

# 特高压直流输电工程换流变压器抽头级数确定方法

赵辰鹏, 马东

(国核电力规划设计研究院, 北京 100095)

**摘要:** 换流变压器参数是直流输电工程设计的重要部分, 为换流站的接线及布置方案论证提供支持, 其合理性关系整个直流输电系统的运行特性和技术经济指标。以呼盟—山东  $\pm 800$  kV 直流输电工程为例, 根据其对系统条件、主回路参数以及运行特性等的要求, 应用新公式对换流变压器抽头级数的计算过程进行了详细论述, 所提计算方法为首次应用, 并通过与实际取值比较验证了所提方法的合理性。

**关键词:** 高压直流输电系统; 换流变压器; 最大空载电压; 最小空载电压; 抽头级数

**Abstract:** The parameters of converter transformer are an important part of the design of HVDC project, which provides the support for the main connection and layout of converter substation, and its rationality will influence the operating characteristics and technological economical index of whole HVDC system. Taking Humeng—Shandong  $\pm 800$  kV HVDC project for example, according to the requirements to system condition, main circuit parameters and operating characteristics, the calculation process of tap series of converter transformer is discussed in detail based on self-compiled program. The proposed calculation method is applied to HVDC project for the first time, and the rationality of the proposed method is verified by the comparison with the actual values.

**Key words:** HVDC transmission system; converter transformer; maximum no-load voltage; minimum no-load voltage; tap series

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0029-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.007

## 0 引言

特高压直流系统换流变压器的参数设计是特高压直流输电系统设计的主要内容, 是系统运行控制和工程成套设计的基础和关键。其主要内容包括: 短路阻抗、最大最小空载直流电压、触发角、熄弧角、抽头级数等。为其他研究, 如无功功率补偿及控制、交流滤波器以及系统过电压与绝缘配合等提供基本条件。

在主回路参数研究中, 换流变压器参数是最重要的内容之一, 这是由于换流变压器处在交流电与直流电互相变换的核心位置, 设备制造技术较复杂, 设备费用昂贵。另外换流变压器的可靠性及可用性对整个系统来说也是至关重要的。

以呼盟—山东  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程的交流系统条件和直流系统性能要求为基础, 依据特高压直流输电理论, 对换流变压器参数进行设计, 如额定空载电压、最大和最小空载电压、调压抽头级数等, 重点研究换流变压器抽头级数。最终给出计

算结果, 并与实际应用值相比较验证了其正确性, 为该特高压直流工程后续各项研究的顺利开展提供依据, 也为今后高压直流工程研究提供参考。

## 1 换流站基础条件

根据特高压直流输电工程的技术条件和目前的制造水平, 中国一般采用每极两个 12 脉动换流器 (400 kV + 400 kV) 串联的接线方式, 如图 1 所示。

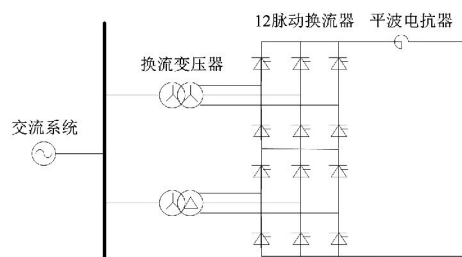


图1 12脉动换流器原理接线图

这种换流器接线方式使得系统的运行方式灵活多变, 主要有7种运行方式: 1) 完整双极运行方式, 每站每极两个12脉动换流器均串联投入运行; 2) 1/2双极

运行方式,每站每极均只有一个12脉动换流器投入运行;3)完整单极大地回路运行方式,一极停运,另一极有两个12脉动换流器串联运行,由大地返回;4)1/2单极大地回路运行方式,一极停运,另一极只有一个12脉动换流器运行,由大地返回;5)完整单极金属回路,一极停运,另一极有两个12脉动换流器串联运行,由金属回路返回;6)1/2完整单极金属回路,一极停运,另一极只有一个12脉动换流器运行,由金属回路返回;7)一极完整,另一极1/2不平衡运行方式,双极中的一极有两个12脉动换流器串联运行,另一极只有一个12脉动换流器运行。

在进行换流变压器抽头级数计算时,抽头级数最大值计算选用完整双极运行方式,抽头级数最小值计算选用完整单极金属回路运行方式;其中以完整双极平衡运行方式且功率正送时的常规运行方式计算系统参数额定值。

## 2 计算所需基础参数

### 2.1 交流系统基础参数

整流侧及逆变侧的交流系统电压及运行范围见表1。

表1 交流系统电压

换流站	整流侧	逆变侧
额定运行电压/kV	535	525
最高稳态电压/kV	550	550
最低稳态电压/kV	500	500
最高极端电压/kV	550	550
最低极端电压/kV	475	475

### 2.2 直流系统基础参数

#### 1) 直流电压

正常全压运行方式下的直流电压为 $\pm 800$  kV,正常半压运行方式下直流电压为 $\pm 400$  kV,定义在线路端极母线与中性点之间。每极都应具有在直流降压至70%~100%正常直流电压内连续运行的能力。

#### 2) 线路参数

逆变侧换流器、换流变压器容量设计与直流电路电阻密切相关。在完整双极平衡运行方式下,整流侧直流电压为额定值800 kV,在额定直流时,逆变侧直流电压完全由直流线路电阻决定,进而决定逆变侧的换流容量。

该工程直流线路导线型号为LGJ-6×1250,

线路长度约1720 km;极端最高温度为40℃,极端最低温度为-25℃,换流变压器参数计算中采用的直流电阻值见表2。

表2 直流线路电阻

所采用的	电阻/ $\Omega$		
	最小值 $R_{dmin}$	额定值 $R_{dN}$	最大值 $R_{dmax}$
直流线路电阻( $R_d$ )	5.36	6.57	14.22

### 3) 控制系统参数

表3 直流控制参数

参数	描述	范围/值
$P_{dN}/MW$	额定功率(双极/单级)	8000/4000
$I_{dN}/A$	额定直流电流	5000
$\alpha_N/(\circ)$	额定触发角	15
$\Delta\alpha/(\circ)$	$\alpha$ 的稳态控制范围	$\pm 2.5$
$\alpha_{min}/(\circ)$	控制系统的最小限制角	5
$\gamma_N/(\circ)$	额定熄弧角	17
$\Delta\gamma/(\circ)$	$\gamma$ 的稳态控制范围	$+ 2.5$
	分接头变化一档	$\pm 1.25\%$
$\Delta U_{d(R \cdot I)}$	对应的整流侧直流电压变化范围	$U_{dRN}/2$

### 4) 设备和测量误差

根据目前特高压设备的生产能力,在换流变压器参数设计中考虑设备制造公差和测量误差,列于表4。

表4 设备和测量误差

参数	描述	误差
$d_x$	正常直流电压运行范围内换流变压器相对感性压降的最大制造公差( $\delta d_x$ )	$\pm 5\% I_{dN}$
$U_d$	测量误差 $\delta U_{dmeas}$	$\pm 1\% U_{dRN}$
$I_d$	测量误差 $\delta I_{dmeas}$	$\pm 0.5\% I_{dN}$
$\gamma$	测量误差 $\delta_\gamma$	$\pm 1.0^\circ$
$\alpha$	测量误差 $\delta_\alpha$	$\pm 0.5^\circ$
$U_{dio}$	电容分压式电压互感器的测量误差 $\delta_{vdio}$	$\pm 1.0\% U_{dioN}$

### 5) 换流器直流电压降

依据以往工程经验,两端换流站每个12脉动换流器的相对阻性压降 $d_r$ 分别为0.3%、0.4%,相对感性压降 $d_x \approx \frac{1}{2}u_k$ ,换流阀前向压降 $U_T$ 分别为0.3 kV、0.4 kV。

### 6) 换流变压器短路阻抗

该工程整流侧换流站换流变压器的短路阻抗 $u_k$ 在换流变压器参数设计中采用20%,逆变侧采用19%计算。

### 3 计算所需中间参数

#### 3.1 额定空载直流电压计算

整流侧、逆变侧额定直流空载电压  $U_{\text{dioNR}}$ 、 $U_{\text{dioNI}}$  分别按照式(1)、式(2)进行计算,整流侧额定触发角  $\alpha_N$  选取为  $15^\circ$ ,逆变侧额定熄弧角  $\gamma_N$  为  $17^\circ$ 。

$$U_{\text{dioNR}} = \frac{\frac{U_{\text{DNR}}}{n} + U_{\text{TR}}}{\cos\alpha_N - (d_{\text{xNR}} + d_{\text{rNR}})} \quad (1)$$

$$U_{\text{dioNI}} = \frac{\frac{U_{\text{dNR}} - R_{\text{dN}} \times I_{\text{dN}}}{n} - U_{\text{TI}}}{\cos\gamma_N - (d_{\text{xNI}} - d_{\text{rNI}})} \quad (2)$$

式中:  $U_{\text{dN}}$  为直流正常运行电压;  $n$  为阀组数;  $I_{\text{dN}}$  为额定直流电流;  $R_{\text{dN}}$  为直流电阻;  $d_{\text{x}}$  和  $d_{\text{r}}$  分别为换流变压器感性和阻性压降;  $U_{\text{T}}$  为换流阀通态压降,下标 N 表示额定, R 表示整流侧, I 表示逆变侧。

#### 3.2 换流变压器阀侧空载直流电压计算

在直流空载电压计算时,需要考虑各种测量误差、设备制造公差以及触发角、熄弧角的调整范围等因素,根据式(3)、式(4)可计算出两侧  $U_{\text{dio}}$  的上、下限值 ( $U_{\text{diomax}}$ 、 $U_{\text{diomin}}$ )。

$$U_{\text{dioR}} = \frac{\frac{U_{\text{dR}}}{n} + U_{\text{TR}} + (d_{\text{xR}} + d_{\text{rR}}) \times \frac{I_{\text{d}}}{I_{\text{dN}}} \times U_{\text{dioNR}}}{\cos\alpha} \quad (3)$$

$$U_{\text{dioI}} = \frac{\frac{U_{\text{dR}} - R_{\text{d}} \times I_{\text{d}}}{n} - U_{\text{TI}} + (d_{\text{xI}} - d_{\text{rI}}) \times \frac{I_{\text{d}}}{I_{\text{dN}}} \times U_{\text{dioNI}}}{\cos\gamma} \quad (4)$$

换流变压器分接开关最小抽头级数由最大空载直流电压决定。此时直流全压过负荷运行,直流电流取额定值 1.05 倍时,抽头位置处在最小抽头位置。

分接开关最大抽头级数由单极金属返回、70% 降压运行方式下的最小空载直流电压决定。在降压运行时为保证谐波干扰水平,换流站的无功平衡以及换流站的损耗在所允许的范围内,经常同时也要求降低额定直流电流值。如果直流电压降到 70%, 直流电流也降到 70%, 则直流输送功率为额定直流功率的 49%, 单级输送功率的最小值取其 10%, 并且触发角(或熄弧角)为最大允许角度。取触发角(或熄弧角)为最大允许角度  $40^\circ$ , 若超过  $40^\circ$  则可能增加换流站的造价或降低直流输电某些运行性能的要求。

下面基于系统参数及测量误差,系统控制方式

为整流侧定电流,逆变侧定电压,具体描述换流站阀侧最大、最小空载电压的计算过程。未见文献应用过所提计算方法,此处为首次应用。

当计算  $U_{\text{diomaxR}}$  时,考虑直流电流取额定值 1.1 倍,代入式(3)的相关参数如下:

$$U_{\text{dR}} = U_{\text{dN}} (1 + \delta U_{\text{dmeas}})$$

$$d_{\text{xR}} = d_{\text{xN}} (1 + \delta d_{\text{x}})$$

$$I_{\text{d}} = I_{\text{dN}} (1.05 + \delta I_{\text{dmeas}})$$

$$\alpha = \alpha_N + \Delta\alpha + \delta\alpha$$

当计算  $U_{\text{diominR}}$  时,考虑直流电压降到 70%, 直流电流也降到 70%, 直流输送功率为额定直流功率的 49%, 单级输送功率的最小值取其 10%, 并且触发角为最大允许角度,代入式(3)的相关参数如下:

$$U_{\text{dR}} = U_{\text{dN}} (0.7 - \delta U_{\text{dmeas}})$$

$$d_{\text{xR}} = d_{\text{xN}} (1 - \delta d_{\text{x}})$$

$$I_{\text{d}} = \frac{P_{\text{dN}} \times 49\% \times 10\%}{U_{\text{dN}} (0.7 - \delta U_{\text{dmeas}})}$$

$$\alpha = \alpha_{\text{max}} - \delta\alpha$$

将  $U_{\text{diomaxR}}$  和  $U_{\text{diominR}}$  分别代入式(5)和式(6)并结合式(7)即可得到整流侧换流变压器的最大、最小抽头级数。

当计算  $U_{\text{diomaxI}}$  时,考虑直流电阻取最小值,代入式(4)的相关参数如下:

$$U_{\text{dR}} = U_{\text{dN}} (1 + \delta U_{\text{dmeas}})$$

$$d_{\text{xI}} = d_{\text{xN}} (1 + \delta d_{\text{x}})$$

$$I_{\text{d}} = I_{\text{dN}} (1.05 + \delta I_{\text{dmeas}})$$

$$\gamma = \gamma_N + \Delta\gamma + \delta\gamma$$

$$R_{\text{d}} = R_{\text{dmin}}$$

当计算  $U_{\text{diominI}}$  时,考虑直流电阻最大情况下的单级金属回线降压 70% 运行方式,且单级输送功率为最小值,熄弧角为最大允许角度,代入式(4)的相关参数如下:

$$U_{\text{dR}} = U_{\text{dN}} (0.7 - \delta U_{\text{dmeas}})$$

$$d_{\text{xI}} = d_{\text{xN}} (1 - \delta d_{\text{x}})$$

$$I_{\text{d}} = \frac{P_{\text{dN}} \times 49\% \times 10\%}{U_{\text{dN}} (0.7 - \delta U_{\text{dmeas}})}$$

$$\gamma = \gamma_{\text{max}} - \delta\gamma$$

$$R_{\text{d}} = R_{\text{dmax}}$$

将  $U_{\text{diomaxI}}$  和  $U_{\text{diominI}}$  分别代入式(5)和式(6)并结合式(7)即可得到逆变侧换流变的最大、最小抽头级数。

式中:  $U_{\text{dR}}$  为整流侧直流电压;  $I_{\text{d}}$  为直流电流,其余参

数如前表所列。

## 4 换流变压器抽头级数计算

换流变压器的最大及最小变比  $\eta$  按如下公式计算。

$$\eta_{\max} = \frac{U_{I\max}}{U_{1N}} \times \frac{U_{\text{dioN}}}{U_{\text{diomin}}} \quad (5)$$

$$\eta_{\min} = \frac{U_{I\min}}{U_{1N}} \times \frac{U_{\text{dioN}}}{U_{\text{diomax}}} \quad (6)$$

换流变压器调节开关级数的计算公式为

$$-TC_{\text{step}} = \frac{\eta - 1}{\Delta\eta} \quad (7)$$

这样 换流变压器的有载调压抽头级数范围如下。

换流变压器抽头级数最大值为

$$-TC = \frac{\eta_{\max} - 1}{\Delta\eta} \quad (8)$$

换流变压器抽头级数最小值为

$$+TC = \frac{\eta_{\min} - 1}{\Delta\eta} \quad (9)$$

## 5 换流变压器抽头级数算例分析

以呼盟—山东特高压  $\pm 800$  kV 直流工程为例, 校验上述的计算过程 呼盟直流额定输送功率 8 000 MW 相关参数如表 1 ~ 表 4 所示。按照上述公式计算换流变抽头级数, 结果如表 5 所示, 由表 5 可看出, 所用公式的计算结果与实际应用值基本一致, 验证了所提计算方法的正确性。

表 5 换流变压器抽头级数计算结果

	整流侧		逆变侧	
	计算值	实际应用值	计算值	实际应用值
额定空载电压 $U_{\text{dioN}} / \text{kV}$	231.16	231.16	223.24	223.24
最大空载电压 $U_{\text{diomax}} / \text{kV}$	235.98	—	228.36	—
最小空载电压 $U_{\text{diomin}} / \text{kV}$	180.08	—	178.46	—
最大抽头级数	+25.6	+26	+24.8	+25
最小抽头级数	-6.7	-6	-5.5	-4

## 6 结 论

根据两端换流站交直流系统的参数, 在数学上

推导了换流变压器参数计算新公式, 即最大和最小空载电压, 然后计算出换流变压器抽头级数。最后通过呼盟—山东  $\pm 800$  kV 特高压直流算例验证了所提计算方法的合理性和正确性。

### 参考文献

- [1] Kunder P. Power system stability and control [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 648 - 689.
- [2] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 153 - 167.
- [3] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 10 - 25.
- [4] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [5] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] 牛涛, 钱康, 张英娇.  $\pm 800$  kV 直流输电系统主回路参数研究 [J]. 智能电网, 2013(3): 48 - 52.
- [7] 陈锡磊, 周浩, 沈扬, 等. 溪洛渡—浙西  $\pm 800$  kV/7 500 MW 特高压直流输电工程主回路参数设计 [J]. 电网技术, 2011, 35(12): 26 - 32.
- [8] 王峰, 徐政, 薛英林. 高压直流输电换流变压器参数确定方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 98 - 103.
- [9] 段玉倩, 饶宏, 黎小林. 高压直流输电系统主回路参数稳态特性计算方法 [J]. 电力系统及其自动化, 2007, 31(16): 53 - 57.
- [10] 刘宝宏, 段威扬, 杨志栋, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统主回路参数研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 17 - 21.
- [11] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135 - 140.
- [12] 刘宝宏, 马为民, 段威扬. 三沪直流输电系统主回路参数研究 [J]. 电力建设, 2007, 28(11): 1 - 4.
- [13] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统换流变压器短路阻抗的选择 [J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1628 - 1632.
- [14] 刘志阳, 文俊, 韩民晓. 特高压直流输电稳态参数的分析与计算 [C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会, 2006.
- [15] 刘艳华. 云广直流特高压换流变压器短路阻抗的选择 [C]. 高电压技术, 2006, 32(9): 100 - 102.

作者简介:

赵辰鹏(1981), 高级工程师, 主要研究方向为电力系统前期规划咨询及稳定与控制;

马东(1986), 工程师, 主要从事电力系统输电线路设计工作。  
(收稿日期: 2015-03-17)