

DL/T 686—1999

## 前 言

前能源部节约能源司于 1988 年颁发的《电力网电能损耗计算导则》(试行)经过了 8 年多的试用,对指导和规范电力网电能损耗的计算,更好地开展电力网降损节能工作起到了很好的作用,近年来,计算方法特别是计算机应用的普及需要对试行导则进行修改补充。为此,电力工业部国调中心委托中国电机工程学会城市供电专委会进行该导则的修编工作,城市供电专委会组织专家在广泛收集意见的基础上,从 1994 年 9 月到 1997 年 4 月进行了该项工作。

这次修编主要增加了应用电子计算机计算线损的篇幅。导则中附录 A 和附录 B 是标准的附录;附录 C、附录 D 是提示在附录。在附录中列入了电网线损理论计算软件设计要求,对原来导则在试行中反映出来的问题进行了修改和补充。

本导则由国家电力公司安全运行与发输电部归口。

本导则起草单位为中国电机工程学会城市供电专业委员会。

本导则的主要起草人:许绍良、宋冶、苗竹梅、虞忠年、罗毅芳、刘遵义。

本导则委托中国电机工程学会城市供电专委会负责解释。

## 中华人民共和国电力行业标准

## 电力网电能损耗计算导则

DL/T 686—1999

Guide of calculation of grid energy loss

## 1 范围

本导则给出了电力网电能损耗分析及计算方法,降低损耗措施效果的计算方法,还给出了电能损耗统计、计算、分析软件的设计要求。

本导则适用于各级电力部门的能耗计算、统计、分析及降损措施效果的计算,也适用于电力系统规划、设计工作中涉及的能耗计算。

## 2 电力网电能损耗计算

## 2.1 统计线损率

2.1.1 统计线损率是各网、省、地市供电部门对所管辖(或调度)范围内的电网各供、售电量计量表统计得出的线损率。

$$\text{统计线损率} = \frac{\text{统计线损电量}}{\text{供电量}} \times 100\%$$

2.1.2 供电量=厂供电量+输入电量-输出电量+购入电量。

2.1.2.1 厂供电量即电厂出线侧的上网电量。对于一次电网厂供电量是指发电厂送入一次电网的电量。对于地区电网厂供电量是指发电厂送入地区电网的电量。

2.1.2.2 输入电量是指邻网输入的电量。

2.1.2.3 输出电量是指送往邻网的电量。

2.1.2.4 购入电量是指厂供电量以外的上网电量,如集资、独资、合资、股份制、独立核算机组、地方电厂、电力系统退役机组、多经机组、用户自备电厂等供入系统的电量。凡地方电厂和用户自备电厂的送出电量不应和系统送入电量抵冲,电网送入地方电厂及用户自备电厂的电量一律计入售电量。

2.1.3 统计线损电能=供电量-售电量。

## 2.1.4 售电量

售电量是指所有用户的抄见电量,发电厂、供电局、变电所,供电所、保线站等的自用电量及电力系统第三产业所用的电量。凡不属于厂用电的其他用电,不属于所或站用电的其他用电,均应由当地电力部门装表收费。

为了分级统计的需要,一次网把输往本局各地区电网的电量视为售电量。

2.1.5 为了分级分压管理,统计线损率又分为:

一次电网的统计线损电量和一次电网的供电量之比的百分率称为一次网损率或主网损失率;

一个地区电网的统计线损电量和该地区电网的供电量之比的百分率称为该地区(市)局的线损率;

一个网局或省范围内所有地、市供电局(电业局)及一次电网的统计线损电量的总和与其供电量之比的百分率称为该网、省局的线损率。

## 2.2 理论线损率

2.2.1 理论线损率是各网、省、地区供电局(电业局)对其所属输、变、配电设备根据设备参数、负荷潮

中华人民共和国国家经济贸易委员会 2000-02-24 批准

2000-07-01 实施

流、特性计算得出的线损率。

$$\text{理论线损率} = \frac{\text{理论线损电能}}{\text{供电量}} \times 100\%$$

### 2.2.2 供电量=厂供电能+输入电能+购入电能

有关厂供电量的规定与 2.1.2.1 条相同。

### 2.2.3 理论线损电量是下列各项损耗电量之和：

- 变压器的损耗电能；
- 架空及电缆线路的导线损耗电能；
- 电容器、电抗器、调相机中的有功损耗电能、调相机辅机的损耗电能；
- 电流互感器、电压互感器、电能表、测量仪表、保护及运动装置的损耗电能；
- 电晕损耗电能；
- 绝缘子的泄漏损耗电能(数量较小,可以估计或忽略不计)；
- 变电所的所用电能；
- 电导损耗。

## 2.3 电力网元件的电能损耗计算

2.3.1 整个电网的电能损耗计算建立在每一电网元件的电能损耗计算基础上,电网的电能损耗是电网内同一时段内各元件电能损耗的总和。

2.3.2 各元件的负荷及运行电压等参数是从代表日(或典型计算时段,下同)的实际测录取得的,即每一个元件及整个电网的潮流及电压是已知的。

### 2.3.3 计算能耗时一般应收集下列资料：

- 发电厂、变电所和电网的运行接线图；
- 变压器、线路、调相机、电容器、电抗器等参数(主要参数计算可参见附录 A)资料(铭牌资料或实测损耗功率)；
- 电力网中各元件的负荷、电压等参数。

### 2.3.4 代表日(或典型计算时段)一般按下列原则选定：

- 电网的运行方式、潮流分布正常,能代表计算期的正常情况；
- 代表日的供电量接近计算期(月、日、年)的平均日供电量；
- 绝大部分用户的用电情况正常；
- 气候情况正常,气温接近计算期的平均温度；
- 计算全年损耗时,应以月代表日为基础,其中 35 kV 以上电网代表日至少取 4 天,使其能代表全年各季负荷情况。

2.3.5 代表日负荷记录应完整,能满足计算需要,一般应有电厂、变电所、线路等 24 h 正点的发电(上网)、供电、输出、输入的电流,有功功率和无功功率,电压以及全天电量记录。

根据代表日正点抄录的负荷,并认为每小时内负荷不变,绘制日负荷曲线。

2.3.6 线路、变压器绕组、串联电抗器等元件的电能损耗,应按元件的日负荷曲线计算。本导则推荐方均根电流法为基本计算方法：

代表日的损耗电能

$$\Delta A = 3I_{\mu}^2 \cdot R \cdot T \times 10^{-3} \quad (\text{kWh}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中：R——元件的电阻,Ω；

T——运行时间,对于代表日 T=24,h；

I<sub>μ</sub>——方均根电流,A。

$$I_{\mu} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T I_i^2}{T}} \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中： $I_i$ ——各正点时通过元件的负荷电流；A。

当负荷曲线以三相有功功率、无功功率表示时

$$I_{\mu} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2}}{3T}} \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中： $P_i$ ——正点时通过元件的三相有功功率，kW；

$Q_i$ ——正点时通过元件的三相无功功率，kvar；

$U_i$ ——与  $P_i$ 、 $Q_i$  同一测量端同一时间的线电压值，kV。

当实测值是每小时有功电能  $A_{\mu}$  (kWh)、无功电能  $A_{\nu}$  (kvarh)，以及测量点平均线电压  $U_{\nu}$  (kV) 时

$$I_{\mu} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T (A_{\mu}^2 + A_{\nu}^2)}{3TU_{\nu}^2}} \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

注：简化计算时，可采用平均电流法（形状系数法）或最大电流法（损耗因数法）。形状系数（ $K$ ）或损耗因数（ $F$ ）值可根据具体情况决定（见附录 B）。

### 2.3.7 导线应考虑负荷电流引起的温升及周围空气温度对电阻变化的影响，进行如下修正

$$R = R_{20}(1 + \beta_1 + \beta_2) \quad (\Omega) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta_1 = 0.2 \left( \frac{I_{\mu}}{I_{yx}} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\beta_2 = \alpha(T_{\text{av}} - 20) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中： $R_{20}$ ——每相导线在 20℃ 时的电阻值， $\Omega$ ；

$\beta_1$ ——导线温升对电阻的修正系数；

$I_{yx}$ ——当周围空气温度为 20℃ 时，导线达到容许温度时的容许持续电流，其值可由有关手册查取，如手册给出的是相当于空气温度为 25℃ 时的容许持续电流，则  $I_{yx}$  应乘以 1.05，换算成 20℃ 时的容许持续电流，A；

$\beta_2$ ——周围空气温度对电阻的修正系数；

$T_{\text{av}}$ ——代表日（或计算期）的平均气温，℃；

$\alpha$ ——导线电阻的温度系数，对铜、铝、钢芯铝线， $\alpha=0.004$ 。

一般当月平均气温在 12℃~28℃ 范围内时，可不进行  $\beta_2$  的修正。

### 2.3.8 对电缆线路，除按线芯电阻以 2.3.6 条的方法计算线芯中的电能损耗外，还应计及绝缘介质中的电能损耗。

电缆介质损耗电能（三相）

$$\Delta A_i = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta \cdot t \cdot L \times 10^{-3} \quad (\text{kWh}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中： $U$ ——电缆运行线电压，kV；

$\omega$ ——角速度， $\omega=2\pi f$  [ $f$  为频率 (Hz)]；

$C$ ——电缆每相的工作电容，可以由产品目录查得，或按式 (9) 计算， $\mu\text{F}/\text{km}$ ；

$\text{tg}\delta$ ——介质损失角的正切值，可以由产品目录查得，或按表 1 选取，或按实测值；

$L$ ——电缆长度，km。

每相电缆的工作电容

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \frac{r_e}{r_i}} \quad (\mu\text{F}/\text{km}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中： $\epsilon$ ——绝缘介质的介电常数，可由产品目录查得，或按表 1 选取，或取实测值；

$r_e$ ——绝缘层外半径，mm；

$r_i$ ——线芯的半径，mm。

2.3.9 变压器的电能损耗应包括空载损耗(固定损耗)及负载损耗(可变损耗)。负载损耗与通过该绕组的负荷电流的平方成正比，2.3.6 条所列的计算方法适用于变压器绕组的电能损耗计算。

2.3.9.1 双绕组变压器损耗电能的计算。

a) 空载损耗电能

$$\Delta A_T = \Delta P_0 \cdot \left( \frac{U_{av}}{U_t} \right)^2 \cdot T \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中： $\Delta A_T$ ——铁芯的损耗电能，kWh；

$\Delta P_0$ ——变压器空载损耗功率，kW；

$T$ ——变压器运行小时数，h；

$U_t$ ——变压器的分接头电压，kV；

$U_{av}$ ——平均电压，kV。

用潮流方法计算时采取接地支路等值的方法。

b) 负载损耗电能

$$\Delta A_R = \Delta P_k \left( \frac{I_{jf}}{I_N} \right)^2 \cdot T \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中： $\Delta A_R$ ——负载损耗电能，kWh；

$\Delta P_k$ ——变压器的短路损耗功率，kW；

$I_N$ ——变压器的额定电流，应取与负荷电流同一电压侧的数值，A。

因  $I = \frac{S}{\sqrt{3}U}$ ，所以式(11)可以改写为

$$\Delta A_R = \Delta P_k \cdot \left( \frac{S_{jf}}{S_N} \right)^2 \cdot T \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中： $S_{jf}$ ——变压器代表日负荷(以视在功率表示)的方均根值，kVA；

$S_N$ ——变压器额定容量，kVA。

c) 变压器的损耗电量

$$\Delta A = \Delta A_T + \Delta A_R$$

2.3.9.2 三绕组变压器损耗电能的计算

空载损耗电能计算与双绕组变压器相同，采用式(10)。负载损耗电能的计算，应根据各绕组的短路损耗功率及其通过的负荷，分别计算每个绕组的损耗电能，再相加而得三绕组变压器绕组的总损耗电能。

$$\Delta A_R = \left[ \Delta P_{k1} \left( \frac{I_{j1}}{I_{N1}} \right)^2 + \Delta P_{k2} \left( \frac{I_{j2}}{I_{N2}} \right)^2 + \Delta P_{k3} \left( \frac{I_{j3}}{I_{N3}} \right)^2 \right] \cdot T \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中： $\Delta P_{k1}$ 、 $\Delta P_{k2}$ 、 $\Delta P_{k3}$ ——分别为三绕组变压器高、中、低压绕组的短路损耗功率，可由式(14)计算得出，kW。

表 1 电缆常用绝缘材料的  $\epsilon$  和  $\text{tg}\delta$  值

电缆型式	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$
油浸纸绝缘		
粘性浸渍不滴流绝缘电缆	4	0.01
压力充油电缆	3.5	0.004 5
丁基橡皮绝缘电缆	4	0.05
聚氯乙烯绝缘电缆	8	0.1
聚乙烯电缆	2.3	0.004
交联聚乙烯电缆	3.5	0.008

注： $\text{tg}\delta$  值为最高允许温度和最高工作电压下的允许值。

DL/T 686—1999

$I_{N1}, I_{N2}, I_{N3}$ ——分别为三绕组变压器高、中、低压绕组的额定电流, A;

$I_{\#1}, I_{\#2}, I_{\#3}$ ——分别为三绕组变压器高、中、低压绕组代表日负荷电流的方均根值, A。

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{k1} &= \frac{\Delta P_{k(1-2)} + \Delta P_{k(1-3)} - \Delta P_{k(2-3)}}{2} \\ \Delta P_{k2} &= \Delta P_{k(1-2)} - \Delta P_{k1} \\ \Delta P_{k3} &= \Delta P_{k(1-3)} - \Delta P_{k1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

式中:  $\Delta P_{k(1-2)}, \Delta P_{k(1-3)}, \Delta P_{k(2-3)}$ ——分别为变压器额定容量的高—中压、高—低压、中—低压绕组短路损耗功率, kW。

对于三个绕组容量不相等的变压器,应先把铭牌给出的  $\Delta P'_{k(1-2)}, \Delta P'_{k(1-3)}, \Delta P'_{k(2-3)}$  归算到额定容量下的  $\Delta P_{k(1-2)}, \Delta P_{k(1-3)}, \Delta P_{k(2-3)}$ , 即

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{k(2-2)} &= \Delta P'_{k(1-2)} \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2 \\ \Delta P_{k(1-3)} &= \Delta P'_{k(1-3)} \left( \frac{S_1}{S_3} \right)^2 \\ \Delta P_{k(2-3)} &= \Delta P'_{k(2-3)} \left( \frac{S_1}{S_3} \right)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

式中:  $S_1, S_2, S_3$ ——分别为高、中、低压绕组的标称容量。

式(15)中的第三式适用于  $S_3$  容量为最小时,若  $S_2$  容量最小,则此式中  $S_3$  应改为  $S_2$ 。

对于三绕组变压器的总能耗电能的计算有

$$\Delta A = \Delta A_T + \Delta A_R \dots\dots\dots (16)$$

2.3.9.3 自耦变压器能耗的计算与三绕组变压器相同,可按式(13)~式(16)计算。

2.3.10 并联电容器、调相机、串联电容器及电抗器的损耗电能计算。

2.3.10.1 并联电容器的损耗电能

$$\Delta A = Q_c \cdot \text{tg} \delta \cdot T \dots\dots\dots (17)$$

式中:  $Q_c$ ——投运的电容器容量, kvar;

$\text{tg} \delta$ ——电容器介质损失角的正切值,可取厂家实测值。

2.3.10.2 调相机的损耗电能

调相机损耗电能应包括调相机本身的损耗电能及调相机辅助的耗电能。

a) 调相机本身的损耗电能

$$\Delta A = |Q| \frac{\Delta P\%}{100} \cdot T \dots\dots\dots (18)$$

式中:  $|Q|$ ——代表日调相机所发无功功率绝对值的平均值, kvar;

$\Delta P\%$ ——平均无功负荷的有功功率损耗率,根据制造厂提供数据或试验测定, kW/kvar;

$T$ ——调相机运行小时数, h。

b) 调相机辅机的耗电能代表日调相机辅机电能表的抄见电能(kWh)。

2.3.10.3 串联电容器的损耗电能

$$\Delta A = 3I_{\#}^2 \cdot \frac{1}{\omega C} \cdot \text{tg} \delta \cdot T \times 10^3 \dots\dots\dots (19)$$

对 50 Hz 电网,串联、电容器的损耗电能为

$$\Delta A = 9.55 I_{\#}^2 \cdot \frac{\text{tg} \delta}{C} \cdot T \dots\dots\dots (20)$$

$$C = \frac{nC_c}{m} \dots\dots\dots (21)$$

式中:  $C$ ——每相串联电容器组的电容,每相由  $n$  组并联,每组由  $m$  个单台电容器串联组成,  $\mu\text{F}$ ;

$C_e$ ——单台电容器的标称电容,  $\mu\text{F}$ 。

#### 2.3.10.4 电抗器的损耗电能

##### a) 串联电抗器

$$\Delta A = 3\Delta P_k \left( \frac{I_{\beta}}{I_N} \right)^2 \cdot T \quad \dots\dots\dots(22)$$

式中:  $I_N$ ——串联电抗器的额定电流, A;

$\Delta P_k$ ——一相电抗器通过额定电流, 温度达到  $75^\circ\text{C}$  时的损耗功率, 按厂家提供或由有关手册查得, kW。

b) 并联电抗器的损耗, 可按厂家提供的数据及运行电压进行计算。

2.3.11 代表日全网的总损耗电量应按空载损耗及负载损耗两部分分类汇总, 然后根据全月供电能及代表日供电能, 折算出全月的损耗电能及线损率。

##### 全月损耗电能

$$\sum \Delta A_m = \left[ \sum \Delta A_G + \sum \Delta A_R \left( \frac{A_m}{A_d \cdot D} \right)^2 \right] \cdot D \quad \dots\dots\dots(23)$$

式中:  $\sum \Delta A_m$ ——全月全网的损耗电能, kWh;

$\sum \Delta A_G$ ——代表日全网的固定损耗电能, 包括变压器铁芯、并联无功补偿设备、调相机、互感器、计量装置、测量装置、保护及远动装置、电缆的介质损耗等损耗电能, kWh;

$\sum \Delta A_R$ ——代表日全网的可变损耗电能, 包括架空线路、电缆线路的导线损耗电能、变压器绕组的损耗电能、串联补偿设备的损耗电能等, kWh;

$A_m$ ——全月供电能, kWh;

$A_d$ ——代表日供电能, kWh;

$D$ ——全月日历天数。

##### 月线损率

$$\Delta A_m \% = \frac{\sum \Delta A_m}{A_m} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(24)$$

#### 2.4 35 kV 及以上电力网电能损耗计算

35 kV 及以上电力网多数为多电源的复杂电力网, 其电能损耗计算一般用计算机进行, 有条件的应实行在线计算。计算电力网的电能损耗, 一般采用潮流计算方法。

#### 2.5 35 kV 以下电力网电能损耗计算

2.5.1 配电网的节点多、分支线多、元件也多, 且多数元件不具备测录运行参数的条件, 因此, 要精确地计算配电网电能损耗是困难的, 在满足实际工程计算精度的前提下, 一般采用平均电流法及等值电阻法等计算机上进行计算。有条件时也可采用潮流计算的方法进行。

##### 2.5.2 配电网电能损耗计算所需原始资料:

- 配电线的单线图, 图上应标明每一线段的参数, 各节点配电变压器的铭牌参数;
- 配电线首端代表日的负荷曲线, 及有功、无功电量, 当月的有功、无功电量;
- 用户配电变压器代表日的有功、无功电量;
- 公用配电变压器代表日或全月的有功、无功电量;
- 配电线首端代表日电压曲线;
- 配电线上装置的电容器容量和位置以及全月投运时间。

##### 2.5.3 配电线电能损耗计算的基本假设:

- 各负荷节点负荷曲线的形状与首端相同;
- 各负荷节点的功率因数均与首端相等;
- 忽略沿线的电压损失对能耗的影响。

## 2.5.4 配电线电能损耗计算的步骤。

a) 根据线路首端的负荷及电压资料,计算以下数据:

1) 首端代表日平均电压

$$U_{av(0)} = \frac{\sum_{t=1}^{24} U_t}{24} \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:  $U_t$ ——首端代表日 24 时正点电压, kV。

2) 根据首端代表日的有功、无功电能,计算平均电流

$$I_{av(0)} = \frac{\sqrt{A_a^2(0) + A_r^2(0)}}{\sqrt{3} U_{av(0)} \times 24} \quad (A) \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中:  $A_a(0)$ 、 $A_r(0)$ 、 $U_{av(0)}$ ——分别为代表日首端的有功电能、无功电能、平均电压。b) 根据线路首端的负荷曲线及代表日有功电量确定首端负荷曲线的特征系数及负荷曲线形状系数的平方值  $K^2$ 。

最小负荷率

$$\beta_{(0)} = \frac{I_{\min(0)}}{I_{\max(0)}} \quad \text{或} \quad \beta_{(0)} = \frac{P_{\min(0)}}{P_{\max(0)}} \quad \dots\dots\dots (27)$$

负荷率

$$f_{(0)} = \frac{A_a(0)}{24 P_{\max(0)}} \quad \dots\dots\dots (28)$$

根据  $\beta_{(0)}$ 、 $f_{(0)}$  值确定  $K^2$  (见附录 C)。

c) 按各节点代表日或月平均日的有功电能确定各节点的平均电流

$$I_{av(j)} = I_{av(0)} \frac{A_a(j)}{\sum_{j=1}^n A_a(j)} \quad (A) \quad \dots\dots\dots (29)$$

式中:  $A_a(j)$ ——第  $j$  节点的日有功电能,其中  $j$  为负荷节点序号 ( $j=1 \sim n$ ),  $n$  为负荷节点总数, kWh。d) 从末端负荷节点开始,逐段代数相加,求出每一线段上的平均电流  $I_{av(j)}$ ,并标于单线图上。

e) 根据各线段的电阻及平均电流,计算各线段代表日的损耗电能和配电线的导线总损耗电能。

每一线段的损耗电能

$$\Delta A_{L(i)} = 3 I_{av(i)}^2 \cdot R \cdot K^2 \times 24 \times 10^{-3} \quad (\text{kWh}) \quad \dots\dots\dots (30)$$

配电线导线的总损耗电能

$$\Delta A_L = 72 \left( \sum_{i=1}^m I_{av(i)}^2 \cdot R_i \right) \cdot K^2 \times 10^{-3} \quad (\text{kWh}) \quad \dots\dots\dots (31)$$

式中:  $I_{av(i)}$ ——第  $i$  线段的平均电流, A; $R_i$ ——第  $i$  线段的电阻,  $i=1 \sim m$ ,  $m$  为该配电线线段的总数,对于配电网各线段的电阻可以不作温度校正,  $\Omega$ 。

f) 根据公用配电变压器(产权属于电力部门的)所在节点的平均电流及该节点配变的额定电流、计算该配电线全部公用配变代表日的绕组损耗电能。

$$\sum \Delta A_{R(j)} = \left( \sum \Delta P_{k(j)} \frac{I_{av(j)}^2}{I_{N(j)}^2} \right) K^2 \times 24 \quad \dots\dots\dots (32)$$

式中:  $\Delta P_{k(j)}$ 、 $I_{av(j)}$ 、 $I_{N(j)}$ ——分别为第  $j$  节点公用配电变压器的短路损耗功率, kW;  $j$  节点日平均电流, A;  $j$  节点配电变压器高压侧的额定电流, A。

g) 配电线全部公用配电变压器代表日的铁芯损耗

$$\sum \Delta A_{\sigma(j)} = \sum \Delta P_{\sigma(j)} \times 24 \quad \dots\dots\dots (33)$$

式中:  $\Delta P_{\sigma(j)}$ ——第  $j$  节点公用配变的空载损耗功率, kW。

h) 配电线代表日的总损耗电能

$$\Delta A = \sum \Delta A_{r(j)} + \Delta A_L + \sum \Delta A_{R(j)} \quad \dots\dots\dots (34)$$

i) 配电线全月损耗电量及线损率

$$\Delta A_m = \left\{ \sum A_{r(j)} + [\Delta A_L + \Delta A_{R(j)}] \left[ \frac{A_{am(0)}}{D \cdot A_{s(0)}} \right]^2 \right\} \cdot D \quad \dots\dots\dots (35)$$

式中:  $A_{am(0)}$ ——配电线首端全月有功电量, kWh;

$A_{s(0)}$ ——首端代表日有功电量, kWh;

$D$ ——全月日历天数。

$$\Delta A_m \% = \frac{\Delta A_m}{A_{am(0)}} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (36)$$

j) 计算配电线等值电阻

导线的等值电阻

$$R_{eqL} = \frac{\Delta A_L \times 10^3}{72 I_{av(0)}^2 \cdot K^2} \quad (\Omega) \quad \dots\dots\dots (37)$$

全部公用配电变压器绕组等值电阻

$$R_{eqR} = \frac{\sum \Delta A_{R(j)} \times 10^3}{72 I_{av(0)}^2 \cdot K^2} \quad (\Omega) \quad \dots\dots\dots (38)$$

配电线铜损等值电阻

$$R_{eq} = R_{eqL} + R_{eqR} \quad (\Omega) \quad \dots\dots\dots (39)$$

配电线等值电阻,可用于以后配电网结构未发生变化时期的简化电能损耗计算。

若该配电线的另一次代表日的首端的平均电流为  $I_{N,av(0)}$ ,首端负荷曲线的形状系数为  $K_N$ ,则该代表日配电线的总损耗为

$$\Delta A_N = \sum \Delta A_{r(j)} + 72 I_{N,av(0)}^2 \cdot K_N^2 \cdot R_{eq} \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (40)$$

2.5.5 如配电线各负荷节点未装设电能表和其他表计,则配电线的电能损耗计算可按接于各节点配电变压器的负载系数相等计算。

导线的等值电阻

$$R_{eqL} = \frac{\sum_{i=1}^m S_{(i)}^2 \cdot R_i}{(\sum S_s)^2} \quad (\Omega) \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中:  $\sum S_s$ ——该线路各节点配电变压器的总容量, kVA;

$S_{(i)}$ ——经  $i$  线段送电的配电变压器总容量, kVA;

$R_i$ ——第  $i$  线段的导线电阻,  $\Omega$ 。

全部公用配电变压器绕组的等值电阻

$$R_{eqR} = \frac{U^2 \sum \Delta P_{k(j)}}{(\sum S_s)^2} \times 10^3 \quad \dots\dots\dots (42)$$

式中:  $U$ ——配电变压器高压侧额定线电压, kV;

$\Delta P_{k(j)}$ ——第  $j$  节点公用配电变压器的额定短路损耗功率, kW。

配电线路总的等值电阻

$$R_{eq} = R_{eqL} + R_{eqR} \quad \dots\dots\dots (43)$$

配电线代表日的总损耗电量

$$\Delta A = [\sum \Delta P_{0(j)} + 3 I_{av(0)}^2 \cdot K^2 \cdot R_{eq} \times 10^{-3}] \times 24 \quad \dots\dots\dots (44)$$

## 2.6 低压电力网电能损耗计算

低压网的网络复杂,且负荷分布不匀,资料亦不全,故一般只能采用简化的方法计算。推荐两种方法

① 台区损耗率法；② 电压损失率法。

2.6.1 台区损耗率法的计算方法和步骤如下。

a) 已知各台区计算期的月供电量，取容量相同，低压出线数具有代表性的台区数个，且负荷正常，电表运行正常，无窃电现象的，做为该容量的典型台区。

b) 实测各典型台区电能损耗及损耗率，即于同一天、同一时段抄录各典型台区总表的供电量及台区区内各售电表的售电量，得出测量期内各典型台区的损耗电量及损耗率，并计算各容量下典型台区的平均损耗率 $\overline{\Delta A}_i\%$ 。

c) 将待计算损耗的各台区，按配电变压器容量分组，组内配电变压器月供电量之和乘以该组典型台区平均损耗率 $\overline{\Delta A}_i\%$ ，即得该组台区损耗。计算公式为

$$\Delta A_i = \overline{\Delta A}_i\% \sum A_i \quad \dots\dots\dots (45)$$

d) 将各组台区损耗相加，可求出配电网低压台区总损耗电量。计算公式为

$$\Delta A = \sum_{i=1}^n \overline{\Delta A}_i\% \sum A_i \quad \dots\dots\dots (46)$$

式中： $n$ ——配电变压器按容量划分的组数；

$A_i$ ——第  $i$  台配电变压器低压侧月供电量。

2.6.2 电压损失率法的计算方法和步骤如下。

a) 选  $n$  个配电变压器容量、低压干线型号及供电半径有代表性的台区为测量各类台区压降的典型台区。

b) 确定低压电网的干线及其末端(若配电变压器有多路出线则需确定每路出线的末端，每一路出线作为一个计算单元)。凡从干线上接出的线路称为一级支线，从上级支线上接出的线路称为二级支线。以下步骤均指一个计算单元。

c) 在低压电网最大负荷时测录配电变压器出口电压  $U_{\max}$ ，末端的电压  $U'_{\max}$ 。

d) 计算最大负荷时首、末端的电压损失率  $\Delta U_{\max}\%$

$$\Delta U_{\max}\% = \frac{U_{\max} - U'_{\max}}{U_{\max}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (47)$$

式中： $U_{\max}$ ——最大负荷时配电变压器出口电压，V；

$U'_{\max}$ ——最大负荷时干线末端电压，V。

e) 按下式计算最大负荷时的功率损耗率  $\Delta P_{\max}\%$

$$\Delta P_{\max}\% = K_p \cdot \Delta U_{\max}\%$$

$$K_p = \frac{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}{1 + \frac{x}{R}\operatorname{tg}\varphi} \quad \dots\dots\dots (48)$$

或根据导线牌号及功率因数由表 2 查得

式中： $x$ ——导线电抗， $\Omega$ ；

$R$ ——导线电阻， $\Omega$ ；

$\varphi$ ——电流与电压间的相角。

f) 按下列公式计算代表日电能损耗率及损耗电能

$$\Delta A\% = \frac{F}{f} \Delta P_{\max}\% \quad \dots\dots\dots (49)$$

$$\Delta A = A \cdot \Delta A\% \quad \dots\dots\dots (50)$$

式中： $f$ ——负荷率，各单位根据实际情况确定；

$F$ ——损耗因数(见附录 C)；

$A$ ——代表日配电变压器供电量(多路出线则每路出线供电量按每路出线电流分摊)，kWh。

g) 对于负荷较大、线路较长的一级支线，测录支接点及支线末端的电压，然后按上述步骤计算支线

的电能损耗。

表 2 低压 380 V 三相架空线路电能损耗率与电压损失率之比( $\Delta P\%/\Delta U\%$ )

$\Delta P\%/\Delta U\%$ 导线牌号	$\cos\varphi$									
	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0	
LJ-25	2.099	1.844	1.636	1.464	1.322	1.203	1.105	1.026	1.0	
LJ LGJ-35	1.933	1.711	1.53	1.379	1.254	1.151	1.066	1.0	1.0	
50	1.726	1.542	1.392	1.267	1.163	1.078	1.011	0.963	1.0	
70	1.521	1.373	1.251	1.15	1.067	1.0	0.95	0.921	1.0	
95	1.331	1.212	1.114	1.034	0.97	0.92	0.885	0.874	1.0	
120	1.212	1.11	1.026	0.959	0.905	0.865	0.84	0.84	1.0	
150	1.06	0.977	0.911	0.858	0.817	0.789	0.777	0.792	1.0	
185	0.94	0.872	0.817	0.775	0.744	0.725	0.722	0.748	1.0	
TJ-16	1.869	1.659	1.487	1.345	1.227	1.129	1.049	0.989	1.0	
25	1.813	1.614	1.45	1.315	1.202	1.11	1.035	0.979	1.0	
35	1.63	1.463	1.326	1.213	1.119	1.043	0.983	0.944	1.0	
50	1.395	1.266	1.161	1.074	1.003	0.948	0.908	0.89	1.0	
70	1.142	1.049	0.973	0.913	0.865	0.831	0.812	0.819	1.0	
95	0.991	0.917	0.858	0.811	0.776	0.753	0.746	0.767	1.0	
120	0.866	0.806	0.759	0.723	0.697	0.683	0.685	0.718	1.0	

h) 一个单元的损耗电量=(干线的损耗电能+主要一级支线的损耗电能)/K

其中 K 为干线及一级支线占计算单元的损耗电能的百分数,一般取 80%。

i) 一台配电变压器的低压网络的总损耗电能为其各计算单元的损耗电能之和。

j) 按上述方法和步骤计算其余典型台区的电能损失率  $\Delta A_i\%$

$$\Delta A_i\% = \Delta A_i/A_i \quad \dots\dots\dots(51)$$

式中: $A_i$ ——典型 i 台区日供电量;

$\Delta A_i$ ——典型台区日电能损耗。

k) 将待计算的各台区按 n 个典型分组,统计各组台区供电量  $\sum A_i$ ,并按下式计算各台区总损耗

$$\Delta A = \sum_{i=1}^n (\Delta A_i\% \sum A_i) \quad \dots\dots\dots(52)$$

式中:n——典型台区数;

$\sum A_i$ ——电能损失率为  $\Delta A_i\%$ 的台区供电量之和。

l) 电能表的电能损耗计算。

电能表的损耗计算,一般主要考虑感应式交流电能表的固定损耗,每只单相表月损耗电能取 1 kWh,每只三相表月损耗电能取 2 kWh,则总损耗电能为

$$\Delta A = 1 \times n + 2 \times M \quad \dots\dots\dots(53)$$

式中:n、M——单相、三相电能表的只数。

m) 台区总损耗电能为低压网络总损耗及电能表损耗之和。

### 3 电能损耗分析

3.1 电能损耗分析的目的在于鉴定网络结构和运行的合理性,供电管理的科学性,找出计量装置、设备性能、用电管理、运行方式、理论计算、抄收统计等方面存在的问题,以便采取降损措施。

3.2 统计线损率与理论线损率进行对比分析时,为了达到两者的可比性,可以考虑下列因素。

- a) 对原统计线损率所用的供电量数值调整为计算理论线损率时采用的供电量数值,并得出相应的线损率。
- b) 对关口计量装置用校验证实的实际误差进行电能调整。
- c) 发电厂中漏计的自用电在供电量中调整,变电所漏计的自用电在线损电能中调整。
- d) 考虑售电量中漏计或多计的电能(包括发电厂、供电局、变电所等的自用电及第三产业用电)。
- e) 考虑因供售电量抄表不同期而少计或多计的电能。
- f) 考虑理论计算中不列入损耗归用户的损耗电能。

进行上述分析后,统计线损率和理论线损率应该基本一致,否则,应查明原因。

3.3 对统计线损及理论线损应按电压等级进行统计,分别列出变压器绕组及空载损耗、线路损耗及其他元件的损耗电能及其所占该电压等级的总损耗电能的百分比。并与上年及历年的分压线损及分类线损进行比较,以便判断损耗结构的变化。分析供电半径、电流密度、供电电压、潮流分布、变压器负载率是否合理,以及售电构成变化对电能损耗的影响。

3.4 分析电网的无功潮流及功率因数,无功功率是否符合分压分区就地平衡的原则。针对无功平衡方面存在的问题,提出改善无功补偿的措施,开展无功优化工作。

#### 4 降低电能损耗措施的效果计算

4.1 对降低能耗措施的采用和降低能耗效果的考核,本导则提出以下基本计算方法。

4.2 合理调整电压降损电能的计算。

本条所指的电压调整,是指通过调整变压器分接头,在母线上投切电容器及调相机调压等手段,在保证电压质量的基础上对电压作小幅度的调整。

为正确决定调压的必要性,应先按如下条件进行判断:

4.2.1 当整个电网的可变损耗与固定损耗之比  $C$  大于表 3 数值时,提高电压水平有降损效果。

表 3 可变损耗与固定损耗之比的标准值(一)

电压提高率 $U_a\%$	1	2	3	4	5
铜铁损比 $C$	1.02	1.04	1.061	1.092	1.10

4.2.2 当整个电网的可变损耗与固定损耗之比  $C$  小于表 4 数值时,降低电压水平有降损效果。

表 4 可变损耗与固定损耗之比的标准值(二)

电压提高率 $U_a\%$	-1	-2	-3	-4	-5
铜铁损比 $C$	0.98	0.96	0.941	0.922	0.903

$$U_a\% = \frac{U' - U}{U} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(54)$$

式中:  $U_a\%$ ——电压提高率;

$U'$ ——调压后的母线电压,kV;

$U$ ——调压前的母线电压,kV。

$$C = \frac{\Delta A_R}{\Delta A_G} \quad \dots\dots\dots(55)$$

式中:  $\Delta A_G$ ——调压前被调电网的固定损耗电能,kWh;

$\Delta A_R$ ——调压前被调电网的可变损耗电能,kWh。

电压调整后降损电能

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A_R \left[ 1 - \frac{1}{(1 + \alpha)^2} \right] - \Delta A_G \cdot \alpha(2 + \alpha) \quad \dots\dots\dots(56)$$

4.3 送电线路升压改造降损电能的计算

送电线路升压改造适用于以下二种情况。

- 4.3.1 用电负荷增长,造成线路输送容量不够或能耗大幅度上升,达到明显不经济的地步。
- 4.3.2 简化电压等级,淘汰非标准电压。

表 5 升压后线路损耗的效果表

升压前的 额定电压 (kV)	升压后的 额定电压 (kV)	升压后的线路 损耗降低 (%)	升压前的 额定电压 (kV)	升压后的 额定电压 (kV)	升压后的线路 损耗降低 (%)
154	220	51	22	35	60.5
110		75	10		91.8
66	110	64	6	10	64
35		89.9	3		91

线路升压后的降损电能为

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A \left( 1 - \frac{U_1^2}{U_2^2} \right) \dots\dots\dots(57)$$

式中:  $\Delta A$ ——升压前线路的损耗电能, kWh;  
 $U_1$ ——升压前线路的额定线电压, kV;  
 $U_2$ ——升压后线路的额定线电压, kV。

或按表 5 查取升压后线路损耗降低百分数。

4.4 并联无功补偿降损电能的计算。

当电网中某一点装置无功补偿容量  $Q_c$  后,则从该点至电源点所有串接的线路及变压器的无功潮流都将减少  $Q_c$ ,从而使该点以前串接元件中的电能损耗减少。其降损电能可用潮流方法计算,也可采用以下两种方法计算。

4.4.1 根据无功经济当量计算:

补偿装置的无功经济当量是该点以前无功潮流流经的各串接元件的无功经济当量的总和。

$$C_{p(x)} = \sum_{i=1}^m C_{pi} \dots\dots\dots(58)$$

式中:  $C_{p(x)}$ ——补偿设备装置点( $x$ 点)的无功经济当量, kW/kvar;  
 $C_{pi}$ —— $x$ 点以前各串元件的无功经济当量;  
 $i$ ——取  $1 \sim m$ ,  $m$  为  $x$ 点以前串接元件数。

为了简化计算,串接元件只考虑到上一级电压的母线。

$$C_{pi} = \frac{2Q_i - Q_c}{U_i^2} R_i \times 10^{-3} \dots\dots\dots(59)$$

式中:  $Q_i$ ——第  $i$  串接元件补偿前的无功潮流, kvar;  
 $R_i$ ——第  $i$  串接元件的电阻,  $\Omega$ ;  
 $U_i$ ——第  $i$  元件的运行电压, kV;  
 $Q_c$ ——无功补偿装置的额定容能, kvar。

装置无功补偿设备后,电网中的降损电能

$$\Delta(\Delta A) = Q_c [C_{p(x)} - \text{tg}\delta] T \dots\dots\dots(60)$$

式中:  $\text{tg}\delta$ ——电容器的介质损耗角正切值,由厂家提供,对于调相机,则以它的相应损耗率代替;  
 $T$ ——无功补偿设备的投运时间, h。

4.4.2 根据补偿点前各串接元件补偿前后的功率因数的变化,计算补偿前各串接元件负荷的功率因数

$$\cos\varphi_{(1)} = \cos \left( \text{arctg} \frac{Q_i}{P_i} \right) \dots\dots\dots(61)$$

式中： $P_i, Q_i$ ——分别为补偿前各元件的有功负荷、无功负荷。

补偿后各串接元件负荷功率因数

$$\cos\varphi_{i(2)} = \cos\left(\arctg \frac{Q_i - Q_c}{P_i}\right) \dots\dots\dots(62)$$

补偿后电网中的降损电能

$$\Delta(\Delta A) = \sum_{i=1}^m \left[ \Delta A_i \left( 1 - \frac{\cos^2\varphi_{i(1)}}{\cos^2\varphi_{i(2)}} \right) \right] - Q_c \cdot \text{tg}\delta \cdot t \dots\dots\dots(63)$$

式中： $\Delta A_i$ ——各串接元件补偿前的损耗电能，kWh。

#### 4.5 增加并列线路降损电能的计算。

增加并列线路是指由同一电源至同一受电点增加一条或几条线路并列运行。

##### 4.5.1 增加等截面、等距离线路并列运行后的降损电能

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A \left( 1 - \frac{1}{N} \right) \dots\dots\dots(64)$$

式中： $\Delta A$ ——原来一回线路运行时的损耗电能，kWh；

$N$ ——并列运行路线的回路数。

##### 4.5.2 在原导线上增加一条不等截面导线后的降损电能

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A \left( 1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \dots\dots\dots(65)$$

式中： $R_1, R_2$ ——分别为原线路的电阻、增加导线的电阻， $\Omega$ 。

#### 4.6 增大导线截面，或改变线路迂回的降损电能

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A \left( 1 - \frac{R_2}{R_1} \right) \dots\dots\dots(66)$$

式中： $\Delta A$ ——改造前线路的损耗电能，kWh；

$R_1, R_2$ ——分别为线路改造前后的电阻，对于有分支的线路，则以等值电阻代替， $\Omega$ 。

#### 4.7 环网开环运行降损电能的计算。

##### 4.7.1 合环运行时的功率分布按下式计算

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{Li} &= \frac{\sum_{k=1}^m \dot{S}_k \dot{Z}_k}{\dot{Z}_\Sigma} \\ \dot{S}_{Lj} &= \frac{\sum_{k=1}^m \dot{S}_k \dot{Z}'_k}{\dot{Z}_\Sigma} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(67)$$

其余线路的功率分布可按基尔霍夫定律确定，

式中： $\dot{S}_{Li}$ ——通过各线段的功率，下标  $i$  为线段顺序号， $i$  取  $1 \sim n$ ， $n$  为线段数，kVA；

$\dot{S}_k$ ——环网各节点的负荷功率，下标  $k$  为节点顺序号， $k=1 \sim m$ ， $m$  为节点数，kVA；

$\dot{Z}_k$ ——第  $k$  节点后各线段阻抗之和， $\Omega$ ；

$\dot{Z}'_k$ ——第  $k$  节点前各线段阻抗之和， $\Omega$ ；

$\dot{Z}_\Sigma$ ——环网各线段阻抗之和， $\dot{Z}_\Sigma = \dot{Z}_k + \dot{Z}'_k, \Omega$ 。

##### 4.7.2 经济功率分布按下式计算

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{Lij} &= \frac{\sum_{k=1}^m \dot{S}_k R_k}{R_\Sigma} \\ \dot{S}_{Lkj} &= \frac{\sum_{k=1}^m \dot{S}_k R'_k}{R_\Sigma} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(68)$$

式中： $\dot{S}_{Lij}$ ——按照经济功率分布的通过各线段的功率，下标  $i$  为线段顺序号， $i$  取  $1 \sim n$ ， $n$  为线段数，kVA；

$R_k$ ——第  $k$  节点后各线段电阻之和， $\Omega$ ；

$R'_k$ ——第  $k$  节点前各线段电阻之和， $\Omega$ ；

$R_\Sigma$ ——环网各线段电阻之和， $R_\Sigma = R_k + R'_k$ 。

其他各线段功率可按基尔霍夫定律确定。

4.7.3 根据经济功率分布得出的送端输出功率  $S_{Lij}$ 、 $S_{Lkj}$  及各负荷节点的负荷功率，确定环网的开环点，使开环后的网络功率分布接近经济功率分布，并得出开环时各线段的功率  $S_{Lig}$ 。

4.7.4 环网开环运行后的降损电能

$$\Delta(\Delta A) = \frac{FT}{U^2} \sum_{i=1}^m (S_{Li}^2 - S_{Lig}^2) R_{Li} \times 10^{-3} \dots\dots\dots(69)$$

式中： $S_{Li}$ ——最高负荷时，合环运行各线段的功率，kVA；

$S_{Lig}$ ——最高负荷时，开环运行各线段的功率，kVA；

$U$ ——环网送端母线的平均线电压，kV；

$R_{Li}$ ——各线段的电阻， $\Omega$ ；

$F$ ——损耗因数；

$T$ ——运行时间，h。

4.8 双绕组变压器经济运行降损电能的计算

4.8.1 当变电所有多台相同型号的双绕组变压器并列运行时，应分别计算相邻台数变压器的临界负荷，确定不同负荷情况下，应当投运的变压器台数。

$n$  台与  $(n-1)$  台变压器的临界负荷

$$S_k = \sqrt{n(n-1) \frac{\Delta P_o}{\Delta P_k F} S_N} \dots\dots\dots(70)$$

式中： $n$ ——并列运行变压器的台数；

$S_N$ ——单台变压器的额定容量，kVA；

$\Delta P_o$ 、 $\Delta P_k$ ——分别为每台变压器的空载损耗、短路损耗，kW；

$F$ ——变电所总负荷的损耗因数。

当变电所总负荷的最大值  $S_{max} > S_k$  时，使用  $n$  台并列运行经济。

当变电所总负荷的最大值  $S_{max} < S_k$  时，使用  $(n-1)$  台并列运行经济。

当  $S_{max} < S_k$  时， $(n-1)$  台运行比  $n$  台运行减少的电能损耗为

$$\Delta(\Delta A) = \left[ \Delta P_o - \frac{1}{n(n-1)} \Delta P_k \left( \frac{S_{max}}{S_N} \right)^2 F \right] T \dots\dots\dots(71)$$

式中： $S_{max}$ ——变电所总负荷的最大值，kVA；

若考虑变压器的无功损耗，则式(70)、式(71)相应改为

$$S_k = \sqrt{n(n-1) \frac{\Delta P_o + C_p \Delta Q_o}{(\Delta P_k + C_p \Delta Q_k) F} S_N} \dots\dots\dots(72)$$

$$\Delta(\Delta A) = \left[ \Delta P_o + C_p \Delta Q_o - \frac{1}{n(n-1)} (\Delta P_k + C_p \Delta Q_k) \left( \frac{S_{max}}{S_N} \right)^2 F \right] T \dots\dots\dots(73)$$

4.8.2 当变电所有多台不同型号的双绕组变压器时，计算并列各种组合方式下的临界负荷表，然后再根据变电所的负荷选择最经济的组合方式。

每两种组合方式的临界负荷可按式(74)计算

$$S_{k(ij)} = \sqrt{\frac{\sum \Delta P_{oj} - \sum \Delta P_{oi}}{\left(\frac{\sum \Delta P_{kj}}{(\sum S_{Ni})^2} - \frac{\sum \Delta P_{ki}}{(\sum S_{Nj})^2}\right) F}} \dots\dots\dots (74)$$

式中： $\sum \Delta P_{oi}$ 、 $\sum \Delta P_{oj}$ ——分别为第*i*种及第*j*种组合方式并联变压器组的总空载损耗，kW；  
 $\sum \Delta P_{ki}$ 、 $\sum \Delta P_{kj}$ ——分别为第*i*种及第*j*种组合方式并联变压器组的总短路损耗，kW；  
 $\sum S_{Ni}$ 、 $\sum S_{Nj}$ ——分别为第*i*种及第*j*种组合方式并联变压器组的总额定容量，kVA；  
*F*——变电所总负荷的损耗因数。

4.8.3 当采用线路变压器组时，要考虑线路的阻抗。

4.9 单相三线制供电比单相二线或三相四线制供电可大幅度降低供电网电能损耗，可采用常规方法进行降损效果计算，它可以使用单相变压器，可以采用高压单相深入用户，单相变压器易于采用卷铁芯结构，使损耗大大减少（可达50%~60%），单相三线制比三相四线制供电中低压电网综合电能损耗约可降低20%~30%。

## 5 电能损耗统计、计算与分析软件设计要求

### 5.1 基本要求

5.1.1 电能损耗的统计、计算与分析应使用计算机编制相应软件完成。

5.1.2 软件功能设计应充分利用计算机高精度、汉字、图形等功能，尽量计算精确、操作方便、实用（参见附录B）。

### 5.2 电能损耗理论计算软件设计要求

5.2.1 电能损耗理论计算软件，主要用于进行线损理论计算和降损分析，以分析技术线损构成，制定降损措施。

5.2.2 软件的计算方法应有广泛的适用性，既有潮流计算方法，也有等值电阻等简化计算方法。

5.2.2.1 应用潮流计算方法时，应考虑下述因素：

- a) 110 kV 及以上电网应计及充电功率对电压及能耗的影响；
- b) 考虑电压变化对变压器空载损耗的影响；
- c) 考虑发电出力曲线，负荷曲线的影响；
- d) 计及电容器、电抗器、调相机辅机等损耗；
- e) 高压网应能计算电晕损耗；
- f) 计及环境温度及导线温升对线路损耗的影响。

5.2.2.2 采用简化方法计算时，应考虑下述因素：

- a) 尽可能精确考虑多端电源供电，如小水（火）电供电的情况；
- b) 充分利用收集到的运行参数，考虑发电出力曲线、负荷曲线对电能损耗的影响；
- c) 应计及电容器、电抗器等元件损耗。

5.2.3 电能损耗理论计算软件应具有输入及运行功能。

5.2.3.1 原始数据的输入型式应有较广泛的适用性：

- a) 应用数据库技术进行管理，并配有标准参数库；
- b) 输入数据可以采用有名值或标么值；
- c) 节点参数可以用有功、无功、电压实际值；或计算期的有功、无功电能与负荷曲线的特征系数输入，并对节点作预处理。

5.2.3.2 能对计算数据进行检错，并作相应的处理。

5.2.3.3 能通过计算机屏幕监视整个输入及计算过程，并能随时进行干预：

- a) 便于人机对话，调用及修改数据文件；
- b) 通过计算机屏幕对运行过程进行追踪监视；

c) 通过计算机屏幕发出错误信息。

#### 5.2.4 电能损耗理论计算软件应具有的输出功能

——能输出供电能损耗分析用的各种分类表格、图形、曲线。如分压线损、变压器的空载和负荷损耗的分类表格。

——应用潮流方法计算时,应能输出代表日任意时刻的潮流结果。如各母线的有功和无功出力、有功和无功负荷、母线电压、线路有功、无功潮流及总有功、无功出力、总有功、无功负荷等。

——能输出代表日全网的综合情况,如有功供电量、无功供电量,有功用电量、无功用电量,有功损耗电能及损耗率、无功损耗电能及损耗率等。

——能输出计算时段(如月、年)的电能损耗结果。

——对于配电网应能输出等值电阻及电抗。

——具有分台区、分县、分地区、分省输出,并能逐级上报的功能,能实现地区汇总、省局及网局汇总。

#### 5.2.5 具有技术降损分析功能

a) 可进行无功综合优化降损计算。

b) 可对线路升压和改造、增加并列线路、更换变压器、停运空载变和变压器经济运行等降损措施进行计算。

c) 可进行电能损耗的敏感度分析。

d) 可进行多种降损分析方案的综合比较。

#### 5.3 电能损耗管理软件设计要求

5.3.1 电能损耗管理软件主要用于每月的线损统计分析计算和日常线损管理,及时发现线损管理中存在的各种问题,保证统计线损真实可信。

5.3.2 软件适用于各种管理模式,能做到分级管理,分线分压统计分析,小指标统计。

5.3.3 根据分级管理的要求,程序分为几大管理模块(如网局、省局、省调、地区局、县局),各模块独立性强,相互之间以统一的数据接口联接。数据可以逐级上报,也可越级上报。

5.3.4 数据输入量要尽量减少,网局、省局、省调要求不送原始数据,数据来源于基层发电厂和供电单位,程序能够做到自动汇总、处理所需数据和分析报表。

5.3.5 程序能够自动汇总处理日常所需的各种线损报表、线损台帐、使计算机完全可以完成日常线损管理工作。

5.3.6 程序要有分析、查寻、对比功能,对影响线损率升降的因素要进行定量分析,如抄表时间、用电结构变化、用电管理、计量管理、主网潮流变化等因素对线损的影响。

5.3.7 录入及统计日期可以在运行时,根据需要随时变更,可方便地查寻和输出特定时间的各类统计结果和各种统计报表。

5.3.8 统计结果以直线图、直方图和饼状图等二维或三维图显示和打印输出。

5.3.9 输出结果齐全,便于分析。

可输出线损报表,要求要有本单位本月及年累计全局、分区、分压供电量、线损电量、线损率,扣无损电量后的线损率,去年同期线损率完成情况,线损小指标统计结果;

可输出每个变电所各电压等级电能平衡情况;

可输出每条线路线损完成情况;

可输出每月关口表位电能,关口表位所在母线电量平衡情况、关口表分线线损统计;

可输出线路、变压器、各电压等级线损、电能平衡等台帐;

可输出统计分析结果,如高损馈路、电能平衡、功率因数、时差、用电构成、主网潮流等对线损的影响分析。

5.4 理论计算与统计软件的数据应能相互传输自动形成对比分析表格。

5.5 在电网自动化条件具备时,实现统计、理论计算的在线化。

附录 A  
(标准的附录)  
电力网元件参数的计算

A1 架空线路的等值电路(见图 A1)和参数

A1.1 电阻

$$R = \frac{r_0 l}{n} = \frac{\rho l}{nS} \quad (\Omega)$$

式中:  $r_0$ ——导线每公里电阻,  $\Omega/\text{km}$ ;  
 $l$ ——线路长度,  $\text{km}$ ;  
 $n$ ——每相分裂导线数;  
 $\rho$ ——导线的计算电阻率,  $20^\circ\text{C}$ 时铝导线  $\rho_{20} = 31.5$ , 铜导线  $\rho_{20} = 18.8, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ;  
 $S$ ——导线标称截面,  $\text{mm}^2$ 。

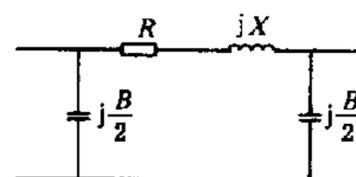


图 A1 架空线路的等值电路

导线电阻一般应采用制造厂家提供的数据。对钢导线,  $R$  随电流而变化, 应查阅有关手册。

A1.2 电抗

$$X = x_0 l = \left( 0.1445 \lg \frac{D_{gh}}{r_{dx}} + \frac{0.0157}{n} \right) l \quad (\Omega)$$

对钢导线

$$x_0 = x'_0 + x''_0$$

$$x'_0 = 0.1445 \lg \frac{D_{gh}}{r_{dx}}$$

式中:  $x_0$ ——线路每公里的电抗, 对于钢导线满足上式,  $\Omega/\text{km}$ ;  
 $x'_0$ ——外感抗,  $\Omega$ ;  
 $x''_0$ ——内感抗, 与电流大小有关, 可查阅有关手册;  
 $D_{gh}$ ——三相导线的几何均距,  $D_{gh} = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{CA}}$ , 其中  $D_{AB}, D_{BC}, D_{CA}$  为三相导线之间的距离,  $\text{cm}$ ;  
 $r_{dx}$ ——每相导线的等效半径,  $\text{cm}$ 。

等效半径  $r_{dx}$  与每相导线的分裂根数  $n$ 、每相导线的计算半径  $r$  和分裂导线间的几何均距  $d_{gh}$  有如下关系

$$r_{dx} = \sqrt[n]{rd_{gh}^{n-1}}$$

$$d_{gh} = a\alpha$$

式中:  $a$ ——分裂导线作正多边形排列时, 为正多边形的边长,  $\text{cm}$ ;  
 $\alpha$ ——分裂系数, 与每相导线的排列有关, 正多边形排列方式的  $\alpha$  值见表 A1。

表 A1 分裂系数值

$n$	2	3	4	5	6
$\alpha$	1	1	1.12	1.27	1.4

A1.3 电纳

$$B = b_0 l = \left( \frac{7.58}{\lg \frac{D_{gh}}{r_{dx}}} \times 10^{-6} \right) l \quad (\text{S})$$

式中： $b_0$ ——线路每相每公里的电纳，S/km。

当架空线路电压在 35 kV 及以下时， $B$  可忽略不计。

若线路长度超过 300 km，并在 1 000 km 以内时， $R$ 、 $X$ 、 $B$  应自乘一修正系数  $K_r$ 、 $K_x$ 、 $K_b$

$$K_r = 1 - \frac{l}{3} x_0 b_0 l^2$$

$$K_x = 1 - \frac{l^2}{6} \left( x_0 b_0 - r_0^2 \frac{b_0}{x_0} \right)$$

$$K_b = 1 + x_0 b_0 \frac{l^2}{12}$$

## A2 变电器的等值电路(见图 A2、图 A3)和参数

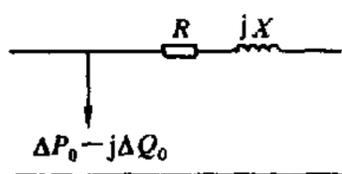


图 A2 双绕组变压器等值电路

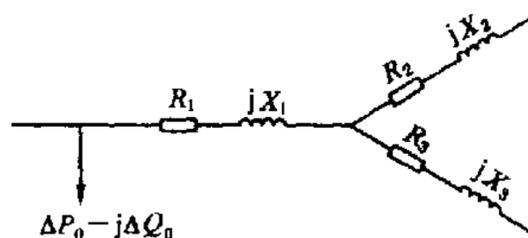


图 A3 三绕组变压器等值电路

### A2.1 双绕组变压器

$$R = \frac{\Delta P_k U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad (\Omega)$$

$$X = \frac{U_k \% U_N^2}{S_N} \times 10 \quad (\Omega)$$

$$\Delta Q_0 = \frac{i_0 \% S_N}{100} \quad (\text{kvar})$$

式中： $U_N$ ——归算侧变压器额定电压，kV；

$S_N$ ——变压器额定容量，kVA；

$\Delta P_k$ ——变压器短路损耗，kW；

$U_k \%$ ——变压器短路电压百分值；

$i_0 \%$ ——变压器空载电流百分值。

### A2.2 三绕组变压器

$$R_1 = \frac{\Delta P_{k1} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad (\Omega)$$

$$R_2 = \frac{\Delta P_{k2} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad (\Omega)$$

$$R_3 = \frac{\Delta P_{k3} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad (\Omega)$$

$$\Delta P_{k1} = 0.5 [\Delta P_{k(1-2)} + \Delta P_{k(1-3)} - \Delta P_{k(2-3)}]$$

$$\Delta P_{k2} = \Delta P_{k(1-2)} - \Delta P_{k1}$$

$$\Delta P_{k3} = \Delta P_{k(1-3)} - \Delta P_{k1}$$

$$X_1 = \frac{U_{k(1)} \% U_N^2}{S_N} \times 10 \quad (\Omega)$$

$$X_2 = \frac{U_{k(2)} \% U_N^2}{S_N} \times 10 \quad (\Omega)$$

$$X_3 = \frac{U_{k(3)} \% U_N^2}{S_N} \times 10 \quad (\Omega)$$

## DL/T 686—1999

式中： $U_{k(1)}\% = 0.5[U_{k(1-2)}\% + U_{k(1-3)}\% - U_{k(2-3)}\%]$

$$U_{k(2)}\% = U_{k(1-2)}\% - U_{k(1)}\%$$

$$U_{k(3)}\% = U_{k(1-3)}\% - U_{k(1)}\%$$

式中符号意义同双绕组变压器。

对容量不是 100/100/100 而是 100/100/66.7、100/66.7/66.7、100/100/50、100/50/100 等的变压器，利用上式时应将绕组小于变压器额定容量的短路损耗，归算到变压器额定容量下的数值。

$$\Delta P_{k(1-2)} = \Delta P'_{k(1-2)} \left( \frac{S_{N1}}{S_{N2}} \right)^2$$

$$\Delta P_{k(1-3)} = \Delta P'_{k(1-3)} \left( \frac{S_{N1}}{S_{N3}} \right)^2$$

$$\Delta P_{k(2-3)} = \Delta P'_{k(2-3)} \left( \frac{S_{N1}}{S_{N3}} \right)^2$$

式中： $\Delta P'_{k(1-2)}$ 、 $\Delta P'_{k(1-3)}$ 、 $\Delta P'_{k(2-3)}$ ——铭牌给出的非全容量时的短路损耗功率；

$S_{N1}$ ——变压器的额定容量（全容量）；

$S_{N2}$ 、 $S_{N3}$ ——中、低压侧绕组本身的容量。

### A2.3 自耦变压器

等值电路及参数计算与普通的双绕组、三绕组变压器相同，但各绕组间的短路损耗和短路电压百分比必须预先归算到同一基准容量（额定全容量）。短路损耗归算方法和普通三绕组变压器相同，短路电压百分比按下式归算

$$U_{k(1-2)}\% = U'_{k(1-2)}\%$$

$$U_{k(2-3)}\% = U'_{k(2-3)}\% \left( \frac{S_{N2}}{S_{N3}} \right)$$

$$U_{k(1-3)}\% = U'_{k(1-3)}\% \left( \frac{S_{N1}}{S_{N3}} \right)$$

式中： $U'_{k(1-2)}\%$ 、 $U'_{k(1-3)}\%$ 、 $U'_{k(2-3)}\%$ ——归算前短路电压百分比。

附录 B  
(标准的附录)

电能损耗统计、计算与分析软件框图

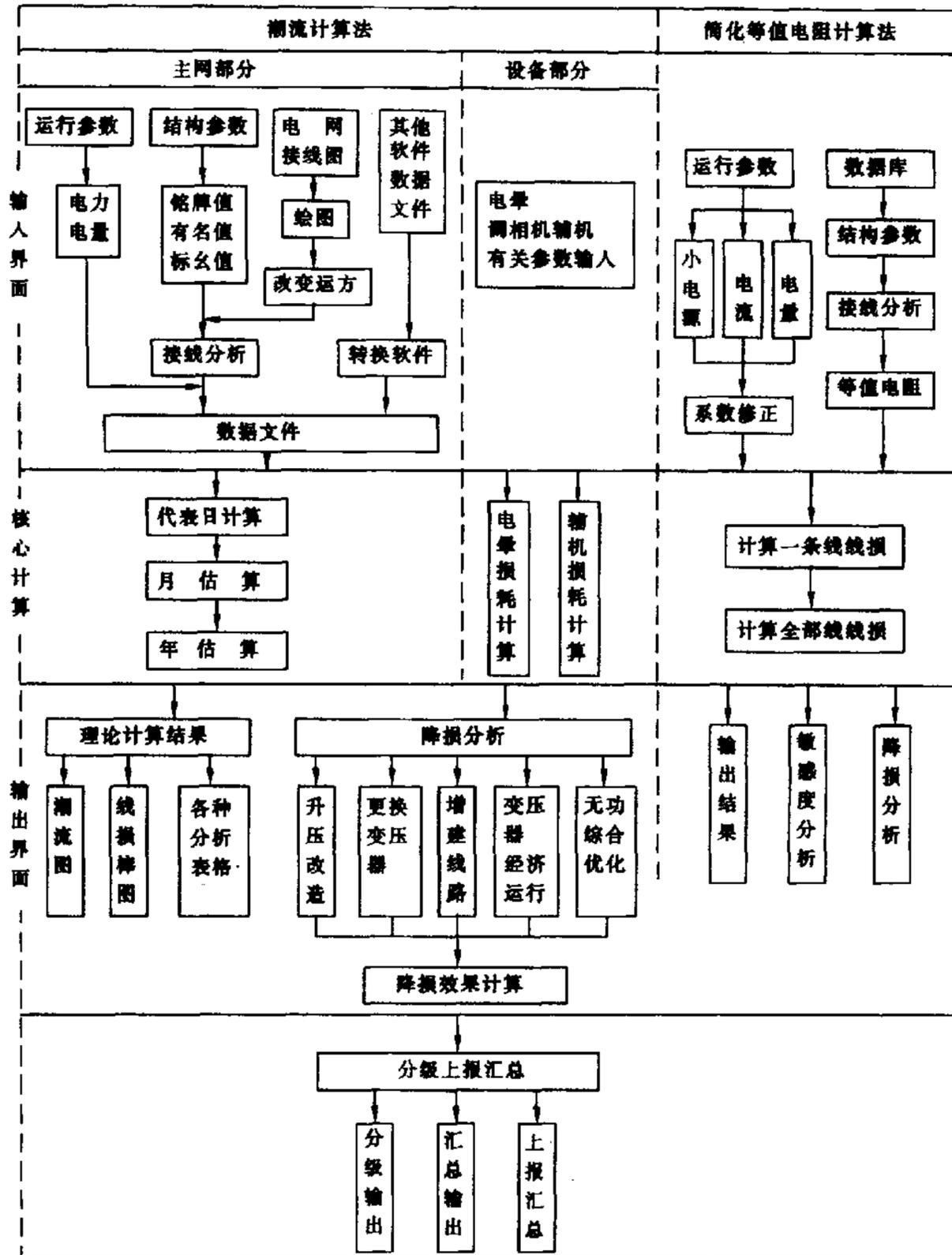


图 B1 电能损耗理论计算软件功能设计框图

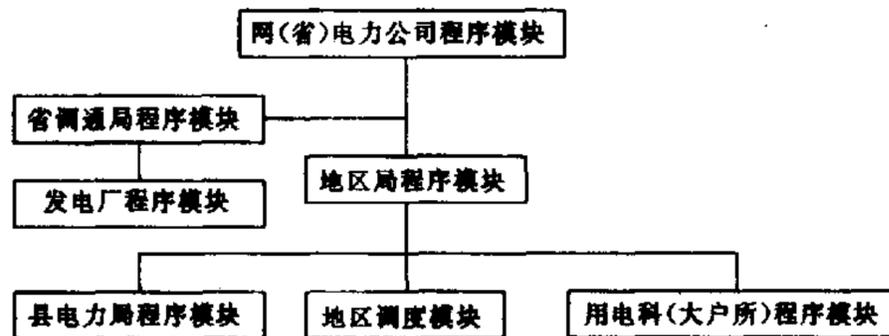


图 B2 电能损耗管理软件层次构成

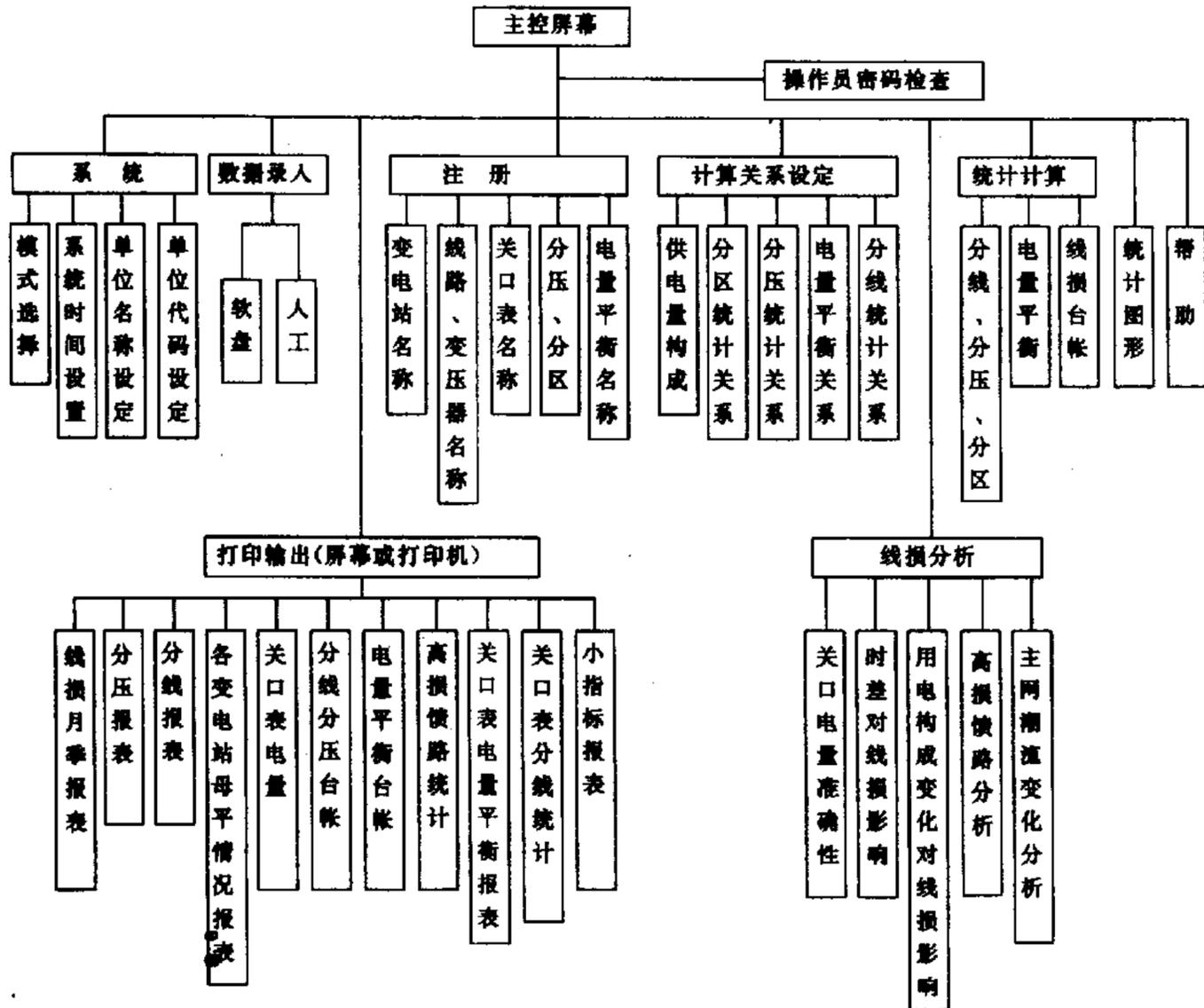


图 B3 电能损耗管理软件功能设计方框图

附录 C

(提示的附录)

关于形状系数(K)和损耗因数(F)的计算说明

C1 形状系数(K)

令方均根电流与平均电流的等效关系为 K, 并称之为形状系数。

$$K = \frac{I_{II}}{I_{av}} \dots\dots\dots(C1)$$

$$I_{av} = \frac{\sum_{i=1}^T I_i}{T} \dots\dots\dots(C2)$$

上两式中:  $I_{av}$ ——代表日负荷电流的平均值, A。

因此, 代表日的损耗电能为

$$\Delta A = 3K^2 I_{av}^2 RT \times 10^{-3} \quad (\text{kWh}) \dots\dots\dots(C3)$$

或 
$$\Delta A = K^2 \frac{A_a^2 + A_r^2}{U_{av}^2 T} R \times 10^{-3} \quad (\text{kWh}) \dots\dots\dots(C4)$$

式中:  $A_a, A_r$ ——代表日的有功电能及无功电能;

$U_{av}$ ——代表日的首端电压平均值, kV。

式(C3)和式(C4)中的  $K^2$  是由负荷曲线的负荷率  $f$  及最小负荷率  $\beta$  确定的

$$f = \frac{I_{av}}{I_{max}} \dots\dots\dots(C5)$$

$$\beta = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \quad \dots\dots\dots(C6)$$

式中:  $I_{\min}$ 、 $I_{\max}$ ——日负荷电流的最小值、最大值, A。

当  $f \geq 0.5$  时,可按直线变化的持续负荷曲线计算  $K^2$  值,即

$$K^2 = \frac{\beta + \frac{1}{3}(1 - \beta)^2}{\left(\frac{1 + \beta}{2}\right)^2} \quad \dots\dots\dots(C7)$$

当  $f < 0.5$  时,可按二阶梯持续负荷曲线计算  $K^2$  值,即

$$K^2 = \frac{f(1 + \beta) - \beta}{f^2} \quad \dots\dots\dots(C8)$$

## C2 损耗因数( $F$ )

令方均根电流的平均与最大电流的平方的比值为  $F$ ,称之为损耗因数

$$F = \frac{I_{\text{方}}^2}{I_{\max}^2} \quad \dots\dots\dots(C9)$$

因此,代表日的损耗电能为

$$\Delta A = 3I_{\max}^2 RFT \times 10^{-3} \quad (\text{kWh}) \quad \dots\dots\dots(C10)$$

当  $f \geq 0.5$  时,按直线变化的持续负荷曲线计算  $F$  值,即

$$F = \beta + \frac{1}{3}(1 - \beta)^2 \quad \dots\dots\dots(C11)$$

当  $f < 0.5$  时,按二阶梯持续负荷曲线计算  $F$  值,即

$$F = f(1 + \beta) - \beta \quad \dots\dots\dots(C12)$$

或

$$F = 0.639f^2 + 0.36f(f + f\beta - \beta) \quad \dots\dots\dots(C13)$$

## 附 录 D

(提示的附录)

### 电晕损耗计算方法简介

电晕损失计算涉及的因素很多,与地理环境、气候条件、导线结构及实际运行情况有关,目前尚没有精确的计算模型。经过比较,在此介绍一种收集参数相对少的计算方法,本方法的核心是通过已有实测曲线(见图 D1~图 D4)进行估算。

根据我国大部分地区的气象条件,可把天气条件划分为以下四类:

- (1) 冰雪天——包括雾凇、雨凇、湿雪、干雪天气;
- (2) 雨天——包括毛毛雨和各种雨强的天气;
- (3) 雾天——包括各种大小雾天、下霜天和结露天;
- (4) 好天——除了以上三种天气以外,都属于好天。

各地区可进行典型条件的电晕损失试验,以取得符合实际的电晕损失曲线。

电力部电力科学研究院及高压研究所,根据导线放电的物理特点,以及在海子头、清河两个实验站实测的数据,绘制了各种天气情况下的电晕损耗功率  $\Delta P_c$  的计算曲线(见图 D1),其关系式为

$$\Delta P_c/n \sim (E_m/\delta, \delta \times r)$$

式中:  $r$ ——每根导线计算半径 cm;

$n$ ——每相导线的分裂根数;

$\delta$ ——空气的相对密度;

$E_m$ ——导线表面的最大电场强度, kV/cm。

应用计算机编制软件时,可将曲线数字化处理后存入计算机。

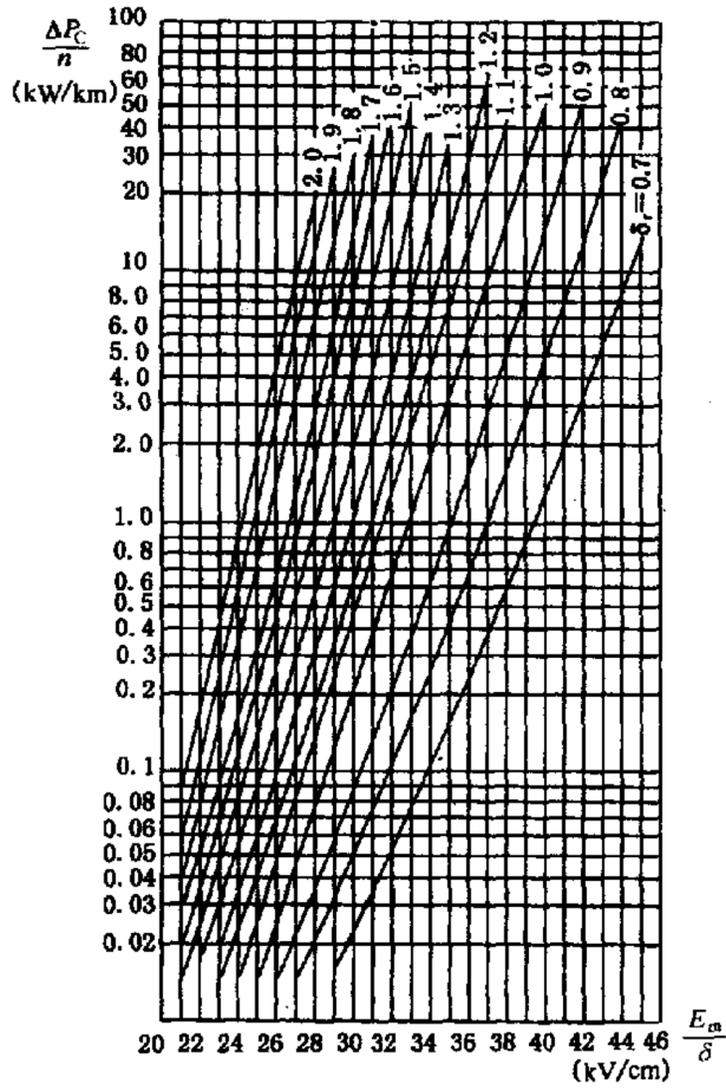


图 D1 电晕损耗计算曲线(好天气)

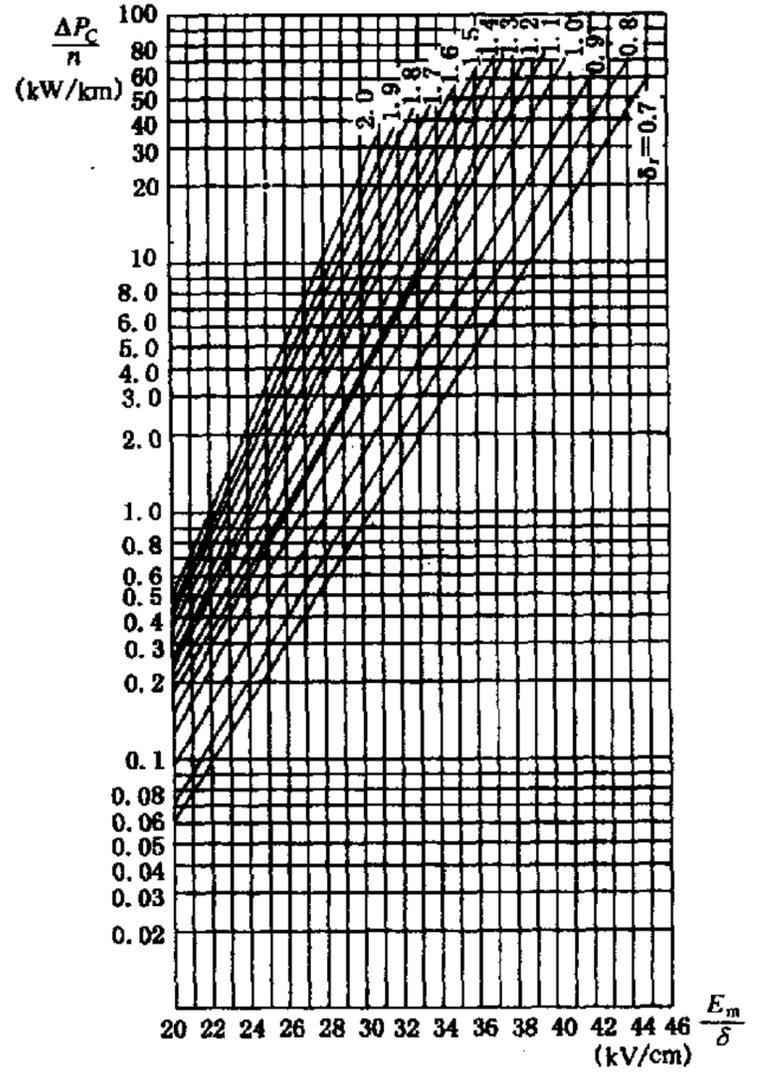


图 D2 电晕损耗计算曲线(雨天)

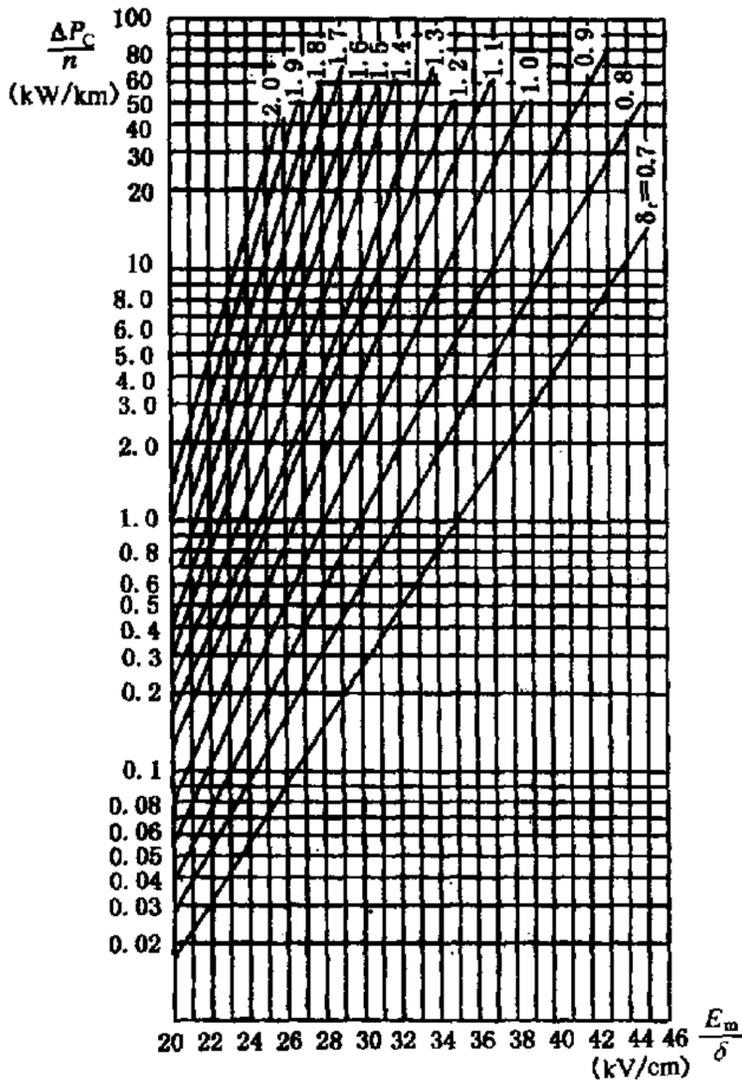


图 D3 电晕损耗计算曲线(雾天)

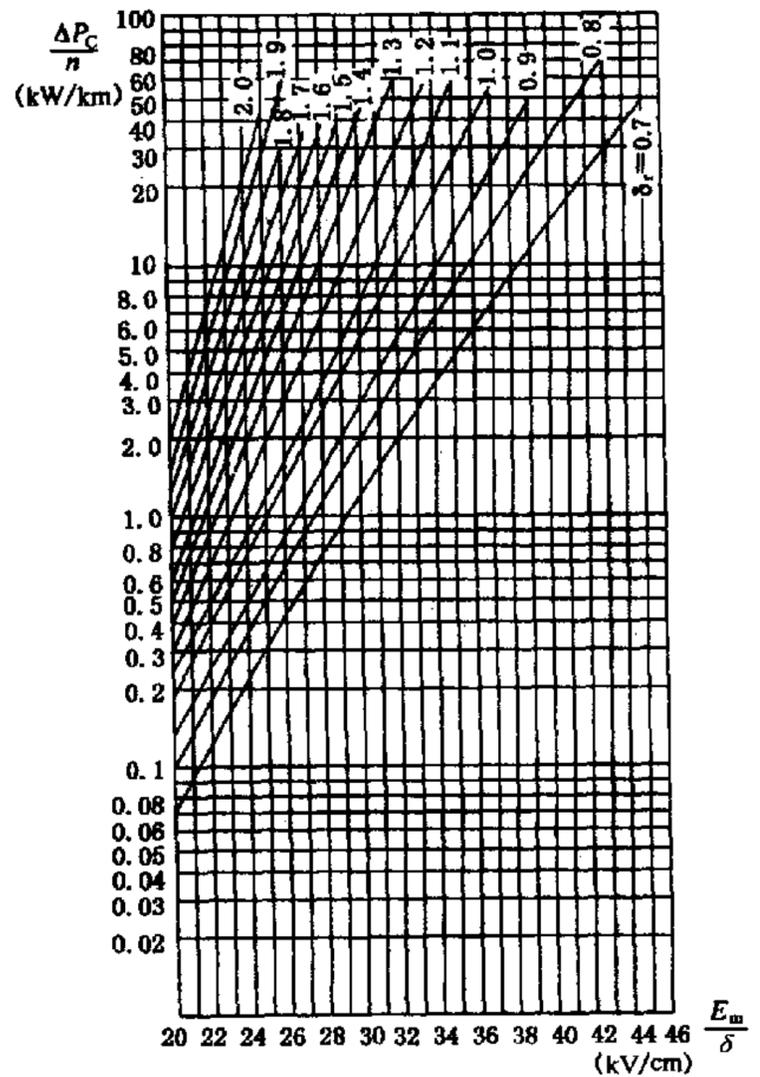


图 D4 电晕损耗计算曲线(雪天)

在某种天气条件下,架空线路每公里的电晕损耗计算步骤如下。

a) 计算 A 相线路每公里的电晕损耗。

首先求出空气的相对密度  $\delta$  及导线表面的最大电场强度  $E_m$

$$\delta = 51.47P / (273 + t)$$

式中:  $P$ ——大气压, Pa;

$t$ ——平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

对于单根导线的输电线路,有

$$E_m = 0.0147CU/r$$

对于分裂导线的输电线路,有

$$E_m = \lambda \times 0.0147CU/r$$

上两式中:  $U$ ——线路的实际运行电压, kV;

$C$ ——各相导线的工作电容, pF/m;

$\lambda$ ——计算分裂导线表面最大电场强度的系数。

当分裂导线成正多边形排列时,有

$$\lambda = 1 + 2r(n-1)\sin(\pi/n)/a$$

式中:  $a$ ——分裂导线间的几何均距, cm。

若计算线路各相导线的工作电容  $C_a, C_b, C_c$ , 则先求得三相换位架空输电线路的平均电容  $C_{av}$  为

$$C_{av} = 24.1 / \lg(D_m / r_{eq}) \quad (\text{pF/m})$$

$$r_{eq} = (r \times a^{n-1})^{1/n}$$

式中:  $D_m$ ——三相导线的几何均距, cm;

$r_{eq}$ ——每根导线的等效半径, cm。

对导线水平排列的三相线路,考虑大地和架空线路的影响以后,在三相对称运行时,边相导线工作电容  $C_a \approx 1.03C_{av}, C_c = C_{av}$ , 中相导线工作电容  $C_b \approx 1.1C_{av}$ , 当三相导线成对称三角形排列时,每相导线工作电容可近似认为相等,等于  $C_{av}$ , 然后求出  $\delta \times r$  和  $E_m/\delta$  的值。

最后,查曲线或采用数学方法从存入计算机的数字化曲线中求得相应 A 相每公里的电晕损耗值  $\Delta P_{cAi}/n_c = \Delta P_{cAi}/n$ 。

b) 同理可得 B 相和 C 相线路每根导线每公里的电晕损耗  $\Delta P_{cBi}/n$  和  $\Delta P_{cCi}/n$ 。

c) 计算一条线路每公里的电晕损耗电能  $\Delta A_{ci}$

$$\Delta A_{ci} = n(\Delta P_{cAi}/n + \Delta P_{cBi}/n + \Delta P_{cCi}/n) \times T_i$$

所以在计算线损时段  $T$  内,三相导线每公里的平均电晕损耗功率  $\Delta P_c$  (kW/km) 以及电晕损耗电能  $\Delta A_c$  (kWh/km) 分别为

$$\Delta A_c = n \sum_{i=1}^k (\Delta P_{cAi}/n + \Delta P_{cBi}/n + \Delta P_{cCi}/n) T_i$$

$$\Delta P_c = \Delta A_c / T$$

$$T = \sum_{i=0}^k T_i$$

式中:  $k$ ——计算时段内不同气象条件的天气数 ( $k \leq 4$ );

$T_i$ ——某种天气的持续小时数,可根据当地气象台站的气象记录取用;

$\Delta P_{cAi}/n, \Delta P_{cBi}/n$  和  $\Delta P_{cCi}/n$ ——某种天气下 A、B、C 相每公里每根导线的损耗功率。

将  $\Delta P_c$  和  $\Delta A_c$  分别乘以线路的长度就得出了每条线路线损计算时段内的平均损耗功率和损失电能。

进一步计算可将导线电晕损耗功率化为节点功率参与潮流计算,统计时再分类列表。