

基于多线程遗传算法的目标分级地区电网电压无功优化控制

冷永杰¹, 张路寅¹, 赵建峰¹, 李慧聪², 张东院¹, 张庆华¹

(1. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100; 2. 山东电力集团有限公司, 山东 济南 250001)

摘要: 地区电网的无功优化控制要求实时的准确性, 方案的准确性、计算及时性以及控制的快速性必须要满足电网的需求。针对以上要求提出了适合地区电网的多线程遗传算法的目标分级地区电网无功优化控制。采用多线程灵敏度计算、定空间灵敏度选择遗传算法的初始种群, 交叉概率采用模糊自调整, 变异概率采用相似度。分关口多线程的改进遗传算法优化计算, 提高收敛速度, 分级考虑控制目标, 分关口并行遥控, 结合某地区电网实例进行分析表明方法可行, 所提方法满足当前地区电网无功优化控制的实时需求。

关键词: 多线程; 改进遗传算法; 定空间灵敏度; 目标分级; 无功电压优化控制

Target classification reactive power optimal control of regional power grid based on multi-thread genetic algorithm

LENG Yongjie¹, ZHANG Luyin¹, ZHAO Jianfeng¹, LI Huicong², ZHANG Dongyuan¹, ZHANG Qinghua¹

(1. iESLab Co., Ltd., Jinan 250100, China; 2. Shandong Electric Power Group Co., Ltd., Jinan 250001, China)

Abstract: Real-time and accuracy are requested in reactive power optimal control of regional power grid. The accuracy of the solution, timeliness of calculation and rapidity of control must satisfy the demand of power grid. Based on multi-thread genetic algorithm, target classification reactive power optimal control of regional power grid is proposed for above requirements. Multi-threaded calculation of sensitivity and specified space sensitivity are adopted for choosing initial population; fuzzy self-adjustment and similarity are used in crossover probability and mutation probability respectively. Improved genetic algorithm which is optimized by gate multi-thread enhances the convergence speed; control target is considered by classification; parallel remote control is considered by gate. Combining with one regional power grid instance, analysis results show the feasibility of proposed method. This method satisfies the real-time requirements of reactive power optimal control of current regional power grid.

Key words: multi-thread; improved genetic algorithm; specified space sensitivity; target classification; reactive power and voltage optimal control

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)18-0037-05

0 引言

地区电网无功电压优化控制对改善电压质量、减小网损, 保证电力系统安全、经济运行具有十分重要的意义。文献[1]提出将 REI 等值技术应用于求解多区域电力系统的无功优化问题, 对系统各个分区的外部网络进行 REI 等值化简, 应用非线性原对偶内点法独立进行各个分区的无功优化计算。文献[2]提出以求解无功优化问题的内嵌离散惩罚非线性原对偶内点法为基础, 利用高性能图形处理器实现线性修正方程的并行求解。文献[3]对采用 Ward 等值和 REI 等值技术的多区域电力系统无功优化并行算法求解思路进行详细分析说明, 对两

种等值并行算法所采用的外部等值网络修正和外层协调计算方法进行了总结。文献[4]在归纳了各类无功优化多目标模型转化方法特点的基础上, 通过在目标空间绘制各种方法所对应的等值线, 从几何的角度, 探讨了各模型转换方法所确定的寻优方向, 并参考近似帕累托最优解集, 研究了各种模型转化方法中最优解的几何意义。文献[5]结合免疫记忆学说和克隆选择原理, 提出了一种解决多目标无功优化问题的免疫记忆克隆选择算法。文献[6]将混沌优化算法融合到粒子群算法中, 提出了混沌粒子群算法求解多目标无功优化问题。

调度地县一体化, 使得无功电压优化控制也变得复杂, 监视控制电压大量增加, 可选的控制设备

也急剧增多, 传统的遗传算法^[7-11]在计算速度, 收敛性等方面不能很好地满足实际需求。主要面临着以下问题:

1) 对于地调来说在高峰期, 会出现大量越限电压和功率因数, 地县一体, 控制设备也增多, 采用传统的遗传算法, 种群规模非常大, 搜索空间也变得很大, 受迭代次数限制, 往往会陷入局部最优。

2) 监控的厂站、电压、功率因数等数量增多, 在高峰期要兼顾每个厂站、每个电压和功率因数往往会出现的没有方案的情况, 或者给出的调整方案侧重点在不重要的厂站、电压和功率因数上。

为了解决以上问题, 本文提出分关口多线程进行遗传算法电压无功控制, 交叉概率采用模糊调整^[12], 变异概率采用相似度调整^[13], 定空间灵敏度^[14]等措施能快速给出最优方案, 采用并发遥控, 能快速调整越限电压和功率因数, 同时优化网损。提出目标分级控制的方法能在不能兼顾所有越限的情况下首先调整优先级高的重点厂站、电压和功率因数。

1 多线程改进遗传算法

1.1 分关口多线程改进遗传算法无功优化

地区电网监控的是 220 kV 及其以下的电压等级的厂站、电压、功率因数, 每个 220 kV 关口下面带一片 110 kV、35 kV、10 kV 厂站, 实践证明, 一个 220 kV 关口下的设备对另外一个关口下电压、功率因数的灵敏度几乎为零, 所以, 采用分关口计算不会影响整体调整效果。对地区电网采用分关口计算, 关口之间没有影响, 采用多线程对每个关口分别进行改进遗传算法优化计算, 多个关口同时进行, 大大缩减了整体计算时间, 使得电网越限电压、功率因数快速得到调整, 越限时间缩短, 提高整体电压质量。

本文改进遗传算法电压无功优化采用的适应度值函数如下。

(1) 总适应度值函数

$$\min F = \min(F_V + F_{\cos\varphi} + F_{P_{\text{loss}}} + F_{T+C}) \quad (1)$$

(2) 电压适应度值函数

$$F_V = \lambda_{220} \sum_{i=1}^{n_{220}} R_i \Delta U_{i220} + \lambda_{110} \sum_{i=1}^{n_{110}} R_i \Delta U_{i110} +$$

$$\lambda_{35} \sum_{i=1}^{n_{35}} R_i \Delta U_{i35} + \lambda_{10} \sum_{i=1}^{n_{10}} R_i \Delta U_{i10} \quad (2)$$

(3) 功率因数适应度值函数

$$F_{\cos\varphi} = \lambda_{\cos\varphi 220} R \Delta \cos\varphi_{220} + \lambda_{\cos\varphi 110} \cdot \sum_{i=1}^{n_{110}} R_i \Delta \cos\varphi_{i110} + \lambda_{\cos\varphi 35} \sum_{i=1}^{n_{35}} R_i \Delta \cos\varphi_{i35} \quad (3)$$

(4) 投切成本适应度值函数

$$F_{T+C} = \lambda_{T+C} \left(\sum_{i=1}^n C_{T_i} \Delta X_{T_i} + \sum_{i=1}^n C_{C_i} \Delta X_{C_i} \right) \quad (4)$$

(5) 网损适应度值函数

$$F_{P_{\text{loss}}} = \lambda_{P_{\text{loss}}} P_{\text{loss}} \quad (5)$$

其中: $F_{P_{\text{loss}}}$ 为网损适应度值; F_V 为电压适应度值; $F_{\cos\varphi}$ 为功率因数适应度值; F_{T+C} 为投切成本适应度值; R_i 、 R 分别为监控电压或者功率因数的罚因子; ΔU_{i220} 、 ΔU_{i110} 、 ΔU_{i35} 、 ΔU_{i10} 分别为各个电压等级越限电压的偏移量; $\Delta \cos\varphi_{220}$ 、 $\Delta \cos\varphi_{i110}$ 、 $\Delta \cos\varphi_{35}$ 分别为各个电压等级越限功率因数的偏移量; n_{220} 、 n_{110} 、 n_{35} 、 n_{10} 、 n 分别为各个电压等级下监控电压、功率因数以及控制的变压器和电容的个数; λ_{220} 、 λ_{110} 、 λ_{35} 、 λ_{10} 、 $\lambda_{\cos\varphi 220}$ 、 $\lambda_{\cos\varphi i110}$ 、 $\lambda_{\cos\varphi 35}$ 、 λ_{T+C} 、 $\lambda_{P_{\text{loss}}}$ 分别为根据优先级确定的各个电压等级电压、功率因数以及投切成本、网损的权重; C_{T_i} 、 C_{C_i} 分别为单台变压器、电容的投切成本; ΔX_{T_i} 、 ΔX_{C_i} 分别为变压器、电容器的动作状态。

1.2 变异概率模糊自动调整

在种群适应度值方差较小的情况下, 为保证算法的稳定性, 应施以较小的变异概率; 在种群适应度值方差较大的情况下, 为了尽快淘汰劣质解, 对适应度值大的个体, 施以较大的变异概率, 出于保护优秀个体的考虑, 对适应度值较小的个体, 应施以较小的变异概率。变异概率的确定依据式(6)和式(7)。

$$P_m = (f_{\text{vadapi}} - f_{\text{vmin}}) / f_{\text{verro}} \quad (6)$$

$$C_r = \begin{cases} 0.95(P_m \geq 1) \\ P_m(P_m < 1) \end{cases} \quad (7)$$

其中: C_r 为变异概率; f_{vadapi} 为第 i 个粒子的适应度值; f_{vmin} 为种群中最小适应度值; f_{verro} 为种群的平均适应度值。

1.3 交叉概率相似度调整

交叉概率的好坏直接影响到遗传算法的收敛速度快慢。本文采用改进的交叉概率相似度调整方法计算交叉概率, 根据个体间的相似度大小来决定是否进行交叉操作, 交叉概率由式(8)确定。

$$S = l / n \quad (8)$$

其中: S 为相似度; l 为两个个体最长公共控制变量串的长度; n 为控制变量串的长度。

取阈值 P , 只有当两个个体的相似度 S 小于 P 时, 这两个个体才可以进行交叉。

2 目标分级优化计算

地县一体, 地区电网进行无功优化控制时要考虑 220 kV、110 kV、35 kV、10 kV 等几个电压等级的电压、功率因数、网损, 如此多的监控点, 必须分清主次才能在优化控制时做到有的放矢。本文提出根据地区电网的实际要求, 对监控点划分优先级, 不同优先级有不同的权重, 在计算适应度值时进行体现, 这样改进遗传算法给出的控制方案才会避免避重就轻。

各个监控点的权重根据优先级按照式(9)计算。

$$\lambda = \frac{N_i^2}{\sum_{i=1}^m N_i^2} \quad (9)$$

式中: λ 为各个监控点权重; N_i^2 为各类监控点优先级平方; m 为监控点分类数目。

表 1 显示不同的优先级对应不同的权重, 不同的权重, 对适应度值的影响不同, 优先级高的, 对适应度值影响大, 遗传算法在寻优过程中就有所侧重, 给出的调整策略体现了不同优先级的要求。

表 1 不同监控点的优先级及其对应的权重

监控量	优先级	权重
220 kV 电压	10	$\lambda_{220}=0.4$
110 kV 电压	8	$\lambda_{110}=0.256$
220 kV 功率因数	6	$\lambda_{\cos\phi 220}=0.144$
110 kV 与 35 kV 电压	5	$\lambda_{110}=\lambda_{35}=0.1$
110 kV 与 35 kV 功率因数	4	$\lambda_{\cos\phi 110}=\lambda_{\cos\phi 35}=0.064$
网损与投切成本	3	$\lambda_{P_{\text{loss}}}=\lambda_{T+C}=0.036$

3 定空间灵敏度

遗传算法的本质是对于给定的搜索空间进行随机搜索, 评价个体的适应程度, 从而寻得最优解。初始的给定搜索空间和变异、交叉操作的搜索方向是关键, 如果能够适当地缩小搜索空间, 指定大致的搜索方向, 则可以大大地减少迭代次数, 缩短收敛时间, 改善实时性。因此可以根据灵敏度分析指定搜索方向、通过修正约束条件作为改进的搜索空间, 形成新的定空间灵敏度遗传算法。

本文灵敏度计算采用摄动法^[15], 利用多线程计算, 缩短了计算时间。地区电网用到的灵敏度系数主要有: 有载调压变压器变比对电压、网损、功率因数的灵敏度; 电容/电抗器对电压、网损、功率因数的灵敏度。

$\frac{\partial U}{\partial X}$ 为有载调压变压器变比、电容/电抗器对电

压灵敏度; $\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial X}$ 为有载调压变压器变比、电容/电

抗器对网损灵敏度; $\frac{\partial \cos\phi}{\partial X}$ 为有载调压变压器变比、电容/电抗器对功率因数灵敏度。

由定空间灵敏度确定的搜索空间为

$$S = \left\{ X \mid \frac{\partial Y_{\text{outLim}}}{\partial X} > m \right\} \quad (10)$$

其中: X 为有载调压变压器、电容、电抗器; Y_{outLim} 为越限电压、越限功率因数以及网损; m 为灵敏度阈值。

4 并发遥控

本文对电压无功优化方案的执行采用并发遥控的模式, 分关口多线程采用遗传算法对电网电压、功率因数等监控量进行矫正, 控制方案同样也分关口给出, 有利于分关口并发遥控实现。

5 多线程遗传算法电压无功优化控制流程

地区电网多线程改进遗传算法电压无功优化控制流程具体步骤如下。

步骤 1: 每个 220 kV 变电站及其下面带一片 110 kV、35 kV、10 kV 变电站分为一个关口。每个线程自动按顺序领关口任务。

步骤 2: 确定每个关口越限信息。

步骤 3: 每个线程根据定空间灵敏度确定遗传算法的搜索空间。

步骤 4: 根据改进遗传算法电压无功优化控制适应度值函数, 求适应度值, 生成电压无功控制方案。其中用到的权重根据优先级确定。

其间:

步骤 4-1: 根据种群适应度值情况对每个个体的变异概率进行模糊自动调整;

步骤 4-2: 根据个体间的相似度大小确定两个个体的交叉概率。

步骤 5: 对步骤 4 生成的方案采用并发遥控的模式执行。

6 实例分析

以某地县一体的地区电网为研究对象, 本地区总共有 22 个 220 kV 关口, 取高峰时刻的时间断面进行分析, 高峰时刻, 越限监控点总共 66 个, 有越限监控点的关口 10 个。

从表 2、表 3 的对比中可以看出, 分关口多线程改进遗传算法计算速度明显提升, 收敛性更好,

矫正电压、功率因数等效果更好，并发遥控更能迅速下发遥控，快速执行优化方案，实时响应电网的变化。

表 2 计算性能指标对比
Table 2 Comparison of calculating performance

改进遗传算法		传统遗传算法电压无功控制	
遗传算法计算时间	46 s	遗传算法计算时间	367 s
所有关口搜索空间		所有关口搜索空间	
控制设备个数 (采用定空间灵敏度)	80	控制设备个数 (不采用定空间灵敏度)	404
关口搜索空间最多控制设备个数 (采用定空间灵敏度)	24	关口搜索空间最多控制设备个数 (不采用定空间灵敏度)	404
实际控制设备个数	54	实际控制设备个数	83
遥控执行完时间	40 s	遥控执行完时间	364 s
计算周期	60 s	计算周期	60 s
灵敏度扫描时间	20 s	灵敏度扫描时间	20 s
最大迭代次数	6 000	最大迭代次数	6 000

表 3 越限监控点信息
Table 3 Information of ultra-limited watch points

监控量	越限个数	改进遗传算法	传统遗传算法
		调整合格数	调整合格数
220 kV 电压	6	6	2
10 kV 电压	30	28	14
220 kV 功率因数	10	8	4
110 kV 与 35 kV 电压	12	7	3
110 kV 与 35 kV 功率因数	8	5	4

7 结论

基于多线程遗传算法的目标分级地区电网电压无功优化控制，采用关口多线程进行遗传算法电压无功控制，交叉概率采用模糊调整，变异概率采用相似度调整，定空间灵敏度等措施能快速给出最优方案，配合并发遥控，能够实时矫正越限监控点。现场应用表明该方法能解决地县一体带来的搜索空间大、越限监控点数量多等问题，能更好地满足地县一体管理模式的要求。

参考文献

[1] 刘志文, 刘明波, 林舜江. REI 等值技术在多区域无功优化计算中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 191-200.

LIU Zhiwen, LIU Mingbo, LIN Shunjiang. Research on application of REI equivalent technique into multi-area reactive power optimization computing[J]. Transactions

of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 191-200.

[2] 黄玉龙, 刘明波. 应用图形处理器实现无功优化并行计算[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 182-190.

HUANG Yulong, LIU Mingbo. Implementation of parallel reactive-power optimization computing using graphics processing unit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 182-190.

[3] 刘志文, 刘明波, 夏文波. 采用两种外部等值技术的多区域无功优化并行算法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 56-66.

LIU Zhiwen, LIU Mingbo, XIA Wenbo. Comparison of multi-area reactive power optimization parallel algorithms using two kinds of external equivalent technique[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 56-66.

[4] 李智欢, 李银红, 段献忠. 无功优化多目标模型转换方法的等值线分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 153-160.

LI Zhihuan, LI Yinhong, DUNA Xianzhong. Analysis of objective-converting methods in multi-objective reactive power optimization using contour lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 153-160.

[5] 罗毅, 多靖赞. 基于免疫记忆克隆选择算法的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 65-70.

LUO Yi, DUO Jingyun. Multi-objective reactive power optimization based on immune memory colonial selection algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 65-70.

[6] 李娟, 杨琳, 刘金龙, 等. 基于自适应混沌粒子群优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 26-31.

LI Juan, YANG Lin, LIU Jinlong, et al. Multi-objective reactive power optimization based on adaptive chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 26-31.

[7] 周双喜, 杨彬. 实现无功优化的新算法——遗传算法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(11): 19-23.

ZHOU Shuangxi, YANG Bin. A new algorithm for reactive power optimization — GA algorithms[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(11): 19-23.

[8] 周双喜, 杨彬. 影响遗传算法性能的因素及改进措施[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(7): 24-26.

ZHOU Shuangxi, YANG Bin. Factors of effect on the performance of genetic algorithms and the methods to perfect it[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 1996, 20(7): 24-26.
- [9] 熊信银, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [10] 赵磊, 曾芬钰. 基于经济性与环保性的微电网多目标优化调度研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 127-132.
ZHAO Lei, ZENG Fenyu. Research on multi-objective optimal operation of microgrid based on economic and environmental protection[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 127-132.
- [11] 韦杏秋, 陈碧云. 基于改进多种群遗传算法的节能环保多目标优化模型[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(12): 22-29.
WEI Xingqiu, CHEN Biyun. Multi-objective optimization model based on improved multiple population genetic algorithm considering energy[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(12): 22-29.
- [12] 曹道友, 程家兴. 基于改进的选择算子和交叉算子的遗传算法[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(2): 44-47.
CAO Daoyou, CHENG Jiaying. A genetic algorithm based on modified selection operator and crossover operator[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(2): 44-47.
- [13] 丁力. 基于智能技术的地区电网电压无功控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- DING Li. Voltage and reactive power control of regional network based on intelligence technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.
- [14] 董岳昕, 杨洪耕. 一种适应于地区电网无功电压优化控制的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 51-54.
DONG Yuexin, YANG Honggeng. A new approach for reactive power/voltage optimization control of regional grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 51-54.
- [15] 于尔铿. 能量管理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

收稿日期: 2014-11-27; 修回日期: 2015-01-16

作者简介:

冷永杰(1977-), 女, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为输电网高层应用和配电网高层应用; E-mail: lengyongjie@ieslab.cn

张路寅(1984-), 女, 硕士, 从事电力系统自动化技术研究工作;

赵建峰(1986-), 男, 硕士, 从事电力系统自动化技术研究工作。

(编辑 周金梅)