

# 基于改进粒子群算法的电压薄弱区域恢复

李然<sup>1</sup>, 盛四清<sup>1</sup>, 王莹<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电力系, 河北 保定 071003; 2. 中国天辰工程有限公司, 天津 300400)

**摘要:** 采用改进的粒子群算法对电压薄弱区域进行恢复。在经典粒子群算法中引入惯性因子和收敛因子改善其收敛性能; 结合电力系统实际运行情况, 采用了基于 DPSO 算法的离散解值集与离散速度值集, 较准确地表达了离散变量。用灵敏度分析结果与网损率最小作为目标函数, 引入约束函数。将改进的粒子群算法运用到电压薄弱区域恢复模型上, 得到较为理想的结果。

**关键词:** 电压稳定; 粒子群优化算法(PSO); 电压稳定薄弱区域; 灵敏度分析指标; 离散值

## Weak voltage areas recovery based on improved particle swarm optimization algorithm

LI Ran<sup>1</sup>, SHENG Si-qing<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China;  
2. China Tianchen Engineering Company Limited, Tianjin 00400, China)

**Abstract:** In this paper, the improvement of the traditional swarm algorithm, the discrete solution set and discrete velocity solution set based on the DPSO are used to improve the swarm algorithm to recover the weak voltage area. The inertial factor and the convergent factor are introduced into the swarm algorithm. The model of the weak voltage recovery which is object to the minimization of the sensitive analysis result and the power loss, and the constraint conditions are introduced. Then the improved swarm algorithm is used as the tool to solve this model and find a more satisfactory solution.

**Key words:** voltage stability; principles of particle swarm optimization(PSO); weak voltage area recovery; sensitivity index; discrete values

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0109-05

## 0 引言

近些年来, 因电压失稳而造成电力系统崩溃的现象在国外很多国家地区曾发生过<sup>[1,2]</sup>, 因此研究电压稳定和电力系统运行中电压不稳定区域的恢复具有十分重大的社会意义。近年来各国对此展开了研究, 并获得了大量的研究成果<sup>[3-5]</sup>。但现有的电压区域恢复研究大都以电压不稳定区域作为研究对象, 而对于电力系统运行中的电压稳定薄弱区域的研究相对较少。

本文通过在灵敏度对电压稳定的分析结果之上, 找到电网的电压稳定<sup>[1]</sup>薄弱区域, 而对其薄弱区域利用粒子群算法进行电压稳定恢复。粒子群算法作为寻优算法, 实现起来比较容易, 操作简单, 可按经验值设置参数一度成为研究的热点<sup>[6]</sup>, 但其收敛精度不高, 易陷入局部极值。本文通过在粒子

群算法中引入惯性因子、收敛因子以及对离散变量的处理可以更有效地保证收敛的可靠性和速度。通过对IEEE30节点系统进行仿真计算, 证明改进粒子群算法在电压薄弱区域恢复的优化结果和收敛性上均具有优势。

## 1 粒子群算法及其改进

### 1.1 经典粒子群优化算法

PSO算法源于对二维空间中鸟群捕食行为的模拟, 最初由Kennedy和Eberhart于1995年提出, 是一类基于群体智能的随机优化算法<sup>[7]</sup>。因其概念简单, 易于实现和计算高效, 引起优化及演化计算等领域学者的广泛关注, 它在电力系统中的应用也得到逐步重视。

在粒子群优化算法中, 任何一个粒子被看成是在 $N$ 维空间里的点  $X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} [0,1]$ , 第 $i$ 个粒子迭代到目前为止最好的位置(即具有最佳适应度)被称为个体最好粒子, 记为  $pBest$ , 而在全

基金项目: 校内青年教师科研基金(200811005)

部粒子中迭代到当前为止具有最佳适应度的粒子则被称为全局最好粒子, 记为  $gBest$ , 粒子位置变化的速度记  $V_i$ ,  $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in})$ 。各粒子根据下式更新自己的速度和位置:

$$V_{id}^{k+1} = V_{id}^k + C_1 \times rand() \times (pBest_{id} - X_{id}^k) +$$

$$C_2 \times rand() \times (gBest_d - X_{id}^k) \quad (1)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (2)$$

式中:  $X_{id}^k$  和  $X_{id}^{k+1}$  分别是第  $i$  个粒子  $d$  维分量在第  $k$  次迭代和  $k+1$  次迭代的位置;  $V_{id}^k$  和  $V_{id}^{k+1}$  分别是第  $i$  个粒子  $d$  维分量在第  $k$  次迭代和  $k+1$  次迭代的速度位置;  $C_1$ ,  $C_2$  是两个正约束系数, 分别调节向全局最好粒子和个体最好粒子方向飞行的最大步长;  $rand()$  是一个  $[0,1]$  间的随机数<sup>[8]</sup>。

## 1.2 粒子群算法的改进

### 1.2.1 惯性因子的引进

为加快 PSO 的收敛速度, 引入惯性因子式,

(1)、(2)修正为

$$V_{id}^{k+1} = \omega \times V_{id}^k + C_1 \times rand() \times (pBest_{id} - X_{id}^k) +$$

$$C_2 \times rand() \times (gBest_d - X_{id}^k) \quad (3)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (4)$$

式中:  $\omega$  称为惯性因子。本文采用  $\omega$  在迭代过程 0.9-0.4 线性下降的方法:

$$\omega = 0.9 - \frac{0.9 - 0.4}{N_{\max}} \times n \quad (5)$$

式中:  $N_{\max}$  为总迭代次数,  $n$  为当前迭代次数。引入  $\omega$  后, 使得 PSO 在开始时探索较大的区域, 较快地定位最优解的大致位置, 随着  $\omega$  逐渐减小, 粒子速度减慢, 开始精细地局部搜索 (这里  $\omega$  类似于模拟退火中的温度参数)。该方法加快了收敛速度, 提高了 PSO 算法的性能。

### 1.2.2 引入收敛因子

Suganthan 的实验表明,  $C_1$ ,  $C_2$  为常数时可以得到较好的解。为了使粒子群算法更有利于在跳出局部最优之后加快收敛速度, 有利于算法更好的收敛, 引入收敛因子  $K$  来保证收敛性:

$$V_{id}^{k+1} = K \left[ \omega V_{id}^k + \varphi_1 \times rand() \times (pBest_{id}^k - X_{id}^k) + \right.$$

$$\left. \varphi_2 \times rand() \times (gBest^k - X_{id}^k) \right] \quad (6)$$

式中:

$$K = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (7)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad \varphi > 4 \quad (8)$$

这是对经典粒子群算法中的一种特殊参数组合, 其中  $K$  即一种受  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  限制的  $\omega$ , 而  $C_1 = K\varphi_1$  和  $C_2 = K\varphi_2$ 。

### 1.2.3 对离散变量的处理<sup>[9,10]</sup>

在实际电力系统中, 发电机的能量可以连续变化, 但是变压器的分接头位置和电容器的投切一般按照一定的步长改变, 所以电压薄弱区域恢复中既包含调节连续变量, 又包括离散的整数变量。本文引入一种针对离散变量优化问题的离散粒子群优化 DPSO 算法。

DPSO 算法中, 粒子也是通过追踪两个极值粒子进行迭代寻优的。针对 DPSO 算法, 给出其离散解值集和离散速度值集两个定义, 如下:

定义 1: DPSO 算法的离散解值集

对任意有限数目的离散值  $s_i \in \mathbb{R}$  构成的离散值集合  $S = [s_1, s_2, \dots, s_n]$ , 称为 DPSO 算法的解值集。

定义 2: DPSO 算法的离散速度值集

速度  $v = (i \rightarrow j)$   $i, j \in \mathbb{R}$  表示离散值由  $i$  变为  $j$ 。对任意有限数目的速度值构成的集合称为速度值集合。

$V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$  集合, 称为 DPSO 算法的速度值集。

由上述定义可知还须定义离散解值集和离散速度值集的基本运算规则, 即为离散解值集之间的减法算子、离散速度值集之间的加法算子、常数与离散速度值集之间的乘法算子和离散解值集与离散速度值集间的加法算子。该四个基本算子构成 DPSO 算法基本公式如下:

$$v^{k+1} = C_1 \cdot v^k \oplus C_2 \cdot (pBest \odot x^k) \oplus C_3 \cdot (gBest \odot x^k) \quad (9)$$

$$x^{k+1} = x^k \otimes v^{k+1} \quad (10)$$

离散解值集间的减法算子  $\odot$  表示粒子解值集间的相减运算; 离散速度值集间的加法算子  $\oplus$  表示粒子的离散速度值集之间的相加运算; 常数与离散速度值集间的乘法算子  $\cdot$  表示常量与离散速度值集间的相乘运算; 离散解值集与离散速度值集间的加法算子  $\otimes$  为离散解值集与离散速度值集间的相加运算。

将上述定义的运算算子运用于简单算例描述如下:  $p_1 = [0, 2, 3, 1]$  和  $p_2 = [0, 1, 2, 0]$  为两个 4 维离散解值集,  $v_2 = [(0 \rightarrow 1), (2 \rightarrow 3), (2 \rightarrow 3), (0 \rightarrow 2)]$  为 4 维离散速度值集。离散解值集间的减法运算为

$p_1 \odot p_2 = v_1 = [(0 \rightarrow 0), (1 \rightarrow 2), (2 \rightarrow 3), (0 \rightarrow 1)]$ ; 离散速度值集间的加法运算为  $v_1 \oplus v_2 = [(0 \rightarrow 1), (1 \rightarrow 3), (2 \rightarrow 3), (0 \rightarrow 1)]$ ; 离散解值集与离散速度值集间的加法运算  $p_1 \otimes v_2 = p_3 = [1, 3, 3, 1]$ 。此外, 为了表示粒子迭代过程中的位置变化程度和粒子位置值之间的距离, 定义有粒子速度值的大小  $\|v\|$  和粒子位置值之间的距离  $\|p_1 - p_2\|$ 。 $\|v\|$  的大小定义为其有效速度值的个数, 有效速度值的定义为当速度值  $(i \rightarrow j)$  中,  $i \neq j$  时表示其是有效的。例如当  $v = [(0 \rightarrow 0), (1 \rightarrow 2), (2 \rightarrow 3), (0 \rightarrow 1)]$  时,  $\|v\| = 3$ , 由于  $p_1 \odot p_2 = v$ , 因此  $\|p_1 \odot p_2\|$  的大小定义同  $\|v\|$ 。

上述定义的运算算子可以满足 DPSO 算法公式的需要。由于 DPSO 算法在结构上与 PSO 算法具有统一性, 可知 DPSO 算法与 PSO 算法具有一致的迭代寻优原理。

## 2 基于改进 PSO 算法的电压薄弱区域恢复

### 2.1 电压薄弱区域恢复的数学模型

电力系统电压薄弱区域恢复是一个多目标、多变量、非线性、多约束的组合优化问题, 其控制变量既有连续变量(如发电机端电压), 又有离散变量(如调节变压器抽头、补偿电容器的投切组数), 使得电压薄弱区域恢复过程十分复杂, 进行电压薄弱区域恢复计算一般要对待恢复设备作综合调整。本文考虑全网各节点电压灵敏度分析值和与系统有功网损率尽量小情况下建立电压薄弱区域恢复的目标模型如下:

$$\min f = \lambda_1 \sum_{i \in M} ploss_i \% + \lambda_2 \sum_{i=0}^N \left( \frac{V_i}{V_{i,lim}} \right)^2 + \lambda_3 \sum_{i \in N_{PQ}} SI_i \quad (11)$$

式中:  $ploss_i \%$  是有功网损率,  $\left( \frac{V_i}{V_{i,lim}} \right)^2$  为节点  $i$  电压越限惩罚项, 不越界时为 0, 越界时为越界量的平方<sup>[11]</sup>。

以  $SI_i$  表示节点电压综合灵敏度指标:

$$SI_i = \alpha_1 * S_{Xi} + \alpha_2 * S_{Qi} \quad (12)$$

$$S_{Xi} = \sum_{i,j=1}^N w_j s_{ij} \quad (13)$$

以  $S_{Xi}$  表示第  $i$  条母线对电网线路发生扰动时的灵敏度和,  $w_j$  为不同支路的权重值,  $s_{ij} (= \frac{\partial u_i}{\partial x_j})$

表示电压  $u_i$  对第  $j$  条支路的灵敏度

$$S_{Qi} = \sum_{i,j=1}^N w_j^q s_{ij}^q \quad (14)$$

以  $S_{Qi}$  表示第  $i$  条母线对系统无功发生变化时的灵敏度和, 其中  $w_j^q$  为权重,  $s_{ij}^q (= \frac{\partial u_i}{\partial Q_j})$  表示第  $i$  条母线电压  $u_i$  对第  $j$  个节点无功功率变化的灵敏度。

$\alpha_1, \alpha_2$  取值可根据电网具体分析情况, 其中需满足  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

$\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_3$  根据不同电网结构的要求可以取不同的加权值。  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。

根据灵敏度数值求出电网节点临界薄弱指标的电压值。对于母线  $i$  电压表达式可写为:

$$V_i = V_i(0) + \frac{\partial V_i}{\partial T_\Sigma} \Delta T_\Sigma \quad (15)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial T_\Sigma} = \alpha_1 \frac{\partial V_i}{\partial X_\Sigma} + \alpha_2 \frac{\partial V_i}{\partial Q_\Sigma} \quad (16)$$

式中:  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。如果  $V_i$  超过其额定值的  $\pm 15\%$ , 则认为此母线的电压值越限, 就将此母线的灵敏度指标定义为电网的临界薄弱性指标。

本文定义电网薄弱区域为易发生故障的薄弱母线以及与其相连的线路集合, 其表达式为:

$$VA = \bigcup_{i \in n}^{S, value} (i_{ib}) \quad (17)$$

式中:  $i_{ib}$  代表母线以及与其相连的支路,  $value$  代表电网的临界薄弱性指标。

等式约束:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

不等式约束包括:

1) 节点电压幅值约束

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

2) 有载调压变压器变比约束

$$T_{imin} \leq T_i \leq T_{imax} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (20)$$

3) 电力电容器补偿无功约束

$$Q_{Cimin} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Cimax} \quad (i=1, 2, \dots, N_c) \quad (21)$$

式中:  $n$  为节点数;  $m$  为有载调压变压器台数;  $G_s$  为发电机台数;  $N_c$  为无功补偿点个数;  $U_i, U_{imin}$

$U_{imax}$  分别为节点  $i$  的实际电压、电压下限和电压上限;  $T_i$ 、 $T_{imin}$ 、 $T_{imax}$  为第  $i$  台变压器的实际变比、变比下限和变比上限;  $Q_i$ 、 $Q_{imin}$ 、 $Q_{imax}$  分别为第  $i$  个无功补偿点的实际补偿无功、无功补偿下限和无功补偿上限。

### 2.2 电压薄弱区域恢复的具体步骤

(1) 初始化, 输入各变量的维数和上、下限值, 粒子群的规模  $N$ 、最大迭代次数等的初始值。

(2) 在可行域内随机生成  $m$  个粒子的位置  $X_i$ , 其中, 变压器变比和电容器容量排在前  $N_t+N_c$  维, 组成初始的离散解值集, 而后  $N_g$  维表示发电机电压为连续值集。同时生成各粒子的初始速度  $v_i$ 。之后在各自的解空间重复步骤(3)至步骤(6)。

(3) 根据各粒子的位置计算对应的适应度函数值, 经过比较得到其相应的  $pbest$  和  $gbest$ 。

(4) 通过式(3)、(4)计算新的速度值与新的位置值, 对连续型变量不作处理, 将离散型变量的计算值离散化。

(5) 变量为连续值按式(3)、(4)进行速度和位置的更新, 检查更新位置是否越限, 若有, 则取该变量的上限值或下限值。变量为离散值则按式(9)、(10)进行更新, 依据DPSO的特点, 其更新的位置不存在越限。

(6) 通过比较更新  $pbest$  和  $gbest$ , 存储所有  $gbest$  值作为最终控制策略的可选方案。

(7) 判断PSO的循环次数, 如超过最大次数限制则停止迭代, 否则转向步骤(4)继续迭代。

### 3 算例及分析

本文以IEEE30节点系统为例进行分析, 系统结构如图1所示。节点2, 5, 8, 11, 13是PV节点, 其余节点是PQ节点。总功率为  $P_{load}=2.834$ ,  $Q_{load}=1.262$ 。系统基准容量为100 MVA, 负荷采用恒功率率模型, 以下数值若无特殊说明, 均为标么值。

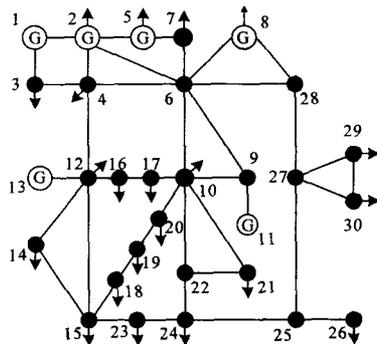


图1 IEEE30节点的电网网络图

Fig.1 Structure of IEEE 30 node system

表1 IEEE30节点系统主要节点灵敏度

Tab.1 Sensitivity index of the IEEE 30

Node	$S_{Xi}$	$S_{Qi}$	$SI_i$
2	10.643 5	5.513 0	16.156 5
13	9.318 0	4.847 1	14.165 1
22	9.253 9	4.477 6	13.731 5
23	9.146 5	4.467 9	13.825 5
27	7.279 5	4.298 1	11.577 6
8	6.114 0	3.824 4	9.938 4
14	5.508 0	3.796 2	9.304 2
3	5.418 4	3.774 1	9.192 5
7	3.063 1	3.768 8	6.831 9
15	2.659 1	3.627 5	6.286 6

经过计算IEEE30系统各节点得到的灵敏度相对较大的值放于表1。经过计算得到电压薄弱区域如下:

$$VA = \bigcup_{i \in 30}^{SI_i \geq 3.8244} (i_{lb}) = (2_{lb}, 13_{lb}, 22_{lb}, 23_{lb}, 27_{lb}, 8_{lb})$$

改进PSO算法对电压薄弱区域进行恢复前后的数据值见表2, 恢复后, 系统网损减少, 电压水平得到提升, 节点电压综合灵敏度指标大幅度减少。

表2 IEEE30节点系统电压薄弱区域恢复前后数据比较  
Tab.2 Data comparison of the IEEE 30 before and after improved PSO to recover weak voltage area

	有功网损	$\Delta U\%$	$SI_{max}$	$SI_{min}$
恢复前	0.059 88	4.78	16.156 5	0.213 6
恢复后	0.056 54	3.91	5.139 5	0.073 6

注:  $\Delta U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q (U_i - U_g)^2}{q}}$  为节点电压偏差指标;

$q$  为节点数;  $U_i$  为各节点电压幅值;  $U_g$  为各节点对应的额定电压幅值, 在式中取标么值1。

各算法的对比见表3。由于待恢复计算的设备数较多, 算法消耗的时间都较长, 但改进PSO的时间还是比PSO少9.96%; 采用改进PSO进行电压薄弱区域恢复时, 设备动作总数(台次)小于PSO, 且恢复效果也更优, 平均电压水平也更合理。

表3 IEEE30节点恢复的各算法比较

Tab.3 The algorithmic results comparison of IEEE 30 system

	有功网损率/(%)	电压均值	平均动作次数	电压薄弱节点	计算耗时/s
PSO	10.56	0.975	46.79	0	617.2
改进PSO	9.19	0.989	39.12	0	555.7

## 4 结语

粒子群优化算法作为群集智能的代表性方法之一, 给大量非线性、不可微和多峰值复杂优化问题的求解提供了一种新的思路和解决方法。本文从引进惯性因子和收敛因子对经典粒子群算法改进, 并考虑对实际中离散变量的处理。将改进后的算法应用于电压稳定薄弱区域恢复中, 通过对 IEEE30 节点系统进行算例验证, 实验结果表明了该算法加快收敛速度和收敛精度。目前针对 PSO 提出的不少改进算法多数取得了不错的效果, 如对其机理和数学基础能有更加深入的研究, PSO 在实际应用领域将得到更加广泛的应用。

## 参考文献

- [1] Ajarapu V, Lee B. Bibliography on Voltage Stability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998,13(1):115-125.
- [2] Kosterev D M, Taylor C W, Mittelsadt W A. Model Validation for the August 10,1996 WSCC System Outrage[J]. IEEE Trans on Power Trans on Power Systems, 1999,14(3):967-979.
- [3] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玫, 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] LI Xing-yuan, WANG Xiu-ying. Fast Voltage Stability Analysis Methods Based on Static Equivalence and Singular Value Resoulution[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2):86-91.
- [5] 徐晓春, 万秋兰, 顾伟, 等. 在线电压稳定分析中快速连续潮流的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2008,36(14):37-41.  
XU Xiao-chun, WAN Qiu-lan, GuWei et al. Application of Fast Continuous Trend in On-line Voltage Stability Analysis[J]. Power System Protection and Control, 2008,36(14):37-41.
- [6] LI Ai-guo, QING Zheng, BAO Fu-min, et al. Particle Optimization Algorithms[J]. Computer Engineerint& Application, 2002, 38(21):1-3.
- [7] YIN Yong-hua, GUO Jian-bo, ZHAO Jian-jun, et al. Preliminary Analysis of Large Scale Blackout in Interconnected North America Power Grid on August 14 Lessons to Be Draw[J]. Power System Technology, 2003,27 (10):8-12.
- [8] 吴秀华, 朴在林, 徐静, 等. 基于改进粒子群优化算法的电力系统无功电压综合控制[J]. 继电器, 2007, 35(21):28-33,38.  
WU Xiu-hua, PU Zai-lin, XU Jing, et al. Based on Improved Particle Swarm Optimization of Power System Reactive Power and Voltage Integrated Control[J].Relay, 2007, 35(21):28-33,38.
- [9] ZHOU Chi, GUO Hai-bing, GAO Liang. Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm[J]. Application Research of Computes, 2003,(12):7-22.
- [10] 梁正友, 支成秀. 基于离散粒子群优化算法的网格资源分配研究[J]. 计算机工程与科学, 2007,29(10):77-78,127.  
LIANG Zheng-you, ZHI Xiu-cheng. Study of Discrete Particle Swarm Optimization Bbased on Grid Resource Allocation[J]. Computer Engineering and Science, 2007,29(10):77-78,127.

收稿日期: 2009-07-01; 修回日期: 2009-10-08

作者简介:

李 然 (1982-), 女, 助教, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: hdliran@163.com

盛四清 (1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统分析、运行和控制和人工智能在电力系统中的应用。

(上接第 108 页 continued from page 108)

- GAO Xiang. Application Technology of Digital Substation[M]. Beijing: China Electric Power Press,2008.
- [7] 杨奇逊. 变电站综合自动化发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 7-9.  
YANG Qi-xun. Development Trend of Integrated Protection and Control in Power Substations[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 7-9.

收稿日期: 2009-08-04; 修回日期: 2009-09-03

作者简介:

陈朝晖 (1979-), 男, 博士, 工程师, 从事电网继电保护运行管理及研究工作; E-mail:chenzh@csg.cn

赵曼勇 (1957-), 女, 教授级高级工程师, 从事二次专业生产运行管理及研究工作。

周红阳 (1969-), 男, 教授级高级工程师, 从事电网继电保护运行管理及研究工作。