

# 输电网理论损耗计算的改进方法

付浩, 周步祥, 陈实

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 电网能量损耗率是电力企业的一项重要综合性技术经济指标, 反映了电力网的规划设计、生产技术和运营管理水平, 因此理论损耗计算对于生产和管理具有重要的指导意义。目前基于潮流计算的输电网理论损耗计算方法已应用得十分广泛, 但实际的操作过程中还存在诸多问题。针对这些问题利用现有的技术手段, 就如何提高计算结果的准确性对整个计算过程进行了完整分析, 在设备信息的管理方式、原始数据的预处理和计算理论的合理性等几方面提出了改进方法, 以期提高输电网理论计算结果的实用性, 为实现生产管理的精细化提供可靠的支持。

**关键词:** 理论损耗; 线损计算; 输电网; 降损; 潮流计算

## Methods to improve the precision of calculation of power system line losses

FU Hao, ZHOU Bu-xiang, CHEN Shi

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Rate of power system energy losses is an important and complicated economic and technical index which reveals the level of programming, production and management of power system. So theoretical loss is usually used to guide the operation of the network. Now the calculation based on power flow is popular but there are still some deficiencies. To solve these problems, an integrated analysis is made to find out some methods to improve the precision of the result. According to that, improvements in both management and calculation are put forward. By the use of these new methods, the result of calculation is more credible.

**Key words:** theoretical line loss; line loss calculation; transmission network; loss reduction; power flow calculation

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)07-0028-04

## 0 引言

电网理论损耗计算可以鉴定电网结构及其运行方式的经济性, 查明损失过大的元件及其原因, 考核统计损耗的真实性, 辅助确定技术降损的措施, 提高电网运营的经济效益。我国“十一五规划”已经把节能降损提高到了前所未有的高度, 电力系统进行新一轮的降损改革是大势所趋。在这种情况下, 线损管理工作必将受到严格监察, 同样理论损耗计算也不能再流于形式。“准确、快速、智能化”将是未来理论损耗计算发展的方向, 作为最基础的一环, 计算的准确性是首要满足的。目前, 基于潮流计算的理论损耗分析已经应用得相当广泛, 本文也将在此基础上针对如何提高输电网理论损耗计算的准确度进行分析, 在具体问题的讨论中将指出, 上述目的的达到不仅仅是依靠更新的计算软件, 关键还在于管理水平的提高。

## 1 原始数据准备

从目前的情况来看, 原始数据的不准确是造成线损计算缺乏可靠性的关键因素。有资料显示, 原始数据不准确造成的误差占到了总误差的 82%~84%。可见提高理论损耗计算准确性的重点就是通过各种途径保证原始数据的真实可靠。

线损计算所涉及的原始数据可以归结为三类:

(1) 设备型号参数; (2) 电力元件模型及接线图; (3) 电网运行参数。对于线损计算来说线路、变压器、电容等元件的模型和接线图绘制程序已经相当成熟, 需要说明的是如何保证 (1)、(3) 两类数据的准确性。

### 1.1 集中管理设备信息

在设备资料管理方面, 大多数单位的现状是: 各个应用系统都建有独立的设备资料库, 系统的操作员不仅要完成本职的管理计算工作还要花大量时间进行设备资料的录入维护。这种情况很可能导致错误, 并降低工作人员的积极性。因此建议: 作为最基础的物资资料, 所有设备的型号参数以及其它相关信息应该统一存放在一个开放的服务器上,

该服务器由专职人员进行维护管理, 向所有应用程序比如 MIS、线损管理系统、供电能力评估系统等提供设备信息的查询接口。基础资料的集中管理可以大量减少重复性劳动, 保证数据的统一, 降低数据的错误率, 便于管理、更新和检查。

### 1.2 利用状态估计和不良数据的检测对测量数据进行预处理

电网运行参数包括代表日各节点的注入功率或电流、节点电压测量量以及支路开断状态。目前大部分省、地调都安装有具备 SCADA 功能的调度自动化系统, 该系统可定时采集电网运行的实时数据。如果线损计算程序能从该系统的通用接口读取所需数据, 则可给计算带来极大方便。但是管理上存在的一些问题可能造成应用程序无法接驳 SCADA。变通的方式是以微软的 EXCEL 进行中间过渡, 将数据导入线损计算程序。这要求两方系统都具有 EXCEL 的接口, 实际上这也应该是最基本的功能, 当然在电子表格的转换格式上需要进行必要调整。由于量测设备、转换器件、传送通道各环节以及量测非同时性、三相信息不同时性等因素, 实际量测量与真值之间存在误差甚至不良数据。把这些数据代入潮流计算有可能造成潮流不收敛。利用状态估计可以对实时数据进行检测滤波。估计误差的协方差阵为  $c=(H^T R^{-1} H)^{-1}$  其中  $R$  为测量误差方差的对角阵,  $H$  为测量方程组的雅可比矩阵。很显然测量量越多即冗余量越多,  $\det(H^T R^{-1} H)$  就越大,  $c$  的对角元素就越小即估计值同实际值的误差越小。选择适当冗余量可以减小估计误差并保证计算速度。如果状态估计的目标函数异常的大则说明存在不良数据, 可通过不良数据辨识排除这些数据, 并用其它测量值的估计值代替。对于人工进行测量的数据, 由于人员素质、测量非同时性等问题的影响更需要进行预处理, 以保证数据的有效。

### 1.3 几个容易被忽视的问题

1) 电阻的温度修正。设备型号参数标称的导线电阻率通常是 20℃ 时的值。根据《电力网电能损耗计算导则》(DLT 686-1999) 要求, 在进行理论损耗计算时需要对导线电阻进行温度校正。校正公式可以依据  $R_w=R_0(1+\alpha(T_w-20))$ , 其中  $T_w$  为导线的工作温度,  $R_w$  为  $T_w$  温度下的电阻,  $R_0$  为 20℃ 的电阻,  $\alpha$  为电阻的温度系数 (通常取 0.004)。很多时候理论损耗计算忽略了电阻的温度修正。假设线路的工作温度为 60℃ (持续工作温度一般限制在 70~80℃ 以下), 按照修正公式  $R_w$  将比  $R_0$  增大 16%, 可见这种忽略将造成很大的误差。

2) 变压器分接头信息的正确录入。变压器分

接头的选择直接关系到导纳矩阵相关元素的大小, 影响无功潮流和节点电压, 同时影响着变压器空载损耗计算 (公式可参考《电力网电能损耗计算导则》)。因此必须正确录入, 而不能随意忽略。

3) 正确处理补偿电容。目前的线损计算中存在这样一种情况, 即把并联电容的补偿量直接与负荷无功抵消。并联电容的补偿量用测量的电压值或平均电压进行计算。无论这种做法导致的误差是否明显都不妥。首先, 这使得损耗计算结果不完整, 不能反映补偿电容的损耗情况; 其次, 这种做法将使程序无法获得真实的无功负荷资料, 不利于维持历史数据库的可靠性, 而节点负荷历史数据可作为分析负荷对线损影响的有力资料。

## 2 潮流计算

目前, 使用得最多的潮流计算方法是牛顿-拉夫逊迭代法及其各种改进法。下面就牛拉法中的一些问题进行讨论。如前所述, 导致误差的原因主要在原始数据, 因此关于潮流计算更关心的是如何得到一个可行解。

### 2.1 制定合适的收敛误差

假设元件模型和原始数据完全符合实际, 潮流结果的准确性则基本上可以由收敛误差表示。但是因为元件模型中作了大量近似处理, 而牛顿迭代法本身就是将非线性方程线性化后的近似计算, 因此对于理论线损计算, 潮流的收敛误差不必取得过小。只要能保证计算结果可行即可。这样做也可以提高计算的速度和程序的数值稳定性 (如果计算使用双精度变量则不存在数值问题)。

### 2.2 潮流的收敛问题

因为代表日电网通常都处于正常运行状态下, 同时运行数据经过预处理后其准确性可以得到保证, 所以系统运行状态导致潮流病态的可能性很小, 如果出现了不收敛的情况首先还是应该考虑元件参数的错误以及 PQ、PV 和平衡节点的设置是否适当。

在计算程序方面, 应该尽量提高算法的适应性和收敛范围。目前比较成熟的牛顿法改进型是考虑负荷电压静特性的最优乘法。最优乘法利用了潮流方程二次型的特点, 结合非线性规划的思路对潮流方程线性化产生的误差进行了修补, 合理的修正了迭代的步长, 不仅提高了潮流计算的收敛性, 也可保证计算永不发散。而将恒功率负荷处理成恒阻抗、恒电流、恒功率模型的综合可以提高潮流的收敛性, 克服重负荷节点对潮流的不利影响。模型如下:

$$P_{is} = A_1 V^2 + B_1 V + C_1 \quad (1)$$

$$Q_{is} = A_2 V^2 + B_2 V + C_2 \quad (2)$$

其中:  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$  分别是恒定阻抗、恒定电流和恒定功率。负荷模型的参数需要根据负荷数据进行归纳总结, 这些工作应该由计划部门负责进行, 而不是线损管理员。由于恒定电流模型会破坏潮流方程的二次型特征, 为了简化程序可以去掉该部分, 把恒定阻抗部分在形成导纳矩阵时, 以接地支路的形式并入电网之中。这样做维持了方程的二次型特点, 简化了计算, 并且仍然可以克服重负荷造成的收敛问题。

另外初值对于潮流的收敛也很重要, 一般采用平起即可。针对小阻抗支路可以设定一个阈值进行辨识, 把确定的变压器小阻抗支路的两端节点电压初值按照其非标准变比进行限定以保证迭代收敛。如图 1 所示, 可以设  $V_i^{(0)} = k V_j^{(0)}$ 。



图 1 小阻抗变压器支路

Fig. 1 Transformer branch with small impedance

由于理论损耗要计算多个测量点的潮流, 常常是同一运行方式下的多个点连续计算。如果一次潮流计算成功收敛后, 显然可以把该结果作为下一点的初值, 这样处理可以大幅度减少计算时间。

### 2.3 PQ、PV 以及平衡节点的设置

对于损耗计算中的潮流, 并不需要涉及复杂的 PQ、PV 逻辑转换。通常负荷节点都设为 PQ 节点。为了提高收敛性可在大量实测数据的基础上建立准确的负荷电压静特性模型替代恒功率模型。边界节点可处理为恒功率的 PQ 节点, 尽管实际情况可能是外部系统向内部供电。发电机节点合并到高压母线上, 后者作为恒功率、恒电压的 PV 节点。平衡节点选在出线较多, 负荷较重的电源母线上, 这样做有利于提高潮流的收敛性能。

由于线损管理的分级体制可能造成地调级的电网呈孤岛状态, 且孤岛的形势随着运行方式的变化而变化。这就必然涉及多平衡节点的计算。一种解决方法是对各岛分别形成网络拓扑, 选择各自的平衡节点进行计算。这样做的问题是每次运行方式的改变都意味着必须重新形成若干孤岛的拓扑。另一种方法是设置若干个  $V \theta$  节点, 同时形成网络拓扑并同时计算。这样做首先要确保各岛找准自己的平衡节点, 其问题是将大大增加方程组的阶数, 造成大量零元素, 且迭代次数由收敛性最差的岛决定, 增加了计算量。究竟采取何种方法需要根据岛的数

量、大小等因素进行合理选择。

## 3 损耗计算

### 3.1 代表日损耗计算

基于 24 点潮流的计算结果, 目前常用的代表日损耗计算方法是设各测量时刻间电流维持不变, 即用柱状图去近似替代损耗曲线。这里存在两个问题: 1) 24 点是否一定要平均分配; 2) 对于在 1 小时内负荷变化很大的情况, 采用柱状图的偏差有多大。

第一个问题的回答有赖于对各个节点的日负荷曲线进行仔细的研究。负荷的类型决定了负荷曲线的基本特性。负荷类型包括: 重工业负荷、轻工业负荷、农村加工负荷、市政生活负荷等。对于地调电网来说节点负荷的分类会相当明显, 对于省调更多的情况可以考虑为综合负荷。根据负荷曲线, 在变化大的时段多分配测量点, 这样有助于提高用离散数据逼近曲线的效果, 提高计算结果的准确性。

第二个问题从图形可以得到直观的认识。不过全网的损耗值不仅同各个节点负荷相关, 也同发电机注入功率以及负荷、电源的分布相关, 要精确分析损耗值同各节点负荷、发电机功率的函数关系非常困难。但是考虑到电流总是连续变化的, 并且在一定时间内保持固定变化趋势, 因此在计算测量间隔的损耗时采用线性变化的损耗值替代恒定损耗可以更好的逼近实际曲线, 计算也相当简单。

基于以上两个问题的讨论, 对导线损耗计算的公式进行改进得到下面的计算公式:

$$\Delta A_i = \frac{3}{2} (I_i^2 + I_{i+1}^2) R t_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \Delta A_i \quad (4)$$

公式 (3) 表示第  $i$  和  $(i+1)$  个测量点之间的损耗,  $t_i$  表示第  $i$  和  $(i+1)$  个测量点之间的时间间隔。公式 (4) 表示从第 1 个测量点到第  $m$  个测量点的损耗总和。其它元件的可变损耗计算公式做类似改进。当然, 这种修改有多少实际意义, 还需要计算的验证。

### 3.2 月、年损耗计算

按照导则, 全月线损电量可表示为:

$$\Delta A_m = [\text{代表日可变损耗} \times (\frac{\text{月供电量}}{\text{代表日供电量} \times \text{当月天数}}) + \text{代表日不变损耗}] \times \text{当月天数} \quad (5)$$

以日平均供电量与代表日供电量比的平方作为损耗修正系数相当粗略。因为 (1) 由于各种原因, 各日的供电量同平均供电量可能有较大差异; (2) 电网中的电流并不是简单的同供电量成正比; (3)

不同运行方式和负荷分布下, 即便供电量相同, 损耗也不同。因此使用上述公式进行计算得出的结果其可靠性值得商榷。

现在调度自动化系统的功能可以实现提供每天的负荷测量数据。充分利用该条件, 可以对整月数据进行收集, 按照下列条件进行分类: (1) 运行方式; (2) 测量时刻。根据分类得到不同运行方式下各测量时刻的负荷值分布。为了避免分布过于复杂, 接近的负荷值可以近似处理为某一个标准值, 标准值的确定要根据数据进行合理划分。用各标准值与代表日负荷比值的平方修正代表日测量时刻可变损耗, 再加上不变损耗后乘以归结为该标准值的负荷值个数得到某运行方式下, 某测量时刻在某负荷标准下的损耗。最后把不同运行方式和测量时刻的损耗值相加即为月总损耗。用表 1 可以清楚地表示如何进行分类。

表 1 详细的负荷分类方式  
Tab.1 Method to sort the loads

运行方式		方式 1		方式 2	
测量时间		负荷值	近似标准	负荷值	近似标准
时刻	日期				
t1	d1	2.55	2.54	-	-
	d2	2.54	2.54	-	-
	d3	2.53	2.54	-	-
	d4	2.60	2.60	-	-
	d5	2.61	2.60	-	-
t2	d1	2.61	2.62	-	-
	d2	2.62	2.62	-	-
	d3	2.63	2.62	-	-

计算公式可以表示为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^h [\Delta A_{Rij} \left(\frac{L_{ijk}}{L_{ij}}\right)^2 + \Delta A_{Gij}] \cdot D_{ijk} \quad (6)$$

其中:三个累加符号依次表示从第 1 种运行方式到第  $n$  种运行方式、从第 1 个测量点到第  $m$  个测量点、从第 1 个负荷标准到第  $h$  个负荷标准。 $L_{ijk}$  表示第  $i$  种运行方式下第  $j$  个测量时刻的第  $k$  个负荷标准值,  $L_{ij}$  表示代表日第  $i$  种运行方式下第  $j$  个测量时刻的负荷值,  $\Delta A_{Rij}$ 、 $\Delta A_{Gij}$  分别表示代表日第  $i$  种运行方式下第  $j$  个测量时刻对应的可变损耗和不变损耗。 $D_{ijk}$  表示归结到第  $i$  种运行方式下第  $j$  个测量时刻第  $k$  个负荷标准值的负荷值数目。

如果代表日没有相应运行方式的数据, 可用其它方式代替, 但最好能对主要运行方式都选取代表日进行一次计算。关于年损耗可以用同样的方式处理。以上近似计算的基础假设是计算日的各节点负荷曲线和各发电机功率曲线形状与代表日相同, 即

便假设同实际有一定差异月损耗值也必然比公式(5)的计算结果更准确可靠。如果能将分类细化, 进行更细致的多代表日计算, 将会大大提高年理论损耗计算的准确性。

## 4 结束语

以上分析了如何提高输电网理论损耗计算的准确性, 具体的工作还需要在实践中改进完善。在节能降损的旗帜之下线损计算的要求正日益提高, 不仅局限在能获取整个网络的损耗和损耗率, 还要求获取各电压等级的损耗和损耗率、各片区的损耗和损耗率。按照电力企业精细化的发展方向, 理论线损计算各个环节的准确性必然会受到更严格的考验。要达到目标, 不仅仅需要更新更快的程序, 关键还是要提高管理人员的素质, 整合优化现有的人力物力, 加强企业的信息管理, 加速提高企业的自动化信息化水平。理论损耗计算不是一朝一夕的工作, 而是一个长期的过程, 全面积累和整理有效数据将是提高理论计算准确性的基石。

## 参考文献

- [1] DT/686-1999, 电力网电能损耗计算导则[S]. DT/686-1999, Guide of Calculation of Grid Energy Loss[S].
- [2] 许汉平, 侯进峰, 施流忠, 等 基于状态估计数据的电网线损理论计算方法[J]. 电网技术, 2003, 27(3):59-62. XU Han-ping, HOU Jin-feng, SHI Liu-zhong, et al Calculation Method of Power System Line Losses Based on Data of State Estimation[J]. Power System Technology, 2003, 27(3):59-62.
- [3] 宋奕冰, 娄北. 基于新的数据处理方式的理论线损计算[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(5):15-17. SONG Yi-bing, LOU Bei. Theoretical Comutation of Network Loss Based on New Data Processing Method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(5):15-17.
- [4] 鲍海, 马千. 电网线损的物理分布机理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21):81-86. BAO Hai, MA Qian. Physical Distribution Mechanism of Network Loss for Power System[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(21):81-86.
- [5] 姚玉斌, 鲁宝春, 陈学允. 小阻抗支路对牛顿法潮流的影响及其处理方法[J]. 电网技术, 1999, 23(9):27-31. YAO Yu-bin, LU Bao-chun, CHEN Xue-yun. A Method to Deal With the Effect of Small Impedance Branches to Prevent Divergence in Newton Raphson Load Flow[J]. Power System Technology, 1999, 23(9):27-31.

(下转第 36 页 continued on page 36)

- of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 1-7.
- [9] Ejebe G C, Waight J G, S-N M, et al. Fast Calculation of Linear Available Transfer Capability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 1112-1116.
- [10] Peterson N M, Tinney W M, Bree D W. Iterative Linear Power Flow Solution for Fast Approximate Outage Studies[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1972: 2048-2056.
- [11] 王良缘, 等. 电力市场中基于内点法的含暂态稳定约束的最大可用输电能力计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 28-33.  
WANG Liang-yuan, et al. Calculation of Available Transfer Capability(ATC) Taking into Account Transient Stability Constraints Based on Interior-Point Solution in Electricity Market[J]. Proceedings of the CUS-EPSSA, 2004, 16(1): 28-33.
- [12] 陈妍, 黄民翔. 基于信赖域内点法的静态 ATC 计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 71-74.  
CHEN Yan, HUANG Min-xiang. Static ATC Calculation Based on a Trust Region Interior-Point Method[J]. Proceedings of the CUS-EPSSA, 2005, 17(5): 71-74.
- [13] Karmarkar N K. A New Polynomial Time Algorithm for Linear Programming[J]. Combinatorica, 1984, (4): 373-395.
- [14] 赖炎连. 线性规划的 Karmarkar 方法[J]. 咸宁学院学报, 2004, 24(6): 1-3.  
LAI Yan-lian. Karmarkar Algorithm for Linear Programming[J]. Journal of Xianning College, 2004, 24(6): 1-3.
- [15] 赖炎连. 线性规划的 Karmarkar 方法(续)[J]. 咸宁学院学报, 2005, 25(3): 1-4.  
LAI Yan-lian. Karmarkar Algorithm for Linear Programming[J]. Journal of Xianning College, 2005, 25(3): 1-4.
- [16] 王良缘, 吴政球, 傅海燕, 等. 电力市场中基于内点法的含暂态稳定约束的最大可用输电能力计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 28-33.  
WANG Liang-yuan, WU Zheng-qiu, FU Hai-yan, et al. Calculation of Available Transfer Capability(ATC) Taking Into Account Transient Stability Constraints Based on Interior-Point Solution in Electricity Market[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2004, 16(1): 28-33.
- [17] 袁越, 久保川淳司, 佐佐木博司. 考虑暂态稳定约束的可用传输能力计算[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 34-39.  
YUAN Yue, Junji K, Hiroshi S. Available Transfer Capability Determination Considering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 34-39.
- [18] 李华强, 刘亚梅. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56-60.  
LI Hua-qiang, LIU Ya-mei. Voltage Stability Assessment for Saddle Node Bifurcation and Limit Induced Bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 56-60.

收稿日期: 2006-09-18; 修回日期: 2006-11-07

作者简介:

曾勇波(1978-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: bullfinch\_zeng@126.com

李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及优化问题研究;

范勇(1973-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题。

(上接第 31 页 continued from page 31)

- [6] 张尧, 宋文南, 贺家李. 临近电压稳定极限的潮流和静稳极限算法[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(5): 17-23.  
ZHANG Yao, SONG Wen-nan, HE Jia-li. An Algorithm for The Load Flow Solution Close to the Voltage Stability Limit and the Determination of Static Voltage Stability Limit[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(5): 17-23.
- [7] 张伯明, 陈寿孙, 等. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.  
ZHANG Bo-ming, SUN Shou-sou, et al. Advanced

Power Network Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.

收稿日期: 2006-11-03; 修回日期: 2006-12-06

作者简介:

付浩(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为调度自动化和计算机信息处理; E-mail: hefoly2000@163.com

周步祥(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向为调度自动化和配电网自动化;

陈实(1978-), 男, 硕士, 研究方向为调度自动化和继电保护。