



中华人民共和国国家标准

GB/T 15544.3—2017/IEC TR 60909-2:2008

三相交流系统短路电流计算 第3部分:电气设备数据

Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems—
Part 3: Data of electrical equipment

(IEC TR 60909-2:2008, Short-circuit current calculation
in three-phase a.c. systems—Part 2: Data of electrical equipment
for short-circuit current calculations, IDT)

2017-12-29 发布

2018-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 I

1 概述 1

 1.1 范围及目标 1

 1.2 规范性引用文件 1

2 电气设备数据 1

 2.1 概述 1

 2.2 同步电机的典型数据 1

 2.3 双绕组、三绕组及自耦变压器的典型数据 5

 2.4 典型单回与同杆并架双回线路参数 9

 2.5 典型高压、中压和低压电缆参数 14

 2.6 异步电动机的典型参数 26

 2.7 母线 27

附录 A（资料性附录） 国家委员会信息 30

参考文献 31

前 言

GB/T 15544《三相交流系统短路电流计算》分为以下 5 个部分：

- 第 1 部分：电流计算；
- 第 2 部分：短路电流计算应用的系数；
- 第 3 部分：电气设备数据；
- 第 4 部分：同时发生两个独立单相接地故障时的电流以及流过大地电流；
- 第 5 部分：算例。

本部分为 GB/T 15544 的第 3 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用 IEC TR 60909-2:2008《三相交流系统短路电流计算 第 2 部分：短路电流计算应用的电气设备数据》。

本部分做了下列编辑性修改：

- 为与现有标准系列一致，将本部分名称改为《三相交流系统短路电流计算 第 3 部分：电气设备数据》。

本部分由中国电力企业联合会提出。

本部分由全国短路电流计算标准化技术委员会(SAC/TC 424)归口。

本部分起草单位：中国电力科学研究院、国家电网公司国家电力调度控制中心、西安交通大学。

本部分主要起草人：汤涌、李明节、卜广全、张彦涛、周济、郭强、施浩波、段翔颖、张玉红、韩家辉、肖惕。

三相交流系统短路电流计算

第 3 部分:电气设备数据

1 概述

1.1 范围及目标

GB/T 15544 的本部分涵盖从不同国家收集的电气设备数据,必要时可用于依照 GB/T 15544.1 进行短路电流计算。

通常电气设备的数据由制造商作为铭牌参数提供,或由电力供应商给出。

在某些情况下,这些数据可能无法获得。当本部分给出的数据与使用者的国家的典型设备相符合时,则这些数据可用于计算低压电网的短路电流。本部分收集到的数据及其评价可应用于中压或高压电网的规划,还可用作与设备制造商或电力供应商所提供设备数据的对比。对于架空线路和电缆,在某些情况下,其电气参数则可根据其外形尺寸由本文件提供的公式计算获得。

本部分作为 GB/T 15544.1 的补充,不改变 GB/T 15544.1 与 GB/T 15544.4 给出的标准化计算流程。

1.2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 15544.1—2013 三相交流系统短路电流计算 第 1 部分:电流计算(IEC 60909-0:2001, IDT)

GB/T 15544.4—2017 三相交流系统短路电流计算 第 4 部分:同时发生两个独立单相接地故障时的电流以及流过大地电流(IEC 60909-3:2009, IDT)

2 电气设备数据

2.1 概述

本部分所提供的数据在计算短路电流时是必要的。数据通过曲线或表格形式给出。架空线路及电缆的正序与零序短路阻抗可通过公式计算得到。

共 15 个国家委员会(National Committee, 以下简称为 NC)对本部分之前的调查问卷做出了响应。参见附录 A。

在某些情况下,电气设备数据的平均值或特性趋势以电气设备额定值(如额定功率、额定电压等)的函数形式给出。

2.2 同步电机的典型数据

同步电机的特征参数列于表 1。电抗用标幺值表示,其基准值为 $Z_{TG}=U_{TG}^2/S_{TG}$ (见 GB/T 15544.1),或以百分比数值给出。

表 1 中还给出零序电抗数值,建议取 $X_{(0)}/X_d''=0.5$ 。

表 1 典型同步发电机、电动机及调相机的真实数据

序号	类型 ^a	额定容量	额定电压及偏差 ^b		功率因数	电抗标么值与直流时间常数						注	NC
		S _{rG}	U _{rG}	±p _G	cosφ _{rG}	x _d ^{''}	x ₍₂₎ ^c	x ₍₀₎ ^d	x _d ^e	x _{dsat} ^f	T _{DC} ^g		
		MVA	kV	%	—	—	—	—	—	—	s		
1	TG2	64	13.8	±5	0.85	0.179	0.170	0.104	1.87	1.87	0.220	60 Hz	美国
2	TG2	100	10.5	±5	0.80	0.134	—	—	1.77	1.45	0.246	50Hz	德国
3	TG2	125	10.5	±5	0.80	0.160	0.180	0.08	2.13	1.87	0.460	50 Hz	前民主德国
4	TG2	180	10.5	±5	0.90	0.250	0.230	0.14	1.83	1.77	0.480	50 Hz	奥地利
5	TG2	353	18.0	±5	0.85	0.167	0.204	0.089	2.26	2.17	0.194	50 Hz	中国
6	TG2	388.9	17.5	±5	0.90	0.203	0.202	0.099	2.42	2.19	0.250	50 Hz	澳大利亚
7	SG14	48	10	±5	0.90	0.16	0.17	0.05	0.78	—	0.16	50 Hz	意大利
8	SG20	290	18.0	±5	0.90	0.22	0.22	0.14	1.03	0.96	0.36	60 Hz	日本
9	SM2	1.45	10	⁺⁵ / ₋₁₀	0.90	0.166	0.166	0.046	1.63	—	0.04	50 Hz	前苏联
10	SM3	3.40	4.0	±5	0.80	0.249	0.303	—	2.675	2.675	0.116	60 Hz	美国
11	SC10	40	13.8	±5	0	0.119	0.129	—	1.33	1.33	0.142 5	60 Hz	美国
12	SC6	100	10.5	±5	0	0.20	0.25	0.095	1.78	1.60	0.57	50 Hz	前捷克斯洛伐克
^a TG2:双极汽轮发电机;SG:凸极发电机;SM:同步电动机;SC:凸极同步调相机。 ^b $U_G=U_{rG}\left(1\pm\frac{P_G}{100\%}\right)$。 ^c 负序电抗。 ^d 零序电抗。 ^e 不饱和同步电抗。 ^f 饱和同步电抗。 ^g 机端三相短路时的直流时间常数。													

图 1 为 50 Hz 或 60 Hz 同步电机(发电机、电动机和调相机)的超瞬态电抗与其额定容量的关系。

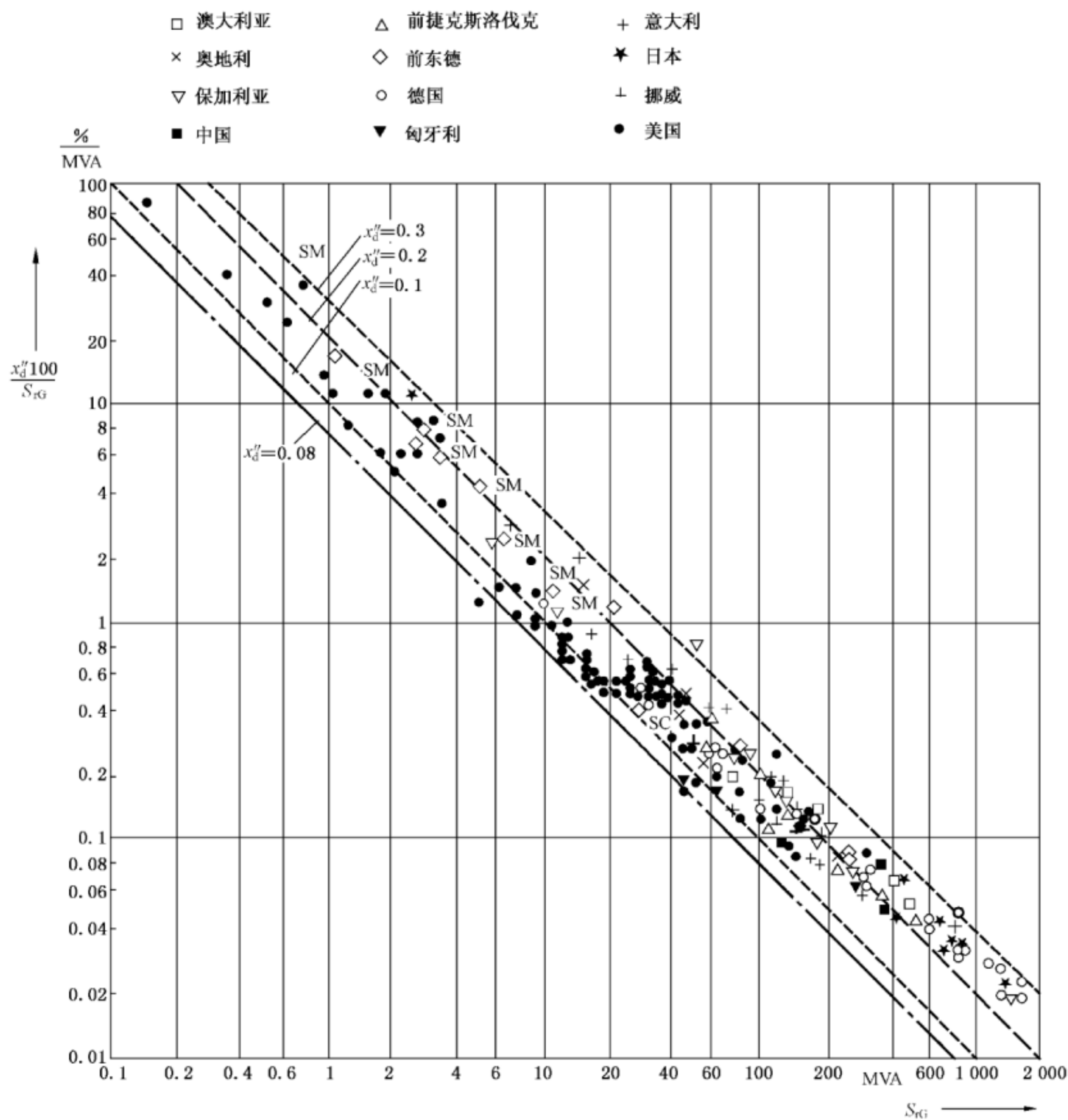


图 1 50 Hz 或 60 Hz 同步电机(汽轮发电机、凸极机、电动机和调相机)的超瞬态电抗

图 2 为 50 Hz 或 60 Hz 同步电机(发电机、电动机)的额定电压及功率因数与其额定容量的关系。

图 3 为 50 Hz 或 60 Hz 汽轮发电机的饱和/不饱和同步电抗(x_{dsat}/x_d)与其额定容量的关系,该数据用于计算稳态短路电流。

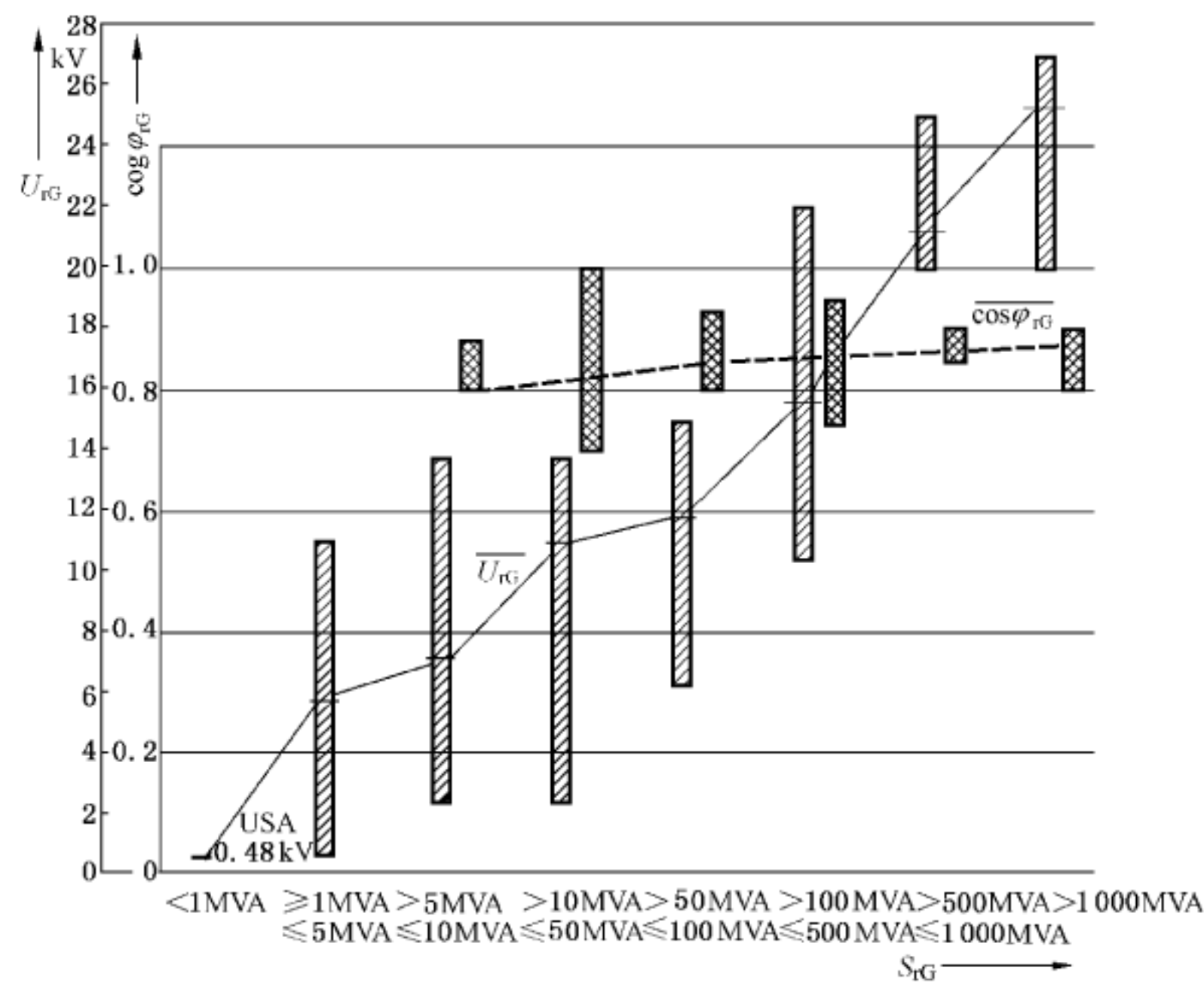


图 2 50 Hz 或 60 Hz 同步电机(汽轮发电机、凸极机、电动机及调相机)
额定电压、额定功率因数与容量的关系

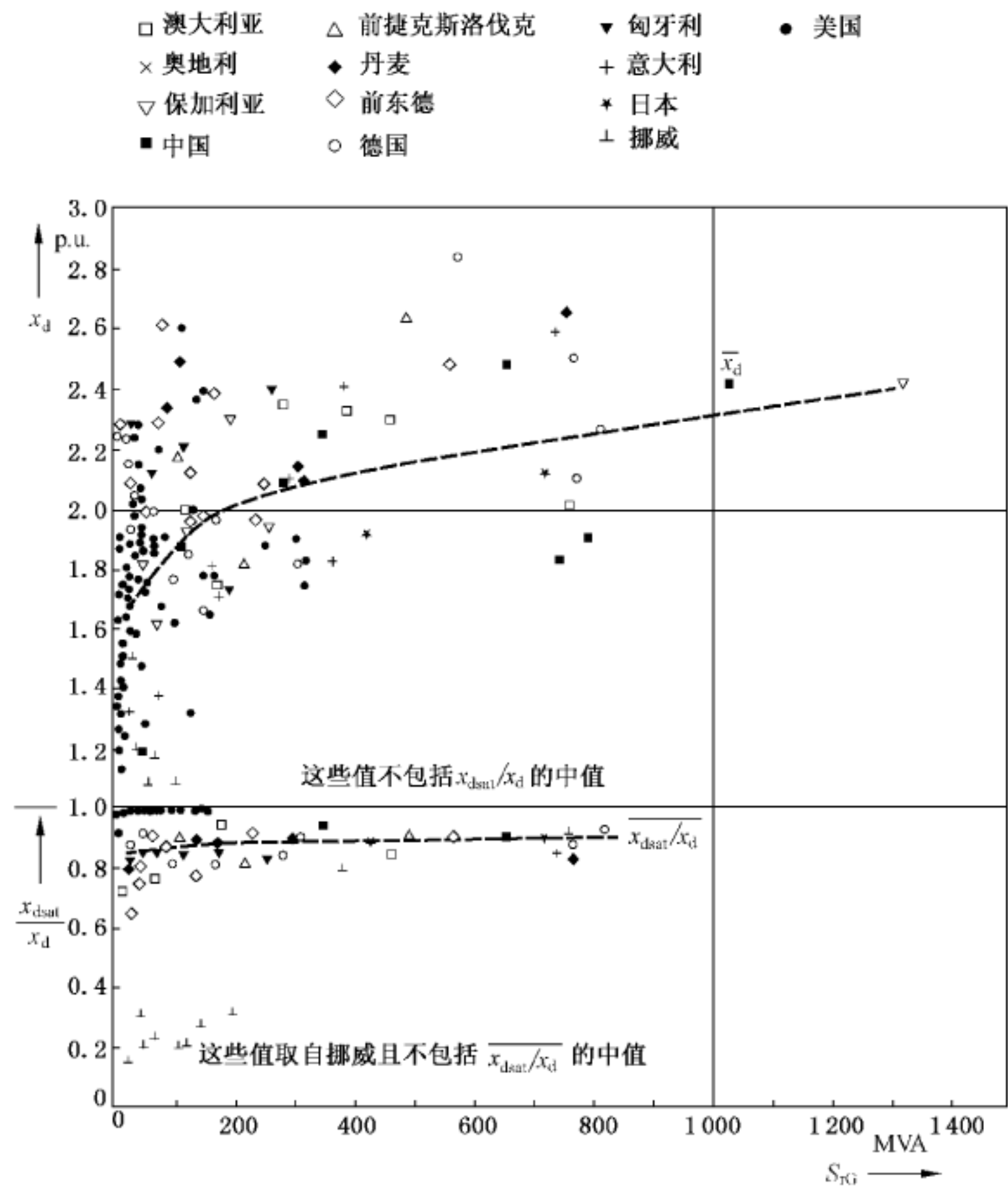


图 3 50 Hz 与 60 Hz 双极汽轮发电机的不饱和与饱和电抗(标么值)

2.3 双绕组、三绕组及自耦变压器的典型数据

表 2、表 3 和表 4 分别给出双绕组、三绕组和自耦变压器的特性参数。

表 2 典型双绕组变压器的真实数据(NT:电网,ST:发电厂)

序号	额定容量	额定电压		额定短路电压		绕组连接组别	接地侧	$\frac{X_{(0)}}{X_{(1)}}$	分接头开关			注	NC
	S_{rT}	U_{rTHV}	U_{rTLV}	U_{kr}	U_{Rr}				$\pm p_T$	u_{k+}	u_{k-}		
	MVA	kV	kV	%	%	—		—	%	%	%		
1	0.63	20	0.4	6.0	1.2	Dyn5	LV	≈ 1	± 5	无载		NT,50 Hz, 3 limb	前民主德国
2	24	33	11	24.2	1.12	YNyn0	HV, LV	0.7	± 10	24.1	25.3	NT,50 Hz, 3 limb	英国
3	31.5	112	22.2	12.8	0.37	YNd5	HV	≈ 1	± 18	13.9	10.5	NT,50 Hz	德国
4	80	121	6.3	10.5	—	YNd5	HV	0.71	2×2.5	—	—	NT,50 Hz, 3 limb	保加利亚
5 ^a	500	400	132	26.1	0.30	YNynd5	HV, LV	≈ 1.6	± 13			NT,50 Hz	丹麦
6	20	138	13.2	10.58	0.49	Dyn1	LV	0.93	$+2.5$ -7.5			ST,60 Hz, 3 limb	美国
7	25	132	6.3	10.5		YNd11	HV	1.0				ST,59 Hz, 3 limb	匈牙利
8	180	110	10.5	12.0	0.221	Yd11		0.78	± 12			ST,50 Hz	奥地利
9	390	350	23.0	15.92	0.554	YNd1	HV	1.0	$+10$ -15	16.7	15.5	ST,50 Hz, 3 limb	澳大利亚
10	780	230	21.0	15.3	0.2	YNd5	HV	$=0.8$	± 15	16.7	14.3	ST,50 Hz	德国
^a 含一个三角形连接辅助绕组的双绕组变压器见表 3。													

表 3 典型三绕组变压器的真实数据

序号	额定容量			额定电压			额定短路电压			绕组连接组别	归算到 A 侧的零序电抗			注	NC
	S_{rTAB}	S_{rTAC}	S_{rTBC}	U_{rTA}	U_{rTB}	U_{rTC}	U_{krAB}	U_{krAC}	U_{krBC}	HV MV LV	$X_{(0)A}$	$X_{(0)B}$	$X_{(0)C}$		
	MVA	MVA	MVA	kV	kV	kV	%	%	%		Ω	Ω	Ω		
1	7.5	7.5	7.5	34.5	13.8	13.8	3.65	3.58	7.96	YN d1 d1	—	—	—	60 Hz, 3 limb	美国
2	25	16	16	120	22	11	11.0	14.5	3.5	YN yn0 d11	99.0	—	3.15	50 Hz 3 limb	匈牙利
3	31.5	31.5	31.5	110	38.5	6.3	10.5	17.5	6.5	YN yn0 d11	6.13	17.23	18.24	"	中国
4	94	94	94	239	130	13.8	11.79	11.31	12.44	YN yn0 d11	32.39	39.23	36.31	"	意大利
5	125	42	42	230	63	20	11.7	10.6	5.9	YN yn0 d11	124.6	—	5.74	50Hz 5 limb	前民主德国
6	600	150	150	400	230	30	17.5	16.5	11.3	YN yn0 d5	50.5	-3.8	125.3	"	奥地利

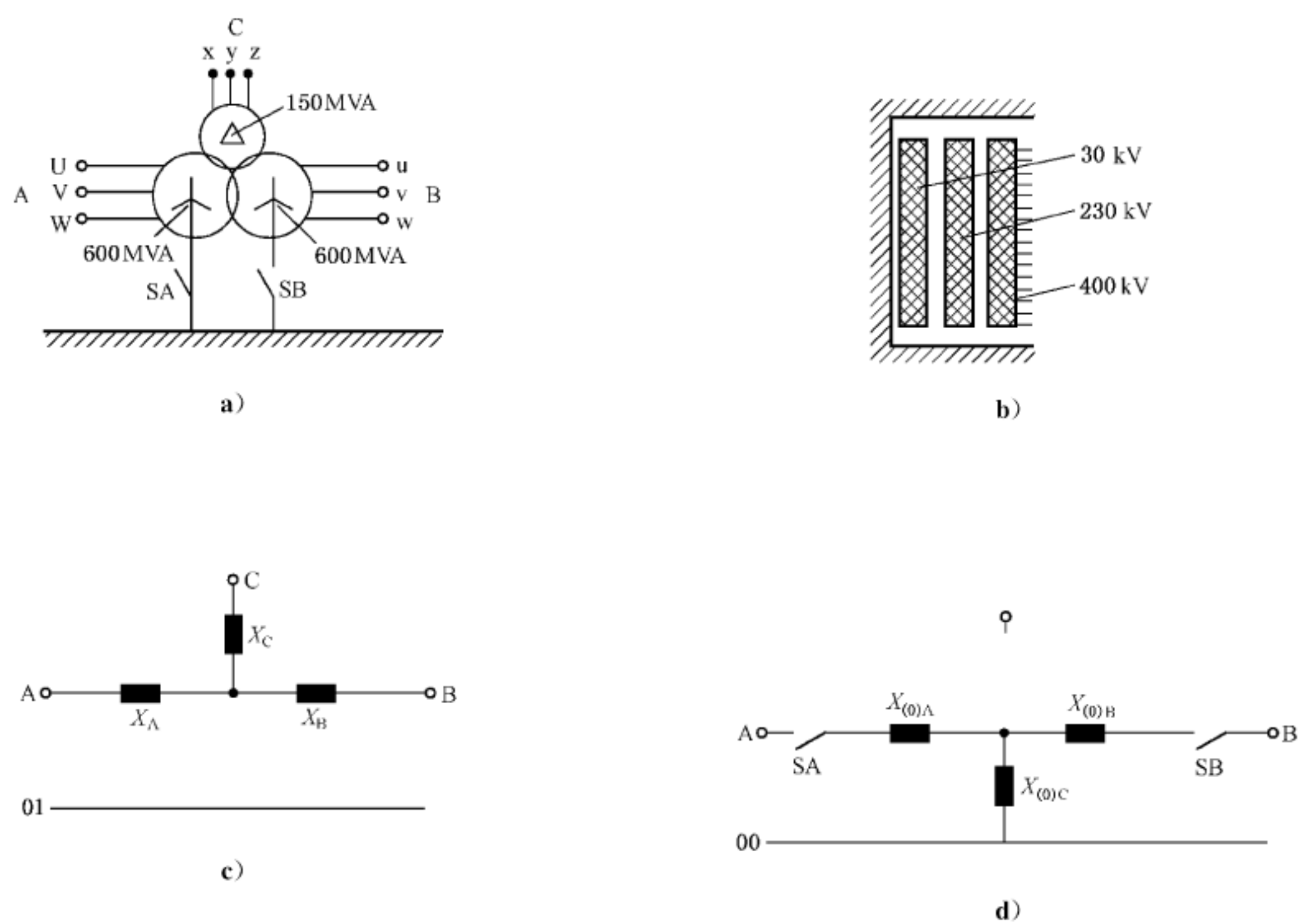
GB/T 15544.3—2017/IEC TR 60909-2:2008

图 4 给出了表 3 中变压器 6 的补充信息。低压绕组 C(30 kV)离铁芯较近,中压绕组 B(230 kV)位于高压绕组 A 与低压绕组 C 之间。高压绕组 A 包含主体部分与辅助调压部分,辅助调压部分与高压侧星形连结点附近的有载调压开关相连[见图 4 中的 b)]。正序电抗 X_A 、 X_B 、 X_C 可根据表 3 中的短路电压求出。折算到高压 A 侧($U_{rTA} = 400$ kV)且不含阻抗校正系数(见 GB/T 15544.1)时, $X_A = 51.1 \Omega$ 、 $X_B = -4.4 \Omega$ 、 $X_C = 124.93 \Omega$ 。 X_B 的值与表 3 中的 $X_{(0)B}$ 值相近,为较小的负值。

表 4 有或无第三绕组的典型自耦变压器真实数据

序号	额定容量			额定电压			额定短路电压			绕组连接组别	归算到 A 侧的零序电抗			NC
	S_{rTAB}	S_{rTAC}	S_{rTBC}	U_{rTA}	U_{rTB}	U_{rTC}	U_{krAB}	U_{krAC}	U_{krBC}	HV MV LV	$X_{(0)A}$	$X_{(0)B}$	$X_{(0)C}$	
	MVA	MVA	MVA	kV	kV	kV	%	%	%		Ω	Ω	Ω	
1	60	60	10	132	66	11	11.0	27.5	79.0	Y yn0 d1	61.6	4.19	1050	澳大利亚
2	200	200	100	230	121	6.6 38.5	11.0	32.0	20.0	Y Auto d11	30.4	0	54.2	前苏联
3	250	75	75	400	132	18	14.6	12.2	7.1	YN yn0 d11	10.11	-7.71	159.1	匈牙利
4	250	100	100	400	121	10	12.9	13.1	6.3	YN yn0 d1	95.7	-13.1	113.9	前捷克斯洛伐克
5	660	198	198	400	231	30	10.2	13.5	10.6	Ⅲ d5 ^a	24.35	0.35	84.65	德国
6	250	250	—	230	130	—	11.6	—	—	YN yn0	24.55	—	—	意大利
7	300	300	—	235	165	—	7.0	—	—	YN yn0	13.0	—	—	丹麦
^a 3 个独立的极。														

如果仅高压侧中性点接地,则 $X_{(0)T} = X_{(0)A} + X_{(0)C}$ 。若仅中压侧中性点接地,则折算到高压侧 $X_{(0)T} = X_{(0)B} + X_{(0)C}$,折算到中压侧 $X_{(0)Tt} = (X_{(0)B} + X_{(0)C}) \times (230\text{kV})^2 / (400\text{kV})^2$ 。



说明：

A —— A,B,C 三绕组及其容量；

B —— 三绕组相对于铁芯的位置；

C —— 正序电抗；

D —— 零序电抗；

A —— 高压侧；

B —— 中压侧；

C —— 低压侧；

SA,SB —— 高压和中压开关。

图 4 三绕组变压器(表 3 中序号 6)

图 5 给出了有或无带载调节分接头的发电厂单元接线变压器短路阻抗与额定容量的关系。短路电压百分比的均值可近似由式(1)计算：

$$\frac{u_{kr}}{\%} = 8 + 0.92 \times \ln \frac{S_{rT}}{\text{MVA}}$$

.....(1)

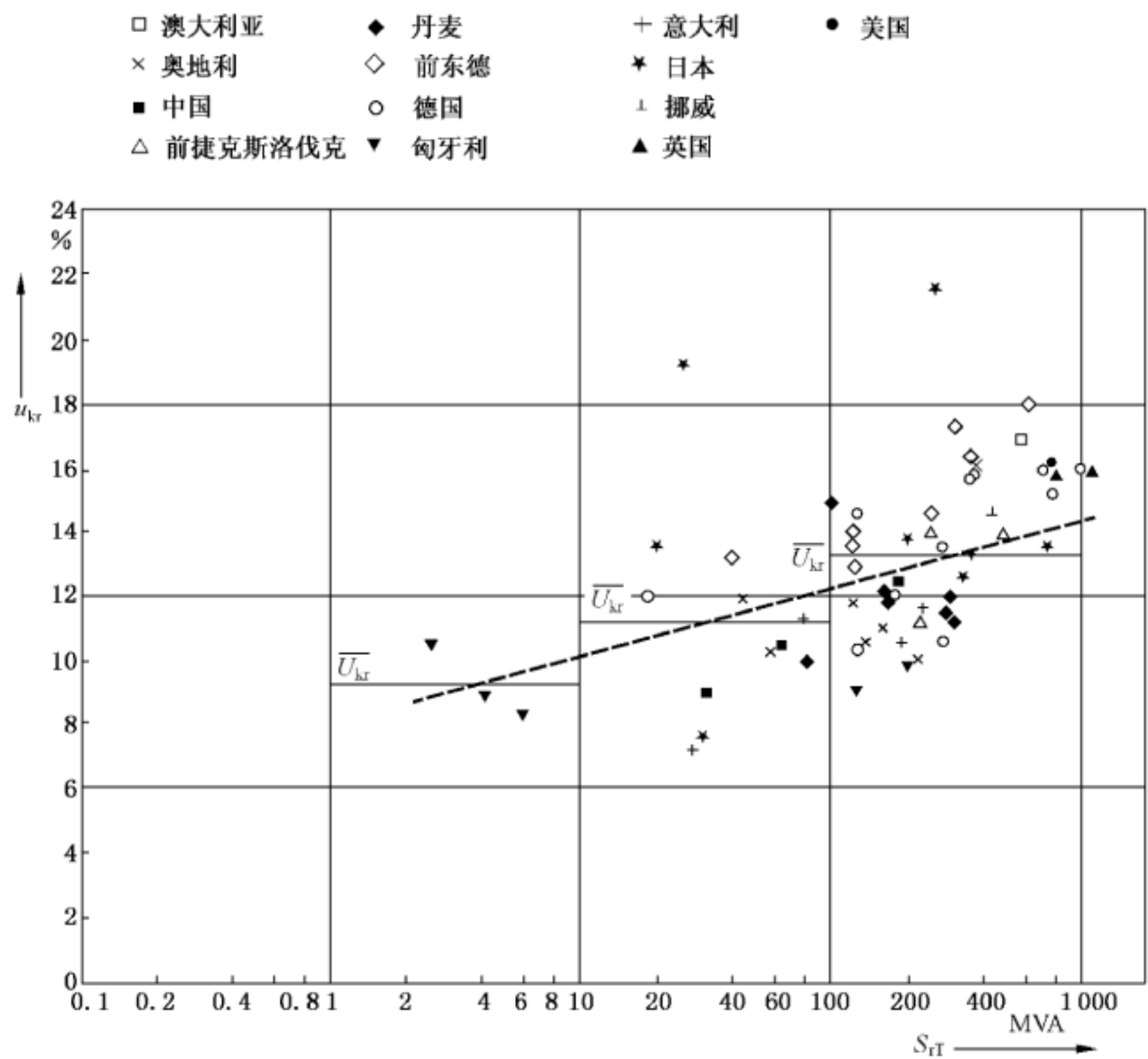


图 5 发电厂单元接线变压器(有或无带载调压分接头)的短路电压百分数 u_{kr}

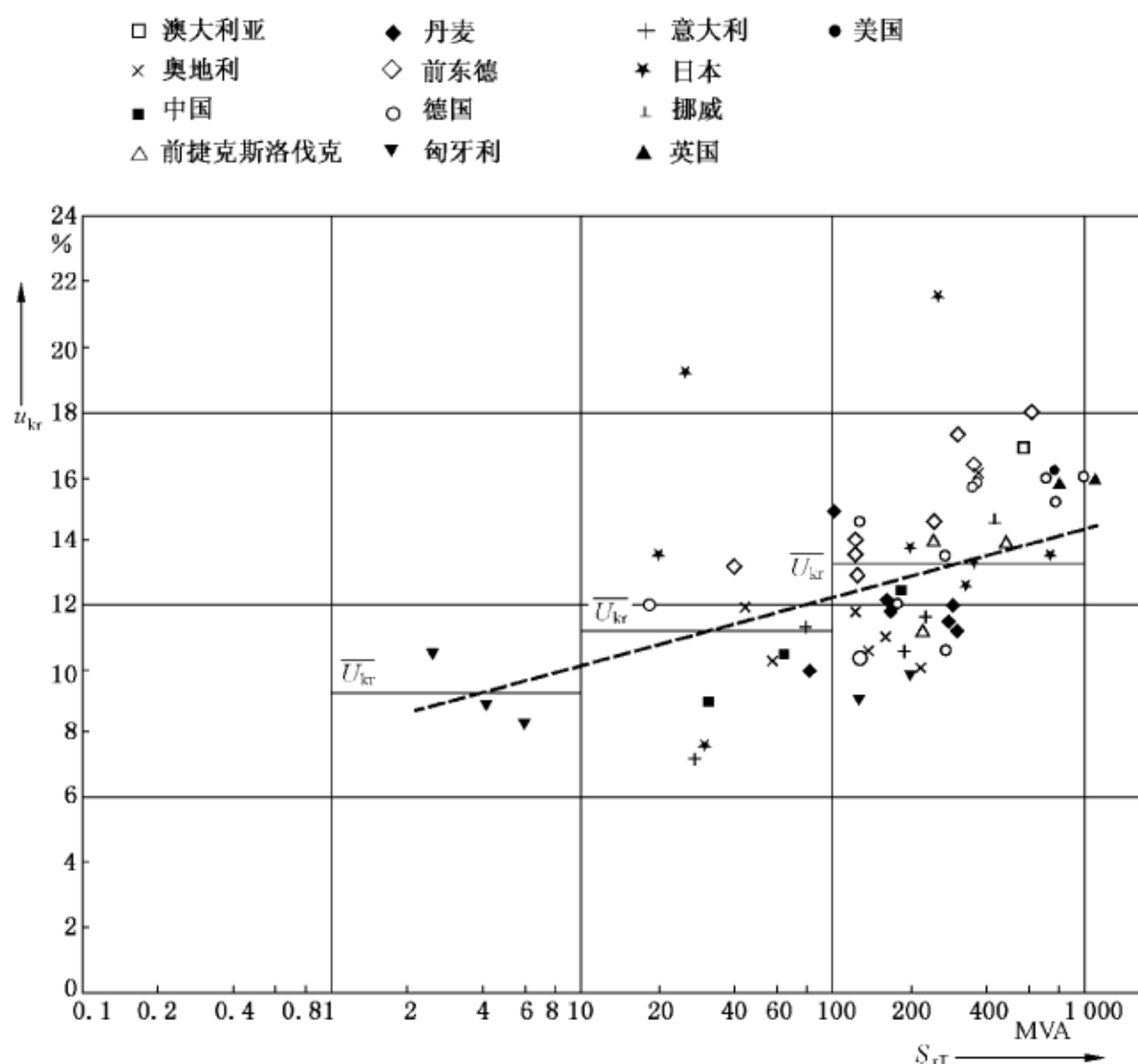
由图 5,可使用如下 u_{kr} 的均值:

- $S_{rT}=1\cdots 10\text{ MVA}:\quad u_{kr}=9\%$
- $S_{rT}=10\cdots 100\text{ MVA}:\quad u_{kr}=11\%$
- $S_{rT}=100\cdots 1\,000\text{ MVA}:\quad u_{kr}=13\%$

图 6 中给出了网络变压器短路电压百分数与额定容量的关系。低压变压器 u_{kr} 通常取 4% 或 6%。通常,自耦变压器 u_{kr} 取值更低些。

双绕组或三绕组变压器,如果只有一个中性点接地, $X_{(0)}/X_{(1)}$ 取如下值:

- YNd 变压器: $X_{(0)}/X_{(1)}=0.8\cdots 1.0$
- Yzn 变压器: $X_{(0)}/X_{(1)}=0.1$
- Ynyn0d 变压器: $X_{(0)}/X_{(1)}=1.5\cdots 3.2(3.7)$

图6 网络变压器额定电压百分比 U_{kr}

2.4 典型单回与同杆并架双回线路参数

正序阻抗可以通过导体横截面积和中心距离等参数求得[见 GB/T 15544.1, 3.4 的式(14)和式(15)]。

导体温度为 20 °C 时,单位千米长度有效电阻可用式(2)求得。

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad \dots\dots\dots (2)$$

导体温度为 20 °C 时,计算最大短路电流 ρ 可采用以下值:

$$\text{铜: } \rho = \frac{1}{54} \times \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}; \text{铝: } \rho = \frac{1}{34} \times \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}; \text{铝合金: } \rho = \frac{1}{31} \times \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}};$$

如果是钢芯铝绞线,仅用铝导体的横截面积作为 q_n 参与计算。

式(3)~式(9)可分别用于计算有/无地线的单/双回采用单根或分裂导线的三相交流架空线路的正序或零序系统的短路阻抗。

单回线路(I)

单回线路的正序系统阻抗用式(3)计算。

$$\underline{Z}'_{(1)} = \underline{Z}'_{1(1)} = \frac{R'_L}{n} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r_B} \right) \quad \text{双分裂导线图例} \quad \dots\dots\dots (3)$$

n 表示分裂数($n=1,2,3,4,6$),如果 $n=1$,则为单根导体, r 表示分裂导体半径, $d=\sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L1L3}d_{L2L3}}$ 表示各根导体间的几何均距, $r_B=\sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ 表示有效分裂半径,其中 R 为布置分裂导体所在圆的半径。

单回线路无地线情况下的零序系统阻抗用式(4)计算。

$$\underline{Z}'_{(0)} = \frac{R'_L}{n} + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + 3\ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_B d^2}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

图 7、图 8 和表 5 中的零序系统阻抗计算时,大地导电率取 $\rho=100 \Omega\text{m}$,等效电流返回深度取 $\delta=930 \text{ m}$ (50 Hz)或 $\delta=850 \text{ m}$ (60 Hz)。 δ 的计算公式见 GB/T 15544.4—2017 中的式(36)。

单回线路带一回地线 Q 情况下的零序阻抗用式(5)计算。

$$\underline{Z}'_{(0)}^{\text{IQ}} = \underline{Z}'_{(0)} - 3 \frac{\underline{Z}'_{\text{QLE}}^2}{\underline{Z}'_{\text{QQE}}} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$$\underline{Z}'_{\text{QQE}} = R'_Q + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_{\text{rQ}}}{4} + \ln \frac{\delta}{r_Q} \right)$$

$$\underline{Z}'_{\text{QLE}} = \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{\text{QL}}}$$

$$d_{\text{QL}} = \sqrt[3]{d_{\text{QL1}}d_{\text{QL2}}d_{\text{QL3}}}$$

μ_{rQ} 取决于地线的材料和结构。

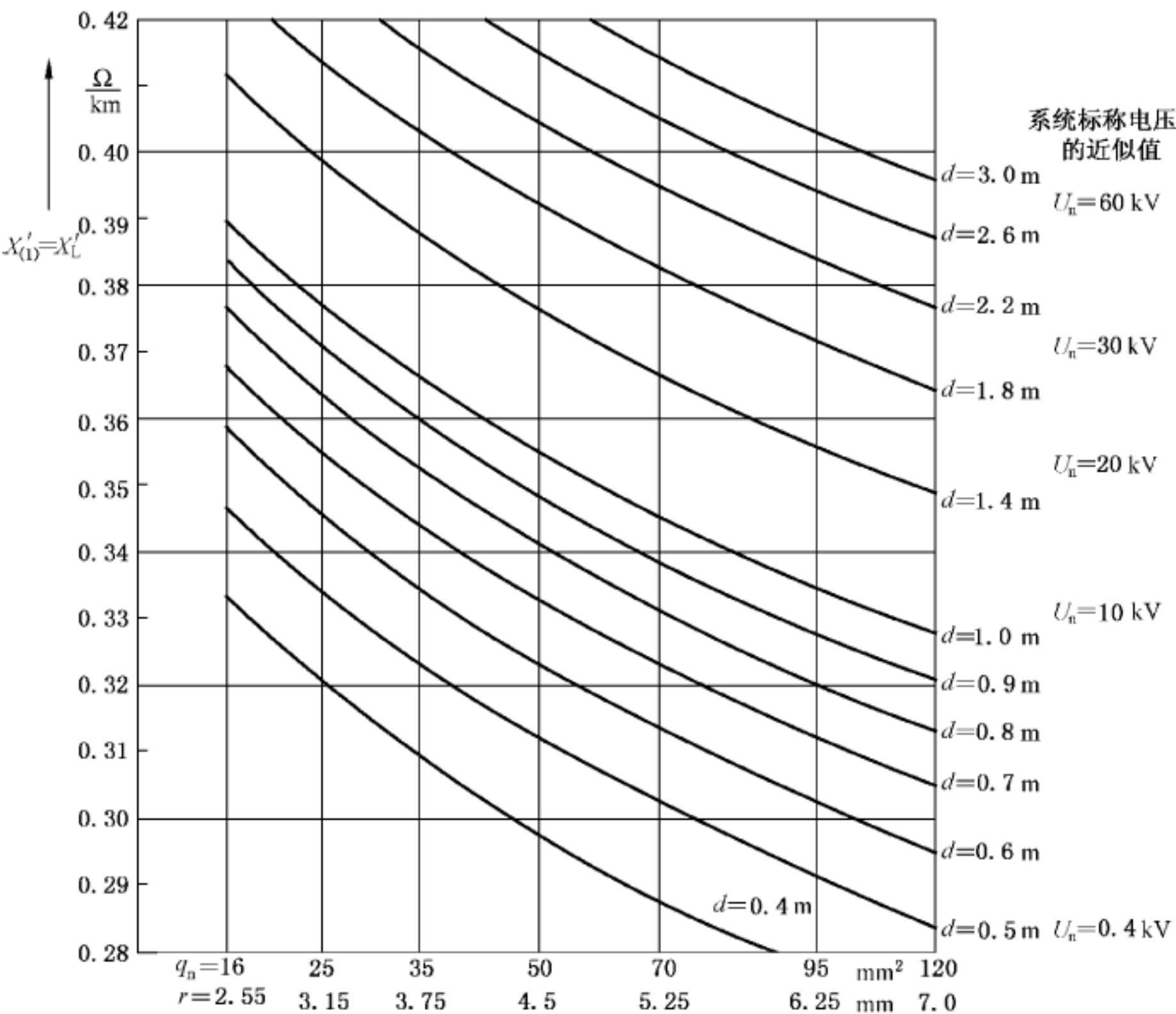
单回线路带双回地线 Q1 和 Q2 情况下的零序阻抗用式(6)计算。

$$\underline{Z}'_{(0)}^{\text{IQ1Q2}} = \underline{Z}'_{(0)} - 3 \frac{\underline{Z}'_{\text{Q1Q2LE}}^2}{\underline{Z}'_{\text{Q1Q2E}}} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$$\underline{Z}'_{\text{Q1Q2E}} = \frac{R'_Q}{2} + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_{\text{rQ}}}{8} + \ln \frac{\delta}{\sqrt{r_Q d_{\text{Q1Q2}}}} \right)$$

$$\underline{Z}'_{\text{Q1Q2LE}} = \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[6]{d_{\text{Q1L1}}d_{\text{Q1L2}}d_{\text{Q1L3}}d_{\text{Q2L1}}d_{\text{Q2L2}}d_{\text{Q2L3}}}}$$



注：频率为 60 Hz 时，阻抗值应乘以 1.2。

图 7 按 GB/T 15544.1—2013 式(15)计算 50 Hz 单回中低压架空线路(铜或铝)的正序电抗 $X'_{(1)} = X'_L$

计算值 $X'_{(1)} = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r} \right)$ ，其中 $d = \sqrt[3]{d_{L1L2} d_{L1L3} d_{L2L3}}$ 。

同杆并架双回线路(Ⅱ)

同杆并架双回线路每回线路的正序阻抗用式(7)计算。

$$\underline{Z}'_{(1)} = \frac{R'_L}{n} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d \times d_{mL1M2}}{r_B d_{mL1M1}} \right) \dots\dots\dots (7)$$

若为双回线路各导体均相对杆塔对称,式(7)中

$$d_{mL1M1} = \sqrt[3]{d_{L1M1} d_{L2M2} d_{L3M3}}, d_{mL1M2} = \sqrt[3]{d_{L1M2} d_{L1M3} d_{L2M3}}$$

否则

$$d_{mL1M2} = \sqrt[6]{d_{L1M2} d_{L1M3} d_{L2M3} d_{L2M1} d_{L3M1} d_{L3M2}}。$$

很多情况下, d_{mL1M2}/d_{mL1M1} 的比值都接近于 1,从而每回线路的正序阻抗 $\underline{Z}'_{(1)} \approx \underline{Z}'_{(1)}$ 。

表 5 50 Hz 或 60 Hz 典型架空线路的实际参数

序号	线路 型号/ 回路数 (图 9)	电压	导体/分 导体材料 与型号	地线 材料与型号	几何参数					正序阻抗 ^a $\underline{Z}'_{(1)} = R'_{(1)} + jX'_{(1)}$	零序阻抗 ^a $\underline{Z}'_{(0)} = R'_{(0)} + jX'_{(0)}$	NC
					r	d	d_{mL1M2}	d_{Q1Q2}	d_{QL}			
					r_B	d_{LM}	d_{mL1M1}					
	kV	mm ²	mm ²	mm	m	m	m	m	Ω/km	Ω/km		
1	A/1	0.40	1×Al 95	(PEN)	6.25	0.6	—	—	—	$0.31 + j0.302$	$0.63 + j0.941$	奥地利

表 5(续)

序号	线路 型号/ 回路数 (图 9)	电压 kV	导体/分 导体材料 与型号 mm ²	地线 材料与型号 mm ²	几何参数					正序阻抗 ^a $\underline{Z}'_{(1)}=R'_{(1)}+jX'_{(1)}$ Ω/km	零序阻抗 ^a $\underline{Z}'_{(0)}=R'_{(0)}+jX'_{(0)}$ Ω/km	NC
					r	d	d_{mL1M2}	d_{Q1Q2}	d_{Q1}			
					r_B	d_{LM}	d_{mL1M1}					
					mm	m	m	m	m			
2	B/1	20	1×Cu 25	—	3.15	1.23	—		—	$0.746+j0.396$	$0.854+j1.643$	意大利
3	D/1	66	1×Al/St	Al/St 25	13.86	3.77	—	3.0	4.9	$0.072+j0.365$	$0.410+j0.882$	挪威
4	F/1	110	1×Al/St 240/40	1×St 50	10.95	4.06	—	—	10.8	$0.119+j0.387$	$0.309+j1.382$	德国
5	C/1	110	1×Al/St 185/25	1×St 50	9.2	4.61	—	—	4.33	$0.156+j0.395$	$0.370+j1.34$	保加 利亚
6	C/1	132	1×Al/St 525/68	1×Al/St 138/68	15.8	5.81	—	—	12	$0.061+j0.387$	$0.202+j0.931$	丹麦
7	E/1	220	1×Al/St 291/37.2	2×St 50	11.75	6.39	—	5.8	6.99	$0.108+j0.411$	$0.352+j1.242$	中国
8	C/ ^b	220	1×Al/St 400/51	1×St 70	13.75	8.0	—	—	11.6	$0.075+j0.420$	$0.250+j1.340$	前苏联
9	G/2	220	2×Al/St 240/40	1×Al/St 240/40	10.95	6.24	15.8	—	16.3	$0.06+j0.299$	$0.273+j1.479$	德国
					66.2	15.3	14.4					
10	K/2	275	4×Al/St 610/79.4	1×AS 160	17.1	9.85	16.39	13.0	16.84	$0.015+j0.239$	$0.111+j1.708$	日本 (50 Hz)
					304	13.74	12.60					
11	K/2	380	2×Al/St 680/85 ^c	1×Al/St 240/40	18.0	11.5	19.2	—	21.6	$0.021\ 5+j0.303$	$0.243+j1.400$	奥地利
					48.9	19.1	23.2					
12	D/1	500	4×Al/St 291/37.2	2×Al/St 120/22	11.75	17.64	—	24.0	18.08	$0.031+j0.286$	$0.233+j0.715$	澳大利 亚
					197.3							
13	K/2	500	4×Al/St 814/56	2×Al/St 150/87	38.4	15.13	25.23	20.4	26.92	$0.009+j0.304$	$0.356+j1.224$	日本 (60 Hz)
					287.3		19.38					
^a 每回线路阻抗,计算电阻值取温度 20℃。												
^b 特殊设计,同一个线路走廊中的两条单回路线路。												
^c 从 2006 年,典型导体配置为:3×Al/St 635/117。												

并行双回架空线路带有一回地线 Q 情况下,每回线路的零序阻抗用式(8)计算。

$$\underline{Z}'_{(0)IIQ} = \underline{Z}'_{(0)} + 3\underline{Z}'_{LME} - 6 \frac{\underline{Z}'^2_{QLE}}{\underline{Z}'_{QQE}} \dots\dots\dots (8)$$

若双回线路全部导体相对杆塔对称,式(8)中

$$\underline{Z}'_{LME} = \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{d_{LM}}$$
$$d_{LM} = \sqrt[3]{d_{mL1M1} d_{mL1M2}^2}$$

$d_{mL1M1} = \sqrt[3]{d_{L1M1} d_{L2M2} d_{L3M3}}$

$d_{mL1M2} = \sqrt[3]{d_{L1M2} d_{L1M3} d_{L2M3}}$

Z'_{QQE} 与 Z'_{QLE} 同式(5)。

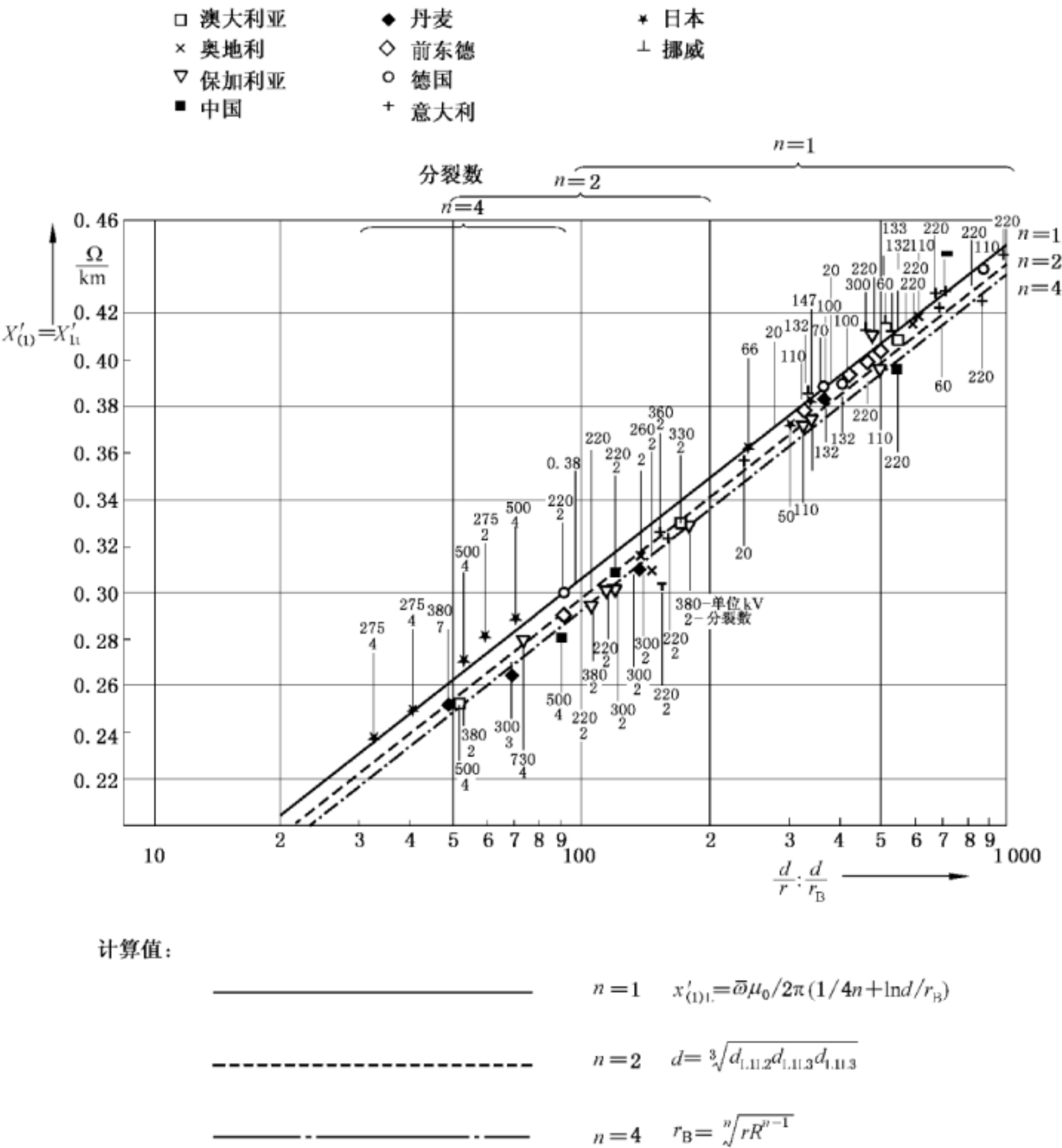


图 8 50 Hz 架空线路正序电抗 $X'_{(1)} = X'_L$

并行双回架空线路带有双回地线 Q1 和 Q2 情况下的零序阻抗用式(9)计算。

$$\underline{Z}'_{(0)HQ1Q2} = \underline{Z}'_{(0)I} + 3\underline{Z}'_{LME} - 6 \frac{\underline{Z}'_{Q1Q2LE}}{\underline{Z}'_{Q1Q2E}} \dots\dots\dots (9)$$

式中： $\underline{Z}'_{LME}$ 同式(8)， $\underline{Z}'_{Q1Q2E}$ 和 $\underline{Z}'_{Q1Q2LE}$ 同式(6)。

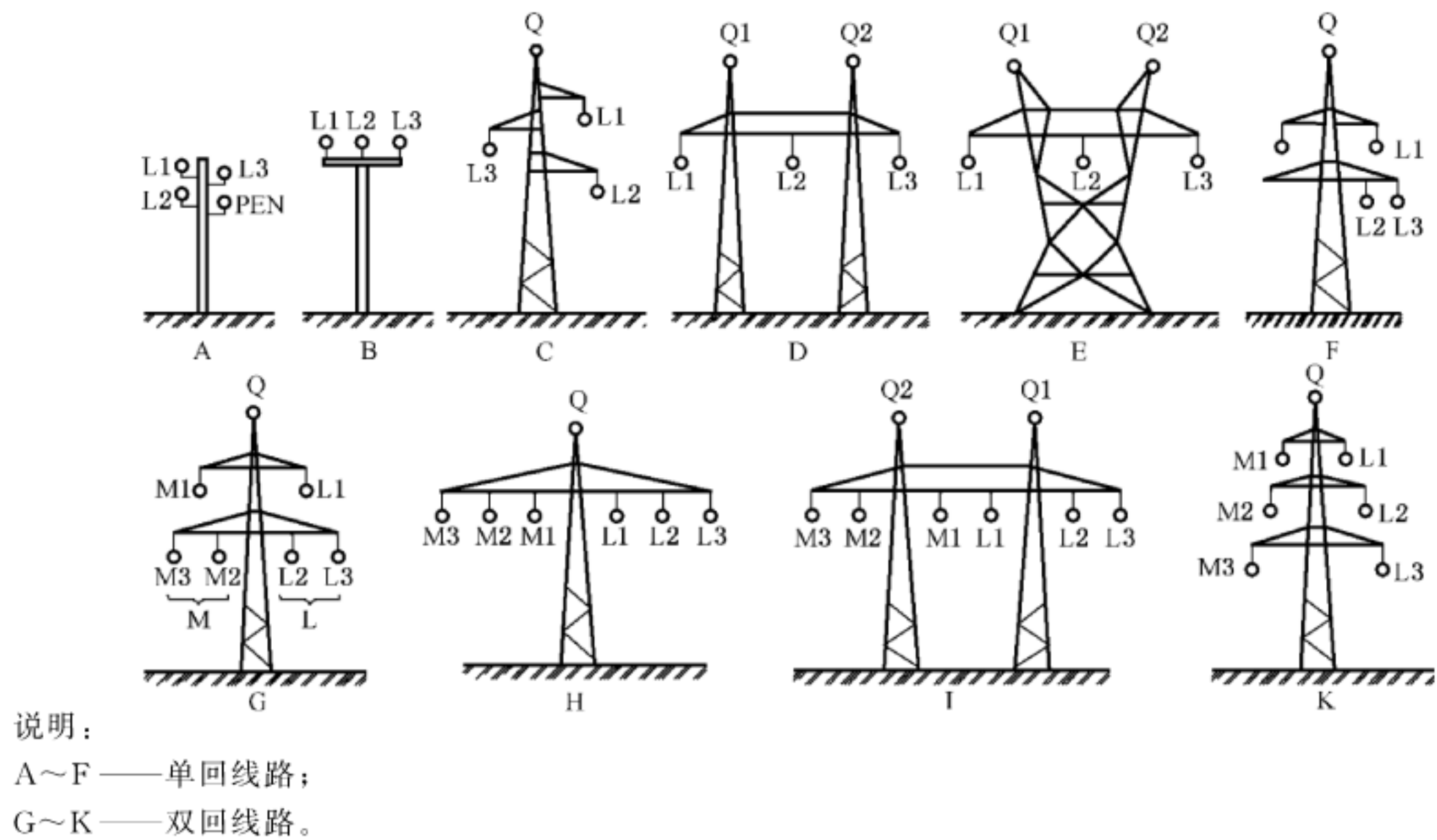


图 9 架空线路类型

2.5 典型高压、中压和低压电缆参数

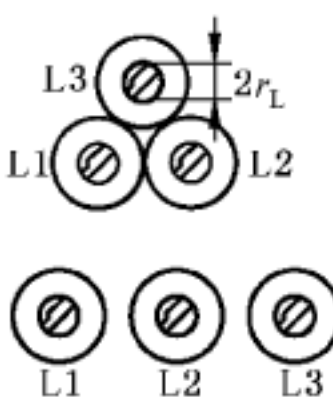
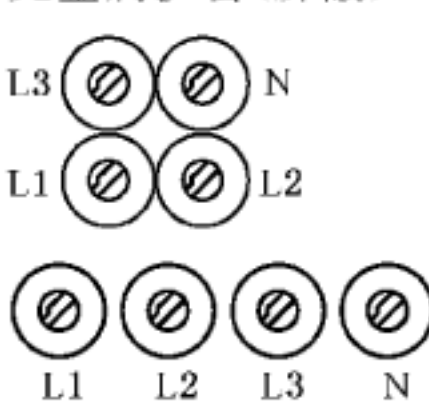
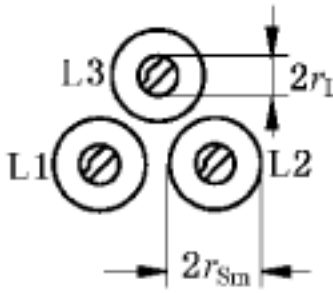
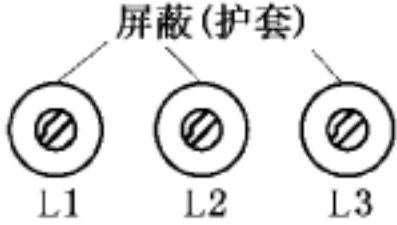
高压、中压和低压电缆阻抗取决于技术水平和相关标准,可以通过相关资料或制造商获取。表 6 中给出了 50Hz 电缆特性参数。

表 6 典型电力电缆的真实数据

序号	额定电	导体		横截面积 与类型 ^b	类型 ^c	缆芯 数 ^d	护套(屏蔽)		正序阻抗 $Z'_{(1)}=R'_{(1)}+jX'_{(1)}$ ^f	电流 回路 ^g	零序阻抗 $Z'_{(0)}=R'_{(0)}+jX'_{(0)}$ ^f	NC
	压 U_n^a	数目	材料				类型 ^e	材料				
	kV	—	—				mm ²	—				
1	0.6/1	4	Al	240/120 rST	NR	3 $\frac{1}{2}$	—	—	0.129+j0.04	4 th +E	4.2R'_{(1)}+j4.6X'_{(1)}	前捷克斯洛伐克
2	6/10	3×1	Cu	120 rST	R ^h	SC	W+T	Cu	0.16+j0.116	S+E	—	匈牙利
3	10	3	Cu	240 rST	NR	TC	M	Pb	0.088+j0.069	S+E	+j0.242	中国
4	22	3	Cu	120 rST	NR ⁱ	TC	FW	Cu	0.153+j0.104	S+E	—	挪威
5	50	3×1	Al	500r	R	SC	W	Cu	0.084+j0.11	S+E	0.456+j0.156	丹麦
6	110	3×1	Cu	240 HO	R ^j	SC	M	Pb/Al	0.079+j0.12	S+E	0.51+j0.30	德国
7	132	3×1	Cu	220r HO	R	SC	M	Pb	0.084+j0.12	S	0.58+j0.061	意大利
8	275	3×1	Cu	1 400sST	R	SC	M	Al	0.013 1+j0.146	S+E	0.047+j0.047	日本
9	330	3×1	Cu	1 200s HO	R	SC	M	Al	0.020 5+j0.188	S+E	0.071 9+j0.056 6	澳大利亚
10	380	3×1	Cu	1 200sST	R	SC	M	Al	0.018+j0.188	S	0.047+j0.070	奥地利
^a 线电压。 ^b r 为圆形;HO 为空心;s 为扇形;ST 为标准。 ^c R 为辐射型;NR 为非辐射型。 ^d SC 为单芯电缆;TC 为三芯电缆。 ^e T 为包带;W 为丝,M 为金属护套;FW 为护套。 ^f 20 ℃时的交流电阻。 ^g S 为护套(屏蔽);E 为地,4th为第 4 根导体。 ^h N2YSY。 ⁱ DKAB。 ^j 油压。												

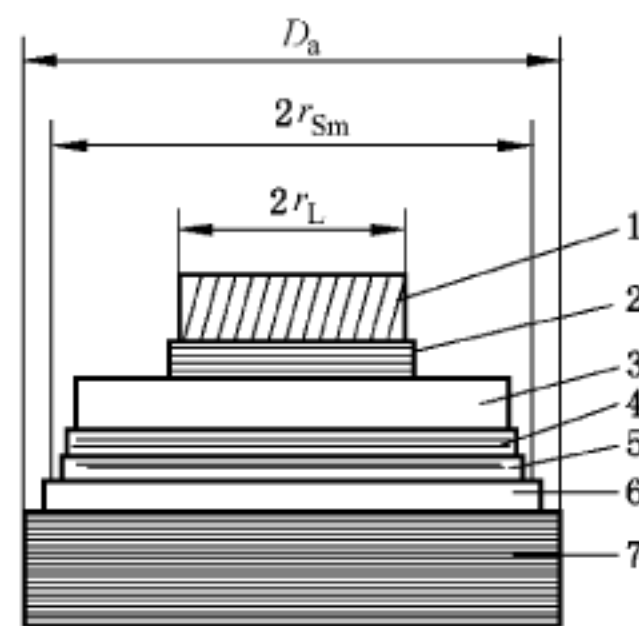
对于不带金属护套(屏蔽)与带金属护套(屏蔽)且双端接地的单芯电缆,表 7 中给出了其正序与零序阻抗的计算公式。表中示例 2 适用于低压系统四芯电缆的计算($N=PEN$)。

表 7 计算电缆正序和零序阻抗的公式

示例 序号	电缆结构	正序和零序阻抗
1a 1b	无金属护套(屏蔽) 	$Z'_{(1)} = R'_L + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r_L} \right) \dots\dots\dots (10)$ $\underline{Z}'_{(0)} = R'_L + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + 3\ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_L d^2}} \right) \dots\dots (11)$ $d = \sqrt[3]{d_{L1L2} d_{L1L3} d_{L2L3}}, \delta$ 取 GB/T 15544.4—2017 中的式(36)
2a 2b	无金属护套(屏蔽) 	四根相同的单芯电缆(低压) $\underline{Z}'_{(1)N} = \underline{Z}'_{(1)} = R'_L + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r_L} \right) \dots\dots\dots (12)$ 电流回路通过第四芯 N $\underline{Z}'_{(0)N} = 4R'_L + j4\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\sqrt{d_{LN}}}{r_L \sqrt{d}} \right) \dots\dots (13)$ 电流回路通过第四芯 N 和大地 E $\underline{Z}'_{(0)NE} = \underline{Z}'_{(0)} - 3 \frac{\left(\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{LN}} \right)^2}{R'_L + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\delta}{r_L} \right)} \dots\dots (14)$ 其中 $\underline{Z}'_{(0)}$ 取自式(11), $d_{LN} = \sqrt[3]{d_{L1N} d_{L2N} d_{L3N}}$
3a 3b	带金属护套(屏蔽)且两端接地  	$\underline{Z}'_{(1)S} = \underline{Z}'_{(1)} + \frac{\left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r_{sm}} \right)^2}{R'_s + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r_{sm}}} \dots\dots\dots (15)$ 电流回路通过护套(屏蔽)与大地 $\underline{Z}'_{(0)SE} = \underline{Z}'_{(0)} - \frac{\left(3\omega \frac{\mu_0}{8} + j3\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{sm} d^2}} \right)^2}{R'_s + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j3\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{sm} d^2}}} \dots\dots (16)$ 其中, $\underline{Z}'_{(1)}$ 见式(10), $\underline{Z}'_{(0)}$ 见式(11), 护套(屏蔽)中值半径 $r_{sm} = 0.5(r_{si} + r_{so})$ 。 $\underline{r}_3 = \frac{R'_s}{R'_s + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j3\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{sm} d^2}}} \dots\dots (17)$

高压电缆

表 7 中示例 3 式(15)与式(16)可用于计算单芯高压电缆线路的正序与零序阻抗,如金属护套(屏蔽)两端接地的 64kV/110kV 电缆(图 10)。正序系统与零序系统中,电缆护套(屏蔽)均会存在电流。在这种情况下,减缩系数(见 GB/T 15544.4)的计算必须考虑 3 个电缆的护套(屏蔽)。



- 说明：
- 1——绞线导体；
 - 2——导体屏蔽：半导电 XLPE；
 - 3——绝缘：XLPE，18mm；
 - 4——绝缘屏蔽：褶皱半导电 XLPE；
 - 5——垫层：半导电包带；
 - 6——金属护套：铅合金；
 - 7——外护套：黑 PE。

图 10 64/110 kV 铅护套单芯电缆

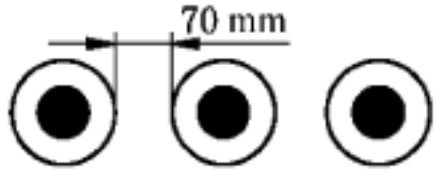
64 kV/110 kV($U_m=123$ kV)铜芯铅护套单芯电缆的参数,以及按表 7 中式(15)与式(16)得到的计算结果列于表 8。其中表 8a)为品字型敷设,表 8b)为平行敷设,这种敷设方式下,需要计算数学中值。电缆数据由制造商提供[4]。

表 8 64/110 kV 铜芯铅套单芯电缆(3×1×240~1 200 mm²)2XK2Y
a) 品字型敷设

q_n	r_L	q_s^a	r_{Sm}^a	D_a	d^b	R'_L	R'_S	 式(15) $\underline{Z}'_{(1)S}=R'_{(1)S}+jX'_{(1)S}$	$\frac{R'_{(0)SE}^c}{R'_{(1)S}}$	$\frac{X'_{(0)SE}^c}{X'_{(1)S}}$	r_3^d
mm ²	mm	mm ²	mm	mm	mm	Ω/km	Ω/km	Ω/km	—	—	—
240	9.3	440	33.3	72	76.3	0.075 4	0.473	0.081 1+j 0.147 3	6.30	1.40	0.245
300	10.3	460	34.9	74	78.4	0.060 1	0.453	0.065 7+j 0.142 6	7.29	1.36	0.236
400	11.9	480	36.4	77	81.6	0.047 0	0.434	0.052 8+j 0.136 0	8.53	1.33	0.228
500	13.8	520	37.6	80	84.8	0.036 6	0.401	0.043 0+j 0.129 0	9.60	1.24	0.213
630	15.6	550	39.8	85	90.1	0.028 3	0.379	0.035 1+j 0.125 0	10.98	1.19	0.203
800	17.35	580	42.0	88	93.3	0.022 1	0.359	0.029 0+j 0.120 4	12.50	1.15	0.193
1 000	19.40	640	44.3	93	98.6	0.017 6	0.326	0.025 2+j 0.116 7	13.06	1.06	0.177
1 200	21.7	670	46.4	98	104	0.015 1	0.311	0.023 2+j 0.112 8	13.52	1.02	0.170
^a $q_s=2\pi r_{Sm}d_s$, 其中 d_s 为铅套厚度。 ^b $d\approx1.06D_a$, 品字型敷设。 ^c $\underline{Z}'_{(0)SE}$ 见式(16)。 ^d 单芯电缆护套的减缩系数, 见式(17)。											

电流通过护套和大地返回情况下,取 $f=50\text{ Hz}$ 、 $\rho=100\text{ }\Omega\text{m}$,零序阻抗 $\underline{Z}_{(0)\text{SE}}' = R_{(0)\text{SE}}' = jX_{(0)\text{SE}}'$ 。

表 8 64/110kV 铜芯铅套单芯电缆($3\times 1\times 240\sim 1\,200\text{ mm}^2$)2XK2Y
b) 平行敷设

q_n	r_L	q_s^a	r_{Sm}^a	D_a	d^b	R_L'	R_S'		$\frac{R_{(0)\text{SE}}'}{R_{(1)\text{S}}'}$	$\frac{X_{(0)\text{SE}}'}{X_{(1)\text{S}}'}$	r_3^d
								式(15) $\underline{Z}_{(1)\text{S}}' = R_{(1)\text{S}}' + jX_{(1)\text{S}}'$			
mm^2	mm	mm^2	mm	mm	mm	Ω/km	Ω/km	Ω/km	—	—	—
240	9.3	440	33.3	72	178.9	0.075 4	0.473	$0.099\,0 + j\,0.201\,5$	5.12	1.047	0.259
300	10.3	460	34.9	74	181.4	0.060 1	0.453	$0.083\,8 + j\,0.195\,9$	5.68	1.016	0.249
400	11.9	480	36.4	77	185.2	0.047 0	0.434	$0.071\,1 + j\,0.188\,2$	6.29	0.982	0.240
500	13.8	520	37.6	80	189.0	0.036 6	0.401	$0.062\,3 + j\,0.180\,1$	6.59	0.911	0.224
630	15.6	550	39.8	85	195.3	0.028 3	0.379	$0.054\,7 + j\,0.174\,5$	7.01	0.870	0.213
800	17.35	580	42.0	88	199.1	0.022 1	0.359	$0.048\,7 + j\,0.169\,0$	7.39	0.836	0.203
1 000	19.40	640	44.3	93	205.4	0.017 6	0.326	$0.046\,1 + j\,0.183\,6$	7.10	0.769	0.186
1 200	21.7	670	46.4	98	211.7	0.015 1	0.311	$0.044\,3 + j\,0.158\,8$	7.02	0.738	0.179
^a $q_s = 2\pi r_{\text{Sm}} d_s$, 其中 d_s 为铅套厚度。 ^b $d = (D_a + 70\text{ mm})\sqrt[3]{2}$, 平行敷设。 ^c $\underline{Z}_{(0)\text{SE}}'$ 参见式(16)。 ^d 单芯电缆护套的减缩系数, 见式(17)。											

中压电缆

按式(15)~式(17)计算德国标准(N)铜或铝芯交联聚乙烯绝缘(2X)铜带铜丝螺旋铠装(S)聚乙烯护套(2Y)单芯电缆的阻抗参数。表 9、表 10 分别给出了电流经铜铠及大地返回情况下 6/10 kV、12/20kV 电缆的正序阻抗及零序阻抗。减缩系数 $r_3 = |\underline{I}_E/3\,\underline{I}_0|$, 考虑 3 根单芯电缆屏蔽层。

表 9 10 kV 电缆 N2XS2Y
a) 品字型敷设(表 7 中的例 3a)

$q_n^{a,d}$	$D_a^{b,d}$	r_L	r_{Sm}^d	$R_L'^d$	$R_S'^c$	$\underline{Z}_{(1)\text{S}}' = R_{(1)\text{S}}' + jX_{(1)\text{S}}'$	$\frac{R_{(0)\text{SE}}'}{R_{(1)\text{S}}'}$	$\frac{X_{(0)\text{SE}}'}{X_{(1)\text{S}}'}$	r_3
mm^2	mm	mm	mm	Ω/km	Ω/km	Ω/km	—	—	—
95/16	29	6.3	23.9	0.193	1.12	$0.193 + j\,0.115$	5.29	4.80	0.48
120/16	30	7.1	24.9	0.153	1.12	$0.153 + j\,0.109$	6.39	5.00	0.48
150/25	32	7.95	26.9	0.124	0.714	$0.124 + j\,0.106$	5.96	2.93	0.34
185/25	33	8.82	27.9	0.099 1	0.714	$0.099\,1 + j\,0.102$	7.20	3.03	0.34
240/25	36	10.05	30.9	0.075 4	0.714	$0.076\,5 + j\,0.099$	9.13	3.11	0.34
300/25	39	11.24	33.9	0.060 1	0.714	$0.060\,3 + j\,0.097$	11.17	3.17	0.34
^a rST, 见表 6。 ^b $d = 1.05 \times D_a$ 。 ^c $\kappa = 56\text{ Sm/mm}^2$ 。 ^d $q_n, R_L', D_a, r_{\text{Sm}}$ [3, 4]。									

b) 平行敷设(表 7 中的例 3b)

$q_n^{a,d}$	$D_a^{b,d}$	r_L	r_{Sm}^d	$R_L'^d$	$R_S'^c$	$\underline{Z}_{(1)S}' = R_{(1)S}' + jX_{(1)S}'$	$\frac{R_{(0)SE}'}{R_{(1)S}'}$	$\frac{X_{(0)SE}'}{X_{(1)S}'}$	r_3
mm ²	mm	mm	mm	Ω/km	Ω/km	Ω/km	—	—	—
95/16	29	6.3	23.9	0.193	1.12	$0.203 + j0.202$	4.84	2.80	0.51
120/16	30	7.1	24.9	0.153	1.12	$0.162 + j0.196$	5.79	2.87	0.51
150/25	32	7.95	26.9	0.124	0.714	$0.137 + j0.189$	5.28	1.72	0.36
185/25	33	8.82	27.9	0.099 1	0.714	$0.112 + j0.183$	6.25	1.75	0.36
240/25	36	10.05	30.9	0.075 4	0.714	$0.087\ 1 + j0.177$	7.76	1.81	0.36
300/25	39	11.24	33.9	0.060 1	0.714	$0.070\ 9 + j0.172$	9.31	1.86	0.37
^a rST,见表 6。 ^b $d = (D_a + 70\ \text{mm}) \times \sqrt[3]{2}$。 ^c $\kappa = 56\ \text{Sm/mm}^2$。 ^d $q_n, R_L', D_a, r_{Sm} [3, 4]$。									

表 10 20 kV 电缆 N2XS2Y
a) 品字型敷设(表 7 中的例 3a)

$q_n^{a,d}$	$D_a^{b,d}$	r_L	r_{Sm}^d	$R_L'^d$	$R_S'^c$	$\underline{Z}_{(1)S}' = R_{(1)S}' + jX_{(1)S}'$	$\frac{R_{(0)SE}'}{R_{(1)S}'}$	$\frac{X_{(0)SE}'}{X_{(1)S}'}$	r_3
mm ²	mm	mm	mm	Ω/km	Ω/km	Ω/km	—	—	—
95/16	33	6.3	28	0.196	1.12	$0.196 + j0.123$	5.19	4.58	0.48
120/16	34	7.1	29	0.156	1.12	$0.156 + j0.117$	6.25	4.76	0.49
150/25	36	7.95	31	0.129	0.714	$0.129 + j0.114$	5.76	2.84	0.34
185/25	38	8.82	33	0.104	0.714	$0.104 + j0.111$	6.89	2.90	0.34
240/25	40	10.05	35	0.081	0.714	$0.081\ 2 + j0.106$	8.55	3.00	0.34
300/25	43	11.24	38	0.066 2	0.714	$0.066\ 4 + j0.103$	10.22	3.07	0.34
^a rST,见表 6。 ^b $d = 1.05 \times D_a$。 ^c $\kappa = 56\ \text{Sm/mm}^2$。 ^d $q_n, R_L', D_a, r_{Sm} [3, 4]$。									

b) 平行敷设(表 7 中的例 3b)

$q_n^{a,d}$	$D_a^{b,d}$	r_L	r_{Sm}^d	$R_L'^d$	$R_S'^c$	$\underline{Z}_{(1)S}' = R_{(1)S}' + jX_{(1)S}'$	$\frac{R_{(0)SE}'}{R_{(1)S}'}$	$\frac{X_{(0)SE}'}{X_{(1)S}'}$	r_3
mm ²	mm	mm	mm	Ω/km	Ω/km	Ω/km	—	—	—
95/16	33	6.3	28	0.196	1.12	$0.204 + j0.206$	4.79	2.81	0.51
120/16	34	7.1	29	0.156	1.12	$0.164 + j0.199$	5.73	2.88	0.52
150/25	36	7.95	31	0.129	0.714	$0.141 + j0.193$	5.18	1.74	0.36

表 10 (续)

$q_n^{a,d}$	$D_a^{b,d}$	r_L	r_{Sm}^d	$R_L'^d$	$R_S'^c$	$\underline{Z}_{(1)S}' = R_{(1)S}' + jX_{(1)S}'$	$\frac{R_{(0)SE}'}{R_{(1)S}'}$	$\frac{X_{(0)SE}'}{X_{(1)S}'}$	r_s
mm ²	mm	mm	mm	Ω/km	Ω/km	Ω/km	—	—	—
185/25	38	8.82	33	0.104	0.714	0.115 + j0.188	8.11	1.77	0.37
240/25	40	10.05	35	0.081	0.714	0.091 + j0.181	7.43	1.82	0.37
300/25	43	11.24	38	0.0662	0.714	0.075 7 + j0.174	8.75	1.87	0.37
^a rST, 见表 6。 ^b $d = (D_a + 70 \text{ mm}) \times \sqrt[3]{2}$。 ^c $\kappa = 56 \text{ Sm/mm}^2$。 ^d $q_n, R_L', D_a, r_{Sm} [3, 4]$。									

低压电缆

表 11 以四根低压(0.6/1 kV)单芯电缆 NYY 4×1× q_n 为例,求取表 7 中例 2a 的阻抗。其中,若电流经第四芯 N 返回,阻抗值为 $\frac{R_{(0)N}'}{R_{(1)N}'}$ 与 $\frac{X_{(0)N}'}{X_{(1)N}'}$;若电流经第四芯 N 与大地返回,阻抗值为 $\frac{R_{(0)NE}'}{R_{(1)N}'}$ 与 $\frac{X_{(0)NE}'}{X_{(1)N}'}$ 。

表 11 四根单芯电缆 NYY4×1× q_n 的正序与零序阻抗

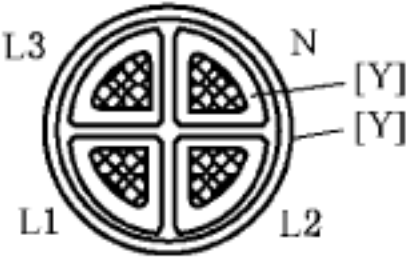
横截面 q_n^a	r_L	R_L'	D_a^b	 式 (12) $\underline{Z}_{(1)N}' = R_{(1)N}' + jX_{(1)N}'$	$\frac{R_{(0)N}'}{R_{(1)N}'}$	$\frac{X_{(0)N}'}{X_{(1)N}'}$	$\frac{R_{(0)NE}'}{R_{(1)N}'}$	$\frac{X_{(0)NE}'}{X_{(1)N}'}$	r^e
mm ²	mm	Ω/km	mm	Ω/km	—	—	—	—	—
4×1×10 r	1.78	1.83	12	1.830 + j0.143	4	4	1.41	13.02	0.89
4×1×16 r	2.26	1.15	13	1.150 + j0.133	4	4	1.77	11.59	0.79
4×1×25 rST	3.24	0.727	15	0.727 + j0.119	4	4	2.22	9.62	0.66
4×1×35 rST	3.82	0.524	16	0.524 + j0.113	4	4	2.55	7.88	0.55
4×1×50 rST	4.54	0.382	18	0.387 + j0.110	4	4	2.78	6.42	0.45
4×1×70 rST	5.40	0.268	19	0.268 + j0.102	4	4	3.01	5.27	0.34
4×1×95rST	6.30	0.193	21	0.193 + j0.099	4	4	3.13	4.56	0.27
4×1×120rST	7.10	0.153	23	0.153 + j0.097	4	4	3.19	4.23	0.23
4×1×150rST	7.95	0.124	26	0.124 + j0.097	4	4	3.22	4.01	0.21
4×1×185rST	8.80	0.099 1	28	0.099 + j0.096	4	4	3.25	3.87	0.18
4×1×240rST	10.05	0.075 4	31	0.075 + j0.094	4	4	3.28	3.77	0.16
4×1×300 rST	11.25	0.060 1	33	0.060 + j0.091	4	4	3.32	3.72	0.15
^a 见表 6。 ^b $D_a = D_{amax}$, 单芯电缆外径 $d = d_{LN} = \sqrt[6]{2D_a}$ ^c $Z_{(0)N}'$ 依式 (13)。 ^d $Z_{(0)NE}'$ 根据等式 (14)。 ^e 见式(21)。									

表 11 中给出的数值 $\frac{R'_{(0)NE}}{R'_{(1)N}}, \frac{X'_{(0)NE}}{X'_{(1)N}}$ 适用于电缆埋设深度 $\delta=931$ m, 长度至少为 1 000 m 的电缆。对于短电缆 ($l < 1\,000$ m $\approx \delta$), $\frac{R'_{(0)NE}}{R'_{(1)N}}, \frac{X'_{(0)NE}}{X'_{(1)N}}$ 的值将小于表 11 中所给数值, 在这种情况下, δ 用表达式 $d_E = (2/e)l_e e^{-l_e/(\omega\delta)}$ 替代。其中, l_e 为电缆长度 ($l_e < \delta$), $e=2.718$, $\omega\mu_0/8$ 用 $0.75(\omega\mu_0/8)d_E/\delta$ 替代[2,5]。

德国标准低压电缆[3]:

类型 A:

铜或铝 (A) 芯四芯导体 PVC (Y) 绝缘 PVC (Y) 护套电缆 [N (A) YY] 如右图所示, 其正



序阻抗用式(18)计算。

$$\underline{Z}'_{(1)N} = R'_L + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r_L} \right) \quad d = \sqrt[3]{d_{L1L2} d_{L1L3} d_{L2L3}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

电缆 N(A)YY 的四根导体截面相同情况下, 其零序阻抗计算适用式(19)~式(21)。

电流经第四芯 N 返回时, 用式(19)计算其零序阻抗。

$$\underline{Z}'_{(0)N} = 4R'_L + j4\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r_L} \right) = 4\underline{Z}'_{(1)N} \quad \dots\dots\dots (19)$$

电流经第四芯 N 及大地 E 返回时, 用式(20)计算其零序阻抗。

$$\underline{Z}'_{(0)NE} = R'_L + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + 3\ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_L d^2}} \right) - 3 \frac{\left(\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d} \right)^2}{R'_L + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\delta}{r_L} \right)} \quad \dots (20)$$

减缩系数(大地电流: $\underline{I}_E = \underline{r} 3 \underline{I}_{(0)}$), 见 GB/T 15544.4) 用式(21)计算。

$$\underline{r} = 1 - \frac{\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d}}{R'_L + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\delta}{r_L} \right)} \quad \dots\dots\dots (21)$$

表 12 给出了按式(18)~式(21)计算四芯低压电缆 NY Y 的参数。

表 12 低压电缆 NY Y
a) 四芯铜电缆

q_n^a	r_L	$R'_L{}^b$	$d_{1s}{}^c$	d^d	$D_a{}^e$	$\underline{Z}'_{(1)N}$	$\frac{R'_{(0)N}}{R'_{(1)N}}$	$\frac{X'_{(0)N}}{X'_{(1)N}}$	$\frac{R'_{(0)NE}}{R'_{(1)N}}$	$\frac{X'_{(0)NE}}{X'_{(1)N}}$	r
mm ²	mm	Ω/km	mm	mm	mm	Ω/km	—	—	—	—	—
4×10 r	1.78	1.83	1.0	6.3	20	1.830+j0.095 1	4	4	1.46	20.07	0.89
4×16 r	2.26	1.15	1.0	7.3	22	1.150+j0.089 4	4	4	1.85	17.30	0.79
4×25 rST	3.24	0.727	1.2	10.2	28	0.727+j0.087 8	4	4	2.33	12.75	0.66
4×35 sST	3.82	0.524	1.2	11.5	26	0.524+j0.085 0	4	4	2.66	9.94	0.54
4×50 sST	4.54	0.387	1.4	13.6	30	0.387+j0.084 6	4	4	2.91	7.66	0.44
4×70 sST	5.40	0.268	1.4	15.6	33	0.268+j0.082 4	4	4	3.12	5.89	0.36

表 12 (续)

q_n^a	r_L	$R_L'^b$	d_{1S}^c	d^d	D_a^e	$\underline{Z}_{(1)N}'$	$\frac{R'_{(0)N}}{R'_{(1)N}}$	$\frac{X'_{(0)N}}{X'_{(1)N}}$	$\frac{R'_{(0)NE}}{R'_{(1)N}}$	$\frac{X'_{(0)NE}}{X'_{(1)N}}$	r
mm ²	mm	Ω/km	mm	mm	mm	Ω/km	—	—	—	—	—
4×95 sST	6.30	0.193	1.6	18.1	38	$0.193+j0.082\ 0$	4	4	3.24	4.89	0.26
4×120 sST	7.10	0.153	1.6	19.9	42	$0.153+j0.080\ 5$	4	4	3.29	4.48	0.22
4×150 sST	7.95	0.124	1.8	22.3	46	$0.124+j0.080\ 5$	4	4	3.32	4.20	0.19
4×185sST	8.80	0.099 1	2.0	24.6	53	$0.0991+j0.0803$	4	4	3.35	4.01	0.17
4×240sST	10.05	0.075 4	2.2	27.9	59	$0.0754+j0.0799$	4	4	3.37	3.86	0.15
4×300 sST	11.25	0.060 1	2.4	31.2	65	$0.0601+j0.0798$	4	4	3.38	3.79	0.14
^a 见表 6。 ^b 20 °C 电阻值。 ^c 绝缘厚度。 ^d $d = \sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L1L3}d_{L2L3}}$ 。 ^e 四芯电缆外径。											

b) 四芯铝电缆

q_n	r_L	$R_L'^a$	d^b	D_a^c	$\underline{Z}_{(1)N}'$	$\frac{R'_{(0)N}}{R'_{(1)N}}$	$\frac{X'_{(0)N}}{X'_{(1)N}}$	$\frac{R'_{(0)NE}}{R'_{(1)N}}$	$\frac{X'_{(0)NE}}{X'_{(1)N}}$	r
mm ²	mm	Ω/km	mm	mm	Ω/km	—	—	—	—	—
4×35 r	3.34	0.868	10.2	28	$0.868+j0.085\ 9$	4	4	2.13	14.87	0.72
4×50 r	4.00	0.641	12.0	30	$0.641+j0.084\ 7$	4	4	2.45	11.85	0.62
4×70 r	4.72	0.443	13.6	34	$0.443+j0.082\ 2$	4	4	2.81	8.80	0.49
4×95 r	5.50	0.320	15.8	38	$0.320+j0.082\ 0$	4	4	3.03	6.72	0.39
4×120 r	6.18	0.253	17.3	42	$0.253+j0.080\ 4$	4	4	3.15	5.75	0.32
4×150 r	6.91	0.208	19.3	46	$0.206+j0.080\ 2$	4	4	3.22	5.10	0.28
4×185 r	7.67	0.164	21.5	50	$0.164+j0.080\ 5$	4	4	3.27	4.59	0.23
^a 20 °C 电阻值。 ^b $d = \sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L1L3}d_{L2L3}}$ 。 ^c 四芯电缆外径。										

电缆 N(A)YY 的第四芯 N 截面小于其他导体情况下(三芯半电缆),其零序阻抗计算适用式(23)~式(25)。其正序阻抗用式(22)计算,同式(18)。

$$\underline{Z}_{(1)N}' = R_L' + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r_L} \right) \quad \dots\dots\dots (22)$$

电流经第四芯 N 返回时,其零序阻抗用式(23)计算。

$$\underline{Z}_{(0)N}' = R_L' + 3R_N' + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(1 + 4 \ln \frac{\sqrt{d_{LN}^3}}{\sqrt[4]{r_L r_N^3 \sqrt{d}}} \right) \quad \dots\dots\dots (23)$$

其中, $d_{LN} = \sqrt[3]{d_{L1N}d_{L2N}d_{L3N}}$

电流经第四芯 N 及大地返回时,其零序阻抗用式(24)计算。

$$\underline{Z}'_{(0)NE} = R'_L + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + 3\ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_L d^2}} \right) - 3 \frac{\left(\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{LN}} \right)^2}{R'_N + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\delta}{r_N} \right)} \dots\dots\dots (24)$$

减缩系数用式(25)计算。

$$\underline{r} = 1 - \frac{\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{LN}}}{R'_N + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\delta}{r_N} \right)} \dots\dots\dots (25)$$

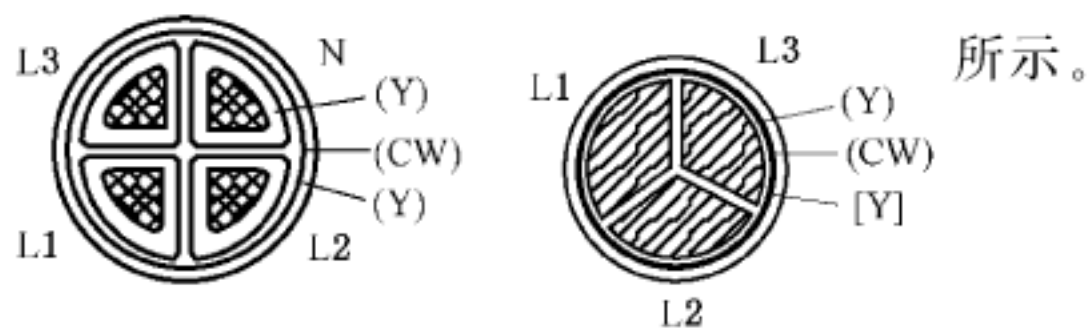
表 13 给出了按式(22)~式(25)计算三芯半低压电缆 NY 的参数。

表 13 三芯半低压铜芯电缆 NY

q_n	r_L	R'_L	r_N	R'_N	d	$\underline{Z}'_{(1)N}$	$\frac{R'_{(0)N}}{R'_{(1)N}}$	$\frac{X'_{(0)N}}{X'_{(1)N}}$	$\frac{R'_{(0)NE}}{R'_{(1)N}}$	$\frac{X'_{(0)NE}}{X'_{(1)N}}$	r
mm ²	mm	Ω/km	mm	Ω/km	mm	Ω/km	—	—	—	—	—
3×25/16	3.24	0.727	2.26	1.15	9.93	0.727+j0.086	5.75	4.79	2.29	17.67	0.79
3×35/16	3.82	0.524	2.26	1.15	11.0	0.524+j0.082	7.58	5.21	2.76	18.42	0.79
3×50/25	4.54	0.387	3.24	0.727	13.2	0.387+j0.083	6.64	4.77	3.39	13.47	0.66
3×70/35	5.40	0.268	3.34	0.524	15.0	0.268+j0.080	6.87	5.14	4.07	10.72	0.54
3×95/50	6.30	0.193	4.00	0.387	17.4	0.193+j0.080	7.02	5.08	4.61	8.44	0.44
3×120/70	7.10	0.153	5.40	0.268	19.3	0.153+j0.079	6.26	4.66	4.58	6.42	0.34
3×150/70	7.95	0.124	5.40	0.268	21.2	0.124+j0.078	7.48	4.94	5.35	6.61	0.34
3×185/95	8.80	0.099 1	6.30	0.193	23.7	0.099+j0.078	6.84	4.81	5.15	5.51	0.27
3×240/120	10.05	0.075 4	7.10	0.153	26.7	0.075+j0.077	7.09	4.85	5.42	5.12	0.23
3×300/150	11.25	0.060 1	7.90	0.124	29.8	0.060+j0.077	7.19	4.87	5.55	2.86	0.21

类型 B:

铜或铝(A)三芯或四芯 PVC 绝缘(Y)铜包带铠装(CW)PVC 护套(Y)电缆[N(A)YC(W)Y],如图例



四芯电缆 NYC(W)Y 的正序阻抗用式(26)计算,同式(18)。零序阻抗的计算适用式(27)~式(29)。

$$\underline{Z}'_{(1)NS} = R'_L + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r_L} \right) \dots\dots\dots (26)$$

电流经第四芯 N 与铜铠导体 S 返回时其零序阻抗用式(27)计算。

$$\underline{Z}'_{(0)NS} = R'_L + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + 3\ln \frac{d_{LN}}{\sqrt[3]{r_L d^2}} \right) + 3 \left[R'_N + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d_{LN}}{r_N} \right) \right] \frac{R'_S + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{Sm}}{d_{LN}}}{R'_N + R'_S + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{r_{Sm}}{r_N} \right)} \dots\dots\dots (27)$$

式(27)中,中值半径 $r_{\text{Sm}}=0.5(r_{\text{Sa}}+r_{\text{Si}})$ 。

流经第四芯与铜凯的电流分别:

$$\underline{I}_{\text{N}}=3\underline{I}_{(0)}\frac{R'_{\text{S}}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{r_{\text{Sm}}}{d_{\text{LN}}}}{R'_{\text{N}}+R'_{\text{S}}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4}+\ln\frac{r_{\text{Sm}}}{r_{\text{N}}}\right)};\underline{I}_{\text{S}}=3\underline{I}_{(0)}\frac{R'_{\text{N}}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{1}{4}+\ln\frac{d_{\text{LN}}}{r_{\text{N}}}\right)}{R'_{\text{N}}+R'_{\text{S}}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4}+\ln\frac{r_{\text{Sm}}}{r_{\text{N}}}\right)}$$

电流经第四芯 N、铜铠导体 S 及大地返回时其零序阻抗用式(28)计算。

$$\underline{Z}'_{(0)\text{NSE}}=R'_{\text{L}}+3\omega\frac{\mu_0}{8}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4}+3\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{\text{L}}d^2}}\right)-\frac{1}{3}\cdot\frac{\underline{Z}'_{\text{N}}\underline{Z}'_{\text{LS}}+\underline{Z}'_{\text{S}}\underline{Z}'_{\text{LN}}-2\underline{Z}'_{\text{LN}}\underline{Z}'_{\text{LS}}\underline{Z}'_{\text{NS}}}{\underline{Z}'_{\text{N}}\underline{Z}'_{\text{S}}-\underline{Z}'_{\text{NS}}^2}\dots\dots\dots(28)$$

其中,

$$\underline{Z}'_{\text{N}}=R'_{\text{N}}+\omega\frac{\mu_0}{8}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4}+\ln\frac{\delta}{r_{\text{N}}}\right);\underline{Z}'_{\text{S}}=R'_{\text{S}}+\omega\frac{\mu_0}{8}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_{\text{Sm}}};$$

$$\underline{Z}'_{\text{L123N}}=\underline{Z}'_{\text{LN}}=3\omega\frac{\mu_0}{8}+j3\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{d_{\text{LN}}};\underline{Z}'_{\text{L123S}}=\underline{Z}'_{\text{LS}}=3\omega\frac{\mu_0}{8}+j3\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_{\text{Sm}}};$$

$$\underline{Z}'_{\text{NS}}=\omega\frac{\mu_0}{8}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_{\text{Sm}}};$$

减缩系数按式(29)计算:

$$\underline{r}=1-\frac{1}{3}\cdot\frac{\underline{Z}'_{\text{N}}\underline{Z}'_{\text{LS}}+\underline{Z}'_{\text{S}}\underline{Z}'_{\text{LN}}-\underline{Z}'_{\text{NS}}(\underline{Z}'_{\text{LN}}+\underline{Z}'_{\text{LS}})}{\underline{Z}'_{\text{N}}\underline{Z}'_{\text{S}}-\underline{Z}'_{\text{NS}}^2}\dots\dots\dots(29)$$

表 14 给出了按式(26)~式(29)计算四芯低压电缆 NYCWY 的参数, $r_{\text{L}}, R'_{\text{L}}, r_{\text{N}}=r_{\text{L}}, R'_{\text{N}}=R'_{\text{L}}$ 及 $d=d_{\text{LN}}$ 与表 12 一致。

表 14 四芯低压电缆 NYCWY 参数

q_{n}^{a}	D_{a}	r_{Sm}^{b}	R'_{S}^{c}	$\underline{Z}'_{(1)\text{NS}}$ [见表 12a)]	$\frac{R'_{(0)\text{NS}}}{R'_{(1)\text{NS}}}$	$\frac{X'_{(0)\text{NS}}}{X'_{(1)\text{NS}}}$	$\frac{R'_{(0)\text{NSE}}}{R'_{(1)\text{NS}}}$	$\frac{X'_{(0)\text{NSE}}}{X'_{(1)\text{NS}}}$	r
mm^2	mm	mm	Ω/km	Ω/km	—	—	—	—	—
4×25/16 rST	30	13.2	1.12	$0.727+j0.087\ 8$	2.82	2.19	2.23	7.90	0.50
4×35/16 sST	29	12.7	1.12	$0.524+j0.085\ 0$	3.05	2.41	2.48	6.51	0.42
4×50/25 sST	34	15.0	0.714	$0.387+j0.084\ 6$	2.96	2.28	2.57	4.60	0.32
4×70/35 sST	38	16.9	0.510	$0.268+j0.0824$	3.01	2.30	2.69	3.54	0.24
4×95/50 sST	43	19.2	0.357	$0.193+j0.0820$	3.02	2.25	2.76	2.92	0.18
4×120/70 sST	47	21.1	0.255	$0.153+j0.0805$	2.99	2.15	2.77	2.56	0.15
4×150/70 sST	51	22.9	0.255	$0.124+j0.080\ 2$	3.19	2.31	2.94	2.61	0.14
4×185/95 sST	57	25.7	0.188	$0.099\ 1+j0.080\ 3$	3.22	2.21	2.99	2.40	0.11
4×240/120 sST	64	29.0	0.149	$0.075\ 4+j0.079\ 9$	3.42	2.19	3.18	2.30	0.10
注: $r_{\text{L}}, R'_{\text{L}}, r_{\text{N}}=r_{\text{L}}, R'_{\text{N}}=R'_{\text{L}}$ 及 d 已在表 12a) 中给出。									
^a 见表 6。									
^b $r_{\text{Sm}}=0.5(r_{\text{Sa}}+r_{\text{Si}})$ 。									
^c $r_{\text{S}}=56\ \text{Sm}/\text{mm}^2$ 。									

三芯电缆 N(A) YCWY 的正序阻抗用式(30)计算,同式(18)。零序阻抗计算适用式(31)~式(33)。

$$\underline{Z}'_{(1)S}=R'_L+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4}+\ln\frac{d}{r_L}\right) \quad [\text{见式(18)}] \quad \dots\dots\dots(30)$$

电流经金属护套 S 返回时,其零序阻抗计算应用式(31)。

$$\underline{Z}'_{(0)S}=R'_L+3R'_S+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4}+3\ln\frac{r_{Sm}}{\sqrt[3]{r_Ld^2}}\right) \quad \dots\dots\dots(31)$$

其中,金属护套 S 中值半径 $r_{Sm}=0.5(r_{Sa}+r_{Si})$ 。

电流回路通过金属护套 S 与大地返回时,其零序阻抗计算应用式(32)。

$$\underline{Z}'_{(0)SE}=R'_L+3\omega\frac{\mu_0}{8}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4}+3\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_Ld^2}}\right)-3\frac{\left(\omega\frac{\mu_0}{8}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_{Sm}}\right)^2}{R'_S+\omega\frac{\mu_0}{8}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_{Sm}}} \quad \dots\dots(32)$$

减缩系数按式(33)计算:

$$\underline{r}=\frac{R'_S}{R'_S+\omega\frac{\mu_0}{8}+j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_{Sm}}} \quad \dots\dots\dots(33)$$

表 15 给出了按式(30)~式(33)计算三芯低压电缆 NYCWY 的参数。

表 15 低压电缆 NYCWY
a) 铜芯三芯电缆

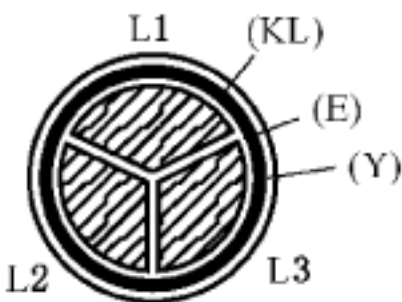
q_n	r_L^a	$R'_L{}^b$	$r_{Sm}{}^c$	$R'_S{}^d$	d^e	$\underline{Z}'_{(1)S}$ 式(30)	$\frac{R'_{(0)S}}{R'_{(1)S}}$	$\frac{X'_{(0)S}}{X'_{(1)S}}$	$\frac{R'_{(0)SE}}{R'_{(1)S}}$	$\frac{X'_{(0)SE}}{X'_{(1)S}}$	r
mm ²	mm	Ω/km	mm	Ω/km	mm	Ω/km	—	—	—	—	—
3×25 rST/16	3.24	0.727	11.6	1.12	9.11	0.727+j0.080 7	5.62	1.56	2.39	19.26	0.82
3×35 sST/16	3.82	0.524	11.1	1.12	10.3	0.524+j0.078 0	7.41	1.18	2.93	19.50	0.82
3×50 sST/25	4.54	0.387	12.9	0.714	12.2	0.387+j0.077 8	6.53	1.14	3.73	13.96	0.69
3×70 sST/35	5.40	0.268	15.0	0.510	13.8	0.268+j0.074 7	6.71	1.21	4.66	10.34	0.57
3×95 sST/50	6.30	0.193	17.3	0.357	16.1	0.193+j0.074 7	6.55	1.18	5.28	6.71	0.45
3×120 sST/70	7.10	0.153	18.2	0.255	17.7	0.153+j0.073 1	6.00	1.07	5.30	4.34	0.34
3×150 sST/70	7.95	0.124	20.6	0.255	19.9	0.124+j0.073 4	7.17	1.10	6.29	4.37	0.35
3×185 sST/95	8.80	0.099 1	22.9	0.188	22.0	0.099 1+j0.073 3	6.69	1.10	6.18	3.03	0.27
3×240 sST/120	10.05	0.075 4	25.7	0.149	24.8	0.075 4+j0.072 5	6.93	1.09	6.56	2.37	0.22
3×300 sST/150	11.25	0.060 1	28.5	0.119	27.8	0.060 1+j0.072 5	6.94	1.06	6.68	1.91	0.18
^a 见表 12a)。 ^b 见表 12a)。 ^c $r_{Sm}=0.5(r_{Sa}+r_{Si})$。 ^d $r_S=56\text{Sm/mm}^2$。 ^e $d=\sqrt[3]{d_{1.1L2}d_{1.1L3}d_{1.2L3}}$。											

b) 铝芯三芯电缆

q_n	r_L^a	$R_L'^b$	r_{Sm}^c	$R_S'^d$	d^e	$\frac{Z'_{(1)S}}{\text{式(30)}}$	$\frac{R'_{(0)S}}{R'_{(1)S}}$	$\frac{X'_{(0)S}}{X'_{(1)S}}$	$\frac{R'_{(0)SE}}{R'_{(1)S}}$	$\frac{X'_{(0)SE}}{X'_{(1)S}}$	r
mm ²	mm	Ω/km	mm	Ω/km	mm	Ω/km	—	—	—	—	—
3×50s/50	4.00	0.641	12.3	0.357	10.7	$0.641+j0.077\ 5$	2.67	1.34	2.31	6.59	0.44
3×70s/70	4.72	0.443	13.7	0.255	12.1	$0.443+j0.074\ 9$	2.73	1.31	2.50	4.45	0.33
3×95s/95	5.50	0.320	15.8	0.188	14.1	$0.320+j0.074\ 9$	2.76	1.29	2.62	3.12	0.26
3×120s/120	6.18	0.253	17.2	0.149	15.4	$0.253+j0.073\ 1$	2.77	1.29	2.55	2.51	0.21
3×150s/150	6.91	0.206	19.0	0.119	17.3	$0.206+j0.073\ 4$	2.73	1.24	2.66	2.05	0.17
3×185s/185	7.67	0.164	20.0	0.096\ 5	19.2	$0.164+j0.073\ 4$	2.77	1.11	2.71	1.62	0.14
^a 见表 12b)。 ^b 见表 12b)。 ^c $r_{Sm}=0.5(r_{Sa}+r_{Si})$。 ^d $r_s=56Sm/mm^2$。 ^e $d=\sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L1L3}d_{L2L3}}$。											

类型 C:

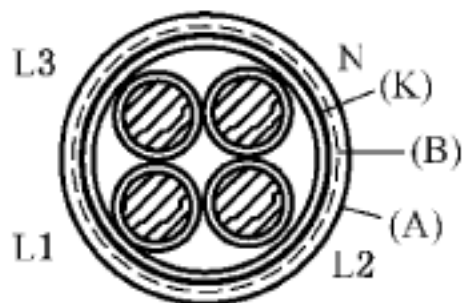
三芯铜或铝(A)浸渍纸绝缘皱纹铝护套(KL)弹性带或塑料薄膜防护(E)PVC外护套(Y)电缆[N(A)KLEY],如图例所示。



式(30)~式(33)适用于计算三芯 C 类电缆正序阻抗、零序阻抗及减缩因子。铝护套适用于作为中性线芯 N 或 PEN[3]。

类型 D:

四芯(或三芯半)铜或铝(A)浸渍纸绝缘铅护套(K)钢带铠装(B)纤维外护套(A)电缆[N(A)KBA],如图例所示。



式(26)~式(29)适用于计算四芯(或三芯半)电缆的正序阻抗、零序阻抗及减缩系数,式(30)~式(33)适用于四芯电缆的计算。

铅护套且具有至少两个重叠钢带铠装的电缆,其减缩因子可通过量测得到,如图 11、图 12 所示[3]。

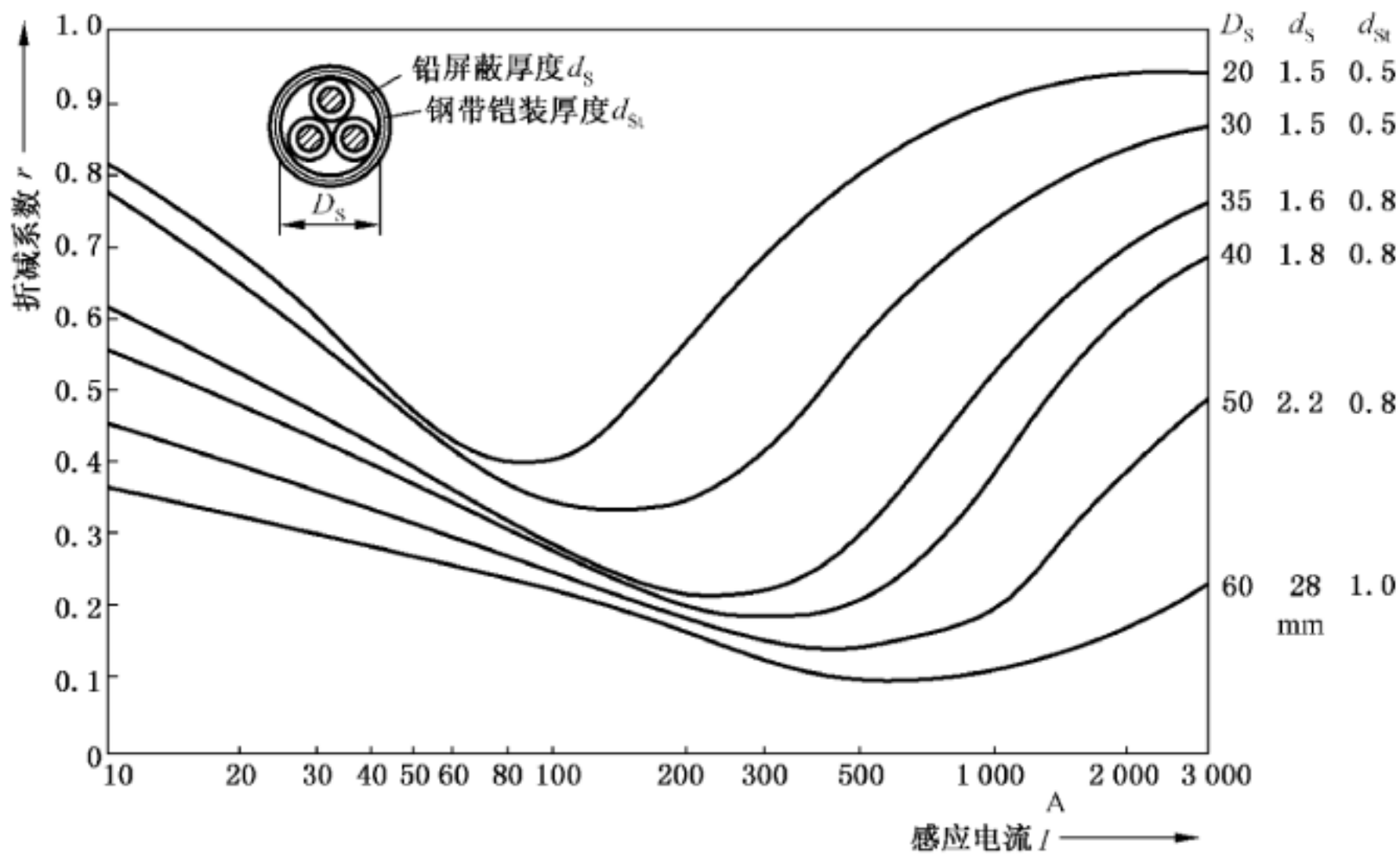


图 11 带一个铅护套和两个重叠钢带铠装的电缆减缩因子与感应电流的关系(50 Hz)

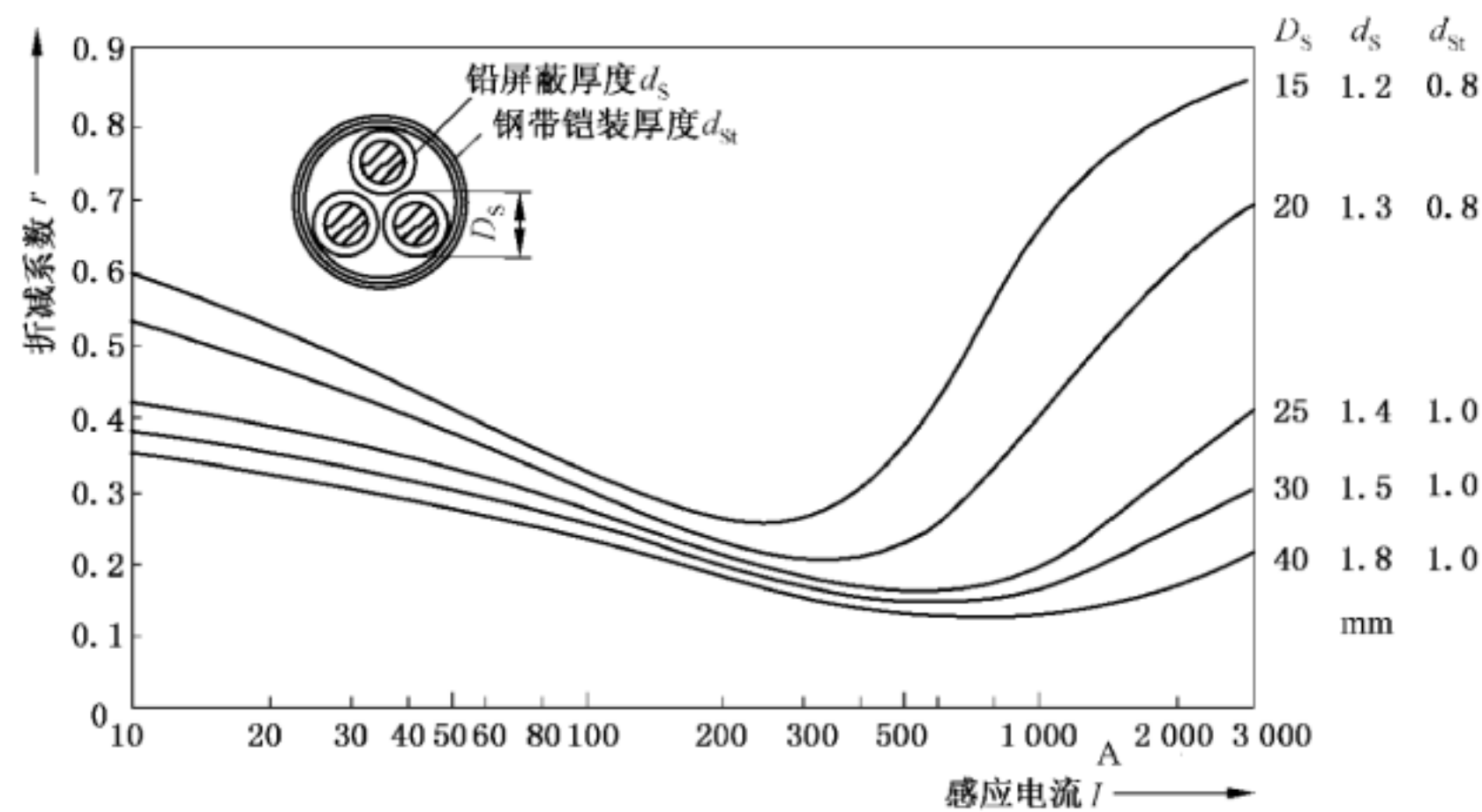


图 12 带三个铅护套和两个重叠钢带铠装的电缆减缩因子与感应电流的关系(50 Hz)

2.6 异步电动机的典型参数

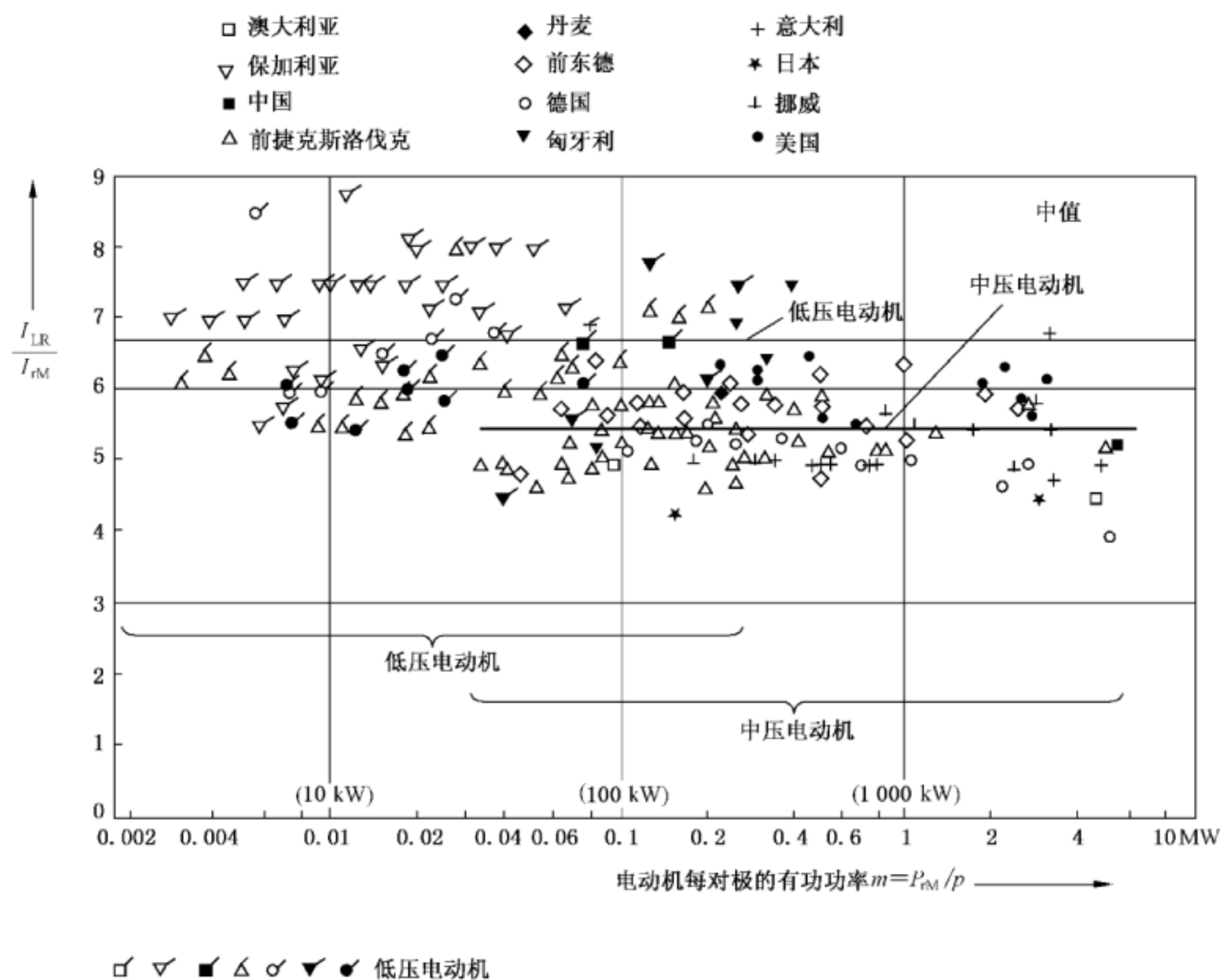
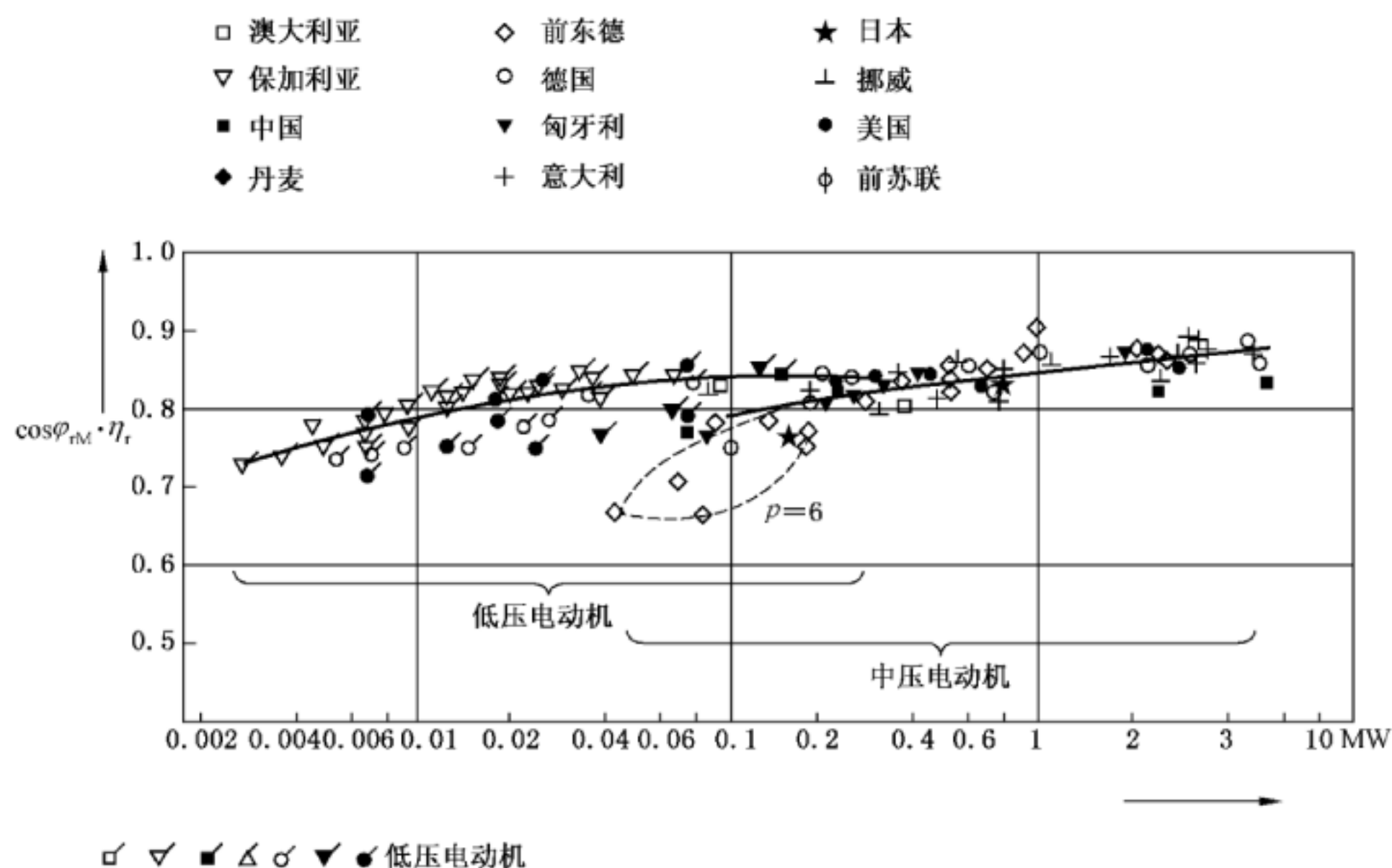
低压电动机与中压电动机的堵转电流与额定电流的比值 I_{LR}/I_{rM} 不同。对于每对极功率为 2 kW~300 kW 的低压电动机,其均值约为 6.7;对于每对极功率为 30 kW~6 MW 的中压电动机,其均值约为 5.5。

表 16 给出了异步电动机的真实数据。

表 16 典型异步电动机的真实数据

序号	额定 功率 P_{rM}	额定 电压 U_{rM}	额定 电流 I_{rM}	功率 因数 $\cos\varphi_{rM}$	效率 (额定) η_{rM}	$\frac{I_{LR}}{I_{rM}}$	转速 n_r	极对数 p	直流时 间常数 T_{DC}	NC
	kW	kV	A	—	—	—	1/min	—	s	
1	45	0.38	80	0.89	0.92	7.14	2 950	1	—	保加利亚
2	200	0.38	370	$\cos\varphi_{rM} \times \eta_{rM} = 0.82$		6.4	—	2	0.013	前捷克斯 洛伐克
3	250	6.0	29	0.89	0.94	5.3	2 973	1	0.05	德国
4	500	6.0	62	0.83	0.942 83	5.8	741	4	0.053	前东德
5	1 000	6.0	121	0.85	0.985	5.0	590	5	0.031	前苏联
6	3 150	6.0	380	$\cos\varphi_{rM} \times \eta_{rM} = 0.80$		5.2	—	6	0.064	前捷克斯 洛伐克
7	6 000	6.0	660	0.90	0.972	5.5	1 490	2	—	意大利
8	315	6.0	36.5	0.88	0.942	6.2	1 794	2	—	挪威, 60 Hz
9	6 000	6.6	595	0.91	0.969	4.5	1 776	2	0.055	日本, 60 Hz
10	9 698	6.6	963	0.917	0.961	6.23	1 190	3	0.096 8	美国, 60 Hz

图 13 中给出了 $I_{\text{LR}}/I_{\text{rM}}$ 数值, 图 14 中给出了功率因数和效率的乘积 ($\cos\varphi_{\text{rM}} \times \eta_{\text{rM}}$) 与每对极有功功率 (P_{rM}/p) 的关系。

图 13 50 Hz 与 60 Hz 低压和中压异步电动机 I_{LR}/I_{rM} 图 14 50 Hz 与 60 Hz 低压和中压异步电动机 $\cos\varphi_{\text{rM}} \times \eta_{\text{rM}}$

2.7 母线

表 17 给出了收集到的低压母线数据。

表 17 收集到的母线数据

序号	额定电压 U_r	额定电流 I_r	导体			护套材料 —	电流回路 ^b	正序阻抗	零序阻抗	NC
			数目	材料	截面积			$\underline{Z}_{(1)} = R'_{(1)} + jX'_{(1)}$	$\overline{Z}_{(0)} = R'_{(0)} + jX'_{(0)}$	
	kV	A	—	—	mm ²			Ω/km	Ω/km	
1	0.38/0.66 (0.40/0.69)	1 250	3	Al	1 120	Al	S+E	0.038 0+j0.016 3	0.088 2+j0.068 9	前苏联
2		1 600	3	Al	1 280	Al	S+E	0.029 7+j0.014 3	0.067 2+j0.055 5	前苏联
3		3 200 ^a	3×2	Al	2 650	Al	S+E	0.010 1+j0.004 95	0.073 5+j0.039 2	前苏联

^a 拆分栏 2×1 600 A。
^b 电流回路通过护套(S)与大地(E)。

每个导体 L1/L2/L3 分别为单、双或三并列架构下的铜或铝质母线,应用几何均距理论[5],其单位长度的正序电抗可由式(34)计算。

$$X'_{(1)} = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[3]{g_{L1L2}^2 g_{L1L3}}}{g_{L1L1}} = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[3]{(ad_{L1L2})^2 (\beta d_{L1L3})}}{g_{L1L1}} \dots\dots\dots (34)$$

图 15 中给出了几何均距 g_{L1L1} 的近似值。

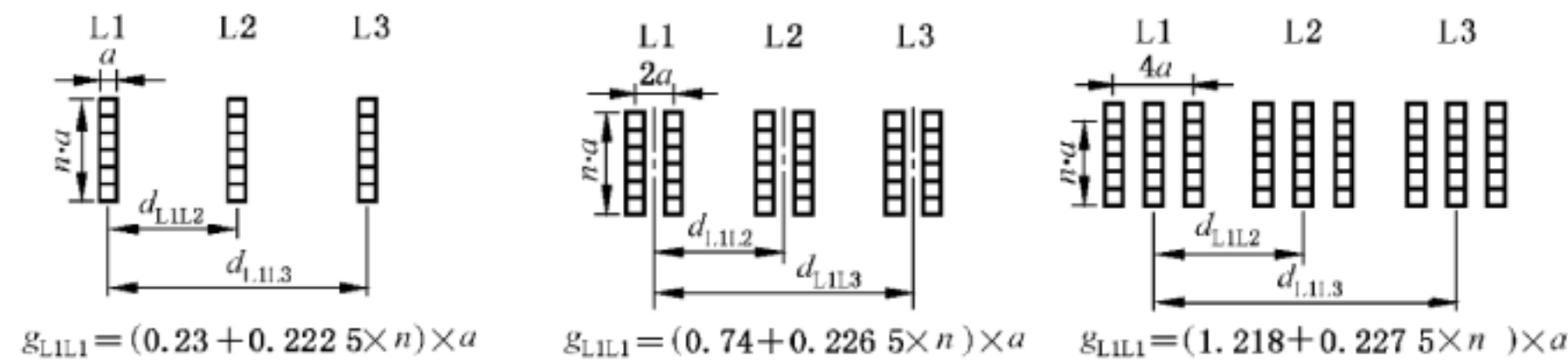
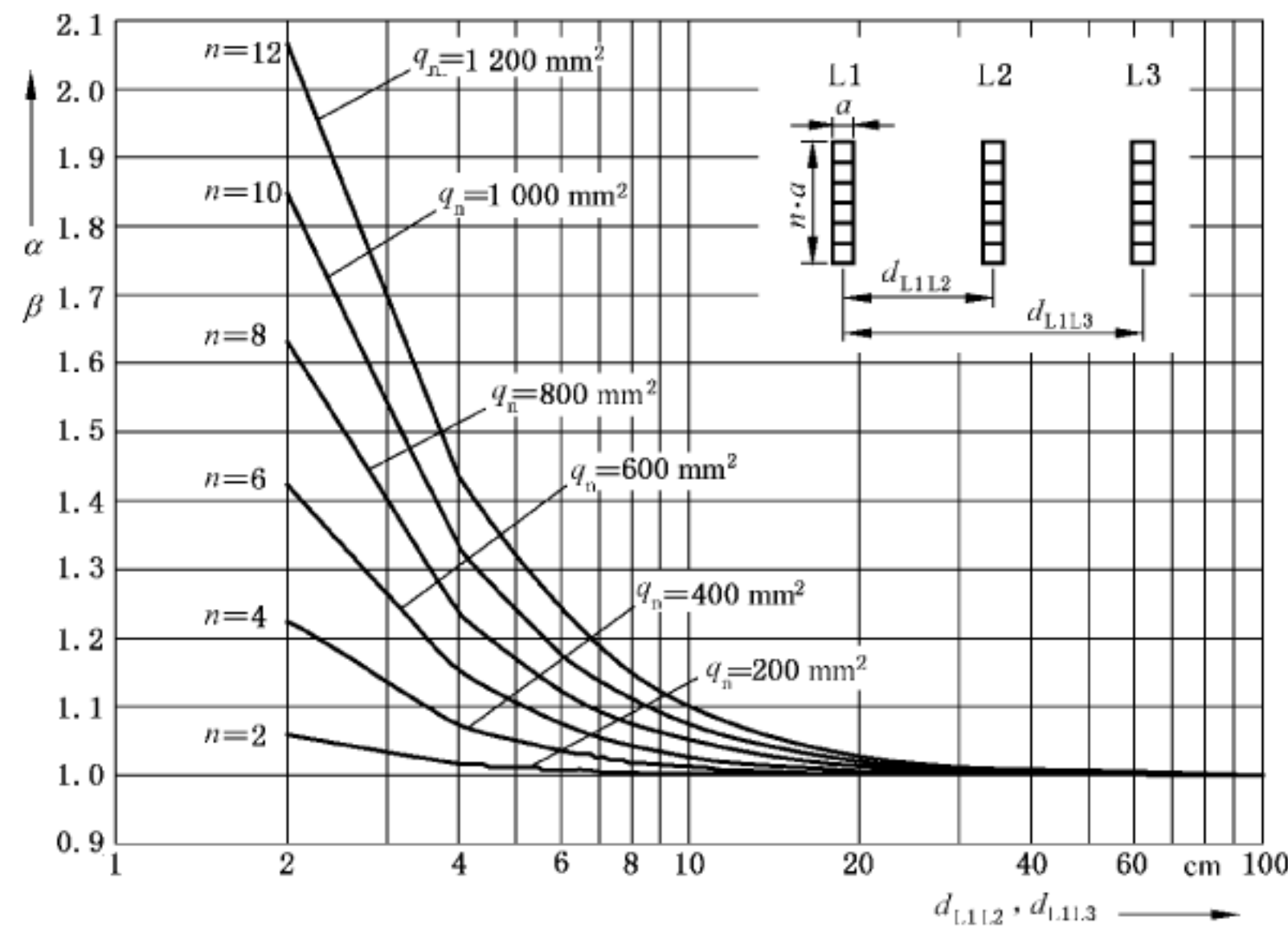


图 15 主导体几何均距 $g_{L1L1} = g_{L2L2} = g_{L3L3}$

图 16a)、图 16b)、图 16c)分别给出了单、双与三并列架构下,母线主导体的系数 $\alpha = g_{L1L2}/d_{L1L2}$ 、 $\beta = g_{L1L3}/d_{L1L3}$ 与距离 d_{L1L2} ($d_{L1L3} = 2 \cdot d_{L1L2}$) 及系数 $n = 2, 4, 6, \dots$ (见图 15) 的关系。



a) 单导体, $\alpha = 10 \text{ mm}$

图 16 式(34)中的系数 α 和 β

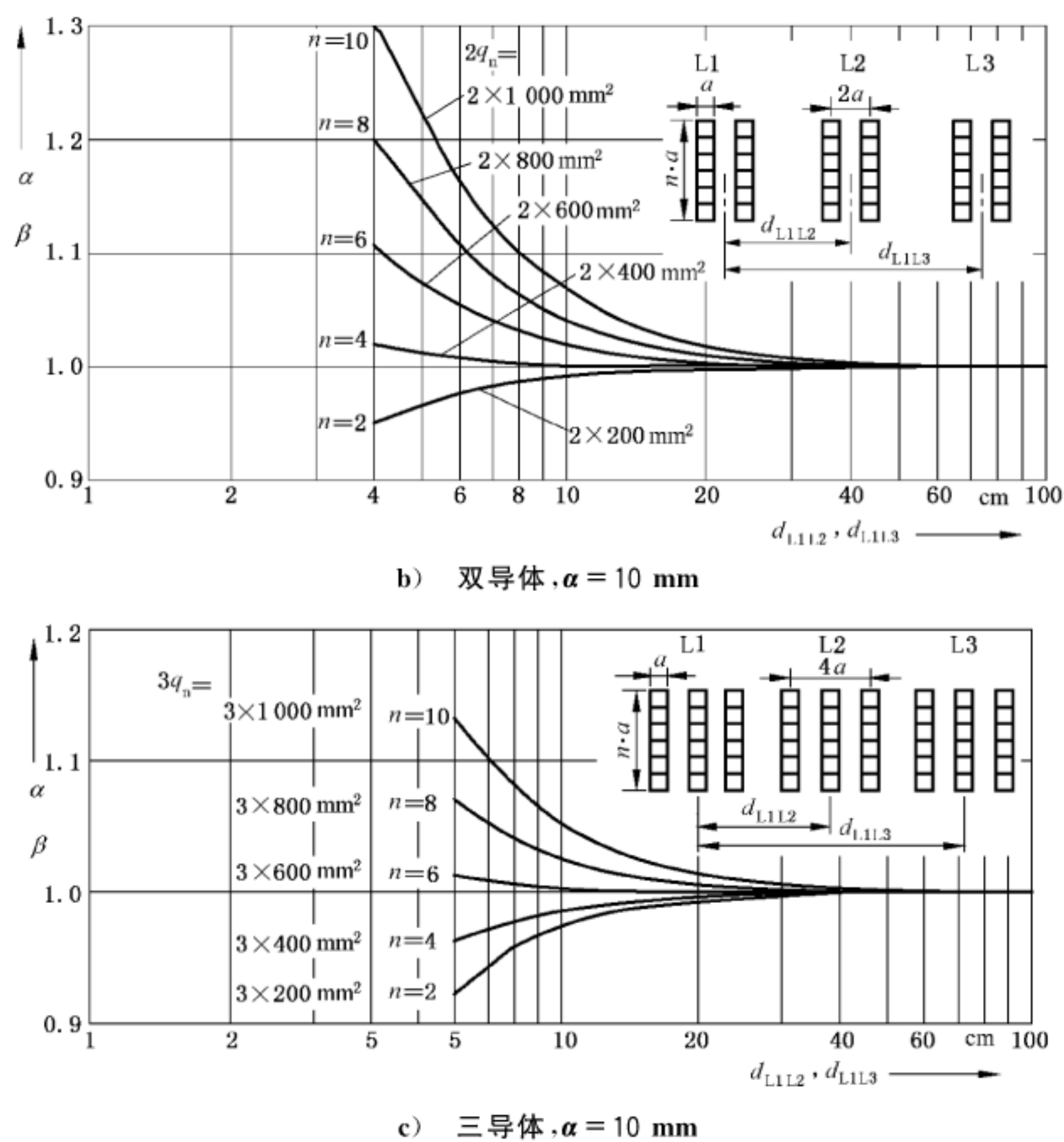


图 16 (续)

按照图 15、图 16 计算方法,表 18 给出了计算 $X'_{(1)}$ 的算例。

表 18 用图 15、图 16 计算 $X'_{(1)}$ 的算例

50 Hz 三相交流铜母线 L1,L2,L3				
$\alpha \times n \times \alpha$ (图 15)	mm	60×10	2×60×10	3×60×10
q_n	mm ²	600	1 200	1 800
g_{L1L1} (图 15)	cm	1.565	2.099	2.583
$g_{L1L2} = \alpha \times d_{L1L2}$ (图 16)	cm	1.071×6=6.426	1.050×6=6.300	1.013×6=6.078
$g_{L1L3} = \beta \times d_{L1L3}$ (图 16)	cm	1.022×12=12.264	1.013×12=12.156	1.002×12=12.024
$X'_{(1)}$ 式(34)	Ω/km	0.102	0.083	0.068

附 录 A
(资料性附录)
国家委员会信息

本部分表 1、表 2、表 3、表 4、表 5、表 6、表 16 和表 17 中的数据取自不同国家。总共 15 个国家委员会为 IEC/TR 60909-2:1992(E1) 提供了数据。表 A.1 列出了当时获取的信息(见 IEC TR 60909-2:1992 的表 1)。

表 A.1 从国家委员会获取的信息

国家委员会	问卷回答数量						
	1	2	3	4	5	6	7
澳大利亚	3	3	3	3	3	3	3
奥地利	10	11	4	1	8	7	—
保加利亚	4	15	6	6	14	11	28
中国	3	3	3	3	3	3	3
前捷克斯洛伐克	8	5	—	3	9	5	68
丹麦	8	18	1	2	8	15	—
前民主德国	23	28	9	6	8	—	20
德国	21	26	2	2	5	13	19
匈牙利	7	16	3	5	9	8	9
意大利	25	16	4	6	26	9	11
日本	12	10	7	7	7	9	3
挪威	9	10	4	3	9	8	10
英国	—	11	1	5	—	—	—
美国	110	10	1	—	—	10	20
前苏联	12	6	3	5	4	—	10
合计	255	188	51	57	113	101	204

参 考 文 献

- [1] Balzer, G., Impedanzmessungen in Niederspannungsnetzen zur Bestimmung der Kurzschlußströme (Measurement of impedances in low-voltage networks for the determination of short-circuit currents) Diss. TH Darmstadt 1977.
- [2] Meyer, E. P., Stromrückleitung über das Erdreich, Impedanzen und induktive Beeinflussung bei Leitern endlicher Länge (Current return through the earth, impedances and inductive interference in the case of conductors with limited length) Diss. TH Darmstadt 1982.
- [3] Heinhold, L., Kabel und Leitungen für Starkstrom, Part 1:1987, Part 2:1989. Siemens Aktiengesellschaft.
- [4] NEXANS, Energy Networks Germany. Insulated Cables for High and Extra High Voltage. Nexans Deutschland Industries AG & Co. KG, 2000.
- [5] Oeding, D., Oswald, B. R., Elektrische Kraftwerke und Netze, 6. Edition; Springer 2004.
- [6] IEC 60038: 2002, IEC standard voltages.
- [7] IEC/TR 60909-1:2002, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems-Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0.
- [8] IEC/TR 60909-4:2000, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems-Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents.
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
三相交流系统短路电流计算
第 3 部分：电气设备数据

GB/T 15544.3—2017/IEC TR 60909-2:2008

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址: www.spc.org.cn

服务热线: 400-168-0010

2017 年 12 月第一版

*

书号: 155066 · 1-59216

版权专有 侵权必究



GB/T 15544.3-2017