

变压器低压侧中性点接地导体截面的选择

钱中阳 (中国市政工程西北设计研究院有限公司北京分院, 北京市 100037)

冯志文 (陕西省建筑设计研究院有限责任公司, 西安市 710003)

李建云 (天津泰达电力公司, 天津市 300457)

Selection of the Grounding Conductor Cross Section of Neutral Point at Transformer Low-voltage Side

Qian Zhongyang (Beijing Branch, CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Feng Zhiwen (Shaanxi Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710003, China)

Li Jianyun (Tianjin TEDA Electric Power Company, Tianjin 300547, China)

Abstract Based on analysis of the present documentation and combined with calculation example, grounding conductor cross section of neutral point at low-voltage side of transformer 10/0.4 kV is validated, and some issues to which attention shall be paid during selecting cross section are discussed.

Key words Neutral point grounding Single-phase short circuit Selection of cross section Validation

摘要 通过对现有文献资料的分析研究, 配以计算实例, 对 10/0.4 kV 变压器低压侧中性点接地导体截面进行校验, 并对截面选择应注意的一些问题进行了探讨。

关键词 中性点接地 单相短路 截面选择 校验

对于 10/0.4 kV 配电变压器低压侧中性点接地, 无论国家规范还是 IEC 标准, 都有较为严格的要求。在工程实践中, 对于变压器中性点接地导体截面的选取, 可参考国标图集中专门的数据表。但笔者尚未见到有关这类表格中数据的详细介绍和验算的文献。本文通过对现行不同国标图集的对比、分析和探讨, 提出在工程应用中需注意的若干问题。

1 设计参考依据

1.1 关于变压器低压侧中性点接地导体截面的选择, 笔者能查到的文献资料

a. 《干式变压器安装》(99D201-2) 图集第 33 页变压器低压侧出线选择。

b. 《10/0.4 kV 变压器室布置及变配电所常用设备构件安装》(03D201-4) 图集第 229 页变压器低压侧出线选择, 其中提到表中数据均参考《工业与民用配电设计手册》、《干式变压器安装》(99D201-2) 图集。

c. 《建筑电气常用数据》(04DX101-1) 图集第 4-3 页变压器低压侧出线选择, 其中 800 kV·A 变压器中性点接地导体采用 VV 电缆时规格为 $1 \times 150 \text{ mm}^2$, 而 99D201-2 和 03D201-4 中采用 VV 电缆时规格为 $1 \times 120 \text{ mm}^2$ 。

d. 《民用建筑电气设计与施工——变配电所》(08D800-3) 图集第 99 页变压器低压侧出线选择, 其中 800 kV·A 变压器中性点接地导体采用 BV 线时规格为 $1 \times 150 \text{ mm}^2$, 而 99D201-2 和 03D201-4 中采用 BV 线时规格为 $1 \times 120 \text{ mm}^2$ 。

1.2 通过对比分析以上资料发现的问题

a. 99D201-2 和 03D201-4 图集数据完全相同, 03D201-4 遵循《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》(GB/T 6451-1999, 现已作废)。630 kV·A 以下干式变压器, 和同容量的油浸式变压器相比, 其阻抗电压 $u_k\%$ 相同, 短路损耗 ΔP 较小, 所以阻抗 Z 相同, 电阻 R 较小, 其电抗 X 较大, 结果是小容量干式变压器的单相短路电流略大 (平均大 15% 左右); 630 kV·A 及以上干式变压器, 和同容量的油浸式变压器相比, 其阻抗电压 $u_k\%$ 较大, 短路损耗 ΔP 较小, 所以阻抗 Z 较大, 电阻 R 较小, 其电抗 X 更大, 结果是大容量干式变压器和同容量油浸式变压器相比单相短路电流略小 (平均小 5% 左右)。两

者差别较大,因此需要分别进行导体热稳定校验。

b. 04DX101-1 和 08D800-3 图集没有明确变压器的类型,在没有明确变压器阻抗电压的情况下,有些截面选择显得没有规律,特别是 630 kV·A 作为阻抗电压的一个分界点,应标明所计算变压器的阻抗电压值。

2 电缆截面计算

变压器低压侧中性点接地导体截面选择应满足低压侧最大单相接地电流时接地线的热稳定校验要求。具体计算中,变压器低压侧中性点接地线按变压器 D, yn11 接法考虑,此时变压器负序及零序阻抗等于正序阻抗。

2.1 计算条件

a. 考虑最不利情况,系统阻抗足够小,按照系统短路容量为 300 MV·A 选择,以满足绝大多数工程要求。

b. 变压器按照 D, yn11 接线方式考虑。

c. 母线采用铜母线,按照变压器低压侧出线母排长度 5 m 计算。

d. 短路故障切除时间按照 0.6 s 计算。

e. 计算最大单相接地电流,考虑基本元件的最小阻抗,即可满足最不利工程情况。

f. 变压器中性点出线电缆长度因环境条件不同而有所不同,极端条件下可能小于 5 m,为满足最不利情况,此阻抗计算中未考虑。

2.2 计算方法

2.2.1 阻抗计算

高压侧系统阻抗计算公式:

$$Z_s = \frac{(c \times U)^2}{S_s} \times 10^3$$

$$X_s = 0.995 \times Z_s$$

$$R_s = 0.1 \times X_s$$

式中: c —— 电压系数,计算单相短路电流时取 1,计算三相短路电流时取 1.05;

U —— 低压系统标称电压,取 0.38 kV;

S_s —— 变压器高压侧系统短路容量,取 300 MV·A。

R_s 、 X_s 、 Z_s —— 归算到变压器低压侧的高压系统电阻、电抗、阻抗, mΩ。

变压器阻抗计算公式:

$$Z_t = \frac{u_k \% \times (c \times U)^2}{100 \times S_t} \times 10^3$$

$$R_t = \frac{\Delta P \times (c \times U)^2}{S_t^2}$$

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2}$$

式中: $u_k \%$ —— 变压器阻抗电压百分数;

S_t —— 变压器额定容量, MV·A;

ΔP —— 变压器短路损耗, kW;

R_t 、 X_t 、 Z_t —— 归算到变压器低压侧的电阻、电抗、阻抗, mΩ。

母线阻抗计算公式:

$$R_b = R_{bus} \times L_{bus}$$

$$X_b = X_{bus} \times L_{bus}$$

式中: R_{bus} —— 选定的低压母线单位长度的相线电阻, mΩ/m;

X_{bus} —— 选定的低压母线单位长度的相线电抗, mΩ/m;

L_{bus} —— 母线长度,取 5 m。

2.2.2 相保阻抗计算

系统相保阻抗计算公式:

$$X_{sp} = 0.67 \times X_s$$

$$R_{sp} = 0.67 \times R_s$$

式中: R_{sp} —— 系统相保电阻, mΩ,

X_{sp} —— 系统相保电抗, mΩ。

变压器 (D, yn11 连接) 相保阻抗计算公式:

$$R_{tp} = R_t$$

$$X_{tp} = X_t$$

式中: R_{tp} —— 变压器相保电阻, mΩ,

X_{tp} —— 变压器相保电抗, mΩ。

母线相保阻抗计算公式:

$$R_{bp} = R_{b0} \times L_{bus}$$

$$X_{bp} = X_{b0} \times L_{bus}$$

式中: R_{b0} —— 母线单位长度相保电阻, mΩ,

X_{b0} —— 母线单位长度相保电抗, mΩ/m,

R_{bp} —— 母线相保电阻, mΩ;

X_{bp} —— 母线相保电抗, mΩ。

短路点总相保阻抗计算公式:

$$R_p = R_{sp} + R_{tp} + R_{bp} + R_{xp}$$

$$X_p = X_{sp} + X_{tp} + X_{bp} + X_{xp}$$

$$Z_p = \sqrt{R_p^2 + X_p^2}$$

式中: R_{xp} —— 线路相保电阻, $m\Omega$,

X_{xp} —— 线路相保电抗, $m\Omega$,

R_p —— 短路点总相保电阻, $m\Omega$,

X_p —— 短路点总相保电抗, $m\Omega$,

Z_p —— 短路点总相保阻抗, $m\Omega$ 。

2.2.3 单相短路电流计算

单相短路电流计算公式:

$$I_d = \frac{U}{\sqrt{3} Z_p}$$

式中: U —— 低压系统标称电压, 380 V;

I_d —— 单相短路电流, kA。

2.2.4 根据热稳定校验计算电缆最小截面

$$S_{min} \geq \frac{I_d}{k} \sqrt{t}$$

式中: S_{min} —— 电缆允许最小截面, mm^2 ;

t —— 短路电流持续时间, 取 0.6 s;

k —— 热稳定计算系数, 见表 1、2。

表 1 常用绝缘材料的计算系数 k 值

Tab. 1 The value of calculation coefficient k of common insulated conductor

导体绝缘材料	PVC ($\leq 300 mm^2$)	XLPE
计算系数 k	115	143

注: 数据来源于《工业与民用配电设计手册》(第三版)第 585 页表 11-1。

表 2 短路前导体温度为 +70℃ 时的热稳定系数值

Tab. 2 The value of thermal stability checkout coefficient when the conductor's temperature is 70℃ before shourt-circuit fault

裸导体	铜	钢
短路时导体最高允许温度 (℃)	300	300
热稳定系数 k	171	60

注: 数据来源于《电力工程电气设计手册 电气一次部分》第 337 页表 8-8。《建筑物电气装置 第 5-54 部分: 电气设备的选择和安装 接地配置、保护导体和保护联结导体》(GB 16895.3-2004/IEC 60364-5-54: 2002) 表 A.54.6 中, 铜为 159, 钢为 58。

2.2.5 计算中需要的其他参数

a. 变压器的阻抗平均值 (归算到 400 V 侧) 见表 3。

表 3 变压器的阻抗平均值

Tab. 3 The average impedance of transformer

变压器型号	S9 (D, yn11)				SC9 (D, yn11)			
	变压器容量 (kV·A)	阻抗电压 (%)	短路损耗 (kW)	正序电阻 (mΩ)	正序电抗 (mΩ)	阻抗电压 (%)	短路损耗 (kW)	正序电阻 (mΩ)
200	4	2.50	10.00	30.40	4	2.24	8.96	29.93
250	4	3.05	7.81	23.75	4	2.41	6.17	24.85
315	4	3.65	5.89	19.43	4	3.10	5.00	19.70
400	4	4.30	4.30	15.41	4	3.60	3.60	15.59
500	4	5.10	3.26	12.38	4	4.30	2.75	12.50
630	4.5	6.20	2.50	11.15	4	5.40	2.18	9.92
800	4.5	7.50	1.88	8.80	6	6.60	1.65	11.89
1000	4.5	10.30	1.65	7.00	6	7.60	1.22	9.52
1250	4.5	12.00	1.23	5.63	6	9.10	0.93	7.62
1600	4.5	14.50	1.25	4.32	6	11.00	0.69	5.96
2000					6	13.30	0.53	4.77
2500					6	15.80	0.40	3.82

注: 数据来源于《工业与民用配电设计手册》(第三版)第 155 页。

b. 铜母线单位长度阻抗值见表 4。

表 4 铜母线单位长度阻抗值

Tab. 4 The impedance / unit length of copper bus

铜母线规格 (mm)	单位长度阻抗值	
	相保电阻 R'_{php} (mΩ/m)	相保电抗 X'_{php} (mΩ/m)
4 (40×4)	0.22	0.451
4 (50×5)	0.14	0.423
4 (63×6.3)	0.088	0.4
3 (80×6.3) + 1 (63×6.3)	0.078	0.384
3 (80×8) + 1 (63×6.3)	0.071	0.382
3 (100×8) + 1 (80×8)	0.049	0.381
3 (125×10) + 1 (80×8)	0.041	0.3698
3×2 (100×10) + 1 (100×10)	0.027	0.366
3×2 (125×10) + 1 (125×10)	0.021	0.344

注: 数据来源于《工业与民用配电设计手册》(第三版)配套计算软件。

3 电缆热稳定校验

单相接地短路计算条件：变压器高压侧短路容量为 $300 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ，变压器采用 $10/0.4 \text{ kV}$ 一台，D, yn11 连接组别，系统接线如图 1、2 所示。计算结果见表 5、表 6。

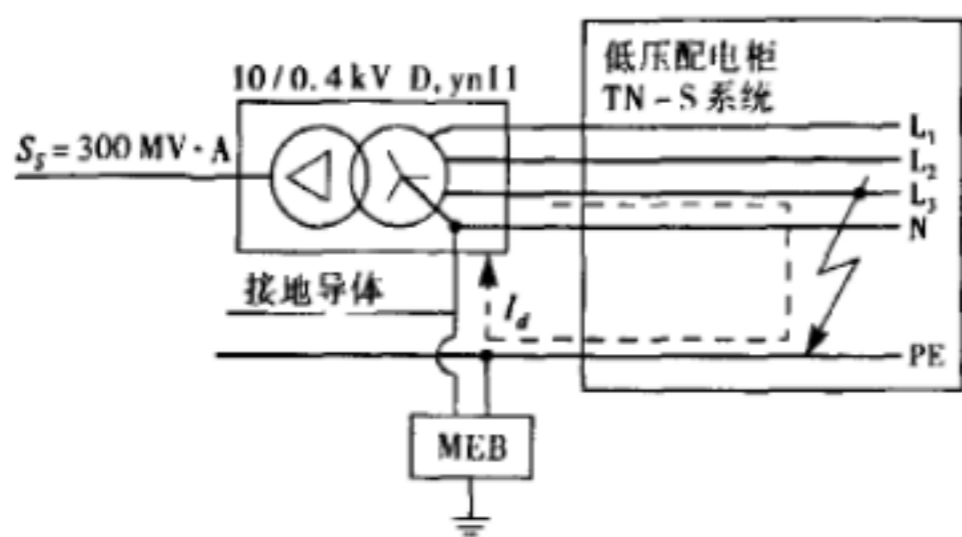


图 1 系统接线图 (I)
Fig. 1 System wiring diagram (I)

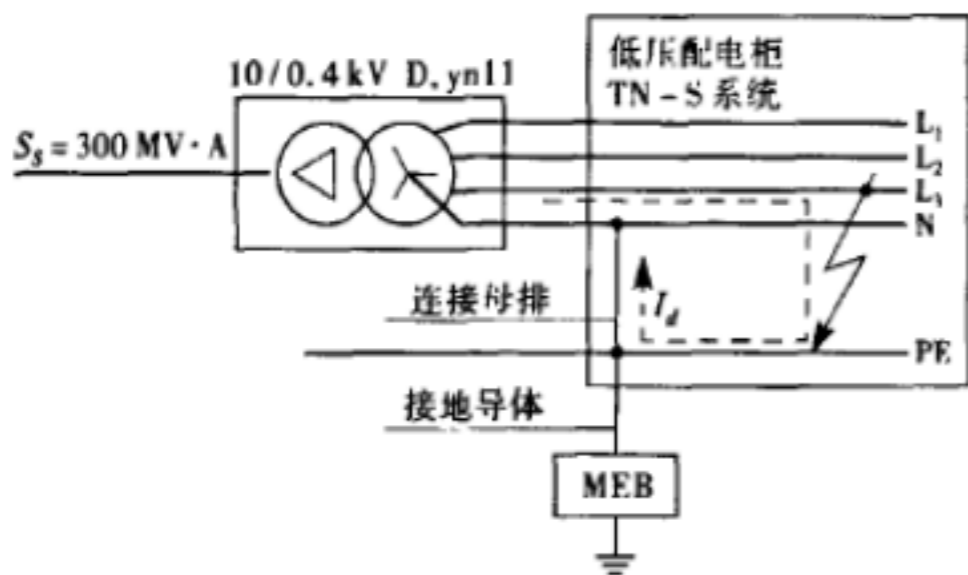


图 2 系统接线图 (II)
Fig. 2 System wiring diagram (II)

4 电缆选择的探讨

4.1 关于计算方法的问题

为计算变压器低压侧最大单相接地短路电流，需考虑较为极端的情况，例如，系统短路容量按不小于 $300 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 考虑。在本文 1.1 节所列图集的变压器低压侧出线选择表中，其附加说明提到对变压器连接等计算条件，而未说明系统短路容量是不妥的。

变压器中性点出线电缆长度因环境条件不同而有所不同，极端条件下可能小于 5 m ，作为选型表格，应考虑满足最不利情况。

4.2 关于变压器连接组别的问题

变压器的零序电抗与其本身的结构和绕组的接法有关。目前不少厂家生产的连接组别 D, yn11 变压器比 Y, yn0 变压器零序阻抗小，二次侧单相短路电流大，可提高二次侧单相接地故障保护的灵敏度。

根据《工业与民用配电设计手册》(第三版)，变压器的负序阻抗等于正序阻抗。Y, yn0 连接的变压器的零序阻抗比正序阻抗大得多，其值由制造厂通过测试提供；D, yn11 连接的变压器的零序阻抗如果没有测试数据时，可取其值等于正序阻抗值，即相阻抗。

导体截面按照低压侧最大单相短路(包括单相接地故障)电流去校验，因此如果电缆选择截面适用于 D, yn11 连接的话，一定也会适用于 Y, yn0 连接。

4.3 关于干式变压器和油浸变压器的问题

03D201-4 图集对于 $630 \text{ kV}\cdot\text{A}$ 及以上变压器的低压侧中性点接地导体截面的选择，简单地套用 99D201-2 图集是不妥的。参照本文上面的校验可以看出，两者还是有较大差别的，工程应用中尤其需要注意。

4.4 两种接地方式对接地导体截面的影响

图 1 的系统接地方式是参考《接地装置安装》(03D501-4) 图集的做法。其主要依据《建筑电气工程施工质量验收规范》(GB 50303-2002) 第 5.1.2 条“接地装置引出的接地干线与变压器的低压侧中性点直接连接”的规定。

图 2 的系统接地方式参考《低压电气装置的设计安装和检验》(第二版)，以及《低压电气装置第 1 部分：基本原则、一般特性评估和定义》(GB/T 16895.1-2008/IEC 60364-1:2005) 和《低压电气装置第 4-44 部分：安全防护 电压干扰和电磁干扰防护》(IEC 60364-4-44-2007) 两个标准。该标准对多电源系统接地的实施有严格的要求，它不允许在变压器室或发电机室内将中性点就地直接接地，还规定自变压器(或发电机)中性点引出的 PEN 线(或 N 线)必须绝缘，并只能在低压主配电盘(柜)内与接地的 PE 母排连接而实现系统的单点接地，在这以外，同一建筑物内中性线不得再在其他处接地，不然中性线电流将通过不期望的并联通路返回电源，这部分中性线电流被称作杂散电流，这部分杂散电流可能会引起火灾、腐蚀和电磁干扰等危害。

从图 1 和图 2 比较来看，故障情况下，图 1 的单相短路电流会通过变压器低压侧中性点接地导体返回变压器中性点；而图 2 中，接地导体按照实际工程做法是分为两部分的，其中连接母排是用于连接 PE 母排与 N 母排，应不小于表 5 或表 6 中按照热稳定校验计算的导体截面。

表5 S9系列变压器(D, yn11连接)低压侧中性点接地导体截面的校验

Tab. 5 Validation of grounding conductor of neutral point at low voltage side of S9 transformer (in D, yn11 connection)

变压器容量 (kV·A)	阻抗电压 (%)	铜母线规格 (mm)	短路点相保阻抗		单相短路电流 I_d (kA)	电缆热稳定校验 $k=115$ $t=0.6s$ (mm ²)	BV 电线 VV 电缆 (mm ²)	校验结果	导体热稳定校验 $k=60$ $t=0.6s$ (mm ²)	镀锌扁钢 (mm ²)	校验结果
			相保电阻 (mΩ)	相保电抗 (mΩ)							
200	4	4 (40×4)	11.14	33.01	6.32	42.54	1×50	通过	81.53	25×4	通过
250	4	4 (50×5)	8.54	26.85	7.81	52.59	1×70	通过	100.80	40×4	通过
315	4	4 (63×6.3)	6.36	21.80	9.69	65.25	1×70	通过	125.07	40×4	通过
400	4	3 (80×6.3) + 1 (63×6.3)	4.73	17.69	12.02	80.95	1×95	通过	155.15	40×4	通过
500	4	3 (80×8) + 1 (63×6.3)	3.65	14.64	14.58	98.20	1×120	通过	188.22	40×5	通过
630	4.5	3 (80×8) + 1 (63×6.3)	2.89	13.42	16.03	107.98	1×150	较大	206.96	50×5	通过
800	4.5	3 (100×8) + 1 (80×8)	2.16	11.06	19.52	131.49	1×120	较小	252.03	50×5	较小
1 000	4.5	3 (125×10) + 1 (80×8)	1.89	9.20	23.42	157.74	1×150	较小	302.33	50×5	较小
1 250	4.5	3×2 (100×10) + 1 (100×10)	1.40	7.81	27.72	186.73	1×185	较小	357.91	63×5	较小
1 600	4.5	3×2 (125×10) + 1 (125×10)	1.05	6.48	33.51	225.70	1×240	通过	432.59	80×5	较小
2 000	4.5	3×2 (125×10) + 1 (125×10)	0.85	5.60	38.82	261.48	1×240	较小	501.17	100×5	较小

表6 SC9系列变压器(D, yn11连接)低压侧中性点接地导体截面的校验

Tab. 6 Validation of grounding conductor of neutral point at low voltage of SC9 transformer (in D, yn11 connection)

变压器容量 (kV·A)	阻抗电压 (%)	铜母线规格 (mm)	短路点相保阻抗		单相短路电流 I_d (kA)	电缆热稳定校验 $k=115$ $t=0.6s$ (mm ²)	BV 电线 VV 电缆 (mm ²)	校验结果	导体热稳定校验 $k=60$ $t=0.6s$ (mm ²)	镀锌扁钢 (mm ²)	校验结果
			相保电阻 (mΩ)	相保电抗 (mΩ)							
200	4	4 (40×4)	9.22	31.52	6.70	45.12	1×50	通过	86.47	25×4	通过
250	4	4 (50×5)	6.35	25.62	8.33	56.14	1×70	通过	107.60	40×4	通过
315	4	4 (63×6.3)	5.12	20.45	10.44	70.30	1×70	较小	134.74	40×4	通过
400	4	3 (80×6.3) + 1 (63×6.3)	3.71	16.33	13.14	88.50	1×95	通过	169.62	40×4	较小
500	4	3 (80×8) + 1 (63×6.3)	2.86	13.24	16.25	109.43	1×120	通过	209.74	40×5	较小
630	4	3 (80×8) + 1 (63×6.3)	2.28	10.66	20.18	135.94	1×150	通过	260.56	50×5	较小
800	6	3 (100×8) + 1 (80×8)	1.73	12.62	17.27	116.32	1×120	通过	222.94	50×5	通过
1 000	6	3 (125×10) + 1 (80×8)	1.29	10.24	21.31	143.51	1×150	通过	275.06	50×5	较小
1 250	6	3×2 (100×10) + 1 (100×10)	0.99	8.34	26.18	176.37	1×185	通过	338.03	63×5	较小
1 600	6	3×2 (125×10) + 1 (125×10)	0.74	6.66	32.84	221.18	1×240	通过	423.93	80×5	较小
2 000	6	3×2 (125×10) + 1 (125×10)	0.59	5.47	40.00	269.44	1×240	较小	516.42	100×5	较小
2 500	6	3×2 (125×10) + 1 (125×16)	0.46	4.52	48.46	326.40	1×300	较小	625.61	80×8	通过

另外,图2中的单相短路电流通过PE母排、连接母排以及N母排返回变压器中性点,不流经PE母排和总等电位箱MEB之间的接地导体,此段接地导体不承受短路电流,只需要满足系统接地和保护接地传导电位功能即可,因此截面选择只需考虑机械强度及环境的腐蚀程度,可按接地装置的条件选择。

参考文献

1 中国航空工业规划设计研究院 组编. 工业与民用

配电设计手册. 第三版. 北京: 中国电力出版社, 2005: 155, 163.

2 王厚余. 低压电气装置的设计安装和检验. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2007: 7, 8.

3 刘迪先, 刘敏. 对民用建筑中变电站及变压器接地的探讨. 建筑电气, 2007 (1): 8-11.

4 王厚余. 变电所的系统接地和杂散电流. 建筑电气, 2007 (9): 4-7.

2009-10-07 来稿

2009-11-24 修回