

基于改进粒子群算法的配电网分布式电源规划

汪兴旺, 邱晓燕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 合理地分布式电源进行选址和定容对于实现配电网网损最小是至关重要的。应用改进粒子群优化算法进行配电网分布式电源(DG)规划,并结合罚函数法将DG规划问题转化成无约束求极值问题,从而有效地提高了改进粒子群优化算法的全局收敛能力和计算精度。对69节点和33节点配电测试系统进行仿真计算,结果表明了论文采用的DG规划模型和改进粒子群优化算法的正确性和适用性。

关键词: 分布式电源规划; 配电网; 改进粒子群优化算法; 现代启发式算法; 有功网损

Distributed generation planning in distribution system based on modified particle swarm optimization algorithm

WANG Xing-wang, QIU Xiao-yan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To minimize line losses of distribution systems, it is crucially important to define the size and location of distributed generators to be placed. This paper proposes a modified particle swarm optimization (MPSO) algorithm for distributed generation (DG) planning in a distribution system. MPSO is utilized to solve the proposed distributed generation (DG) planning model, and combined with penalty function, the DG planning problem is transferred into a problem to solve extreme-value without constraints, thus the calculation accuracy and global convergence ability of MPSO are effectively improved. Simulation of the proposed algorithm by 69-bus distribution test system and 33-bus distribution test system is conducted. Simulation results validate the correctness and adaptability of the proposed DG planning model and MPSO algorithm.

Key words: distributed generation planning; distribution system; modified particle swarm optimization (MPSO) algorithm; meta-heuristic algorithms; power loss

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0016-05

0 引言

分布式电源 DG (Distribution Generation) 是指直接布置在配电网或者分布在负荷附近的小型发电机组。分布式电源凭借其投资省、发电方式灵活、与环境兼容等优点而备受关注,它与电网联合运行可以提高系统的经济性、安全性、可靠性和灵活性,并且满足了可持续发展的要求,大大减轻了环保的压力。EPRI(美国电力研究院)的研究指出,到2010年,新增分布式电源总容量将占新增电源总容量的25%^[1]。

分布式电源的接入,给传统的配电网规划带来实质性的挑战,使得配电网规划必须充分考虑分布式发电对电网的影响。随着分布式电源比例的不断扩大,必将增大配电网的复杂性和不确定性。因此必须合理选择 DG 的位置和容量。DG 规划既要考

虑负荷的需求范围、系统的经济性、可靠性以及损耗等常规电力规划问题。同时,大量 DG 装置的安装均具有短期性,通常意义下,它的服务对象更具针对性和特殊性^[2]。

近年来,通过对 DG 的最优选址和定容从而使系统网损最小已成为国内外研究的热点。现代启发式算法与传统数学规划方法相比,具有全局优化性能、鲁棒性强、通用性强且适于进行并行计算的特点,因而在电力系统规划中得到广泛运用。文献[3]在分布式电源个数、位置和容量均未知的条件下,采用遗传算法(GA)对 MV 级配电网中分布式电源的位置和容量进行优化,该算法考虑了馈线容量极限、馈线电压形态以及三相短路电流等技术,建立了以网络扩建及损耗成本用最少为目标函数。文献[4]提出一种通过模糊遗传算法(Fuzzy-GA)来解决配电网分布式电源最优安装地点问题。考虑配电系统的有

功网损最小为目标函数, 分布式电源的数量和容量大小以及电压上下限为约束条件。将目标函数和约束条件转化为多目标函数, 通过模糊方法建模, 并使用目标规划和遗传算法计算出多目标函数的全局最优解。文献[5]将 Hereford Ranch 算法(HRA)用于配电网中分布式电源的最优位置及容量大小确定。文献[6]从损耗最小的角度出发, 提出一种应用禁忌搜索算法(TS)来优化位置和容量的分解协调方法。文献[7]将蚁群优化算法(ACO)用于求解配电系统中 DG 的最优定容和选址问题。模型的目标函数考虑 DG 电源的投资成本、运行维护成本、输电网电能购买成本和网损成本。文献[8]将粒子群优化(PSO)与潮流算法相结合, 用于同时搜索 DG 的最优容量和接入位置, 在满足系统电压约束的条件下最终达到有功网损最小的目的。文献[9]分析了分布式电源接入配电网前后网络损耗的变化情况, 并在此基础上提出采用混合模拟退火 SA(Simulated Annealing)的改进粒子群优化算法, 对分布式电源选址和定容问题进行优化求解。

本文在传统 PSO 的基础上, 提出一种改进粒子群优化算法(MPSO), 并将其用于配电网 DG 规划。算例仿真表明 MPSO 用于配电网的 DG 规划是有效可行的, 并且其收敛性能较 PSO 有一定程度的提高。

1 配电网 DG 规划模型

配电网 DG 规划的目的是对 DG 进行最优选址和定容, 使配电网满足安全约束, 并使配电网有功网损最小, 数学模型可由下式表示:

$$\min P_L = \sum_{i=1}^L |I_i|^2 R_i \quad (1)$$

等式约束为

$$P_{SUB} + \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG_i} = P_L + \sum_{i=1}^N P_{LD_i} \quad (2)$$

此外还包括潮流方程。

不等式约束为

$$|V_i|^{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|^{\max} \quad (3)$$

$$|I_i| \leq |I_i|^{\max} \quad (4)$$

$$P_{DG_i}^{\min} \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i}^{\max} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG_i} \leq \eta \sum_{i=1}^N P_{LD_i} \quad (6)$$

式中: P_L 为系统有功网损; I_i 为支路 i 的电流; L 为系统的支路数; R_i 为支路电阻; P_{SUB} 为变电站输出

的有功容量; P_{DG_i} 为第 i 个 DG 的注入有功; N_{DG} 为安装 DG 总数; N 为节点数; P_{LD_i} 为节点上负荷有功, $|V_i|$ 、 $|V_i|^{\min}$ 和 $|V_i|^{\max}$ 分别表示第 i 个节点电压幅值和电压下、上限; $|I_i|$ 和 $|I_i|^{\max}$ 分别表示每条支路电流大小和允许通过的电流上限; $P_{DG_i}^{\min}$ 和 $P_{DG_i}^{\max}$ 分别表示 DG 注入有功的下、上限; η 为 DG 有功总量占系统负荷总量的比例上限。

综合考虑目标函数和约束条件, 本文以下式作为目标函数:

$$\min F = P_L + C_1 \delta_1 + C_2 \delta_2 + C_3 \delta_3 + C_4 \delta_4 \quad (7)$$

式中: P_L 由式(1)可得; $\delta_1 = \max(0, |V_i|^{\min} - |V_i|) + \max(0, |V_i| - |V_i|^{\max})$, C_1 为电压越限时的惩罚因子, $\delta_2 = \max(0, |I_i| - |I_i|^{\max})$, C_2 为电流越限时的惩罚因子, $\delta_3 = \max(0, P_{DG_i}^{\min} - P_{DG_i}) + \max(0, P_{DG_i} - P_{DG_i}^{\max})$, C_3 为 DG 注入有功越限时的惩罚因子, $\delta_4 = \max(0, \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG_i} - \eta \sum_{i=1}^N P_{LD_i})$, C_4 为 DG 有功总量越限时的惩罚因子。

2 PSO 算法及其改进

2.1 基本 PSO 算法

粒子群优化 PSO (particle swarm optimization)^[10]算法是 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的基于集群智能的随机优化算法, 适用于求解非线性、不可微的复杂优化问题。由于 PSO 算法简单、易实现且需要调节的参数不多, 因此已被应用于多个学科和工程领域。但该算法收敛精度不高, 易陷入局部极值。为避免陷入局部最优, 本文将改进的 PSO 算法应用于求解配电网分布式电源的选址和定容。

设在一个 D 维解搜索空间中, 采用 PSO 算法初始化后产生一群随机粒子, 其中第 i 个粒子的位置和速度可表示为一个 D 维向量 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ 和 $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为群体规模。第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置为 $x_{pi} = [x_{pi1}, x_{pi2}, \dots, x_{piD}]$, 该位置适应度值为 p_{best_i} , 称为个体极值。整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置为 $x_g = [x_{g1}, x_{g2}, \dots, x_{gD}]$, 该位置适应度值为 g_{best} , 称为全局极值。各粒子根据如下公式进行迭代操作, 以更新自己的速度和位置。

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1^k (p_{bestid}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2^k (g_{bestd}^k - x_{id}^k) \quad (8)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (9)$$

式中： d 表示 D 维解搜索空间中的第 d 维， $d=1,2,\dots,D$ ； k 为迭代次数；变量 c_1 和 c_2 为非负的加速度常数； r_1, r_2 是 $[0,1]$ 之间的随机数； ω 是非负常数，称为惯性权重。粒子速度受最大速度 v_{max} 的限制 ($v_i(k) \leq v_{max}$)， v_{max} 可根据粒子的取值区间长度来确定。迭代中止条件一般选为不超过最大迭代次数或粒子迄今为止搜索到的最优位置满足适应阈值。

2.2 改进的 PSO 算法(MPSO)

惯性权重 ω 使微粒保持运动惯性，使其有扩展搜索空间的趋势，有能力探索新的区域。若 ω 较大，粒子有能力扩展搜索空间，搜索以前所未到达的区域，整个算法的全局搜索能力强；若 ω 较小，粒子主要在当前解附近搜索，局部搜索能力较强。因此采用自适应 MPSO 算法调整 ω 的策略，让 ω 随算法迭代的进行而线性地减少，从而显著改善算法的收敛性能。设 ω_{max} 、 ω_{min} 分别为惯性系数的起始值和终止值， $iter$ 为当前迭代次数， $iter_{max}$ 为最大迭代次数。 ω 按下式进行迭代^[11]：

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} \times iter \quad (10)$$

同时，在粒子群算法求解优化过程中，粒子还会出现一种“聚集”现象。即当某个粒子处在“最优位置”时，其余粒子都将迅速地飞向该位置，从而造成所有粒子聚集在某一特定位置，或者聚集在某几个特定位置的现象，使算法陷入局部最优。本文针对这种“聚集”现象，采用了一种简单实用的自调整方法，即当粒子群在搜索空间搜索时，当种群的 g_{best} 经过设定的次数仍然得不到提高时，算法在保留 g_{best} 的情况下重新初始化粒子群中部分粒子的位置和速度，使寻优操作达到更广的空间，从而避免算法出现过早收敛的现象^[12]。

3 MPSO 用于配电网 DG 规划

3.1 含分布式电源的配网潮流计算

连接到配电网的分布式电源所采用的模型既可简化为 PV 节点，也可以是 PQ 节点，本文将其当成具有恒定功率的 PQ 节点。由于分布式电源的位置一般靠近负荷中心，本文假设分布式电源的位置在负荷点上^[13]。图 1 所示为将与母线相联的 DG 看作是值为负的 PQ 负荷节点。

由于配电网普遍采用开环的运行方式，其网络

多为辐射状，因此一般可以采用前推回推法^[14]（或称为前推回代法）进行配电网潮流计算。前推回推潮流算法是当前应用广泛的配电网潮流算法，具有较好的线性收敛性能^[15]。

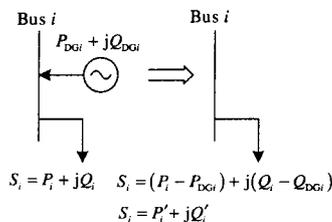


图 1 DG 接入母线 i 的模型

Fig.1 Model of the DG unit connected to the i bus

3.2 算法求解步骤

1) 输入原始数据，获取系统节点信息和支路信息，确定电压、电流上下限；初始化算法参数（粒子群体的规模、最大迭代次数、惯性权重的上下限、权重因子 c_1 和 c_2 、粒子更新的最大速度等）。

2) 设定迭代次数 $iter=0$ ，利用随机数发生器在可行域内随机生成 M 个粒子，各粒子位置为 x_i ，同时在一定范围内设定初始速度 v_i （本文中设初始速度为 0），并设定各初始粒子的个体最优解和全局最优解为某一足够大值。

3) 对于种群中每个粒子，应用前推回推法进行潮流计算和网损计算；根据潮流计算的结果按式(7)评估种群中每个粒子的适应值；取其中最小值作为群体当前的最优解 g_{best} ，设定每个粒子当前位置为认知最优解 p_{best_i} 。

4) 更新计数器 $iter = iter + 1$ ；根据式(10)更新惯性因子 ω ；根据式(8)、式(9)计算每个粒子的速度 v_i 和位置 x_i ；若 $v_i > v_{max}$ 则取 $v_i = v_{max}$ ，若 $v_i < -v_{max}$ 则 $v_i = -v_{max}$ 。

5) 应用前推回推法进行潮流计算和网损计算，重新评估每个粒子的适应值。①比较各粒子适应值 $F(x_i)$ 和当前个体最优解 p_{best_i} ，若某个粒子的适应值 $F(x_i) < p_{best_i}$ ，则 $p_{best_i} = F(x_i)$ ， $x_{pi} = x_i$ ；②令所有粒子 $F(x_i)$ 中的最小值为 F_{min} ，若 $F_{min} < g_{best}$ ，即本代群体最优解小于上代群体最优解，则 $g_{best} = F_{min}$ ；若 g_{best} 值不变，则 $n = n + 1$ ，若 $n \geq 10$ 则重新将部分粒子初始化，若 $n < 10$ ，则 $n = 0$ （其中 n 为程序设定的次数）。

6) 判断 $iter$ 是否已达到预置的最大迭代次数 $iter_{max}$ ，是则转向 7)，否则转向 4)。

7) 输出最优解(即最后一次迭代后的 g_{best})。

4 仿真结果及分析

利用上述模型及求解方法, 在 Matlab 计算环境下分别对 69 节点配电网测试系统^[16]和 33 节点配电网测试系统^[17]进行仿真。69 节点系统接线图如图 2 所示, 该系统负荷总的有功功率和无功功率分别为 3 802.19 kW 和 2 694.60 kvar。改进粒子群优化算法的参数设置: 粒子数目 $m=20$, 权重因子 $c_1=c_2=2$, 惯性系数 $\omega_{max}=0.9$, $\omega_{min}=0.4$, 最大迭代次数为 50。通过计算得出, 未接入 DG 时, 系统的有功网损为 224.931 7 kW, 61 节点为 DG 的最佳接入位置, 最优有功容量为 1 872.4 kW, 有功网损为 83.200 9 kW。优化后有功网损下降率达 63.01%。

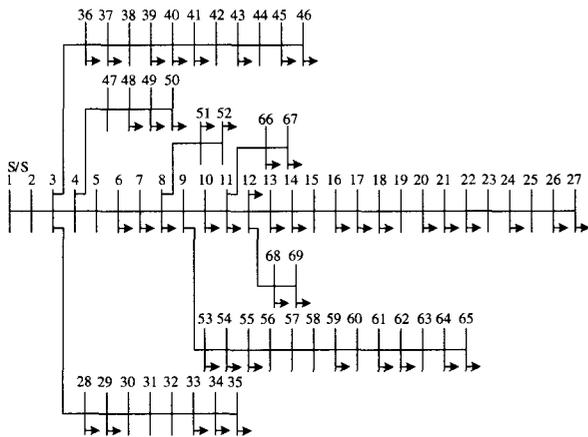


图 2 69 节点配电网测试系统接线图

Fig.2 69-bus radial distribution system

为了研究安装 DG 对配电系统的影响, 同时验证改进粒子群算法的有效性, 将该法计算结果与文献[18]中提出的黄金分割法(Golden Section Search algorithm)和网格搜索法(grid search algorithm)的计算结果进行比较, 见表 1。

表 1 69 节点配电网测试系统计算结果对比

Tab.1 Comparison of the results of different approaches for 69-bus distribution test system

方法	DG最佳接入位置	DG最优有功容量/kW	DG未接入时有功网损/kW	DG接入后有功网损/kW
黄金分割法	Bus 61	1 872.7	225.000 0	83.220 0
网格搜索法	Bus 61	1 863.0	225.000 0	83.220 0
改进粒子群算法	Bus 61	1 872.4	224.931 7	83.200 9

从表 1 可以看出, 改进粒子群算法的各项计算结果与黄金分割法、网格搜索法是基本一致的, 说明了该算法用于配电网 DG 规划的可行性和有效性。合理地 DG 进行选址和定容, 不但能够有效

降低配电网有功网损, 而且可以提高系统电压水平。DG 未接入时, 系统的节点电压最小值为 0.909 2 p.u., 出现在 65 节点上。DG 接入后, 系统的节点电压最小值为 0.968 3 p.u., 出现在 27 节点上。图 3 给出 PSO 与 MPSO 在优化过程中的收敛情况。可见, MPSO 能够更快地收敛到最优解, 具有很高的优化效率。

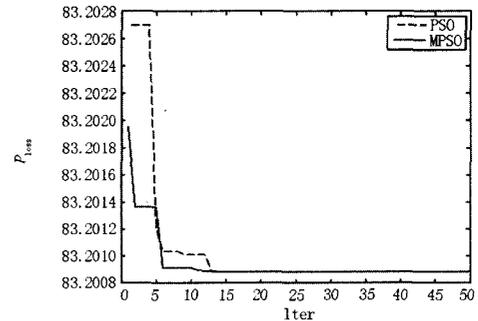


图 3 69 节点配电网测试系统 PSO 及 MPSO 优化的收敛特性图

Fig.3 Comparison of convergency between MPSO and PSO for 69-bus distribution test system

33 节点系统接线图如图 4 所示, 该系统负荷总的有功功率和无功功率分别为 3 715 kW 和 2 300 kvar。改进粒子群优化算法的参数设置: 粒子数目 $m=50$, 权重因子 $c_1=c_2=2$, 惯性系数 $\omega_{max}=0.9$, $\omega_{min}=0.4$, 最大迭代次数为 100。经过潮流计算, DG 未接入时, 系统的节点电压最小值为 0.916 9 p.u., 出现在 18 节点上, 系统的有功网损为 201.719 1 kW。13 节点和 30 节点为 DG 最佳接入位置, DG 的最优有功容量分别为 846.6 kW 和 1 151.5 kW, 有功网损为 85.979 3 kW。优化后有功网损下降率达 57.38%。DG 接入后, 系统的节点电压最小值为 0.967 6 p.u., 出现在 33 节点上。

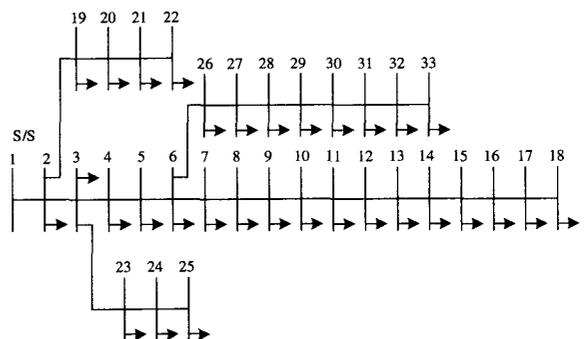


图 4 33 节点配电网测试系统接线图

Fig.4 33-bus radial distribution system

5 结论

改进粒子群优化算法(MPSO) 在寻优过程中既

具有较快的收敛速度, 又避免过早陷入局部最优, 有效地提高了 PSO 算法的计算效率。本文将改进的粒子群优化算法用于配电网的分布式电源规划, 通过分别对 69 节点和 33 节点配电测试系统进行测试, 表明了本文算法用于配电网 DG 的选址和定容是有效可行的。本文只考虑了有功网损最小的分布式电源规划, 而电力市场环境下, 综合考虑 DG 的类型、安装成本、运行维护成本、排污成本、电网购电成本以及有功网损成本等诸多因素的 DG 规划, 有待今后进一步研究。

参考文献

- [1] Thomas A, Göran A, Lennart S. Distributed Generation: a Definition[J]. Electric Power System Research, 2001, 57(3): 195-204.
- [2] 王建, 李兴源, 邱晓燕. 含分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90-97. WANG Jian, LI Xing-yuan, QIU Xiao-yan. Power System Research on Distributed Generation Genetration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 90-97.
- [3] Celli G, Pilo F. Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Network[A]. in: Proceedings of 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Power Industry Computer Applications[C]. Sydney (Australia): 2001.81-86.
- [4] Kim K H, Lee Y J, et al. Dispersed Generator Placement Using Fuzzy-GA in Distribution Systems[A]. in:IEEE PES Summer Meeting[C].2002.1148-1153.
- [5] Gandomkar M, Vakilian M, Ehsan M. Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Network Using Hereford Ranch Algorithm[A]. in: ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems[C]. 2005.916 -918.
- [6] Nara K, Hayashi Y, et al. Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators[A]. in: IEEE PES Winter Meeting[C].Ohio(USA):2001. 918-923.
- [7] Hamid F, Mahmood-Reza H. ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems[A]. in:2007 IEEE Power Tech[C].Lausanne: 2007.555-560.
- [8] AlHajri M F, AlRashidi M R, El-Hawary M E. Hybrid Particle Swarm Optimization Approach for Optimal Distribution Generation Sizing and Allocation in Distribution Systems [A]. in: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. 2007.1290-1293.
- [9] 刘波, 张焰, 杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108. LIU Bo, ZHANG Yan, YANG Na. Improved Particle Swarm Optimization Method and Its Application in the Siting and Sizing of Distributed Generation Planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2) : 103-108.
- [10] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [A]. in: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks[C]. 1995.1942-1948.
- [11] Shi Y, Eberhart R. A Modified Particle Swarm optimizer[A]. in: IEEE World Congress on Computational Intelligence[C].1998.69-73.
- [12] 袁松贵, 吴敏, 彭赋, 等. 改进 PSO 算法用于电力系统无功优化的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(7) : 159-162. YUAN Song-gui, WU Min, PENG Fu, et al. Reactive Power Optimization of Power System Using the Improved Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 159-162.
- [13] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩张规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-43. WANG Cheng-shan, CHEN Kai, XIE Ying-hua, et al. Siting and Sizing of Distributed Generation in Distributing Network Expansion Planning[J].Automation of Electrical Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.
- [14] 张尧, 王琴, 宋文南, 等. 树状网的潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 217-220. ZHANG Yao, WANG Qin, SONG Wen-nan, et al. A Loadflow Algorithm for Radial Distribution Power Networks [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (3): 217-220.
- [15] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 配电潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 26-29. SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. Study on Convergence of Back/Forward Sweep Distribution Power Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 26-29.
- [16] Baran M E, Wu F F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989 4(1): 725-732.
- [17] Baran M E, Wu F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989 4(2): 1401-1407.

- 6-9.
- [6] 堵俊, 邵振国, 郭晓丽. 用小波分析提取电压闪变的幅值调制信号[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 18(3): 34-37.
DU Jun, SHAO Zhen-guo, GUO Xiao-li. Tracking the Envelope of Voltage Flicker Using Wavelet Analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2005, 18(3): 34-37.
- [7] 王志群, 朱守真, 周双喜. Hilbert 变换求取电压闪变有关参数[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 34-38.
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi. Parameter Estimation of Voltage Flicker through Hilbert Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 34-38.
- [8] 赵刚, 施围, 林海雪. 闪变值计算方法的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 15-18.
ZHAO Gang, SHI Wei, LIN Hai-xue. A Study on Calculation of Short Term Flicker Severity[J]. Power System Technology, 2001, 25 (11): 15-18.
- [9] Zhang D, Xu W, Nassif A. Flicker Source Identification by Interharmonic Power Direction[A].in: IEEE 18th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. 2005: 2031-2034
- [10] XU Wil-sun, LIU Xian, LIU Yi-lu, An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination[J]. IEEE Trans on Power Deliver, 2003, 18(1).
- [11] 赵勇, 沈红, 李建华, 等. 谐波源的识别及其与非谐波源的分离方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 84-87.
ZHAO Yong, SHEN Hong, LI Jian-hua, et al. Approach of Identification and Separation of Harmonics Sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 84-87.
- [12] Nassif A B, Nino E E, Xu W. A V-I Slope-Based Method for Flicker Source Detection[A].in: Power Symposium Proceedings of the 37th Annual American[C]. 2005.
- [13] Axelberg P G V. Measurement Methods for Calculation of the Direction to a Flicker Source, Thesis[D]. Goteborg (Sweden): Chalmers University of Technology, 2003.
- [14] Axelberg P G V, Bollen M H J. An Algorithm for Determining the Direction to a Ficker Source[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 755-760.
- [15] Axelberg P G V, Bollen M H J, Gu Irene Yu-Hua. Trace of Flicker Sources by Using the Quantity of Flicker Power[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(1): 465-471.
- [16] 邵振国, 朱少林, 张榕林. 闪变污染性负荷的阻抗分析法[A]. 第三届电能质量(国际)研讨会[C]. 三亚: 2006.
SHAO Zhen-guo, ZHU Shao-lin, ZHANG Rong-lin. Operating Analysis of Flicker-type Contaminating Load[A]. in: The 3rd ICPQ[C]. Sanya: 2006.
- [17] 孙树勤. 电压波动与闪变[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
SUN Shu-qin. Voltage Fluctuation and Flicker[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

收稿日期: 2008-08-29; 修回日期: 2008-09-11

作者简介:

邵振国(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电能质量及电力系统稳定与控制方面的研究与教学工作; E-mail: shao.zg@fzu.edu.cn

吴丹岳(1964-) 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能质量技术监督、研究工作。

(上接第 20 页 continued from page 20)

- [18] Gözel T, Eminoglu U, Hocaoglu M H. A Tool for Voltage Stability and Optimization (VS&OP) in Radial Distribution Systems Using Matlab Graphical User Interface (GUI) [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008,(16): 505-518.

收稿日期: 2008-09-02; 修回日期: 2008-10-24

作者简介:

汪兴旺(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与计算; E-mail: sinowon@163.com

邱晓燕(1964-), 女, 博士, 教授, 主要从事电力系统稳定性分析与控制方面的研究。