

# 电网规划中的网络损耗评估算法的研究与应用

程秀娟<sup>1</sup>, 周步祥<sup>1</sup>, 廖烽然<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 烟台市供电公司, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对规划期电网信息不足及不确定性, 结合规划阶段高压、中压和低压配电网各自的特点, 在相关近似处理的基础上, 提出了适合各电压等级的理论线损率估算方法。特别是在中、低压配网中, 针对主干线不同负荷分布情况, 引入了损耗率修正因子法, 最大限度地克服了规划期电网信息匮乏、负荷分布模糊等制约因素, 为规划期线损率评估提供了一种实用性很强的方法, 对优化规划方案起到了一定的作用。

**关键词:** 损耗率修正因子; 线损率; 电压等级; 配电网规划

**Abstract:** Considering the insufficient information and the uncertainty of power grid in the planning period, the methods for estimating the line loss rate are presented based on the relevant approximation, combining with the features of high-voltage, medium-voltage and low-voltage distribution network in the planning stages. Especially regarding medium-voltage and low-voltage distribution network, a correction factor method for different load distribution of main line is proposed to overcome the restrictive factors such as insufficient data of power grid in the planning stage and fuzzy load distribution. The method provides a very practical way for the assessment of line loss in the planning period and plays a certain role to optimize the planning projects.

**Key words:** loss rate correction factor; line loss rate; voltage grade; distribution network planning

**中图分类号:** TM731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0014-05

## 0 引言

配电网线损率是电力部门一项综合性经济技术指标, 也是表征电力系统规划设计水平和电网经济运行的一项重要指标。因此, 现代配电网规划中对规划涉及各阶段目标年度都有综合线损率的规划目标要求, 故需要对配电网进行分电压等级理论线损计算, 同时这些指标对规划方案的选择起着非常重要的作用。鉴于配电网规划的灵活性、不确定性以及规划中理论线损指标的工程进度要求, 如何快速有效地计算出各种规划方案的线损水平指标, 成为电力规划工作者关心的问题。

目前, 传统的计算线损的方法有均方根电流法、平均电流法、结点等效功率法、潮流法等。由于这些算法都需要大量的结构和运行数据, 因此主要适用于现运行配电网线损的计算, 针对规划水平年简化和分电压等级组合方法的研究尚不多见<sup>[1-4]</sup>。由于规划中电网详细的接线和实际的负荷均不确定, 难以直接应用常规的理论线损方法进行计算。因此, 如何解决规划设计阶段馈线数据匮乏、负荷分布信息模糊、线

路上配电变压器分布不明等制约因素成为规划阶段线损计算的关键技术。

从配电网规划的实际应用角度出发, 根据规划已知的电网信息和按照满足规划所需计算精度的要求, 结合规划期配电网特点, 提出了分电压等级计算线损的简洁实用方法。特别是针对中低压配网结构比较复杂、分支线路多、规模大、相关电网参数难于获取等特点, 引入损失系数法, 采用基于配电变压器容量的等值电阻法, 并根据实际负荷分布规律引入了损失系数法修正线损率, 为估算规划年配网线损率提供了一种合理且实用的方法。

## 1 规划年线损率及其特点分析

线损率的计算不仅需要配电网的结构参数, 而且还需要大量的运行数据。而规划年不仅缺乏运行数据, 规划网络的结构数据也存在很大的不确定性。因此, 如何克服线损所需参数的匮乏性和网架的不确定性成为规划年线损率估算的关键。

在各规划年, 通过分区负荷预测可得到各 110 kV 变电站的最大负荷。同时, 通过对各 110 kV 变

站进行 10 kV 线路新增及改造规划, 可知各变电站 10 kV 出线数及路径。根据规划年可知的电网信息和满足规划所需计算精度的要求, 以某典型日为例分电压等级分析。

### 1.1 高压配网分析

规划年 35~110 kV 的网架结构相对确定、结构相对简单、数据容易收集, 各结点的负荷率和最小负荷率均比较高, 各结点的负荷曲线形状也较接近。除一些特殊支路 (如存在功率交换的联络线) 外, 根据其网架规划、分区负荷预测及运行方式, 利用结点等效功率用潮流计算方法算出的支路功率  $\Delta P_{\max}$  与支路的实际等效功率基本一致<sup>[5]</sup>, 且若干实例计算表明, 其误差控制在 5% 以内<sup>[5]</sup>。

表 1 规划年高压配网可知信息

名称	参数
最大负荷损耗功率	$\Delta P_{h \max}$
最大负荷利用小时数 /h	$T_{h \max}$
功率因数	$\cos \varphi$
最大负荷损耗小时数 /h	$\tau_{h \max}$
全社会总用电量 / $\times 10^8$ kWh	S

### 1.2 中压配网分析

中国中压配网虽然庞大, 但是一般都是辐射状网络。针对规划阶段馈线数据匮乏、实际负荷分布信息模糊、馈线详细接线不确定以及线路上配电变压器分布不明等制约因素, 现以规划网主干线为单元做以下近似处理。

(1) 根据对中压配网负荷预测, 可知中压配网最大总负荷  $P_{\max}$ , 假设在某种典型接线方式下, 负荷均匀分布到每条馈线上, 且馈线总条数为 Y, 则可知单条馈线的平均负荷量为

$$P_{l0} = P_{\max} / Y \quad (1)$$

(2) 假设规划设计中每条馈线采用配电变压器型号基本相同, 负载率基本一致 (一般考虑经济负载率为 0.6~0.7), 根据主干线负荷量可估算出每条馈线所带的平均配电变压器总容量及其台数。

根据以上分析便可估算出主干线单条馈线的功率损耗  $\Delta P_{l0}$ , 考虑次干线损耗引入修正系数  $\mu$  (一般取 0.8), 可得单条馈线损耗。

$$\Delta P_{l0} = \Delta P_{l0}' / \mu \quad (2)$$

(3) 假设规划水平年中压配网典型接线方式分区有 M 个, 由单条馈线损耗逐个累加便可得到整个中压配网的线损率。

### 1.3 低压配网分析

表 2 规划年中压配网可知信息

可知信息	分区典型接线
线路总负荷 /MW	$P_{h \max}$
线路主要型号	LGJ-XXX
线路条数	N
配变主要型号	如 S11(250 kVA)
线路平均配变台数	W
平均架空长度 /km	L
最大负荷利用小时 /h	$T_{h \max}$
功率因数	$\cos \varphi$
最大负荷损耗小时 /h	$\tau_{h \max}$

在低压配网这个电压等级上, 配电网要比中压配网复杂得多, 并且缺乏完整的、准确的线路参数和负荷参数。考虑到低压线的电量损失在全网损失中所占比例较小 (一般 0.4 kV 低压线损都只占总线损的 5% 以下)<sup>[5]</sup>, 所以用简化方法估算低压线损率对总线损的计算误差不会有明显的影响。因此规划年可以只估算典型台区线损率。先按照容量选取典型台区, 并计算各个容量下典型台区的平均线损率, 再用月供电量之和乘以平均线损率, 得出台区损耗, 最后将各组台区损耗汇总。

表 3 规划新建典型台区可知信息

可知信息	典型台区	
	低压主干线	低压次干线
线路主要型号	LGJ-XXX	LGJ-XXX
平均架空长度 /km	0.04	0.12
负荷性质	居照、商业、动力等	
公变总用户数	X	

## 2 高压配网线损率的评估

计算日假设在某种运行方式下, 对高压配网进行潮流计算便可知典型日的功率损耗  $\Delta P_{\max}$ 。然后根据最大负荷损耗时间法 (T- $\tau$  法) 来估算线损。假定负荷恒定为最大, 经过最大负荷损耗时间  $\tau_{\max}$ , 网络中损耗的电能与实际电网全年损耗的电能相等, 从而得到年线损电量及线损率。

$$\Delta P_{h, y} \% = \frac{\Delta P_{h \max} \times \tau_{\max}}{35/110 \text{ kV 公用网年供电量}} \times 100\% \quad (3)$$

$\tau_{\max}$  是最大负荷利用小时数和功率因数的函数  $\cos \varphi$ , 即  $\tau = f(T_{\max}, \cos \varphi)$ , 根据  $T_{\max}$  和给定的  $\cos \varphi$  查表可得  $\tau_{\max}$  的值。

## 3 中压配网线损率的评估

考虑到城网是单环网、N 供一备等, 农网大部分

是单负荷, 将中压馈线划分为城网和农网两种典型接线方式, 分别算出城网和农网主干线以及线路上所带的变压器的损耗, 累加可得整个中压的配电网损耗。

### 3.1 典型接线主干线的线路损耗估算

假设配电线路负荷沿线分布有一定规律时, 利用分散损耗系数法, 根据配电线路出口总的均方根电流、馈线首端负荷及沿线分布形式和主干线参数直接求出总损耗, 不必逐点进行计算<sup>[5]</sup>。

在满足实际工程计算精度的前提下, 采用不要求收集运行数据的基于配电变压器容量 (一般考虑经济负载率为 0.6~0.7) 的等值电阻法。馈线等值电阻和代表日均方根电流为 (推导略)。

$$R_{eq1} = \frac{\sum_{i=1}^m S_{Ni}^2 rL}{S_{N\Sigma}^2} \quad (4)$$

$$I_{ms} = \frac{0.6 S_{N\Sigma}}{\sqrt{3} U_N} \quad (5)$$

式中,  $S_{Ni}$  为通过第  $i$  段线路供电的配电变压器的额定容量 (kVA);  $S_{N\Sigma}$  为该条配电线路全部配电变压器的额定容量的总和 (kVA);  $U_N$  为线路额定电压;  $r$  为馈线单位长度电阻;  $L$  为馈线长度。

先假设整条馈线负荷集中分布于主干线末端, 可计算得功率损耗  $\Delta P_{L0}$ 。

$$\begin{aligned} \Delta P_{L0} &= 3 I_{ms}^2 R_{eq1} \times 10^{-3} \\ &= 0.6^2 \frac{\sum_{i=1}^m S_{Ni}^2 rL}{U_N^2} \end{aligned} \quad (6)$$

再根据规划年该馈线的实际负荷分布, 用线路末端集中负荷供电时的功率损耗乘以损耗率修正因子  $G_p$  来估算<sup>[6,7]</sup>, 可得该主干线实际的损耗为

$$\Delta P_L = G_p \times \Delta P_{L0} \quad (7)$$

式中, 末端集中分布时  $G_p = 1$ , 沿线均匀分布时  $G_p = 0.333$ , 沿线渐增分布时  $G_p = 0.533$ , 沿线渐减分布时  $G_p = 0.20$ , 中间较重分布时,  $G_p = 0.38$ 。

### 3.2 计及变损的中压配网损耗估算

现对线路上配电变压器做近似处理, 根据单条馈线上的负荷可估算得到每条馈线的平均配电变压器总容量和台数  $W$ 。则根据配电变压器型号可查到每台配电变压器的空载损耗为  $\Delta P_{T0}$ , 负载损耗为  $\Delta P_k$ , 则馈线上配电变压器总损耗可估算为

$$\Delta P_T = [\Delta P_{T0} + K_i^2 \times \Delta P_k] \times W \quad (8)$$

式中,  $K_i$  为第  $i$  台配电变压器的平均负载率。

计入分支线损耗引入修正系数,  $T$  为配电变压器

一年投运小时数, 一般取 8760。由此可估算出单条馈线年有功总损耗为

$$\Delta P_{\Sigma} = [\Delta P_L / 0.8 + K_i^2 \Delta P_k \times W] \tau_{max} + \Delta P_{T0} \times T \times W \quad (9)$$

假设规划年典型接线方式分区为  $M$ , 典型接线方式馈线条数为  $Y$ , 则中压配网年线损率可表示为

$$\Delta P_{m,y} \% = \frac{\sum_{i=1}^M (Y \times \Delta P_{\Sigma})}{P_{max} T_{max}} \times 100\% \quad (10)$$

## 4 低压网综合线损率的评估

对于规划阶段低压线损计算以工程精度需求做适当简化。鉴于 0.4 kV 低压网有三相四线制、单相两线制、三相三线制等供电方式, 利用改进台区等值电阻法估算典型台区线损率, 进而估算整个低压网线损率。

### 4.1 规划新建台区

对于规划新建或改造较大的台区, 借助改进的台区等值电阻法计算, 结合低压电力网的特殊性, 利用中压电力电量平衡结果计算出一个等效电阻, 线路结构类似 10 kV 线路处理方法。

以三相三线制接线为例, 针对规划线路中的公用配电变压器, 可以按电力平衡结果以及台区用户的负荷性质 (居民、商业、动力等终端用户), 由此得该类配电变压器的等值电阻和典型平均电流为

$$R_{eq1} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i rL}{N} \quad (11)$$

$$I_{av} = \eta \frac{0.6 S_{av}}{\sqrt{3} U_{av}} \quad (12)$$

式中,  $N_i$  为低压线路各计算线段的电力网结构参数;  $N$  为配电变压器低压出口电网结构常数;  $\eta$  为计入典型负荷的形状系数, 居民用户  $\eta$  取 1.84, 商业用户  $\eta$  取 1.75, 动力用户  $\eta$  取 1.73。

由此得该台区总损耗为

$$\Delta P = G_p \times N I_{av}^2 R_{eq1} T \times 10^{-3} \quad (13)$$

式中,  $N$  为电力网结构系数, 单相供电取 2, 三相三线制取 3, 三相四线制取 3.5, 对于规划年一般取 3。

对于单相两线制接线, 线路通过电流为  $I$  此段线路电阻为  $R$  其损耗为  $I^2 R$ , 地线损耗为  $I^2 R$ ; 相应的三相三线制线路电流为  $I/\sqrt{3}$ , 电阻为  $R_{dz}$ , 三条火线损耗为  $3 \times (I/\sqrt{3})^2 R_{dz}$ 。根据损耗相等的原则

$$2 \times I^2 R = 3 \times (I/\sqrt{3})^2 R_{dz} \quad (14)$$

由此得  $R_{dz} = 6R$ ,  $R_{dz}$  为对应三相四线制线路的计入电阻。

对于三相四线制接线, 假设三相负载平衡, 则地线损耗为 0, 其计入电阻与三相三线制一致。

根据以上分析, 规划新建台区年总损耗为

$$\Delta P = G_p \times N I_{lv}^2 \lambda R_{eq} T \times 10^{-3} \quad (15)$$

式中, 三相制接线线路  $\lambda = 1$ , 单相制接线  $\lambda = 6$ 。

#### 4.2 台区损失系数法

针对规划年变动不大的现有低压台区, 按照负荷分类, 借助台区电压损失率法计算。这种方法只要求简单的电压运行数据, 避免了难于整理的电力网结构数据, 既简便易行又相对合理。

抽样检测该网送端电压和末端电压, 得到电压损耗百分数  $\Delta U\%$ 。

计及损失因数补偿的线路功率损耗为

$$\Delta P_{10}\% = G_p (1+a) K_{pU} \Delta U\% \quad (16)$$

式中,  $G_p$  是功率损失系数;  $a$  负荷不对称系数, 规划年取 1.67;  $K_{pU}$  与配电线结构及负荷分布规律有关, 末端集中分布时  $K_{pU} = 1/\cos^2\varphi$ , 均匀分布时  $K_{pU} = 2/3\cos^2\varphi$ 。可近似地取  $K_{pU} = 0.75^{[1]}$ 。

### 5 实际应用

本次规划严格按照《中国南方电网公司 110 kV 及以下配电网规划指导原则》中对平均线损率、供电可靠性、负荷转供能力和电压损耗率等指标的要求, 将规划年各电压等级线路负载率及供电半径控制在合理范围之内<sup>[8]</sup>。以海南某地区为例, 算例中分别对城网和农网各取一种典型接线方式进行线损估算。

#### 5.1 高电网线损率实例计算

根据网架规划及负荷预测可知规划水平年海南某地区全社会供电量为 7 328 GW h 经高压网潮流计算后, 得到经过无功补偿后的 110 kV 电压等级电网总有功损耗为 12.657 MW (包括变压器和线路)。根据  $T_{max} = 5 400 \text{ h}$ ,  $\cos\varphi = 0.971$ , 查表得最大负荷损耗小时数取 3 600 h, 则高压网年线损率为

$$\begin{aligned} \Delta P_{h,y}\% &= \frac{\Delta P_{h,max} \times \tau_{max}}{35/110 \text{ kV 公用网年供电量}} \times 100\% \\ &= \frac{12.657 \times 3 600}{73.28 \times 10^5} \times 100\% = 0.622\% \end{aligned}$$

#### 5.2 中压网线损率实例计算

由负荷预测及网架规划可得规划水平年海南某

区域网和农网两种典型接线的相关数据, 如表 1 所示。

规划水平年海南某区负荷均匀分布, 根据式 (5)、(6) 及 (7) 求得整个中压配网损耗为 133 334.2 MW h。

考虑同时率为 0.95, 规划水平年整个中压配网公用网最大负荷  $P_{max} = 1 201.75 \text{ MW}$ , 可得海南某区规划水平年中压配电网的年线损率为

$$\begin{aligned} \Delta P_{m,y}\% &= \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{max} T_{max}} \times 100\% \\ &= \frac{133 334.2}{1 201.75 \times 3 500} \times 100\% = 3.17\% \end{aligned}$$

表 4 海南某区中压网典型接线数据

参数表	分区典型接线	
	城网	农网
线路总负荷 /MW	1 054	211
线路主要型号	LGJ-240	LGJ-120
线路条数	302	85
配电变压器主要型号	S11(250 kVA)	S11(100 kVA)
线路平均配电变压器台数	27	42
平均架空长度 /km	3.21	8.91
最大负荷利用小时 /h	3 500	3 000
功率因数	0.95	0.9
最大负荷损耗小时 /h	2 000	1 700

注: 为了便于统计, 算例中架空线路长度取平均供电半径; 取配电变压器负载率为 0.6。

#### 5.3 低压网线损率实例计算

本次规划只考虑新建台区, 按照《导则》中对规划半径的要求, 县城小于 250 m, 重要乡镇小于 300 m, 农村小于 500 m。考虑海南某区地域特点, 算例中平均架空长度取导则允许最大供电半径的 80%。根据电网可知参数求得线损率如表 2 所示。

表 5 规划新建典型台区接线数据

参数表	典型台区	
	低压主干线	低压次干线
线路主要型号	LGJ-120	LGJ-95
平均架空长度 /km	0.04	0.12
负荷性质	居照	
公变总用户数	896	
低压网线损率 /%	3.33	

注: 线路型号取比例最大的一种。

假设规划水平年中压网公用网负荷全部为低压侧负荷, 最大负荷利用小时数取与中压网相同, 最大损耗小时数取  $\tau_{max} = 1 700 \text{ h}$  则低压网最大损耗功率为

$$\Delta P = \frac{P_{max} T_{max} \times \Delta P_{L,y}\%}{\tau_{max}}$$

$$= \frac{1 \ 201.75 \times 3 \ 500}{1 \ 700} \times 3.33\%$$

$$= 82.39(\text{MW})$$

假设 10 kV 公用线年供电量与低压公用年供电量近似相等。根据以上三节的计算结果,可估算得到海南某区规划水平年全网的年综合线损率为

$$\Delta P_{\Sigma} \% = \Delta P_{h} \% + (\Delta P_{m} \% + \Delta P_{l} \%)$$

$$\times \frac{10 \text{ kV 公用网年供电量}}{35/110 \text{ kV 公用网年供电量}}$$

$$= 0.622\% + (3.17\% + 3.33\%) \times$$

$$\frac{1 \ 201.75 \times 3 \ 500}{73.28 \times 10^5}$$

$$= 4.3\%$$

由以上分析计算可知,到规划水平年,海南某区年综合网损率将达到 4.3%,其中高压网理论线损率为 0.622%,中压网理论线损率为 3.17%,低压网理论线损率为 3.33%,各项指标水平均满足南方电网公司的相关要求<sup>[8]</sup>。

## 6 结论及分析

规划、设计阶段线损的计算主要用于电网规划方案比较,对优化电网有着重要意义。但是由于各种制约因素,目前对规划、设计阶段理论线损计算的研究很少。在实际配网规划实践的基础上探讨一种分电压等级的简化线损估算方法。所提出的适合高压配网、中压配网、低压配网的理论线损率估算方法,特别是对于中低压规划理论线损的估算方法,克服了现有大多数理论计算方法缺乏规划态配网数据的问题。算例表明了所提方法的简洁和实用,能够解决规划期理论线损的计算问题。

对于规划态的理论线损评估,由于网架和负荷分布的不确定性,馈线一般只考虑了网架主干线,对负荷分布在满足实际工程计算精度的基础上做了一定

假设,分电压等级计算模型也是在一定程度的假设基础上建立起来的,但是经过实例验证,已能够满足规划阶段的工程精度要求,对优化电网规划方案起到了一定的作用。

## 参考文献

- [1] 郭晓军. 回归分析法在线损计算中的应用 [J]. 继电器, 2002, 30(8): 50-51, 54.
- [2] 张超, 刘宪林. 集成神经网络在配电网线损分析中的应用 [J]. 继电器, 2002, 30(7): 3-6.
- [3] 辛开远, 杨玉华, 陈富. 计算电网线损的 GA 与 BP 结合的新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 79-82.
- [4] 李秀卿, 汪海, 许传伟, 等. 基于免疫遗传算法优化的神经网络配电网网损计算 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 37-39.
- [5] 杨秀台. 电力网线损的理论计算和分析 [M]. 北京: 水利出版社, 1985.
- [6] 赵俊光, 王主丁, 乐欢. 中压配电网规划中馈线电气计算的估算方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 98-101.
- [7] 方向晖. 中低压配电网规划与设计基础 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [8] 中国南方电网公司. 220 kV 以下城市电网优化工作组. 中国南方电网公司 110 kV 及以下配电网规划指导原则 [S]. 2009.
- [9] 付浩, 周步祥, 陈实. 输电网理论损耗计算的改进方法 [J]. 继电器, 2007, 35(7): 28-31, 36.

### 作者简介:

程秀娟 (1986), 女, 硕士研究生, 主要从事调度自动化及计算机信息处理方面的研究工作;

周步祥 (1965), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机应用等方面的研究工作。

(收稿日期: 2010-11-19)

## 加强技术监督 给力德阳换流站

四川省首条直流输电工程 ±500 kV 德宝直流输电工程, 定于 2011 年 5 月 26 日至 6 月 4 日进行首次停电检修。

四川电科院为保证此次技术监督任务顺利实施, 专门成立了德阳换流站首检技术监督机构, 明确了现场技术监督项目负责人、专业负责人, 现场安全负责人; 并且制定了详细的技术监督计划表, 明确了技术监督人员职责, 确保现场技术监督不留死角, 为德阳换流站安全投运进行技术保障。