

文章编号: 1671-6833(2004)02-0059-04

# 城市高压电网最优网架运行方式的在线确定

王克文<sup>1</sup>, 刘湘莅<sup>1</sup>, 谢志棠<sup>2</sup>, 胡金磊<sup>1</sup>

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 香港理工大学电机系, 香港)

**摘要:** 从城市高压电网的实际特点出发, 采用降阶枚举法进行城市高压电网最优运行网架的在线确定计算. 开关的状态用整型变量表达, 所有开关状态的组合构成了电网可能运行方式的全枚举集; 考虑继电保护等各种实际电网运行约束后, 大幅度减少了可能的运行方式数; 对有限数目运行方式的准确计算, 保证了结果的最优性和计算的快速性. 该思路已分别用于“城市电网智能决策支持系统”中电网事故后恢复方案、当前运行方式以及将来任一时刻的最优网架运行方案的确定. 在南阳城市电网的实际试运行表明了该方法的有效性和实用性.

**关键词:** 城市电网; 在线; 优化; 枚举法

中图分类号: TM 761.1; TM 726.3 文献标识码: A

## 0 引言

优化计算方法已广泛应用于电力系统的规划和运行分析. 在多数的分析模型中, 均计及了电网运行的经济性和安全性<sup>[1~6]</sup>, 甚至简单考虑了可靠性和稳定性. 除了分析目的的差异和在具体表达上的侧重不同外, 用于网络规划和运行分析的优化模型原则上可以相互借用<sup>[2~6]</sup>.

网络结构的变化常用整型变量描述, 节点注入功率等运行参数可由连续变量表达. 当同时考虑两类变量时, 所构成的完整优化模型常常不易求解. 在计算精度允许的前提下, 将整型变量用连续变量近似表达, 是一种大量采用的处理方法<sup>[2,3]</sup>. 为协调整型变量和计算量之间的矛盾, 新的方法也不断提出<sup>[1,6]</sup>.

作为在线分析软件, 应具有较强的实用性, 不但应满足算法的可靠性和计算的快速性, 同时应计及电网运行时各种实际约束, 保证计算结果的准确, 提供真正可用的最优方案.

本文在确定电网最优运行网架时, 从实际对象的特点出发, 以枚举法为基础, 保证了结果的准确性和全局最优性. 并利用电网运行的实际约束, 大幅度减少了枚举数目, 同时准确计及了继电保护配置、平行运行线路、并列运行变压器约束等各

种实际限制条件, 从而完成了算法的在线尝试.

## 1 南阳城市高压电网

图1为所要处理的实际系统接线图. 系统主要由110 kV网络构成, 也包括10 kV和35 kV母线, 并包含两个局部电厂.

该具体系统具有两个特点: ①220 kV的南阳、宛北两个变电站分别与两个外部系统相联, 且不允许在城网的110 kV电压等级下互联. 因此, 尽管在110 kV城市电网内允许有局部环网, 但只能联至两个220 kV电源中的一个, 或将110 kV网络分裂成两部分运行. ②由于枣林、罗庄两个变电站从两回宛陈线上“T”接, 保护配置对运行方式有特定的要求. 主运行方式下双回线路在陈庄解列.

以上特点要求所开发的软件不仅要能适应多个子网络的处理, 且必须考虑实际系统的具体约束.

该城市高压电网已有的数据采集系统能够提供较为完整的开关运行状态和系统运行数据. 在所开发的“城市电网智能决策支持系统”中, 在线采集来的生数据已先经过状态估计等功能模块的纠错处理, 网架优化所采用的开关状态和系统运行数据具有较高的可信度.

收稿日期: 2004-01-28; 修订日期: 2004-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50177028); 河南省科技攻关项目(0224330010)

作者简介: 王克文(1964-), 男, 山西省平陆县人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电力系统分析和稳定控制方面的研究.

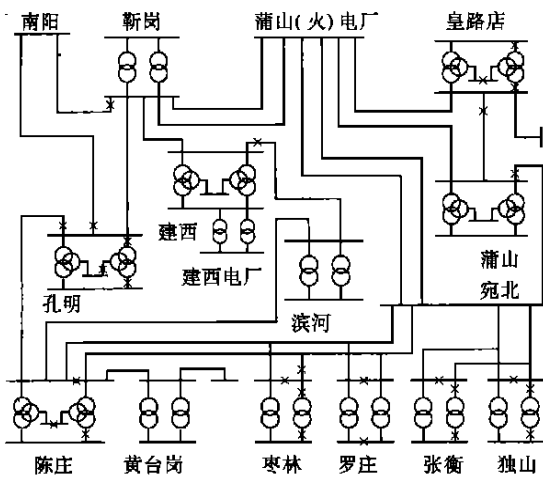


图 1 110 kV 系统

Fig 1 The 110 kV power system

## 2 降阶枚举法

### 2.1 元件描述

对图 1 所示的特定系统而言, 在线采集数据经状态估计等纠错功能模块处理后, 为网架优化提供了所有元件的运行状态、所有母线的电压和节点、支路功率, 并删除了大量不需要的多余数据。

因此, 在网架优化中需考虑的元件有: 线路、双绕组变压器、三绕组变压器、断路器、隔离开关、10 kV 母线并联电容器, 并标注出平行线路。元件的标识和相互间的联接关系由元件两端的节点编号描述。

为简化起见, 所有元件的状态均描述为: -1, 不详或未采集到; 1, 运行; 2, 停运, 但可用; 3, 检修; 4, 故障; -10, 手工设置停运; 10, 手工设置投运。其中, 最后两个状态 -10 和 10, 以及检修状态 3 由手工输入, 故障状态 4 由“故障诊断”模块或手工输入提供。尽管部分元件(主要是部分隔离开关)的状态未采集上来, 但经手工处理后已能满足网架优化的要求。

显然, 各类元件中, 数目最多的是隔离开关, 然后是断路器。网架优化中涉及到的元件总数约为 600 多个。

### 2.2 性能指标

网架优化的目的是在众多的可行运行方案中确定最合理的运行方式。采用降阶枚举法, 该问题转化为对各运行方案的性能指标进行排序并提供前几个方案供运行人员参考。

对每一运行方案, 计算的指标包括: 总有功负荷  $P_{L\Sigma}$  (MW), 总无功负荷  $Q_{L\Sigma}$  (Mvar), 总有功损

耗  $\Delta P_{\Sigma}$  (MW), 总无功损耗  $\Delta Q_{\Sigma}$  (Mvar), 电压越限的节点数  $N_V$ , 最大电压偏移  $P_V$  (%), 功率越限支路数  $N_S$ , 最大越限功率量  $P_S$  (MVA), 开关操作次数  $N_k$ 。

每一运行方案对应于一组操作的断路器编号、名称和操作状态。

对图 1 所示系统, 经对运行方案排序后, 前几个方案有相同的  $P_{L\Sigma}$  和  $Q_{L\Sigma}$ ; 功率越限支路数  $N_S$  为 0; 电压越限节点数  $N_V$  随设定的电压上、下限而变化; 主要的区别在于功率损耗和开关操作次数。所以实际排序时, 不考虑  $N_V$  和  $P_V$ ; 并考虑到计算误差的影响, 在对  $P_{L\Sigma}$ 、 $Q_{L\Sigma}$  进行数值比较时不计小数位。

### 2.3 降阶枚举的基本思路

为了进行网架优化, 先将所有可以投运的元件(状态为 1, 2 和 10)全投运; 然后依次断开一个或多个断路器形成满足要求的运行方案, 即降阶枚举集; 最后计算各方案的性能指标并对方案排序。

对于降阶枚举集的形成有两种可选方法。

第一种方法是按照图论理论形成全枚举集, 然后按运行约束删去不满足的方案。该方法比较直观, 但存在计算壁垒问题。当断路器数为  $N$  时, 全枚举集可能有  $2^N$  个运行方案。不论是全枚举集的形成, 还是对方案的简单评估都将需要不可接受的计算时间。在线应用中不易采用。

第二种方法是从系统的实际运行特点出发形成降阶枚举集。如果将图 1 系统中允许的内部小环网看作运行约束, 可近似认为该 110 kV 系统应在满足各种运行约束的前提下开环运行。因此, 先按图论的方法确定所有的环, 每个环都解开时即形成开环运行。各环中依次断开不同的断路器即形成降阶枚举集。详述于后。

### 2.4 环的确定与简化

采用图论中的方法, 按照元件两端的节点编号可以快速地确定出网络中的所有环。这些环要么以两个电源母线为起末点(类似于双电源环), 要么为网络中的独立环。考虑实际因素, 可删去相当一部分环。

(1) 当环中含有两台变压器, 且在中压或低压侧联络时, 断开中、低压母线联络断路器(状态设为 3), 删去该环, 以避免高压侧解列而中低压联络;

(2) 按变电站负荷大小确定变压器的经济运行方式, 即负荷低于经济运行门槛值时断开一台

变压器的断路器, 否则合上变压器各电压侧的母联断路器;

(3) 当一个环中含有一组平行线路中的两条线路时, 删去该环, 即删去完全由平行线路引起的环;

(4) 当两个环中分别含有一组平行线路中的一条线路, 且其它元件相同时, 删去两个环中的任意一个, 即删去由平行线路引起的相似环;

(5) 当一个环中仅含一条线路时, 表示双电源间的直接联络, 若按运行要求不允许, 则删去该环, 并断开相应断路器(状态设为 3)。

经以上处理后, 去掉已不再构成回路的环, 从而使环数大量减少。在图 1 系统的主运行方式下, 此时只剩下 7 个环, 然后标识每个环中可用于断开环网的断路器, 以备后用。

### 2.5 降价枚举法的实现

先将状态为 1, 2, 10 的元件全投运, 并断开在 2.4 节中状态设为 3 的元件, 然后从每个环中断开一断路器, 形成一个运行方案。共有运行方案 1 100 多个, 仍显得太多。

对每一运行方案进行如下处理:

(1) 考虑继电保护约束。例如, 当两回宛陈线均投运时, 需断开陈 110 kV 母联。所有继电保护约束由人机界面预先输入。

(2) 当断开双回平行线路中的一条时, 需同时断开另一条。

(3) 对该运行方案按图论方法划分子系统。由于图 1 中有多个电源母线, 常常得到多个相互独立的子系统, 但真正有用的为 1 或 2 个子系统, 其余为独立电源母线。

(4) 计算该运行方案下的总负荷, 即各子系统负荷之和。当总负荷量小于上一运行方案时, 舍去该运行方式。

(5) 对各子系统进行准确的潮流计算, 计算各性能指标, 确定需进行的开关操作和各元件上功率, 各母线电压, 以备图形显示用。

以上各步骤中, 主要计算量在于(5)中的潮流迭代计算。由于采用(4)中的总负荷比较, 舍去了大量的不合理方案。

在图 1 系统的主运行方式下, 尽管 7 个环共形成 1 100 多个方案, 但能进行步骤(5)准确计算的仅 106 个。在图 1 系统的其它运行方式下, 试算表明, 能进行(5)步准确计算的方案数约在 40 到 180 之间。

试算表明, 在步骤(4)的总负荷比较时, 应略

去有名值表达下的小数位, 以略去状态估计所提供数据中的误差影响。

步骤(4)中仅保存从当前运行方式需操作的断路器而非全部元件状态。对每一运行方案而言, 操作的断路器数少则几个, 多则十几个, 便于存贮。

全部计算完成后, 按性能指标对各方案排序, 提供当前运行方式及前 4 个最优方案。

### 3 算例

在图 1 所示的 110 kV 系统中, 共含有两个外部电源和两个内部电源, 13 个 110 kV 变电站, 4 组平行线路为火岗、火宛、宛陈和宛张线。枣林、罗庄站从两回宛陈线上“T”接引出; 独山站从两回宛张线上“T”接引出。枣林、罗庄、张衡为桥式接线。

12 个继电保护约束条件中, 由线路运行状态决定变电站高、中、低压母联断路器的运行状态。其中, 2 个约束对应于陈庄站, 4 个对应于枣林变, 4 个对应于罗庄站, 2 个对应于张衡站。

从数据采集系统得到的相关信息包括: 支路(元件)数 622 个, 节点、支路功率遥测量 194+71 个, 遥信量 352 个, 最大节点编号为 1 579。状态估计、故障诊断、人机界面输入等功能模块提供了当前运行方式下各元件的状态和各节点负荷值, 以及故障元件、检修元件、保护约束、元件参数等。对于无远动遥信传送的某些隔离开关值, 由人机界面输入。

在图 1 所示的当前运行方式下进行网架优化。降阶枚举过程中共形成 7 个环, 由这些环生成 1 100 多个运行方案, 经预处理后仅对 106 个方案进行准确计算。所得结果列于表 1。相应断路器操作列于表 2。其中, 方案 1 为当前运行方式, 通过宛北变与外部系统相联; 方案 2 为第一优化方案; 其它 3 个为较优方案。

表 1 当前运行方式和前 4 个优化方案

Tab 1 The current mode and the first four schemes

| 项目                       | 方案 1  | 方案 2  | 方案 3  | 方案 4  | 方案 5  |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{L\Sigma}/MW$         | 274.2 | 274.2 | 274.2 | 274.1 | 274.2 |
| $Q_{L\Sigma}/Mvar$       | 95.3  | 95.3  | 95.7  | 95.3  | 95.4  |
| $\Delta P_{\Sigma}/MW$   | 3.657 | 3.633 | 3.762 | 3.825 | 3.882 |
| $\Delta Q_{\Sigma}/Mvar$ | 18.91 | 17.31 | 17.78 | 17.95 | 18.21 |
| 电压越限节点数                  | 6     | 8     | 8     | 8     | 10    |
| 最大电压偏移/%                 | 7.46  | 7.65  | 7.65  | 7.65  | 7.65  |
| 功率越限支路数                  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 越限量/MVA                  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| 操作断路器数                   | 0     | 4     | 6     | 6     | 6     |

表2 操作的断路器

Tab 2 Operated Breaks

|              | 应合断路器           | 应开断路器           |
|--------------|-----------------|-----------------|
| 方案1 (当前运行方式) |                 | —               |
| 方案2          | 张112, 张102      | 岗111, 张100      |
| 方案3          | 张112, 张102, 蒲路2 | 岗111, 张100, 火路1 |
| 方案4          | 张112, 张102, 陈孔2 | 岗111, 张100, 岗孔1 |
| 方案5          | 张112, 张102, 建滨1 | 岗111, 张100, 陈滨1 |

表1中, 各方案的总负荷量基本一致, 主要的区别在于损耗的大小. 第一优化方案(方案2)的损耗低于当前运行方式(方案1), 方案3到方案5的损耗高于当前运行方式. 结合表2, 方案2是在方案1的基础上依据变电站负荷大小将张衡站改为两台主变运行, 将靳岗站改为一台主变运行. 方案3~5中则进一步分别用蒲路线代替火路线、陈孔线代替岗孔线、建滨线代替陈滨线, 尽管损耗有所增加, 仍提供了备选的可能运行方式.

对其它未列出方案的考察表明, 各方案均符合实际系统情况.

由于编程中稀疏技术的充分采用, 在CPU速度为2G的微机, 整个网架优化的计算需30s左右, 能满足在线经济分析的要求.

#### 4 结论

本文以城市高压电网为对象, 充分利用网架

运行的实际特点和各种运行约束, 大幅度降低了可能运行方案的枚举数, 从而实现了降阶枚举法在网架优化中的应用. 分析和试算均表明, 该方法具有相当的可靠和有效性, 能够满足中小型城市高压电网在线经济分析的要求. 所提思路已成功应用于“城市电网智能决策支持系统”中电网事故后恢复方案、当前运行方式以及将来任一时刻的最优网架运行方案的确定.

#### 参考文献:

- [1] 黄武钟, 钟丹虹, 孔德键, 等. 改进的遗传算法在汕头电网规划中的应用[J]. 广东电力, 2001, 14(5): 8~11.
- [2] 刘学东, 王磊, 余耀. 最优潮流改进简化梯度法的研究与应用[J]. 山东电力技术, 2003, 129(1): 19~22.
- [3] 姚诸香, 李庆庆, 郭玉金, 等. 带惩罚项的无功优化模型与算法[J]. 电力系统自动化学报, 1998, 10(3): 39~44.
- [4] 张喜林, 李芬. 大城市次输电网优化潮流[J]. 中国电力, 2003, 33(5): 48~49.
- [5] 段晓军, 刘明波. 模糊集理论在电力系统优化潮流中的应用综述[J]. 电网技术, 1998, 22(7): 54~57.
- [6] 杨丽徙, 王金凤, 陈根永. 基于GIS和Tabu搜索的配电网优化规划[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(3): 75~77.

### On-line Optimization of the Operating Configuration for Urban High-voltage System

WANG Ke-wen<sup>1</sup>, LIU Xiang-li<sup>1</sup>, TSE Chi-tung<sup>2</sup>, HU Jin-lei<sup>1</sup>

(1. College of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

**Abstract:** Based on the characteristics of the urban high-voltage power system, the reduced order enumeration approach is applied to on-line determination of the optimum operating mode for urban power network configuration. The operating states of breaks are represented by integer variables, the combination of all break states forms the full enumeration set. With the consideration of various practical constraints, such as the relay protection constraints, the number of system operating mode is largely reduced. Therefore, the optimum result and the computational speed is obtained by the accurate computation for only limited number of system modes. In the “intelligent supporting system for urban power systems”, this approach has been used, respectively, for the restore scheme determination after a system fault, the current system mode optimization, and any future system condition analysis. The effectiveness of the discussed approach is tested by the application in the Nanyang urban power system.

**Key words:** urban power system; on-line; optimization; enumeration approach