

电气运行高级工培训教材

电气设备及其运行

(运行管理)

广西电力工业局高级工培训教材编委会 编

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

内 容 提 要

本书是《电气运行高级工培训教材》之一册，主要内容包括：电力系统基本知识，电力系统通信传输及通讯，电力系统调度自动化，电力系统安全运行，电力系统经济运行，电力系统可靠性管理及发电厂、变电站班组培训工作。

本书为电气运行高级工培训教材，也可供有关技术人员学习、参考。

电气运行高级工培训教材
电气设备及其运行
(运行管理)

广西电力工业局高级工培训教材编委会 编

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号)

各地新华书店经售

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 263 千字
1994 年 12 月第一版 1995 年 5 月北京第二次印刷

印数 6591—16740 册

ISBN 7-120-02110-9/TM·575

定价 13.00 元

前 言

这套电气运行高级工培训教材是我们根据原能源部司局文件教培 [1992] 4 号《关于加强电力系统高级技工培训工作的意见》和中电联部室文件教职 [1992] 19 号《关于电力工人培训教材建设工作的意见》等文件的精神，并根据工人技术等级标准、岗位规范、安全规程、运行规程、检修（安装）规程，组织我局属系统二十多位高、中级讲师和工程师精心编写而成。这是一套融基础理论、专业理论和操作技能为一体，按照工人培训的特点和规律，以提高电气运行高级技工操作技能为中心，做到基础理论为专业理论服务，专业理论为提高技能服务而编写的培训教材。

这套教材共有四册，包括《专业基础理论》、《电气设备及其运行（一次部分）》、《电气设备及其运行（二次部分）》、《电气设备及其运行（运行管理）》。这四册书既是统一的整体，又有相对的独立性，能满足具有不同要求的读者的需要。

本册为电气设备及其运行的运行管理部分。主要内容有：电力系统基本知识、电力系统通信、电力系统调度自动化装置、电力系统安全运行、电力系统经济运行、电力系统可靠性管理、班组技术培训。

参加本册编写的人员有：王亚忠、李子良、林光琨、姚正湘、王淑明、张建忠、潘新峰、袁永勋。

在编写过程中，得到中电联教培部领导，广西电力工业局领导，广西电力工业局科教处、生产处、供用电处、安监处、中调所、中试所等单位领导的大力支持和帮助。在此表示衷心感谢。

由于编者的水平有限，书中错误在所难免，诚望有关专家、老师及广大读者批评指教。

广西电力工业局高级工培训教材编委会

1994 年 7 月于南宁

目 录

序

前 言

第一章 电力系统基本知识	1
第一节 电力系统的潮流分布.....	1
第二节 电力系统频率及电压调节	29
第三节 电力系统的稳定	47
第二章 电力系统通信传输及通讯	69
第一节 电力载波通信	69
第二节 微波通信	73
第三节 卫星通信	83
第四节 光纤通信	85
第三章 电力系统调度自动化	91
第一节 调度自动化系统的构成	91
第二节 远动系统	91
第三节 变送器.....	106
第四节 调度端调度自动化系统.....	111
第四章 电力系统安全运行	115
第一节 《电业安全工作规程》在运行岗位上的应用.....	115
第二节 运行规程.....	121
第三节 电气事故处理的一般知识.....	125
第四节 调度规程.....	130
第五章 电力系统经济运行	134
第一节 努力增加发（供）电量.....	134
第二节 提高电力网运行的经济性.....	136
第三节 系统负荷在各台机组的最佳分配.....	137
第四节 电气设备节能技术.....	139
第五节 火电厂节能的行政管理.....	146
第六章 电力系统可靠性管理	148
第一节 发供电设备可靠性管理.....	148
第二节 供电系统供电可靠性统计办法.....	161
第七章 发电厂、变电站班组培训工作	171
第一节 班组培训任务、要求和方法.....	171
第二节 各级电气运行工的培训.....	176
第三节 班组培训工作的管理.....	178

第一章 电力系统基本知识

第一节 电力系统的潮流分布

运行中的电力系统带上负荷后，就有电流及与电流、电压相对应的功率从电源（发电机）通过电力网中的各元件（变压器、电力线路、电抗器等）流向负荷，因此，我们称电力网中的功率为潮流。在发电、输电、供电、配电、用电的过程中，称电力网中的功率分布为潮流分布。为了进行潮流电压及稳定性等计算，需将电力系统的结线用等值电路表示，这样，便可以将《电工基础》中的各种基本理论和分析方法用于电力系统的各种场合的计算。电力系统等值电路中的各元件是用电阻、电抗、电导、电纳等参数表征的，这些参数称为网络参数。运行中的电力网中各结点的电压，通过各元件的电流、功率等，称为电力系统的运行参数。

一、电力系统的等值电路

电力系统的主要元件是：发电机、变压器、电力线路、电抗器、电容器组等。这些元件是用阻抗、导纳、电压源等电路元件表征的。

（一）电力线路的等值电路和参数计算

根据电力线路的电压等级和长度，一般将 35kV 电压级及以下的电力线路称为配电线路；将 110kV 及以上电压级的电力线路称为输电线路；将 500kV 及以上电压级的电力线路称为超高压输电线路。

1. 电力线路的等值电路

电力线路一般由铝绞线或钢芯铝绞线构成。由于我们研究的系统是三相对称的，因此，只需研究其中一相的参数即可。导线由金属材料构成，因此导线有电阻，导线还有电感及沿线均匀分布的电容，线路还有感抗和容纳。电力线路的电阻、感抗、电导、容纳，都是沿线路均匀分布的。但是，为了计算的方便，一般将 300km 以下的电力线路（ $f=50\text{Hz}$ 的工频）用集中参数等值电路表示。至于线路长度超过 300km 的电力线路，则需按均匀分布线路来计算。

由于三相电路是对称的，因此，三相线路的等值电路只画一相即可。线路的参数实际上是沿线路均匀分布的，其均匀分布参数的等值电路如图 1-1 所示。图中， r_0 、 x_0 、 b_0 、 g_0

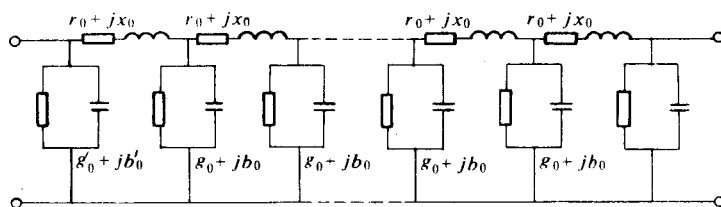


图 1-1 电力线路的均匀参数等值电路

为导线单位长度的电阻、电抗、电纳和电导。其中 r_0 和 x_0 的单位为： Ω/km ， b_0 、 g_0 的单位为： S/km 。

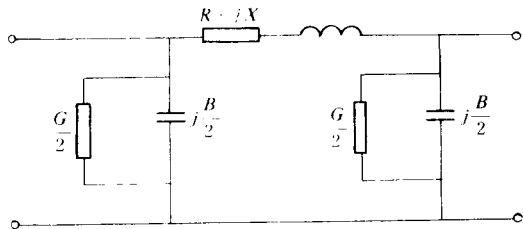


图 1-2 电力线路的集中参数等值电路

如果已知电力线路的长度 L (km)，及其单位长度的电阻 r_0 ，电抗 x_0 ，电纳 b_0 和电导 g_0 ，则可按下式计算集中参数等值电路中的网络参数 R ， X ， B 和 G ：

$$\left. \begin{aligned} R &= r_0 L \quad (\Omega) \\ X &= x_0 L \quad (\Omega) \\ B &= b_0 L \quad (\text{S}) \\ G &= g_0 L \quad (\text{S}) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

并联电导 g_0 是用于表征电力线路绝缘介质中与电压平方成正比的有功功率损耗的参数。对于架空线路，主要指电晕损耗和绝缘子泄漏损耗，对于电缆线路，主要指绝缘介质的极化损耗和泄漏损耗。

架空线路的绝缘子漏电所产生的损耗很小，可以忽略不计。实际运行表明，35kV 及以下的电力线路无电晕损耗， $g_0=0$ 对于 110kV 及以上电压级的电力线路，在设计时需验算产生电晕的临界电压（称为电晕临界电压 U_{Lj} ，必须保证电晕临界电压大于线路工作电压 V ，即 $U_{Lj} > V$ 。因此，电力线路晴天时在额定电压 V 附近不会出现电晕， $g_0=0$ 所以在大多数等值电路中忽略并联电导 G ，即取 $G \approx 0$ ，相应的等值电路如图 1-3 所示。

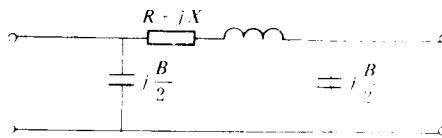


图 1-3 不计电导 G 时的集中参数等值电路

在潮流计算中，110kV 及以上电压级的输电线路的并联容纳常用电容功率表示，如图 1-4 所示，电容功率 Q_c 与容纳的关系如下：

$$Q_c = U^2 B$$

式中 U_c ——输电线路额定电压 (kV)；

B ——线路电纳 (S)；

Q_c ——线路电容功率 (Mvar)。

对于 35kV 及以下电压级的地方配电线路，由于电压低、线路短，由电容电纳引起的容性无功功率不大，故可忽略并联容纳，等值电路简化后如图 1-5 所示。

2. 电力线路的参数计算

由式 (1-1) 可知，如果能求出 r_0 、 x_0 、 b_0 、 g_0 ，则可以很方便地计算 R 、 X 、 B 、 G 。因

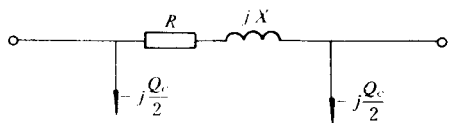


图 1-4 用电容功率 Q_c 表示并联容纳的 Π 型等值电路

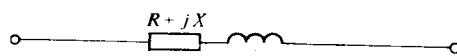


图 1-5 配电线路的简化等值电路

此，下面重点介绍 r_0 、 x_0 、 b_0 、 g_0 的公式计算法和查表法。

(1) 公式计算法

① 电阻

$$r_0 = \rho / S \quad (\Omega/\text{km}) \quad (1-2)$$

式中 ρ ——电阻率；

S ——截面积。

铜导线 $\rho = 18.8 \quad (\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km})$

铝导线 $\rho = 31.5 \quad (\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km})$

② 感抗

$$x_0 = 0.1445 \lg \frac{D_{jj}}{r_{dz}} + \frac{0.0157}{n} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (1-3)$$

式中 D_{jj} ——三相导线的几何均距；

r_{dz} ——每相导线的等值半径 (cm)；

n ——每相次导线的根数，例如三分裂导线 $n=3$ ，四分裂导线 $n=4$ ；对于普通非分裂导线的线路， $n=1$ 。

式 (1-3) 的辅助公式：

$$D_{jj} = \sqrt{D_{AB} D_{BC} D_{CA}} \quad (1-4)$$

(1-4) 式中， D_{AB} 、 D_{BC} 、 D_{CA} 分别为 A、B、C 三相导线之间的线间距离。

$$r_{dz} = \sqrt{r d_{jj}^{n-1}} \quad (1-5)$$

$$d_{jj} = \alpha d \quad (1-6)$$

式 (1-5) 中 r ——分裂导线中次导线的半径；

d_{jj} ——每相次导线的几何均距；

d ——每相次导线间的线间距离。

对于双分裂导线 $\alpha=1$ ，三分裂正三角形导线 $\alpha=1$ ，三分裂水平排列导线 $\alpha=1.26$ ，四分裂正四边形导线 $\alpha=1.12$ 。

③ 容纳

$$b_0 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{jj}}{r_{dz}}} \times 10^{-6} \quad (\text{s}/\text{km}) \quad (1-7)$$

④ 电导

$$g_0 = \frac{\Delta P_g}{U_e^2} \quad (\text{s}/\text{km}) \quad (1-8)$$

式中 ΔP_g ——三相线路每千米的电晕及介质损耗功率 (MW/km)；

U_e ——线路额定线电压 (kV)。

(2) 查表法

为了计算方便，将各种型号的导线每相每千米的电阻 r_0 ，电抗 x_0 ，容纳 b_0 及电容功率

列于表 1-1~1-5 中。我们可以根据导线的型号从表中直接查取其 r_0 , x_0 , b_0 等, 再根据电力线路的长度 L (km), 由式 (1-1) 计算等值电路中的 R 、 X 、 B 。

表 1-1 各种常用架空线的规格 (JB 649-65, 部颁标准)

标称 截面 (mm ²)	导 线 型 号														
	LJ 型			LGJ 型			LGJQ 型			LGJJ 型			GJ 型		
	计算 外径	计算 截面	单位 重量	计算 外径	计算 截面	单位 重量	计算 外径	计算 截面	单位 重量	计算 外径	计算 截面	单位 重量	计算 外径	计算 截面	单位 重量
	(mm)	(mm ²)	(kg/km)	(mm)	(mm ²)	(kg/km)	(mm)	(mm ²)	(kg/km)	(mm)	(mm ²)	(kg/km)	(mm)	(mm ²)	(kg/km)
16	5.1	15.9	44	5.4	17.8	62									
25	6.4	24.7	68	6.6	26.6	92							6.6	26.6	22.77
35	7.5	34.4	95	8.4	43.1	150							7.8	37.15	31.82
50	9.0	49.5	136	9.6	56.3	196							9.0	49.46	41.87
70	10.7	69.3	191	11.4	79.3	275							11.0	72.19	61.50
95	12.4	93.3	257	13.7	113.0	404							12.5	93.22	79.45
120	14.0	117	322	15.2	137.0	492				15.5	142.6	530	12.6	94.11	98.10
150	15.8	148	407	17.0	174.6	617	16.6	165.8	559	17.5	181.4	678	14.0	116.18	
185	17.5	183	503	19.0	215.4	771	18.4	203.0	687	19.6	288.1	850			
240	20.0	239	656	21.6	281.1	997	21.6	274.7	937	22.4	297.3	1111			
300	22.0	298	817	24.2	351.3	1257	23.5	328.2	1098	25.2	369.2	1390			
400	25.8	396	1087	28.0	467.2	1660	27.2	441.5	1501	29.0	493.3	1840			
500	29.1	501	1376				30.2	541.7	1836						
600	32.0	604	1658				33.1	650.2	2206						
700							37.1	805.3	2756						

表 1-2 LJ、TJ 型架空线路的电阻及感抗 (单位: Ω /km)

导线型号	电阻	几 何 均 距 (m)											电阻	导线型号
		0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0			
	LJ	感 抗											TJ	
LJ-16	1.98	0.358	0.377	0.391	0.405	0.416	0.435	0.449	0.460				1.20	TJ-16
LJ-25	1.28	0.345	0.363	0.377	0.391	0.402	0.421	0.435	0.446				0.47	TJ-25
LJ-35	0.92	0.336	0.352	0.366	0.380	0.391	0.410	0.424	0.435	0.445	0.453	0.54	TJ-35	
LJ-50	0.64	0.325	0.341	0.355	0.365	0.380	0.398	0.413	0.423	0.433	0.441	0.39	TJ-50	
LJ-70	0.46	0.315	0.331	0.345	0.359	0.370	0.388	0.399	0.410	0.420	0.428	0.27	TJ-70	
LJ-95	0.34	0.303	0.319	0.334	0.347	0.358	0.377	0.390	0.401	0.411	0.419	0.20	TJ-95	
LJ-120	0.27	0.297	0.313	0.327	0.341	0.352	0.368	0.382	0.393	0.403	0.411	0.158	TJ-120	
LJ-150	0.21	0.287	0.312	0.319	0.333	0.344	0.363	0.377	0.388	0.398	0.406	0.123	TJ-150	

表 1-3

LGJ 型架空线路导线的电阻及感抗

(单位: Ω/km)

导线型号	电阻	几何均距 (m)														
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
		感 抗														
LGJ-35	0.85	0.366	0.385	0.403	0.417	0.429	0.438	0.446								
LGJ-50	0.65	0.353	0.374	0.392	0.406	0.418	0.427	0.435								
LGJ-70	0.45	0.343	0.364	0.382	0.396	0.408	0.417	0.425	0.433	0.440	0.446					
LGJ-95	0.33	0.334	0.353	0.371	0.385	0.397	0.406	0.414	0.422	0.429	0.435	0.44	0.445			
LGJ-120	0.27	0.326	0.347	0.365	0.379	0.391	0.400	0.408	0.416	0.423	0.429	0.433	0.438			
LGJ-150	0.21	0.319	0.340	0.358	0.372	0.384	0.398	0.401	0.409	0.416	0.422	0.426	0.432			
LGJ-185	0.17				0.365	0.377	0.386	0.394	0.402	0.409	0.415	0.419	0.425			
LGJ-240	0.132				0.357	0.369	0.378	0.386	0.394	0.401	0.407	0.412	0.416	0.421	0.425	0.429
LGJ-300	0.107										0.399	0.405	0.410	0.414	0.418	0.422
LGJ-400	0.08										0.391	0.397	0.402	0.406	0.410	0.414

表 1-4

LGJQ 及 LGJJ 型架空线路导线的电阻及感抗

(单位: Ω/km)

导线型号	电阻	几何均距 (m)						
		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
		感 抗						
LGJQ-300	0.108		0.401	0.406	0.411	0.416	0.402	0.424
LGJQ-400	0.080		0.391	0.397	0.402	0.406	0.410	0.414
LGJQ-500	0.065		0.384	0.390	0.395	0.400	0.404	0.408
LGJJ-185	0.170	0.406	0.412	0.417	0.422	0.426	0.433	0.437
LGJJ-240	0.131	0.397	0.403	0.409	0.414	0.419	0.424	0.428
LGJJ-300	0.106	0.390	0.396	0.402	0.407	0.411	0.417	0.421
LGJJ-400	0.079	0.381	0.387	0.393	0.398	0.402	0.408	0.412

表 1-5

LGJ、LGJJ 及 LGJQ 型架空线路导线的容纳

(单位: $10^{-6}\text{s}/\text{km}$)

导线型号	几何均距 (m)														
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
	容 纳														
LGJ	35	2.97	2.83	2.73	2.65	2.59	2.54								
	50	3.05	2.91	2.81	2.72	2.66	2.61								
	70	3.12	2.99	2.88	2.79	2.73	2.68	2.62	2.58	2.54					
	95	3.25	3.08	2.96	2.87	2.81	2.75	2.69	2.65	2.61					
	120	3.31	3.13	3.02	2.92	2.85	2.79	2.74	2.69	2.65					
	150	3.38	3.20	3.07	2.97	2.90	2.85	2.79	2.74	2.71					
	185			3.13	3.03	2.96	2.90	2.84	2.79	2.74					
	240			3.21	3.10	3.02	2.96	2.89	2.85	2.80	2.76				
	300									2.86	2.81	2.78	2.75	2.72	
	400									2.92	2.88	2.83	2.81	2.78	

导线型号	几 何 均 距 (m)														
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
	容 纳														
LGJJ	120					2.80	2.75	2.70	2.66	2.63	2.60	2.57	2.54	2.51	2.49
	150					2.85	2.81	2.76	2.72	2.68	2.65	2.62	2.59	2.57	2.54
	185					2.91	2.86	2.80	2.76	2.73	2.70	2.66	2.63	2.60	2.58
	240					2.98	2.92	2.87	2.82	2.79	2.75	2.72	2.68	2.66	2.64
LGJQ	300					3.04	2.97	2.91	2.87	2.84	2.80	2.76	2.73	2.70	2.68
	400					3.11	3.05	3.00	2.95	2.91	2.87	2.83	2.80	2.77	2.75
	500					3.14	3.08	3.01	2.96	2.92	2.88	2.84	2.81	2.79	2.76
	600					3.16	3.11	3.04	3.02	2.96	2.91	2.88	2.85	2.82	2.79

【例题 1-1】 有一条长度为 120km, 额定电压为 110kV 的输电线路, 采用 LGJ—185 的导线, 水平排列, 线间距离 4m, 求线路的参数。

解: 线路一次结线及等值电路如图 1-6 所示。

导线的几何均距 $D_{jj} = \sqrt[3]{4 \times 4 \times 8} = 5(\text{m})$

查表 1-3 得 $r_0 = 0.17\Omega/\text{km}, x_0 = 0.409\Omega/\text{km}$

$$x_0 = 0.409\Omega/\text{km}$$

查表 1-5 得 $b_0 = 2.79 \times 10^{-6} \text{S}/\text{km}$

所以 $R = r_0 L = 0.17 \times 120 = 20.40\Omega$

$$X = x_0 L = 0.409 \times 120 = 49.08\Omega$$

$$B = b_0 L = 2.79 \times 10^{-6} \times 120 = 334.8 \times 10^{-6} \text{s}$$

$$\frac{B}{2} = 167.4 \times 10^{-6} \text{s}$$

计算结果标在图 1-6 (b) 等值电路中。

(二) 电力变压器的等值电路和参数计算

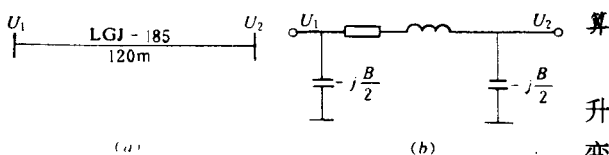


图 1-6 线路一次结线及等值电路

(a) 结线示意图; (b) 等值电路图

在高压输电、配电线路上, 一般都有升压、降压电力变压器与线路串联。电力变压器是电力网的主要元件之一。按变压器的结构分单相、三相变压器; 双绕组、三绕组变压器; 无激磁调压、有载调压变压器; 自耦、分裂变压器等。

1. 双绕组变压器的等值电路和参数计算

在进行实际的工程计算时, 双绕组变压器常常可以用图 1-7 所示的等值电路来等效。图中, R_B 为短路电阻, X_B 为短路电抗, $Z_B = R_B + jX_B$ 称为串联阻抗, G_B 为激磁导纳, B_B 为激磁电纳 $Y_B = G - jB_B$ 为并联导纳。

其中图 1-7 (a) 为激磁支路用导纳表示的等效电路, 图 1-7 (b) 为激磁支路用激磁损

耗(铁损、空载损耗)表示的等效电路;图 1-7 (c) 是忽略空载损耗时的等效电路。

要计算 R_B 、 X_B 、 G_B 、 B_B 这四个参数,需要事先知道变压器的空载试验和短路试验的参数,即短路损耗 ΔP_d ,短路电压百分数 u_d (%),空载损耗 ΔP_0 ,空载电流百分数 I_0 (%).从变压器的铭牌上可得知这四个试验参数,也可以从相关变压器手册资料里找到。下面介绍参数的计算。

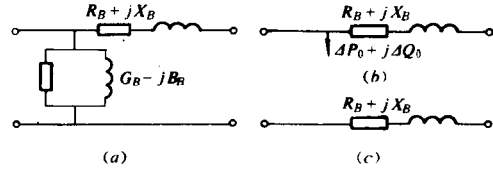


图 1-7 双绕组变压器的等值电路

① 短路电阻 R_B , R_B 可按短路损耗 ΔP_d 值求得其计算公式为

$$R_B = \Delta P_d \frac{U_e^2}{S_e^2} \quad (\Omega) \quad (1-9)$$

式中 ΔP_d ——变压器的额定短路损耗 (MW);

S_e ——变压器额定容量 (MVA);

U_e ——变压器的额定电压 (kV), 当欲得将 R_B 归算到高压侧时取 $U_e = U_{e1}$,

欲将 R_B 归算到低压侧时,取 $U_e = U_{e2}$, 其中 U_{e1} 表示变压器高压侧额定电压, U_{e2} 表示低压侧绕组的额定电压。

② 短路电抗 X_B . X_B 为经折算后高压绕组和低压绕组串联漏抗的总电抗, 可由短路电压百分数 (亦称短路电抗百分数) 直接求得, 计算公式为:

$$X_B = \frac{U_d (\%) }{100} \times \frac{U_e^2}{S_e} \quad (\Omega) \quad (1-10)$$

式中 U_e ——变压器高压或低压绕组的额定电压 (kV);

S_e ——变压器额定容量 (MVA)。

③ 激磁电导 G_B . G_B 可由空载损耗 ΔP_0 求得, 计算公式为:

$$G_B = \frac{\Delta P_0}{U_e^2} \quad (s) \quad (1-11)$$

④ 激磁电纳 B_B . B_B 与空载电流 I_0 (%) 有关, 其计算公式为:

$$B_B = \frac{I_0 (\%) }{100} \times \frac{S_e}{U_e^2} \quad (s) \quad (1-12)$$

变压器的激磁无功损耗:

$$\Delta Q_0 = \frac{I_0 (\%) }{100} S_e \quad (\text{Mvar}) \quad (1-13)$$

注意, ΔP_0 、 ΔQ_0 分别为有功和无功激磁损耗, 由于它们是通过空载试验得到的, 故也称为空载损耗。但是, 这并不意味着只在变压器空载时才有这两个损耗, 实际上不论变压器空载与负载运行, ΔP_0 和 ΔQ_0 总是存在的, 且只与电压有关, 由于电网电压波动很小, 故 ΔP_0 、 ΔQ_0 几乎与负荷电流无关, 故又称 ΔP_0 和 ΔQ_0 为变压器的固定损耗 (即铁损)。在串联电阻 R_B 和电抗 X_B 上的有功和无功损耗是与负荷电流平方成正比的, 负荷电流愈大, 损耗愈大, 故称之为可变损耗, 即铜损。

【例题 1-2】 某 220kV 升压变电所装有一台 SSPL-260000 型变压器, 其铭牌数据为:

$S_e = 260000 \text{ kVA}$; $U_{e1}/U_{e2} = 242/15.75 \text{ kV}$; $\Delta P_d = 1460 \text{ kW}$; $\Delta P_0 = 232 \text{ kW}$; $U_d (\%) = 14$;
 $I_0 (\%) = 0.963$ 。

试求以变压器高压侧为基准的变压器参数并画出等值电路。

解：根据 (1-9) 式可得：

$$R_B = \Delta P_d \frac{U_e^2}{S_e^2} = 1.46 \times \frac{242^2}{260^2} = 1.26 (\Omega)$$

根据式 (1-10) 可得：

$$X_B = \frac{U_d (\%)}{100} \cdot \frac{U_e^2}{S_e} = \frac{14}{100} \cdot \frac{242^2}{260} = 31.53 (\Omega)$$

根据式 (1-11) 可得：

$$G_B = \frac{\Delta P_0}{U_e^2} = \frac{0.232}{242^2} = 3.96 \times 10^{-6} (\text{S})$$

根据 (1-12) 式可得：

$$B_B = \frac{I_0 (\%)}{100} \cdot \frac{S_e}{U_e^2} = \frac{0.963}{100} \cdot \frac{260}{242^2} = 42.75 \times 10^{-6} (\text{S})$$

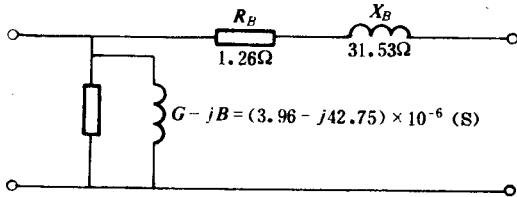


图 1-8 SSPL-260000 型变压器的
T 型等值电路图

由计算结果，得 SSPL-260000 型变压器的 T 型等值电路如图 1-8 所示。

2. 三绕组和自耦变压器的等值电路和参数计算

就变压器各绕组端点接线条件而言，自耦变压器完全等值于普通三绕组变压器，因而自耦变压器的参数和等值电路的确定也与三绕组变压器相同。GB1094-79

规定按标准系列生产的三绕组电力变压器的容量比(指 $S_{e1}/S_{e2}/S_{e3}$)为三类。第 I 类:100/100/100;第 II 类:100/100/50;第 III 类:100/50/100。自耦变压器的额定容量比只有后两类。

三绕组和自耦变压器的等值电路如图 1-9 所示。其中 (a) 图是以激磁导纳表示激磁支路；(b) 图是以导纳中激磁功率损耗表示激磁支路。

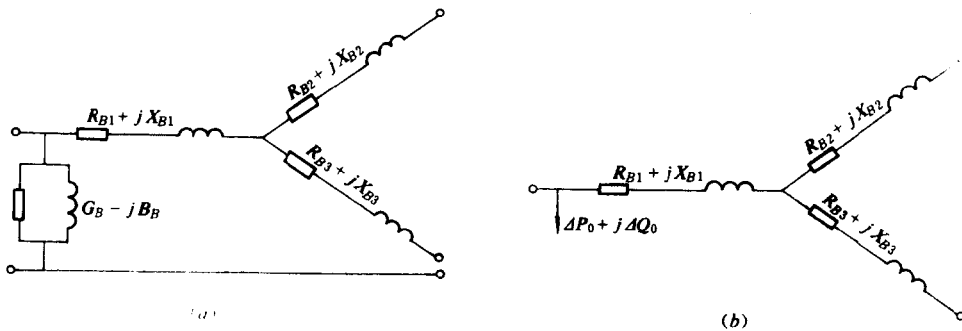


图 1-9 三绕组变压器的等值电路

三绕组的基本参数同样为 R_B 、 X_B 、 G_B 和 B_B ，其中激磁电导 G_B 及激磁电纳 B_B 的计算公式与双绕组变压器是相同的即式 (1-11) ~ 式 (1-13)，这里不再重复，下面着重介绍短路电阻 R_B 和电抗 X_B 的计算公式

① 短路电阻 R_{B1} 、 R_{B2} 和 R_{B3}

设已知各绕组间的短路损耗 ΔP_{d12} 、 ΔP_{d23} 、 ΔP_{d31} ，则可按下式求各绕组的短路损耗：

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{d1} &= \frac{1}{2} (\Delta P_{d12} + \Delta P_{d31} - \Delta P_{d23}) \\ \Delta P_{d2} &= \frac{1}{2} (\Delta P_{d23} - \Delta P_{d12} - \Delta P_{d31}) \\ \Delta P_{d3} &= \frac{1}{2} (\Delta P_{d31} + \Delta P_{d23} - \Delta P_{d12}) \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

然后，可按 (1-9) 式求出各短路电阻的值：

$$\left. \begin{aligned} R_{B1} &= \Delta P_{d1} \frac{U_c^2}{S_c^2} \\ R_{B2} &= \Delta P_{d2} \frac{U_c^2}{S_c^2} \\ R_{B3} &= \Delta P_{d3} \frac{U_c^2}{S_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

应当指出，(1-14) 式是按容量比为 100/100/100 的变压器给出的。对于 100/50/50 或 100/50/100 的变压器，制造厂家所提供的短路损耗值往往是一对线圈中容量较小的线圈达到额定值的值。因此需按下式将其归算到第 1 绕组的额定容量之下：

(a) 容量比为 100/100/50 的变压器

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{d23} &= 4\Delta P'_{d23} \\ \Delta P_{d31} &= 4\Delta P'_{d31} \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

(b) 容量比为 100/50/100 的变压器

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{d12} &= 4\Delta P'_{d12} \\ \Delta P_{d23} &= 4\Delta P'_{d23} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

根据变压器的容量比，按 (1-16) 或 (1-17) 式归算后，即可按 (1-14) 和 (1-15) 式计算 R_{B1} 、 R_{B2} 、 R_{B3} 。

② 短路电抗 X_{B1} 、 X_{B2} 、 X_{B3}

通常制造厂家提供的是变压器各绕组间的短路电压百分数 U_{d12} (%)、 U_{d23} (%)、 U_{d31} (%)，因此需按下式计算各绕组的 U_d (%) 值：

$$\left. \begin{aligned} U_{d1}(\%) &= \frac{1}{2} [U_{d12}(\%) + U_{d31}(\%) - U_{d23}(\%)] \\ U_{d2}(\%) &= \frac{1}{2} [U_{d23}(\%) + U_{d12}(\%) - U_{d31}(\%)] \\ U_{d3}(\%) &= \frac{1}{2} [U_{d31}(\%) + U_{d23}(\%) - U_{d12}(\%)] \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

表 1-6

电力变压器 型号	额定容量 (kV·A)	额定电压(kV)			损耗(kW)				短路电压(%)			空 载 电 流 (%)	连接组标号
		高压	中压	低压	短 路		空 载		高	中	低		
					高	低	中	低					
SFSL ₁ -6300/110	6300/6300/6300	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	11,10.5	62.6	50.7	12.5	17	10.5	6	1.4	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11	
		110±2×2.5%			62	50.7							6
SFSL ₁ -8000/110	8000/4000/8000 8000/8000/4000	121±5%	38.5±2×2.5%	11,10.5	66.2	51.6	12.5	10.5	17	6	1.4	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11	
		110±5%			65.6	51.6							6
SFSL ₁ -10000/110	10000/10000/10000	121±5%	38.5±2×2.5%	11,10.5	83	19	14.2	17.5	10.5	6.5	1.26	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11	
		110±5%			83	19							6.5
SFSL ₁ -15000/110	15000/15000/15000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	10.5 6.3	91	69.3	17	17	10.5	6	1.5	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11	
		110±5%			89.6	69.7							6
SFSL ₁ -20000/110	20000/20000/10000 20000/10000/20000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	10.5 6.3	120	95	22.7	17	10.5	6	1.3	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11	
		110±5%			152.8	47							6
SFSL ₁ -20000/110	20000/20000/20000	121±2×2.5%	38.5±5%	10.5 6.3	52	47	50.2	18	10.5	6.5	4.1	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11	
		110±5%			148.2	47							6.5
SFSL ₁ -20000/110	20000/20000/20000	121±2×2.5%	38.5±5%	10.5 6.3	145	117	43.3	10.5	18	6.5	3.46	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11	
		110±5%			154	119							6.5

续表 1-6

电力变压器 型号	额定容量 (kV·A)	额定电压(kV)			损耗(kW)				短路电压(%)			空 载 电 流 (%)	连接组号
		高压	中压	低压	短 路			高 中	高 低	中 低			
					高	中	低						
SFSL ₁ -25000/110	25000/25000/25000	121±2×2.5%	38.5±5%	10.5	175	197	142	49.5	10.5	18	6.5	3.4	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
				6.3	194	182	144	49.5	18	10.5	6.5		
SFSL ₁ -25000/110	25000/25000/25000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	10.5	219	224	172	42.7	10.5	18	6	3.5	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
				6.3	229.1	212	181.6	32.2	18	10.5	6.5		
SFSL ₁ -31500/110	31500/31500/31500	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	10.5	276	250	205.5	72	17.5	10.5	6.5	0.8	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
				6.3	215.4	231	184	37.2	10.5	18	6.5		
SFSL ₁ -40000/110	40000/40000/40000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	10.5	244	274.5	205.5	72	10.5	17.5	6.5	2.7	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
				6.3	308.8	350.3	251	62.2	10.5	18	6.5		
SFSL ₁ -50000/110	50000/50000/50000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	6.3	350.6	318.3	252.9	62.2	18	10.5	6.5	1	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
				6.3	350.6	318.3	255	62.2	18	10.5	6.5		
SFSL ₁ -50000/110	50000/50000/50000	121±2×2.5%	38.5	6.3	350	300	255	53.2	17.5	10.5	6.5	0.8	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
				6.3	300	350	255	53.2	10.5	17.5	6.5		
SFSL ₁ -63000/110	63000/63000/63000	121±2×2.5%	38.5±5%	6.3	380	470	320	64.2	10.5	18.5	6.5	0.7	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
				6.3	470	380	320	64.2	18.5	10.5	6.5		
SFSLQ ₁ -10000/110	10000/10000/10000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	6.3	87.95	90.05	67.9	21.4	17	10.5	6	1.5	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
				6.3	88.76	86.65	67.7	21.4	10.5	17	6		
SFSLQ ₁ -15000/110	15000/15000/15000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	6.3	120	120	94	30.5	17	10.5	6	1.2	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
				6.3	120	120	94	30.5	10.5	17	6		

续表 1-6

电力变压器 型号	额定容量 (kV·A)	额定电压(kV)			损耗(kW)						短路电压(%)			空载 电流 (%)	连接组号
		高压	中压	低压	短路			空载			高	中	低		
					高	中	低	高	中	低					
SFSLQ-20000/110	20000/20000/20000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	6.3	153	147.6	111.6	33.5	17	10.5	6	1.1	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11		
					142.9	152.9	110.4	10.5	17	6					
SFSLQ-31500/110	31500/31500/31500	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	6.3	155	150	112	34	17	10.5	6	1.2	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11		
					150	155	112	10.5	17	6					
SSPSL-31500/110	31500/31500/31500	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	10.5 6.3	217	200.7	158.6	46.8	17	10.5	6	0.9	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11		
					202	214	160.5	10.5	17	6					
SSPSL-45000/110	45000/45000/45000	121±5%	69	6.3	230	214	184	38.4	18	10.5	6.5	0.8	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11		
					160	185	115	80	12	23	9.5				
SSPSL-50000/110	50000/50000/50000	121±5%	38.5±5%	10.5	350	318.3	250.9	89.6	18	10.5	6.5	2.82	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11		
					580	510	450	76	18.5	10.5	6.5				
SSPSL-75000/110	75000/75000/75000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	10.5	91	91	70	22	18	10.5	6.5	3.3	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11		
					120	120	95	27	17	10.5	6				
SFSL-10000/110	10000/10000/10000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	10.5 6.3	91	91	70	22	18	10.5	6.5	4.0	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11		
					120	120	95	27	17	10.5	6				
SFSL-15000/110	15000/15000/15000	121±2×2.5%	38.5±2×2.5%	10.5 6.3	235	235	115	49	18.5	10.5	6.5	2.5	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11		
					235	235	115	49	10.5	18.5	6.5				
SFSL-63000/110	63000/63000/63000	121±2×2.5%	38.5±5%	10.5 6.3	410	410	260	84	18	10.5	6.5	2.2	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11		
					410	410	260	84	10.5	18	6.5				

表 1-7

220kV、330kV 三相自耦电力变压器技术数据

型 号	额定容量高/中/低 (MV·A)	额定电压(kV)			损 耗(kW)				短路电压(%) (已归算到高压 额定容量)				空 载 电 流 (%)	连 接 组	
		高	中	低	空 载		短 路		高	中	高	中			低
					高	中	高	低							
SSPSO-360000/330	360/360/72	363 +4.5% -55	242	11	207					7.5	77.5	66.7	0.351	Y ₀ -0/Δ-12-11	
OSFPSZ-90000/330	90/90/90	345	121±6×1.67%	11	97	339.4	93.92	78.4	9.65	25.74	14.25	0.483	Y ₀ -0/Δ-12-11		
OSFPS-150000/330	150/150/40	330±2×2.5%	121	11	145.4	569.5	83.95	106.4	9.9	24.3	13.8	0.627	Y ₀ -0/Δ-12-11		
OSFPS-240000/330	240/240/40	330±2×1%	242	10.5	73.5	565.3	176.9	180.4	8.64	94.2	18.5	0.206	Y ₀ -0/Δ-12-11		
OSFPSL-90000/220	90/90/45	220±2×2.5%	121	11	77.7	723.7	315	253.5	9.76	36.62	24.24	0.5	Y ₀ -0/Δ-12-11		
OSFPSL-120000/220	120/120/60	220+4×2.5%	121	11	73.25	455	366	346	9.35	33.1	21.6	0.346	Y ₀ -0/Δ-12-11		
SSFPSL-30000/220	300/300/150	242±2×2.25%	121	13.8	224.7	1043	508.2	612.5	13.43	11.74	18.66	0.582	Y ₀ -0/Δ-12-11		