

基于 GATS 的电网无功电压综合控制

周 晖,谈顺涛

(武汉大学电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 简述了无功电压综合控制的必要性及其设计思想和主要功能。根据电力系统实际运行情况及本系统自身特点,就 PV 节点给定电压,适应度函数的构造,交叉率、变异率的取值及禁忌搜索(TS)算法与遗传算法(GA)的结合等主要问题,详细介绍了 GATS 混合优化策略的具体实现形式,以实现逆调压要求,保证电压合格,避免早熟收敛,同时加速搜索进程。在 IEEE118 节点系统的计算中,混合优化算法与简单遗传算法相比,有效降低了计算时间,提高了优化效果,从而证明了 GATS 混合优化策略的实用性。

关键词: 遗传算法; 禁忌搜索; 模糊逻辑; 混合优化策略

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)06-0001-05

0 引言

随着我国电力体制改革的不断深入,对供电质量的要求越来越高,无功电压综合控制作为提高电能质量的一条重要途径正受到越来越多的关注。为保障电网的供电质量和安全经济运行,在地区电网中安装了相当数量的无功补偿装置和不同调压方式的变压器。充分发挥已有无功补偿装置和变压器调压的作用、改进电网调度运行方式,是电力系统运行亟待解决的一个问题。因此实现无功与电压协调控制及无功功率的优化调度,从而改善电网运行条件、减少电网损耗及进一步完善电力系统自动化系统的功能就显得格外重要。

1 无功电压综合控制概述

1.1 无功电压综合控制系统的设计思想

地区电网无功电压综合控制系统的总体思想是:通过 SCADA 系统采集全网各节点的运行电压、无功功率、有功功率等实时数据,在现有 EMS 系统基础上,以电网电能损耗最少和各节点电压总体水平最优为综合控制目标,以各节点电压合格为约束条件,进行综合优化处理后,形成有载调压变压器分接开关调节,AGC 的调节方式和无功补偿设备投切控制的指令,利用调度自动化系统的“四遥”功能,实现地区电网无功电压的优化运行。控制策略采用 GATS 混合优化策略与专家规则相结合。其中,采用 GATS 混合优化策略为主体算法来求解目标优化问题,以专家规则的形式引入运行经验中的有效知识便于取得更符合实际的结果,且减少了计算量。

1.2 无功电压综合控制系统主要功能

- 1) 基本功能:保证各节点电压合格并尽可能趋于目标值,并在此基础上使全网网损最小;
- 2) 设备保护功能:预先计算控制措施的效果,防止无功补偿设备投切振荡;以尽量少的设备动作次数实现基本功能,有效防止主变分接头、电容器的频繁投切;
- 3) 防止电压失稳的功能:将通过选择有效的基于就地信息或区域信息的电压稳定指标,引入无功电压集中优化控制中,以实现电网或重负荷节点的电压稳定性监控。

2 基于 GATS 混合优化策略的优化算法

2.1 无功电压综合控制数学模型

电力系统无功电压综合控制是指在满足系统各种运行约束的条件下,通过优化计算确定发电机的机端电压、有载调压变压器的分接头档位和无功补偿设备投入量等,以达到系统有功网损最小和各节点电压的优化。其数学模型如下:

1) 目标函数:

$$\min F = CP_s + \sum_{i=1}^N (V_i - V_i^{\text{lim}})^2 + {}_2T_i + {}_3T_c \quad (1)$$

式中: P_s 为网损计算值; C 为有功网损电价; $(V_i - V_i^{\text{lim}})^2$ 为各节点电压越限惩罚项,不越界时为 0,越界时为越界量的平方; T_i 、 T_c 分别为所有变压器和电容器动作次数的计数器; ${}_1$ 、 ${}_2$ 、 ${}_3$ 为各惩罚项的系数。

2) 等式约束:即为各节点有功和无功平衡约束。

$$P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} - Q_{Ri} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3)$$

式中: N 为电网节点总数; P_{Gi} , P_{Li} 分别为节点 i 发电机有功出力和有功负荷; Q_{Gi} , Q_{Ci} , Q_{Li} , Q_{Ri} 分别为节点 i 发电机无功出力、容性无功补偿容量、无功负荷和感性无功补偿容量; G_{ij} , B_{ij} , θ_{ij} 分别为电网中节点 i 和 j 之间的电导、电纳和节点电压相角差。

(3) 不等式约束:

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (\text{节点电压约束}) \quad (4)$$

$$Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max} \quad (\text{节点无功约束}) \quad (5)$$

$$T_{i\min} \leq T_i \leq T_{i\max} \quad (\text{变压器变比约束}) \quad (6)$$

2.2 GATS 混合优化策略

上述无功电压综合控制是一个多变量、不连续、多约束的非线性规划问题,线性规划(LP)、非线性规划(NLP)等传统的优化方法存在需要粗颗粒的近似处理、线性化等问题,且易于收敛到局部最优解。近年来,一些基于人工智能的新型高效启发式算法,如人工神经网络、专家系统、BOX算法、模拟退火算法^[1]以及遗传算法^[3,4]等被相继用于电力系统无功优化及相关领域的研究。遗传算法(GA)和禁忌搜索(TS)是近年来逐渐兴起的启发式搜索算法。GA是利用生物界中“优胜劣汰”的思想,通过随机搜索的方式不断地产生新解,淘汰性能差的解,并通过变异的方式逃离局部最优解,以达到全局最优或近似全局最优。它在解决多变量、非线性、不连续、多约束的问题时显示出独特的优势;TS是在邻域搜索的基础上,通过设置禁忌表来避免循环搜索,并利用藐视准则来奖励一些优良状态,藉此实现不同空间区域的搜索。GA算法具有隐含并行性,且能进行全局解空间的搜索,实现简单,但易于陷入早熟收敛;TS算法具有较强的“爬山”能力,且能有效避免重复搜索,速度快,但对初始解比较敏感,且为串行搜索。因此,将这两种算法结合起来构造出的GATS混合优化策略,既具有TS优良的局部搜索能力,又能实现GA的并行搜索方式,是一种有效可行的提高优化性能的方法。

GATS混合优化策略是在进程层次上的组合邻域搜索,其基本思想是:利用经验知识产生初始解群;利用隶属函数解决不确定参数问题,从而构造适应度函数;利用改进遗传算法进行外层循环寻优,确

保对整个解空间的搜索;在遗传操作中嵌套并行的TS操作,充分结合两种搜索策略的优点。

GATS混合优化策略的关键改进介绍如下:

1) 在目标函数中加入对负荷情况的考虑,采用模糊数学的思想,引入隶属函数来调节各PV节点的目标电压值,以实现逆调压方式。对应的惩罚项应为实际电压值与给定电压值之差乘以相应系数,具体表达式为:

$$U = \sum_{i=1}^{N_{pv}} i (V_i - U_{pvi} - \mu(i)) \quad (7)$$

式中: N_{pv} 为PV节点的总数; $U^{i=1}$ 为所有PV节点目标电压实现程度的惩罚项; i 为每个PV节点目标电压实现程度的惩罚项系数; U_{pvi} 为各PV节点的给定电压值; $\mu(i)$ 为每个PV节点负荷轻重程度的隶属函数。

$U_{pvi} + \mu(i)$ 就是考虑了负荷水平后的PV节点目标电压值。由于平衡节点的存在,使得PV节点的实际电压值在无功优化实施前必然等于原始的给定值,即 U_{pvi} , 因此,式(7)最终等效于

$$U = \sum_{i=1}^{N_{pv}} i \mu(i) \quad (8)$$

$\mu(i)$ 是反映负荷水平的PV节点目标电压改变量,是实现逆调压的关键。 $\mu(i)$ 的定义式如下:

$$\mu(i) = (\bar{P} - (\sum_{i=1}^N P_i) / (N - 1)) / \bar{P} + i P_i / T_i \quad (9)$$

式中: N 为节点总数; P_i 为每个节点的有功负荷大小(流入节点时取负,流出时取正); \bar{P} 为根据历史记录得出的全网正常负荷的平均值(对于不同季节可分别计算); \bar{P} 为对应于全网总负荷相对水平的系数; i 为对应于各节点负荷相对水平的系数;此外,若 $U_{pvi} + \mu(i)$ 的值超过节点电压上下限,则将目标电压锁定在边界值上。

通过以上考虑,既计及了全网的负荷总水平,又考虑到不同节点的个体差异和重要程度,因而能实时地跟踪负荷水平,确定适当的PV节点目标电压值。以上各系数在每次迭代中都保持不变,但针对不同时期的网络、负荷状况和具体调度要求,可以随时进行调整。

在考虑了设备动作次数的限制及节点电压越限的惩罚后,目标函数的表达式为:

$$\min F = CP_s + \sum_{i=1}^N (V_i - V_i^{\lim})^2 + \sum_{i=1}^N T_i + \sum_{i=1}^N T_c + \sum_{i=1}^N U \quad (10)$$

式中: λ 为对应 U 的惩罚项的系数,通过对系数的合理选择可以使目标函数值保持为正。

2) 考虑到 GA 容易发生“早熟”收敛的现象,为避免在进化初期,种群中个别适应值较大个体大量繁殖而造成过早收敛,应根据种群状况,在不同的进化阶段采用不同的适应函数表达式。由于所有适应值均为正值,为了减少适应值的差异,当整个种群适应值的样本方差与样本平均值之比超过规定值或者最大适应值与平均值之比过大时,对于每一代种群,可以在原有适应值的基础上,加上整个种群适应值的样本均值,以此作为选择操作中选择概率的基础。而样本方差与样本平均值之比较小或最小适应值与平均值之比过小时,为了加速收敛,可以在原适应值基础上减去最小适应值的一半。适应值表达式如下:

$$f(i) = \begin{cases} 1/ F(i) + \bar{f} & f_{\max}/\bar{f} > Rat_f \\ 1/ F(i) - f_{\max}/2 & f_{\max}/\bar{f} < Rat_f \text{ 且 } f_{\max}/\bar{f} > Rat_f \\ 1/ F(i) & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $f(i)$ 为第 i 个染色体的目标函数值; $\bar{f} = \frac{1}{pop-size} \sum_{k=1}^{pop-size} 1/ F(k)$, 为种群适应度的平均值, $pop-size$ 为种群大小; f_{\max} 为最大适应值; Rat_f 为最大适应值与平均值之比的门限值,可取为 0.4; f_{\max}^2 为每代种群适应值的方差; Rat^2 为适应值方差与平均值之比的门限值,可取为 0.1。

3) 由于 GA 的选择性压力往往较大,因而易陷入局部最优,且很难跳出壁垒;当发生种群最优解连续数代都没有更新,就有可能意味着陷入了局部最优,此时借助于 TS 能接受劣解和避免重复的特点,通过执行禁忌操作,跳出局部最优。显然判断是否陷入局部最优时,最优解保留代数门限值 N_{-local} 应小于搜索终止对应的最大代数 N_{-whole} 。此外,由于 TS 的“爬山”能力强,在种群执行遗传操作的同时,可在每代选出性能最优的若干个解,并行执行 t_1 代禁忌搜索操作作为补充,以期更快地达到最优。在每次循环的最后,再对本代最优解执行 t_2 代 TS 操作,若大于历代最优解则取而代之,否则保持不变。 t_1 、 t_2 的值视 TS 操作的效果可实时改变,但不宜过小,否则无法起到禁忌的作用。各 TS 操作独立进行,且每次循环中,若选出的若干最优解中包含有上次进行过 TS 操作的,则相应的禁忌表依然有效,其它的 TS 表则清空。

TS 方法包括移动、Tabu 表和释放准则 3 个基本要素,下面分别做简单介绍:

移动的设计。TS 方法的搜索过程由“移动”来实现,一次“移动”产生一个试验解。本文中采用多点移动的方式,即每次对多个设备的值进行领域搜索;其选择策略采用最好解优先策略,即将最优移动后的解作为下一次搜索的起点,以提高搜索质量;

Tabu 表。禁忌表是禁忌搜索算法的核心。凡是记录到 Tabu 表中的移动,在当前迭代中禁止实现,以避免搜索陷入死循环。Tabu 表规模 (Tabulist-size) 随着搜索的深入由小到大动态变化,以适应不同搜索阶段的特点,提高解的质量。Tabu 表的更新采用传统的“先进先出”(FIFO)的管理方式;

释放准则。对于 Tabu 表有可能限制某些可以导致更好解的“移动”,所以 TS 方法使用了“释放准则”。被 Tabu 表禁忌的“移动”,如果满足“释放准则”,仍然可以实现。释放准则的设计方法很多,本文采用基于适应值的“释放准则”:如果一个移动作用于当前解后,可达到一个到目前为止最优的适应值,则认为该移动满足了“释放准则”。

另外,为使初始种群中尽可能地包含更多的优良基因,同时又能有效控制运算量,初始种群取为 90,每两次迭代减少 5,直至到 50 为止。此外,由于遥信数据的不完整,可能出现数据缺失或数据错误的情况,因而可能出现病态网络和潮流不收敛的情况,对此情况要能加以闭锁。最后采用最优个体保留最大代数和种群平均适应度与最大适应度之比作为收敛综合判据。在迭代初期,可采用较大的最优个体保留代数以避免发生早熟收敛,而在平均适应度与最大适应度的比值接近 1 时,为了缩短搜索时间可考虑适当减少最优个体保留代数。例如,早期可取为 8,后期取为 5。

3 无功电压综合控制主流程

系统用于闭环运行时的流程如图 1 所示。

首先周期性地从实时数据库中读取数据,并进行潮流计算,当满足优化条件时,执行优化程序。启动条件可包括网损大小,各节点电压水平,负荷变化情况,当有紧急情况时,也允许手动启动优化进程。在输入网络数据及算法参数,并产生初始解群后,执行算法核心部分。当算法收敛后,程序将无功电压控制方案发送给 SCADA 系统,再通过遥信和遥调执行。在开环运行期间,也可以输出多组优化方案,调度人员可根据运行经验和现场情况灵活选择。此外,可通过对迭代终止判据的修改,在优化效率和优化质量间进行权衡。

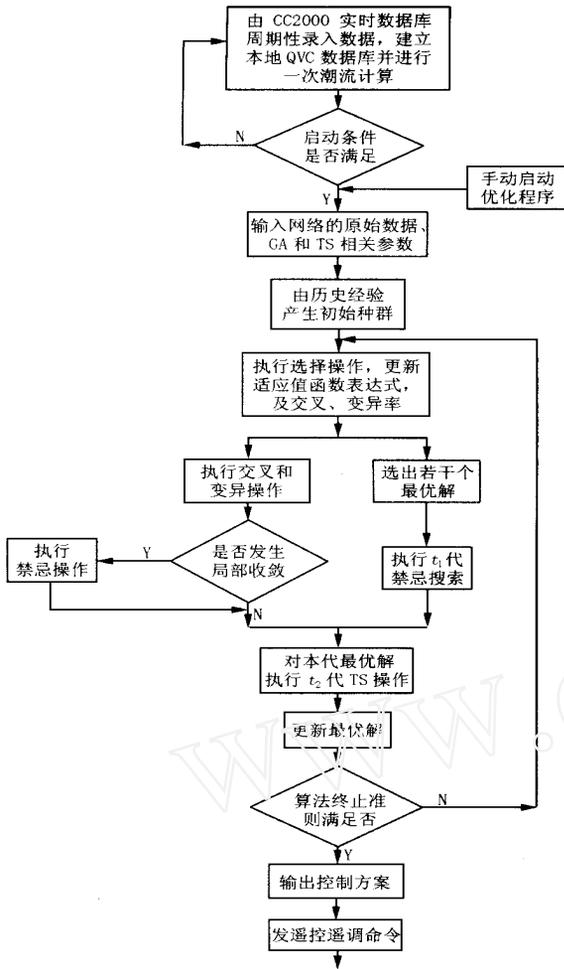


图1 无功电压综合控制主流程

Fig. 1 Main flow chart of integrated control over reactive power and voltage

4 算例及分析

基于以上 GATS 混合优化策略的优化程序,在 IEEE18 节点系统和某地区电网中进行了优化计算,取得了较好的效果。以 IEEE 系统为例,初始种群规模 $N=90$,最大遗传代数 M 为 100,采用可交叉率和变异率,初值分别为 0.9 和 0.1,终值分别近似为 0.7 和 0.3, t_1 、 t_2 分别取为 $3\sqrt{N}/2$ 和 $2\sqrt{N}$, N 为问题的规模。与简单遗传算法相比,在运算速度和优化效果上都有较大的改进。表 1 所示为简单遗传算法和 GATS 混合优化策略进行 20 次优化运算后数据平均值统计。

由表 1 中数据可以看出,混合优化算法的迭代次数明显少于 SGA,适应函数值有了大幅提高,对节点电压的控制上,基本做到了全网电压的合格。由于考虑了动作次数(变压器调节一档或电容器投切

一组视为动作一次)的限制,设备的动作次数也明显下降。

表 1 简单遗传算法与 GATS 混合优化策略性能比较

Tab. 1 Performance comparison between SGA and the hybrid GATS optimization strategy

算法	迭代	最优解	电压越界	设备动	运算时间
	次数	适应值	节点数	作次数	/s
简单遗传算法(SGA)	72.4	107.1	4.8	13.4	177.1
增强型遗传算法(EGA)	33.6	186.3	0.2	8.6	53.9

在实验中,混合优化算法最快只用了 41 s 就得到了全局最优解,其适应值为 193.93。而 SGA 得到的最优解的适应度最大只有 121.52,均为局部最优解。由此可以看出,混合优化算法较之简单遗传算法在运算速度和优化效果等方面都有了很大提高,能够满足电力系统实时应用的要求。

此外通过对 IEEE14 节点和 30 节点系统的试验发现,网络规模越大,改进算法的性能提高越明显。

5 结论

本文简要介绍了电网无功电压综合控制的设计思想和功能,并详细论述了基于电力系统运行实际和本系统运行要求提出的 GATS 混合优化策略。通过 IEEE 系统和实际电网中的运行试验,说明混合优化算法结合了 GA 和 TS 两者的优点,能以大概率收敛到全局最优,且收敛速度快,在优化速度和优化效果上都有了很大改进。此外,可根据电力系统的实际运行要求,灵活地改变无功电压综合控制方式,具有较强的适应性。

参考文献:

- [1] LIU Yurtian, MA Li, ZHANG Jiarrjun. GA/SA/TS Hybrid Algorithms for Reactive Power Optimization[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000: 245-249.
- [2] Hano I, et al. Real Time Control of System Voltage and Reactive Power[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1969, 88(10): 1544-1559.
- [3] Taylor GA, Song YH, Irving MR, et al. A Review of Algorithmic and Heuristic Based Methods for Voltage/VAR Control [A]. 5th International Power Engineering Conference (IPEC2001) [C]. Singapore: 2001. 117-122.
- [4] 文劲宇,江振华,等(WEN Jirru,JIANG Zhenhua, et al). 基于遗传算法的无功优化在鄂州电网中的实现(Genetic Algorithm Based Reactive Power Optimization and Its Appli-

cation in Ezhou City Power System) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24 (2): 45-47.

- [5] 王凌 (WANG Ling). 智能优化算法及其应用 (Intelligent Optimization Algorithms with Applications) [M]. 北京:清华大学出版社,施普林格出版社 (Beijing:Tsinghua University and Springer Press), 2001.

收稿日期: 2003-06-30; 修回日期: 2003-09-10

作者简介:

周晖 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用;

谈顺涛 (1947 -), 男, 教授, 副院长, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究教学工作。

GATS-based reactive power and voltage integrated control

ZHOU Hui, TAN Shurtao

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this paper, the necessity of reactive power and voltage integrated control is briefly formulated, and its design principles as well as the main functions are presented. Based on operational practice in power network and the characteristic of this system, the particular realization method of a hybrid GATS optimization strategy is proposed in the selection of PV node voltage, the construction of fitness function, the confirmation of crossover rate and mutation rate, the combination of TS and GA algorithm, etc so as to implement the counterregulation of voltage, optimize the node voltage profile, avoid premature convergence and shorten the search time. Compared with simple genetic algorithm (SGA), the improved algorithm achieved satisfactory result in IEEE 118 node power system, the search time is shortened and optimization effect is better, which indicates the practicability of the hybrid GATS optimization strategy.

Key words: genetic algorithm (GA); tabu search (TS); fuzzy logic; hybrid optimization strategy

2003 年国家电网公司系统安全生产情况基本稳定

在全国电力安全生产工作会议上,国家电网公司副总经理陆启洲说:2003 年国家电网公司系统安全生产情况基本稳定。

2003 年以来,除代管的西藏拉萨电网发生一起全网停电事故,国家电网公司认定为重大电网事故外,公司系统直属电网未发生重大及以上的电网、设备事故;未发生对社会造成严重影响的停电事故;未发生重大及以上的人身事故;未发生重大设备损坏事故。公司系统电力生产、基本建设共发生人身死亡事故 14 起,死亡 15 人,万人死亡率由 2002 年的 0.23% 下降为 0.21%,下降两个百分点;发生一般电网事故 127 起,同比下降 7.3%;发生一般设备事故 342 起,同比下降 10%。

但是目前电网安全生产仍存在许多问题和困难,应引起足够的重视:

一是适应电力体制改革形势的安全生产法规亟待建立和完善。电网、电厂、用户安全管理界面和责任在法律上还不够明确,电力系统的统一调度、协调和安全管理关系需要通过法规制度进一步明确。

二是电网网架薄弱,安全稳定问题突出。随着互联电网规模的迅速扩大,电网特性发生了很大变化,网间之间、网厂之间相互影响、相互作用增强,影响安全稳定的因素多元化。加之网间联系薄弱,电网动态稳定、电压稳定问题突出。保证电网稳定运行的主要手段依赖系统安全自动装置,电网的安全水平偏低。

三是电力供需形势严峻,进一步增加了电网的稳定运行压力。2003 年夏季,主要跨区、跨省联络线路均在稳定极限运行;发电机组已全部满负荷运行,备用容量严重不足,有的电网甚至出现了零备用,输变电设备重载情况普遍,电网输送容量已达极限,配网重载、满载问题也十分突出。

四是电网运行环境日益恶化,外力破坏十分严重。电力行政执法移交给地方经济综合管理部门,由于地方经济综合管理部门在电力设施保护方面缺少人力、物力和财力,使得电网运行的外部环境比以往任何时候都要差。

五是安全管理的基础仍然薄弱,设备装备水平低,技术改造资金不足。2003 年以来发生的各类事故尽管有客观因素,有外部条件的影响,但人员责任的原因不容忽视。