

基于禁忌搜索算法的变电站电压无功优化控制

任晓莉^{1,2}, 程红丽¹, 刘健¹

(1. 西安科技大学银河信息与自动化技术研究所, 陕西 西安 710054;

2. 宝鸡文理学院计算机科学系, 陕西 宝鸡 721007)

摘要: 为了实现变电站电压无功综合控制, 根据有功功率和无功功率的负荷预测曲线, 以降损收益最大为适配值函数, 以电压约束、电气极限约束和控制约束为约束条件, 建议了一种改进的禁忌搜索算法。引入最低收益阈值来限制调节次数的增加, 在此基础上建议了一种确定最佳调整次数的方法。还建议了一种有约束线性最小二乘算法, 基于变电站内的量测数据以及变压器的参数来估计系统母线电压和系统阻抗参数。算例结果表明建议的方法是可行的, 并且具有可以有效地减少调节次数的特点。

关键词: 电压无功优化; 无功补偿; 电压调节; 最小二乘法; 禁忌搜索

Voltage and reactive power control based on tabu search algorithm for substations

REN Xiao-li^{1,2}, CHENG Hong-li¹, LIU Jian¹

(1. Institute of Information and Automation Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Department of Computer and Science, Baoji University of Arts and Science, Baoji 721007, China)

Abstract: In order to reach the voltage and reactive power control for substations, based on the forecasted load profile, maximizing the reduced loss energy is used as the index, an improved tabu search approach is proposed. The constraints consist of voltage requirements, electrical limitations of apparatus and control restrictions. The least benefit threshold is introduced to limit the raising of the number of times of regulation, which is increased once there is at least one period with voltage requirement not met. An iteration method to determine the best regulation times and the optimal voltage and reactive power control scheme is suggested. A constrained linear least square algorithm is also discussed to estimate the system bus voltage and system impedance parameter. An example is given to show the feasibility of the proposed approach, with which the number of times of regulation can be effectively reduced.

Key words: voltage and reactive power control; reactive power compensation; voltage adjustment; least square method; tabu search algorithm

中图分类号: TM76; TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)08-0031-04

0 引言

变电站动态无功优化是一个非常复杂的非线性时空强耦合的优化问题, 一方面, 某一时刻的静态无功优化是一个复杂的非线性混合整数优化, 具有空间复杂性; 另一方面, 一段时间如(1天)内的无功优化又必须考虑负荷的动态变化, 具有时间复杂性^[1]。因此动态无功优化需要充分考虑变电站参数及未来一天负荷曲线的有功和无功变化情况, 通过自动调节有载变压器的分接头和并联补偿电容器的组数, 在满足各种物理和运行约束条件下提高电压质量和保持无功平衡。在电力系统无功优化中,

为了跟踪在线负荷的改变, 保持系统始终处于最优状态, 理论上需要不断地进行无功优化; 然而, 控制设备一天内不能频繁动作并且动作是不连续的, 因此在系统实际运行过程中并不能经常进行无功优化。因此电力系统动态无功优化问题的研究很有实际意义。

电压无功综合控制的典型方法包括有: 传统九区图法^[2]及改进的九区图法(十三区图法^[3], 十七区域图法^[4], 五区图法^[5], 双九区图^[6])。但九区图法在实际运行中, 存在着频繁调节变压器分接头和电容器的缺陷, 甚至可能会出现震荡现象, 而且操作较复杂。电力系统电压无功优化常用的现代启发

式优化算法有遗传算法(GA)^[7,8]、模拟退火(SA)算法^[9]、粒子群算法^[10]和禁忌搜索(TS)^[11]算法等。遗传算法(GA)和模拟退火算法收敛速度慢,且优化参数的设置受主观因素影响较大。粒子群算法和禁忌搜索(TS)算法效率较高,利用这两种方法进行电压无功优化策略搜索已经取得了很好的研究成果。已有工作都是对变压器分接头以及电容器组在一段时间内的最大动作次数进行限制以避免调节过于频繁的,但是如果最大动作次数限制值的设置偏小,则在负荷波动较大的情况下,有可能会得不到最优效果;如果最大动作次数限制值的设置偏大,则在负荷波动较小的情况下,有可能会造成频繁调节。因此最大动作次数限制值的选择十分重要,但是已有文献均未讨论该问题。

本文提出一种限制调节次数(而不限制调节元件的最大动作次数)的禁忌搜索法,并且建议一种最小二乘系统参数状态估计方法来估计候选电压无功控制策略的效果。

1 基本原理

本节不再赘述禁忌搜索算法的基本原理,主要论述采用禁忌搜索算法实现变电站电压无功优化控制中需要解决的关键技术问题。

1.1 数学模型

对于无T接分支的线路,系统和受端变电站的

第1段 起始时刻	第1段 主变档位	第1段 电容容量	第2段 起始时刻	第2段 主变档位	第2段 电容容量	第N段 起始时刻	第N段 主变档位	第N段 电容容量
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------	-------------	-------------	-------------

图2 解的构成

Fig.2 Constitution of the solution

1.3 邻域搜索

在禁忌搜索迭代过程中,将当前解中某个元素的取值分别增加一个单位或减少一个单位,而保持其他元素不变,就得到了两个候选解,将调整元素轮换一遍,就得到了候选解集合,这个过程就是邻域搜索。

对于方式调整的起始时间元素,其调整间隔可以是15分钟、30分钟或1小时(分别对应96点、48点和24点负荷曲线)。

对于变压器档位元素和电容器容量元素,其调整间隔分别取决于变压器的档位间隔和电容器组的投放容量间隔。

1.4 适配值函数

以考察时间单元内降损收益最大为适配值函数,即

等值电路分别如图1所示。图中 U_S 为系统电压, R_S 和 X_S 分别为系统等值电阻和等值电抗, R_t 和 X_t 分别为变压器绕组电阻和绕组漏抗, G_t 和 B_t 分别为变压器铁心电导和铁心电纳, U_G 和 U_B 分别为变电站主变压器高压侧和低压侧电压, P_L 和 Q_L 分别为变压器低压侧的有功和无功功率, C 为补偿电容器组投入的容量, K 为变压器变比。

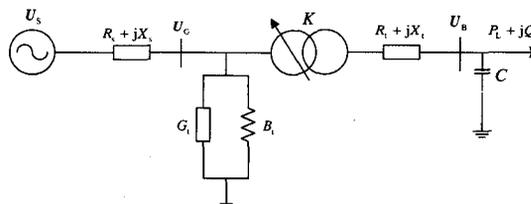


图1 变电站等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of substations

1.2 解的构成

在考察时间单元(典型为1天)内期望进行 N 次调整的前提下,将解分为 N 段,其构成如图2所示。

当然,还可以引入其它因素作为控制变量。

本文用 $S^{(k)} = [S_1^{(k)} \quad S_2^{(k)} \quad \dots \quad S_M^{(k)}]$ 表示解

的第 k 次迭代结果。

$$\text{Max } f = \sum_{i=1}^N (A_{B,i} - A_{O,i}) \quad (1)$$

其中: $A_{B,i}$ 和 $A_{O,i}$ 分别为第 i 时间段内优化前和优化后的损耗电量。

损耗电量由主变压器损耗(包括铁损和铜损)和上游输电线路中的损耗电量构成,可以根据各个负荷的预测曲线及解中描述的调整方式,采用潮流计算方法得出。

1.5 约束条件

典型的约束条件主要包括:

1) 电压约束: $U_{B,\min} \leq U_B \leq U_{B,\max}$, 其中 $U_{B,\min}$ 和 $U_{B,\max}$ 分别为变压器低压侧母线电压的允许下限和上限。母线电压 U_B 也可采用常规潮流计算方法得出。

2) 电气极限约束: $I_T < I_{T,\max}$, 其中 I_T 为流过变

压器的电流, $I_{T_{max}}$ 为流过变压器电流的允许上限。

3) 控制约束: 变压器档位在其可行范围内; 电容器容量在其可行范围内; 相邻两段起始时刻不重叠 (还可设置相邻两段起始时刻的最小间隔)。

1.6 初始解和藐视准则

以考察时间单元内期望的调整次数、当前变压器的实际档位和各台电容器的实际容量为初始解。藐视准则为: 若某个禁忌候选解的适配值优于“best so far”状态, 则解禁此候选解, 令其为当前状态和新的“best so far”状态。

1.7 禁忌长度和终止准则

禁忌长度越长, 禁忌搜索算法的“爬山”能力越强。但是禁忌长度太长, 会影响收敛速度, 并且对于规模较小且网格化程度较弱的配电网, 会造成候选解集过小甚至没有候选解。因此禁忌长度应根据配电网的规模适当选取, 一般可取 3~5。

终止准则可定为: 当达到最大迭代次数或最佳适配值连续若干次保持不变, 则终止禁忌搜索。

1.8 最佳调整次数

考察时间单元 (典型为 1 天) 内期望的调整次数 N 可以根据经验确定。

也可以根据经验确定考察时间单元内期望的调整次数范围: (N_{min}, N_{max}) , 并用 N_1, N_2, \dots, N_k 表示候选的调整次数, 然后采用 1.2~1.7 节论述的禁忌搜索法分别得出各个调整次数取值下的适配值, f_1, f_2, \dots, f_k , 若: $f_{i+1} - f_i < F_{set}$ (其中 F_{set} 为事先设置的最低收益阈值) 且各个时间段内电压都满足约束条件, 则最佳调整次数为 N_i ; 否则最佳调整次数为 N_{max} 。

如果当考察时间单元内期望的调整次数为最大限值 N_{max} 时, 仍不能确保各个时间段内电压都满足约束条件, 则可按下列步骤进行:

1) $N_{max} = N_{max} + 1$ 。

2) 按照调整次数 N_{max} 重新进行搜索。

3) 若优化结果可以确保各个时间段内电压都符合约束条件要求, 则退出, 最佳调整次数为 N_{max} ; 否则返回到 1)。

2 系统参数状态估计

采用禁忌搜索算法进行电压无功综合控制, 需要估计出候选电压无功控制策略的效果, 为此需要事先得到系统母线电压和系统阻抗等参数。这些参数可以根据源端的运行方式人工置入或由调度自动化系统通过远动通道设置, 也可以根据变电站侧采集的数据进行状态估计。

下面探讨基于变电站内能够获得的量测信息, 采用有约束线性最小二乘算法对系统参数进行状态

估计的方法。

假设系统电压和阻抗变化较缓慢, 在上述潮流约束的基础上, 就可以根据变电站中变压器低压侧的电压、低压侧的有功和无功功率的实时量测数据估计出系统电压和阻抗。

U_s 可以表示为:

$$U_s = U_G + (P_G R_s + Q_G X_s) / U_G \quad (2)$$

其中: $U_G = \sqrt{(U_B + \Delta U_t)^2 + (\delta U_t)^2}$, 为变压器高压侧的电压, ΔU_t 、 δU_t 分别为变压器阻抗中电压降落的纵、横分量。 $P_G + jQ_G$ 为变压器高压侧的功率。其中 $P_G = P_L + \Delta P_{zt} + \Delta P_{yt}$, ΔP_{zt} 为变压器绕组电阻损耗的功率, ΔP_{yt} 为变压器励磁支路铁心电导损耗的功率; $Q_G = Q_L + \Delta Q_{zt} + \Delta Q_{yt}$, ΔQ_{zt} 为变压器绕组漏抗损耗的功率, ΔQ_{yt} 为变压器励磁支路铁心电纳损耗的功率。

以变电站的系统电压和阻抗作为状态估计的状态向量, 即

$$x = [U_s, R_s, X_s]^T \quad (3)$$

变压器低压侧电压、低压侧的有功和无功功率的量测矢量 E 为

$$E = [P_{L1}, Q_{L1}, U_{B1}; P_{L2}, Q_{L2}, U_{B2}; \dots; P_{Ln}, Q_{Ln}, U_{Bn}]^T \quad (4)$$

其中: 下标序号代表采样时间序列号。

根据式 (2), 状态向量与量测向量存在线性关系, 即状态估计的量测方程为:

$$Cx = d \quad (5)$$

式(5)中:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{P_{G1}}{U_{G1}} & -\frac{Q_{G1}}{U_{G1}} \\ 1 & -\frac{P_{G2}}{U_{G2}} & -\frac{Q_{G2}}{U_{G2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -\frac{P_{Gn}}{U_{Gn}} & -\frac{Q_{Gn}}{U_{Gn}} \end{bmatrix}$$

$$x = [U_s, R_s, X_s]^T, \quad d = \begin{bmatrix} U_{G1} \\ U_{G2} \\ \vdots \\ U_{Gn} \end{bmatrix}$$

状态估计的目标函数可定义为

$$\min \|C\hat{x} - d\| \quad (6)$$

其中: $\|\cdot\|$ 是欧氏范数, \hat{x} 为状态向量的估计值。

状态估计的约束条件为

$$U_{S,\min} \leq U_S \leq U_{S,\max} \quad (7-a)$$

$$R_{S,\min} \leq R_S \leq R_{S,\max} \quad (7-b)$$

$$X_{S,\min} \leq X_S \leq X_{S,\max} \quad (7-c)$$

其中： $U_{S,\min}$ 、 $U_{S,\max}$ 、 $R_{S,\min}$ 、 $R_{S,\max}$ 和 $X_{S,\min}$ 、 $X_{S,\max}$ 分别为系统电压、系统电阻和系统电抗的上下限值。

在式(5)、(6)和(7)基础上，采用线性最小二乘法就可以得出系统电压和阻抗的最优估计 \hat{U}_S 、 \hat{R}_S 和 \hat{X}_S 。

3 实例

实例参考某 110 kV 变电站，站内的 SZ9 系列 2 绕组变压器可以带负荷调压，容量为 50 MVA，取值范围为 0.9~1.1，共 17 档，每档 1.25%，10 kV 侧安装 6 台容量为 2 Mvar 的补偿电容器，采用典型 48 点日负荷预测曲线如图 3 所示。取一天内期望的调整次数 N_1 、 N_2 和 N_3 分别为 2、3 和 4，然后在满足 1.5 节的约束条件下，假设变压器的当前档位为 9 档，已投入前 2 台电容器，采用禁忌搜索算法分别计算各调整次数取值下的适配值函数 f_1 、 f_2 和 f_3 ，一天的最低收益阈值 F_{set} 设置为 150 kW·h。最大迭代次数为 150，优化的结果如表 1 所示，各时段按优化方案调整后，电压均符合约束条件要求，通过比较各调整次数取值下的适配值，可知调整次数为 3 时，优化效果最好。

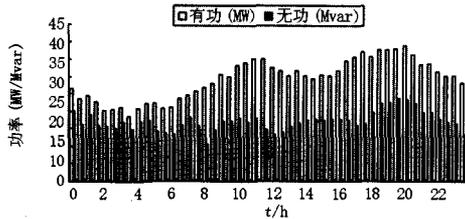


图 3 典型日负荷预测曲线

Fig.3 The typical daily load prediction curves

表 1 优化控制结果

Tab.1 Result of reactive power optimization control

调整次数 (次/天)	控制设备 动作时刻	主变 档位	电容器 投切	一天的降损 收益(MW·h)	降损 率/(%)
2	4:00	10	3 投	1.3852	5.93
	8:00	12	3 切		
3	4:00	10	3 投	1.5474	6.63
	8:00	12	3 切		
	19:30	14	3、4 投		
4	4:00	10	3 投	1.5600	6.68
	8:00	12	3 切		
	19:30	14	3、4 投		
	23:30	12	3、4 切		

注：在初始状态下，系统一天的有功损耗为 23.351 MW·h

实例分析结果表明该方案是可行的，而且能够改善电压质量、降低网络损耗和减少设备动作次数。

4 结论

本文采用禁忌搜索算法实现变电站电压无功优化控制，考虑电容器和有载变压器分接头一天内动作次数和调节量的约束以及母线电压的不等式约束，根据经验确定时间单元（1 天）内期望的调整次数范围，以考察时间单元内的降损收益最大为适配值函数，确定最佳调整次数，优化出每个时段的主变压器档位的调节和电容器组的投切，确定了设备的最少调节次数和最佳动作时间，降低了电能损耗。算例结果表明建议的方法是可行的，并且具有可以有效减少调节次数的特点。

参考文献

- [1] 任晓娟, 邓佑满, 赵长城, 等. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003,23(1): 31-36.
REN Xiao-juan, DENG You-man, ZHAO Chang-cheng, et al. Study on the Algorithm for Dynamic Reactive Power Optimization of Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 31-36.
- [2] 王湘中, 肖阳伟. 变电站电压无功综合控制策略研究与实现[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, 29(3):81-83.
WANG Xiang-zhong, XIAO Yang-wei. Smart Device for Voltage and Reactive Power Control[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2002, 29(3):81-83.
- [3] 全庆胎, 颜钢峰. 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. Voltage and Reactive Power Control Based on Real-time Database[J]. Relay, 2001, 29(10): 22-25.
- [4] 庄侃沁, 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.
- [5] 孙文生, 张明军. 五区图变电站电压无功控制原理研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (12):39-41.
SUN Wen-sheng, ZHANG Ming-jun. Study on Five-Zone Theory of Substation VQC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (12):39-41.
- [6] 阎振坤, 厉吉文, 李晓华. 基于模糊边界和双九区图的变电站电压无功控制策略研究[J]. 继电器, 2005,33(10):36-39.

(下转第 39 页 continued on page 39)

从上面的分析中看出,在多目标 OPF 中,通过控制不同目标函数 ω 来控制系统的安全水平,但在典型的有输电线路功率约束的 OPF 中就不行。因此市场各参与者在获得更大的市场效益的同时,要考虑系统的安全性。

PSAT 工具的这种用图形来表示各变量间的关系非常直观,这只是其中的几个变量间的关系,还可以画出更多的,如 ω 与各支路变量间的关系、 λc 与其它变量间的关系等等,非常方便使用者分析和决策。

4 结论

1) 本文描述了一个结合经济性和系统安全性为目标的 OPF 模型,采用收敛迅速,迭代次数与系统规模关系不大的内点法对其进行求解。在 PSAT 软件中得到了充分的验证。

2) 通过对 IEEE6 节点系统和 Italian 129 节点系统进行多目标 OPF 计算和分析,文中所描述的方法可以通过调整权重系数对不同的目标进行协调,实现最优化。

3) 用 PSAT 进行的多目标 OPF 计算有速度快,载入数据方便,图表分析直观清楚等优越性。此外,PSAT 具有完善的友好的 GUI 界面和 Simulink 仿真库,非常方便用户使用和学习。本文中 PSAT 用的是 V1.3.4 版本,到目前为止,PSAT 已经出了更新的

版本 V2.0.0,增加了更多的功能。本文中所有数据结果都是 PSAT 运行在 Matlab7.0.1 上得出。

参考文献

- [1] 卢险峰. 最优化方法应用基础[M].上海:同济大学出版社,2003.
- [2] 卓峻峰,赵冬梅.基于混沌搜索的多目标模糊优化潮流算法[J].电网技术,2003,27(2):41-44.
ZHUO Jun-feng,ZHAO Dong-mei.A Chaos Optimization Based Algorithm for Multi-objective Fuzzy Optimal Power Flow[J]. Power System Technology, 2003,27(2):41-44.
- [3] Milano F, Cañizares C A, Invernizzi M. Multi-objective Optimization for Pricing System Security in Electricity Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(2): 596-604.
- [4] Milano F. An Open Source Power System Analysis Toolbox[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1199-1206.
- [5] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.

收稿日期:2007-09-10; 修回日期:2007-12-14

作者简介:

彭春华(1973-),男,副教授,博士,主要从事电力市场、热工自动化、电力监控信息系统等方面的研究;

陈佳琰(1982-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: chenjiy1128@163.com

(上接第 34 页 continued from page 34)

YAN Zhen-kun, LI Ji-wen, LI Xiao-hua. Study of Voltage and Reactive Power Integrative Control Strategy Based on Fuzzy Boundary and Double Nine-area Control Method[J]. Relay, 2005,33(10):36-39.

- [7] 苏永春,陈星莺,刘存凯.基于遗传算法的变电站电压无功综合控制[J].继电器,2002,30(10):11-14.

SU Yong-chun, CHEN Xing-ying, LIU Cun-kai. Reactive Power/voltage Control in the Substation Based on GA[J]. Relay, 2002,30(10):11-14.

- [8] 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,2005,33(24):45-48.

GENG Guang-fei, YANG Ren-gang. Research on Reactive Power Optimization Control System in High Voltage Distribution Power Network[J]. Relay, 2005,33(24):45-48.

- [9] 顾丹珍,徐瑞德.一种地区电网多目标无功优化的新方法—改进模拟退火算法[J].电网技术,1998,22(1):71-74.

GU Dan-zhen, XU Rui-de. A New Approach for Multiple Objective Reactive Power Optimization—Improved Simulated Annealing[J]. Power System Technology,1998, 22(1):71-74.

- [10] 张文,刘玉田.自适应粒子群优化算法及其在无功优化中的应用[J].电网技术,2006,30(8):19-24.

ZHANG Wen, LIU Yu-tian. Adaptive Particle Swarm Optimization Method and Its Application in Reactive Power Optimization[J]. Power System Technology, 2006,30(8):19-24.

- [11] 杨银国,张伏生,贺春光,等.基于主动禁忌搜索的配电网无功电压优化控制[J].西安交通大学学报,2005,39(8):895-899.

YANG Yin-guo, ZHANG Fu-sheng, HE Chun-guang, et al. Volt/Var Control in Distribution Systems with Reactive Tabu Search[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(8): 895-899.

收稿日期:2007-09-19; 修回日期:2007-12-11

作者简介:

任晓莉(1978-),女,硕士研究生,研究领域为信息与信号处理;E-mail:seaskyrl@126.com

程红丽(1966-),女,教授,硕士,研究领域为自动化与测控技术;

刘健(1967-),男,教授,博士生导师,博士,研究领域为电力系统及其自动化。