

DL07/01

电力系统线损

吴安官 倪保珊 编著

中国电力出版社

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 有功功率损耗与电能损耗	1
第二节 线损电量与线损率	3
第三节 线损的计算与分析	5
第二章 影响线损各因素的分析	8
第一节 交流电阻的计算	8
第二节 测计期内气温、电压变化对线损的影响	9
第三节 负荷曲线形状的影响	13
第四节 负荷功率因数和负荷分布对线损的影响	20
第三章 按电流负荷曲线计算线损	22
第一节 均方根电流法和损耗因数法	22
第二节 用理想化负荷曲线推求 $F(f)$ 的函数关系	24
第三节 用统计数学方法求取 $F(f)$ 的近似公式	31
第四节 用数学分析方法推求 $F(f)$ 公式	34
第四章 电流负荷曲线的概率论分析	36
第一节 负荷曲线及其参数的概率涵义	36
第二节 洛桑德 (Rossander) 公式作为分布函数的 分析	38
第三节 各种损耗因数公式的比较	44
第五章 按功率负荷曲线计算线损	48
第一节 考虑功率因数的线损计算	48
第二节 特罗格尔 (Tröger) 的最大负荷功率因数法	50
第三节 格拉祖诺夫 (Глазунов) 的年平均功率因数法	51
第四节 等效负荷曲线法	53

第五节	无功补偿后负荷曲线参数的计算	63
第六节	无功补偿降损效果的计算	66
第七节	电力网规划与设计用的年电能损耗计算曲线	73
第六章	多分支线路电能损耗的计算	84
第一节	多分支线路电能损耗计算的基本方法	84
第二节	等值电阻法与配电变压器的电能损耗计算	93
第三节	双分量平衡法	101
第四节	分散系数法	108
第五节	用压降法计算多分支线路的电能损耗	116
第六节	多分支线路电能损耗计算方法的比较与选择	122
第七章	电力网元件电能损耗的理论计算	125
第一节	电能损耗的分类	125
第二节	架空线路电能损耗计算	126
第三节	电缆线路的电能损耗计算	138
第四节	主变压器的电能损耗计算	144
第五节	其他电器设备的电能损耗计算	148
第八章	电力网电能损耗的变化规律	152
第一节	线损变化分析基础	152
第二节	空载损耗的计算与分析	154
第三节	负载损耗系数 C 值的计算与分析	158
第四节	按降损要求确定电压水平	173
第九章	电力网线损率指标的分析与预测	179
第一节	线损率构成分析	179
第二节	电力网供电结构对线损率影响的分析	185
第三节	售电量构成分析	189
第四节	线损电量变化的多因素分析	194
第五节	边际线损率与供电量增量的优化分配	200
第六节	线损率指标的预测	204
第十章	降低线损的技术措施	217

第一节	选择合理的接线方式和运行方式	217
第二节	搞好电力网的无功功率平衡, 合理确定 电力网的电压水平	227
第三节	采用无功功率补偿设备和提高功率因数	229
第四节	变压器的经济运行	237
第五节	调整 and 平衡负荷	250
第六节	加强电力网的维护工作	253
第七节	加强用电管理和计量管理	254
附录 A	电晕损耗功率 ΔP_{dy} 计算曲线	257
附录 B	电力网元件的电气参数计算	262
附录 C	分段积分法求取损耗因数公式	269
附录 D	配电变压器空载功率损耗与电压关系 的实测分析	273
参考文献		275

第一节	选择合理的接线方式和运行方式	217
第二节	搞好电力网的无功功率平衡, 合理确定 电力网的电压水平	227
第三节	采用无功功率补偿设备和提高功率因数	229
第四节	变压器的经济运行	237
第五节	调整和平衡负荷	250
第六节	加强电力网的维护工作	253
第七节	加强用电管理和计量管理	254
附录 A	电晕损耗功率 ΔP_{dy} 计算曲线	257
附录 B	电力网元件的电气参数计算	262
附录 C	分段积分法求取损耗因数公式	269
附录 D	配电变压器空载功率损耗与电压关系 的实测分析	273
参考文献		275

第一章 绪 论

第一节 有功功率损耗与电能损耗

在一个供电地区内,电能通过电力网的输电、变电和配电的各个环节供给用户。在电能的输送和分配过程中,电力网的各个元件都要产生一定数量的有功功率损耗和电能损耗。

一、有功功率损耗的主要类型

根据电磁场理论所进行的分析表明,电磁场的能量是通过电磁场所在的介质空间,由电源向负荷传输的,导线起到了引导电磁场能量的作用。进入导线内部并转化为热能的电能损耗,也是由电磁场供给的。

在交流输电的情况下,应用能量流密度坡印廷(Poynting)矢量的概念,对单芯同轴电缆电路进行分析的结果表明,在介质空间中传输负荷所需功率的同时,在电缆中产生了4类有功功率损耗。

(1) 电阻发热损耗 ΔP_1 (W)。它与电流的平方成正比,即

$$\Delta P_1 = I^2 R \quad (1-1)$$

式中 I ——缆芯中通过的电流 (A);

R ——缆芯和外皮电阻之和 (Ω)。

(2) 泄漏损耗 ΔP_2 (W)。它与电压的平方成正比,即

$$\Delta P_2 = U^2 G \quad (1-2)$$

$$G = \frac{2\pi l r}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1-3)$$

式 (1-2)、(1-3) 中 U ——缆芯和外皮之间的电压 (V);
 G ——介质的漏电导 ($1/\Omega$);
 r ——电导率 [$1/(\Omega \cdot m)$];
 l ——电缆的长度 (m);
 r_1 ——电缆芯半径 (cm);
 r_2 ——电缆外皮内侧半径 (cm)。

(3) 介质磁化损耗 ΔP_3 (W)。它与电流的平方和频率成正比, 即

$$\Delta P_3 = I^2 \omega L \operatorname{tg} \delta \quad (1-4)$$

$$L = \frac{l \mu}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1-5)$$

式 (1-4)、(1-5) 中 ω ——交流电角频率 ($1/s$);
 L ——电缆的电感 (Wb/A);
 μ ——电缆介质的磁导率 ($\Omega \cdot s/m$);
 $\operatorname{tg} \delta$ ——电缆介质反复磁化损失角的正切值。

(4) 介质极化损耗 ΔP_4 (W)。它与电压的平方和频率成正比, 即

$$\Delta P_4 = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (1-6)$$

$$C = \epsilon \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1-7)$$

上二式中 C ——电缆的电容 (F);
 ϵ ——电缆介质的介电常数 (F/m);
 $\operatorname{tg} \delta$ ——电缆介质反复极化损失角的正切值。

上述 4 类有功功率损耗代表了电力系统有功功率损耗的基本类型。除此之外，高压线路上和高压电机中还可能产生电晕损耗，这是比较特殊的一类，是由于导体表面的电场强度过高，致使导体外部介质粒子电离所造成的有功功率损耗，因而它与导体的表面场强和空气密度等因素有关，详见第七章第二节。

二、电能损耗计算

电能损耗 ΔA (kW · h) 是一定时间内有功功率损耗对时间的积分，即

$$\Delta A = \int_0^T \Delta P(t) dt \times 10^{-3} \quad (1-8)$$

对于电阻发热损耗，式 (1-8) 可改写成

$$\Delta A = \int_0^T I^2(t) R(t) dt \times 10^{-3} \quad (1-9)$$

在时段 T 内，负荷电流与导体电阻都可能发生变化，所以计算电能损耗要比计算有功功率损耗来得复杂。当计算时段较长时，很难采用逐点平方累加的方法来计算电能损耗。若采用电流负荷曲线 $I(t)$ 或有功负荷曲线 $P(t)$ 的有关参数来计算电能损耗，要取得准确度令人满意的计算结果，是一个比较困难的问题，也正是研究电能损耗计算方法及其理论的重点内容。

第二节 线损电量与线损率

一个供电地区或电力网在给定时段(日、月、季、年)内，输电、变电、配电各环节中所损耗的全部电量(其中包括分摊的电网损耗电量、电抗器和无功补偿设备等所消耗的电量

以及不明损耗电量等)称为线路损耗电量,简称线损电量或线损。线损电量中的一部分,虽然可以通过理论计算来确定,或用特制的测量线损的表计来计量,但它的全量却无法准确得知。因此,线损电量通常是根椐电能表所计量的总“供电量”和总“售电量”相减得出。也就是说,线损是个余量,它的准确度取决于计量供电量和售电量的电能计量系统的准确度,以及对用户售电量科学合理的抄录和统计制度。

所谓供电量,是指发电厂、供电地区或电力网向用户供出的电量,其中包括输送和分配电能过程中的线损电量。其计算式⁽¹⁾为:

$$A_g = A_f - A_y - A_{ch} + A_r \quad (1-10)$$

式中 A_g ——供电地区或电力网的供电量;

A_f ——本地区或本网内发电厂的发电量;

A_y ——发电厂厂用电量;

A_{ch} ——向其他电力网输出的电量;

A_r ——从其他电力网输入的电量(包括购入电量)。

所谓售电量,是指电力企业卖给用户的电量和电力企业供给本企业非电力生产(如基本建设部门等)用的电量。对本企业的非电力生产单位,都应作为用户看待。所以,供电地区或电力网的售电量等于用户电能表计量的总和。

线损电量占供电量的百分比称为线路损耗率,简称线损率,其计算式为

$$\text{线损率} \% = \frac{\text{供电量} - \text{售电量}}{\text{供电量}} \times 100 \% \quad (1-11)$$

在电力网的运行管理工作中,用总供电量减去总售电量所得到的线损电量,称为统计线损电量,对应的线损率称为统计线损率。

在统计线损电量中，有一部分是在输送和分配电能过程中无法避免的，是由当时电力网的负荷情况和供电设备的参数决定的，这部分损耗电量称为技术损耗电量，它可以通过理论计算得出，所以又称为理论线损电量，对应的线损率称为理论线损率。

在统计线损电量中，另一部分损耗是不明损耗，也称管理损耗，这部分损耗可以而且应该采取必要的措施予以避免或减少。

第三节 线损的计算与分析

电力网规划、电力网接线方案的比较和变电所的设计，都需要进行线损理论计算。这种规划、设计阶段的线损计算所要求的准确度并不高，但要求计算方法简便、实用，所以表格法和计算曲线法比较理想。局部的线损理论计算，可用于对一些降损技术措施的效益进行预计，通过技术经济比较来选择经济合理的降损方案。比较全面细致的线损理论计算，可以确定线损电量的大小及其构成，也可以揭示技术线损电量与运行的电压水平、负荷率、平均功率因数等因素之间的关系，从而能比较科学地制定降损的技术措施；全面的线损理论计算的结果，还可与统计所得的统计线损电量相比较，从而估计出管理损耗电量的大小，为降低管理损耗电量提供依据。

上述 3 类线损理论计算，对于各个供电部门和有独立供电系统的工业企业都是需要的。因此，对线损理论计算问题进行全面探讨是非常必要的。

根据线损的理论计算结果进行线损分析，是线损管理工作的重要内容。根据《电力网电能损耗管理规定》，要求进行

3 种线损分析，即统计分析、指标分析和经济分析。

1. 统计分析

在主系统送、变电过程中所损耗的电能称为网损，在地区电网送、变、配电过程中所损耗的电能称为地区线损。

(1) 地区线损构成分析。对送、变电线损应分压、分线进行分析；对配电线损应分区、分站、分线或分台区（以配电变压器供电范围划分）进行分析。此外，要对地区电力网的空载损耗和负载损耗进行分类统计，计算空载线损率和负载线损率。

(2) 电网结构分析。要分压统计线损率，且对不同的供电结构，特别是对二绕组、三绕组变压器各种降压和联接方式所对应的供电量、线损率进行统计分析，从而可以寻求改善供电结构降低线损的途径。

(3) 售电量构成分析。向邻近地区输出的供电量将增加本地区的线损，对这种过境电量的影响需进行分析。线损由用户承担的专用线售电量和不计损耗的趸售电量统称为无损售电量。显然，无损售电量占总售电量比例的大小，会直接影响统计线损率的数值，这也需要进行分析。

上述 3 种统计分析所得到的结果，要与线损理论计算结果进行比较，以便找出送、变、配电系统中线损较大的薄弱环节，确定降损的主要途径。

2. 指标分析

比较本期与上期的线损率指标和本期线损率统计值与计划值之间的差异，是指标分析的基本内容。指标分析可以从以下 5 个方面进行考虑。

(1) 售电量增减及用电类别与电压构成的变化；

(2) 电力系统的运行方式，潮流分布和电力网结构的变

化；

(3) 降损措施和工程投产的影响；

(4) 新增大用户的影响；

(5) 更换系统主元件的影响。

3. 经济分析

对在变电所采用集中安装的无功补偿设备和在配电线路上分散安装的无功补偿设备所取得的降损效益进行分析；对大用户考核高峰功率因数或考核高峰、低谷功率因数所取得的效益进行分析，是经济分析的两种主要类型。

第二章 影响线损各因素的分析

第一节 交流电阻的计算

架空电力线路广泛采用裸导线，其交流电阻要比其直流电阻为大，这是由于交流电的集肤效应所造成的。对钢芯铝线，由于钢芯磁化将引起铁损，使交流电阻更加增大。集肤效应增大的电阻可进行理论计算，而钢芯磁化增大的电阻值必须通过实测来确定。交流电阻可用下式计算

$$R = K_1 K_2 R_{zhl}^{(2)} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2-1)$$

$$K_1 = 0.99609 + 0.018578X_1 - 0.030263X_1^2 + 0.020735X_1^3 \quad (2-2)$$

$$K_2 = 0.99947 + 0.028895X_2 - 0.0059348X_2^2 + 0.00042259X_2^3 \quad (2-3)$$

$$X_1 = \frac{D + 2d}{D + d} \times 0.01 \sqrt{\frac{8\pi f(D - d)}{R_{zhl}(D + d)}} \quad (2-4)$$

$$X_2 = \frac{I}{S} \quad (2-5)$$

式(2-1)~(2-5)中 R_{zhl} ——导线在计算温度下的直流电阻 (Ω/km);

K_1 ——导线的集肤效应系数;

X_1 ——计算导线集肤效应系数的

参数；

D 、 d ——分别为导线的外径与内径 (cm)；

f ——交流电频率 (Hz)；

K_2 ——导线的铁损系数；

X_2 ——计算导线铁损系数的参数；

I ——通过导线的电流 (A)；

S ——导线的截面积 (mm^2)。

计算表明，截面积为 $50 \sim 240 \text{mm}^2$ 的铝绞线，其交流电阻比直流电阻仅增大 $0.02\% \sim 0.5\%$ ；截面积为 $25 \sim 240 \text{mm}^2$ 的钢芯铝线，其交流电阻比直流电阻增大 $1.3\% \sim 4.6\%$ 。上述下限对应于载流量为允许值的 20% ，上限则对应于载流量为允许值时的情况。由此可见，当通过架空线路导线的电流接近或超过允许值时，必须计及交流电阻的增大因素。在其他情况下，可直接用直流电阻来进行线损计算，这样并不会引起显著的误差。

第二节 测计期内气温、电压 变化对线损的影响

一、测计期内气温变化对线损的影响

由式 (1-9) 可见，在一个测计期内，不仅负荷在随时间变化，导线的电阻也随着气温的变化而变化。显然，要同时考虑这两个变化因素并进行积分运算是极其复杂的。为便于线损计算，可先考虑气温变化对电阻这个变量的影响。

众所周知，导线电阻随气温的变化可按下式计算

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (2-6)$$

式中 R_0 ——导线在 20°C 时的电阻值 (Ω)；

α ——导线电阻的温度系数,对铜、铝及钢芯铝线,一般取 $\alpha = 0.004$;

T ——空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

将一天内 24h 的负荷电流与气温的记录数据代入式 (2-6) 和式 (1-9) 可得

$$\begin{aligned}\Delta A &= \int_0^{24} I^2(t) R(t) dt \times 10^{-3} \\ &= [I_1^2 R_0 (1 + \alpha T_1) + I_2^2 R_0 (1 + \alpha T_2) \\ &\quad + \cdots + I_{24}^2 R_0 (1 + \alpha T_{24})] \times 10^{-3} \\ &= [(I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_{24}^2) + \alpha (I_1^2 T_1 \\ &\quad + I_2^2 T_2 + \cdots + I_{24}^2 T_{24})] R_0 \times 10^{-3} \quad (2-7)\end{aligned}$$

定义加权平均气温

$$T_{\text{ji}} = \frac{I_1^2 T_1 + I_2^2 T_2 + \cdots + I_{24}^2 T_{24}}{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_{24}^2} \quad (2-8)$$

则式 (2-7) 可改写成

$$\begin{aligned}\Delta A &= (I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_{24}^2) (1 + \alpha T_{\text{ji}}) R_0 \times 10^{-3} \\ &= (I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_{24}^2) R_{\text{ji}} \times 10^{-3} \quad (2-9)\end{aligned}$$

$$R_{\text{ji}} = R_0 (1 + \alpha T_{\text{ji}}) \quad (2-10)$$

式中 R_{ji} ——对应于加权平均气温的导线电阻。

如上所述,如果按加权平均气温和式 (2-9) 计算电能损耗,就完全计及了气温变化的影响。

由式 (2-8) 可见,当负荷不变时 $T_{\text{ji}} = T_{\text{pj}}$ 。由于日气温变化呈单峰型,日负荷变化一般有两个不等的高峰,所以在—昼夜内或超过—昼夜的周期内, T_{pj} 与 T_{ji} 相当接近,以 T_{pj} 代替 T_{ji} 不会产生较大的负误差。

根据式 (2-10) 进行的电阻值相对误差分析表明,由于导线电阻的温度系数 α 值很小,所以即使用 T_{pj} 代替 T_{ji} 有一

定的相对误差,但电阻值和电能损耗的相对误差仍然很小。当测计期为一月或一年时,按平均气温计算电阻后,三相对称元件的电能损耗公式(1-9)可改写成

$$\Delta A = 3R \int_0^T I^2(t) dt \times 10^{-3} \quad (2-11)$$

二、测计期内电压变化对线损的影响

当实测的负荷数据不是电流而是有功功率和无功功率时,计算线损要考虑电压的变化。如测计期为一昼夜,式(2-11)可改写成

$$\Delta A = R \int_0^{24} \frac{[P^2(t) + Q^2(t)]}{U^2(t)} dt \times 10^{-3} \quad (2-12)$$

式中 R ——考虑气温变化按式(2-10)计算所得的电阻(Ω);

$P(t)$ 、 $Q(t)$ ——同一测量点的有功功率(kW)、无功功率(kvar);

$U(t)$ ——有功、无功功率测量点的电压(kV)。

可以定义一昼夜的有功功率、无功功率平方值为权的有功功率加权平均电压和无功功率加权平均电压,即

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{U_{\text{均},P}^2} &= \left(\frac{P_1^2}{U_1^2} + \frac{P_2^2}{U_2^2} + \cdots + \frac{P_{24}^2}{U_{24}^2} \right) / (P_1^2 + P_2^2 + \cdots + P_{24}^2) \\ \frac{1}{U_{\text{均},Q}^2} &= \left(\frac{Q_1^2}{U_1^2} + \frac{Q_2^2}{U_2^2} + \cdots + \frac{Q_{24}^2}{U_{24}^2} \right) / (Q_1^2 + Q_2^2 + \cdots + Q_{24}^2) \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

则式(2-12)可改写成

$$\Delta A = R \left[\int_0^{24} P^2(t) dt / U_{\text{均},P}^2 + \int_0^{24} Q^2(t) dt / U_{\text{均},Q}^2 \right] \times 10^{-3} \quad (2-14)$$

对电压和负荷变动幅度不同的 220kV、110kV 和 35kV 系统

实测的数据进行计算表明,用平均电压 U_{pj} 代替加权平均电压 $U_{jq.P}$ 、 $U_{jq.Q}$,其偏小误差一般不超过1%,所以式(2-14)可进一步改写成

$$\Delta A = \frac{R}{U_{pj}^2} \left[\int_0^{24} P^2(t) dt + \int_0^{24} Q^2(t) dt \right] \times 10^{-3} \quad (2-15)$$

在正常运行情况下,长时段的电压变动幅度不会很大,仍可用 U_{pj} 代替 $U_{jq.P}$ 、 $U_{jq.Q}$,即有

$$\Delta A = \frac{R}{U_{pj}^2} \left[\int_0^T P^2(t) dt + \int_0^T Q^2(t) dt \right] \times 10^{-3} \quad (2-16)$$

前苏联学者曾对电压偏移与配电网电能损耗的关系进行了研究^[3],结果表明:不考虑电网电压的偏移用平均电压计算电能损耗,其误差与电压、电流变化之间的相关系数值、符号及电压偏移值有关,即有

$$\left. \begin{aligned} \delta(\Delta A)\% &= |r_{U/I}| \times \sigma_U\% \\ \delta(\Delta A)\% &= \left(\frac{\Delta A_2 - \Delta A_1}{\Delta A_1} \right) \times 100\% \end{aligned} \right\} \quad (2-17)$$

式中 ΔA_1 ——考虑电压偏移的电能损耗值 (kW·h);

ΔA_2 ——用平均电压计算所得的电能损耗值 (kW·h);

$r_{U/I}$ ——电压变化与电流变化之间的相关系数,

$$-1 \leq r_{U/I} \leq 1;$$

$\sigma_U\%$ ——以百分数计算的电压变化的均方差。

配电网中电压偏移值的分布接近“正态分布”,故有

$$\sigma_U\% = \frac{1}{6} \left(\frac{U_{zd} - U_{zx}}{U_{pj}} \right) \times 100\% \quad (2-18)$$

式中 U_{zd} 、 U_{zx} ——分别为最高和最低电压值。

由式(2-18)可见,当配电网电压变化高达20%时,用平均