

# 结合灵敏度分析的城市高压网架在线优化

杨建伟, 王克文

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 从城市高压网架的实际特点出发, 在降阶枚举法的基础上, 引入灵敏度指标, 进行城市高压电网最优运行方式的在线确定计算。由所有开关状态的组合构成电网可能运行方式的枚举集, 考虑继电保护等各种实际运行约束, 大幅减少电网的运行方式。对有限数目的运行方式根据灵敏度指标排序, 依次计算各方案的性能参数, 确定最终的优化方案, 保证了结果的最优性, 计算的快速性。在城市高压电网的试运行, 表明该算法的有效性和实用性。

**关键词:** 城市电网; 优化; 枚举法; 灵敏度; 在线

## On-line optimization of the urban high-voltage system combined with sensitivity analysis

YANG Jian-wei, WANG Ke-wen

(School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** From the actual characteristics of the urban high-voltage power system and based on the reduced order enumeration approach, the sensitivity coefficient is introduced to on-line determination of the optimum operating mode for urban power network configuration. The combination of all break states forms the full enumeration set, and with the consideration of various practical constraints, such as the relay protection constraints, the number of system operating mode is largely reduced. According to the sensitivity of indicators, the performance parameters of the only limited number of system modes are accurately calculated in sequence, and the final optimization program is obtained to ensure the optimum result and the computational speed. The effectiveness of the discussed approach is tested by the application in Yuncheng urban high-voltage power system.

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

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)08-0059-04

## 0 引言

网架优化是一个多目标、多阶段、包括大量不确定因素的离散、非线性受约束的混合整数规划问题<sup>[1]</sup>。优化计算方法已广泛应用于电力系统的规划和运行分析<sup>[2-8]</sup>, 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>[3-8]</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。为了便于优化模型的求解, 在计算精度允许的前提下, 可将整型变量用连续变量近似表达<sup>[3-4]</sup>。作为在线分析软件, 应具有较强的实用性, 适应多个子网络的处理, 满足算法的可靠性和计算的快速性, 同时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, 准确计及了继电保护配置、平行运行

线路、并列运行变压器等各种约束条件, 利用电网运行的实际约束大幅度减少了枚举数目, 进而在枚举法<sup>[9]</sup>的基础上结合灵敏度分析, 引入支路导纳系数, 任一支路导纳系数的变化将影响到节点电压, 进而改变平衡点的有功注入功率, 根据平衡点有功注入对支路导纳系数的灵敏度, 计算各方案的性能指标, 形成优化运行方案, 从而完成算法的在线尝试, 并保证了结果的准确性和全局最优性。

## 1 网架优化的降阶枚举法

### 1.1 元件设置

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。并需标注出平行线路。各类元件数目最多的是隔离开关, 其次是断路器。网架优化算例中涉及到的元件总数约为 900 多个。所开发的“城市电网智能决策支持系统”<sup>[10]</sup>, 对在线采集来

的数据经状态估计等纠错功能模块处理后,为网架优化提供了各元件的运行状态、母线电压和节点、支路功率,并删除了大量不需要的多余数据。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,状态 -10、10 和检修状态 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。

### 1.2 性能指标

网架优化的目的是在众多可行的运行方案中确定最合理的运行方式。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  $N_V$ ,最大电压越限量  $P_V(\%)$ ,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  $N_k$ 。

采用降阶枚举法,该问题转化为对各运行方案的灵敏度指标进行排序计算,提供前几个方案供运行人员参考。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。

### 1.3 降阶枚举的基本算法

先将所有可以投运的元件(状态为 1, 2 和 10)全投运,系统中允许的内部小环网看作运行约束,近似认为该 110 kV 系统在满足各种运行约束的前提下开环运行。采用图论的方法,按照元件两端的节点编号,快速地确定网络中的所有环。再把每个环都解开,形成开环运行。解环时,按照灵敏度大小依次断开不同的断路器,形成降阶枚举集。

网络中的环以两个电源母线为起末点(类似于双电源环),或为网络中的独立环。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。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) 删去完全由平行线路引起的环。当一个环中含有一组平行线路中的两条线路时,删去该环。

(4) 删去由平行线路引起的相似环。当两个环中分别含有一组平行线路中的一条线路,且其他元

件相同时,删去两个环中的任意一个。

(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)。

经过上述处理后,在算例系统的主运行方式下,环网大量减少,仅剩 25 个。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)投运,并断开状态为 3 的元件,标识出每个环中可用于断开环网的断路器。然后按照灵敏度大小,从每个环中断开一个断路器形成满足要求的运行方案。对于每一运行方案做如下处理:

(1) 考虑继电保护约束。

(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。由于算例中有多个电源母线,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) 计算该运行方案下各子系统的负荷之和,即总负荷。如果总负荷小于上一运行方案时,就舍去该运行方式。

(5) 计算平衡点有功注入对某一支路导纳系数的灵敏度。按照灵敏度的大小排序,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的功率、各母线电压,以备图形显示用。

上述步骤(4),保存的仅是从当前运行方式切换到新运行方式所需操作的断路器,而非全部的元件状态。经过(4)中的总负荷比较,舍去了大量的不合理方案。主要计算量在步骤(5)的潮流迭代计算。按灵敏度大小依次计算各方案的性能指标,再进行排序,提供当前运行方式及前 4 个最优方案。

## 2 灵敏度分析

基于在改进粒子群优化算法引入收敛因子  $K$  的思想,本文在直角坐标系的牛顿-拉夫逊法潮流计算中,引入支路导纳系数  $K_{ij}$ ,对注入节点  $i$  的有功  $P_i$  表达式将有如下的形式:

$$P_i = \sum_{j=1}^n K_{ij} [e_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)] \quad (1)$$

任一支路导纳系数  $K_{ij}$  的变化将影响到节点电压,进而改变平衡点的有功注入功率,平衡点有功出力直接反映了网损的大小。因此,可引入支路导纳系数,选取节点电压作为中间变量,确定平衡点功率  $P_s$  对第  $ij$  条支路导纳系数  $K_{ij}$  的灵敏度:

$$\frac{\partial P_s}{\partial K_{ij}} = (e_s^2 + f_s^2)G_{ss} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^{2n} \frac{\partial P_s}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial K_{ij}} \quad (2)$$

其中： $\partial P_s / \partial X_i$  为平衡点有功功率对节点电压的一阶导数。将潮流计算修正方程式中的雅可比矩阵扩展到包含平衡节点，可得  $\partial P_s / \partial X_i$  的值。 $\partial X_i / \partial K_{ij}$  为节点  $i$  的电压对第  $ij$  条支路导纳系数  $K_{ij}$  的一阶导数。将潮流计算中的节点功率平衡方程式两侧对支路导纳系数  $K_{ij}$  求导得：

$$\mathbf{T} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{D}_k \quad (3)$$

其中： $\mathbf{T}$  是第  $2k$  个元素为  $\partial P_s / \partial K_{ij}$ ，其余元素为 0 的列向量； $\mathbf{J}$  是潮流计算中的雅可比矩阵； $\mathbf{D}_k$  是由  $\partial X_i / \partial K_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, 2n-2$ ) 构成的列向量。由式 (3) 可得：

$$\mathbf{D}_k = \mathbf{J}^{-1} \cdot \mathbf{T} \quad (4)$$

显然，节点电压  $X_i$  对  $K_{ij}$  的一阶导数为  $\mathbf{J}^{-1}$  的第  $2k$  列与  $\partial P_s / \partial K_{ij}$  的乘积。需要计算的仅是  $\mathbf{J}^{-1}$  中有限数量的相应列。因此，可对现有的牛顿法潮流计算程序稍加修改，保存在对修正方程式进行高斯消去过程中的某些元素值，形成相应的类似于快速分解潮流计算中的因子表；利用因子表技术的快速前回代计算  $\mathbf{J}^{-1}$  中的相应列，即  $\mathbf{D}_k$ 。

求解所有的灵敏度数值时， $\mathbf{J}$  阵不变。采用因子表技术，所有灵敏度计算量接近于一次完整的高斯消去<sup>[11]</sup>，从而保证了算法的快速性。

### 3 优化算例

在运城电网的 110 kV 系统中，从数据采集系统得到的相关信息包括：支路(元件)数，节点、支路功率遥测量，遥信量和最大节点编号。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。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。

在当前运行方式下进行网架优化。将列向量  $\mathbf{D}_k$  代入式(2)可计算出平衡点功率  $P_s$  对第  $ij$  条支路导纳系数  $K_{ij}$  的灵敏度系数，再按照从大到小的顺序对灵敏度数值排序，结果列于表 1。

表 1 平衡点有功注入对节点导纳系数  $K_{ij}$  的灵敏度

Tab.1 Sensitivity of balance active power to admittance coefficient  $K_{ij}$

节点 $i$	节点 $j$	支路名称	电阻 /Ω	灵敏度值
877	826	143-闻喜新-汾闻 II 线	2.546 2	0.826 185 05
-491	504	051-闻化-闻化 3#主变	3.244 6	0.755 875 17
-364	382	057-城西-城西 1#主变	2.034 9	0.585 582 20
-363	381	057-城西-城西 2#主变	2.034 9	0.490 286 11
75	293	148-虚拟-丰乐线	2.239 8	0.412 638 69
-859	1 028	146-新绛站-新绛 2#主变	1.355 1	0.342 264 98
763	764	126-220 金鑫-金古线	5.823 2	0.240 286 25
-474	506	045-海鑫北-海鑫北 3#主变	1.758 9	0.196 393 13

注：表格中的负号表示变压器支路

对算例系统，搜索到 110 kV 环网 67 个，解环涉及的元件数 938 个。降阶后的 110 kV 环网 25 个，需准确计算的运行方式有 78 个。经对运行方案排序后，前几个方案有相近的  $P_{L\Sigma}$  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， $N_V$  为 0，与之对应的最大电压越限量  $P_V$  也为 0；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  $P_V$ 。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。根据灵敏度的排序试算每个运行方案，按性能指标再对各方案排序，输出优化结果。计算后的优化输出界面见图 1。



图 1 网架优化的输出界面

Fig. 1 Output interface of structure optimization

各运行方案的性能指标列于表 2。

方案 1 为当前运行方式，方案 2 为次优方案，后面 3 个为较优方案。各方案的总负荷量基本接近，主要的区别在于功率损耗的不同。方案 2~5 尽管损耗有所增加，但仍可作为备选的优化方案。

表 2 当前运行方式和前 4 个优化方案

Tab.2 Current mode and the first four schemes

项 目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
$P_{L\pm}/MW$	2 659.59	2 666.21	2 666.21	2 666.21	2 666.21
$Q_{L\pm}/Mvar$	4 348.82	4 956.62	4 956.39	4 956.40	4 956.38
$\Delta P_{\pm}/MW$	124.66	164.12	165.01	165.02	165.06
$\Delta Q_{\pm}/Mvar$	452.32	505.05	511.42	511.26	511.69
电压越限节点数	0	0	0	0	0
最大电压 越限量/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
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	81	79	79	81

### 4 结论

本文以城市高压电网为对象，利用网架的实际特点和运行约束，大幅度降低可能运行方案的枚举数，然后依据衡点有功功率  $P_s$  对第  $ij$  条支路导纳系数  $K_{ij}$  的灵敏度大小排序，计算各方案的性能指标，从而实现了灵敏度分析在网架优化中的应用。分析和试算表明，该方法具有较高的可靠性和有效性，在 Visual Fortran 编程中采用了稀疏技术，能够满足城市高压电网在线经济分析的要求，已被应用于“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] 王同文, 许文格, 管霖. 电力网的网架结构优化规划方法[J]. 继电器, 2005, 33 (21): 58-64.  
WANG Tong-wen, XU Wen-ge, GUAN Lin. Methods for Optimal Programming of the Electric Power Grid Structure[J]. Relay, 2005, 33 (21): 58-64.

[2] 任苹, 高立群, 王珂, 等. 基于混合粒子群优化的电网优化规划[J]. 东北大学学报, 2006, 27 (8): 843-846.  
REN Ping, GAO Li-qun, WANG Ke, et al. Transmission Network Optimization Planning Based on Hybrid PSO[J]. Journal of Northeastern University, 2006, 27 (8): 843-846.

[3] Sensarma P S, Rahmani M. A Comprehensive Method for Optimal Expansion Planning Using Particle Swarm Optimization[A]. in: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference[C]. New York(USA): 2002.1317-1322.

[4] 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.  
LIU Xue-dong, WANG Lei, YU Yao. The Research and

Application of Improved Simplifying Gradient Algorithm in the Optimal Power Flow[J]. Shandong Electric Power, 2003, 129 (1): 19-22.

[5] 金义雄, 程浩忠, 严健勇, 等. 改进粒子群算法及其在输电网规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 46-50.  
JIN Yi-xiong, CHENG Hao-zhong, YAN Jian-yong, et al. Improved Particle Swarm Optimization Method and Its Application in Power Transmission Network Planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4): 46-50.

[6] Coello C A, Pulido G T, Lechuga M S. Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8 (3): 256-279.

[7] Abido M A. Optimal Power Flow Using Particle Swarm Optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2002, 24 (7) :563-571.

[8] 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.  
ZHANG Xi-lin, LI Fen. Optimal Power Flow on Sub-transmission Lines in Large Cities[J]. Electric Power, 2003, 33 (5): 48-49.

[9] 王克文, 刘湘莅, 谢志棠, 等. 城市高压电网最优网架运行方式的在线确定[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2004, 25 (2): 59-62.  
WANG Ke-wen, LIU Xiang-li, XIE Zhi-tang, et al. On-line Optimization of the Operating Configuration for Urban High-voltage System[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2004, 25 (2): 59-62.

[10] 杨宛辉, 王克文, 等. 城市电网运行智能决策支持系统[J]. 继电器, 2004, 32 (14): 56-59.  
YANG Wan-hui, WANG Ke-wen, et al. Intelligent Decision-making Supporting System for Urban Power System[J]. Relay, 2004, 32 (14): 56-59.

[11] 王克文, 张建芬, 杨海晶, 等. 用灵敏度法确定变电站电容器组的在线投切[J]. 继电器, 2003, 31 (9): 15-19.  
WANG Ke-wen, ZHANG Jian-fen, YANG Hai-jing, et al. Sensitivity-based On-line Adjustment of Shunt Capacitors in Substation[J]. Relay, 2003, 31 (9): 15-19.

收稿日期: 2009-05-20; 修回日期: 2009-06-10

作者简介:

杨建伟(1978-), 男, 硕士研究生, 电气助理工程师, 主要从事电力系统经济运行的研究; E-mail:antyang2000@yahoo.com.cn

王克文(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事电力系统分析和稳定控制方面的研究。