第四章　牵引供电系统的电压损失

供电系统由于阻抗及负荷而导致供电电压降低，其降低的数值称为电压损失。牵引负荷引起的电压损失主要由两部分组成：牵引网的电压损失和牵引变电所的电压损失。有时，还应计入电力系统的电压损失。三部分电压损失的计算，原理相同。

根据国家标准《铁道干线电力牵引交流电压标准》（GB 1402）的规定，铁道干线电力牵引变电所牵引侧母线上的额定电压为 27.5 kV，自耦变压器供电方式为 55 kV；电力机车、电动车组受电弓和接触网的额定电压为 25 kV，最高允许电压为 29 kV；电力机车、电动车组受电弓上最低工作电压为 20 kV；电力机车、电动车组在供电系统非正常（检修或事故）情况下运行时，受电弓上的电压不得低于 19 kV。

为了保证电力牵引列车的正常运行，牵引供电系统的设计，必须进行电压损失计算，以校核供电臂末端区间电力机车受电弓上的短时最低电压，要求不低于上述标准。

第一节　牵引网的电压损失

一、电压损失计算和牵引网当量阻抗

牵引网的电压损失，等于牵引变电所牵引侧母线电压与电力机车受电弓上电压的算术差。它不同于牵引网的电压降，因为牵引网的电压降等于牵引网电流与牵引网阻抗的乘积，也就是变电所牵引侧母线电压与电力机车受电弓上电压的相量差。例如，若牵引变电所牵引侧母线电压为 24.5 kV，而电力机车受电弓上电压为 21.6 kV，则从牵引变电所到电力机车该段牵引网的电压损失为：24.5－21.6 = 2.9（kV）。而这段牵引网的电压降一般要大于此值。

电压损失通常采用近似计算，应用适宜于工程计算的简单算式。

设牵引变电所牵引侧母线电压为$\dot{U}_1$，电力机车受电弓上电压为$\dot{U}_2$，牵引网电流为$\dot{I}$，牵引网阻抗为 $Z = R + \mathrm{j}X$，如图 4.1 所示，其相量关系如图 4.2 所示。则牵引网的电压损失为

$$\Delta U = U_1 - U_2$$

从相量图可知，由于$\dot{U}_1$与$\dot{U}_2$之间的夹角δ一般不大，可近似认为$U_1 = \dot{U}_1 \cos\delta$，即 U_1 在数值上等于相量$\dot{U}_1$在相量$\dot{U}_2$轴线上的投影。于是，电压损失$\Delta U = \dot{U}_1 \cos\delta - \dot{U}_2$，其数值等于线段$\overline{ac}$。

由图 4.2 可知

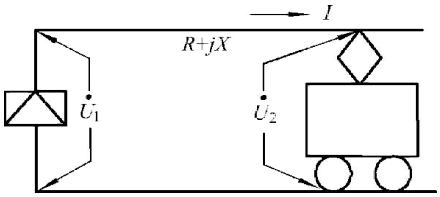


图 4.1　牵引网电压损失示意图

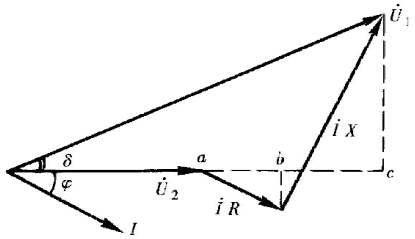


图 4.2　牵引网电压相量图

$$\overline{ab} = IR\cos\varphi$$

$$\overline{bc} = IX\sin\varphi$$

所以
$$\Delta U = I(R\cos\varphi + X\sin\varphi) \tag{4.1}$$

这就是化简后的电压损失的计算公式。它同样也适用于牵引变电所和其他情况下电压损失的计算。它的主要优点就在于避免了复杂的复数运算。

电力机车牵引负荷功率因数 $\cos\varphi$，交—直型机车可取 0.8 或 0.82，交—直—交型机车可取 0.98，且一般波动范围不大。因此，可把式（4.1）括号中的值看成一个参数，称为牵引网当量阻抗，用 Z' 表示。它只同牵引网长度有关，写成单位值（每千米值）为

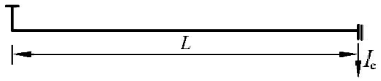
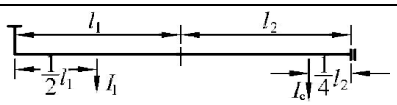
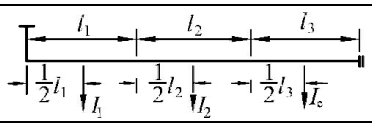
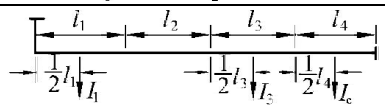
$$z' = r\cos\varphi + x\sin\varphi \tag{4.2}$$

称为牵引网当量单位阻抗。它不再是复数。牵引网的电压损失便等于牵引电流的绝对值与牵引网当量阻抗的乘积。这就大大简化了牵引网电压损失的计算。

二、单线牵引网的电压损失

在供电计算中，一般只需计算最严重的运行条件下的最大电压损失。所以首先就确定计算条件，然后再分析计算方法。单线牵引网电压损失的计算条件可按表 4.1 所列考虑，这是根据概率计算的结果得出的。表 4.1 中，c（或 I_c）表示计算列车。

表 4.1　单线区段供电臂牵引网电压损失计算条件一览表

区间数	列车位置
1	
2	
3	
4	

注：1. 当供电臂列车用电概率较小时（3 个区间 $p \leq 0.35$，4 个区间 $p \leq 0.25$），则表中 3，4 两项中 I_1 可取消；
2. 供电臂列车用电概率对应于线路非平行能力的列车对数进行计算；
3. 列车电流取对应位置的列车用电平均电流。

计算列车 I_c 处牵引网最大电压损失应为

$$\Delta U_c = z' \sum_{i=1}^{c} I_i l_i \quad (\mathrm{V}) \tag{4.3}$$

式中，I_i 为供电臂中对应位置的列车用电平均电流（A）；l_i 为各用电列车与牵引变电所的距离（km）；z'为牵引网当量单位阻抗（Ω/km）。

牵引网电压损失也可取供电臂安培千米 95% 概率最大值来计算。即

$$\Delta U_c = (I\,l)_{\max} z' = A_p I\,l\,z' \quad (\mathrm{V}) \tag{4.4}$$

式中，I 为供电臂列车用电平均电流（A）；l 为供电臂区间平均长度（km）；A_p 为供电臂安培公里 95% 概率最大值的系数。

这个方法计算结果较前面方法计算结果为小，但在供电方案研究中亦具有参考价值。

两边供电条件下，作为供电臂最大电压损失的计算，应考虑分区所解列时的情况，因此与一边供电情况相同。

三、双线牵引网的电压损失

1．双线接触网的电流分配规律

若双线上、下行接触网在供电臂末端并联，当供电臂内只有一列列车时，接触网的电流分配规律见图 3.18、式（3.39）和对应说明。

当供电臂内有多列列车时，如图 4.3 所示，线路（Ⅰ）各列车电流为 $\dot{I}_{\mathrm{I}1}$，…，$\dot{I}_{\mathrm{I}i}$，…，$\dot{I}_{\mathrm{I}c}$，相应的离开变电所的距离为 $l_{\mathrm{I}1}$，…，$l_{\mathrm{I}i}$，…，$l_{\mathrm{I}c}$；而线路（Ⅱ）各列车电流为 $\dot{I}_{\mathrm{II}1}$，…，$\dot{I}_{\mathrm{II}m}$，…$\dot{I}_{\mathrm{II}n}$，相应的离开变电所的距离为 $l_{\mathrm{II}1}$，…，$l_{\mathrm{II}m}$，…，$l_{\mathrm{II}n}$；则可应用叠加原理得到线路（Ⅰ）和线路（Ⅱ）首端电流 $\dot{I}'$ 与 $\dot{I}''$ 分别为

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}' &= \sum_{i=1}^{c} \frac{2L - l_{\mathrm{I}i}}{2L} I_{\mathrm{I}i} + \sum_{m=1}^{n} \frac{l_{\mathrm{II}m}}{2L} I_{\mathrm{II}m} \\ \dot{I}'' &= \sum_{i=1}^{c} \frac{l_{\mathrm{I}i}}{2L} I_{\mathrm{I}i} + \sum_{m=1}^{n} \frac{2L - l_{\mathrm{II}m}}{2L} I_{\mathrm{II}m} \end{aligned}\right\} \tag{4.5}$$

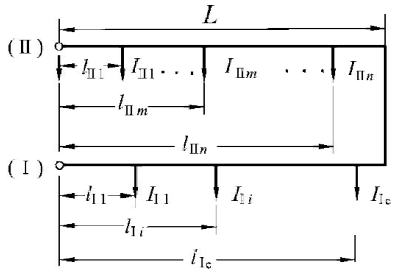


图 4.3　双线一边并联供电接触网电流分布和牵引网电压损失计算图

由式（4.5）还可以知道，从每一列列车取流点向供电臂首端看，后侧接触网电流等于前侧接触网电流减该列列车电流之差。

2．双线牵引网电压损失的计算条件

牵引供电系统设计中双线牵引网电压损失的计算，一般应按分区所上、下行接触网联络断路器分闸，取其重负荷方向进行计算。列车电流取重负荷方向重货列车用电平均电流。计

算列车数取对应远期输送能力概率积分为 95% 的最大列车数，有小数时，其小数部分的列车电流放于变电所端。追踪间隔数由重负荷方向的重货列车运行时分与追踪间隔时分确定，有小数时，其小数部分放于供电臂的始端。列车位置参照表 4.1。

3．双线牵引网最大电压损失的计算公式

如图 4.3 所示，双线牵引网最大电压损失，一般出现在供电臂重负荷方向接触网最远端列车受电弓处，用 $\Delta U_{\mathrm{I c}}$ 表示。根据推导，$\Delta U_{\mathrm{I c}}$ 的计算公式如下。

（1）一边并联供电

此时供电臂末端上、下行接触网连接，如图 4.3 所示。

当 $l_{\mathrm{I c}} > l_{\mathrm{II}\,n}$ 时，

$$\begin{aligned}\Delta U_{\mathrm{I c}} &= \frac{z_{\mathrm{I}}'}{2L}\left[(2L-l_{\mathrm{I c}})\sum_{i=1}^{c}(I_{\mathrm{I}\,i}l_{\mathrm{I}\,i})+l_{\mathrm{I c}}\sum_{m=1}^{n}(I_{\mathrm{II}\,m}l_{\mathrm{II}\,m})\right]+\\ &\quad \frac{z_{\mathrm{I II}}'}{2L}\left[(2L-l_{\mathrm{I c}})\sum_{m=1}^{n}(I_{\mathrm{II}\,m}l_{\mathrm{II}\,m})+l_{\mathrm{I c}}\sum_{i=1}^{c}(I_{\mathrm{I}\,i}l_{\mathrm{I}\,i})\right]\\ &= \frac{1}{2L}\Big\{\left[z_{\mathrm{I}}'(2L-l_{\mathrm{I c}})+z_{\mathrm{I II}}'l_{\mathrm{I c}}\right]\sum_{i=1}^{c}(I_{\mathrm{I}\,i}l_{\mathrm{I}\,i})+\\ &\quad \left[z_{\mathrm{I}}'l_{\mathrm{I c}}+z_{\mathrm{I II}}'(2L-l_{\mathrm{I c}})\right]\sum_{m=1}^{n}(I_{\mathrm{II}\,m}l_{\mathrm{II}\,m})\Big\}\end{aligned} \tag{4.6}$$

当 $l_{\mathrm{I c}} < l_{\mathrm{II}\,n}$ 时，

$$\begin{aligned}\Delta U_{\mathrm{I c}} &= \frac{z_{\mathrm{I}}'}{2L}\left[(2L-l_{\mathrm{I c}})\sum_{i=1}^{c}(I_{\mathrm{I}\,i}l_{\mathrm{I}\,i})+l_{\mathrm{I c}}\sum_{m=1}^{n}(I_{\mathrm{II}\,m}l_{\mathrm{II}\,m})\right]+\\ &\quad \frac{z_{\mathrm{I II}}'}{2L}\left\{(2L-l_{\mathrm{I c}})\sum_{m=1}^{n-1}(I_{\mathrm{II}\,m}l_{\mathrm{II}\,m})+l_{\mathrm{I c}}\left[I_{\mathrm{II}\,n}(2L-l_{\mathrm{II}\,n})+\sum_{i=1}^{c}(I_{\mathrm{I}\,i}l_{\mathrm{I}\,i})\right]\right\}\\ &= \frac{1}{2L}\Big\{[z_{\mathrm{I}}'(2L-l_{\mathrm{I c}})+z_{\mathrm{I II}}'l_{\mathrm{I c}}]\sum_{i=1}^{c}(I_{\mathrm{I}\,i}l_{\mathrm{I}\,i})+[z_{\mathrm{I}}'l_{\mathrm{I c}}+z_{\mathrm{I II}}'(2L-l_{\mathrm{I c}})]\sum_{m=1}^{n-1}(I_{\mathrm{II}\,m}l_{\mathrm{II}\,m})+\\ &\quad [z_{\mathrm{I}}'l_{\mathrm{II}\,n}+z_{\mathrm{I II}}'(2L-l_{\mathrm{II}\,n})]I_{\mathrm{II}\,n}l_{\mathrm{I c}}\Big\}\end{aligned} \tag{4.7}$$

（2）一边分开供电

此时图 4.3 所示供电臂末端上、下行接触网断开：

$$\left.\begin{aligned}&\text{当 } l_{\mathrm{I c}} > l_{\mathrm{II}\,n} \text{ 时}\quad \Delta U_{\mathrm{I c}} = z_{\mathrm{I}}'\sum_{i=1}^{c}(I_{\mathrm{I}\,i}l_{\mathrm{I}\,i})+z_{\mathrm{I II}}'\sum_{m=1}^{n}(I_{\mathrm{II}\,m}l_{\mathrm{II}\,m})\\ &\text{当 } l_{\mathrm{I c}} < l_{\mathrm{II}\,n} \text{ 时}\quad \Delta U_{\mathrm{I c}} = z_{\mathrm{I}}'\sum_{i=1}^{c}(I_{\mathrm{I}\,i}l_{\mathrm{I}\,i})+z_{\mathrm{I II}}'\left[\sum_{m=1}^{n-1}(I_{\mathrm{II}\,m}l_{\mathrm{II}\,m})+I_{\mathrm{II}\,n}l_{\mathrm{I c}}\right]\end{aligned}\right\} \tag{4.8}$$

式（4.6）～式（4.8）中，z'_{I} 为双线区段线路Ⅰ的牵引网当量单位自阻抗（Ω/km）；$z'_{\mathrm{I\,II}}$ 为双线区段上、下行牵引网间的当量单位互阻抗（Ω/km）；电流单位为 A；距离单位为 km；$\Delta U_{\mathrm{I\,c}}$ 单位为 V。

当线路（Ⅱ）只有一列列车用电运行 $(n=m=1)$ 时，式（4.7）、式（4.8）中，$\sum_{m=1}^{n-1}(I_{\mathrm{II}\,m}l_{\mathrm{II}\,m})=0$。

四、计算举例

当采用 JTM95+CTS120 的全补偿单链形悬挂接触网和 60 kg/m 型钢轨，大地电导率为 10×10^{-14}（CGSM），牵引负荷的功率因数 $\cos\varphi=0.8$ 和 $\cos\varphi=0.98$ 时，由第三章第三节、第四节例题计算结果，可得牵引网当量单位阻抗如表 4.2 所示，供计算时采用或参考。

表 4.2　牵引网当量单位阻抗

单线或双线	当量单位阻抗值（Ω/km）		
	符　号	当 $\cos\varphi=0.8$ 时	当 $\cos\varphi=0.98$ 时
单　线	z'	0.366	0.223
双　线	z'_{I}，z'_{II}	0.337	0.206
	$z'_{\mathrm{I\,II}}$	0.087	0.044

例 1　某一单线区段供电臂参数如图 4.4 所示，牵引网为全补偿单链形悬挂 JTM95＋CTS120，大地电导率为 10×10^{-14}（CGSM），钢轨采用 60 kg/m 型，牵引负荷功率因数 $\cos\varphi=0.8$。

求：该供电臂的牵引网的最大电压损失。

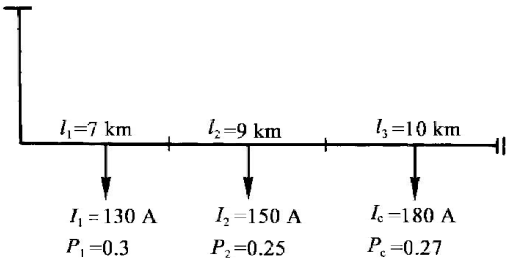


图 4.4　[例 1] 计算图

解　方法一：按表 4.1 的计算条件，I_1 = 130 A 取消，则

$$\begin{aligned}\Delta U_{\mathrm{c}} &= z'\sum_{i=1}^{c} I_i l_i \times 10^{-3}\\ &= \left[150\times(7+9\times0.5)+180\times(7+9+10\times0.5)\right]\times0.366\times10^{-3}\\ &= 2.015 \quad (\mathrm{kV})\end{aligned}$$

方法二： $p=\dfrac{\sum p_i}{n}=\dfrac{0.3+0.25+0.27}{3}=0.273$

按供电臂安培千米 95% 概率计算，由 $p=0.273$，查图 7.14 曲线得 $A_p=3.8$

由 $$I=\frac{\sum I_i p_i}{\sum p_i}=\frac{130\times0.3+150\times0.25+180\times0.27}{0.3+0.25+0.27}=152\quad(\text{A})$$

区间平均长度 $l=\dfrac{7+9+10}{3}=8.67\quad(\text{km})$

则 $$\Delta U_c=A_p Ilz'\times10^{-3}=3.8\times152\times8.67\times0.366\times10^{-3}=1.833\quad(\text{kV})$$

比较两种方法的计算结果，表明按供电臂安培公里 95% 概率最大值计算电压损失要偏小一些。

例 2 某一双线区段供电臂（其参数如图 4.5 所示），其重负荷方向为 I 方向，接触网为 JTM95+CTS120 全补偿单链形悬挂，钢轨为 60 kg/m 型，牵引负荷功率因数 $\cos\varphi=0.8$，两线路轨道中心距离为 5 m。

求该供电臂在下列情况下的最大电压损失：

（1）一边并联供电；

（2）一边分开供电。

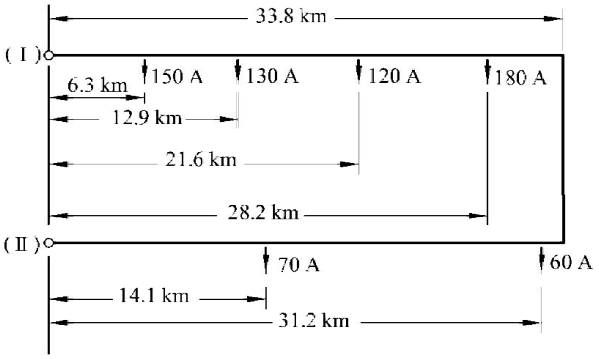


图 4.5 [例 2] 计算图

解 （1）一边并联供电

按式（4.7）得

$$\Delta U_{\mathrm{I}c}=\frac{1}{2L}\Big\{[z'_{\mathrm{I}}(2L-l_{\mathrm{I}c})+z'_{\mathrm{I\,II}}l_{\mathrm{I}c}]\sum_{i=1}^{c}(I_{\mathrm{I}i}l_{\mathrm{I}i})+[z'_{\mathrm{I}}l_{\mathrm{I}c}+z'_{\mathrm{I\,II}}(2L-l_{\mathrm{I}c})]\sum_{m=1}^{n-1}(I_{\mathrm{II}m}l_{\mathrm{II}m})+$$
$$[z'_{\mathrm{I}}l_{\mathrm{II}n}+z'_{\mathrm{I\,II}}(2L-l_{\mathrm{II}n})]I_{\mathrm{II}n}l_{\mathrm{I}c}\Big\}$$
$$=\frac{1}{2\times33.8}\times\{[0.337\times(2\times33.8-28.2)+0.087\times28.2]\times$$
$$(150\times6.3+130\times12.9+120\times21.6+180\times28.2)+$$

$$[0.337\times28.2+0.087\times(2\times33.8-28.2)]\times70\times14.1+$$
$$[0.337\times31.2+0.087\times(2\times33.8-31.2)]\times60\times28.2\}$$
$$=2\ 926\quad(\mathrm{V})$$

（2）一边分开供电

按式（4.8）第二式计算

$$\Delta U_{\mathrm{I\,c}}=z'_{\mathrm{I}}\sum_{i=1}^{j}(I_{\mathrm{I}\,i}l_{\mathrm{I}\,i})+\ z'_{\mathrm{I\,II}}\left[\sum_{m=1}^{n-1}(I_{\mathrm{II}\,m}l_{\mathrm{II}\,m})+I_{\mathrm{II}\,n}l_{\mathrm{I\,c}}\right]$$
$$=0.337\times(150\times6.3+130\times12.9+120\times21.6+180\times28.2)+$$
$$0.087\times[70\times14.1+60\times28.2]$$
$$=3\ 701\quad(\mathrm{V})$$

第二节　牵引变电所的电压损失

牵引变电所的电压损失，即牵引变电所牵引变压器绕组的电压损失。牵引变压器归算到二次侧的相阻抗 $Z_{\mathrm{T}}=R_{\mathrm{T}}+\mathrm{j}\,X_{\mathrm{T}}$。将式（4.1）写成

$$\Delta U=(I\cos\varphi)R_{\mathrm{T}}+(I\sin\varphi)X_{\mathrm{T}}$$

因为大、中型变压器（包括牵引变压器）$R_{\mathrm{T}}\ll X_{\mathrm{T}}$，故上式可写成

$$\Delta U=(I\sin\varphi)X_{\mathrm{T}}\tag{4.9}$$

即牵引变压器绕组的电压损失等于其中负荷电流的虚部绝对值（$I\sin\varphi$）与电抗 X_{T} 的乘积。

式（4.9）中，φ 为负荷功率因数角；当交—直型电力机车牵引时，取 $\cos\varphi=0.8$，$\varphi=36.9°$，$\sin\varphi=0.6$；或取 $\cos\varphi=0.82$，$\varphi=34.9°$，$\sin\varphi=0.57$；当交—直—交型电力机车牵引时，取 $\cos\varphi=0.98$，$\varphi=11.5°$，$\sin\varphi=0.2$。

实际中，需要计算牵引变压器的最大电压损失，其计算条件一般是与供电臂电流和牵引网电压损失计算条件相对应。即单线区段，直接按表 4.1 所列负荷累加起来作为计算供电臂的最大电流，或查附录 C 中图 C.5 曲线获得最大电流。双线区段查附录 C 中图 C.5 获得供电电臂 95%最大列车数的最大电流 $I_{\max}$。单相联结、三相 YNd11 联结、平衡联结牵引变压器，一个供电臂电流取最大值，另一个供电臂电流取平均值。

一、单相联结变压器电压损失

单相变压器绕组的电抗 X_{T} 可按下式计算

$$X_{\mathrm{T}}=\frac{U_{\mathrm{k}}\%}{100}\cdot\frac{U_{\mathrm{N}}}{I_{\mathrm{N}}}=\frac{U_{\mathrm{k}}\%}{100}\cdot\frac{U_{\mathrm{N}}^{2}}{S_{\mathrm{N}}}\quad(\Omega)\tag{4.10}$$

式中，$U_{\mathrm{k}}(\%)$，U_{N}，I_{N}，S_{N}对应为单相变压器的阻抗电压百分值、额定电压（V）、额定电流（A）、额定容量（VA）。

单相联结变压器两侧供电臂属于同相，因此变压器最大电压损失为

当$\cos\varphi=0.8$（或 0.82）时：$\Delta U_{\mathrm{T}\max}=0.6\ (\text{或}\ 0.57)(I_{1\max}+I_{2\mathrm{av}})\,X_{\mathrm{T}}$ （V） (4.11)

当$\cos\varphi=0.98$时：$\Delta U_{\mathrm{T}\max}=0.2\ (I_{1\max}+I_{2\mathrm{av}})\,X_{\mathrm{T}}$ （V） (4.12)

式中，$I_{1\max}$为重负荷供电臂最大电流（A）；$I_{2\mathrm{av}}$为轻负荷供电臂平均电流（A）。

二、单相 Vv 联结变压器电压损失

Vv 联结变电所两侧供电臂分别由各自的变压器供电，其最大电压损失为

当$\cos\varphi=0.8$（或 0.82）时：$\Delta U_{\mathrm{T}\max}=0.6\ (\text{或}\ 0.57)I_{\max}X_{\mathrm{T}}$ （V） (4.13)

当$\cos\varphi=0.98$时：$\Delta U_{\mathrm{T}\max}=0.2I_{\max}X_{\mathrm{T}}$ （V） (4.14)

式中，$I_{\max}$为供电臂最大电流（A）。

三、三相 YNd11 联结变压器电压损失

1. 三相变压器的阻抗

三相变压器的额定电压为线电压，因此阻抗电压的百分值按定义为

$$U_{\mathrm{k}}\%=\frac{\sqrt{3}I_{\mathrm{N}}Z_{\mathrm{T}}}{U_{\mathrm{N}}}\times100\tag{4.15}$$

即变压器被当成 Y,y 联结，Z_{T}代表等效 Y,y 联结的每相阻抗。

由于$R_{\mathrm{T}}\ll X_{\mathrm{T}}$，所以可认为$X_{\mathrm{T}}\approx Z_{\mathrm{T}}$，如此可得三相变压器等效 Y 联结每相电抗为

$$X_{\mathrm{T}}=\frac{U_{\mathrm{k}}\%}{100}\cdot\frac{U_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3}I_{\mathrm{N}}}=\frac{U_{\mathrm{k}}\%}{100}\cdot\frac{U_{\mathrm{N}}^{2}}{S_{\mathrm{N}}}\quad(\Omega)\tag{4.16}$$

式（4.15）、式（4.16）中，$U_{\mathrm{k}}(\%)$，U_{N}，I_{N}，S_{N}对应为三相变压器的阻抗电压百分值、额定电压（V）、额定电流（A）、额定容量（VA）。

实际上三相变压器二次侧绕组为三角形联结，而三角形联结时每相电抗为等效 Y 联结每相电抗的 3 倍（参见 Y-△等效变换）。因此，变压器绕组三角形联结时的电抗为

$$X_{\mathrm{T}\Delta}=3X_{\mathrm{T}}\tag{4.17}$$

2. 三相联结变压器电压损失计算

见图 1.13、图 1.14、式（1.7）及相关叙述，按电力系统正常运行方式的相序，bc 相为超前相（C 相），ac 相为滞后相（A 相）。

（1）超前相电压损失 ΔU_{bc}

以 $\dot{U}_c$ 为基准相量，则 $\dot{I}_b = I_b \angle -\varphi_b$，$\dot{I}_a = I_a \angle -120° - \varphi_a$，于是

$$\begin{aligned}\dot{I}_{bc} &= -\frac{1}{3}\dot{I}_a + \frac{2}{3}\dot{I}_b = -\frac{1}{3}I_a \angle -120° - \varphi_a + \frac{2}{3}I_b \angle -\varphi_b \\ &= -\frac{1}{3}I_a[\cos(-120° - \varphi_a) + \mathrm{j}\ \sin(-120° - \varphi_a)] + \frac{2}{3}I_b[\cos(-\varphi_b) + \mathrm{j}\ \sin(-\varphi_b)] \\ &= \frac{1}{3}[2I_b\cos\varphi_b + I_a\cos(60° - \varphi_a)] - \mathrm{j}\frac{1}{3}[2I_b\sin\varphi_b - I_a\sin(60° - \varphi_a)]\end{aligned}$$

由式（4.9）和上式，得

$$\Delta U_{bc} = \frac{1}{3}[2I_b\sin\varphi_b - I_a\sin(60° - \varphi_a)]X_T \quad (\mathrm{V}) \tag{4.18}$$

（2）滞后相电压损失 ΔU_{ac}

以 $\dot{U}_a$ 为基准相量，则 $\dot{I}_a = I_a \angle -\varphi_a$，$\dot{I}_b = I_b \angle 120° - \varphi_b$，于是

$$\begin{aligned}\dot{I}_{ca} &= \frac{2}{3}\dot{I}_a - \frac{1}{3}\dot{I}_b = \frac{2}{3}I_a \angle -\varphi_a - \frac{1}{3}I_b \angle 120° - \varphi_b \\ &= \frac{2}{3}I_a[\cos(-\varphi_a) + \mathrm{j}\ \sin(-\varphi_a)] - \frac{1}{3}I_b[\cos(120° - \varphi_b) + \mathrm{j}\ \sin(120° - \varphi_b)] \\ &= \frac{1}{3}[2I_a\cos\varphi_a + I_b\cos(60° + \varphi_b)] - \mathrm{j}\frac{1}{3}[2I_a\sin\varphi_a + I_b\sin(60° + \varphi_b)]\end{aligned}$$

由式（4.9）和上式，得

$$\Delta U_{ac} = \frac{1}{3}[2I_a\sin\varphi_a + I_b\sin(60° + \varphi_b)]X_T \quad (\mathrm{V}) \tag{4.19}$$

由式（4.18）和式（4.19）可知，一般 $\Delta U_{ac} > \Delta U_{bc}$，即滞后相电压损失大于超前相电压损失。所以，如牵引变电所两供电臂负荷不相等，应以滞后相向轻负荷臂供电为宜。

超前相和滞后相的最大电压损失分别为

当 $\cos\varphi = 0.8$（或 0.82）时

$$\left.\begin{aligned}\Delta U_{T1max} &= [0.4(\text{或}\,0.38)I_{1max} - 0.13(\text{或}\,0.141)I_{2av}]\,X_T \\ \Delta U_{T2max} &= [0.4(\text{或}\,0.38)I_{2max} + 0.33(\text{或}\,0.332)I_{1av}]\,X_T\end{aligned}\right\} \quad (\mathrm{V}) \tag{4.20}$$

当 $\cos\varphi = 0.98$ 时（或 0.38）

$$\left.\begin{aligned}\Delta U_{T1max} &= (0.13I_{1max} - 0.25I_{2av})\,X_T \\ \Delta U_{T2max} &= (0.13I_{2max} + 0.32I_{1av})\,X_T\end{aligned}\right\} \quad (\mathrm{V}) \tag{4.21}$$

式中，$I_{1(2)max}$ 为超前（滞后）相供电臂最大电流（A）；$I_{1(2)av}$ 为超前（滞后）相供电臂平均电流（A）；右下角标中 1，2 分别表示超前相、滞后相。

四、斯科特联结变压器电压损失

根据式(1.13)、式(1.16),斯科特联结变压器有$U_{2N}=\dfrac{U_{1N}}{K_U}$，$I_{2N}=\dfrac{\sqrt{3}K_U}{2}I_{1N}$，$\dfrac{U_{2N}}{I_{2N}}=\dfrac{2}{K_U^2}\cdot\dfrac{U_{1N}}{\sqrt{3}I_{1N}}$［其中，$U_{1N}$，$U_{2N}$ 和 I_{1N}，I_{2N} 分别为一、二次额定电压（V）和额定电流（A），K_U 为斯科特变压器变压比］。由此可知，把一次电压归算至二次侧时应将其除以 K_U，把一次电流归算至二次侧时应将其乘以 $\dfrac{\sqrt{3}K_U}{2}$，一次侧三相系统等效星形每相电抗 X_{T1} 转换为二次侧两相输出端口每相电抗 X_{T2} 时应将 X_{T1} 除以 $\dfrac{K_U^2}{2}$；反之，X_{T2} 转换为 X_{T1} 时应将 X_{T2} 乘以 $\dfrac{K_U^2}{2}$。因此，斯科特联结变压器归算至二次侧的每相绕组电抗 X_{T2} 可按下式计算

$$X_{T2}=X_{T1}\cdot\frac{2}{K_U^2}=\frac{U_k(\%)}{100}\cdot\frac{U_{1N}}{\sqrt{3}I_{1N}}\cdot\frac{2}{K_U^2}=\frac{U_k(\%)}{100}\cdot\frac{U_{1N}^2}{S_N}\cdot\frac{2}{K_U^2}\quad(\Omega)\qquad(4.22)$$

或

$$X_{T2}=\frac{U_k(\%)}{100}\cdot\frac{U_{2N}}{I_{2N}}=\frac{U_k(\%)}{100}\cdot\frac{2U_{2N}^2}{S_N}\quad(\Omega)\qquad(4.22')$$

式中，$U_k(\%)$ 为阻抗电压百分值，S_N 为额定容量（VA）。

采用斯科特联结牵引变压器的变电所两侧供电臂分别由 M 座、T 座供电，其最大电压损失分别为

$$\left.\begin{aligned}\Delta U_M&=I_{Mmax}X_{T2}\sin\varphi_M\\ \Delta U_T&=I_{Tmax}X_{T2}\sin\varphi_T\end{aligned}\right\}\quad(V)\qquad(4.23)$$

式中，I_{Mmax}，I_{Tmax} 和 φ_M，φ_T 分别为 M 座、T 座供电臂最大电流（A）和功率因数角（°），当交—直型电力机车牵引时，φ_M，φ_T 均可取 36.9° 或 34.9°；当交—直—交型电力机车牵引时，φ_M，φ_T 取 11.5°。

五、平衡变压器电压损失

见图 1.20 及图 1.18，先导出平衡变压器的等效电路和参数计算公式，再分析其电压损失。

1. 等效电路

根据由变压器短路试验可以确定其短路阻抗的原理，应用式(1.33′)第一、三式、式(1.45)至式（1.47）和阻抗匹配关系，便可得到与 YN▽联结平衡变压器归算到二次侧的电抗 X_T（忽略电阻不计）对应的各段线圈 ac，bc，ad，be，df，eg 和 ab 的等效电抗 X_{ac}，X_{bc}，X_{ad}，X_{be}，X_{df}，X_{eg} 和 X_{ab} 如下

$$
\left.\begin{aligned}
X_{\mathrm{ac}} = X_{\mathrm{bc}} &= \frac{U_{\mathrm{k}}(\%)}{100}\cdot\frac{\sqrt{2}(\lambda+2)U_{2\mathrm{N}}}{3(\sqrt{3}+1)}\Bigg/\frac{\sqrt{\lambda^2+2\lambda+2}I_{2\mathrm{N}}}{\lambda+2} \\
&= \frac{U_{\mathrm{k}}(\%)}{100}\cdot\frac{\sqrt{2}(\lambda+2)^2}{3(\sqrt{3}+1)\sqrt{\lambda^2+2\lambda+2}}\cdot\frac{2U_{2\mathrm{N}}^2}{S_{\mathrm{N}}} = \frac{\sqrt{2}(\lambda+2)^2}{3(\sqrt{3}+1)\sqrt{\lambda^2+2\lambda+2}}X'_{\mathrm{T}} \\
X_{\mathrm{ad}} = X_{\mathrm{be}} &= \frac{U_{\mathrm{k}}(\%)}{100}\cdot\frac{\sqrt{6}U_{2\mathrm{N}}}{3(\sqrt{3}+1)}\Bigg/I_{2\mathrm{N}} \\
&= \frac{U_{\mathrm{k}}(\%)}{100}\cdot\frac{\sqrt{6}}{3(\sqrt{3}+1)}\cdot\frac{2U_{2\mathrm{N}}^2}{S_{\mathrm{N}}} = \frac{\sqrt{6}}{3(\sqrt{3}+1)}X'_{\mathrm{T}} \\
X_{\mathrm{df}} = X_{\mathrm{eg}} &= \frac{U_{\mathrm{k}}(\%)}{100}\cdot\frac{\sqrt{2}(1+\sqrt{3}-\lambda)U_{2\mathrm{N}}}{3(\sqrt{3}+1)}\Bigg/I_{2\mathrm{N}} \\
&= \frac{U_{\mathrm{k}}(\%)}{100}\cdot\frac{\sqrt{2}(1+\sqrt{3}-\lambda)}{3(\sqrt{3}+1)}\cdot\frac{2U_{2\mathrm{N}}^2}{S_{\mathrm{N}}} = \frac{\sqrt{2}(1+\sqrt{3}-\lambda)}{3(\sqrt{3}+1)}X'_{\mathrm{T}} \\
X_{\mathrm{ab}} &= \lambda X_{\mathrm{ac}} = \lambda X_{\mathrm{bc}}
\end{aligned}\right\} \tag{4.24}
$$

式中，X_{ab} 须按阻抗匹配关系确定，是由变压器设计制造决定的；$U_{\mathrm{k}}(\%)$，S_{N}，$U_{2\mathrm{N}}$，$I_{2\mathrm{N}}$ 分别为变压器阻抗电压百分值、额定容量（VA）、二次额定电压（V）、二次额定电流（A）；且

$$
X'_{\mathrm{T}} = \frac{U_{\mathrm{k}}(\%)}{100}\cdot\frac{2U_{2\mathrm{N}}^2}{S_{\mathrm{N}}} \tag{4.25}
$$

从而可绘出归算到二次绕组的等效电路，如图 4.6 所示。将该图中三角形联结电抗 X_{ab}，X_{ac}，X_{bc} 变换为星形联结的等效电抗 X_{a}，X_{b}，X_{c}，即

$$
\left.\begin{aligned}
X_{\mathrm{a}} &= \frac{X_{\mathrm{ab}}X_{\mathrm{ac}}}{X_{\mathrm{ab}}+X_{\mathrm{ac}}+X_{\mathrm{bc}}} \\
X_{\mathrm{b}} &= \frac{X_{\mathrm{ab}}X_{\mathrm{bc}}}{X_{\mathrm{ab}}+X_{\mathrm{ac}}+X_{\mathrm{bc}}} \\
X_{\mathrm{c}} &= \frac{X_{\mathrm{ac}}X_{\mathrm{bc}}}{X_{\mathrm{ab}}+X_{\mathrm{ac}}+X_{\mathrm{bc}}}
\end{aligned}\right\} \tag{4.26}
$$

则可绘出如图 4.7 所示的 abc 三角形变星形等效电路。再将其中 x_{a}，x_{b} 分别与相应支臂的电抗相加得 X_{α}，X_{β}，即

$$
\left.\begin{aligned}
X_{\alpha} &= X_{\mathrm{a}}+X_{\mathrm{ad}}+X_{\mathrm{df}} \\
X_{\beta} &= X_{\mathrm{b}}+X_{\mathrm{be}}+X_{\mathrm{eg}}
\end{aligned}\right\} \tag{4.27}
$$

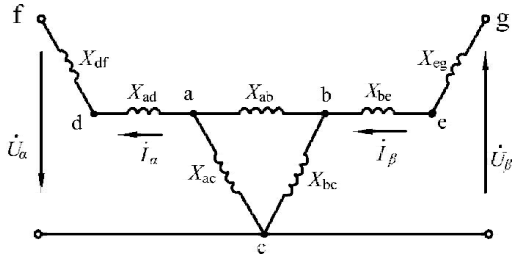


图 4.6　归算到二次侧的等效电路

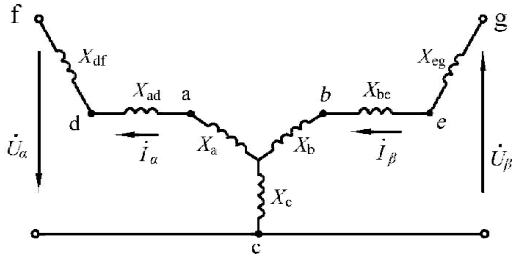


图 4.7　abc 三角形变星形等效电路

于是，可绘出如图 4.8 所示的简化星形等效电路，它可直接用于计算平衡变压器电压损失和短路电流。由该图可得平衡变压器归算到二次侧的电抗 X_T 如下

$$X_T = X_\alpha + X_c = X_\beta + X_c \tag{4.28}$$

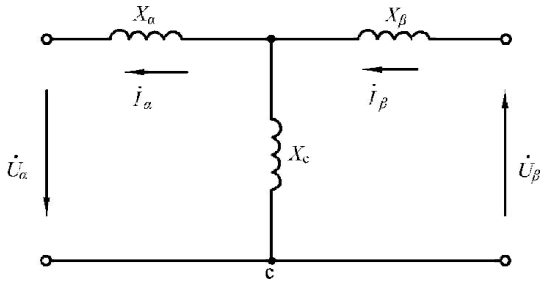


图 4.8　简化星形等效电路

对于 YN▽联结阻抗匹配平衡变压器，$\lambda = \sqrt{3}+1$，$U_d = U_e = \dfrac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{6}}U_{2N} = \dfrac{\sqrt{6}}{3(\sqrt{3}+1)}U_{2N}$，依次应用式（4.24）～式（4.28）计算（注意 $X_{a\alpha} = X_{ad}$，$X_{b\beta} = X_{be}$，$X_{df} = X_{eg} = 0$），可得图 4.8 中的参数和 X_T 如下

$$\left.\begin{aligned} X_\alpha &= X_\beta = 0.876\ 2X'_T \\ X_c &= 0.211\ 3X'_T \\ X_T &= 1.087\ 5X'_T \end{aligned}\right\} \tag{4.29}$$

对于非阻抗匹配 YN▽联结平衡变压器，$\lambda = 1$，$U_d = U_e = \dfrac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}(\sqrt{3}+1)}U_{2N} = \dfrac{\sqrt{6}}{3(\sqrt{3}+1)}U_{2N}$，依次应用式（4.24）～式（4.28）计算，则得图 4.8 中的参数和 X_T 如下

$$\left.\begin{aligned} X_\alpha &= X_\beta = 0.829\ 2X'_T \\ X_c &= 0.231\ 5X'_T \\ X_T &= 1.060\ 7X'_T \end{aligned}\right\} \tag{4.30}$$

式（4.24）～式（4.30）计算所得电抗的单位均为欧姆（Ω）。

2. 电压损失

由图 4.8 可得 YN▽联结平衡变压器电压降为

$$\Delta\dot{U}_\beta = \dot{I}_\beta(X_\beta + X_c) - \dot{I}_\alpha X_c = \dot{I}_\beta X_T - \dot{I}_\alpha X_c = X_T\left(\dot{I}_\beta - \dot{I}_\alpha \frac{X_c}{X_T}\right)$$

$$\Delta\dot{U}_\alpha = \dot{I}_\alpha(X_\alpha + X_c) - \dot{I}_\beta X_c = \dot{I}_\alpha X_T - \dot{I}_\beta X_c = X_T\left(\dot{I}_\alpha - \dot{I}_\beta \frac{X_c}{X_T}\right)$$

以 φ_β，φ_α 分别表示两供电臂超前相、滞后相的功率因数角，则由上式和式（4.9），并应用图 4.9 所示的求算平衡变压器电压损失作图法，可得 YN▽联结平衡变压器电压损失为

$$\left.\begin{aligned} &\text{超前相}\quad \Delta U_\beta = X_T\left(I_\beta \sin\varphi_\beta - I_\alpha \frac{X_c}{X_T}\cos\varphi_\alpha\right) \\ &\text{滞后相}\quad \Delta U_\alpha = X_T\left(I_\alpha \sin\varphi_\alpha + I_\beta \frac{X_c}{X_T}\cos\varphi_\beta\right) \end{aligned}\right\} \tag{4.31}$$

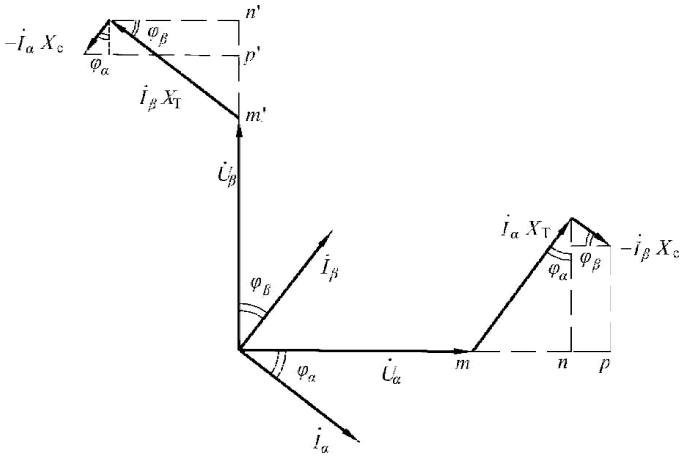


图 4.9　求算平衡变压器电压损失作图法

图 4.9 中，因为　$\overline{m'n'} = I_\beta X_T \sin\varphi_\beta$，$\overline{n'p'} = I_\alpha X_c \cos\varphi_\alpha$，$\overline{m'p'} = \Delta U_\beta = \overline{m'n'} - \overline{n'p'}$

所以　$\Delta U_\beta = I_\beta X_T \sin\varphi_\beta - I_\alpha X_c \cos\varphi_\alpha$

因为　$\overline{mn} = I_\alpha X_T \sin\varphi_\alpha$，$\overline{np} = I_\beta X_c \cos\varphi_\beta$，$\overline{mp} = \Delta U_\alpha = \overline{mn} + \overline{np}$

所以　$\Delta U_\alpha = I_\alpha X_T \sin\varphi_\alpha + I_\beta X_c \cos\varphi_\beta$

对于 YN▽联结阻抗匹配平衡变压器，参见式（4.29）可得

$$\frac{X_c}{X_T} = \frac{0.211\,3X'_T}{1.087\,5X'_T} = 0.194\,3$$

因此，式（4.31）变为

$$\left.\begin{aligned} &\text{超前相}\quad \Delta U_\beta = X_T(I_\beta \sin\varphi_\beta - 0.194\,3I_\alpha \cos\varphi_\alpha) \\ &\text{滞后相}\quad \Delta U_\alpha = X_T(I_\alpha \sin\varphi_\alpha + 0.194\,3I_\beta \cos\varphi_\beta) \end{aligned}\right\} \tag{4.32}$$

对于非阻抗匹配 YN∇联结平衡变压器，参见式（4.30）可得

$$\frac{X_{\mathrm{c}}}{X_{\mathrm{T}}}=\frac{0.231\,5X'_{\mathrm{T}}}{1.060\,7X'_{\mathrm{T}}}=0.218\,2$$

则式（4.31）变为

$$\left.\begin{array}{ll}\text{超前相} & \Delta U_{\beta}=X_{\mathrm{T}}(I_{\beta}\sin\varphi_{\beta}-0.218\,2I_{\alpha}\cos\varphi_{\alpha})\\ \text{滞后相} & \Delta U_{\alpha}=X_{\mathrm{T}}(I_{\alpha}\sin\varphi_{\alpha}+0.218\,2I_{\beta}\cos\varphi_{\beta})\end{array}\right\}\tag{4.33}$$

式（4.31）至式（4.33）计算所得电压损失的单位均为伏特（V）；具体计算时，每一式子括号内第一项中供电臂电流取最大值（A），第二项中供电臂电流取平均值（A）；当交—直型电力机车牵引时，φ_{β}，φ_{α} 均可取 36.9°或 34.9°；当交—直—交型电力机车牵引时，φ_{β}，φ_{α} 取 11.5°。

第三节　电力系统的电压损失和供电臂的电压水平

一、电力系统电压损失

牵引负荷在电力系统中造成的最大电压损失，一般由电力部门根据系统和牵引负荷的资料进行计算。此时应保证电力系统向牵引变电所的供电电压不超过 110（或 220）×（1±10%）kV，牵引负荷按计算变压器最大电压损失的条件考虑。

由于单相牵引负荷造成电力系统三相电压不平衡，其电压损失的计算不同于一般对称三相电网的情况，所以在缺乏系统资料时可进行估算，其值随牵引变电所距离电源点的远近而不同，一般为 1 500～3 000 V（归算至 27.5 kV 侧）。