI-36 节点系统为例进行仿真以验证本节所提出的判据。在仿真中, 负荷为恒阻抗和动态负荷相结合。仿真系统如图 5 所示。

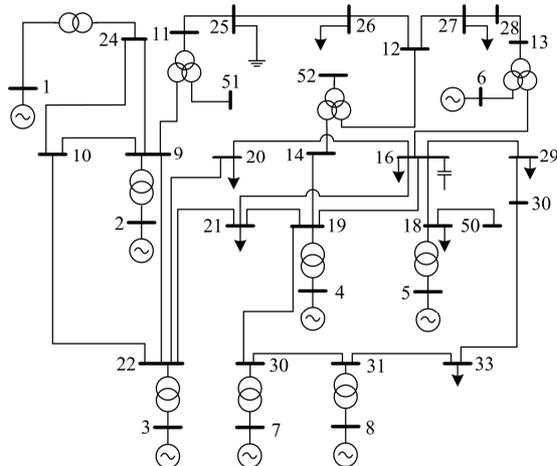


图 5 36 节点系统简图

Fig. 5 36-node simple diagram

算例 1。

扰动为系统重载, 在 1 s 时减小 2 号和 5 号机 80% 出力, 负荷为 60% 感应电动机和 40% 恒阻抗负荷。仿真结果表明, 在该扰动下用本节判据判断电压不稳定的母线有: 16、18、19、20、21、23、29、50、52。现选取不稳定和稳定的两种不同情况的母线电流、功率、 $\tan \varphi$ 和电压时域响应曲线变化分别如图 6、图 7 所示。

在图 6 中, 母线 20 在 1.25 s 后判据启用, 电流上升, 有功功率下降, 其 $\tan \varphi$ 相应增加, 符合判据, 在 1.35 s 即可判定电压发生失稳, 此时电压为 0.7519 p.u. 该判据比用电压门槛值的判据能更早地判断电压失稳。

由图 7, 发电机减小出力 1.25 s 后判据启用, 电流上升, 有功功率也上升, 不满足判据条件, 该母线不会发生电压失稳。其电压时域响应曲线也表明, 经过小幅且短暂的电压下降后又回升到较高水平, 没有发生电压失稳, 验证了电压保持稳定。

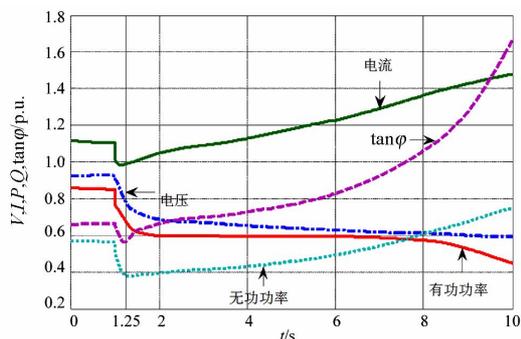


图 6 母线 20 电压不稳定情况的曲线变化

Fig. 6 Voltage instability curve at bus 20

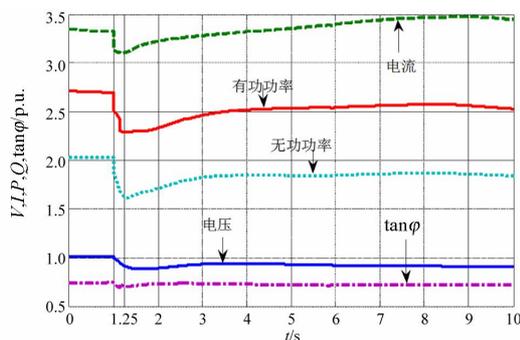


图 7 母线 22 电压稳定情况的曲线变化

Fig. 7 Voltage stability curve at bus 22

算例 2。

扰动故障为 1 s 时 12-26 联络线断线, 负荷为 40% 感应电动机和 60% 恒阻抗负荷。仿真结果表明, 在该扰动下用本节判据判断电压不稳定的母线有: 16、17、18、19、20、23、25、26、29、50。现选取不稳定和稳定的两种不同情况的母线电流、功率、 $\tan \varphi$ 和电压时域响应曲线变化分别示如图 8、图 9 所示。

在图 8 中, 系统断线扰动发生后 0.25s 启用判据, 均不满足判据条件, 母线电压稳定。其中在随后时间里的电压时域响应曲线也验证了电压保持稳定, 没有失稳。

在图 9 中, 母线 20 在 1.25 s 后启用判据, 出现电流上升、有功功率下降、 $\tan \varphi$ 增加时间持续超过 0.1 s, 符合判据, 在 1.35 s 时即可判定母线电压失稳, 此时电压为 0.791 p.u. 可见文中判据能够及早地判断出电压失稳。

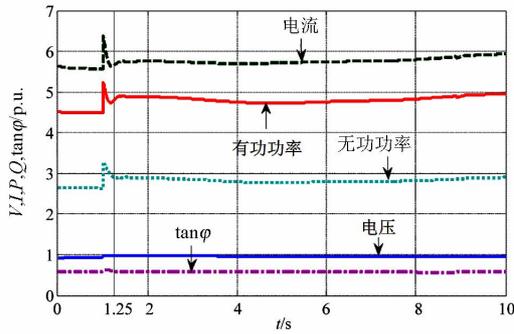


图8 母线9电压稳定情况曲线变化

Fig. 8 Voltage stability curve at bus 9

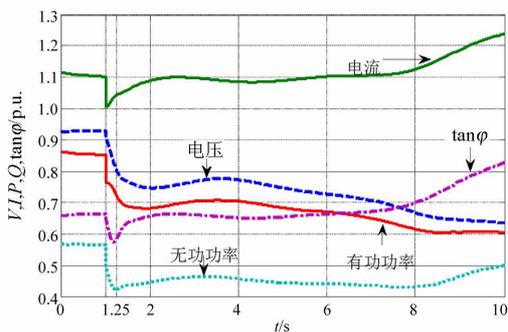


图9 母线20电压不稳定情况曲线变化

Fig. 9 Voltage instability curve at bus 20

大量仿真结果表明, 本文所提用于电压失稳与否的判据对于受端母线的稳定性判别具有很好的鲁棒性。对于发电机出口母线和靠近发电机的送端母线, 符合失稳判据条件情况时其母线电压都比受端母线高。这完全符合电力系统中电压的分布规律, 也表明电压稳定是有界稳定的特性。电力系统的电压稳定监视和控制主要是面向受端母线和系统的中枢母线。故本文判据可胜任这一任务。

4 结论

在小系统中, 研究了电压失稳性问题及判据, 根据理论分析和仿真算例, 得到以下结论:

1) 基于 $P-V$ 曲线和 $V-Q$ 曲线特性的综合分析, 解释了电力系统电压失稳的机理。

2) 本文提出了跟踪动态测量的判断扰动后电力系统电压是否失稳的判据, 即依据扰动后母线电流、功率及有功和无功的变化规律判断电压是否失稳, 该判据原理清晰, 易于应用。

3) 文中所提判据不依赖人为设定电压门槛值, 使判据的机理性更强, 并能及早判断电力系统电压的稳定性, 仿真算例验证了该判据的有效性。

本文研究内容目前还基于仿真数据, 面向 PMU 采集的实际系统数据, 该判据还需进行完善, 如避

开扰动的合理时间、判据满足的持续时间等问题需进一步研究。

参考文献

- [1] 李欣然, 贺仁睦, 章健, 等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 1-10.
LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHANG Jian, et al. Effect of load characteristics on power system steady-state voltage stability and the practical criterion of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 1-10.
- [2] 马兆兴, 万秋兰, 李洪美. 考虑极限诱导分岔的电压稳定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 1-7.
MA Zhao-xing, WAN Qiu-lan, LI Hong-mei. Research on voltage stability analysis of limit induced bifurcation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 1-7.
- [3] 曹国云, 王冲, 陈陈. 中心流形方法降维分析电压崩溃中的 Fold 分岔[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 40-43.
CAO Guo-yun, WANG Chong, CHEN Chen. Center manifold method to simplify the analysis of Fold bifurcation associated with voltage collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 40-43.
- [4] MORISON G K, GAO B, KUNDUR P. Voltage stability analysis using static and dynamic approaches[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1159-1171.
- [5] 李兴源, 王秀英. 基于静态等值和奇异值分解的快速电压稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 1-4.
LI Xing-yuan, WANG Xiu-ying. Fast voltage stability analysis methods based on static equivalence and singular value resolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 1-4.
- [6] CORSI S, TARANTO G N. A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1271-1279.
- [7] VU K, BEGOVIC M M, NOVOSEL D, et al. Use of local measurements to estimate voltage stability margin[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(8): 1029-1035.
- [8] 马兆兴, 陈昊, 万秋兰. 计及 STATCOM 容量约束的电压失稳性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 88-93.
MA Zhao-xing, CHEN Hao, WAN Qiu-lan. Analysis on voltage instability considering STATCOM capacity constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 88-93.

- [9] 段俊东, 郭志忠. 一种可在线确定电压稳定运行范围的方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 113-117.
DUAN Jun-dong, GUO Zhi-zhong. A new method for on-line determination of the capability curves of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 113-117.
- [10] 丁涛, 董柏峰, 顾伟, 等. 基于 PMU 的电压稳定动态线性化指标优化切负荷算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 27-33.
DING Tao, DONG Bo-feng, GU Wei, et al. Optimization of a load shedding scheme using dynamic voltage stability linearized index based on PMU[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 27-33.
- [11] GLAVIC M, VAN CUTSEM T. Wide-area detection of voltage instability from synchronized phasor measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1408-1416.
- [12] 张学清, 梁军, 刘道伟, 等. 基于信号能力综合指数的电网电压稳定性能研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 88-94.
ZHANG Xue-qing, LIANG Jun, LIU Dao-wei, et al. Study of power grid voltage stability based on signal energy aggregate index[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 88-94.
- [13] MILOSEVIC B, BEGOVIC M. Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 121-127.
- [14] VERBIC G, GUBINA F. A new concept of voltage-collapse protection based on local phasors[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 576-581.
- [15] 干磊, 康河文, 何敏. 基于广域测量系统的电压稳定动态监测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 152-156.
GAN Lei, KANG He-wen, HE Min. The dynamic monitoring of voltage stability based on wide-area measurement system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 152-156.
- [16] 刘道伟, 谢小荣, 穆钢, 等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 13-17.
LIU Dao-wei, XIE Xiao-rong, MU Gang, et al. An on-line voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 13-17.
- [17] 汤涌, 易俊, 孙华东, 等. 基于功率电流变化关系的电压失稳判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 7-11.
TANG Yong, YI Jun, SUN Hua-dong, et al. Voltage instability criterion based on variation relationship of power and current[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 7-11.
- [18] 卡森, 武尔勒斯. 电力系统电压稳定性[M]. 王奔, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 14-27.
CUTSEM T V, VOURMAS C. Voltage stability of electric power systems[M]. WANG Ben, Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 14-27.
- [19] 孙华东, 周孝信. 计及感应电动机负荷的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 1-6.
SUN Hua-dong, ZHOU Xiao-xin. An on-line voltage stability index of power system considering induction motor loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 1-6.
- [20] CORSI S, TARANTO G N. A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1271-1279.

收稿日期: 2014-03-11; 修回日期: 2014-05-06

作者简介:

马兆兴(1982-), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统电压稳定性及无功控制研究; E-mail: zhaoxing_ma@sina.com

李洪美(1969-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为电力系统稳定性分析;

万秋兰(1950-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为电力系统规划、运行及控制。