

基于粒子群优化搜索的二级电压控制分区

王春燕, 王倩倩, 马成飞, 赵彩虹

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 电力系统的电压控制分区是一个非线性的大规模组合优化问题, 使用常规方法难以得到理想的结果. 现根据电压幅值对无功功率的灵敏度定义了电力系统各节点间的电气距离, 在此基础上建立了电压分区的组合优化模型, 将粒子群优化搜索方法用于已有的电压分区的优化模型. 最后在 IEEE 39 节点测试系统上对该方法进行了验证, 结果表明该方法有效、可行.

[关键词] 二级电压控制, 分区控制, 电气距离, 粒子群优化算法

[中图分类号] TM 73 TP301 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010)02-0001-05

Searching for Secondary Voltage Control Area Based on Particle Swarm Optimization

Wang Chunyan, Wang Qianqian, Ma Chengfei, Zhao Caihong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract The partitioning of electric power system for voltage control is a non-linear large-scale combinatorial optimization problem. Conventional methods are not normally appropriate for such a problem. Based on the sensitivity of voltage to reactive power injection, this paper first defines the electrical distance between the two nodes in power system, and then based on this idea a novel optimization model for partitioning of power system for voltage control is established, and search for particle swarm optimization methods have been used to optimize the partition of the voltage model. Finally the feasibility and efficiency of the proposed method are verified on the IEEE 39-bus system.

Key words secondary voltage control, partitioning control, electrical distance, particle swarm optimization algorithm

由于电力系统无功的本地特性, 无功控制设备分布于整个网络中, 对于大系统的电压控制和无功优化可采用先分区再优化的策略. 最简单、直观的电力网络分区可以根据地域或电网所属的电力公司来划分, 但这样的分区没有考虑系统的电气特性, 显然过于粗糙, 不适于系统分析和运行控制. 研究人员提出了各种各样的电网分区方法, 例如, 文献 [1] 根据其定义的“电气距离”, 使用信息论理论对系统进行电压控制分区; 文献 [2] 使用 α 嵌套分解法对电压控制分区. 从数学优化的角度看, 电力网络分区是一个 NP—hard 的组合优化问题. 一些适合求解此类问题的现代启发式方法被用于电力网络的分区, 例如模拟退火法 SA (Simulated Annealing Algorithm)^[3]、Tabu 搜索法 TS (Tabu Searching)^[4] 遗传算法 GA (Genetic Algorithm)^[5] 等常用来解决此类问题. 本文从电压控制的角度, 根据文献 [6] 提出的一种电网分区的优化模型, 将粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 搜索用于二级电压控制分区, 并在 IEEE 39 节点测试系统中对所提出的方法进行了测试.

1 电压控制分区模型

组合优化是通过数学方法寻找离散事件的优先编排、分组、次序或筛选等. 电压控制分区是要把电网中的节点进行分组, 以使某个优化目标达到最优, 这正是一个典型的组合最优化问题. 求解此类问题的关键是建立一个恰当的优化模型. 对系统电压分区应满足以下 4 点要求^[7]:

- (1) 保证区域内强耦合, 区域间弱耦合, 尽可能减少相邻子区域间的二级电压控制的相互影响.

收稿日期: 2009-02-24

通讯联系人: 赵彩虹, 教授, 研究方向: 电力系统电压无功优化等. E-mail: zch@mail.njnu.net

- (2) 整个系统电压控制区的数目不宜过多, 否则会影响系统整体的运行效率.
- (3) 每个电压控制区的大小适中, 过大不宜控制, 过小则无实际意义且会影响系统整体性能.
- (4) 每个电压控制区都应包含发电机节点和负荷节点, 并尽可能保证区域内的无功功率平衡, 且留有一定的无功裕量.

1.1 电气距离

1.1.1 电气距离和子区域直径

电气距离的定义很多^[8], 本文采用文献[9]中的定义, 定义节点 i 与 j 的电气距离为:

$$D_{ij} = D_{ji} = -\lg(\alpha_{ij} \cdot \alpha_{ji}),$$

(1)

式中, α_{ij} 为系统受到扰动后节点 i 与节点 j 的电压变化量之比, 即:

$$\Delta V_i = \alpha_{ij} \cdot \Delta V_j,$$

(2)

$$\alpha_{ij} = \frac{\partial V_i / \partial Q_j}{\partial V_j / \partial Q_i},$$

(3)

其中, V_i 、 V_j 、 ΔV_i 、 ΔV_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值和幅值变化量; Q_i 与 Q_j 分别为节点 i 与节点 j 的无功功率; $\partial V_i / \partial Q_i$ 和 $\partial V_j / \partial Q_j$ 可由潮流计算的修正方程得到, 牛顿法潮流计算的功率修正方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix},$$

(4)

式中, ΔP 和 ΔQ 分别为节点注入有功功率和无功功率的变化量; $\Delta \theta$ 和 ΔV 分别为节点电压相角和幅值的变化量; $J_{P\theta}$ 、 J_{PV} 、 $J_{Q\theta}$ 、 J_{QV} 为雅克比矩阵的子块. 忽略有功功率和相角对无功功率的影响可得到:

$$\Delta V = [J_{QV}]^{-1} \cdot \Delta Q,$$

(5)

得到 $[J_{QV}]^{-1}$ 后便可由式 (1)、(2) 计算出电网各节点间电气距离矩阵 D . 已知各节点间电气距离后, 定义各分区的直径 d 为区域内电气距离最大两点间的电气距离.

1.1.2 分区模型

对平衡各分区的规模、加强分区内部的联系和减少区域间耦合程度的期望可体现为: 平衡各区域的节点数, 减小各区域直径和区域间的割集支路数. 目标函数可表示为^[6]:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^Z [n_i^2(x) + \lambda d_i(x)] + b^2(x),$$

(6)

式中, x 为分区方案; Z 为分区数; b 为割集支路数; λ 为加权系数; n_i 、 d_i 分别为区域 i 的节点数和区域直径.

约束条件包括:

$$g_i^{\min} \leq g_i(x) \leq g_i^{\max},$$

(7)

$$c_i^{\min} \leq c_i(x) \leq c_i^{\max},$$

(8)

$$t_i^{\min} \leq t_i(x) \leq t_i^{\max},$$

(9)

$$s_i^{\min} \leq s_i(x) \leq s_i^{\max},$$

(10)

$$h(x) = 0$$

(11)

式中, g_i 、 c_i 、 t_i 分别为区域 i 内发电机(调相机)、无功补偿设备(包括电容和电抗)和变压器的数目; $s_i = g_i(x) + c_i(x) + t_i(x)$ 为区域 i 内无功控制设备(包括发电机、调相机、补偿电容和变压器)的总数; g_i^{\max} 、 g_i^{\min} 分别为 g_i 的上下限值, 其余类同; h 为两节点属于不同分区变压器数目. 约束后目标函数即电压分区的优化模型可表示为:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^Z [n_i^2(x) + \lambda d_i(x) + \beta_1 p_{gi} + \beta_2 p_{ci} + \beta_3 p_{ti} + \beta_4 p_{si} + \beta_5 h^2(x)] + b^2(x),$$

(12)

式中, $\beta_1 \sim \beta_5$ 是式中约束条件的罚函数; p_{gi} 、 p_{ci} 、 p_{ti} 和 p_{si} 分别为区域 i 内的发电机数、补偿电容器、调压变压器数和无功设备总数越限时的惩罚值. 其计算公式为:

$$p_{\varphi i} = \begin{cases} \varphi_i - \varphi_i^{\max}, & \varphi_i > \varphi_i^{\max} \\ \varphi_i^{\min} - \varphi_i, & \varphi_i < \varphi_i^{\min} \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

(13)

式中, φ 表示 g 、 c 、 t 或 s

对于约束条件, 可采用当不满足约束条件即越限时使目标函数等于一个很大的值 H 的方法. 例如, 考虑一约束条件为每个区内的无功电源数不小于 3 在优化计算过程中, 一旦发现分区方案中有一个区内的无功电源数小于 3 则令目标函数值等于一个很大的值, 优化计算则会将此目标函数不理想的方案忽略. 式 (12) 所示的优化模型可适用于遗传算法、Tabu 搜索等方法、粒子群优化算法等. 分区数量 Z 的选择显然对优化结果有很大的影响. 注意到式 (12) 所示的模型中并未要求 x 的元素必须取遍从 1 到 Z 间的所有值, 也就是说, 优化结果可能是有的区为空, 在这种情况下, 最优的分区数量比初始的分区数 Z 小, 这等同于分区数量也作为一个被优化的变量参与优化计算, 但这需要取较大的初始分区数. 在后面的实例计算中将对分区数的选择做进一步讨论.

2 基于粒子群优化的电压控制分区

粒子群优化搜索是近年来受到普遍关注的一种高效的优化方法. 对大规模非线性整数规划问题, 虽然从数学上尚无法证明其能保证求得最优解, 但大量的研究结果已证明了它确能相当有效地求得最优解或次优解. 而且在解的优劣程度相当的条件下, 粒子群优化搜索的速度一般快于遗传算法和模拟退火算法. 在很多领域包括电力系统分析中, 粒子群优化搜索已得到了成功应用.

2.1 粒子群优化算法原理

粒子群优化算法 (PSO) 是由 James Kennedy 博士和 R. C. Eberhart 博士于 1995 年提出^[10-11]. 该算法源于对鸟群、鱼群觅食行为的模拟. 在 PSO 中, 首先初始化一群随机粒子, 然后通过迭代寻找最优解. 在每一次迭代中, 粒子通过跟踪两个极值来更新自己的速度和位置. 第一个极值是粒子本身所找到的最优解, 这个解叫做个体极值 (p_{best}); 另一个极值是整个种群目前找到的最优解, 这个极值是全局极值 (g_{best}). PSO 算法简单易实现, 不需要调整很多参数. 粒子依据下式更新速度和位置:

$$v_{id}^{k+1} = w \times v_{id}^k + c_1 \times \text{rand}() \times (P_{id} - x_{id}^k) + c_2 \times \text{rand}() \times (P_{gl} - x_{id}^k), \quad (14)$$

其中, v_{id}^k 表示第 k 次迭代运算的第 i 个粒子在第 d 维 $\text{rand}()$ 上的速度; w 为惯性权重; c_1 , c_2 为学习因子, 是调节 P_{id} (即 p_{best}) 和 P_{gl} (即 g_{best}) 相对重要性的参数, 在本文中取 $\omega = 0.7298$, $c_1 = c_2 = 1.49681$, $\text{rand}()$ 为 $(0, 1)$ 区间内的随机数. 粒子移动的下一位置 (q_{id}^{k+1} 为第 i 个粒子位置的第 d 维):

$$q_{id}^{k+1} = q_{id}^k + v_{id}^{k+1}. \quad (15)$$

在全部粒子进行速度和位置更新后, 根据每个粒子的适应度大小更新局部最优解和全局最优解, 然后进行下一次迭代. 每一维粒子的速度被限制在一个最大速度 V_{max} 的范围内, 设置较大的可以保证粒子种群的全局搜索能力, V_{max} 太大将会飞离最好解, 太小则粒子种群局部搜索能力弱.

2.2 电压控制分区的步骤

粒子群优化搜索从初始解开始. 初始解可以通过随机方法产生或由已有的启发式方法产生. 通过“迭代”在对全部的粒子进行速度和位置的更新后, 根据每个粒子的适应度大小更新局部最优解和全局最优解, 然后进行下一次迭代. 用粒子群优化搜索求解最优电压控制分区的步骤为:

1) 初始化所有粒子: 设粒子种群规模为 N , 在允许的范围内随机设置粒子的初始位置和速度, 将 x 的所有元素置 1 作为 x 的初始值 x_{init} . 令当前解 $x_{current} = x_{init}$. 置最优解 $p_{best} = x_{init}$, $g_{best} = x_{init}$. 计算目标函数 $f(x_{init})$.

2) 迭代: 求出每个粒子的适应值即目标函数值, 并与 p_{best} 和 g_{best} 比较, 如果优于原有的 p_{best} 和 g_{best} 则用该适应值替代. 然后, 根据公式 (14)、(15) 调整粒子的位置和速度.

3) 检查各变量是否溢出各自的取值范围. 如果高于其上限值, 或低于其下限值, 则用相应的边界值替代.

4) 根据终止条件判定是否终止迭代. 如果达到最大迭代次数或达到要求的最优解条件, 则终止迭代; 否则返回 b 继续迭代.

用粒子群优化搜索求解最优电压控制分区的算法流程见图 1

3 算例

为了验证本文所提出的将粒子群优化搜索方法用于二级电压控制分区的有效性, 采用 MATLAB 7.0

编制了相应的程序,对 IEEE39 节点系统的分区进行了仿真,仿真结果表明,将 IEEE39 节点系统分为 6 个区域是一个合理的划分.图 1 所示为分区数为 6 的 IEEE39 节点的测试系统,从分区的结果来看,每个分区所包含的节点附近没有将不相连的节点划分在一个区域内的情况,进一步说明分区结果的合理性.

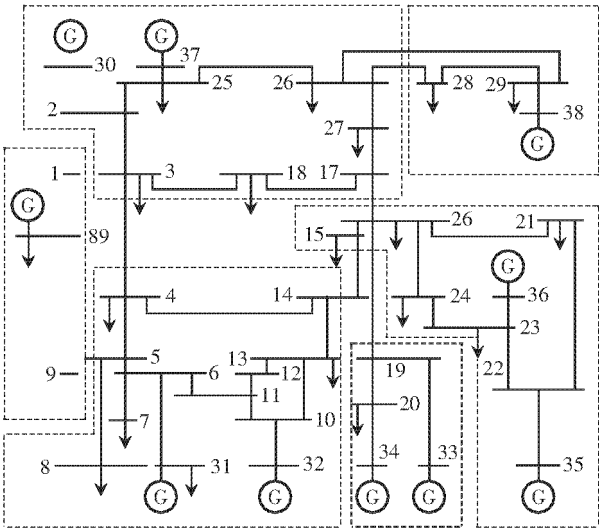


图 1 分区数为 6 的 IEEE39 节点的测试系统
Fig.1 IEEE 39-bus test system with 6 partitions

分区数取较大值,可以使分区数作为优化参数参与优化,但较大的分区数使搜索空间扩大了,这将减慢收敛速度和影响搜索找到全局最优解,所以初始分区数应根据经验取一个合适的值.本例中分区数目取 6 分区结果见表 1 和图 2 但这个最优的分区数仅仅是数学意义上的最优,在对实际系统分区时,用上述算法所得的分区可能需要调整,例如 4 区节点数较多,区域间的节点分配过于不均匀,这可通过将 4 区单独再分成较小的区来解决.

表 1 分区数为 6 的分区结果	
Table 1 Partition result when the partition number is 6	
子区域	节点号
1	1 9
2	2 3 17, 18 25 26, 27
3	15 16 21 23, 24
4	4 5 6 7, 8, 10 11, 12, 13, 14
5	19 20
6	28 29

在系统的分区数目给定的情况下,可直接用给定的分区数进行搜索,文献 [12]用其所提出的基于无功源控制空间聚类分析法对同一系统做了 6 个区的分区,其结果与本文的 6 个区的分区结果大致相同.从而从另一个侧面证明了本文的分区方法是有效的.需要指出的是,由于本文的分区方法基于第 1 节中所定义的电气距离和电压分区的优化模型,而该电气距离和电压分区的优化模型都与运行工况相关,因此分区可能会随运行工况的改变而有所变动.

4 结论

无功电压控制通常是区域性的控制,因而电压控制的分区是一个非常有实际意义的问题,好的分区可以充分发挥无功电源的控制作用,降低成本,提高经济效益.传统无功电压分区中存在电气距离不足之处,考虑到多个节点之间的相互影响的作用,本文提出了一种基于粒子群优化搜索的新的电压控制分区方法,保证了不同分区间节点的弱耦合性和同一分区内节点的强耦合性,从而为系统无功的控制和补偿提供了较好的参考依据.分区分 3 步进行: ① 给出了电气距离的定义以及电压分区的优化模型; ② 使用粒子群优化搜索求解式 (10) 所示的优化问题; ③ 根据实际需要,对分区结果做适当调整.通过 IEEE 39 节点算例分析表明,本文提出的分区方法是有效、可行的.

[参考文献] (References)

- [1] Lagonotte P, Sabonnadiere J C, Leost J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in france[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486
- [2] 范磊, 陈珩. 二次电压控制研究(一)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11): 18-21.
Fan Lei Chen Heng Study of secondary voltage control part one[J]. Automation of Electric Power System, 2000, 24(11): 18-21. (in Chinese)
- [3] Irving M R, Sterling M J H. Optimal network tearing using simulated annealing[J]. EE Proc-C, 1990, 137(1): 69-72
- [4] 刘大鹏, 唐国庆, 陈衍. 基于 Tabu 搜索的电压控制分区[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 18-22
Liu Dapeng, Tang Guoqing, Chen Heng Tabu search based network partitioning for voltage control[J]. Automation of Electric Power System, 2002, 26(6): 8-22 (in Chinese)
- [5] Zambroni de Souza A C, Quintana V H. New technique of network partitioning for voltage collapse margin calculations[J]. EE Proc-C, 1994, 141(6): 630-636
- [6] 胡泽春, 王锡凡, 王秀丽, 等. 用于无功优化控制分区的两层搜索方法[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 37-41.
Hu Zechun, Wang Xifan, Wang Xiuli et al Two-layered network partitioning approach for optimal reactive power dispatching [J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 37-41. (in Chinese)
- [7] 王颖. 基于模糊聚类的二级电压控制分区[D]. 长沙: 湖南大学电气与信息工程学院, 2008 19-24
Wang Ying A fuzzy clustering based method for secondary voltage control partitioning[D]. Changsha School of Electric and Information Engineering Hunan University, 2008 19-24 (in Chinese)
- [8] 王耀瑜, 张伯明, 孙宏斌, 等. 一种基于专家知识的电力系统电压/无功分级分布式优化控制分区方法[J]. 中国电机工程学报, 1998 18(3): 221-224
Wang Yaoyu, Zhang Boming, Sun Hongbing et al An expert knowledge based subarea division method for hierarchical and distributed electric power system voltage/VAR optimization and control[J]. Proceedings of the CSEE, 1998 18(3): 221-224 (in Chinese)
- [9] Lagonotte P, Sabonnadiere J C, Leost J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in france[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486
- [10] Kennedy J Eberhart R. Particle swarm optimization[C] //Proc of IEEE International Conference on Neural Networks(ICNN). Perth IEEE, 1995. 1942-1948
- [11] Eberhart R, Kennedy J A new optimizer using particle swarm theory[C] //Proc 6th Int Symposium on Micro Machine and Human Science Nagoya IEEE Service Center, 1995. 39-43
- [12] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40
Guo Qinglai, Sun Hongbing, Zhang Boming et al Power network partitioning based on clustering analysis in mvar control space [J]. Automation of Electric Power System, 2005, 29(10): 36-40 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]