

全网无功优化的变电站电压无功控制策略

张玉珠¹, 杨丽徙¹, 侯向阳², 周哲²

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 郑州新力电力有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 九区图是以工作点是否位于最优控制区为启动控制判据的无功优化调控策略; 五区图是一种基于动作效果预算, 以操作优劣距离为判据, 面向VQC装置的调控策略; 针对五区图的边界盲区缺乏明确的动作判据的缺陷, 提出了九区图五区图组合调控策略; 对于全网的变电站, 根据设定的最优限值曲线, 按照九区图判断各变电站的无功调压设备的工作点区域及启动区的上下限, 仅对有越限的变电站按照五区图进行VQC装置的调控, 既可减少控制变量的频繁操作, 又可保证全网电压的质量和全网潮流的最优分布。

关键词: 电压无功控制; 九区图; 五区图; 组合控制策略; 全局优化; 盲区

Strategy of voltage and reactive power control on global optimization control

ZHANG Yu-zhu¹, YANG Li-xi¹, HOU Xiang-yang², ZHOU Zhe²

(1. School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;
2. Xinli Power Company Limited, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Nine-zone theory is optimization of reactive power control strategy which takes the operating point whether is located the superior control area as the start control criterion. Five-zone theory is one kind regulative strategy based on the movement effect, which adopts the criterion of operation quality distance and faces VQC installment. In view of the boundary blind area of five-zone theory lacks of the explicit movement criterion, this paper presents nine-zone theory and five-zone theory combination control strategy. According to the most superior limiting value curve designed, it judges each substation the operating point region and start up limits of reactive power and voltage based on nine-zone theory in the entire net transformer substation. The substation over limits are adjusted using VQC device by five-zone theory. It can not only reduce the operation of control variable, but also make sure the voltage quality and optimal power flow of the whole network.

Key words: voltage and reactive power control; nine-zone theory; five-zone theory; combination control strategy; global optimization ; blind area

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)12-0036-05

0 引言

电压质量对电力系统的安全与经济运行, 有着重要的影响。深入开展电网无功的优化规划工作, 实现无功设备的科学调控和无功功率的分层、分区、就地平衡, 是降低网损、保持电压质量合格的重要手段。目前的无功优化可分为两大类: 一类是变电站电压无功综合控制(VQC), 利用有载调压变压器和并联补偿电容器进行局部的电压及无功补偿的自动调节, 以保证负荷侧母线电压在规定范围内, 及进线功率因数尽可能接近1; 另一类是全网无功优化, 考虑全网范围内所有无功电压控制设备以全网网损最小为目标函数进行定量的优化调度。

1 电压无功控制现状

1.1 基于变电站VQC的分散控制

基金项目: 河南省科技攻关项目(0324250075)

分散控制方式是以变电站为中心, 通过调节有载变压器分接头档位, 控制无功补偿设备的工作状态, 维持受控母线电压和从电网吸收的无功功率在规定的范围内。但它只能实现局部优化, 保证受控母线电压合格, 不能实现全系统的最优控制以达到全网功率损耗最小的目的。同时VQC装置的调节控制是基于给定的电压无功上下限, 如果上下限值给定不合理, 无论调节措施多么完美, 都不可能得到合理的控制。

1.2 基于数值优化计算的集中控制

集中控制是通过调度中心对各个调压设备和无功可控设备实施电压无功综合在线控制, 在满足负荷需求和保证系统电能质量的条件下使系统网络损耗最小。由于网内各变电站的自动化水平不尽相同, 欲实现全系统电压无功的集中优化控制还有相当大的难度。

1.3 分级电压无功控制方法

这种方法将电力系统的无功功率和电压自动

控制按空间和时间从功能上分成三个不同的层次, 即一级、二级和三级, 每一级都有其独立的控制目标, 同时, 低级控制系统也可以根据上级控制系统的要求调整自己的控制目标。分级电压控制思想可以把一个较大规模的电力系统分割成多个子区域, 只需分别对各个子区域进行电压无功优化控制就能实现对整个电力系统的电压无功优化控制。目前分级电压控制研究还在初级阶段, 没有形成系统的分析和设计方法, 实用化的研究也有待进一步加强。

2 五区图控制原理及分析

变电所中的电压无功综合控制装置一般进行以下 5 种基本操作: 无动作; 升变压器档位; 降变压器档位; 投容(感)性装置; 退容(感)性装置。五区图控制原理是一种基于动作效果预算的、以操作优劣距离为判据、面向 VQC 装置实施操作的调控策略。

将 VQC 的五种操作在 U-Q 平面上当前工作点处矢量化, 可以得到 VQC 的操作动作矢量图及其边界示意图, U 为电压, Q 为无功, 如图 1 所示。

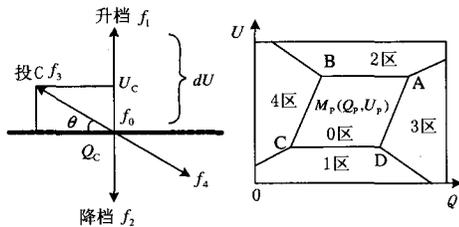


图 1 操作矢量图及“五区图”边界示意图

Fig.1 Operating vector and boundary of “five-zone theory”

5 个动作矢量分别如下:

- ① 不动作矢量: $f_0(Q, U) = (Q, U)$;
- ② 升档矢量: $f_1(Q, U) = (Q, U + dU)$;
- ③ 降档矢量: $f_2(Q, U) = (Q, U - dU)$;
- ④ 投 C 矢量: $f_3(Q, U) = (Q - Q_c, U + U_c)$;
- ⑤ 切 C 矢量: $f_4(Q, U) = (Q + Q_c, U - U_c)$ 。

设理想工作点(目标工作点)为 $M_p(Q_p, U_p)$, 当前工作点为 $M(Q, U)$, 当执行完第 i 项操作后的工作点移动到 $M_i(Q_i, U_i)$, 定义 $M_i(Q_i, U_i)$ 到目标工作点 $M_p(Q_p, U_p)$ 距离的平方为操作优劣距离:

$$L_i = |M_i M_p|^2 = (U_i - U_p)^2 + (Q_i - Q_p)^2 \quad (1)$$

针对电压无功综合控制装置的操作就是 $f_i (i=0, 1, 2, 3, 4)$ 动作选择的过程, 即以 L_i 最小为最优控制目标条件, 形成以操作优劣距离最短为判据来确定最优操作动作的控制策略, 通过选择最优操作

量 f_i , 使当前工作点 $M(Q, U)$ 不断向最优控制目标工作点 $M_p(Q_p, U_p)$ 逼近的过程。

3 九区图五区图组合控制策略

3.1 控制边界和控制区分析

文献[3]用 Matlab 仿真法, 在 U-Q 平面上得到“五区图”的控制边界。在文献[4]中作者从几何做图的角度提出一个新的, 简单可靠的边界确定方法, 该方法根据线段垂直平分线到线段两端距离相等的原理, 得到“五区图”的控制边界。

本文用解析法进行边界公式的推导。对图 1 操作矢量图进行分析, 可得到边界线 BC, AD 的斜率为 $K_{BC}, K_{AD} = Q_c / U_c$, 1 区到 4 区边界线的斜率为 $K_A = Q_c / (dU + U_c)$, $K_B = -Q_c / (dU - U_c)$, $K_C = Q_c / (dU + U_c)$, $K_D = -Q_c / (-U_c + dU)$, 理想工作点的坐标为 $M_p(Q_p, U_p)$ 。根据投切一组电容容量 Q_c , 相应电压改变 U_c , 变压器分接头升降一档可改变电压大小 dU , 可以推出 0 区的宽度为 $(U_c^2 + Q_c^2) / Q_c$, 高度为 dU 。经过数学推导, 所得边界公式同文献[4]。

控制区的动作分别为在 1 区进行升档动作 f_1 , 在 2 区进行降档动作 f_2 , 在 3 区进行投 C 动作 f_3 , 在 4 区进行切 C 动作 f_4 , 0 区为不动作区。

对控制边界分析, 可得如下性质:

1) 若 U_c 远小于 dU , 则 $K_A = -K_B = K_C = -K_D = Q_c / dU$, 随 Q_c / dU 增大, 1 区和 2 区变小, 弱化了变压器分接头升降档的动作, 优先选择投切电容器的操作。

2) 当 K_{AD}, K_{BC} 接近无穷大, 即忽略电容器投切时的电压效应时, “五区图”更接近“九区图”。

3.2 启动动作区分析

文献[4]中作者提出, 根据电压无功合格上下限选择一个最优控制区, 当工作点越出最优控制区, 启动控制进行最优操作判断。可以根据运行经验, 整定一个合适的操作距离值 L , 在 U-Q 平面上形成一个以理想工作点为圆心, 以 \sqrt{L} 为半径的圆形动作非启动区, 该区域避开了非启动区中电压无功合格的边缘状态, 将系统控制在额定的最佳状态。通过改变 \sqrt{L} 值, 实现可以量化的启动灵敏设置, 可随时调节最优运行区域的大小, 便于现场调试, 增强控制的适应性, 但是这个方法, 仅仅根据运行经验进行整定, 可能导致电网无功潮流分布不合理和节点被控对象频繁操作, 无法实现全局的最优控制。

为了更好地实现全局最优控制, 将九区图和五

区图相互配合,以九区图为启动判据,以全网无功电压最优为目标,当工作点越出最优控制区时启动控制,按照五区图进行变电站的VQC的最优操作判断,选取合适的操作动作,形成九区图和五区图相互配合的控制策略。如图2所示。

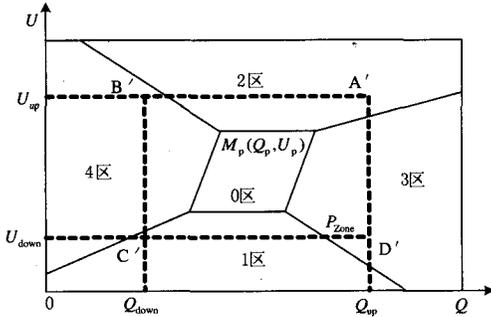


图2 启动动作示意图
Fig.2 Action area of five-zone diagram

在实际操作中,首先根据次日24h的母线负荷预测,计算出次日全网的最优无功潮流分布和最优无功补偿量,由此算出各变电站的最优无功限值和电压限值,再根据负荷曲线的变化趋势以及补偿调压装置动作次数的限制,对最优无功电压限值曲线进行分段,并对分段后的限值做校验计算^[5-6]。

组合控制策略可以保证全网潮流最优,使投切次数合理分配,其优化的目标是保证节点电压在允许范围内,使整个网络的有功功率损耗最小,据此给定理想工作点和启动区的上下限。“九区图”中电压和无功限值的宽度为:

$$\begin{aligned} V_{\max} - V_{\min} &= V_w \\ Q_{\max} - Q_{\min} &= \beta \cdot C_{\text{var}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: V_{\max} 、 V_{\min} 分别表示九区图中的电压上限和下限,单位为kV; V_w 表示电压限值的宽度,一般为0.5kV; β 为裕度系数; Q_{\max} 、 Q_{\min} 分别表示九区图中的无功上限和下限; C_{var} 表示电容器单组补偿容量,考虑到无功功率的上下限之差应大于至少一组电容器的容量,系数 β 取1.3。

最佳的无功,电压启动值为:

$$\begin{cases} V_{\text{opt}} = V_{\max} - \lambda_1 \cdot V_w \\ V_{\text{opt}} = V_{\min} + \lambda_2 \cdot V_w \\ Q_{\text{opt}} = Q_{\max} - \lambda_3 \cdot \beta \cdot C_{\text{var}} \\ Q_{\text{opt}} = Q_{\min} + \lambda_4 \cdot \beta \cdot C_{\text{var}} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中的 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 为裕度系数,一般取值为0.5,实际中可根据不同时段的特点在0.3~0.7之间调整; V_{opt} 、 Q_{opt} 表示由全网无功优化得到的最优电压和无功。在峰转谷,谷转峰负荷段,适当收缩电压无功上下限,使装置动作敏感,取值小些;在峰、谷负荷段,负荷发生不规则往返波动,适当放宽电压无功上下限,尽量减少装置动作次数,取值大些。这

种整定方法克服了变电站局限于无功,电压就地控制,从优化与控制的角度使局部优化、分散控制变为全局优化、集中控制与分散控制相结合,提高了系统电压的合格率、降低了系统的总线损。

3.3 盲区的处理

当工作点位于两个操作区的边界上时,则边界两边的两种操作的优劣距离相等,这时将无法判断采用哪种操作,形成盲区。参照文献[2]提出的两种方法来解决盲区的判断问题:一是加入“电压优先”判据,尽量采取投切电容的策略,保证电压合格;二是引入优先系数 K_p ,重新定义优劣距离为:

$$R_i = |M_i M_o|^2 = [K_p(U - U_p)^2 + (Q - Q_p)^2] \quad (4)$$

式中: $K_p > 1$ 。 K_p 的值可以量化地反映对 U 的优先控制程度,当 K_p 增大时,1区和2区的区域面积相对缩小,直接对电压影响最大的升档和降档操作被弱化了,控制策略会优先选择对电容器组进行操作,以减少对变压器分接头的调节。

通过改变 K_p 的可实现程度,可以量化电压优先控制,但这时原边界上工作点的优劣距离判断问题虽得以解决,新边界上的工作点又出现优劣距离相等无从判断的问题^[7]。考虑到变压器不能作为无功电源,调节变压器的分接头只能改变系统无功潮流的分布的情况,在边界应采取优先操作电容的调控策略。根据电容投切判据建立如下的数学模型^[8]:

$$Q_{CA} = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \alpha_1 + \frac{Q_s}{Q_{C0}} \alpha_2 \quad (5)$$

式中: U_2 为实时电压值; Q_s 为实时功率值; Q_{C0} 为单组电容器无功容量; α_1 、 α_2 为权重系数(由无功调节的边界决定)。

设在 $Q_{CA} \geq 1$ 时电容投入,在 $Q_{CA} \leq -1$ 时电容切除。设在 $U = U_{2N}$ 时, $Q_s \geq 1.5Q_{C0}$ 时,可投入1组电容器;在 $U = 1.05U_{2N}$, $Q_s \geq 2.0Q_{C0}$ 时,可投入1组电容器。代入式(5)中,可得:

$$\begin{cases} \frac{U_{2N} - U_{2N}}{U_{2N}} \alpha_1 + \frac{1.5Q_{C0}}{Q_{C0}} \alpha_2 = 1 \\ \frac{U_{2N} - 1.05U_{2N}}{U_{2N}} \alpha_1 + \frac{2.0Q_{C0}}{Q_{C0}} \alpha_2 = 1 \end{cases} \quad (6)$$

求解得到, $\alpha_1 = 20/3$, $\alpha_2 = 2/3$, 由此可得到投入电容的动作判据:

$$Q_{\text{投}} = \frac{20}{3} \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} + \frac{2}{3} \frac{Q_s}{Q_{C0}} \geq 1 \quad (7)$$

同理,设 $U = U_{2N}$, $Q \leq -0.5Q_{C0}$ 时,切除一组电容器; $U = 0.95U_{2N}$ 时, $Q \leq -Q_{C0}$, 切除一组电容器,代入式(5)求解得到 $\alpha_1 = 20$, $\alpha_2 = 2$, 由此可得到切除电容的动作判据:

$$Q_{\text{切}} = 20 \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} - 2 \frac{Q_s}{Q_{C0}} \leq -1 \quad (8)$$

当工作点位于两个操作区的边界时, 在边界上优先进行电容器投切判断, 满足投切判据进行优先选择电容器进行操作, 否则进行有载变压器分接头的调整。

4 计算步骤

Step1. 针对某一个具体的配电网进行最优潮流计算。将次日短期负荷预测曲线分为 24 个时段, 在每一个分段中, 选择一个接近于该段平均负荷的典型负荷点, 对每个时段进行全网无功优化计算。

Step2. 根据得到的全网在最优状态下的各变电站变压器低压侧母线电压变化曲线和变压器高压侧无功变化曲线计算出各个变电站 VQC 的最佳启动动作值。

Step3. 判断当前的工作点是否在动作区, 若在动作区, 分别执行第 i 项操作动作 ($i=0,1,2,3,4$), 工作点移动到 $M_i(Q, U_i)$, 计算 $M_i(Q, U_i)$ 到目标工作点 $M_p(Q_p, U_p)$ 操作优劣距离。

Step4. 若其中某两项动作后的操作优劣距离相等, 说明原先工作点处于盲区, 进行盲区投切电容判断, 满足投切判据进行优先选择电容器进行操作, 否则进行有载变压器分接头的调整。

Step5. 若原工作点不处于盲区, 选择操作优劣距离最短的操作动作来进行 VQC 电压无功调整。

5 算例

以某地区配电网为例, 其负荷数据见图 3。该配电系统包括 1 个 220 kV 变电站, 4 个 110 kV 变电站, 220 kV 变电站内设两台主变。

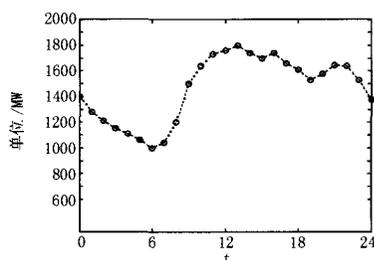


图 3 某城市电网典型有功负荷变化曲线

Fig.3 Typical change curve of active power load voltage

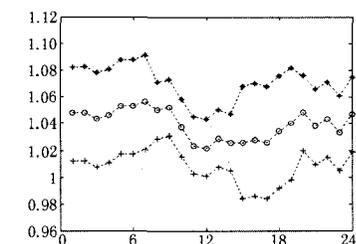


图 4 变压器低压侧最优电压及五区图最佳电压启动值域

Fig.4 Optimal change and its setting value curves of voltage

用标么值表示, 基准值取为 100 MVA, 选择等裕度系数, 有: 0:00-6:00, $\lambda_i=0.5$; 6:00-13:00, $\lambda_i=0.3$; 13:00-18:00, $\lambda_i=0.6$; 18:00-24:00, $\lambda_i=0.4$; $i=1,2,3,4$ 。根据 220 kV 变压器低压侧最优电压和高压侧最优无功可得其整定的最优电压无功曲线, 分别见图 4 和图 5。

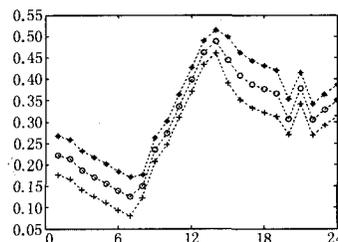


图 5 变压器高压侧最优无功及五区图最佳无功启动值域
Fig.5 Optimal change and its setting value curves of reactive power

图中中间的曲线为最优电压无功曲线, 上下两个曲线分别为整定最佳电压无功启动值的上下限。改进后的五区图启动值上下限对负荷的变化更加敏感, 在峰转谷, 谷转峰时启动值上下限缩小, 装置动作敏感; 峰谷负荷段, 启动值上下限扩大, 减少了装置的动作。改进“五区图”后全天变压器分接头投切次数由 15 次降为 8 次, 电容器组投切次数由 11 次降为 6 次, 网损率由 1%降低为 0.9987%。

6 结语

本文从全网无功优化的角度出发, 提出了九区图五区图组合优化控制策略, 对五区图的启动动作值进行整定, 并对五区图的边界盲区的处理上提出了一些改进措施。保证了全网的潮流最优, 减少了变压器分接头的动作, 避免了控制变量过度频繁的操作, 降低了网损。

参考文献

- [1] 全庆贻, 颜钢锋. 变电站电压无功综合控制的研究[J]. 继电器, 2001, 29(10): 22-25.
TONG Qing-yi, YAN Gang-feng. Research on Voltage and Reactive Power Integrated Control of Substation [J]. Relay, 2001, 29(10): 22-25
- [2] 庄侃沈, 李兴源. 变电站电压无功控制策略和实现方式[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 47-50.
ZHUANG Kan-qin, LI Xing-yuan. Strategies and Implementation Modes of Voltage and Reactive Power Control for Substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 47-50.
- [3] 蔡凯. 电压无功综合控制装置控制原理的新讨论——由“九区图”到“五区图”[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 92-95.
CAI Kai. New Discussion on Synthetical Control of

- Voltage and Reactive Power from Nine Zone Theory to Fivezone Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 92-95.
- [4] 孙文生, 张明军. 关于“五区图”电压无功综合控制原理的再讨论[J]. 电力系统自动化, 2005, 10(12): 69-75.
SUN Wen-sheng, ZHANG Ming-jun. Further Discussion on “Five-Zone” Theory in the Area of Voltage and Reactive Power Synthetical Control. Automation of Electric Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 10(12):69-75.
- [5] 耿光飞, 杨仁刚. 高压配电网无功优化集中控制系统研究[J]. 继电器, 2005, 12(24): 45-48.
GENG Guang-fei, YANG Ren-gang. Research on Reactive Power Optimization Control System in Ligh Voltage Distribution Power Network [J]. Relay, 2005, 12(24): 45-48
- [6] 朱春明, 刘明波, 裴爱华, 等. 变电站电压无功控制范围的整定计算方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 70-74.
ZHU Chun-min, LIU Ming-bo, PEI Ai-hua, et al. Setting Method for Control Range of Voltage and Reactive Power in Substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 70-74.
- [7] 孙文生, 张明军. 基于操作动作效果预算比较的电压无功综合控制原理[J]. 继电器, 2006, 34(16): 35-40.
SUN Wen-sheng, ZHANG Ming-jun. Study on Voltage and Reactive Power Control Based on Operation Effect Calculation and Comparison[J]. Relay, 2006, 34(16): 35-40.
- [8] 陈远华, 秦荃华, 杨晓红, 等. 基于模糊边界无功调节判据的电压无功综合控制[J]. 中国电力, 2002, 35(10): 50-53.
CHEN Yuan-hua, QIN Quan-hua, YANG Xiao-hong, et al. Voltage and Reactive Power Integrative Control Based Fuzzy Boundary Criterion of Reactive Power[J]. Electric Power, 2002, 35(10): 50-53.
- [9] 钱康龄, 纪红, 等. 分布式电压无功全局优化控制系统的研制与应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 6-99
QIAN Kang-ling, JI Hong, et al. Research and Application of Distribute Voltage and Reactive Power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 6-99.

收稿日期: 2006-12-04; 修回日期: 2007-04-20

作者简介:

张玉珠(1974-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划; E-mail: eegszhangyz@gs.zzu.edu.cn

杨丽徙(1956-), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统规划与电力GIS。

(上接第 31 页 continued from page 31)

- WU Xin, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. A New Fault Diagnosis Approach of Power System Based on Bayesian Network and Temporal Order Formation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 14-18.
- [6] 阎平凡, 张长水. 人工神经网络与模拟进化运算[J]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
YAN Ping-fan, ZHANG Chang-shui. Artificial Neural Network and Simulation Evolution Operation [J]. Beijing: Qinghua University Press, 2000.
- [7] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与MATLAB7.0实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Feisi Science and Technology Study Center, Neural Network Theory and MATLAB7.0 Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [8] 董长虹主编. Matlab神经网络与应用. 北京: 国防工业出版社, 2005.
DONG Chang-hong. Matlab Neural Network and Application. Beijing: Qinghua Press, 2005.
- [9] 楼顺天, 施阳. 基于MATLAB的系统分析与设计—神经网络[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
LOU Shun-tian, SHI Yang. System Analysis and Design Based on MATLAB- Neural Network[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000.
- [10] 丛爽. 面向MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998.
CONG Shuang. For MATLAB Toolbox's Neural Network Theory and Application[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1998.
- [11] 石永恒, 陈荣生, 杨亚平. 种改进型BP网络算法在凝汽器故障诊断中的应用[J]. 电站辅机, 2006, 96(1): 15-19.
SHI Yong-heng, CHEN Rong-sheng, YANG Ya-ping. Application of an Improved BP Net Calculation to the Fault Diagnosis of Condensers[J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2006, 96(1): 15-19.

收稿日期: 2006-12-01; 修回日期: 2007-03-11

作者简介:

成蓬勃(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动控制; E-mail: jiangxiao0535@eyou.com

袁福科(1960-), 男, 从事电力系统自动化的研究及开发工作;

刘灿萍(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统过电压。