

# 水轮发电机中性点接地装置选型分析

何伟,刘云平,罗永刚,黄智欣,陈玉红

(东方电气集团东方电机有限公司,四川 德阳 618000)

**摘要:** 水轮发电机中性点接地装置选型需要考虑定子接地故障电流、故障点暂态过电压和位移电压等。针对某水电站中性点装置的两种接地装置,定量分析对比参数调节对接地点故障电流、故障电流中阻性与容性成分的比值以及中性点位移电压放大系数等关键参数的影响。通过对比得出:案例中高阻抗变压器方案仅能在中性点位移电压较小时,以放大位移电压为代价来降低接地故障电流,调节效果是单向的;而并联电抗方案的参数调节是双向的,相比高阻抗变压器方案其现场调节的灵活性更好。

**关键词:** 水轮发电机;中性点装置;并联电抗;高阻抗;故障电流;位移电压;暂态过电压

中图分类号: TM312 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)03-0059-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.03.014

## Analysis on Type Selection of Hydro-generator Neutral Grounding Device

He Wei, Liu Yunping, Luo Yonggang, Huang Zhixin, Chen Yuhong

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to control the grounding current, transient overvoltage and displacement voltage, the neutral grounding device is needed in hydropower station. The fault current in grounding point, the reactance and impedance proportion in fault current, the amplification factor of displacement voltage of neutral point between grounding devices with high impedance and shunt reactance in a hydropower station are compared. The calculations are as follows: in this case, the high impedance scheme can reduce the fault current at the low displacement voltage, but it increases the displacement voltage too, and the adjustment is unidirectional, while the adjustment of shunt reactance scheme is bidirectional, which has better flexibility in the site adjustment.

**Key words:** hydro-generator; neutral grounding device; shunt reactance; high impedance; fault current; displacement voltage; transient overvoltage

## 0 引言

大型水轮发电机均设有中性点接地装置,其主要目的:一是降低定子线圈一点接地故障下的接地故障电流,防止造成定子铁心的大面积损坏;二是限制故障点暂态过电压和传递过电压,避免损坏绝缘。根据相关研究结果,要求接地故障电流的阻性分量大于等于容性分量,以保证接地暂态过电压小于2.6倍的相电势<sup>[1]</sup>。中性点接地装置选型时,一般按该2个电流分量相等进行参数计算。

近年来,随着水轮发电机容量不断增加,电压和回路电容也不断增大,导致电机电容电流过大,必须

依靠中性点接地装置提供感性电流予以补偿以降低接地点故障电流<sup>[2]</sup>。而部分机组的运行数据和相关的研究表明,中性点接地装置提供补偿感性电流之后,会导致正常运行时电机中性点位移电压出现放大趋势,放大倍数约等于电容电流与期望的接地点故障电流的比值。虽然中性点位移电压产生的根源是电机三相回路电容的不平衡,但是追求过小的接地点故障电流会加剧中性点位移电压放大现象,导致产生较大的中性点位移电压,甚至超过10%相电势的标准允许值。

## 1 中性点接地装置主要参数计算

### 1) 某大型水轮发电机的参数

发电机额定电压  $U_N = 24 \text{ kV}$ ;  
发电机单相对地电容  $C_g = 3.53 \text{ } \mu\text{F}$ ;  
接地点故障电流  $I_k = 25 \text{ A}$ 。

2) 参数计算

发电机电容电流为

$$\dot{I}_{cf} = j\sqrt{3}U_N\omega C = j55.3 \text{ A} \quad (1)$$

接地点故障电流为

$$\dot{I}_k = \frac{25}{\sqrt{2}} + j\frac{25}{\sqrt{2}} = 17.7 + j17.7 \text{ A} \quad (2)$$

中性点接地装置一次侧电流为

$$\dot{I}_{n1} = \dot{I}_k - \dot{I}_{cf} = 17.7 - j37.6 \text{ A} \quad (3)$$

$$I_{n1} = \sqrt{17.7^2 + 37.6^2} = 41.58 \text{ A} \quad (4)$$

等效至一次侧的中性点接地装置阻抗为

$$\dot{R}_{n1} = \frac{U_N I \sqrt{3}}{I_{n1}} = 141.6 + j301.6 \text{ } \Omega \quad (5)$$

接地变压器容量为

$$S \geq \frac{U_N \cdot I_{n1}}{4.7} = 212.3 \text{ kVA} \quad (6)$$

接地变压器容量取值为

$$S = 225 \text{ kVA} \quad (7)$$

从上面计算式可以看出,只要发电机基本参数和接地故障电流确定,中性点接地装置等效至一次侧的参数就已经确定了。不同型式的装置,其参数选择的区别在于二次侧电压(或接地变压器变比)的选取以及二次侧回路阻抗的实现方式。

2 中性点接地方案

应用于大型水轮发电机的中性点接地方案主要有两种:高阻抗变压器方案和并联电抗方案<sup>[1-3]</sup>。

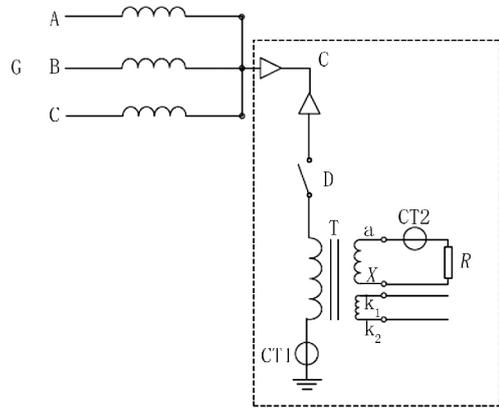
1) 高阻抗变压器方案

高阻抗变压器方案接线原理如图1所示,中性点经二次侧带负载电阻的接地变压器接地。当发电机发生单相接地故障时,在定子绕组一点接地继电保护的配合下瞬时切除故障,防止定子铁心受损坏。中性点接地装置包括连接电缆、隔离开关、接地变压器、负载电阻、电流互感器、柜体、相关附件以及所有必需的内部连接等。中性点装置的电阻由变压器自身电阻和外接串联电阻组成,而电抗由高阻抗变压器自身提供。

2) 并联电抗方案

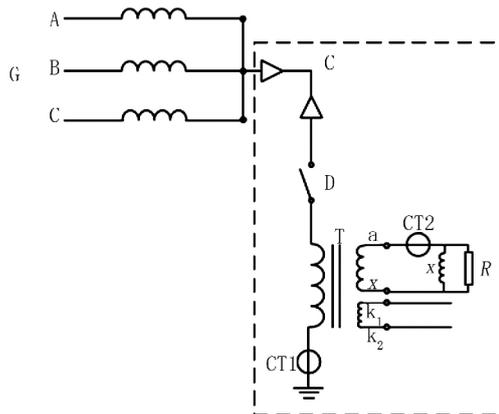
并联电抗方案接线原理如图2所示。中性点经

二次侧带负载电阻和并联电抗的接地变压器接地,当发电机发生单相接地故障时,保证在定子绕组一点接地继电保护的配合下瞬时切除故障,防止定子铁心受损坏。中性点接地装置包括连接电缆、隔离开关、接地变压器、负载电阻、并联电抗、电流互感器、柜体、相关附件、所有必需的内部连接等。接地变压器提供部分电阻和电抗,外接的电阻和电抗并联回路提供剩余部分。



G - 发电机; C - 单芯电缆; D - 隔离开关; T - 接地变压器; CT1、CT2 - 电流互感器; R - 负载电阻

图1 高阻抗变压器方案



G - 发电机; C - 单芯电缆; D - 隔离开关; T - 接地变压器; CT1、CT2 - 电流互感器; R - 负载电阻; X - 并联电抗

图2 并联阻抗变压器方案

3 两种方案接地变压器和二次侧元件参数

两种方案接地变压器和二次侧元件参数及计算见表1。

由表1数据可以看出,两种方案的接地装置均能计算得到合适的参数配置,而且等效至一次侧的参数完全一致。

表1 两种方案接地变压器和二次侧参数对比

参数	计算方法	并联电抗方案	高阻抗变压器方案
二次侧电压 $U_2/V$		500	1000
变比 $K$	$U_N/\sqrt{3}U_2$	27.71	13.86
二次侧阻抗 $\dot{R}_{n2}/\Omega$	$\dot{R}_{n1}/K^2$	0.184 + j0.393	0.737 + j1.57
变压器容量 $S/kVA$		225	225
负载损耗 $P/W$	按经验	3400	3400
变压器电阻 电压百分比 $R_1/\%$	$P/S$	1.51	1.51
变压器电阻 $R_1/\Omega$	$P/(S/\sqrt{3}U_2)^2$	0.05	0.201
变压器电抗 电压百分比 $X_1/\%$		3.7(按标准 3%~5%)	11.78 $X_1(S/\sqrt{3}U_2)^2/S$
变压器电抗 $X_1/\Omega$		0.123 $X_1\%S$	1.57 ( $\dot{R}_{n2}$ 的虚部)
变压器阻抗 电压百分比 $Z_1/\%$	$\sqrt{R_1\%^2 + X_1\%^2}$	4	11.88
变压器阻抗 $Z_1/\Omega$	$R_1 + jX_1$	0.05 + j0.123	0.201 + j1.57
外接阻抗 $Z_{ad}/\Omega$	$\dot{R}_{n2} - \dot{Z}_1$	0.134 + j0.27	0.536
外接电阻 $R_{ad}/\Omega$		0.675	0.536
并联电抗 $X_{ad}/\Omega$		0.336	
并联电抗电感 值 $L_{ad}/mH$		1.07	

#### 4 两种方案参数调节对短路电流和中性点偏移的影响分析

中性点接地装置参数调节的需求主要基于两点:

1) 回路电容、装置参数计算值与实际运行值可能存在差异,需要根据实际运行情况对参数进行调整。

2) 如果运行过程中发生了较为严重的中性点位移现象,可以通过调节装置参数,降低位移电压放

大倍数,在一定程度上降低中性点位移电压;反之,如果中性点位移电压控制效果很好,可以通过调整装置参数进一步减小接地故障电流。

中性点装置参数调节需要保证:

1) 接地故障电流中的阻性分量大于等于容性分量;

2) 接地故障电流不超过 25 A。

中性点装置接入后,中性点位移电压放大系数计算公式为

$$K = \frac{|\dot{U}_{ON}|}{|\dot{U}_{ON}|} = \frac{|j\omega C_{\Sigma}|}{|j\omega C_{\Sigma} + \dot{Y}_{n1}|} \quad (8)$$

式中: $C_{\Sigma}$ 为三相回路对地总电容; $\dot{Y}_{n1}$ 为等效至一次侧的中性点接地装置导纳,其值按变比  $K$  的平方与等效至二次侧的导纳  $\dot{Y}_{n2}$  成正比。

下面按照  $\pm 15\%$  的调节范围,对两种方案参数调节对地点故障电流、故障电流中阻性与容性成分的比值以及中性点位移电压放大系数等关键参数的影响进行定量分析对比。

##### 4.1 高阻抗变压器方案参数调节

高阻抗变压器方案参数调节的计算结果见表2。

表2 高阻抗变压器方案参数调节计算

外接电阻 调节比例/%	接地故障 /A	故障电流阻性 与容性分量比值	位移电压 放大系数
85	23.01	1.012	2.403
90	23.67	1.010	2.336
95	24.32	1.007	2.273
100	25.00	1.000	2.214
105	25.61	0.997	2.159
110	26.23	0.991	2.108
115	26.85	0.984	2.060

从表2数据可以看出,由于受故障电流中阻性与容性分量比值的限制,高阻抗变压器方案二次侧外接电阻仅能朝偏小值调节。调节结果使位移电压放大系数增加和接地故障电流减小。也就是说,高阻抗变压器方案仅能实现在中性点位移电压较小时,以放大位移电压为代价从而降低接地故障电流。而当中性点位移电压较大时,并不能通过参数调节达到降低位移电压的目的,其调节效果是单向的。

##### 4.2 并联电抗方案参数调节

并联电抗方案在不同外接电阻和并联电感参数调节下,计算得到的接地故障电流值见表3,故障电

流中阻性与容性分量的比值见表4,位移电压放大系数见表5。

表3中,灰色底纹区域表示接地故障电流满足不大于25 A的参数调节范围,加粗字体区域对应表4中可选但接地故障电流大于25 A的参数调节范围。

由表4可以得知,由于受故障电流阻性与容性分量比值的限制,外接电阻和并联电感的调节范围仅能在表4中的灰色底纹区域选取。

将表3和表4的参数选择区域整合到表5,并结合位移电压放大系数结果,可以得出以下结论:

1)当中性点位移电压较大时,可以通过选择

表5中字体加粗区域的参数配置,以减小中性点位移电压,但代价是接地故障电流会超过25 A。中性点位移电压最大可减少13%,此时接地故障电流增大至28.6 A。

2)当中性点位移电压较小时,可以通过选择表5灰色底纹区域的参数配置,以提高中性点位移电压为代价,减小接地故障电流。接地故障电流最小可调节至20.8 A,此时中性点位移电压增大至19.8%。

因此,并联电抗方案的参数调节是双向的,相比高阻抗变压器方案其现场调节的灵活性更好。

需要说明的是,上述计算仅是针对调节比例在

表3 不同参数下接地故障电流计算结果(并联电抗方案)

外接电阻 调节比例/%	并联电感不同调节比例下故障电流/A										
	85%	88%	91%	94%	97%	100%	103%	106%	109%	112%	115%
85	23.64	24.22	<b>24.80</b>	<b>25.37</b>	<b>25.94</b>	<b>26.50</b>	<b>27.04</b>	<b>27.58</b>	<b>28.1</b>	<b>28.61</b>	29.10
88	23.27	23.85	24.44	<b>25.02</b>	<b>25.59</b>	<b>26.15</b>	<b>26.7</b>	<b>27.24</b>	<b>27.76</b>	28.27	28.77
91	22.92	23.61	24.1	24.68	<b>25.26</b>	<b>25.82</b>	<b>26.38</b>	<b>26.92</b>	<b>27.45</b>	27.96	28.47
94	22.59	23.19	23.78	24.37	24.95	<b>25.51</b>	<b>26.07</b>	26.62	27.15	27.67	28.18
97	22.29	22.88	23.48	24.07	24.65	<b>25.23</b>	25.79	26.34	26.88	27.4	27.92
100	22.00	22.60	23.20	23.79	24.38	24.96	25.53	26.08	26.62	27.15	27.66
103	21.72	22.33	22.93	23.53	24.12	24.71	25.28	25.83	26.38	26.91	27.43
106	21.47	22.07	22.68	23.29	23.88	24.47	25.04	25.6	26.15	26.69	27.21
109	21.22	21.83	22.45	23.05	23.65	24.24	24.82	25.38	25.94	26.47	27.00
112	20.99	21.61	22.22	22.83	23.44	24.03	24.61	25.18	25.73	26.28	26.8
115	20.77	21.39	22.01	22.63	23.23	23.83	24.41	24.98	25.54	26.09	26.62

表4 不同参数下故障电流中阻性和容性分量比值(并联电抗方案)

外接电阻 调节比例/%	并联电感不同调节比例下阻性和容性分量比值										
	85%	88%	91%	94%	97%	100%	103%	106%	109%	112%	115%
85	1.49	1.39	1.32	1.25	1.19	1.14	1.1	1.06	1.03	1.00	0.97
88	1.45	1.36	1.28	1.21	1.16	1.11	1.07	1.03	1.00	0.97	0.94
91	1.42	1.32	1.25	1.18	1.13	1.08	1.04	1.00	0.97	0.94	0.92
94	1.39	1.29	1.22	1.15	1.1	1.05	1.01	0.98	0.95	0.92	0.89
97	1.36	1.27	1.19	1.13	1.07	1.03	0.99	0.95	0.92	0.89	0.87
100	1.33	1.24	1.16	1.1	1.05	1.00	0.97	0.93	0.90	0.87	0.85
103	1.30	1.21	1.14	1.08	1.03	0.98	0.94	0.91	0.88	0.85	0.83
106	1.28	1.19	1.12	1.06	1.01	0.96	0.92	0.89	0.86	0.83	0.81
109	1.25	1.17	1.1	1.04	0.99	0.94	0.90	0.89	0.84	0.82	0.79
112	1.23	1.15	1.08	1.02	0.97	0.92	0.89	0.85	0.82	0.80	0.78
115	1.21	1.13	1.06	1.00	0.95	0.91	0.87	0.84	0.81	0.78	0.76

表5 不同参数下位移电压放大系数(并联电抗方案)

外接电阻 调节比例/%	并联电感不同调节比例下位移电压放大系数										
	85%	88%	91%	94%	97%	100%	103%	106%	109%	112%	115%
85	2.34	2.28	2.23	<b>2.18</b>	<b>2.13</b>	<b>2.09</b>	<b>2.04</b>	<b>2.01</b>	<b>1.97</b>	<b>1.93</b>	1.90
88	2.38	2.32	2.26	<b>2.21</b>	<b>2.16</b>	<b>2.11</b>	<b>2.07</b>	<b>2.03</b>	<b>1.99</b>	1.96	1.92
91	2.41	2.35	2.29	2.24	<b>2.19</b>	<b>2.14</b>	<b>2.10</b>	<b>2.05</b>	2.01	1.98	1.94
94	2.45	2.38	2.33	2.27	2.22	<b>2.17</b>	<b>2.12</b>	2.08	2.04	2.00	1.96
97	2.48	2.42	2.35	2.30	2.24	<b>2.19</b>	2.14	2.10	2.06	2.02	1.98
100	2.51	2.45	2.38	2.32	2.27	2.22	2.17	2.12	2.08	2.04	2.00
103	2.55	2.48	2.41	2.35	2.29	2.24	2.19	2.14	2.10	2.05	2.02
106	2.58	2.5	2.44	2.37	2.32	2.26	2.21	2.16	2.11	2.07	2.03
109	2.61	2.53	2.46	2.4	2.34	2.28	2.23	2.18	2.13	2.09	2.05
112	2.63	2.56	2.49	2.42	2.36	2.30	2.25	2.20	2.15	2.10	2.06
115	2.66	2.58	2.51	2.44	2.38	2.32	2.26	2.21	2.16	2.12	2.08

±15%范围内电阻和电感参数调节的趋势计算,因受限于元件制造难度,电阻和电感实际的可调节范围和抽头数量并不会按表中计算点设计,调度幅度有限。

从上面计算结果可以看出,当发生严重的中性点电压位移时,通过调节中性点接地装置的参数以期减少中性点位移电压的幅度是有限的,只能作为一种辅助措施。根本的措施还是需要对三相回路电容平衡性进行严格限制,或者在回路适当位置通过电容调节来改善三相回路电容的平衡性。

## 5 结 语

两种接地方案均能计算得到合适的参数配置,而且等效至一次侧的参数完全一致。

案例中,高阻抗变压器方案仅能实现在中性点位移电压较小时,以放大位移电压为代价来降低接地故障电流。而当中性点位移电压较大时,并不能通过参数调节实现降低位移电压的目的,其调节效

果是单向的。而并联电抗方案的参数调节是双向的,相比高阻抗变压器方案其现场调节的灵活性更好。具体的案例需要具体分析,所提分析方法有助于其他机组的中性点装置选型。

### 参考文献

- [1] 沈兵,关鹤,刘祖高.大型水轮发电机中性点接地变压器二次侧电阻并联电抗器的探讨[J].电工技术,2018(5):139-140.
- [2] 乔照威,李洪超.发电机中性点接地装置阻抗参数设计[J].上海大中型电机,2016(2):16-18.
- [3] 张琦雪,曾祥君,徐金,等.大型发电机中性点组合型接地方式的分析与探讨[J].电力自动化装置,2018,38(11):217-221.

作者简介:

何伟(1985),工程师,主要从事水轮发电机设计工作;

刘云平(1986),工程师,主要从事水轮发电机和智慧产品设计工作;

罗永刚(1979),高级工程师,主要从事水轮发电机设计工作。

(收稿日期:2019-02-13)

# 欢迎订阅

# 《四川电力技术》