

基于广域测量系统的电压稳定动态监测

干磊¹, 康河文², 何敏¹

(1. 湖北黄石供电公司, 湖北 黄石 435002; 2. 酒泉超高压输变电公司, 甘肃 酒泉 735010)

摘要: 基于同步相量技术的广域动态测量系统, 可以在时空坐标下监测电力系统动态运行特性, 弥补了现有 SCADA 系统和故障滤波系统的不足, 为大电网动态电压稳定监测奠定了基础。介绍了 WAMS 的基本原理, 接着比较详细地阐述了电压稳定在线监测系统的内容及其在线应用的具体实现方法。在 EPRI-36 节点系统上的仿真结果验证了该监测系统的有效性。

关键词: 电力系统; 电压稳定; 电压稳定动态监测; 广域测量系统

The dynamic monitoring of voltage stability based on wide-area measurement system

GAN Lei¹, KANG He-wen², HE Min¹

(1. Hubei Huangshi Power Supply Company, Huangshi 435002, China; 2. Jiuquan EHV Transmission and Transformation Company, Jiuquan 735010, China)

Abstract: Synchrophasor technology-based Wide-Area Measurement System (WAMS) can supervise the dynamic operation of power systems in time-space coordinate, which overcomes the weaknesses of traditional SCADA and digital fault recorders and lays a foundation for dynamic voltage stability monitoring of large-scale power system. Firstly, the basic principle of WAMS is introduced. Then the contents and the realization methods of online voltage stability monitoring system are expatiated concretely. Finally, simulation test with the EPRI 36-bus system shows the availability of the monitor system.

Key words: power system; voltage stability; voltage stability dynamic monitoring; wide-area measurement system (WAMS)

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0152-04

0 引言

近几十年来, 电力系统向大电网、高电压和远距离输电发展, 虽然对提高经济效益、促进环境保护起到了重要作用, 但是也给电力系统的安全运行带来了新的问题, 电压失稳就是其中之一^[1]。电压稳定性的离线分析不仅计算量大, 而且难以适应实际系统运行方式的改变, 因而电压稳定性的实时监控和控制逐渐变得重要^[2]。

20 世纪 90 年代初, 基于全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 的相量测量单元 (Phasor Measurement Unit, PMU) 的成功研制, 标志着同步相量 (Synchrophasor) 技术的诞生。它在电力系统中的广泛应用, 促进了大电网广域测量/监视系统 (Wide-Area Measurement/Monitoring System, WAMS) 的形成和发展。现代电网的规模不断扩大, 动态特性非常复杂, 电压在线稳定性监测越来越需要从系统整体来考虑。WAMS 能实现广域电网运行状态的在线同步测量, 借助于高速通信网络还可将

测得的相量数据进行汇总, 这就为实现全局型的电压稳定性在线监测创造了条件^[3]。因此, 探索一种基于广域测量系统的电压稳定综合动态监测和分析的在线应用算法具有重要的意义。

1 WAMS 的基本原理

WAMS 的基本原理可用图 1 来说明。在发电厂和变电站安装相量测量单元 (PMU), 它对母线电压和线路电流进行三相交流采样, 采用相量算法计算正负零序相量、频率和功率, 对于发电厂还得到机组的内电势相量, 然后由 GPS 接收器提供的高精度时钟信号将测量结果打上时标, 继而遵循共同的接口协议 (如 IEEE 1344 标准) 将带时标的相量数据打包并通过高速通信网络传送到数据中心, 数据中心对各子站的相量进行同步处理和存储, 并可计算系统惯性中心角度和各机组、母线的相对相角, 进一步由相应的应用程序, 对相量数据执行实时评估以动态监视电网的安全稳定性, 或进行离线分析, 为系统的优化运行提供依据, 进一步与控制结合起

来,提高电网的安全稳定水平和传输能力。

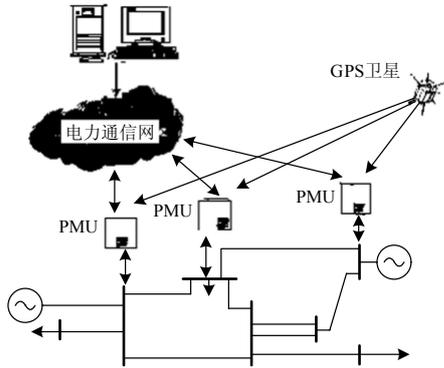


图1 WAMS系统结构图

Fig.1 System configuration of WAMS

2 监测的内容和分析方法

2.1 电压越限监测

电压失稳的判据可为母线电压下降,平均值持续低于限定值。具体的电压数值和持续时间可以根据系统具体情况设定。根据WAMS采集的电压相量信息,实时监测系统电压的分布,当出线异常状态(稳态越限、暂态越限)时,进行报警、启动录波等功能。

具体实现时,用一组包含电压跌落的门槛值和可接受的最大持续时间的二元表来描述每个节点对暂态电压跌落可接收性的要求。

2.2 电压稳定指标监测

目前常用的静态电压稳定指标有灵敏度^[4]、负荷裕度^[5]、最小特征值(奇异值)^[6]、 L 指标^[7]等。但这些方法都需要不同程度的复杂计算,应用于电力系统在线监控时存在一定的困难,文献[8]指出了这些指标线性很不好,它们都不能预报系统接近崩溃点的程度。

在本电压监测系统中,支路采用如图2所示的典型II型等值模型,支路在线电压稳定指标为:

$$L_{VSIk} = \frac{4P_{kj}R_k}{[V_{ki} \cos(\theta_k - \delta_k)]^2} \quad (1)$$

文献[9]给出了该指标的定义。其中 P_{kj} , R_k , V_{ki} , θ_k , δ_k 分别表示与该母线相连的其中一条输电支路 k 末端(根据有功流向确定支路的首段和末端)的有功、电阻、首端电压幅值、支路阻抗角、支路两端相角差。监测母线的电压稳定指标定义为:

$$V_{SI} = \max_{k \in S} (L_{VSIk}) \quad (2)$$

其中: L_{VSIk} 代表与该母线相连的支路 k 的电压稳定指标; S 代表与该母线相连的总支路个数。当 V_{SI} 等于1时,意味着该母线已达到电压崩溃点(传输

能力极限)。此时,负荷若进一步增加,系统即发生电压崩溃/失稳。 V_{SI} 与1的距离间接反映该母线的电压稳定裕度。

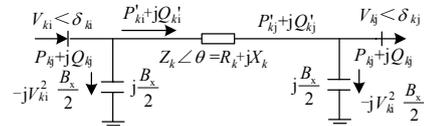


图2 电力支路模型图

Fig.2 The transmission line model of power system

3 V_{SI} 指标在 WAMS 中的具体实现

由 V_{SI} 的表达式可以看出,支路参数 R_k , θ_k 是影响 V_{SI} 精度的根本原因,其他量 P_{kj} , V_{ki} , δ_k 都是实际的状态量, V_{SI} 在实际工程中的在线应用有以下几种情况。

3.1 单个母线装有 PMU

在实际高压输电系统中,一个母线往往和多条支路相连,根据支路有功流向确定支路的首端和末端。在系统某一负荷水平下,该母线可能是一条支路的首端,是另一条支路的末端,那么 V_{SI} 的在线计算又有以下两种方法。

3.1.1 PMU 在支路末端

假如 k 支路 j 侧装有PMU,可以知道某一时刻的 P_{kj} , Q_{kj} , V_{kj} 。对于图2的电力系统模型图,根据有功流向,令 i 为发端侧,电压相量为 $V_{ki} \angle \delta_{ki}$,注入功率为 $P_{ki} + jQ_{ki}$, j 侧输出功率为 $P_{kj} + jQ_{kj}$,阻抗 $Z_k \angle \theta_k = R_k + jX_k$, $jB_k/2$ 为支路两端的等值导纳。通过等值阻抗靠 i 侧的功率为 $P_{ki}' + jQ_{ki}'$,通过等值阻抗靠 j 侧的功率为 $P_{kj}' + jQ_{kj}'$ 。支路参数 R_k , X_k , B_k , θ_k 已知,可得:

$$P_{ki}' + jQ_{ki}' = P_{ki} + j(Q_{ki} + V_{ki}^2 \frac{B_k}{2}) \quad (3)$$

$$P_{kj}' + jQ_{kj}' = P_{kj} + j(Q_{kj} - V_{kj}^2 \frac{B_k}{2}) \quad (4)$$

当以 j 的相电压 V_{kj} 为参考相量,即 $\dot{V}_{kj} = V_{kj} \angle 0^\circ$,

$\dot{I}_2, \cos \varphi_2$ 已知,对应的电压相量图如图3所示,可求得支路首端的相电压:

$$\dot{V}_{ki} = \dot{V}_{kj} + \dot{I}(R_k + jX_k) = \dot{V}_{kj} + \frac{P_{kj}' - jQ_{kj}'}{V_{kj}} (R_k + jX_k) = \quad (5)$$

$$\dot{V}_{ki} + \frac{P_{kj}' R_k + Q_{kj}' X_k}{V_{kj}} + j \frac{P_{kj}' X_k - Q_{kj}' R_k}{V_{kj}} = \dot{V}_{ki} + \Delta V_{ki} + j \delta V_{ki}$$

$$\text{式中: } \Delta V_{kj} = \frac{P'_{kj} R_k + Q'_{kj} X_k}{V_{kj}}, \delta V_{kj} = \frac{P'_{kj} X_k - Q'_{kj} R_k}{V_{kj}} \quad (6)$$

那么支路首端的电压幅值为

$$V_{ki} = \sqrt{(V_{kj} + \Delta V_{kj})^2 + \delta V_{kj}^2} \quad (7)$$

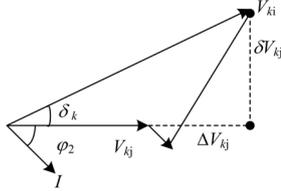


图3 支路的电压相量图

Fig.3 Voltage phasor mode of transmission line

从相量图中可以求得支路两端电压的相角差:

$$\delta_k = \tan^{-1} \frac{\delta V_{kj}}{V_{kj} + \Delta V_{kj}} \quad (8)$$

将已知的 P_{kj} , δ_k 和公式 (7)、(8) 求得的 V_{ki} , δ_k 代入公式 (1)、(2) 即可求得该母线的电压稳定指标。

3.1.2 PMU 在支路首端

假如 k 支路 i 侧装有 PMU, 可以知道某一时刻的 P_{ki}, Q_{ki}, V_{ki} , 由式 (2) 可求得 P'_{ki}, Q'_{ki} , 支路 k 的有功损耗:

$$\Delta P_k = \frac{P_{ki}'^2 + Q_{ki}'^2}{V_{ki}^2} R_k \quad (9)$$

支路末端的有功:

$$P_k = P_{ki} - \Delta P_k \quad (10)$$

当以 i 的相电压 V_{ki} 为参考相量, $I_1, \cos \varphi_1$ 已知, 对应的电压相量图如图 4 所示, 可求得:

$$\Delta V_{ki} = \frac{P'_{ki} R_k + Q'_{ki} X_k}{V_{ki}}, \delta V_{ki} = \frac{P'_{ki} X_k - Q'_{ki} R_k}{V_{ki}} \quad (11)$$

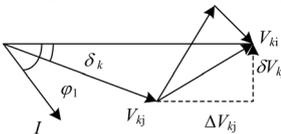


图4 支路的电压相量图

Fig.4 Voltage phasor mode of transmission line

从相量图中可以求得支路两端电压的相角差:

$$\delta_k = \text{tg}^{-1} \frac{\delta V_{ki}}{V_{ki} + \Delta V_{ki}} \quad (12)$$

将已知的 V_{ki}, θ_k 和式 (10)、(12) 求得的 P_{kj}, δ_k 代入公式 (1)、(2) 即可求得该母线的电

压稳定指标。

3.2 支路两端母线装有 PMU

在支路两端装有 PMU 这种情况下, 不仅按照上面提到的方法求得支路两端各母线的电压稳定指标 V_{SI} , 可以采用另外的方法求得该支路的电压稳定指标, 具体实现该指标分以下两种情况。

3.2.1 不计支路导纳的影响

由于支路两端装有 PMU, 可以同时知道支路两端的 $V_{ki}, V_{kj}, P_{ki}, P_{kj}, Q_{ki}, Q_{kj}, \delta_{ki}, \delta_{kj}$ 支路参数 $R_k, X_k, \theta_k, \delta_k$ 可分别由式 (13) ~ (16) 在线求得:

$$R_k = \frac{(P_{ki} - P_{kj}) V_{kj}^2}{(P_{kj}^2 + Q_{kj}^2)} \quad (13)$$

$$X_k = \frac{(Q_{ki} - Q_{kj}) V_{kj}^2}{(P_{kj}^2 + Q_{kj}^2)} \quad (14)$$

$$\theta_k = a \tan(X_k / R_k) \quad (15)$$

$$\delta_k = \delta_{ki} - \delta_{kj} \quad (16)$$

将 $V_{ki}, P_{kj}, R_k, \theta_k, \delta_k$ 代入式 (1)、(2) 求得 V_{si} 值。

3.2.2 计及支路导纳的影响

在这种情况下, 至少应知道支路两端的导纳 $B_{K/2}$, 根据公式(3)、(4)分别求得 $P_{ki}', P_{kj}', Q_{ki}', Q_{kj}'$ 将公式 (13)、(14) 中的 $P_{ki}, P_{kj}, Q_{ki}, Q_{kj}$ 分别替换为 $P_{ki}', P_{kj}', Q_{ki}', Q_{kj}'$ 求得 R_k, X_k , 代入式 (15) 求得 θ_k , 由式 (16) 求得 δ_k , $V_{ki}, P_{kj}, R_k, \theta_k, \delta_k$ 代入式 (1)、(2) 求得 V_{si} 值。

该指标用于广域静态电压稳定在线监测与分析的流程框图如图 5 所示。

根据仿真和经验设置比较合理的电压预警阈值, 当指标越过某一阈值时进行相应级别的电压报警, 并将最弱连接支路显示出来。当改变系统负荷时, 要观察全网所能计算出的 $L_{V_{SIk}}$ 变化情况, 对最弱支路在线分析引起 $L_{V_{SIk}}$ 增大的原因, 和电压稳定控制接口, 采取有效的措施 (改变发电机出力或进行无功补偿等) 提高最弱联络支路的电压稳定水平。

4 仿真结果分析

本监测算法应用于 EPRI-36 系统中, 以电力系统综合分析程序 (WPSASP) 潮流输出结果作为实测数据, 采用连续稳态潮流的方法, 逐渐增加系统某一母线、某一区域以及全系统的负荷使系统趋于电压崩溃, 对本文的在线电压稳定指标进行验证, 仿真结果表明不同的负荷增长模式下, 系统趋于电

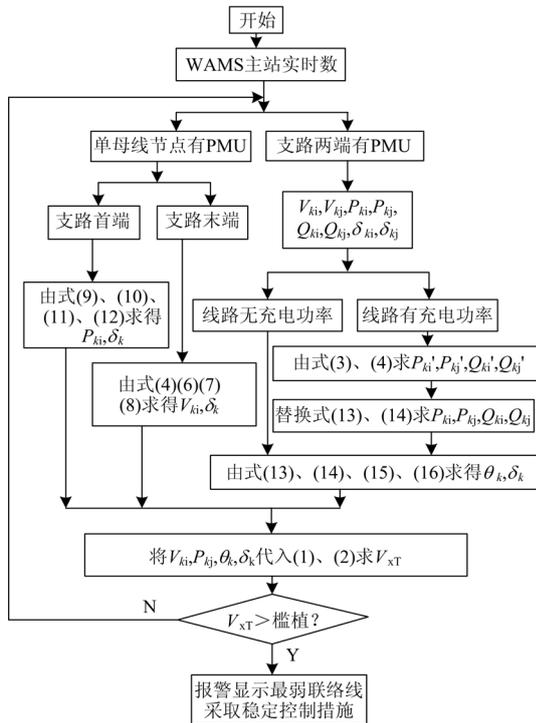


图5 静态电压稳定在线监测流程

Fig.5 Flow chart of static voltage stability on-line monitoring

压崩溃的路径不同,但 L_{VSIk} 同样能很好地反映系统各支路电压稳定的变化情况,在系统临近电压崩溃点时,总有一支路的 L_{VSIk} 值最大且接近于临界阈值1。因为篇幅关系,在此仅以恒功率因数(0.95)逐渐增加全网负荷直到系统临近电压崩溃为例来说明问题,几条代表支路的 L_{VSIk} 指标曲线仿真结果见图6所示。

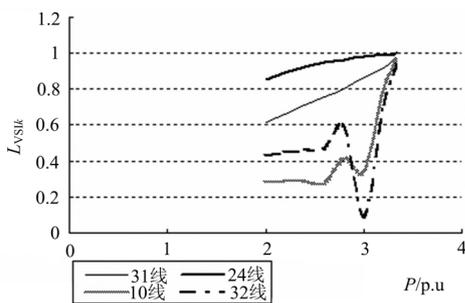


图6 全网负荷增加时的支路 L_{VSIk} 曲线

Fig.6 The curve of L_{VSIk} with the whole load increasing

在此仿真事件中,母线 BUS20 的电压下降最快最低。从图6可以看出,支路24的 L_{VSIk} 值始终是最高的,则该支路是系统的最弱支路。但最弱支路24却并不与母线 BUS20 相联,这就说明了不能简单的根据母线电压的降落大小判断系统电压的稳定水平,系统发生电压崩溃可能发生在电压变化并不

明显的其他支路上。支路10、32的 L_{VSIk} 曲线出现了两次转折,有功潮流发生两次转移,临近电压崩溃点其 L_{VSIk} 上升特快,这说明了发生电压崩溃的突然和速度之快。

所以,系统趋于电压崩溃的过程中,本电压稳定动态检测算法求得的结果能有效地反映系统各支路电压稳定水平的变化情况。

5 结语

广域测量系统的迅速发展和广泛应用为大电网电压稳定性的在线监测奠定了基础。本文利用支路电压稳定指标 L_{VSIk} , 结合 WAMS 的实际工程应用背景,提出了一种基于 WAMS 的电压稳定动态监测具体实现方案。该方案只对系统安装 PMU 的节点电压实时监测,具有计算简便快捷的优点,从而更趋于实用。

参考文献

- [1] 刘益青, 陈超英, 梁磊, 等. 电力系统电压稳定性的动态分析方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (1): 105-108.
LIU Yi-qing, CHEN Chao-ying, LIANG Lei, et al. Review of dynamical analysis of voltage stability in power systems[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15 (1): 105-108.
- [2] 吴浩, 韩祯祥. 电压稳定的实时监控[J]. 电力自动化设备, 2002, 22 (1): 11-14.
WU Hao, HAN Zhen-xiang. Real-time monitoring and control of voltage stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22 (1): 11-14.
- [3] 谢小荣, 李红军, 童陆园, 等. 同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J]. 电网技术, 2004, 28 (1): 10-14.
XIE Xiao-rong, LI Hong-jun, TONG Lu-yuan, et al. Feasibility study on using synchrophasor technology for power system transient stability control[J]. Power System Technology, 2004, 28 (1): 10-14.
- [4] Flatabo N, FossoOD, OgnedalR. A method for calculation of margins to voltage instability applied on the norwegian system for maintaining required security level[C]. //IEEE PWR. Seattle: 1993, 8 (3): 920-928.
- [5] 包黎昕, 张步涵, 段献忠, 等. 电压稳定裕度指标分析方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (4): 52-55.
BAO Li-xin, ZHANG Bu-han, DUAN Xian-zhong, et al. A summary of the state of the art of voltage stability margin indices[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (4): 52-55.
- [6] 冯诒涛, 刘取, 周双喜, 等. 多机电系统电压静态稳定性的特征结构分析法[J]. 清华大学学报, 1991, 3 (4): 19-27.

(下转第161页 continued on page 161)

- GAO Jun-yan. Distribution network expansion planning including distributed generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [8] DELFINOB. Modeling of the integration of distributed generation into the electrical system[C]. //Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago (IL, USA): 2002: 170-175.
- [9] 张明, 毕鹏翔, 刘健, 等. 辐射状配电网支路电流法潮流计算的收敛特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 41-44.
ZHANG Ming, BI Peng-xiang, LIU Jian, et al. Research on emergency of branch current method based on power flow calculation for radial distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 41-44.
- [10] 刘晓飞, 彭建春, 高效, 等. 基于单亲遗传算法的配电网规划[J]. 电网技术, 2002, 26 (3): 52-56.
LIU Xiao-fei, PENG Jian-chun, GAO Xiao, et al. Distribution network planning based on partheno-genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2002, 26 (3): 52-56.
- [11] 欧阳武. 含分布式发电的配电网规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [12] 吕盼. 基于离散人工鱼群算法的输电网优化规划研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2009.
Lü Pan. Transmission network planning based on discrete artificial fish school algorithm[D]. Jinlin: Northeast Dianli University, 2009.
- [13] 聂宏展, 乔怡, 吕盼, 等. 基于混合人工鱼群算法的输电网扩展规划[J]. 电网技术, 2009, 33 (2): 78-83.
NIE Hong-zhan, QIAO Yi, Lü Pan, et al. Transmission network expansion planning based on hybrid artificial fish school algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33 (2): 78-83.
- [14] 李晓磊, 路飞, 田国会, 等. 组合优化问题的人工鱼群算法应用[J]. 山东大学学报, 2004, 34 (5): 64-67.
LI Xiao-lei, LU Fei, TIAN Guo-hui, et al. Applications of artificial fish school algorithm in combinatorial optimization problems[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2004, 34 (5): 64-67.
- [15] 程晓荣, 张秋亮, 王智慧, 等. 基于人工鱼群算法的配电网网架优化规划[J]. 继电器, 2007, 35 (21): 34-38.
CHENG Xiao-rong, ZHANG Qiu-liang, WANG Zhi-hui, et al. Distribution network structure planning based on AFSA[J]. Relay, 2007, 35 (21): 34-38.
- [16] 刘耀年, 李迎红, 张冰冰, 等. 基于人工鱼群算法的最优潮流计算[J]. 电工电能新技术, 2006, 25 (10): 30-34.
LIU Yao-nian, LI Ying-hong, ZHANG Bing-bing, et al. Artificial fish school algorithm for optimal power flow problems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25 (10): 30-34.
- [17] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Principle and application of genetic algorithms[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
- [18] 康庆平, 周雷. 一个实用的配电网优化规划方法[J]. 电网技术, 1994, 18 (6): 39-43.
KANG Qing-ping, ZHOU Lei. An efficient method of optimum planning for distribution systems[J]. Power System Technology, 1994, 18 (6): 39-43.

收稿日期: 2010-04-15

作者简介:

杨文荣 (1969-), 女, 博士, 教授, 主要研究领域为工程电磁场与磁技术, 电力电子及其应用;

吴海燕 (1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为智能电网与分布式发电系统;

李练兵 (1972-), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为风电逆变器、光伏并网逆变器、运动控制。E-mail: lilianbing@hebut.edu.cn

(上接第 155 页 continued from page 155)

- FENG Zhi-hong, LIU Qu, ZHOU Shuang-xi, et al. An eigen-structure analysis method of the steady-state voltage stability in multimachine system[J]. Journal of Tsinghua University, 1991, 3 (4): 19-27.
- [7] Berrizzi A, Finazzi P, Dosi D, et al. First and second order methods for voltage collapse assessment and security enhancement[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1998, 13 (2): 543-551.
- [8] 姜勇, 周双喜, 朱凌志. 电力系统电压稳定分析中的二阶指标[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42 (9): 1165-1167.
JIANG Yong, ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi. Second-order indices for power systems steady state voltage stability[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2002, 42 (9): 1165-1167.
- [9] Wandell B A. Foundations of vision, sinauer associates[M]. P underland, MA: Inc. Sublshers, 1995.

收稿日期: 2009-11-24; 修回日期: 2010-01-05

作者简介:

干磊 (1983-), 男, 硕士, 研究方向为电压稳定分析, 分布式发电, 电能质量治理; E-mail: ganlei9199@163.com

康河文 (1983-), 男, 助理工程师, 本科, 研究方向为电气工程及其自动化;

何敏 (1985-), 女, 本科, 研究方向为电压稳定分析, 分布式发电, 电能质量治理。