

# 容纳小水电弃水及电容器投切的配网优化运行研究

彭显刚<sup>1</sup>, 张聪慧<sup>1</sup>, 王星华<sup>1</sup>, 刘艺<sup>1</sup>, 余欣梅<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省电力设计研究院系统规划部, 广东 广州 510900)

**摘要:** 随着能源危机和环境挑战, 越来越多基于包含小水电的分布式电源并入配电网运行。为了充分利用小水电的发电能力, 分析了小水电群的运行特性, 提出了计及电容器投切约束和小水电弃水的优化控制方法与策略, 利用改进的PSO智能算法进行目标的优化求解。利用IEEE9节点系统对该方案进行测试仿真计算, 结果表明该算法能够很好地获取全局最优解。该方法可应用于含有小水电等分布式电源的配电网优化运行分析中。

**关键词:** 配电网; 运行优化; PSO算法; 小水电弃水; 电容器投切

## Research on optimal operations of distribution system with accommodation water discharge of small hydropower station and capacitor-switching

PENG Xian-gang<sup>1</sup>, ZHANG Cong-hui<sup>1</sup>, WANG Xing-hua<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, YU Xin-mei<sup>2</sup>

(1. Department of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Power System Planning Division, Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510900, China)

**Abstract:** With the energy crisis and environmental challenge, more and more distributed generation (DG) based on small hydropower station has been connected to the distribution network. In order to make full use of the small hydropower exploitation capacity, the operation characteristics of small hydropower station are analysed, and an optimization control method and strategy containing the capacitor-switching limitation and the water discharge of small hydropower station is proposed. A new intelligent PSO algorithm is proposed to solve this objective optimization of small hydropower. The proposed method is tested by IEEE 9-bus system, the investigations reveal that method is capable of obtaining global optimal solutions efficiently. The satisfying result shows that the method proposed can be used in the optimal operation analysis of distribution network with distributed generations such as small hydropower station, etc.

This work is supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 10151009001000045).

**Key words:** distribution network; operation optimization; PSO algorithm; water discharge; capacitor switching

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0058-04

## 0 引言

在近几年国家节能减排的政策鼓励下, 区域小水电群以其丰富的能量来源及清洁无污染的运行方式, 越来越受到地区电网的重视并得到大力发展。

小水电群与区域电网并网运行可以有效降低电力峰荷、缓解电压骤降、消除过负荷和堵塞、增加输电裕度, 并且大大提高供电可靠性。但与此同时, 并网的小水电群由于受自然环境而分丰、枯水期的

不同运行方式及其可控性差不能很好地受调度运行的管理, 致使部分小水电不能合理地满足并网运行条件, 诸如电压等约束条件, 有时为了满足并网约束, 只能对小水电采取大量弃水, 但这又不能很好地做到节能调度、发展清洁能源的政策号召。

因此, 本文针对小水电群合理优化并网问题展开研究, 通过电容器投切来改善电压越界, 寻求在计及电容器投切次数限制、小水电弃水最少的约束下配电网的最经济运行方式。

## 1 含小水电群区域电网运行分析

在日常运行中, 由于小水电无库容、调节能力差、季节性强等因素, 大部分小水电不能随日负荷

**基金项目:** 广东省自然科学基金项目资助(10151009001000045), 广东省教育厅电力节能与新能源技术重点实验室资助项目(IDSYS200701)

曲线的峰谷变化而调整出力,此外,很多梯级或流域内的多个小水电由于地理条件的限制,经常采用串T形式接入电网的某一馈线,远离负荷中心,这种结构进一步恶化了梯级和流域小水电群接入配电网后的运行条件,导致流域小水电站相互之间竞争发电上网,造成电网运行指标的大量越限;或是为了满足电网运行指标的限制而导致在低负荷下的大量弃水,这对电网的安全运行和电站的经济运行都是不利的。

由于小水电群运行具有季节性、同步性的特点,在丰水期基本上为送端系统,小水电群基本没有调节能力而同步开机满发,造成局部电网电压普遍偏高,在重负荷下,水电机端电压高,受无功封锁导致无功欠发,从电网吸收感性无功并投入电容器组;在枯水期为受端系统,由于地处整个电网末梢,送电距离远且电气联系弱,因此局部电网电压普遍偏低。

因此,小水电并网运行的主要问题来自于丰水期重、轻负荷日的峰谷差过大,而小水电的库容调节能力过低,导致了高峰负荷小水电满发、而电容器频繁投入;低谷负荷电容器退出而小水电弃水。

## 2 小水电群区域配网运行的改进优化模型

### 2.1 基本思想

小水电发电机在发有功的同时也作为一种无功电源,可在一定程度上缓解无功不足。但实际的情况是,水电站在丰水期往往存在着无功欠发,甚至还要从大电网吸收感性无功的现象,加重了电网的无功负担,在与电网进行无功交换中形成了大量的有功损耗。并且,在小水电群运行的丰水期,考虑峰谷负荷的差异需要投切电容器来控制电网电压,而很多水电站优化计算中,没有考虑电容器投切次数对设备寿命的影响,因此其结果经常出现电容器的频繁投切操作,并不符合实际运行和经济性的要求;同时在水电大发汛期,大量小水电冲击电网主网,低谷倒送电力,大大增加了电网调峰负担,会受到电网限制其发电,造成水电站弃水浪费。

本文针对小水电并网位置和结构特点,以电容器投切代价及电站弃水最小为约束,电网经济运行费用最小为优化目标,提出了智能PSO优化方案,实现电网与区域小水电群的最优运行。

### 2.2 改进优化模型

#### 2.2.1 目标函数

$$\min f = k_E \cdot T \cdot \left[ P_L + \sum_{i=1}^n (p_{ie} - p_i) \right] + k_q \cdot \sum_{j=1}^{NC} \Delta q_j \quad (1)$$

式中:  $P_L$  为优化时刻的系统总网损;  $T$  为优化时间

间隔,一般取  $T = 1\text{h}$ ;  $K_E$  为单位电能损耗的费用系数;  $\Delta q_j$  为补偿节点  $j$  处在优化前后两个时段电容器投入组数的变化量;  $K_q$  为电容器一次投切动作的代价系数;  $NC$  为系统中装有可投切电容器的节点数;  $n$  为优化时刻投入的小水电数;  $p_{ie}$  为水电站满发时对应的额定功率,  $p_i$  为水电站实际弃水发电时对应的功率。

优化模型改进的关键就是在以往的目标函数中增加了对电容器投切代价及水电弃水进行量化的部分。电容器的频繁投切对设备寿命有很大影响,并且也不符合实际运行的要求,应将电容器投切次数采用功率指标计入到目标函数中处理,根据运行及约束要求,得出最小投切代价<sup>[1]</sup>。式(1)中的投切代价系数  $K_q$ ,可按以下方法近似计算:假定一台电容器组的购买成本为  $F_C$  元,正常寿命期内允许的投切次数为  $T_C$  次,正常使用寿命为  $Y_C$  年,投切开关永远不动作时补偿装置的预期寿命是  $Y'_C$ ,则投切开关动作一次的代价(元/次)为:

$$K_q = F_C (Y'_C - Y_C) / (Y_C T_C) \quad (2)$$

若令  $C_q = K_q / (K_E \cdot T)$ ,则目标函数可转化为如下形式:

$$\min f = P_L + \sum_{i=1}^n (p_{ie} - p_i) + C_q \cdot \sum_{j=1}^{NC} \Delta q_j \quad (3)$$

式中,  $C_q$  为以功率形式表示的投切代价系数,单位为  $\text{kW}/\text{次}$ 。

采用式(3)形式的目标函数,控制变量的变化量  $\Delta q$  及  $(p_{ie} - p_i)$  过大会使目标函数值增大,优化结果将在降损量与投切代价、弃水之间达到平衡,从而能够避免过多的投切次数和过大的弃水量。此外,通过将总投切次数的约束转化为目标函数中的投切代价,将全局性的动态优化改造为解耦的逐时段静态优化,计算复杂度显著降低,且无须对负荷预测曲线进行等值和简化,保证了较高的计算精度<sup>[2]</sup>。

#### 2.2.2 约束条件

##### (1) 潮流约束

$$G(\mathbf{X}, \mathbf{q}) = 0 \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{q}$  分别代表优化时刻系统的状态变量向量和控制变量向量。

##### (2) 电容器投入组数约束(控制变量约束)

$$0 \leq q_j \leq q_{j,\max} \quad j = 1, 2, \dots, NC \quad (5)$$

式中,  $q_j$  和  $q_{j,\max}$  分别为节点  $j$  处可投切电容器的投入组数和最大安装组数。

##### (3) 电压上下限约束

$$V_{\min} \leq |V_j^1| \leq V_{\max} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中,  $|V_j^1|$ 、 $V_{\min}$  和  $V_{\max}$  分别为节点 $j$ 的电压有效值、节点电压的下限和上限;  $N$ 为系统的节点数。

(4) 电容器安全约束 (状态变量约束)

为了保证电容器的安全运行, 各电容器的工作电流、工作电压和总的负荷应满足下式, 即:

$$\begin{cases} |I_{C,j}| \leq 1.30I_{CN,j} \\ |V_{C,j}| \leq 1.10V_{CN,j} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $I_{C,j}$ 、 $V_{C,j}$  分别为电容器 $j$ 的电流、电压;  $I_{CN,j}$ 、 $V_{CN,j}$  分别为电容器 $j$ 的额定电流、电压<sup>[3]</sup>。

2.2.3 PSO优化原理

式(1)~(7)属于不可微的非线性整数规划的范畴, 其目标函数和约束条件都是离散控制量的非线性函数, 难以用传统规划方法进行问题的精确求解, 因而本文利用一种新的智能演化计算方法——微粒群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 来解决上述问题。

假若在 $D$ 维搜索空间中有 $m$ 个微粒, 微粒 $i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 的位置为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$ , 它所经历过的最优位置记为  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})^T$ , 相应的适应度值称为个体最优解  $pBest_i$ 。整个微粒群经历过的最优位置记作  $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})^T$ , 相应的适应度值称为全局最优解  $gBest$ 。微粒 $i$ 的移动速度用  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$  表示。则微粒根据如下计算公式来更新自己的速度和位置<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} V_i(t+1) = \omega \cdot V_i(t) + r(0, c_1)(P_i(t) - X_i(t)) + r(0, c_2)(P_g(t) - X_i(t)) \\ X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1), i = 1, 2, \dots, m; \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\omega$  为惯性权重;  $c_1$  和  $c_2$  为加速常数;  $r(0, c_1)$  和  $r(0, c_2)$  为两个相互独立的随机函数, 分别产生  $[0, c_1]$  和  $[0, c_2]$  范围的随机数;  $t$  指迭代计算次数<sup>[5-6]</sup>。

根据 PSO 优化原理, 结合本文小水电群区域配电网的优化目标, 对配电网网损、电容器投切代价及小水电弃水进行逐时段优化迭代计算, 寻找最优适应度值, 得到全局最优解<sup>[7-8]</sup>。

3 算例分析

3.1 算例系统说明

本文以IEEE9节点算例系统为例, 对小水电位于5、7、9节点时其优化计算情况及结果进行分析。该系统的固定电容器及可投切电容器组配置情况如表1所示, 节点的电压限值为  $V_{\max}=1.10$  p.u. 和  $V_{\min}=0.90$  p.u.。

表1 9节点配电系统的电容器配置情况

Tab.1 Capacitor placement of the 9-bus system

| 补偿节点号 | 单组额定容量/<br>kvar | 固定<br>电容器/组 | 可投切<br>电容器/组 |
|-------|-----------------|-------------|--------------|
| 2     | 300             | 5           | 0            |
| 3     | 300             | 2           | 3            |
| 4     | 300             | 2           | 3            |
| 5     | 300             | 0           | 5            |
| 6     | 300             | 1           | 2            |
| 8     | 300             | 0           | 5            |

根据负荷预测得到未来一天系统各节点负荷曲线来实现配电网电容器的优化投切和水电弃水优化。为便于计算, 假定算例系统中的所有负荷节点都属于同一类型, 其节点在未来一天的阶梯形日负荷曲线如图1所示 (纵坐标是以24 h的平均功率为基准的标么值功率, 称负荷曲线系数)。

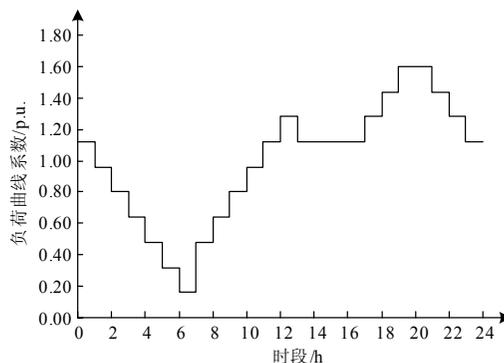


图1 某节点的阶梯形日负荷曲线

Fig.1 The piece-wise daily load profile of a bus in the 9-bus system

3.2 计算结果分析

在以电容器投切次数及水电弃水为约束的区域电网优化程序中, 通过设置VC++编程中不同参数值, 分别考虑小水电群运行中不计电容器投切代价、计及电容器投切和考虑电容器投切并使小水电机组进相运行时三种不同运行状态下电网的损耗、小水电的弃水代价和投切次数进行优化研究和比较。

(1) 不计投切代价

将投切费用系数 $C_q$ 设置为 $C_q=0$ , 经程序解耦运行一天内24 h负荷曲线, 得到的计算结果如表2所示。

表2 不计电容器投切代价计算结果

Tab.2 Results of ignoring capacitor-switching cost

|                  |                  |   |   |   |    |    |
|------------------|------------------|---|---|---|----|----|
| 补偿节点号            | 2                | 3 | 4 | 5 | 6  | 8  |
| 投切次数             | 0                | 4 | 3 | 8 | 10 | 11 |
| 24时段的网损总和 / p.u. | 49.909 393 00    |   |   |   |    |    |
| 24时段的弃水总和 / p.u. | 6 584.824 692 51 |   |   |   |    |    |

(2) 计及投切代价

将投切费用系数 $C_q$ 设置为 $C_q=0.04$ , 经程序解耦运行一天内24 h负荷曲线, 得到的计算结果如表3所示。

表3 计及电容器投切代价计算结果

Tab.3 Results of considering capacitor-switching cost

|                  |                  |   |   |   |   |   |
|------------------|------------------|---|---|---|---|---|
| 补偿节点号            | 2                | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 |
| 投切次数             | 0                | 1 | 2 | 3 | 0 | 2 |
| 24时段的网损总和 / p.u. | 50.667 087 62    |   |   |   |   |   |
| 24时段的弃水总和 / p.u. | 6 639.604 015 29 |   |   |   |   |   |

(3) 考虑机组进相运行及电容器投切代价

发电机正常运行时, 向系统提供有功的同时还提供无功, 定子电流滞后于端电压一个角度, 此种状态即迟相运行。当系统供给的感性无功功率多于需要时, 将引起系统电压升高, 要求发电机少发无功甚至吸收无功, 此时发电机可以由迟相运行转变为进相运行。同步发电机向量图如图2所示。

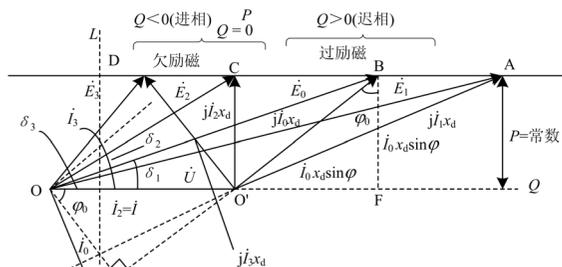


图2 同步发电机向量图

Fig.2 Synchronous generators vector diagram

对于区域小水电群, 由于其受到自然条件的限制, 有丰、枯水期, 在丰水期水电大发汛期, 大量小水电冲击电网主网, 负荷低谷时倒送电力, 大大增加了电网调峰的负担, 会受到电网限制其发电, 造成水电站弃水浪费。这时应安排一些小容量水电机组进相运行, 有利于在夏季无功充裕时降低系统过高电压, 并对水电站的弃水问题得到很大改善。

此时, 设置合理参数, 适当考虑使发电机进相运行, 由图2可知, 机组进相运行时, 无功功率为负。这里设置 $C_q=0.04$ , 约束条件 $Q_{max} > Q > -0.3Q_{max}$ 时运行程序得出计算结果如表4。

表4 计及进相运行及电容器投切代价计算结果

Tab.4 Results of considering leading phase operation and capacitor-switching cost

|                  |                  |   |   |   |   |   |
|------------------|------------------|---|---|---|---|---|
| 补偿节点号            | 2                | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 |
| 投切次数             | 0                | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 24时段的网损总和 / p.u. | 65.164 407 99    |   |   |   |   |   |
| 24时段的弃水总和 / p.u. | 2 762.793 724 17 |   |   |   |   |   |

分析上述计算结果可知:

① 与未考虑投切代价的结果相比, 计及投切代价的目标优化中有功网损虽有所增加, 但差别并不大。两者的最大差别体现在, 前者为了追求每一时段的网损最小需要付出频繁投切的代价, 后者则可以使电容器投切次数得到有效的控制, 因此从工程实际的角度而言, 后者的结果才是真正可操作的优化方案。

② 在电容器投切代价的基础上, 考虑发电机的进相运行, 从程序的优化结果可以看出, 有功网损略有增加, 但幅度依然不大, 而其水电群的弃水代价却有很大幅度的减小, 这对丰水期低负荷时水电站的经济运行非常有利, 并且电容器的投切次数也被控制的比较合理, 符合工程实际。

4 结论

本文针对小水电群区域配电网的网损、电容器投切及小水电弃水问题建立模型并结合PSO智能算法进行优化方案研究。得出了在小水电丰水期重负荷情况下, 合理控制电容器投切次数, 从而减少投切代价; 而在小水电丰水期轻负荷下, 考虑机组进相运行, 有效地减少了水电站弃水浪费, 达到节能优化目标。算例分析表明, 该优化方案使得小水电群与区域配电网能够更加合理经济地运行, 具有一定的实用性和可行性。

参考文献

[1] 余欣梅. 考虑谐波影响的配电网电容器优化模型及相关算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.  
YU Xin-mei. Study on modeling and solution algorithms of capacitor optimization with harmonic consideration in distribution systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

[2] 许立雄, 吕林, 刘俊勇. 基于 PSO的配网重构与电容器投切综合优化算法[J]. 继电器, 2006, 34(17): 25-28.  
XU Li-xiong, Lü Lin, LIU Jun-yong. Comprehensive optimization of distribution network reconfiguration and capacitor switching based on particle swarm optimization[J]. Relay, 2006, 34(17): 25-28.

(下转第 67 页 continued on page 67)

- grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 12-17.
- [7] 刘永军, 万频, 王东海, 等. 自适应模糊算法在光伏系统MPPT中的应用[J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 167-171.  
LIU Yong-jun, WAN Pin, WANG Dong-hai, et al. Maximum power point tracking in photovoltaic system by using adaptive fuzzy arithmetic[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2008, 29(6): 167-171.
- [8] Syafaruddin, Karatepe Engin, Hiyama Takashi. Polar coordinated fuzzy controller based real-time maximum-power point control of photovoltaic system[J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2597-2606.
- [9] 周林, 武剑, 栗秋华, 等. 光伏阵列最大功率点控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1145-1154.  
ZHOU Lin, WU Jian, LI Qiu-hua, et al. Survey of maximum power point tracking techniques for photovoltaic array[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1145-1154.
- [10] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, SUN Xiao-ying, et al. The photovoltaic generation and application of the solar energy[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [11] 茆美琴, 余世杰, 苏建晖. 带有MPPT功能的光伏阵列MATLAB通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.  
MAO Mei-qin, YU Shi-jie, SU Jian-hui. Versatile matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [12] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 斯普林格出版社, 2001.  
LI Qing-yang, WANG Neng-chao, YI Da-yi. Numerical analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Springer Press, 2001.
- [13] 吴玉蓉, 张国琴. 基于DSP控制的单相光伏并网逆变器系统的设计[J]. 继电器, 2008, 36(4): 51-56.  
WU Yu-rong, ZHANG Guo-qin. Design of single phase photovoltaic grid-connected inverse system based on DSP[J]. Relay, 2008, 36(4): 51-56.

收稿日期: 2010-02-05; 修回日期: 2010-05-15

作者简介:

邱培春(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: qiupc22@126.com

葛宝明(1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制;

毕大强(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用。

(上接第 61 页 continued from page 61)

- [3] 吴文传, 张伯明. 电容器实时优化投切的最优匹配注入流法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 35-39.  
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Optimal matching injected flow for optimal sizing of capacitor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 35-39.
- [4] 王星华, 余欣梅. 电容器组串联电抗率优化选择模型和算法研究[J]. 电力系统控制与保护, 2008, 36(16): 43-47.  
WANG Xing-hua, YU Xin-mei. Optimal configuration of series reactors in capacitor banks[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(16): 43-47.
- [5] 赵登福, 刘昱, 夏道止. 考虑开关动作次数约束的配电网无功电压控制方法的研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(8): 783-786.  
ZHAO Deng-fu, LIU Yu, XIA Dao-zhi. Reactive power/voltage control of distribution system considering the constraint of the maximum allowable number of switching operations[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(8): 783-786.
- [6] 胡泽春, 王锡凡. 配电网无功优化的分时段控制策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 45-49.  
HU Ze-chun, WANG Xi-fan. Time-interval based control strategy of reactive power optimization in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 45-49.
- [7] 唐群纲, 林景栋. 基于启发式搜索降低配电网网损的配网重构算法[J]. 电力系统控制与保护, 2007, 35(14): 10-12.  
TANG Qun-gang, LIN Jing-dong. Reconfiguration of distribution network algorithm of power loss reduction based on heuristic search[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(14): 10-12.
- [8] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40  
CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Study on Power flow calculation of distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 35-40.

收稿日期: 2009-02-10; 修回日期: 2009-04-16

作者简介:

彭显刚(1964-), 男, 副教授, 从事电力系统分析、电网优化与控制研究;

张聪慧(1984-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统运行与控制研究; E-mail: zchsunny99@163.com

王星华(1972-)男, 副教授, 从事电力系统分析、电网优化与控制研究。