

高压直流输电系统开路试验原理分析与工程建议

李泰, 荆雪记, 孔令凯, 李少华, 彭忠, 吴庆范, 吴彦维

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 开路试验是高压直流输电工程投运前必做的一项基本试验。该实验中触发角与直流电压的关系具有特殊性。从换流阀电路模型入手, 详细分析了在不带线路工况下换流阀的导通情况, 推导出理想情况下直流电压与触发角的关系, 并给出了理想电压公式的适用条件。使用三沪 I 回直流输电工程一次模型, 在 EMTDC 中进行了不带线路和带线路工况下的开路试验, 并对试验结果进行了详细的分析。分析和实验结果表明: 带线路工况下, 直流电压在触发角小于 60° 后到达额定值是正常的。开路试验保护中设置电压判据是不合理的, 可只采用电流原理判据作为试验是否成功的依据。

关键词: 高压直流输电; 开路试验; 换流阀; 触发角; 电压判据

Analyses on the principle of open line test in HVDC and some suggestion for its practice

LI Tai, JING Xueji, KONG Lingkai, LI Shaohua, PENG Zhong, WU Qingfan, WU Yanwei

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: The open line test must be done before HVDC transmission project is put into operation. The relationship between firing angle and DC voltage at open line test is not same as normal operation. Based on the circuit model of the valve and circuit principle, a detailed analysis about the turning on/off of the valve without connecting the DC line is given. A relationship between firing angle and DC voltage is obtained. And the scope for applying this relationship is given. A simulation in EMTDC software is employed to verify the analyzing results. Analysis and experimental results show that: without DC line, DC voltage will reach its rated value when firing angle is less than 60 degrees; the protection based on the voltage criterion in open line test is not reasonable. Only the current criterion in protection is needed for detecting whether the open line test is successful or not.

Key words: HVDC; open line test; converter valve; firing angle; voltage criterion

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)11-0134-08

0 引言

开路试验是高压直流输电工程投运之前必做的一项基本试验, 是检验直流控制保护系统功能是否正常, 相关直流设备以及直流线路的绝缘性能是否完好的重要手段^[1-4]。该试验在换流器直流端开路情况下进行, 换流阀仅在很短的导通时间内有充电电流, 过流其余时间处于关断状态, 直流电压与触发角的关系与正常运行时完全不同。在实际工程中, 经常出现触发角下降到 60° 后直流电压仍未升到额定值, 开路试验保护动作的情况, 因此有必要对开路试验的原理进行深入分析。

文献[5]在不带线路工况下, 根据可控硅的导通条件推导了三种触发角范围内直流电压与触发角的

关系。其导通依据是相电压是否大于 0。对于带线路的工况, 该文献结合葛上直流工程南桥站的现场试验数据进行了分析, 指出试验结果与计算值的差异是由直流端存在电阻与电容导致的。

文献[6]给出了不带线路工况下的理想电压公式, 即 ABB 公司在三常直流工程中采用的开路试验电压理想计算公式。该文献对于阀的导通和关断过程未有详细分析, 推导的前提是不考虑换流器的分压、阻尼电路, 得出的结论与文献[5]截然不同。对于带线路的工况, 该文献把分压、阻尼电路, 平波电抗器, 直流滤波器以及直流线路等效为一个电阻和电容的并联, 给出了改进的电压计算公式。

文献[7]介绍了 ABB 公司开路试验控制保护软件的实现细节。文献[2]介绍了龙政直流工程在带线

路工况下进行开路试验时开路试验保护(电压原理)动作的情况, 指出保护动作原因是基于电压原理的保护以理想电压计算公式为参考, 导致实际值与计算值的差值超过了设定值。同时文献[2]在文献[6]的基础上指出, 根据实际直流工程系统绝缘要求和参数, 计算出能够进行开路试验的临界时间常数, 在满足灵敏度要求条件下, 整定开路试验电压原理保护的门槛值, 可提高开路试验电压原理保护的可靠性。另外该文献指出, 可以使用曲线拟合法得出直流电压与触发角的关系, 以代替理想电压公式。

上述文献都未从换流阀电路模型入手分析开路试验过程直流电压与触发角的关系, 对于阀关断后直流侧仍有直流电压的原因未作分析。本文从换流阀电路模型入手, 给出了 ABB 理想电压公式的详细推导过程和适用条件。为了验证相关结论的正确性, 在 EMTDC 中建立了三沪 I 回直流工程开路试验详细模型, 进行了开路试验的仿真, 结果表明不带线路情况下的推导过程是正确的。带线路情况下, 仿真结果和公式计算的差异表明: 不宜把直流滤波器、直流线路等简单地用 RC 回路代替; 在实际工程试验中触发角小于 60° 后电压才达到额定值是正常的。因此, 不考虑电压原理保护, 只采用电流原理保护作为空载加压试验失败的判据是可行的。

1 换流阀结构及等效电路

直流输电工程中广泛采用的换流器由 12 个单阀构成, 一个单阀由多个可控硅模块和阳极电抗器模块串联而成, 单个可控硅模块由多个可控硅极串联而成, 可控硅极是换流阀的最小单元。可控硅级主要包括 4 部分: 阻尼回路、分压回路、可控硅控制单元 TCU 和可控硅。其电气结构如图 1 所示^[8-15]。

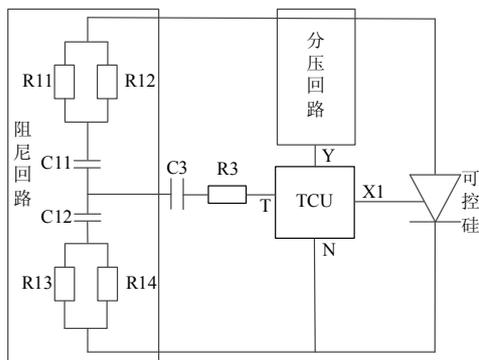


图 1 可控硅级电气结构

Fig. 1 Electrical structure of SCR

阻尼回路主要作用是: (1) 当阀在熄灭过程中, 阻尼电压的振荡; (2) 给可控硅控制单元提供暂态充电, 保证在阀触发前 TCU 能获得可靠的工作电源。

分压回路的主要作用是: (1) 测量可控硅两端电压, 用于形成 IP、PF 和 RP 逻辑的输入电压; (2) 给可控硅控制单元 TCU 提供稳态时的工作电源。C3 和 R3 分别为暂态充电电容和电阻, 可在可控硅刚承受正向电压时, 加速可控硅控制单元的电源充电。

可控硅控制单元主要作用是触发和监视可控硅。

电抗器的作用是: 在可控硅阀导通或出现电流突变时, 限制电流的变化速率, 使阀免于不均匀导通产生局部过热而引起的破坏。当阀导通稳定, 流过电流很大时, 电抗器饱和, 呈现出低阻抗。

单个阀由很多个可控硅极串联而成, 为了便于分析, 用图 2 所示的等效电路来集中表示。图 2 中用 R_{on}/R_{off} 代表可控硅的特性, 在关断状态下等效电阻为 R_{off} ($R_{off} \rightarrow \infty$), 在开通状态下等效电阻为 R_{on} ($R_{on} \rightarrow 0$), 右侧的 RC 回路代表分压、阻尼电路。下文提到的缓冲电路即指图 2 中右侧的 RC 回路。缓冲电路对开路试验中直流电压的保持有着直接关系, 忽略缓冲电路将得到完全不同的结果。

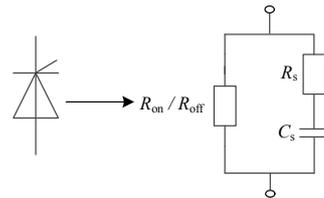


图 2 换流阀的等效模型

Fig. 2 Equivalent model of thyristor

换流阀的特性为: (1) 当其两端有正向压降且门极有触发脉冲时导通。(2) 电流为 0 后才会关断。(3) 处于导通状态时电阻很小, 处于关断状态时电阻很大^[7-8]。

图 2 中的等效电路在 EMTDC、RTDS 模型中广泛使用, 经过实践验证是准确的。

2 不带线路理想工况下开路试验

以 6 脉动换流器为例, 分析开路试验时直流电压与触发角的关系。为简化分析, 忽略换相电抗、直流滤波器, 使用图 3 所示电路。

由于阀共阴极点 N_1 和阀共阳极点 N_2 之间没有回路, 直流电压 U_{N1N} 只与共阴极的 3 个阀(V_1 、 V_3 、 V_5)有关, U_{N2N} 只与共阳极的 3 个阀(V_4 、 V_6 、 V_2)有关。

在没有触发脉冲到来时, 在三相平衡相电压的作用下 $U_{N1N}=0$, $U_{N2N}=0$, 阀端电压为交流电源相电压。触发系统点火角的起始点($\alpha = 60^\circ$)为相应换相电压的过零点。以阀 V_1 为例, 点火角起始点为线电

压 U_{AC} 的正向过零点。相电压 U_{AN} 正向过零点超前线电压 30° ，因此触发角大于 150° 之后，阀无法导通。

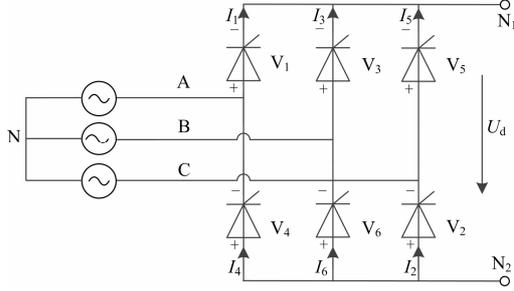


图 3 6 脉动换流器接线图

Fig. 3 Connection diagram of six pulse converter

以下分析阀 V_1 导通过程中电流和电压的变化。假设阀 V_1 为第一个要触发导通的阀，在阀 V_1 导通前瞬间阀 V_1 、 V_3 、 V_5 两端的电压为

$$\begin{cases} U_{V1} = U_{AN} = U_m \cdot \sin(\alpha + 30^\circ) \\ U_{V3} = U_{BN} = U_m \cdot \sin(\alpha - 90^\circ) \\ U_{V5} = U_{CN} = U_m \cdot \sin(\alpha + 150^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

在阀 V_1 导通期间，阀 V_1 缓冲电路被短路，阀 V_3 缓冲电路端电压由 U_{AN} 变为 U_{BA} ，阀 V_5 缓冲电路端电压由 U_{CN} 变为 U_{CA} 。在此期间缓冲电路中电容进行充/放电，阀可等效为短路。

设阀缓冲电路的电阻为 R_s ，电容为 C_s ，以阀 V_1 导通瞬间为计时零点，依据正弦激励下一阶电路的全响应可得，在阀 V_1 导通过程中，阀 V_1 、 V_3 、 V_5 缓冲电路中的电流分别为

$$\begin{cases} I_{sc_1} = \frac{-U_{AN}(0_+) \cdot k_1}{R_s} e^{-\frac{t}{R_s C_s}} \\ I_{sc_3} = \left[\frac{U_{BA}(0_+) - U_{BN}(0_+) \cdot k_1}{R_s} - U_{BA}(0_+) \cdot k_2 \right] \cdot e^{-\frac{t}{R_s C_s}} + U_{BA}(t) \cdot k_2 \\ I_{sc_5} = \left[\frac{U_{CA}(0_+) - U_{CN}(0_+) \cdot k_1}{R_s} - U_{CA}(0_+) \cdot k_2 \right] \cdot e^{-\frac{t}{R_s C_s}} + U_{CA}(t) \cdot k_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中， 0_+ 表示在阀 V_1 导通瞬间，

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2}} \angle \arctan(-\omega R_s C_s) \doteq 1 \angle 0^\circ,$$

$$k_2 = \frac{\omega C}{\sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2}} \angle \arctan\left(\frac{1}{\omega R_s C_s}\right) \doteq \omega C_s \angle 90^\circ.$$

阀 V_3 、阀 V_5 中的电流为

$$I_{th_3} = \frac{U_{BA}(t)}{R_{off}} \doteq 0, \quad I_{th_5} = \frac{U_{CA}(t)}{R_{off}} \doteq 0 \quad (3)$$

阀 V_1 中的电流为

$$I_{th_1} = -(I_{sc_1} + I_{sc_3} + I_{sc_5} + I_{th_3} + I_{th_5}) \quad (4)$$

将式(1)~式(3)代入(4)可得

$$I_{th_1} = 3U_m \cdot \omega C_s \cdot \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ) + \left[\frac{3U_m \cdot \sin(\alpha + 30^\circ)}{R_s} - 3U_m \cdot \omega C_s \cdot \sin(\alpha + 120^\circ) \right] e^{-\frac{t}{R_s C_s}} \quad (5)$$

式中，以阀 V_1 导通时刻为计时零点。

从式(5)可以看出：在阀 V_1 导通瞬间，阀 V_1 中流过的电流最大，最大值为 $3U_m \cdot \sin(\alpha + 30^\circ)/R_s$ 。随后，阀 V_1 中电流逐渐衰减，在电流变为 0 后，阀 V_1 关断。设阀 V_1 导通的角度为 $\Delta\theta$ ，则阀 V_1 关断瞬间阀 V_1 、 V_3 、 V_5 缓冲电路中电容电压为

$$\begin{cases} U_{sc_1}(0_+) \doteq 0 \\ U_{sc_3}(0_+) = U_{BA} \cdot k_1 \doteq U_{BA} = \sqrt{3}U_m \cdot \sin(\alpha - 120^\circ + \Delta\theta) \\ U_{sc_5}(0_+) = U_{CA} \cdot k_1 \doteq U_{CA} = \sqrt{3}U_m \cdot \sin(\alpha + 180^\circ + \Delta\theta) \end{cases} \quad (6)$$

阀 V_1 关断后，阀 V_3 、阀 V_5 缓冲电路电容中储存的能量使 U_{N1N} 基本保持不变。以阀 V_1 关断时刻为计时零点，由运算电路的分析可得 U_{N1N} 为

$$U_{N1N}(t) = -\frac{1}{3} \frac{R_{off}}{(R_s + R_{off})} \times [U_{sc_1}(0_+) + U_{sc_3}(0_+) + U_{sc_5}(0_+)] \cdot e^{-\frac{t}{(R_s + R_{off})C_s}} \doteq U_m [\cos(\alpha - 60^\circ + \Delta\theta)] e^{-\frac{t}{R_{off}C_s}} \quad (7)$$

在阀 V_1 触发脉冲的 120° 内有

$$U_{N1N} = \begin{cases} U_{AN} = U_m \cdot \cos(\omega t + \alpha - 60^\circ), & 0 \leq \omega t < \Delta\theta \\ U_m [\cos(\alpha - 60^\circ + \Delta\theta)] e^{-\frac{1}{R_{off}C_s}(t - \frac{\Delta\theta}{\omega})}, & \Delta\theta \leq \omega t < 120^\circ \end{cases} \quad (8)$$

式中，以阀 V_1 导通时刻为计时零点。

式(8)中 $\Delta\theta$ 与阀的导通时间有关，而导通时间与阀导通时缓冲电路的充电电流大小和缓冲电路时间常数有关。充电电流最大值与导通过程中 U_{N1N} 的变化量成正比，与缓冲电路的电阻 R_s 成反比。假定 $R_s C_s \rightarrow 0$ ，则阀 V_1 导通过程中的电流为

$$I_{th1} \doteq 3U_m \cdot \omega C_s \cdot \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ) \quad (9)$$

由式(9)可知: 当 $\alpha \geq 60^\circ$ 时, 阀 V_1 导通很短时间后就因电流为 0 而关断; 当 $\alpha < 60^\circ$ 时, 阀 V_1 不会立即关断, 在相电压达到峰值($\alpha = 60^\circ$)且电流过 0 后才会关断。

在阀 V_3 触发脉冲到来之前, 由于缓冲电路中电容的放电, U_{N1N} 会有所下降。

当 $\alpha \geq 60^\circ$ 时, 在触发脉冲到来时刻, 由于端电压必然大于 0, 阀 V_3 将按时导通。导通过程中, 阀 V_3 电流和 U_{N1N} 的变化情况与阀 V_1 类似, 只不过是导通过程中流过晶闸管的电流小了很多, 导通时间变短了。由于 U_{N1N} 的变化量很小, 充电/放电电流大大减小。

当 $\alpha < 60^\circ$ 时, 触发脉冲到来时刻, 阀 V_3 可能会因为端电压小于 0, 而被延迟到 ϕ 导通, 导通的角度范围为 $0^\circ \sim (60^\circ - \phi)$ 。导通期间 U_{N1N} 为相电压。阀 V_3 将在 $\alpha \geq 60^\circ$ 后关断, 关断后 U_{N1N} 从相电压峰值开始衰减。

后续阀与阀 V_3 的情况类似。在 $R_s C_s \rightarrow 0$, $R_{off} \rightarrow \infty$ 条件下有以下结论:

$$U_{N1N} \doteq \begin{cases} U_m \cos(\alpha - 60^\circ) & \alpha \geq 60^\circ \\ U_m & \alpha < 60^\circ \end{cases} \quad (10)$$

U_{N2N} 的情况与 U_{N1N} 类似。只不过 $U_{N2N} < 0$ 且最大值点滞后 U_{N1N} 60° 。

综上, 可得到 6 脉动换流器开路试验端电压理想公式为

$$U_d = 2U_{N1N} \doteq \begin{cases} 2U_m \cos(\alpha - 60^\circ) & \alpha \geq 60^\circ \\ 2U_m & \alpha < 60^\circ \end{cases} \quad (11)$$

实际上 R_{off} 为有限值(通常为几兆欧), $R_{off} C_s$ 取值通常为 0.1 s 数量级, 不能忽略。下面在 $R_s C_s \rightarrow 0$ 的条件下, 计算直流电压在一个工频周期内的平均值。

$\alpha \geq 60^\circ$ 时, 阀开通角度 $\Delta\theta$ 较小。假定 $\Delta\theta \rightarrow 0$, 在阀导通后的 120° 区间内有

$$U_{N1N} \doteq U_m \left[\cos(\alpha - 60^\circ) \right] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (12)$$

式中, $\tau = R_{off} C_s$ 。

直流电压平均值为

$$\bar{U}_d = 2\bar{U}_{N1N} = \frac{3}{\pi} U_m \tau \cos(\alpha - 60^\circ) (1 - e^{-\frac{2\pi}{3\omega\tau}}) \quad (13)$$

$\alpha < 60^\circ$ 时, 在阀导通后的 120° 区间内有

$$U_{N1N} \doteq \begin{cases} U_m \sin(\omega t + \phi + \frac{\pi}{6}) & 0^\circ \sim (60^\circ - \phi) \\ U_m e^{-\frac{1}{\tau}(\omega t - \frac{\pi}{3\omega} + \frac{\phi}{\omega})} & (60^\circ - \phi) \sim 120^\circ \end{cases} \quad (14)$$

直流电压平均值为

$$\bar{U}_d = 2\bar{U}_{N1N} = \frac{3}{\pi} U_m \left[\frac{1}{\omega} \cos(\phi + \frac{\pi}{6}) + \tau (1 - e^{-\frac{1}{3\omega\tau}(\frac{\pi}{3\omega} + \frac{\phi}{\omega})}) \right] \quad (15)$$

对于 12 脉动换流器, 直流电压为 6 脉动换流器的 2 倍。因此, 在理想条件($R_s C_s \rightarrow 0$, $R_{off} \rightarrow \infty$)下, 不带线路的 12 脉动换流器理想电压公式为

$$U_d \doteq \begin{cases} 4U_m \cos(\alpha - 60^\circ) & \alpha \geq 60^\circ \\ 4U_m & \alpha < 60^\circ \end{cases} \quad (16)$$

在非理想条件下不带线路的 12 脉动换流器理想电压(平均值)公式为

$$\bar{U}_d = \begin{cases} \frac{6}{\pi} U_m \tau \cos(\alpha - 60^\circ) (1 - e^{-\frac{2\pi}{3\omega\tau}}) & \alpha \geq 60^\circ \\ \frac{6}{\pi} U_m \left[\frac{1}{\omega} \cos(\phi + \frac{\pi}{6}) + \tau (1 - e^{-\frac{1}{3\omega\tau}(\frac{\pi}{3\omega} + \frac{\phi}{\omega})}) \right] & \alpha < 60^\circ \end{cases} \quad (17)$$

充电过程中充电电流的暂态最大值为

$$I_{chg_max} = 3U_m \cdot \sin(\alpha + 30^\circ) / R_s \quad (18)$$

3 带线路工况下开路试验

在这种工况下, 由于直流滤波器、平波电抗和线路的加入, 阀导通和关断的情况与不带线路时有所不同。由于电路阶数增加, 不易采用解析的方式计算。

文献[6]将换流阀中存在的分压、阻尼电路, 平波电抗器, 直流滤波器以及直流线路等因素等效为对地电容和对地电阻。但等值电路中的电容 C 和电阻 R 系数不易确定, 且阀的导通状况和带电线路时不同, 难以得到一个明确的公式。下文将通过实验方法进行分析。

4 EMTDC 仿真实验

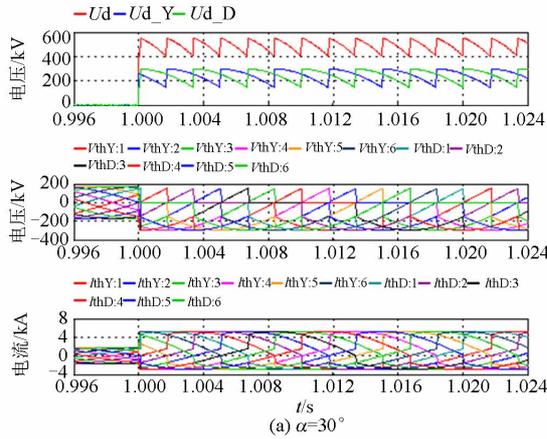
为验证上文对不带线路工况下的分析结果, 使用三沪 I 回直流输电工程参数, 在 EMTDC 搭建了相关试验模型。参数如下:

换流变副边线电压: 210.4 kV(相电压峰值 171.79 kV); 换流阀关断电阻: 1 M Ω ; 阀缓冲电路: $R_s=1\ 056\ \Omega$, $C_s=0.104\ \mu\text{F}$ 。平波电抗: 290 mH; 直流线路: 1 059 km, 塔高 27.18 m, 分裂间距 0.45 m, 双极导线水平距离 15 m, 4 分裂, 导线半径 0.018 12 m, 导线电阻率 0.040 02 Ω/km , 弧垂 15 m。

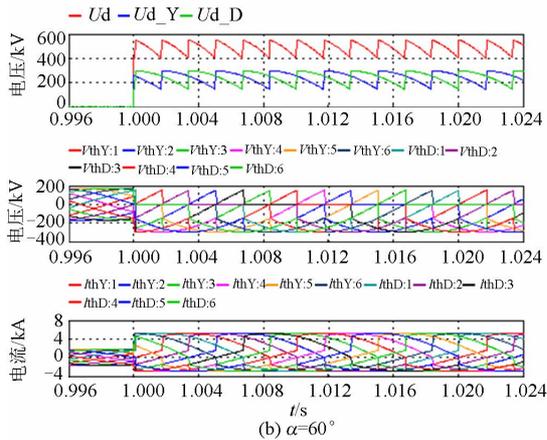
4.1 不带线路开路试验

在这种情况下, 不考虑直流滤波器的影响。为

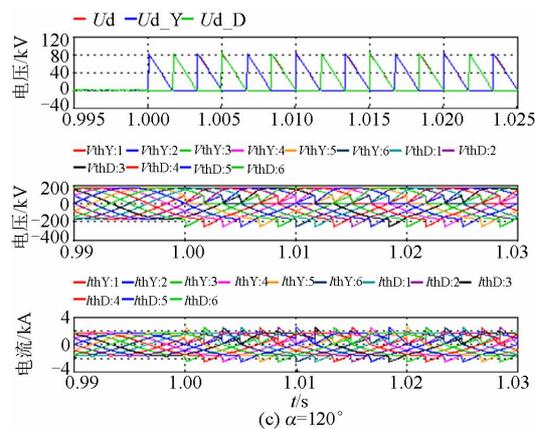
了说明缓冲电路对于直流电压保持的作用，该试验分别在禁用缓冲电路和启用缓冲电路的情况下进行。禁用缓冲电路时，在不同触发角下，12脉动换流器的直流电压如图4所示。



(a) $\alpha=30^\circ$



(b) $\alpha=60^\circ$



(c) $\alpha=120^\circ$

图4 不考虑缓冲电路以及线路工况下的直流电压

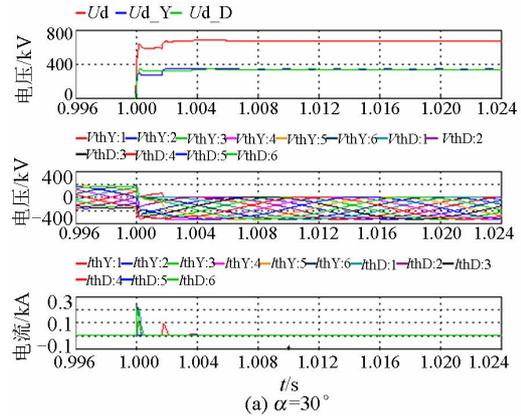
Fig. 4 DC voltage without considering RC snubber and DC line

图中 U_d 为直流电压， U_{d_Y} 、 U_{d_D} 分别为两个6脉动换流器输出的直流电压。 V_{thY} 、 V_{thD} 分别为两个6脉动换流器中每个阀两端的电压。 I_{thY} 、

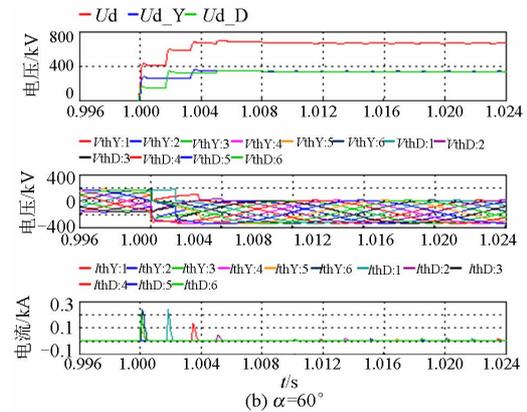
I_{thD} 分别为两个6脉动换流器中每个阀中的电流。

在不考虑缓冲电路的情况下，只要阀端电压为负，电流就会变负而关断，阀导通的时间较长。仿真结果与文献[5]的结论是一致的。

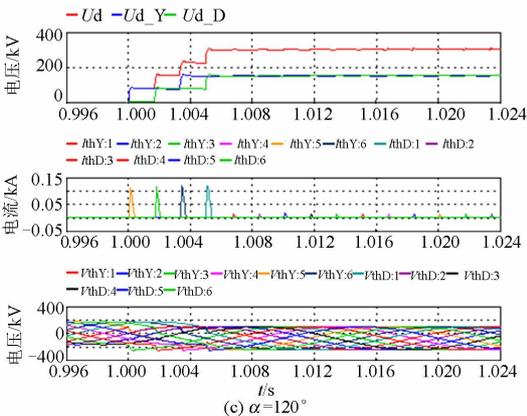
启用缓冲电路时在不同触发角下的12脉动换流器的直流电压如图5所示。



(a) $\alpha=30^\circ$



(b) $\alpha=60^\circ$



(c) $\alpha=120^\circ$

图5 考虑缓冲电路不带线路工况下的直流电压

Fig. 5 DC voltage considering RC snubber without DC line

从图中可以看出，在 $\alpha < 60^\circ$ 时，阀被延迟导通，导通时间较长，直流电压最大值和最小值与 $\alpha = 60^\circ$ 时很接近。 $\alpha \leq 60^\circ$ 时，阀导通时间很短。在阀关断后，直流端电压以一阶RC电路规律下降。直流

电压的变化规律与式(17)吻合。

在整个 α 角变化范围内, 直流电压变化情况如图6所示。

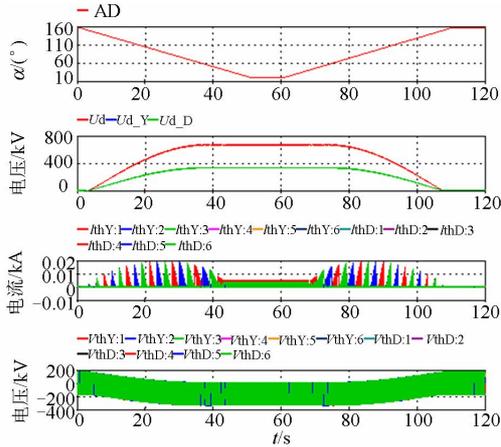


图6 不带线路工况下直流电压随 α 角的变化

Fig. 6 DC voltage without DC line when α varies

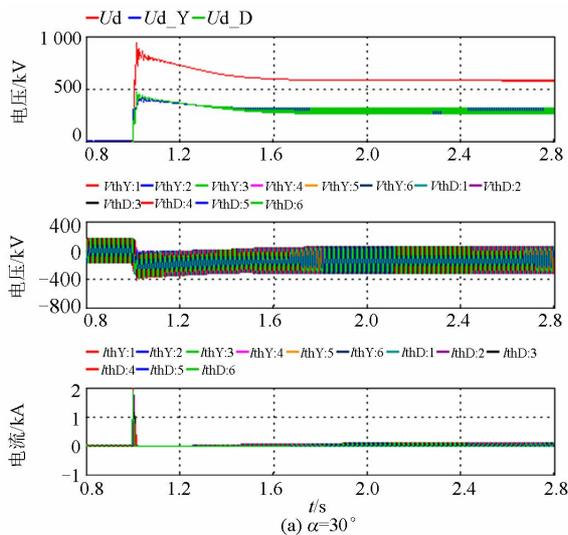
图中, AO为触发角。从图中看出, 最大直流电压出现在 $\alpha=54^\circ$ 左右, 此时直流电压为668 kV。 α 角与直流电压的关系与式(11)基本吻合。在直流电压升降过程中阀电流最大值为19 A。

实验结果表明: 缓冲电路对开路试验中直流电压的保持有着直接关系, 忽略缓冲电路将得到完全不同的结果。

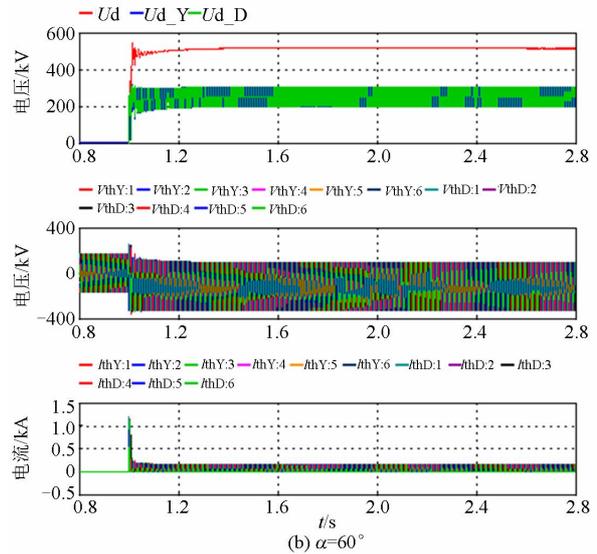
4.2 带线路开路试验

在带直流线路, 且连接直流滤波器的情况下, 不同触发角下的12脉动换流器直流电压如图7所示。

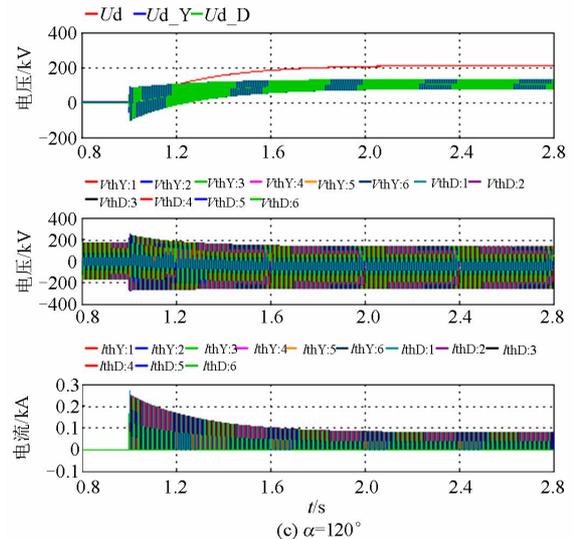
从图7中可以看出, 带直流线路工况下直流电压的波形与不带线路时完全不同。由于阀的导通状况与之前有较大差异, 直流电压最大值并不是出现在 $\alpha=60^\circ$, 在 $\alpha<60^\circ$ 范围内直流电压还可继续增大。



(a) $\alpha=30^\circ$



(b) $\alpha=60^\circ$



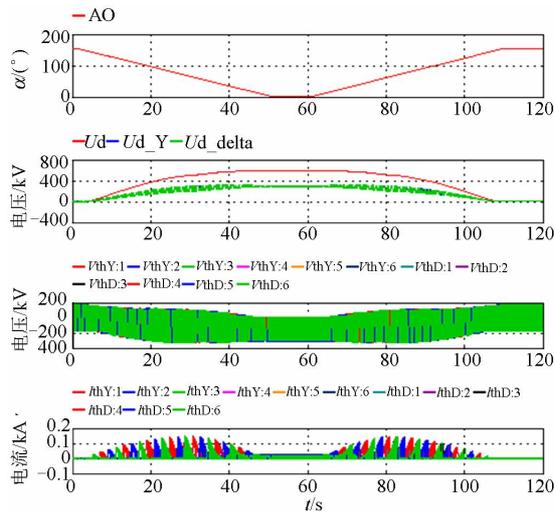
(c) $\alpha=120^\circ$

图7 带线路工况下直流电压随 α 角的变化
Fig. 7 DC voltage with DC line when α varies

在整个 α 角变化范围内的(12脉动换流器)直流电压变化情况如图8所示。

从图中看出, 最大直流电压出现在 $\alpha=15^\circ$, 此时直流电压为588 kV。直流电压与触发角的关系与不带线路理想工况有较大差异。这时如果用式(17)计算直流电压仍有较大误差。在直流电压升降过程中, 阀中电流最大值为147 A。电压稳定时, $\alpha=60^\circ$ 时的冲击电流最大。当 $\alpha<15^\circ$, 冲击电流基本不变。冲击电流主要是等值电阻决定的充电电流。这与前文的分析结果是一致的。随着触发角的减小, 阀电压为正的时间也减少, $\alpha<60^\circ$ 以后阀的开通时间加长, 阀电压波形更接近于换流器正常运行时的波形, 不会造成阀损坏。

因此, 开路试验保护的电压部分使用理想电压公式与电压实测值比较的方式作为判据是不合理

图8 带线路工况下直流电压随 α 角的变化Fig. 8 DC voltage with DC line when α varies

的。文献[6]提出可以使用改进的电压计算公式来修正原有电压判据。但改进的电压计算公式需要确定一个与线路有关的等效的电阻 R 和电容 C 的值。 R 和 C 的值不易确定。对于不同的直流工程，其直流线路长度、线路工况都是不同的， R 和 C 的确定需经大量的试验验证。且直流线路一般比较长，沿线气候变化、电晕放电等都会影响等值电阻和等值电容的值，也就是说在不同的触发角和工况下， R 和 C 的值是变量。这就导致在使用时需不断修正 R 和 C 的取值。如果 R 和 C 的取值不当，其计算值更易偏离真实值^[4]。可见，使用电压计算公式具有很大的局限性。不考虑电压原理保护，只采用电流原理保护作为空载加压试验失败的判据是可行的。

5 结论

本文基于阀的电路模型，运用电路原理，详细分析了不带线路情况下开路试验中阀的导通过程和电压能保持在直流侧的原因，得出了直流电压与触发角的关系。使用三沪 I 回详细模型，在 EMTDC 中进行了不带线路和带线路情况下的开路试验。理论推导与试验果表明：缓冲电路对开路试验中直流电压的保持有着直接关系；在不带线路情况下，直流电压最大值出现在触发角等于 60° 附近；在带线路工况下，在触发角小于 60° 后才达到额定值。ABB 理想电压公式只适用于不带线路情况下，触发角大于 60° 的工况。因此，开路试验可以不设置电压判据，只采用电流判据作为试验是否成功的依据。

参考文献

[1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力

出版社, 2004.

[2] 田庆. 龙政直流开路试验分析[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 45-47.

TIAN Qing. Analysis of Longzheng HVDC open line test[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 45-47.

[3] 江一. 贵广直流输电工程线路开路试验研究[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(6): 34-53.

JIANG Yi. Study on open line tests of Gui-Guang HDVC transmission project[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(6): 34-53.

[4] 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): 16-19.

LIU Xuanxuan. Analysis of open line test in Yunnan-Guangdong UHVDC transmission project[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(8): 16-19.

[5] 陶瑜. 葛洲坝-上海直流输电线路空载加压试验[J]. 电网技术, 1990, 5(2): 15-19.

TAO Yu. Open line test of DC transmission line between Shanghai and Gezhouba[J]. Power System Technology, 1990, 5(2): 15-19.

[6] 王明新. 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. Investigation on open line test principle of HVDC[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 11-14.

[7] 胡宇洋. 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): 30-32.

HU Yuyang. Fault analysis of open line test on DC side of Gezhouba converter station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 30-32.

[8] 中国南方电网超高压输电公司. 高压直流输电现场实用技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[9] 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.

[10] 陈仕龙, 束洪春, 万春红, 等. 一种特高压直流输电线路单端电压暂态保护原理[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 26-31.

CHEN Shilong, SHU Hongchun, WAN Chunhong, et al. The principle of single-ended transient based voltage protection for UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 26-31.

[11] 杨敏, 孙志军, 李楠, 等. 直流输电换流阀点火脉冲的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 126-129.

YANG Min, SUN Zhijun, LI Nan, et al. Design of firing pulse used for valves control in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 126-129.

- [12] 肖俊, 李兴源. 高压直流输电系统触发滞后角与换相时间关系的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 30-34.
XIAO Jun, LI Xingyuan. Analysis of the relationship between trigger-delayed angle and commutation time in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 41(14): 30-34.
- [13] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. ± 800 kV 直流输电线路边界保护的模型匹配时域算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 320-327.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. ± 800 kV DC transmission line boundary protection using model matching algorithms in time-domain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 320-327.
- [14] 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): 320-327.
WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 320-327.
- [15] 袁海燕, 傅正财. 基于有限元法的 ± 800 kV 特高压直流输电线路离子流场计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 139-146.
YUAN Haiyan, FU Zhengcai. Coronaionized field analysis of ± 800 kV HVDC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 139-146.

收稿日期: 2014-07-24; 修回日期: 2014-10-13

作者简介:

李 泰(1980-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电控制保护系统仿真研究工作; E-mail: taidouli@163.com

荆雪记(1979-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电控制保护系统仿真研究工作;

孔令凯(1982-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电控制保护系统软件设计工作。

(编辑 葛艳娜)