

# 高压直流输电系统开路电压的研究

张 烁,李永丽,李博通

(天津大学 电力系统仿真控制教育部重点实验室,天津 300072)

**摘要:** 针对现有高压直流输电系统开路电压公式不适用于计算带直流线路开路试验开路电压的问题,分别对带/不带直流线路开路试验的试验原理及开路电压建立过程进行分析,解释了带直流线路开路试验中开路电压较小的原因,并通过对现有开路电压计算公式进行修正,给出了适用于带直流线路开路试验的开路电压计算公式。所提公式可用以修正直流开路试验电压差值保护整定值,避免了带线路开路试验中电压差值保护的误动。利用 PSCAD 仿真软件搭建  $\pm 500$  kV 高压直流输电系统仿真模型,对所提公式进行了仿真验证。仿真结果证明所提公式具有较高的准确性。

**关键词:** 高压直流输电; 高压直流输电开路试验; 开路电压; 触发角; 直流线路参数; 滤波器; 仿真; 模型

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.015

## 0 引言

高压直流输电因其在远距离、大容量输电方面的优势,近年来在国内得到了大力发展。截至 2013 年底,我国已建成超、特高压直流输电线路 20 余条,高压直流输电正逐渐成为未来我国跨区域大容量输电的重要方式<sup>[1-6]</sup>。

直流开路试验 OLT(Open Line Test)又称空载加压试验(以下简称开路试验),是检测换流阀及直流场设备、直流控制系统、直流输电线路能否正常工作的重要手段。直流系统在设备检修或长时间停运后,都必须通过开路试验才具备正式送电条件<sup>[6-7]</sup>。在开路试验过程中,操作人员通过控制换流器触发角,使测量电压(即开路电压)按一定变化率逐渐升高,并通过观察测量电压能否逼近预设的目标电压来判断各设备的工作状况是否正常。开路试验目标电压根据开路电压理论值选定,因此,开路电压计算公式的准确性对于试验成功与否至关重要。

收稿日期:2014-12-20;修回日期:2015-09-09

根据检测对象的不同,开路试验可分为不带直流线路和带直流线路 2 种。从试验系统结构上看,2 种开路试验的区别仅在于直流线路侧开路点位置不同,不带直流线路开路试验开路点设在直流线路首端,主要用于检测换流阀及直流控制系统的工作状况;带直流线路开路试验的开路点设在直流线路末端,除了检测换流阀及直流控制系统的工作状况外,还可用于检测直流滤波器等直流场设备及直流线路的绝缘水平和耐压能力。对于不带线路开路试验,ABB 公司推导了其开路电压计算公式(以下简称为现有公式),并依此设计了开路试验电压差值保护,保护动作于开路电压测量结果与计算结果之差大于动作门槛值( $\pm 500$  kV 系统的动作门槛值为 150 kV)。而对于带直流线路开路试验,由于目前尚未有机构或个人给出其开路电压的推导公式,因此,在实际试验中也是利用现有公式计算其目标电压。但是根据实际试验结果,带直流线路开路试验的开路电压与不带线路时相比明显减小<sup>[9-10]</sup>,若利用现有公式计算其目标电压,则测量电压与目标电压之间将存在较

## Series resonance analysis based on improved dummy branch method for high-speed railway traction network

WANG Bin, QIU Zhongcai, HAN Xudong, JIANG Xiaofeng, GAO Shibin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A method of series resonance analysis based on the improved dummy branch method is proposed, which equals the non-ideal harmonic voltage source with the combination of equivalent impedance and Norton circuit, replaces the loop impedance matrix with the correlation matrix obtained by the node admittance matrix to analyze the series resonance, and applies the branch method to obtain the branch current response for calculating the series resonance frequency and amplitude to effectively avoid the large dimension of the node admittance matrix. The proposed method is used to analyze the series resonance of high-speed railway traction network and the analytical results show its correctness and effectiveness.

**Key words:** dummy branch method; high-speed railway; series resonance; branch method; electric traction

大差值,可能造成电压差值保护误动,进而闭锁试验系统<sup>[11-13]</sup>。文献[14-15]结合实例,对带直流线路开路试验中测量电压较低的原因及现有公式的适用范围进行详细分析,但并未给出具体的带直流线路开路电压计算公式。文献[16]通过对带直流线路开路试验中线路元件充放电过程进行讨论,给出了带直流线路开路电压计算公式。但所提公式中需要利用线路对地电导等参数,其数值受气候环境影响大,很难应用于工程实际。

鉴于带/不带直流线路开路试验系统仅在是否包含直流线路上存在区别,本文借鉴不带直流线路开路电压公式的推导方法,通过分析直流设备及线路元件对开路电压的影响,确定带直流线路开路电压的稳定条件,并通过对现有不带直流线路开路公式进行修正,给出适用于带直流线路开路试验的开路电压计算公式。利用 PSCAD 仿真软件搭建了直流输电系统的仿真模型,对改进公式进行了仿真验证,仿真结果验证了所提公式的准确性。

## 1 不带直流线路开路试验开路电压公式的推导

超高压直流输电系统多采用 12 脉动换流器,12 脉动换流器由 2 个 6 脉动换流器串联构成,在不带线路开路试验中其开路电压等于 6 脉动换流器的 2 倍,因此,为了简化分析过程,下面以 6 脉动整流器为研究对象进行不带直流线路开路试验开路电压公式推导,其开路试验系统示意图如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

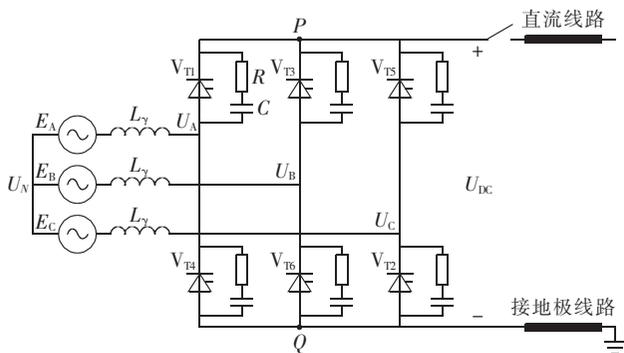


图 1 不带直流线路开路试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of OLT system without DC line

图中,  $E_A$ 、 $E_B$ 、 $E_C$  为换流变压器阀侧三相感应电动势;  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  为换流变压器阀侧三相端电压;  $L_y$  为换相电抗;  $U_{DC}$  为开路电压;  $U_N$  为换流变压器阀侧中性点电压。  $V_{T1}$ — $V_{T6}$  为晶闸管换流阀,换流阀两端并接有 RC 缓冲电路; 阀  $V_{T2}$ 、 $V_{T4}$ 、 $V_{T6}$  阳极共点于 Q 点,称为共阳极阀组;  $V_{T1}$ 、 $V_{T3}$ 、 $V_{T5}$  阴极共点于 P 点,称为共阴极阀组。

假设换流变压器阀侧交流系统三相对称,线电

动势有效值为  $E$ ,根据换流原理,换流器的自然换相点为交流线电压过零点,因此,为了方便描述换流器导通触发角,以线电动势  $E_{CA}$  正向过零点为坐标原点建立坐标系,换流变压器阀侧各相交流相、线电动势的波形图如图 2 所示。

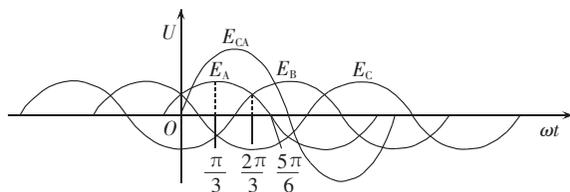


图 2 换流变压器阀侧各相理想电动势波形图

Fig.2 Ideal valve-side electromotive force waveforms of converter transformer

换流变压器阀侧各相感应电动势表达式为:

$$\begin{cases} E_A = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\omega t + 30^\circ) \\ E_B = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\omega t - 90^\circ) \\ E_C = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\omega t + 150^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

由图 1 可知,开路电压  $U_{DC}$  可表示为:

$$U_{DC} = U_P - U_Q \quad (2)$$

由于 Q 点接地,  $U_Q = 0$ , 因此,  $U_{DC} = U_P$ 。又由于直流线路侧开路,  $U_P$  幅值大小仅受换流阀通断状态的影响,在共阴极组任意换流阀导通时满足:

$$U_P = U_x = E_x + U_N \quad x = A, B, C \quad (3)$$

其中,  $x$  表示与导通阀相连的交流侧某相。因此,为了求取  $U_P$  表达式,以下对各换流阀通断期间  $U_P$  的变化情况逐一进行分析。

先以  $V_{T1}$  为例,在  $V_{T1}$  首次导通前,在三相对称电压的作用下, P、Q 2 点的初始电压  $U_P$ 、 $U_Q$  及换流变压器阀侧中性点电压  $U_N$  均等于 0。此时  $V_{T1}$  的阴极电压等于 0,阳极电压等于  $E_A$ ,忽略阀导通/关断固有时间的影响,结合图 2 可知,若换流阀触发角  $\alpha$  小于  $150^\circ$ ,在  $V_{T1}$  触发时刻有  $U_A > 0$ ,  $V_{T1}$  导通,忽略阀上压降,在  $V_{T1}$  导通后,根据式(3)有:

$$U_P = U_A = E_A \quad (4)$$

根据晶闸管导通条件,晶闸管在承受反压后关断,因此,  $V_{T1}$  将导通至其阳极电压单调递减为止。结合式(1),若  $\omega t \in [0^\circ, 60^\circ)$ ,  $E_A$  递增,在此期间触发  $V_{T1}$ ,  $V_{T1}$  导通至  $\omega t = 60^\circ$  时关断,关断后  $V_{T1}$  的阴极电压  $U_P = E_A(60^\circ)$ ; 若  $\omega t \in (60^\circ, 150^\circ]$ ,  $E_A$  递减,在此期间触发  $V_{T1}$ ,  $V_{T1}$  会在导通后随即便因承受反压而关断,关断后  $V_{T1}$  的阴极电压  $U_P = E_A(\alpha)$ 。

根据直流输电换相原理,  $V_{T2}$  在  $V_{T1}$  触发 1/6 工频周期后触发。与  $V_{T1}$  分析过程相同,若触发角小于  $150^\circ$ ,  $V_{T2}$  导通。  $V_{T2}$  导通后,根据其阴、阳极电压相

等有:

$$U_C(\alpha+60^\circ) = E_C(\alpha+60^\circ) + U_N = 0 \quad (5)$$

因此:

$$U_N = -E_C(\alpha+60^\circ) \quad (6)$$

可见,在  $V_{T2}$  导通之后,  $U_N$  不再为 0,且在  $V_{T2}$  导通期间  $U_N$  随  $E_C$  变化。根据图 2,若  $\omega t \in [60^\circ, 120^\circ)$ ,  $E_C$  递减,在此期间触发  $V_{T2}$ ,  $V_{T2}$  将导通至  $\omega t = 120^\circ$  时关断,关断后  $U_N = -E_C(120^\circ) = E_A(60^\circ)$ ;若  $\omega t \in (120^\circ, 210^\circ]$ ,  $E_C$  递增,在此期间触发  $V_{T2}$ ,  $V_{T2}$  会在导通后即便因承受反压而关断,关断后  $U_N = -E_C(\alpha+60^\circ) = E_A(\alpha)$ 。因此在  $V_{T3}$  触发时其阳极电压等于  $U_N + E_C(\alpha+60^\circ) = 2U_p$ ,大于其阴极电压  $U_p$ ,  $V_{T3}$  可导通,之后的分析过程与  $V_{T1}$  相同,可推导出在  $V_{T3}$  关断后  $U_p$  表达式为:

$$U_p = E_A(\alpha) + U_N = \begin{cases} \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E & 0^\circ < \alpha \leq 60^\circ \\ \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\alpha+30^\circ) & 60^\circ < \alpha \leq 150^\circ \end{cases} \quad (7)$$

$V_{T4}$ 、 $V_{T6}$  导通期间的分析过程与  $V_{T2}$  相同,由于交流侧三相电压对称,各阀导通期间所确定的  $U_N$  相等,  $U_N$  波形近似为一条直线,但受换流变压器铁芯饱和等因素的影响,  $U_N$  中含少量谐波,以 3 次谐波为主<sup>[17]</sup>。图 3 为触发角  $\alpha=120^\circ$  时  $U_N$  的仿真波形。

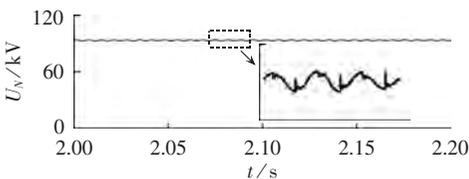


图 3  $\alpha=120^\circ$  时,不带直流线路开路试验的  $U_N$  波形

Fig.3  $U_N$  waveform of OLT without DC line when  $\alpha=120^\circ$

理想条件下,在  $V_{T3}$  关断后,  $U_p$  将保持不变,但是由于均压、缓冲电路的影响,  $U_p$  实际呈缓慢衰减状态<sup>[10]</sup>(由于电压衰减速度很慢,在计算开路电压时可忽略),而根据换流原理,共阴极管各阀导通时刻对应的交流相电压瞬时值相等,大于此时  $V_{T5}$  的阴极电压  $U_p$ ,  $V_{T5}$  满足导通条件。  $V_{T5}$  通断期间的分析过程与  $V_{T3}$  相同,  $U_p$  的幅值和变化规律也均与式(7)相同,各阀不断重复以上过程,得到  $U_p$  波形如图 4 所示。

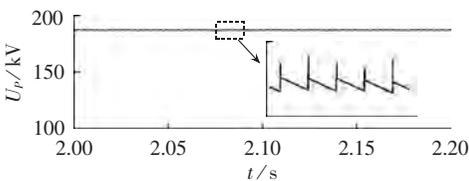


图 4  $\alpha=120^\circ$  时,不带直流线路开路试验的  $U_p$  波形

Fig.4  $U_p$  waveform of OLT without DC line when  $\alpha=120^\circ$

将式(7)代入式(2)即得到不带直流线路条件下

6 脉动换流器开路电压计算公式,12 脉动换流器开路电压等于 6 脉动换流器的 2 倍,因此,最终得到超高压直流输电系统不带直流线路开路试验开路电压公式(即现有公式)为:

$$U_{DC} = \begin{cases} \frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E & 0^\circ < \alpha \leq 60^\circ \\ \frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\alpha+30^\circ) & 60^\circ < \alpha \leq 150^\circ \end{cases} \quad (8)$$

## 2 带直流线路开路试验开路电压的建立过程分析及公式推导

### 2.1 带直流线路开路电压的建立过程分析

以上分析了不带直流线路开路电压的推导过程,对于带直流线路开路试验,由于换流系统结构及控制方式与不带直流线路时完全相同,因此,可以借鉴以上推导思路用于带直流线路开路电压的分析。仍以 6 脉动系统为研究对象,将图 1 所示系统开路点从线路首端移至线路末端即为带线路开路试验系统,6 脉动换流器带直流线路开路试验系统示意图如图 5 所示。

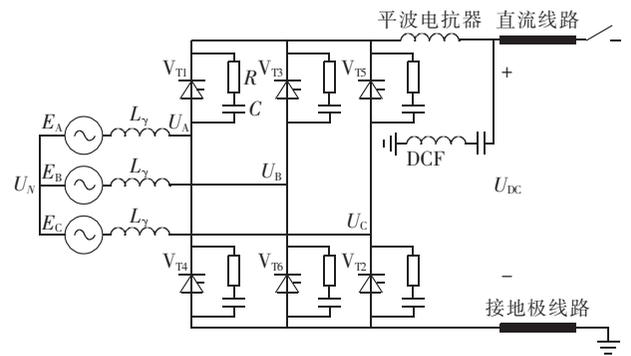


图 5 带直流线路开路试验系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of OLT system with DC line

在接入直流线路后,换流器与直流线路及直流滤波器(DCF)支路可以通过大地构成回路,带直流线路开路试验系统等效示意图如图 6 所示。

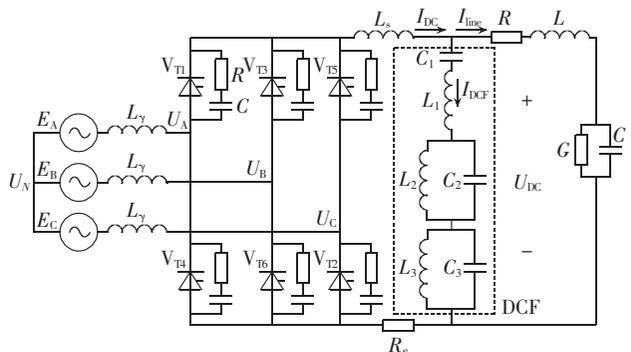


图 6 带直流线路开路试验系统等效示意图

Fig.6 Equivalent schematic diagram of OLT system with DC line

根据仿真实验结果,线路模型采用集中参数或分布参数对开路电压基本无影响,因此,为了简化分析过程,本文采用输电线路集中参数。图 6 中, $R$ 、 $L$ 、 $G$ 、 $C$  分别为直流线路的电阻、电感、电导、电容; $L_s$  为平波电抗器;DCF 为三调谐直流滤波器; $R_e$  为接地极线路阻抗; $I_{DC}$  为开路电流; $I_{DCF}$  为直流滤波器支路电流; $I_{line}$  为直流线路电流; $U_{DC}$  为开路电压; $U_{DCF}$  为直流滤波器支路电压,由图可知  $U_{DC}=U_{DCF}$ 。

根据之前的分析,在开路试验过程中换流阀导通时间很短,在试验中的任意时刻换流器至多有 1 个阀导通。在所有换流阀均关断时,交流线路通过各换流阀的缓冲电路与直流线路侧相连,由于交流系统对称,所以开路电流  $I_{DC}$  约等于 0;而在某一换流阀导通时,系统对称被打破,换流阀直流侧出口线路有电流流过,电流持续时间等于换流阀的导通时间,在阀关断后系统恢复对称状态, $I_{DC}$  再次衰减至 0,之后  $I_{DC}$  以换流阀触发间隔为周期不断重复上述过程。

在阀导通阶段, $I_{DC}$  中的直流分量只能通过对地电导支路,而对地电导支路的阻值极大,所以  $I_{DC}$  中直流分量所占的比例很小。又根据换流原理,6 脉动换流器仅在直流侧产生  $6n(n=1,2,3,\dots)$  次谐波<sup>[2]</sup>,因此,此时的  $I_{DC}$  主要由  $6n$  次谐波构成。如图 6 所示,DCF 支路与直流线路并联,根据  $I_{DC}$  的频率特性,对于  $I_{DC}$  而言,DCF 支路的阻抗比直流线路小得多,因此, $I_{DC}\approx I_{DCF}$ 。带直流线路开路试验触发角  $\alpha=120^\circ$  时的开路电流  $I_{DC}$ 、直流滤波器支路电流  $I_{DCF}$ 、直流线路电流  $I_{line}$  仿真波形如图 7 所示,图中  $t_1-t_6$ 、 $t'_1-t'_6$  分别对应 6 个换流阀的触发和关断时刻。

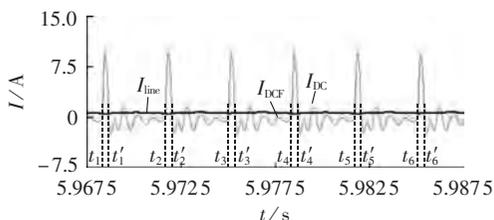


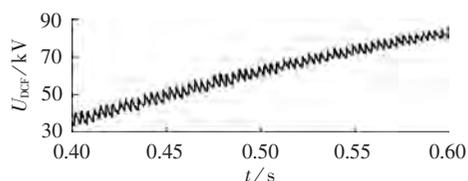
图 7  $\alpha=120^\circ$  时,带直流线路开路试验的  $I_{DC}$ 、 $I_{DCF}$  和  $I_{line}$  仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms of  $I_{DC}$ ,  $I_{DCF}$  and  $I_{line}$  of OLT with DC line when  $\alpha=120^\circ$

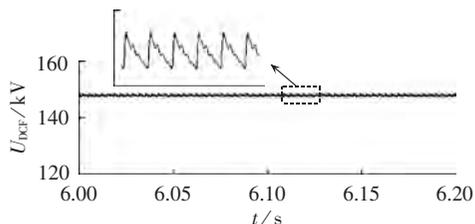
图 7 反映了直流线路侧各支路电流在开路电压稳定后某一工频周期内的变化情况,如图所示, $I_{DC}$  与  $I_{DCF}$  波形近似重合,两者均在换流阀导通时突然正向增大并随着换流阀的关断再逐渐衰减为 0。由于开路电压已经趋于稳定,故  $I_{line}$  波形近似为一条直线且幅值很小,仿真结果与之前的分析相吻合。

根据上述的直流线路侧电流分布特征,在换流阀导通阶段由交流侧向直流侧注入的能量只会少

部分以热能的形式消耗在对地电导上,而绝大部分能量将流入 DCF 支路为其支路电容充电, $U_{DCF}$  随之逐渐升高。在换流阀关断后, $I_{DC}$  反向且幅值逐渐衰减为 0,交流系统不再向直流线路侧输送能量,DCF 支路电容开始向对地电导支路放电, $U_{DCF}$  下降,至下一个换流阀导通为止。由于触发角固定,DCF 支路电容在每周期内的充放电时间固定,在试验开始阶段,由于  $U_{DCF}$  较低,对地电导支路在阀关断期间消耗的能量小于 DCF 支路电容在阀导通期间吸收的能量, $U_{DCF}$  不断升高,如图 8(a)所示。但随着  $U_{DC}$  的升高,DCF 支路电容每周期内吸收的能量越来越少而对地电导支路消耗的能量却不断增多, $U_{DC}$  升高的速度逐渐放缓,当  $U_{DCF}$  在每周期内升降的幅值相等后, $U_{DCF}$  达到稳态,如图 8(b)所示。



(a)  $U_{DCF}$  稳定前



(b)  $U_{DCF}$  稳定后

图 8  $\alpha=120^\circ$  时,带直流线路开路试验的  $U_{DCF}$  仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms of  $U_{DCF}$  of OLT with DC line when  $\alpha=120^\circ$

根据图 6,  $U_{DCF}=U_{DC}$ 。因此,由上所述,在带直流线路开路试验中,开路电压从建立到稳定之间存在暂态变化过程,当 DCF 支路电容在开路电压单个变化周期内充放电能量达到平衡时开路电压趋于稳定。相比于不带直流线路开路试验,因为在换流阀关断期间存在降压过程,所以,带直流线路开路试验开路电压的稳态值比不带直流线路开路试验中的开路电压小。

## 2.2 带直流线路开路试验开路电压公式推导

### 2.2.1 6 脉动换流器带直流线路开路电压公式的推导

根据 2.1 节的分析,计算开路电压最直接的方法就是利用电压稳定后 DCF 支路电容在单个电压变化周期内充放电能量平衡这一结论,列写关系式以求解开路电压。但是由于直流系统的非线性特征,换流器的等效模型难以确定,且无法应用相关电路原理。同时换流阀导通期间的直流线路电流为

冲击电流,很难写出其具体表达式,而对地电导参数又极易受环境影响,因此,利用单个电压变化周期内充放电能量平衡特征推导开路电压计算公式是不可行的。

值得注意的是,对于带直流线路开路试验,在换流阀导通阶段,仍有式(2)、(3)成立,即:

$$U_{DC} = U_x = E_x + U_N \quad x = A, B, C \quad (9)$$

因此,可以通过求解  $U_N$  确定  $U_{DC}$ 。在不带直流线路试验中,  $U_N$  波形近似为一条直线,如图 3 所示。在带直流线路开路试验中,共阳极组阀导通时  $U_N$  变化情况与不带直流线路时相同,而在共阴极组阀导通时,由于开路电压比不带线路时小,  $U_N$  也比不带直流线路时小,所以在带直流线路开路试验中  $U_N$  波形近似为矩形波。对于 6 脉动换流器,  $U_N$  变化周期为 1/3 工频周期,在每个周期内  $U_N$  跳变 2 次,跳变时刻对应于换流阀导通时刻,共阳极组阀导通时  $U_N$  由低电位跳变至高电位,共阴极组阀导通时  $U_N$  由高电位跳变至低电位。

带直流线路开路试验触发角  $\alpha = 120^\circ$  时的  $U_N$  仿真波形如图 9 所示,图中  $t_{c1} - t_{c6}$  分别对应 6 个换流阀的触发时刻。

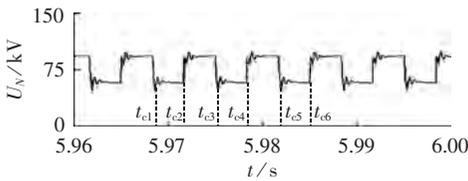


图 9  $\alpha = 120^\circ$  时,带直流线路开路试验的  $U_N$  波形  
Fig.9  $U_N$  waveform of OLT with DC line when  $\alpha = 120^\circ$

综上所述,2 种开路试验中开路电压幅值不等的原因也可以理解为:对于 2 种开路试验,在共阴极组阀导通时刻,换流变压器阀侧中性点电压并不相等。

因为在换流阀交流侧,  $U_N$  满足:

$$U_N = (U_A + U_B + U_C) / 3 \quad (10)$$

所以,可以利用交流侧三相相电压求解  $U_N$ 。如图 9 所示,共阴极组阀导通时  $U_N$  跳变至低电平,因此,对于矩形波  $U_N$ ,求解开路电压需要利用的是其极小值  $U_{Nmin}$ 。在本文中,  $U_{Nmin}$  的求取方法为:以  $U_N$  变化周期为采样窗长,取交流侧三相相电压数据代入式(10)计算  $U_N$ ,并由低电压采样数据的平均值求取  $U_{Nmin}$ 。在确定了  $U_{Nmin}$  后,带直流线路开路试验中开路电压可以表示为:

$$U_{DC} = E_x + U_N = E_A(\alpha) + U_{Nmin} =$$

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E + U_{Nmin} & 0^\circ < \alpha \leq 60^\circ \\ \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\alpha + 30^\circ) + U_{Nmin} & 60^\circ < \alpha \leq 150^\circ \end{cases} \quad (11)$$

### 2.2.2 12 脉动换流器带直流线路开路电压公式的推导

对于 12 脉动换流器,其系统示意图如图 10 所示。

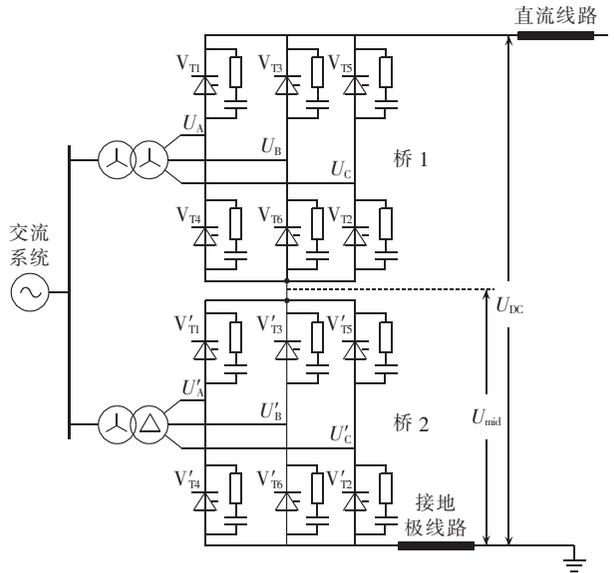


图 10 12 脉动换流器带直流线路开路试验系统等效示意图

Fig.10 Equivalent schematic diagram of OLT system with DC line for 12-pulse converter

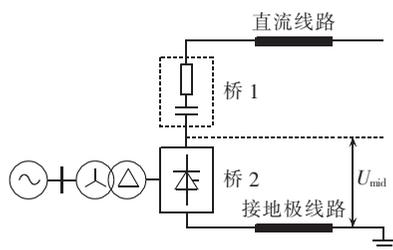
根据系统结构,  $U_{mid}$  即为桥 2 的输出电压,因此,下面以其为研究对象,分析在 12 脉动系统中 6 脉动换流器的输出电压特征。

根据前文的分析可知,无论带直流线路与否,在开路试验过程中,受触发角大小影响,换流阀的导通时间均很短,当触发角大于  $60^\circ$  时,换流阀在导通后随即便会因承受反压而关断。因此,在试验任意时刻,换流系统中至多有 1 个换流阀导通,且在试验的绝大多数时间内,系统中的所有换流阀均处于关断状态,在此期间,由于换流系统结构对称,交直流系统间无能量传递,开路电压保持不变。而在有换流阀导通期间,由于系统对称结构被破坏,交直流系统间可能出现能量传递。

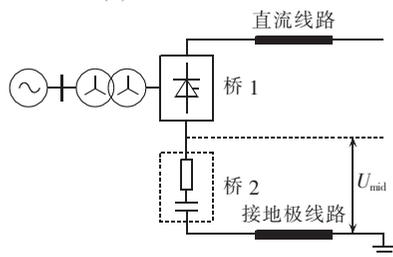
对于不带直流线路开路试验,由于直流线路侧开路,即使在换流阀导通期间,交直流系统间仍基本无能量传递,开路电压仅由换流阀触发时刻的交流相电压决定。在所有换流阀均关断期间,开路电压仅存在缓慢的衰减过程,幅值基本保持不变。在某一个换流阀导通期间,若换流阀位于桥 2,则桥 1 各阀均关断,桥 2 与直流侧只能通过桥 1 换流阀的缓冲电路相连接,桥 1 等效于 1 个 RC 串联支路,此时的 12 脉动开路系统等效于在 6 脉动开路系统的开路端串联进 1 个 RC 串联支路,但由于直流侧开路,RC 支路显然对开路电压无影响,  $U_{mid}$  与 6 脉动带直流线路开路试验中开路电压值相等。

若导通的换流阀位于桥 1, 由于此时系统中仍无能量变化, 所以桥 1 中某一阀导通, 仅相当于改变了串联  $RC$  元件的数值, 对  $U_{mid}$  无影响。同理可得, 另一个 6 脉动换流器的输出电压也与 6 脉动开路试验时相等。综上, 在 12 脉动不带直流线路开路试验中, 2 个 6 脉动换流器的输出电压与 6 脉动不带直流线路开路试验中的开路电压相等, 因此, 12 脉动不带直流线路开路试验的开路电压可以按 6 脉动换流器开路电压的 2 倍近似进行计算。

而对于带直流线路开路试验, 当桥 2 中某一阀导通时, 桥 1 等效为  $RC$  支路, 串接于桥 2 与直流线路之间, 如图 11(a) 所示。由于此时换流阀通过线路及换流阀的接地点构成回路, 所以此时  $RC$  上存在一定压降, 造成  $U_{mid}$  比 6 脉动带直流线路开路电压小, 两者的差值受  $RC$  参数影响。



(a) 桥 2 中某阀导通时



(b) 桥 1 中某阀导通时

图 11 12 脉动换流器中的部分阀导通时带直流线路开路试验系统等效示意图

Fig.11 Equivalent schematic diagram of OLT system with DC line when partial valves of 12-pulse converter are turned on

当桥 1 中某一阀导通时, 桥 2 各阀均处于开路状态, 相当于将  $RC$  支路串接在桥 1 与接地点之间, 如图 11(b) 所示。此时的  $U_{mid}$  等于  $RC$  支路上的压降, 根据换流器结构, 显然 2 种情况下得到的  $U_{mid}$  的幅值大小并不相等。

综上所述, 对于 12 脉动换流器, 在直流线路进行开路试验时, 桥 2 的输出电压波形不再近似为直线型, 而是变为矩形波, 输出电压每隔  $30^\circ$  跳变一次, 下降沿对应桥 1 中换流阀导通时刻, 上升沿对应于桥 2 中换流阀导通时刻。触发角  $\alpha = 120^\circ$  时的  $U_{mid}$  仿真波形如图 12 所示, 图中 1—6 表示桥 1 中各阀的导通时刻, 1'—6' 表示桥 2 中各阀导通时刻。

图 12 验证了上述分析的正确性, 由于桥 1 和桥 2 仅在换流变压器接法上有区别, 其他结构完全相同, 所以桥 1 的输出电压波形与桥 2 相同, 仅在相位上相差  $30^\circ$ 。由于 2 个输出电压之间的相位差与输出电压的跳变间隔相同, 因此, 其中一桥的输出电压为高时另一桥的输出电压为低, 如图 13 所示, 其中  $U_{DC1}$  表示桥 1 输出电压,  $U_{DC2}$  表示桥 2 输出电压。又由于 12 脉动换流器的开路电压等于两桥输出电压之和, 所以, 测得的 12 脉动换流系统开路电压约等于  $U_{mid}$  的高电压和低电压之和。

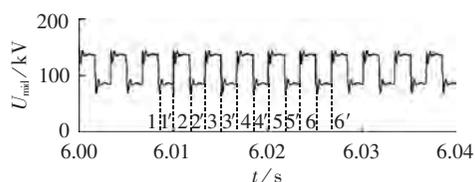


图 12  $\alpha = 120^\circ$  时, 带直流线路开路试验所得的 12 脉动换流器  $U_{mid}$  仿真波形

Fig.12 Simulative waveform of  $U_{mid}$  of OLT with DC line for 12-pulse converter when  $\alpha = 120^\circ$

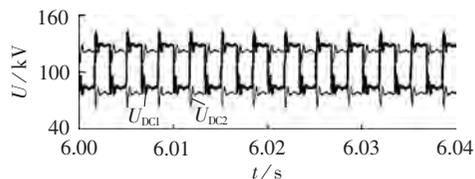


图 13  $\alpha = 120^\circ$  时, 带直流线路开路试验所得的 12 脉动换流器桥 1、桥 2 输出电压波形

Fig.13 Output voltage waveforms of bridge 1 and 2 of OLT with DC line for 12-pulse converter when  $\alpha = 120^\circ$

根据前文的分析, 桥 1、桥 2 中换流阀导通时刻的  $U_{mid}$  幅值不同, 设桥 2 中换流阀导通时的  $U_{mid}$  幅值用  $U_{mid,h}$  表示, 桥 1 中换流阀导通时的  $U_{mid}$  幅值用  $U_{mid,l}$  表示。如图 12 所示, 由于桥 2 中各阀导通时得到的高电压均相等, 因此, 任意选取其中一阀作为研究对象, 以阀  $V'_{T1}$  为例, 在阀  $V'_{T1}$  导通时有:

$$U_{mid,h} = U'_A(\alpha + 30^\circ) = E'_A(\alpha + 30^\circ) + U_{Nbh} \quad (12)$$

其中,  $U_{Nbh} = (U'_A + U'_B + U'_C)/3$  为桥 2 换流变压器阀侧等值中性点电压。

同理, 对于桥 1 取阀 2 为对象, 设桥 1 换流变阀侧中性点电压为  $U_{Nbp}$ , 则在阀 2 导通时有:

$$U_{mid,l} = U_C(\alpha + 60^\circ) = E_C(\alpha + 60^\circ) + U_{Nbp} \quad (13)$$

因此, 12 脉动带直流线路开路试验的开路电压计算公式为:

$$U_{DC} = U_{mid,h} + U_{mid,l} \quad 0^\circ < \alpha \leq 150^\circ \quad (14)$$

将式(1)代入式(14)得:

$$U_{DC} = U_{mid,h} + U_{mid,l} = -E_A(\alpha) + U_{Nbh} + E_A(\alpha) + U_{Nbp} = U_{Nbh} + U_{Nbp} \quad 0^\circ < \alpha \leq 150^\circ \quad (15)$$

根据仿真结果, 用  $U_{Nbp,min}$  表示  $U_{Nbp}$  的极小值; 用

$U_{Ndn\_max}$  表示  $U_{Ndn}$  的极大值,则 12 脉动带直流线路开路试验的开路电压等于:

$$U_{DC} = U_{Nup\_min} + U_{Ndn\_max} \quad 0^\circ < \alpha \leq 150^\circ \quad (16)$$

超高压直流输电系统带直流线路开路试验的开路电压可以按式(16)进行计算,  $U_{Nup\_min}$  和  $U_{Ndn\_max}$  的求解过程与 2.2.1 节中  $U_{Nmin}$  的求解过程相同。

### 3 仿真验证

为了验证所提公式在实际带直流线路开路试验中的计算准确性,参照高坡—肇庆  $\pm 500$  kV 超高压直流输电系统,利用 PSCAD 搭建超高压直流输电系统仿真模型对所提公式进行了仿真验证。模型参数依据高坡—肇线实际参数设定,线路长度取 891 km,单位长度线路参数根据架空线参数求得,对地电导参数为皮克公式推算结果,具体参数如表 1 所示,参数定义与图 5 相同。

表 1 仿真系统参数  
Table 1 Parameters of simulation system

参数	参数值	参数	参数值
$L_n$	0.27 H	$R_n$	0.5 $\Omega$
$L_1$	10.869 mH	$C_1$	1.6 $\mu$ F
$L_2$	10.384 mH	$C_2$	4.48 $\mu$ F
$L_3$	2.06 mH	$C_3$	5.81 $\mu$ F
$R$	$9.96 \times 10^{-3} \Omega/\text{km}$	$G$	$3.97 \times 10^{-9} \text{ S}/\text{km}$
$L$	2.98 mH/km	$C$	$8.07 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$

仿真中  $E = 233.3$  kV,开路电压仿真结果取电压平均值。表 2 为超高压直流输电系统带直流线路开路试验开路电压的仿真及计算结果,其中现有公式和修正公式的计算结果分别由式(8)和式(16)计算得到,计算误差为对应计算结果与仿真结果之差的绝对值。

表 2 超高压直流输电系统带直流线路开路试验仿真结果

Table 2 Simulative results of OLT with DC line for EHVDC system

触发角 $\alpha/^\circ$	仿真 结果/kV	计算结果/kV		计算误差/kV	
		式(8)	式(16)	式(8)	式(16)
20	636.0	762.0	633	126.0	3.0
40	603.5	762.0	600	158.5	3.5
60	532.0	762.0	530	230.0	2.0
70	487.5	750.0	487	262.5	0.5
80	455.0	716.0	457	261.0	2.0
90	415.0	660.0	418	245.0	3.0
100	362.5	583.5	363	221.0	0.5
110	299.5	490.0	298	190.5	1.5
120	227.5	381.0	224	153.5	3.5
130	149.5	260.5	147	111.0	2.5
140	68.0	132.5	68	64.5	0
150	0	0	0	0	0

通过对表 2 的仿真结果进行分析可知:在带直流线路试验中,现有开路电压公式的计算结果与测

量结果之间存在较大差值,且随着触发角的减小,差值逐渐增大;当触发角小于  $120^\circ$  时,计算结果与测量结果之间的差值已超过开路试验电压差值保护的启动门槛值(150 kV),而修正公式的计算结果准确度明显更高。

### 4 结论

a. 在带直流线路开路试验中,受直流设备及线路元件充放电过程的影响,开路电压稳态值比不带直流线路时小得多,若利用现有不带直流线路开路电压公式计算带直流线路开路试验的开路电压,计算结果准确性较差,可能造成开路试验电压差值保护误动,导致试验极闭锁等问题。

b. 对于带直流线路开路试验,由于直流输电系统的非线性特征,通过电压暂态过程分析推导开路电压计算公式的难度很大。利用换流器交流侧三相电压求解换流变压器阀侧中性点电压,对现有公式计算结果进行修正可以极大地提高开路电压计算结果的准确性。

### 参考文献:

- [1] 刘振亚,特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005:30-32.
- [2] 浙江大学直流输电编写组. 直流输电[M]. 北京:中国电力出版社,1982:9-15.
- [3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010:7-9.
- [4] 田书欣,程浩忠,常浩,等. 特高压电网社会效益分析及评价方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):145-153.  
TIAN Shuxin, CHENG Haozhong, CHANG Hao, et al. Analysis and evaluation of social benefit from UHV power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2):145-153.
- [5] 周浩,钟一俊. 特高压交、直流输电的适用场合及其技术比较[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):6-12.  
ZHOU Hao, ZHONG Yijun. Applicable occasions of UHVAC/UHVDC transmission and their technology comparisons in China[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5):6-12.
- [6] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[EB/OL]. (2011-03-16). [http://www.gov.cn/2011lh/content\\_1825-838.htm](http://www.gov.cn/2011lh/content_1825-838.htm).
- [7] 胡宇洋,唐开平,余珊珊. 葛洲坝换流站直流开路试验故障原因分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(18):103-107.  
HU Yuyang, TANG Kaiping, YU Shanshan. Fault analysis of open line test on DC side of Gezhouba converter station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18):103-107.
- [8] 阴春晓,艾芊. 高压直流线路开路试验的控制原理及保护分析[J]. 电力与能源,2012,33(6):521-525.  
YIN Chunxiao, AI Qian. Control principle and protection analysis of the HVDC open line test[J]. Power and Energy, 2012, 33(6):521-525.
- [9] 李志平. 高压直流开路电压建立过程分析[J]. 南方电网技术,2014,8(3):37-41.

- LI Zhiping. Analysis on the voltage building process of HVDC open circuits[J]. Southern Power System Technology,2014,8(3):37-41.
- [10] 那虎,丁正平,孙晋峰. 高压直流输电用无源型直流转换开关电弧电流特性研究[J]. 高压电器,2012,48(9):67-71.
- NA Hu,DING Zhengping,SUN Jinfeng. Arc current characteristic of DC circuit breaker in HVDC transmission and distribution system[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(9):67-71.
- [11] 李侠,陈干. 高压直流输电开路试验中换流阀设备保护的探索[J]. 高压电器,2012,48(3):86-88.
- LI Xia,CHEN Gan. Case study on converter valve protection in open circuit test[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(3):86-88.
- [12] 那虎. 高压直流输电用直流转换开关试验回路研究 [D]. 西安:西安交通大学,2003.
- NA Hu. Study of test circuit of DC circuit breaker for HVDC transmission and distribution system[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2003.
- [13] TOKUYANA S,ARIMATSU K,YOSHIOKA Y. Development and interrupting tests on 250 kV 8 kA HVDC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1985,104(9):2453-2459.
- [14] 刘宣宣. 云广直流输电工程空载加压试验分析[J]. 电力建设,2011,32(8):45-48.
- LIU Xuanxuan. Analysis of open line test in Yunnan-Guangdong UHVDC transmission project[J]. Electric Power Construction,2011,32(8):45-48.
- [15] 田庆. 龙政直流开路试验分析[J]. 高压电器,2004,45(6):49-51.
- TIAN Qing. Analysis of Longzheng HVDC open line test[J]. High Voltage Apparatus,2004,45(6):49-51.
- [16] 王明新,谢国平. 高压直流输电开路试验原理的探讨[J]. 电网技术,2004,28(22):11-14.
- WANG Mingxin,XIE Guoping. Investigation on open line test principle of HVDC[J]. Power System Technology,2004,28(22):11-14.
- [17] 李永新,易吉良,郭峰. Yy0 联结三相变压器组三次谐波电压试验研究及设计要点[J]. 变压器,2013,50(5):36-39.
- LI Yongxin,YI Jiliang,GUO Feng. Key design points and third harmonic voltage test study of three-phase transformer unit with Yy0 connectin[J]. Transformer,2013,50(5):36-39.

#### 作者简介:



张 烁

张 烁(1984—),男,辽宁铁岭人,博士研究生,从事高压直流输电线路保护与控制方面的研究(E-mail:zhangshuo\_tju@126.com);

李永丽(1963—),女,河北石家庄人,教授,博士,从事电力系统故障分析及电气设备故障诊断、电力系统微机保护、超特高压输电系统保护原理及重合闸技术、分布式发电系统并网控制与保护技术等方面的研究;

李博通(1981—),男,河北保定人,讲师,博士,从事超特高压输电系统保护与控制、分布式发电及微网保护与控制等方面的研究(E-mail:libotong@tju.edu.cn)。

## Open line voltage of HVDC transmission system

ZHANG Shuo,LI Yongli,LI Botong

(Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The existing open line voltage formula of HVDC system is not applicable to the open line voltage calculation of OLT(Open Line Test) with DC line,for which,the test principle and the set-up process of open line voltage are analyzed respectively for OLT with and without DC line and the reason why the open line voltage of OLT with DC line is smaller is explained. An improved open line voltage formula is given for the OLT with DC line,which is used to correct the setting of OLT voltage differential protection to avoid its misoperation. The simulation model of typical  $\pm 500$  kV HVDC transmission system is built with PSCAD and the simulative results show the higher accuracy of the improved formula.

**Key words:** HVDC power transmission; HVDC open line test; open line voltage; firing angle; DC line parameters; electric filters; computer simulation; models