

电压稳定临界域的描述及在线近似确定

段俊东¹, 郭志忠², 魏成江³

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 吴华宇航化工有限责任公司, 河南 焦作 454000)

摘要: 广域测量技术的发展和应用于电力系统电压稳定监视奠定了基础。在此引入负荷阻抗角建立了新的电压稳定临界域的描述即电压表示形式和功率表示形式, 并建立了电压稳定域。利用广域测量技术对节点戴维南等值参数的在线估计实现了对静态电压稳定临界域的在线确定, 间接地避免了潮流计算中 Jacobi 矩阵在临界点奇异而带来的不收敛问题, 弥补了传统方法在线应用中存在的系统规模大、非线性模型不准确、数据多且更新不及时、速度慢等缺陷。通过仿真计算表明提出的方法可行, 可在线快速确定电压稳定临界域。

关键词: 电力系统; 电压稳定; 电压稳定临界域; 电压稳定域; 广域测量系统; 相角测量单元

The critical domain description of voltage stability of power system and its determination

DUAN Jun-dong¹, GUO Zhi-zhong², WEI Cheng-jiang³

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2 Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Wuhua Yuhang Chemical Limited Liability Company, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The development and applications of wide-area measurement system (WAMS) established the foundation of on-line assessment of voltage stability in large-scale power system. This paper presents a new description of the voltage critical states-the voltage expression and the power expression, and the voltage stability domain is established. The critical domain of voltage stability is determined through the estimation of the Thevenin's parameters of a node. Through the local measurement, the method can indirectly avoid the divergence problem caused by the Jacobian matrix singularity of load flow at the critical state. And it avoids the limitations of the conventional methods in on-line applications such as the large-scale power system, the nonlinear model inaccuracy, slow updating of large amount of data. Simulation results prove the proposed method reasonable and that it can on-line determine the critical domain of the node static voltage stability.

Key words: power system; voltage stability; critical domain of voltage stability; domain of voltage stability; wide-area measurement system (WAMS)

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)17-0047-05

0 引言

随着电力系统规模的扩大和电力体制改革的深入, 电力系统常常出现运行接近稳定边界的状态, 给电力系统的安全运行带来了很大影响。近几年来发生的电力事故表明大系统的电压安全性和稳定问题越来越重要^[1-3]。为了提高电力系统运行的安全性、可靠性和灵活性, 必须对节点电压进行在线监视和稳定裕度判断, 为系统的运行调整和事故中处理以及事故后恢复提供一定的在线可行依据。

在线近似确定电压稳定的临界域, 为电力系统

的稳定运行提供一定的参考, 以便通过适当的调整使系统满足一定的稳定裕度, 并为系统在紧急情况下调整和控制提供一定的指导作用, 是目前电力科学研究者努力追求的目标。

电力系统是个复杂的非线性动力学系统, 可以用一个非线性微分-差分-代数方程组来表示^[4]; 电力系统设备很多且各种调整和控制也很多^[3], 负荷的动态变化不容易控制, 研究具有很大的难度^[5,6]。目前许多研究从静态角度基于电力系统潮流方程或扩展潮流方程对电压稳定运行出现临界状态的条件和描述进行了探讨^[7,8], 但是受系统数据采集和整个系

统负荷动态变化及相关控制器的调整及控制等的影响,使得很难在线快速准确地确定电压稳定的临界域,尤其是多个电压临界点及其相互关系的变化对电力系统的相关协调控制至关重要。

本文通过引入负荷阻抗角建立了新的电压稳定临界域的描述即电压表示形式和功率表示形式,并建立了电压稳定域。根据局部电压、电流矢量变化实现了节点电网侧等值参数的在线估计^[9],在此基础上实现了薄弱节点^[10]电压稳定临界域的在线快速近似获得,为电力系统关键节点的电压稳定控制提供一定的借鉴。

1 关键节点电压稳定临界域的描述

关键节点常采用等值的方式来进行分析,通常将所考察的节点等值成如图1所示。

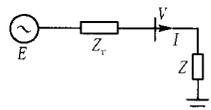


图1 关键节点的等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of the critical node

图中, $Z_r = R_r + jX_r$ 为关键节点电网侧戴维南等值阻抗, $Z = R + jX$ 为节点的等值负荷阻抗; E, V 为关键节点的电网侧戴维南等值电势和节点电压。当网络侧等值不变时,根据阻抗模判据可得:

$$P_{\max} = \frac{\cos \phi E^2}{2|Z_r| + 2(R_r \cos \phi + X_r \sin \phi)} \quad (1)$$

及

$$V_{\text{cr}} = \frac{E(|Z_r| \cos \phi + j|Z_r| \sin \phi)}{(|Z_r| \cos \phi + R_r) + j(|Z_r| \sin \phi + X_r)} \quad (2)$$

式(1)、(2)就是保持电压稳定所对应的极限功率和临界电压。由式子可以看出,极限功率和临界电压是关于戴维南等值电势和负荷阻抗角(或功率因数角 ϕ)的函数。

对于大型电力系统来说,节点电网侧的等值阻抗一般近似为纯电抗,即, $R_r \approx 0$, $X_r/|Z_r| \approx 1$ 。则,式(1)可近似表示为:

$$P_{\max} = \frac{\cos \phi E^2}{2|Z_r|(1 + \sin \phi)} = \frac{\cos \phi E^2}{2X_r(1 + \sin \phi)} \quad (3)$$

式(2)可近似表示为:

$$V_{\text{cr}} = \frac{E(X_r \cos \phi + jX_r \sin \phi)}{(X_r \cos \phi + jX_r \sin \phi) + jX_r}$$

$$= \frac{E}{1 + \sin \phi + j \cos \phi} \quad (4)$$

由式(1)或(3)可以看出,在网络侧阻抗等值参数不变的情况下,节点的极限功率是负荷等值阻抗角的函数,变化曲线如图2(a)所示;由式(2)或(4)也可以看出,节点的临界电压也是负荷等值阻抗角的函数,变化曲线如图2(b)所示。

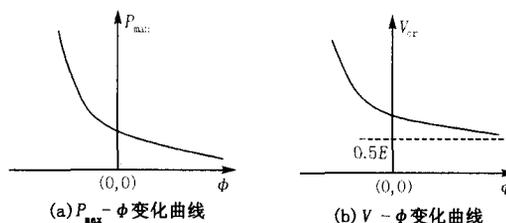


图2 电压稳定临界线

Fig.2 The critical domain of voltage stability

由此可见,采用式(1)和(2)及其变化图形可表示关键节点电压稳定临界域;当 $R_r \approx 0$, $X_r/|Z_r| \approx 1$ 时,可采用式(3)和(4)表示。

电压稳定临界域由两部分组成:式(1)或(3)表示的是在电压临界状态下,对应的最大负荷功率与负荷等值阻抗角之间的关系,实际上是电压临界状态的功率表示形式。式(2)或(4)表示的是在电压临界状态下,对应的电压临界值与负荷等值阻抗角之间的关系,实际上是电压临界状态的电压表示形式。

2 电压稳定临界域的变化特性

由式(3)可以看出最大传输功率与该节点的戴维南等值电势、等值阻抗和节点负荷的阻抗角(或者功率因数)有关。

1) 当节点的戴维南等值电势和等值阻抗不变时,最大传输功率只与节点负荷的阻抗角有关。 $P_{\max} - \phi$ 变化曲线如图2(a)所示。随着阻抗角从 $-90^\circ < \phi \leq 90^\circ$ 变化, P_{\max} 单调递减,通过无功补偿改变节点负荷的阻抗角可以明显提高最大传输功率。

2) 当等值阻抗和节点负荷的阻抗角不变时,最大传输功率与等值电势的平方成正比。提高等值电势的幅值可以增大最大传输功率。

3) 当等值电势和节点负荷的阻抗角不变时,最大传输功率与等值阻抗成反比。减小等值电抗可以明显地提高最大传输功率。

由式(4)可以看出, 临界电压值与戴维南等值电势和节点负荷的阻抗角有关。

1) 当节点的戴维南等值电势不变时, 节点的临界电压与节点负荷的阻抗角成单调递减变化。 $V_{cr}-\phi$ 变化曲线如图2(b)所示, 临界电压最小值为 $0.5E$, 用虚线表示。从图中可以看出, 随着节点负荷由感性负载变为容性负载, 临界电压不断增大, 接近正常运行水平的电压或者超过正常水平的电压, 而且变化幅度与阻抗角具有明显的关系。

2) 当节点的阻抗角不变时, 节点的临界电压与节点的戴维南等值电势成正比变化, 随着 E 的增大, V_{cr} 增大。但是, 实际上电力系统的电源都装有自动调压装置, 节点戴维南等值电势的变化空间很小, 所以, 等值电势的变化幅度对临界电压的影响不明显。

由上述电压稳定临界域的描述可知, 在线近似得到电压稳定临界域的关键就是戴维南等值参数的在线快速获得。

3 电压稳定域

根据关键节点的最大传输功率和临界电压可确定电力系统节点电压稳定域。从图2可以看出, 稳定域主要由最大传输功率曲线 $P_{max}-\phi$ 和临界电压变化曲线 $V_{cr}-\phi$ 决定。对于正常运行的节点状态, 在 $P-\phi$ 空间上位于 $P_{max}-\phi$ 曲线的下方, 在 $V-\phi$ 空间上位于 $V_{cr}-\phi$ 曲线的上方。受运行电压水平的限制, 电压不可能太高, 则节点的电压稳定域比较窄。如图3所示为考虑节点电压最大值的限制和临界电压最大传输功率限制得到的节点电压稳定域。

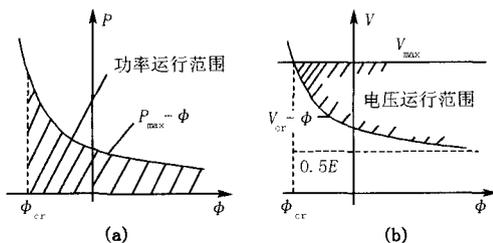


图3 节点的电压稳定域

Fig.3 Nodal domain of voltage stability

图3(a)的斜线空间表示节点传输功率的变化范围, 由极限传输功率曲线、阻抗角等于 ϕ_{cr} 的直线与功率等于0的直线围成的图形。其中 ϕ_{cr} 为图3(b)中电压极大值和临界电压曲线相交点对应的节点阻抗角。

图3(b)的斜线空间表示节点电压的变化范围, 由节点最大电压值和临界电压曲线所围成的图形。

节点最大电压值与临界电压曲线的交点表示, 通过补偿提高传输功率极限满足电压稳定所对应的节点阻抗角, 称为节点极限阻抗角, 用 ϕ_{cr} 表示, 其在 $P_{max}-\phi$ 对应的极限功率, 称为节点极限传输功率。

4 电压稳定域的在线近似获得

根据文献[9]的推导和算例证明, 采用广域测量系统实现的局部电压、电流矢量变化可实现关键节点的戴维南等值参数的在线跟踪与估计。因此利用广域测量实现的戴维南参数估计可近似估计电压稳定临界域进而得到电压稳定域, 并根据实时变化作跟踪校正。

方法如下:

1) 采用文献[9]得到的关键节点等值阻抗模, 并考虑高压、超高压系统节点之间的等值电阻都很小, 近似等于等值电抗。即

$$X_r \approx Z_r \approx \frac{|V_t - V_{t-1}|}{|I_t - I_{t-1}|} \quad (5)$$

等值电势为:

$$E_t = V_t + jX_r I_t \quad (6)$$

2) 代入式(3)近似得到当前状态下的最大传输功率与负荷阻抗角 ϕ 的变化曲线 $P_{max}-\phi$; 代入式(4)近似得到当前状态下的临界电压与负荷阻抗角 ϕ 的变化曲线 $V_{cr}-\phi$, 即电压稳定临界域的两种近似表示, 由此按照上述电压稳定域的定义可确定关键节点在当前状态下的电压稳定域。

5 算例及分析

对2机5节点^[3]系统计算节点1在各种负荷变化下达到电压临界点时, 最大负荷功率与负荷功率因数之间的变化曲线 $P_{max}-\phi$ 和临界电压与负荷功率因数之间的变化曲线 $V_{cr}-\phi$ 。计算结果见表1所示, 变化曲线如图4所示。

计算结果表明, 当节点电压达到电压临界点时, 负荷的最大功率和达到临界点负荷变化的功率因数有关, 如图4(b)所示; 临界电压值也与达到临界点负荷变化的功率因数有关, 如图4(a)所示。

表1 计算结果

Tab.1 The calculation results

P_{max}	V_{cr}	$\phi/(^\circ)$	$\cos\phi$
5.610	1.1989	-45	-0.7071
4.490	0.9275	-25.84	-0.9000
3.150	0.7460	0	1.0000
2.080	0.6280	25.84	0.9000
1.401	0.5536	45	0.7071
0.806	0.5162	60	0.5000

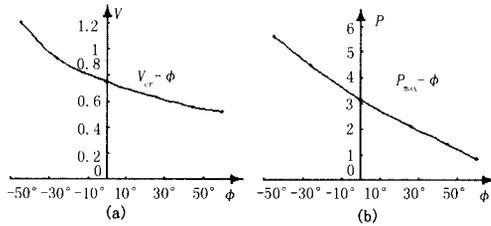


图4 节点1的 $V_{cr}-\phi$ 曲线和 $P_{max}-\phi$ 曲线

Fig.4 Curves of $V_{cr}-\phi$ and $P_{max}-\phi$ of the node 1

对 IEEE-新英格兰 10 机 39 节点^[3]系统节点 8 的最大传输功率与阻抗角, 临界电压与阻抗角变化的曲线。算法采用 32 节点为平衡节点, 节点 8 单独增负荷, 考虑了纯电阻负荷增长到保持初始有功不变增加无功, 所对应的阻抗角变化得到的 $P_{max}-\phi$ 和 $V_{cr}-\phi$ 曲线变化, 如图 5 所示。

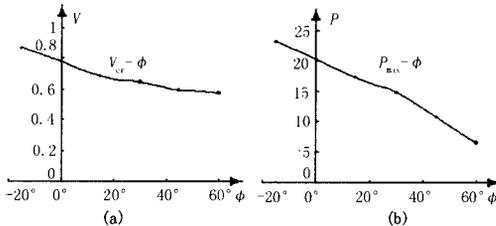


图5 节点8的 $V_{cr}-\phi$ 曲线和 $P_{max}-\phi$ 曲线

Fig.5 Curves of $V_{cr}-\phi$ and $P_{max}-\phi$ of the node 8

由此可见, 只要戴维南等值电抗和等值电势计算得准确, 就可以近似得到当前状态下的最大传输功率与负荷阻抗角的变化曲线 $P_{max}-\phi$ 和临界电压与负荷阻抗角的变化曲线 $V_{cr}-\phi$, 即电压稳定临界域。

表2 $\cos\phi=0.9$ (滞后) V_{cr} 的计算结果

Tab.2 Results of V_{cr} at $\cos\phi=0.9$ (lagged)

P_1	V_1	$ Z_{K1} $	E	$\phi=25.84^\circ$	$\phi=0^\circ$	$\phi=-25.84^\circ$
1.6	0.8690					
1.8	0.8141	0.1786	1.0800	0.6373	0.7637	1.0168
1.9	0.7779	0.1738	1.0713	0.6322	0.7575	1.0086
2.0	0.7277	0.1707	1.0639	0.6278	0.7523	1.0016
2.06	0.6762	0.1683	1.0572	0.6238	0.7475	0.9953
2.08	0.6280	0.1674	1.0541	0.6220	0.7454	0.9924

以 $\cos\phi=0.9$ (滞后) 的连续潮流计算结果来估计 $P_{max}-\phi$ 和 $V_{cr}-\phi$ 曲线, 并根据得到的曲线计算其他临界点的电压值 V_{cr} 见表 2, 最大功率 P_{max} 见表 3。

由仿真计算结果可以看出:

(1) 节点在电压临界状压下临界电压值 V_{cr} 与节点电网侧戴维南等值电势和节点负荷的阻抗角有关, 可以用式 (2) 或 (4) 表示, 可用 $V_{cr}-\phi$ 曲线表示。采用本文的方法可在线近似估算 $V_{cr}-\phi$ 曲线, 把握临界电压值的变化。在戴维南等值电势变化不大

的情况下, 节点电压处于临界状态下的临界电压值主要由节点负荷阻抗角决定。

表3 $\cos\phi=0.9$ (滞后) P_{max} 的计算结果

Tab.3 Results of P_{max} at $\cos\phi=0.9$ (lagged)

P_1	V_1	$ Z_{K1} $	E	$\phi=25.84^\circ$	$\phi=0^\circ$	$\phi=-25.84^\circ$
1.6	0.8690					
1.8	0.8141	0.1786	1.0800	2.05	3.27	5.21
1.9	0.7779	0.1738	1.0713	2.07	3.30	5.27
2.0	0.7277	0.1707	1.0639	2.08	3.32	5.30
2.06	0.6762	0.1683	1.0572	2.08	3.32	5.30
2.08	0.6280	0.1674	1.0541	2.08	3.32	5.29

(2) 节点在电压临界状态下的最大功率与节点电网侧戴维南等值电势、等值电抗和节点负荷的阻抗角有关, 可以用式 (1) 或 (3) 表示, 可用 $P_{max}-\phi$ 曲线表示。采用本文的方法可在线近似估算 $P_{max}-\phi$ 曲线, 把握最大功率的变化。在网络结构不变的情况下, 最大功率主要由节点负荷阻抗角决定。

(3) 采用本文方法计算得到的 $P_{max}-\phi$ 曲线估算在当前状态下保持功率因数不变处于电压临界状态时的功率比较准确, 而计算其他功率因数下的最大功率值有一定的误差, 与当前功率因数相差越大最大功率误差愈大, 但在当前功率因数附近误差比较小。

6 结论

根据理论分析和仿真结果表明, 引入负荷节点的等值阻抗角或功率因数可对节点的电压稳定临界域进行确切描述, 建立了电压稳定临界域的两种数学描述即功率描述形式和电压描述形式, 分别由式 (1) 或 (3) 和 (2) 或 (4) 表示; 可用 $P_{max}-\phi$ 和 $V_{cr}-\phi$ 曲线在 $P-\phi$ 和 $V-\phi$ 空间上表示出其电压稳定域。

本文提出的估计 $P_{max}-\phi$ 和 $V_{cr}-\phi$ 曲线方法可大致把握节点处于电压临界状态下的最大功率变化与临界电压值变化, 从而近似把握电压稳定域。

由于算法只利用正常运行下的两种状态变化就可以实现戴维南等值电势和等值阻抗模的估计进而大致得到 $P_{max}-\phi$ 和 $V_{cr}-\phi$ 曲线, 给出一定的电压稳定域, 因此不需要当前的运行方式和全网的测量数据, 也不需要复杂的非线性模型及其参数, 直接利用采用局部的电压电流矢量的测量值就可实现, 间接地避免了潮流方程在临界点的不收敛、系统规模过大、非线性模型不准确、数据多且不同时等缺陷。

利用广域测量技术实现的电压电流矢量测量就可实现本文的方法, 由于广域测量系统数据采集速度快、更新及时, 准确可靠, 需求数据少易于实现,

能够给运行人员的调度和控制提供一定的准确参数值, 具有一定的实用性。

参考文献

- [1] Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.
HAN Zhen-xiang, CAO Yi-jia. Power System Security and Its Prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6.
- [3] 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.
- [4] Cutsem T Van, Vournas C D. Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-Term Time Scales[J]. IEEE Trans on PWRs, 1996, 11 (1): 146-154.
- [5] 段献忠, 汪馥英, 何仰赞, 等. 负荷建模研究现状综述[J]. 电力系统自动化, 1994, 18 (8): 60-68.
DUAN Xian-zhong, WANG Fu-ying, HE Yang-zan, et al Review of the Development of Load Modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(8): 60-68.
- [6] 石景海, 贺仁睦. 动态负荷建模中的负荷时变性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 85-90.
SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Load Time-variation Study in Dynamic Load Modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (2): 85-90.
- [7] 祝达康, 程浩忠. 求取电力系统 PV 曲线的改进连续潮流法[J]. 电网技术, 1999, 23 (4): 37-40.
ZHU Da-kang, CHENG Hao-zhong. An Improved Continuation Method in Tracing PV Curves of Power Systems[J]. Power System Technology, 1999, 23 (4): 37-40.
- [8] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压稳定分析的改进连续潮流法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (16): 13-16.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An Improved Continuation Power Flow Method for Voltage Stability Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(16): 13-16.
- [9] 段俊东, 郭志忠. 对在线电压稳定监视的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (5): 199-202.
DUAN Jun-dong, GUO Zhi-zhong. On-line Monitoring of Power System Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (5): 199-202.
- [10] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(6): 40-45.
ZHANG Yao, SONG Wen-nan. Determination of the Critical State of Voltage Stability in Load Buses and the Weakest Bus of the Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6): 40-45.
- 收稿日期: 2007-03-18; 修回日期: 2007-04-16
- 作者简介:
段俊东 (1969-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: dddzfm@163.com
郭志忠 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、计算机在电力系统中的应用、电力市场、光学电流互感器等;
魏成江 (1969-) 男, 本科, 电气工程师, 研究方向为电气设备运行与控制。
-
- (上接第 30 页 continued from page 30)
- [4] Levitin G, Mazal-Tov S, Elmakis D. Optimal Allocation of Sectionalizer in Radial Distribution Networks[A]. In: Proceeding of the 1995 Stockholm Power Tech Conference[C]. 1995. 761-764.
- [5] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22: 32-38.
LI Xiao-lei, SHAO Zhi-jiang, Qian Ji-xin. An Optimizing Method Based on Autonomous Animals: Fish-swarm Algorithm[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2002, 22: 32-38.
- [6] 李晓磊, 钱积新. 基于分解协调的人工鱼群优化算法研究[J]. 电路与系统学报, 2003, 8 (1): 1-6.
LI Xiao-lei, Qian Ji-xin. Studies on Artificial Fish-swarm Optimization Algorithm Based on Decomposition and Coordination Techniques[J]. Journal of Circuits and Systems, 2003, 8(1): 1-6.
- [7] CHEN Rong-liang, Allen K, Billinton R. Value-based Distribution Reliability Assessment and Planning[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(1): 421-429.
- [8] WEN Fu-shuan, Chang C S. Transmission Network Optimal Planning Using the Tabu Search method[J]. Electric Power Systems Research, 1997, 42(2): 153-163.
- [9] XIE Kai-gui, ZHOU Jia-qi, Billinton R. Reliability Evaluation Algorithm for Complex Medium Voltage Electric Distribution Networks Based on the Shortest Path[J]. IEEE Proceeding-Gener, Transm, and Distrib, 2003, 150(6): 686-690.
- [10] 王守相, 王成山. 配电系统联络开关的优化配置[J]. 继电器, 2002, 30 (12): 24-27.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan. Optimal Tie Switches Allocation in Distribution Systems[J]. Relay, 2002, 30 (12): 24-27.
- 收稿日期: 2007-04-28; 修回日期: 2007-06-20
- 作者简介:
张红霞 (1976-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为数据挖掘、MIS 系统; E-mail: zhx0988@sohu.com
赵秀明 (1965-) 女, 硕士, 教授, 主要研究领域为管理信息系统设计与开发、局域网广域网技术与工程。