

基于 IEC61970 县级电网电压无功优化控制的实现

刘军¹, 黄伟¹, 戴博¹, 王玮², 张建华¹

(1. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 山东省胶州供电公司, 山东 胶州 512026);

摘要: 探讨了针对县级电网系统进行无功优化的软件技术, 即以 IEC61970 CIM 模型为基础, 构建网络分析的拓扑模型, 在此基础上进行县级电网的在线无功优化计算。此外还着重分析了在量测数据质量不高, 点多面广且对实时性有要求的情况下进行县级电网无功优化分析的策略。结合胶州供电公司的实际情况, 讨论了软件设计和实施过程的主要技术问题, 最后得出两点结论。

关键词: 县级电网; IEC61970; 潮流计算; 在线无功优化; 改进的免疫遗传算法

Realization of distribution network power reactive optimization system based on IEC61970

LIU Jun¹, HUANG Wei¹, DAI Bo¹, WANG Wei², ZHANG Jiang-hua¹

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education of North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Jiaozhou Power Supply Bureau, Shangdong Power Grid Corporation, Jiaozhou 512026, China)

Abstract: This paper discusses the technology of reactive optimization based county power grid, such as building electric network topology modal based on IEC 61970 Common Information Model(CIM). It also discusses the method of realizing the arithmetic of electric network real-time flow and online reactive optimization. The paper stresses real-time analysis on test no good quality of measure and no precision archives information of distribution network facility. The paper gives the software realization of realization optimization in Jiaozhou Power Supply Bureau, Shangdong Power Grid Corporation. In the end, two conclusions are drawn.

Key words: county distribution network; IEC61970; real-time distribution network flow; reactive optimization; immune genetic algorithm

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)14-0045-05

0 引言

近年来, 电网的安全经济运行日益受到重视, 无功优化问题也得到了广泛的研究。和传统的地区电网比较起来, 县级电网有其自身的特点, 首先是 110 kV 的子输电网和 10 kV 城区辐射配电网并存, 在进行分析时需要整体考虑; 因为资金等限制, 县级电网的量测存在较多的残缺和误差, 需要更加实用的状态估计手段, 必要时采用离线和在线相结合的方式; 县级电网点多面广, 电压质量不高, 需要稳定可靠的无功优化程序来分析, 但无功优化调整的措施又不多, 在无功分析时需要考虑实际可投用设施的约束和增加设施的经济性等等^[1]。山东胶州电网作为青岛电网的子系统, 属于县级规模, 上述问题均不同程度存在, 本文针对实际情况, 详细给出实时无功优化在设计和实施的过程中采取的相关措施。目前该系统已达到在线分析的功能。

1 网络拓扑分析与实时数据预处理

1.1 基于 IEC61970 CIM(Common Information Model) 模型县级电网的拓扑分析^[2-6]

CIM 包括了 EMS(能量管理系统)和 DMS(配电网管理系统)中的所有主要对象, 特别是那些与电力运行有关的对象。其中大部分是对系统元件的描述, 如变压器、线路、开关、互感器等, 这些都是构造拓扑所需要的信息和数据。通过提供一种对象类和属性及他们之间的关系来表示电力系统资源的标准方法, CIM 方便了实现不同卖方独立开发的 DMS 应用的集成, 多个独立开发的完整的 DMS 系统之间的集成, 以及 DMS 系统和其他涉及电力系统运行的不同方面的系统^[7]。

根据 CIM 模型的 Wires 类和 Topology 类, 分别构造了一个基本的网络数据库(CIMDB)。该数据库为关系数据库, 定义了与高级分析相关的数据结构。

原始设计时在 CIMDB 数据库的端子表(Terminal)、连接点表(ConnectivityNode)里录入拓扑信息,基于这两个表,加上录入的交流线路表(ACLine Segment)、开关表(Breaker)、负荷开关表(LoadBreak Switch)、绕组表(Transformer Winding)等一起构成拓扑分析的基础。

拓扑分析依然采用成熟实用的母线分析模型,包括两个部分:1) 厂站母线分析:根据开关的开断状态和元件的退出恢复状态,由节点模型形成母线模型。该模型分别由 ConnectivityNode 表和 Terminal 经过一定的处理获得。2) 系统网络分析:分析整个电网的母线由闭合支路联接成多少个子电网,每个子电网是有电气联系的母线的集合,计算中以此为单元划分网络方程组。该分析是在 CIMDB 的内存映射表中进行,使用内存映射表大大加快了无功优化时目标函数评价的速度。

1.2 实时数据预处理措施

县级电网由于受节点量测的限制,往往进行正常的状态估计比较难,在实际的工程中,为保证在线分析软件可用,在程序设计的时候就要考虑到各种可能出现的情况,也有可能需要有一些人为的措施对实时数据进行处理。

对量测比较好的电压等级,如 110 kV 网络,采用基于加权最小二乘法的快速分解法进行状态估计,该方法简单,实用,也比较成熟,一般情况下能很好地收敛。对于 35 kV 及以下的网络,需要采取较复杂的技术,首先在网络建模时,对影响潮流计算收敛性比较大的负荷点和发动机点,手工录入高低限值和默认值,作为计算时的备用。在分析过程中一旦出现越限的可疑数据,系统自动取默认值参与计算。有些 T 节点,可能没有量测,首先取节点周边的数据对 T 节点进行估计,如果估计的负荷越限,采用默认值进行计算;如果周边的数据不能得到 T 节点的负荷估计值,采用默认值进行处理。

采取上述措施后,一般能得到可用于计算的有效数据,现场情况千变万化,在实时数据的计算机预处理仍然无效,系统自动转为离线方式,由调度员进行数据的干预,经过干预后的数据肯定能满足分析的要求。

2 实时无功优化的改进免疫遗传算法

2.1 无功优化目标函数

一般将有功网损最小作为目标函数,电压越限和发电机无功越限作为罚函数加入到目标函数中。

$$F = \min [P_L + \lambda_v \sum_{i=1}^{n1} (\frac{\Delta U_i}{U_M})^2 + \lambda_G \sum_{i=1}^{n2} (\frac{\Delta Q_i}{Q_M})^2] \quad (1)$$

式中:第一项为系统的有功网损;第二项为对节点电压越界的罚函数, $n1$ 为系统内 PQ 节点个数;第三项为对 PV 节点无功越界的罚函数, $n2$ 为系统内 PV 节点个数。 λ_v 和 λ_G 为罚因子, ΔU_i 为 i 节点的电压越界量大小, ΔQ_i 为 i 节点无功越界量大小。

$$U_M = U_{i\max} - U_{i\min}$$

$$Q_M = Q_{i\max} - Q_{i\min}$$

节点功率约束方程

$$P_i = U_i \sum_{j \in N} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$Q_i = U_i \sum_{j \in N} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

式中: P_i , Q_i , U_i 分别为节点 i 处的注入有功,无功和电压; G_{ij} , B_{ij} , θ_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导,电纳和相角差。

不等式约束方程

1) 状态变量的不等式约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}; Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max}$$

式中: $U_{i\min}$, $U_{i\max}$ 分别表示节点电压上下限; $Q_{Gi\min}$, $Q_{Gi\max}$ 分别为发电机节点无功输出功率上下限。

2) 控制变量的不等式约束

$$Q_{ci\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci\max}; T_{i\min} \leq T_i \leq T_{i\max}$$

$$U_{Gi\min} \leq U_{Gi} \leq U_{Gi\max}$$

式中: $Q_{ci\min}$, $Q_{ci\max}$, $T_{i\min}$, $T_{i\max}$, $U_{Gi\min}$, $U_{Gi\max}$ 分别为无功补偿装置无功容量,变压器变比和具有发电机节点电压的上下限。

2.2 基于免疫遗传算法的无功优化^[7]

2.2.1 产生初始抗体

由问题的候选解基因随机产生一定数目的抗体群。

2.2.2 结合力的计算

1) 抗体与抗原之间的结合力计算

将目标函数每次的运行结果全体用 A_v 函数表示,可以得到:

$$A_v = f(v)$$

式中: $f(v)$ 为公式 (1), 可以用目标函数表示抗体抗原结合力。

2) 抗体与抗体之间的结合力计算

抗体与抗体之间的结合力 $B_{v,w}$ 计算采用如下公式:

$$B_{v,w} = 1/(1 + H_{v,w})$$

式中: $H_{v,w}$ 为两个抗体的距离, 由抗体基因编码整实数编码, 采用欧氏空间中 2-范数意义下的距离:

$$H_{v,w} = \{ \sum [(V_{Gv} - V_{Gw})^2 + (D_{civ} - D_{ciw})^2 + (T_{iv} - T_{iw})^2] \}^{1/2}$$

$B_{v,w}$ 值大小反映了抗体之间的相似程度, 当抗体相似时, $B_{v,w}$ 值比较大, 反之, 则比较小。

2.2.3 计算抗体浓度

$$c_v = \sum_{w=1}^N B_{v,w} / N$$

式中: N 为抗体种群的个数。

抗体群中浓度最大的抗体表明了它在抗体群中占了绝对优势, 即达到一个相对的最优点, 体现这一代种群的进化结果, 将这个浓度最大的抗体保留下来。浓度较高的抗体则说明它和其它抗体之间的相似性较大, 为了维持抗体群的多样性, 需要对较高浓度的抗体进行抑制。把其它抗体 (除掉最优抗体) 按照其浓度的大小进行排序, 通过设定的淘汰

率, 浓度大的抗体被淘汰。一部分随机产生的新个体用来代替被淘汰的个体。通过对较高浓度抗体的抑制可以很好地防止抗体群向单一化发展, 维持抗体群的多样性, 从而防止陷入局部最优点。

2.2.4 抗体生存期望值计算

抗体 v 的适应值由该抗体与抗原的结合力 A_v 和该抗体的浓度 c_v 两部分组成:

$$p = \alpha A_v + (1 - \alpha) c_v$$

其中: α 为一个比例系数, $0 < \alpha < 1$ 。

从上式可以看出, 抗体与抗原的结合力 A_v 越小, 相应的适应值越小; 抗体的浓度概率越小, 相应的适应值越小; 适应值越小, 越接近最优解。这样既可保留与抗原的结合力小 (即目标函数小) 的抗体, 又可通过抗体间基于浓度的相互促进与抑制, 确保个体多样性, 有利于提高最优点附近的收敛性。

采用标准遗传算法和上述改进的免疫遗传算法计算文献[8] IEEE 30 节点系统, 设抗体群规模为 60, 种群的进化代数 100 代, 交叉率为 0.8, 变异率为 0.02, 比例系数为 0.98, 免疫遗传算法中每一次迭代都有 10% 的新个体进入抗体群。算法的流程图如图 1。得到 GA 与 IGA 的对比结果如表 1 所示。

表 1 IEEE 30 节点 GA 与 IGA 结果对比

Tab.1 IEEE 30 node results compare GA and IGA

状态	发电有功/MW	负荷有功/MW	网损/MW	网损减少百分比/(%)	中间结果/MW
优化前	2.902 00	2.834 00	6.823 18	-	-
GA	2.887 20	2.834 00	5.319 92	22.03	第 45 代:5.321 2
IGA	2.885 40	2.834 00	5.142 22	24.64	第 15 代:5.213 3

通过表 1 可以看出, 免疫遗传算法能得到更好的优化结果, 寻优精度得到提高; 其次寻优速度也好于标准遗传算法, 第 15 代即得到最优解。

3 县级电网实时无功优化计算策略

3.1 针对县级电网目标函数的简化

县级电网一般采用闭环设计, 开环运行模式, 整体呈现辐射状; 电网内一般无发电厂 (或无功很小的发电厂), 呈现受端电网特征。基于以上考虑, 在进行无功优化时, 系统的电源点为平衡节点, 其余皆为 PQ 节点, 由于没有 PV 节点, 也就没有 PV 节点无功越界问题, 目标函数仅有 PQ 节点电压越界的惩罚项, 由此新的目标函数为:

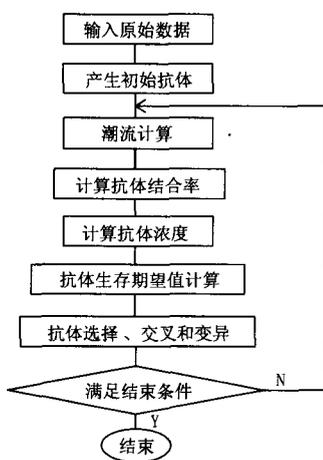


图 1 免疫遗传算法无功优化流程图

Fig.1 Flowchart of reactive power

$$F = \min [P_L + \lambda_v \sum_{i=1}^{n_l} (\frac{\Delta U_i}{U_M})^2]$$

相应的约束条件也得到简化:

$$\Delta U_i = \begin{cases} U_i - U_{i\max} & (U_i > U_{i\max}) \\ 0 & (U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}) \\ U_{i\min} - U_i & (U_i < U_{i\min}) \end{cases}$$

$$U_M = U_{i\max} - U_{i\min}$$

因为网内没有电源点, 县级电网无功控制手段主要是电容器投切和变压器分接头调整, 由于电网以辐射形为主, 变压器分接头调整对无功分布影响不大, 其主要效果是改善下游节点电压水平, 而降损效益明显的是电容器优化投切, 针对县级电网电压越限的裕度较大的情况, 罚因子 λ_v 不宜太大, 和网损为同一等级为宜。

3.2 抗体基因编码方式的简化

控制变量(无功补偿装置的投切档位和变压器分接头的可调档位)编码为抗体, 均采用整数编码模式。将候选解抗体基因编码采用整数编码, 可以有效避免基因改变后网络拓扑结构变化, 例如电容器组的投切组数仅仅改变该组的所挂节点无功注入的大小, 增加一组电容器等值为增加该节点无功而不是合上电容器组开关, 优化结束后将投运组数转化为开关动作, 不影响优化结果的合理性。电容器投切和变压器档位调整采用二进制编码则势必出现开关状态的变化而导致拓扑改变, 频繁的拓扑分析使得潮流计算不堪重负。整数编码也可以避免基因过长, 也省去了频繁编码、解码的过程, 使计算速度和准确性都得到了提高, 有利于处理大规模的优化问题。

3.3 县级电网实时潮流计算模式选择

每一个抗体进行适应度计算时需要计算潮流得到系统网损, 无功优化状态变量也由潮流计算结果获得, 因此, 一个快速且稳定收敛的潮流计算程序是解决县级电网无功优化的关键。

县级电网的潮流计算有其特殊性, 因为它是子输电网和辐射网的结合, 在进行全网计算的时候, 采用单纯的牛顿法和前推回代算法均不能满足要求, 需要考虑子输电网采用牛顿法, 辐射网采用前推回代法的主从分裂潮流算法^[9]。

当计算辐射配电网潮流时, 由子输电潮流结果提供配电根节点的电压; 计算子输电潮流时, 由配电潮流结果提供输电系统广义负荷的功率数据, 两者交替计算, 反复迭代直至收敛。

在考虑实时数据的校正和计算模式确定后, 县级电网的实时潮流计算过程相对简单, 计算的重点是如何满足现场的需要。在收敛判据方面, 不能仅仅给出一个不收敛的结论, 还需要给出不收敛的原因。在设计时, 以系统失配总功率(minr)作为收敛标准, 这样潮流总能收敛, 但是结果不一定是合理的。如果 minr 为零, 或者非常小(小于设定的迭代精度 epsmax)则表示潮流计算收敛并且结果合理。如果 minr 较大, 则表示收敛但是负荷条件或者发电出力不合理, 如果 minr < 0 (一般情况下小于零), 表示负荷太重, 此时电压中会有很低水平的电压。这样的判据能够直观地使调度人员观察数据的问题, 以便定点检查数据的合理性, 启动离线潮流计算。在无功优化时可以及时淘汰适应度差的个体(潮流不收敛导致网损和电压越界罚函数值偏大)。

3.4 无功优化控制和软件设计的问题

客观而言, 县级电网无功优化目前还是以分析为主, 很难真正做到闭环控制。在系统进行优化后不仅要直观给出最优解, 还要相应给出部分次优解, 以便调度人员根据经验和现场情况进行选择变压器分接头调整和电容器投切。

对县级系统而言, 软件的使用和后期维护实际上比开发的难度还要大, 如何设计方便实用且稳定的图形人机系统是能否真正用起来的关键。比如尽量不让用户键盘输入操作, 需要交互的地方采用鼠标选择的方式等等。数据维护最好也不要放在人机系统里, 以扩展日常使用的 Office 工具为宜。

4 系统功能与软件实现

胶州电网共有 220 kV 变电站 2 座, 110 kV 变电站 5 座, 35 kV 变电站 22 座, 用户变电站 18 座, 龙发电厂 1 座。南郊站的胶张线进线开关处于分位, 将胶州电网分成两个独立的辐射网子系统。两个子辐射网共有 139 个节点, 其中平衡节点 2 个, 分别位于胶州站和匡正站内, 取进线母线功率之和为电源, PQ 节点 137 个(包括 T 接), 胶州站子系统内仅有一个 12 MW 龙发电厂, 将其也设为 PQ 节点。网内有 8 台可调分接头变压器, 共有 28 组电容器。

在胶州项目的实施过程中, 针对现场情况, 图形人机子系统和无功优化子系统采用 VC++6.0 开发, 数据维护子系统采用 EXCEL+VBA 开发, 数据库系统采用 SQL Server2000。软件结构如图 2。

通过上述针对县级电网改进的免疫遗传算法进行胶州电网的无功优化计算, 设抗体群规模为 60, 种群的进化代数为 100 代, 交叉率为 0.8, 变异

率为 0.02,电压越界罚因子为 0.01,比例系数为 0.98,免疫遗传算法中每一次迭代都有 10%的新个体进入抗体群。GA 与 IGA 的对比结果如表 2 和图 3 所示。

表 2 胶州县级电网 139 节点 GA 与 IGA 结果对比

Tab.2 Jiaozhou network 139 node results comparison of GA and IGA

状态	适应度	适应度减少百分比/(%)	收敛代数
优化前	0.087 186	—	—
GA	0.076 698	13.67	第 24 代
IGA	0.074 639	14.39	第 16 代

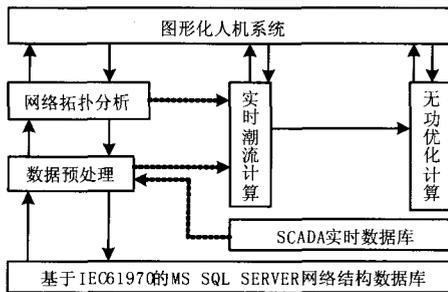


图 2 无功优化软件流程图

Fig. 2 Flow chart of distribute reactive

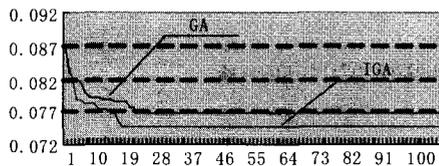


图 3 GA 与 IGA 收敛结果对比

Fig.3 Contingency results GA and IGA comparison

从上述对比可以看出,利用县级电网特征,采用改进免疫遗传算法处理胶州电网无功优化,能更快更好地得到最优解。

5 结论

针对县级电网无功优化分析系统,本文得出两点结论:

- 1) IEC61970 CIM 模型目前已达到实用的程度,不仅可以用到输电网 EMS 中,也可以用到县级电网中,标准化的接口有利于后续系统的接入;
- 2) 县级电网有自己的特点,在工程实施的过程中只要充分考虑其基础资料落后,量测不理想,使用人员水平参差不齐等因素,能开发出完全可以实用的无功优化软件。

参考文献

[1] 张伯明,孙宏斌,邓佑满,等.面向地区电网的 EMS

高级应用软件[J].电力系统自动化,2000,24(5).
 ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, DENG You-man, et al. Advanced Application Software Package of EMS Developed for Sub-Transmission Power Network[J]. Automation of Electric Power Systems,2000, 24(5).
 [2] 能量管理系统应用程序接口(EMS-API)第 301 部分:公共信息模型(CIM)基础[M].北京:中国电力出版社,2005.
 Energy management System Application Program Interface(EMS-API) Part 301:Common Information Model(CIM)[M].Beijing:China Electric Power Press, 2005.
 [3] 潘毅,周京阳,李强,等.基于公共信息模型的电力系统模型的拆分与合并[J].电力系统自动化,2003,27(15):45-48.
 PAN Yi, ZHOU Jing-yang, LI Qiang, et al. The Separation/combination of Power System Model Based on CIM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 45-48.
 [4] Neumann S. CIM Extensions for Electrical Distribution[A]. In:Power Engineering Society Winter Meeting[C].2001. 904-907.
 [5] IEC 61968, System Interfaces for Distribution Management. Available: ftp://ftp.macro.com[EB/OL]
 [6] 朱见伟,丁巧林,杨宏,等.配电网 CIM 综合模型的构建与应用[J].继电器,2006 34(10): 60-63,72.
 ZHU Jian-wei, DING Qiao-lin, YANG Hong, et al. Construction and Application of Electrical Distribution CIM model[J].Relay, 2006 34(10): 60-63,72.
 [7] 徐春丽.基于免疫遗传算法的无功优化研究(硕士论文)[D].北京:华北电力大学,2003.
 XU Chunli. Research of Reactive Power Optimization Based on Immune Genetic Algorithm, Thesis[D]. Beijing:North China Electric Power University,2003.
 [8] 郭创新,朱承治,赵波,等.基于改进免疫算法的电力系统无功优化[J].电力系统自动化,2005,29(15): 23-29.
 GUO Chuang-xin,ZHU Cheng-zhi,ZHAO Bo,et al. Power System Reactive Power Optimization Based on an Improved Immune Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(15):23-29.
 [9] 孙宏斌,张伯明,相年德.发输配全局电力系统分析[J].电力系统自动化,2000 24(1): 17-20.
 SUN Hong-bin,ZHANG Bo-ming,XIANG Nian-de, Comprehensive Power System Analysis Including Transmission and Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000,24(1):17- 20.

收稿日期:2006-12-26 修回日期:2007-02-08

作者简介:

刘军(1969-),男,博士研究生,高工,从事 DMS、电能量与线损系统研究工作;E-mail: lld_hby@163.com

黄伟(1962-),男,副教授,从事配电网规划, DMS 研究工作;

戴博(1976-),女,博士研究生,从事配电系统,电力系统电压稳定研究工作。