

DOI: 10.7667/PSPC180293

高压直流输电开路试验机理分析及解析计算

张秋实¹, 傅闯², 戴栋¹, 汪娟娟¹, 李志平²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 高压直流开路试验(Open Line Test, OLT)是检测换流阀、直流场设备、直流输电线路绝缘是否正常的重要手段。基于电力电子理论和电路理论,采用高压直流工程中换流阀实际运行参数及其触发控制方式,对高压直流开路试验建立可定量计算的等效电路。分别对带和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解析分析和定量计算,解释了两种工况下开路电压建立的原理与物理本质。采用等效电路定量计算不同工况下开路试验电压,计算结果相比于传统公式误差显著降低。在PSCAD/EMTDC中利用CIGRE高压直流标准测试模型,对计算结果进行了仿真验证。

关键词: 高压直流输电; 开路电压; 触发角; 缓冲电路

Mechanism analysis and analytical calculation of open line test for HVDC transmission

ZHANG Qiushi¹, FU Chuang², DAI Dong¹, WANG Juanjuan¹, LI Zhiping¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Co., Ltd, Guangzhou 510080, China)

Abstract: HVDC transmission Open Line Test (OLT) is the normal operation of an important means to detect the converter valves, DC equipment, and DC transmission line insulation. In this paper, the equivalent circuit for quantitative calculation of HVDC OLT is established based on the theory of power electronics and circuit theory and combined with the actual operating parameters and trigger control mode of converter valve in HVDC project. This paper analyzes and calculates the test principle with and without DC line OLT respectively and the process of establishing the open line voltage, and explains the principle and physical essence of establishing open line voltage under the two conditions. On this basis, the equivalent circuit is used to calculate the voltage of OLT under different conditions. The calculation results are more accurate than the traditional formula. The CIGRE simulation model of HVDC system is built by using PSCAD/EMTDC simulation software, and the simulation results are analyzed and verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777079), Smart Grid Joint Fund of State Grid Corporation of China (No. U1766213), and Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. ZBKJXM20180104).

Key words: high voltage direct current transmission; open line voltage; trigger angle; snubber circuit

0 引言

高压直流开路试验(Open Line Test, OLT)又称空载加压试验(以下简称开路试验),是高压直流输电工程投运之前必须开展的一项基本试验,是检验高压直流设备和线路绝缘性能以及控制保护系统功能是否正常的重要手段。此外,高压直流系统在设

备检修或长时间停运后,也必须通过开路试验的检验后方可正式送电^[1]。与直流输电系统稳态运行状态不同,开路试验条件下换流阀导通时间短、充电电流小,直流电压与触发角的关系与正常运行时完全不同,而开路试验目标电压需通过计算得到开路电压理论值设定。因此,研究开路试验的开路电压建立过程并且推导更适用的开路电压公式以保证开路试验顺利进行十分必要。

文献[2]结合穗东换流站与龙泉换流站开路试验进行分析,对比开路电压测量结果与理想开路电压计算结果,认为公式计算值与实测值之间存在较

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51777079);国家电网智能电网联合基金项目资助(U1766213);南方电网科技项目资助(ZBKJXM20180104)

大误差, 认为理想公式不适用于带线路工况开路试验, 并且分析了使用带直流线路的 12 脉动换流阀组开路电压计算公式的局限性和复杂性。文献[3]在不带线路工况下, 根据晶闸管的导通条件推导了直流电压与触发角的关系, 对比了高压直流输电系统正常运行工况下与不带线路工况下换流阀导通情况的不同, 并结合换流阀的导通条件分析不带线路工况下直流电压与触发角的关系, 并且结合葛上直流工程南桥站的现场试验数据对于带线路工况下实测电压与理论电压误差进行分析。文献[4]结合高压直流工程中换流阀实际运行参数及其触发控制方式建立了开路试验等效电路并且结合等效电路对开路电压建立过程进行分析, 认为开路电压建立过程的实质是交流侧电源对换流阀并联的缓冲电路电容充电后向直流侧电容转移电荷量的过程, 并且开路电压与触发角相关, 触发角小于 150° 开路电压不能建立。

文献[5]中从换流阀电路模型入手分析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得出结论, 认为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。文献[6]借鉴不带直流线路开路电压公式的推导方法, 分别对带和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, 并对现有开路电压计算公式进行修正。但是修正公式中中性点电压计算并未列出, 不适用于工程实际。

综上所述, 开路试验中主要通过 ABB 公司提出的理想不带线路工况下开路电压公式(即传统公式)计算开路电压理论值, 但是对比工程实测电压与传统公式计算结果有较大误差, 可能引起保护系统误动作, 因此传统公式使用有较大局限性。目前在开路试验原理研究方面已取得一定成果, 但仍有部分不足。虽然根据实验结果可以总结出经验公式应用于工程, 但是缺乏对开路电压建立过程的理论分析和结合电路的详细推导。鉴于此, 本文结合实际工程参数建立等效开路试验电路模型, 利用电力电子理论和电路理论对不带线路和带线路开路电压建立过程进行解析分析, 特别分析了换相电感对开路电压影响。在 PSCAD/EMTDC 中利用 CIGRE 高压直流标准测试模型对理论推导过程和计算结果进行仿真验证。

1 不带线路开路试验计算方法

1.1 开路试验基本原理模型

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^[7-8]。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, 其空载 6 脉动桥电路图如图 1 所示。

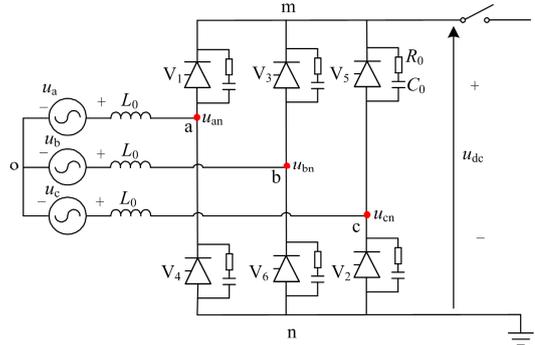


图 1 空载 6 脉动桥电路图

Fig. 1 No-load six ripple bridge circuit

图中, u_{an} 、 u_{bn} 、 u_{cn} 为换流变压器二次侧等值交流系统的工频基波正弦相电动势, L_0 为每相的等值换相电感, $u_{mn} = u_{dc}$ 为开路电压, u_o 为换流阀直流侧中性点电压。换流阀臂的等效电路模型如图 2 所示, 阀臂导通时电阻为零, 阀臂不导通电阻为 ∞ ^[9-10]。换流阀两端并联有 RC 缓冲电路, R_0 、 C_0 分别为单个桥臂上所有晶闸管极中缓冲电路等效后的电阻和电容, 其参数选择如表 1 所示; 阀 V_2 、 V_4 、 V_6 阳极共点于 n 点, 称为共阳极阀组; V_1 、 V_3 、 V_5 阴极共点于 m 点, 称为共阴极阀组^[11]。

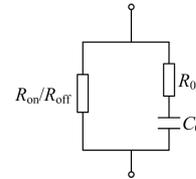


图 2 换流阀臂的等效电路模型

Fig. 2 Equivalent model of converter valve arm

设换流阀直流侧交流系统三相对称, 线电压电动势有效值为 U , 为后续计算方便考虑, 将线电压 u_{ac} 过零时设为计时零点, 则对称三相电压源 u_{an} 、 u_{bn} 、 u_{cn} 如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \sin(\omega t + 30^\circ) \\ u_{bn} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \sin(\omega t - 90^\circ) \\ u_{cn} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \sin(\omega t + 150^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

相应地, 线电压可表示为

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{an} - u_{bn} = \sqrt{2}U \sin(\omega t + 60^\circ) \\ u_{bc} = u_{bn} - u_{cn} = \sqrt{2}U \sin(\omega t - 60^\circ) \\ u_{ca} = u_{cn} - u_{an} = \sqrt{2}U \sin(\omega t + 180^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

由图 1 可得, 开路电压 U_{dc} 可以表示为

$$u_{dc} = u_{mn} = u_{mo} + u_{on} \quad (3)$$

1.2 理想工况空载直流开路电压建立过程分析

根据电路理论可知, 共阴极阀组的换流阀导通时对共阳极阀组的阀电压、阀电流等影响很小, 所以先针对一个半桥进行分析^[12]。

在第一个触发脉冲到来前, 空载半桥电路是一个三相交流平衡电路^[13-14], 中性点 O 点电动势为 0 且 $u_{mo}=0$, 易得此时开路电压 $u_{dc}=u_{mo}+u_{on}=0$ 。下面以阀 1 导通为例进行分析, 阀 1 导通时空载半桥示意图如图 3 所示。

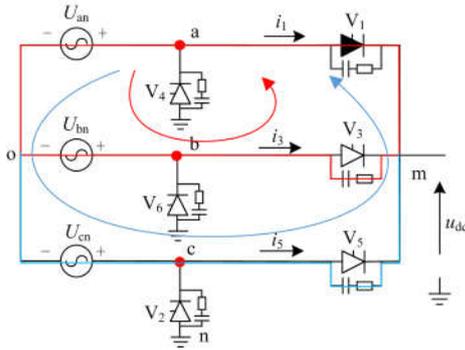


图 3 阀 1 导通时空载三相半桥等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of no-load three-phase half bridge of valve 1 conduction process

利用节点电压法求解以上电路, 设 $Z_0 =$

$R_0 - j\frac{1}{\omega C_0}$, O 点为参考节点, 可列方程如下:

$$\frac{u_m - u_{an}}{R_{on}} + \frac{u_m - u_{an}}{Z_0} + \frac{u_m - u_{bn}}{Z_0} + \frac{u_m - u_{cn}}{Z_0} = 0 \quad (4)$$

可以解得:

$$u_m = \frac{u_{an} Z_0}{3R_{on} + Z_0} \quad (5)$$

若晶闸管为理想元件, 导通电阻 $R_{on}=0$, 则阀 1 导通期间 $u_m \approx u_{an}$ 。换流阀在通过电流为 0 且承受反压时才关断。而在开路试验中, 换流阀导通时才有电流通过, 当触发角 $\alpha < 60^\circ$ 时, 换流阀会导通直到达到相电压峰值后承受反压才关断; 触发角大于等于 60° 时换流阀导通即承受反压, 当充电过程结束后即关断, 导通时间较小; 而触发角大于 150° 时

换流阀因阀两端一直承受反向电压而不会导通^[15-16]。结合换流阀参数可以计算得时间常数 $\tau=50.26 \mu s$, 不带线路工况下换流阀导通时间约为 $0.15\sim 0.3 ms$, 因此在开路试验中换流阀导通期间有足够长时间使换流阀电路进入稳态, 所以仅考虑电路拓扑切换后的稳态情况, 可以利用电荷守恒原理计算开路电压。

设各个换流阀缓冲电路电压分别为 U_{C1} 、 U_{C3} 、 U_{C5} , 因为电容电压不会突变, 所以, 阀 1 导通后:

$$\begin{cases} u_{C1} = u_m - u_{an} \approx 0 \\ u_{C3} = u_m - u_{bn} \approx u_{ab} \\ u_{C5} = u_m - u_{cn} \approx u_{ac} \end{cases} \quad (6)$$

设缓冲电路电容储存电荷总量为 Q , 可得

$$Q = (u_{C1} + u_{C3} + u_{C5})C_0 = (u_{C3} + u_{C5})C_0 \quad (7)$$

$$Q = (u_{ab} + u_{ac})C_0 = \sqrt{2}U(\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 60^\circ)) \quad (8)$$

根据式(8)可知: 当触发角 $\alpha \leq 60^\circ$ 时, 缓冲电路上储存的电荷量可以在换流阀导通期间达到电荷最大值, 开路电压可以达到最大值, 充电结束后当 $\omega t > 60^\circ$ 时换流阀承受反向电压关断^[17]; 当触发角 $60^\circ < \alpha < 150^\circ$ 时, 换流阀在相电压峰值过后才导通, 充电过程结束后缓冲电路上总电荷小于最大值, 开路电压随着触发角增大而降低。

因为开路电压由缓冲电路电容维持, 所以有:

$$u_{mo} = \frac{Q}{3C_0}。$$

$$\begin{cases} u_{mn} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}U (\alpha < 60^\circ) \\ u_{mn} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}U \sin(\alpha + 30^\circ) (60^\circ < \alpha < 150^\circ) \\ u_{mn} = 0 (150^\circ < \alpha) \end{cases} \quad (9)$$

类似于共阴极阀组, 共阳极阀组以阀 6 导通为例, 下半桥路电压 U_{on} 可以表示为

$$u_{on} = \frac{(u_{ba} + u_{bc})C_0}{3C_0} = \frac{\sqrt{2}U(\sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t - 60^\circ))}{3} \quad (10)$$

$$\begin{cases} u_{on} = -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}U (\alpha < 60^\circ) \\ u_{on} = -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}U \sin(\alpha + 30^\circ) (60^\circ < \alpha < 150^\circ) \\ u_{on} = 0 (150^\circ < \alpha) \end{cases} \quad (11)$$

将 6 脉动桥分为上、下两个半桥进行分析, 在换流阀解锁前电路处于三相平衡状态^[18-19], 当阀解

锁信号到来时, 共阳极阀组的阀 6 先导通, 下半桥的电压 U_{on} 建立过程如前面所述空载半桥相同, 因为有交流电压钳位, 在阀 1 导通前 $u_{mo}=0$, 下半桥电压建立过程不受上半桥影响, 当充电过程结束后换流阀内电流归零, 阀 6 关断。在下个触发脉冲到来时, 阀 1 导通, 期间因为有交流电压钳位 U_{on} 保持不变, 对共阴极阀组缓冲电路充电。后续情况各阀依次导通对缓冲电路充电, 直至到达稳态。下面根据不同触发角情况进行分析。

触发角 $\alpha < 60^\circ$ 时, 设换流阀以阀 6、1、2、 \dots 、6 的顺序导通, 阀解锁时刻阀 6、1 上均有正向电压, 故触发信号到来时阀 6、1 同时导通。根据上节计算结果可知, 阀 6、1 同时导通时上下半桥电压如式(12)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{mn} = \frac{(u_{ab} + u_{ac})C_0}{3C_0} = \\ \frac{\sqrt{2}U(\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 60^\circ))}{3} \\ u_{on} = \frac{(u_{ba} + u_{bc})C_0}{3C_0} = \\ \frac{\sqrt{2}U(\sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t - 60^\circ))}{3} \end{array} \right. \quad (12)$$

式中, $\omega t < 60^\circ$, 所以计算可得 $U_{mn} = U_{mnmax} = \sqrt{2}U$, $U_{mn} > U_{mnmax} = -\sqrt{2}U$ 。由此可得在触发角小于 60° 时, 阀解锁时刻虽然上下半桥同时导通, 但是共阴极阀组缓冲电路电容存储电荷已达到最大值, 而共阳极阀组的缓冲电路上储存的电荷量还未达到最大值, 因而在阀 1 导通后 60° 电角度阀 2 触发时缓冲电路中仍会有充电电流。若忽略阀关断期间的电荷损耗, 再过 60° 电角度阀 3 因两端没有正向电压而不会导通, 此后开路电压达到稳态状态。可表示为

$$u_{dc} = u_{mn} - u_{on} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \quad (13)$$

而触发角 $60^\circ < \alpha < 150^\circ$ 时, 在阀解锁时刻共阳极阀组上有一个阀先导通, 60° 电角度后共阴极阀组有一个阀导通, 之后按照阀导通顺序依次导通。不同于触发角小于 60° 的情况, 当触发角 $60^\circ < \alpha < 150^\circ$ 时缓冲电路电容上储存电荷量最大值就是换流阀导通时刻的电荷值, 稳态时开路电压表达式可表示为

$$u_{dc} = u_{mn} - u_{on} = \frac{\sqrt{2}U(\sin(\alpha + 60^\circ) + \sin(\alpha) - \sin(\alpha - 60^\circ) + \sin(\alpha - 120^\circ))}{3} \quad (14)$$

化简得:

$$u_{dc} = \sqrt{2}U \sin(\alpha + 30^\circ) \quad (15)$$

从以上分析可以看出, 在理想工况下不带线路开路试验电压建立过程的本质就是在阀导通期间对缓冲电路上电容充电, 开路电压由电容上能量维持, 开路电压的大小由阀导通时刻电压决定。综上所述, 开路电压可表示为

$$u_{dc} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U (\alpha < 60^\circ) \\ \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \sin(\alpha + 30^\circ) (60^\circ < \alpha < 150^\circ) \\ 0 (150^\circ < \alpha) \end{cases} \quad (16)$$

由以上推导可知, 在理想不带线路工况开路试验中, 某一半桥换流阀导通对其他阀组缓冲电路上储存能量不影响, 所以各个阀组可独立计算。12 脉动换流器含有两个 6 脉动桥共 4 个半桥, 随着换流阀导通, 4 个半桥上缓冲电路电容储存能量逐步提高达到稳态, 因此 12 脉动换流器开路电压相当于 6 脉动换流器的 2 倍, 最终得到高压直流输电系统不带直流线路开路试验开路电压公式(即传统公式)为

$$u_{dc} = \begin{cases} \frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U (\alpha < 60^\circ) \\ \frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \sin(\alpha + 30^\circ) (60^\circ < \alpha < 150^\circ) \\ 0 (150^\circ < \alpha) \end{cases} \quad (17)$$

2 换相电感对开路电压的影响分析

以上分析了不带直流线路高压直流换流器理想工况下开路电压的推导过程, 在换流阀导通的过程中, 由于交流系统和换流变压器存在感抗, 所以在开路试验计算过程中需要考虑换相电感对电压建立过程和稳态电压的影响^[20]。考虑换相电感后换流系统和控制方式和理想情况完全相同, 只是放电回路变为二阶电路, 因此可以借鉴以上分析方法用于考虑换相电感工况。仍以 6 脉动系统为例分析, 其电路图参考图 1 所示。

类似于理想情况下的空载 6 脉动电路, 考虑换相电感的不带线路开路试验可以对上下半桥电压分开计算。结合电力电子基础理论与电路理论可以对上下半桥分别建立微分模型分析电压建立过程。相比于理想不带线路工况, 考虑换相电感后相当于在原充电回路中串接了电感, 充电回路阶数提升, 单个换流阀导通期间充电过程增长; 但共阴极阀组的

换流阀导通时对共阳极阀组的阀电压、阀电流等影响依然很小，反之亦然，所以可以针对一个半桥的端电压变化进行分析^[21-22]。以阀 6 导通为例，在阀 6 导通期间主要对共阳极阀组的阀 2、阀 4 缓冲电路电容充电，下面选取阀 6 和阀 4 缓冲电路回路充电回路为例分析。

图 4 为阀 6 导通时阀 6 和阀 4 缓冲电路回路示意图，红色框表示导通路径。对于典型 500 kV 高压直流工程换流阀， $L_0=0.051$ H， $C_0=0.017$ 9 μ F， $R_0=2$ 808 Ω ，电路初始条件如下，其中 U 为线电压有效值。

$$u_{ab} = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \frac{\pi}{3}) \quad (18)$$

$$u_{an} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}U \sin(\omega t + \frac{\pi}{3}) \quad (19)$$

$$u_{c4}(0) = u_{an}(0) \quad (20)$$

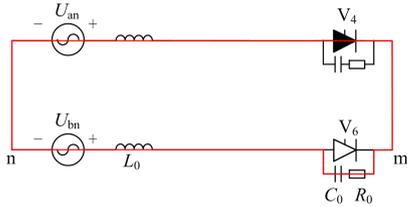


图 4 充电回路电路图

Fig. 4 Circuit diagram of charging circuit

利用 KVL 定理对图 4 所示电路建立微分方程可得：

$$2L_0C_0 \frac{du_{c4}^2}{dt^2} + R_0C_0 \frac{du_{c4}}{dt} + u_{c4} = u_{ab} \quad (21)$$

设特征根为 p ，可得特征方程：

$$2L_0C_0p^2 + R_0C_0p + 1 = 0 \quad (22)$$

设正弦激励为

$$u_{ab}(\alpha) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (23)$$

$$\varphi_0 = 60^\circ + \alpha \quad (24)$$

首先计算特征方程的特解，设特解为

$$u_{c4m} = \sqrt{2}U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (25)$$

利用向量分析法，可得：

$$u_m = \frac{U}{\sqrt{R_0^2 + [2\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0}]^2}} \frac{1}{\omega C_0} \quad (26)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{2\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0}}{R_0} \quad (27)$$

其次计算特征方程的通解，设：

$$a = \frac{R_0}{4L_0} = 1.37 \times 10^4 \quad (28)$$

$$b = \frac{1}{\sqrt{2L_0C_0}} = 2.34 \times 10^4 \quad (29)$$

方程特征根为

$$s_{1,2} = -a \pm \sqrt{a^2 - b^2} \quad (30)$$

因为 $a^2 - b^2 < 0$ ，所以特征方程有两个共轭复根，设其通解为

$$u_{c4h}(t) = (K_1 \sin \omega_1 t + K_2 \cos \omega_1 t) e^{-at} \quad (31)$$

其暂态响应分量为

$$\omega_1 = \sqrt{b^2 - a^2} \quad (32)$$

$$K_1 = \frac{a(u_{c4}(0) - U_m \sqrt{2} \sin \varphi) - \omega U_m \sqrt{2} \cos \varphi}{\omega_1} \quad (33)$$

$$K_2 = u_{c4}(0) - U_m \sin \varphi \quad (34)$$

可以计算得阀 4 缓冲电路电压为

$$u_{c4}(t) = u_{c4h}(t) + u_{c4m}(t) = (K_1 \sin \omega_1 t + K_2 \cos \omega_1 t) e^{-at} + \sqrt{2}U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (35)$$

对其求导可求得阀 6 导通期间阀 4 充电电流为

$$i_{c4}(t) = C_0 \frac{du_{c4}(t)}{dt} \quad (36)$$

同样方法可求得阀 6 导通期间阀 2 充电电压、电流为

$$u_{c2}(t) = u_{c2h}(t) + u_{c2m}(t) \quad (37)$$

$$i_{c2}(t) = C_0 \frac{du_{c2}(t)}{dt} \quad (38)$$

易求得阀 6 自放电回路电压、电流为

$$u_{c6}(t) = u_{c6}(0) \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (39)$$

$$i_{c6}(t) = C_0 \frac{du_{c6}}{dt} \quad (40)$$

阀 6 导通期间总电流为各阀充放电电流之和：

$$i_{v6}(t) = i_{c2}(t) + i_{c4}(t) + i_{c6}(t) \quad (41)$$

令阀 6 导通期间电流为 0，可求得阀 6 的导通时间，代入式(35)、式(37)、式(39)中可求得各阀缓冲电路电压，结合 1.2 节内容可依次计算各阀导通后开路电压。

在不带线路工况下因缓冲电路电容在阀关断后没有放电回路，开路电压稳态值取决于换流阀导通时刻阀电压值。在考虑换相电感的影响后，结合上述计算过程可以看出，换流阀关断后换相电感储能输入电容，进而导致开路电压稳态电压值上升。

3 带线路开路试验计算方法

3.1 带线路开路试验电压建立过程分析

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, 由于换流器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, 参考 CIGRE 高压直流标准测试模型将平波电抗器、直流滤波器与直流线路叠加体现为 π 型电路^[23-24], 其等值电路如图 5 红色框部分所示。

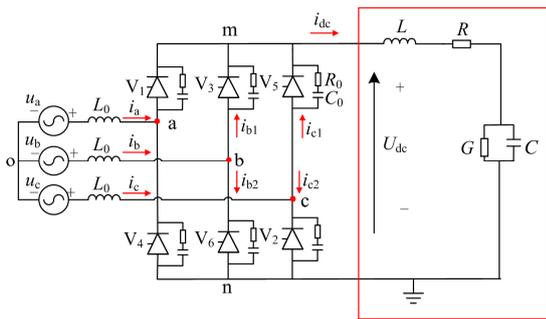


图 5 带直流线路开路试验系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of open line test system with DC line

图 5 中, R 、 L 、 C 分别是线路的电阻、电感、对地电容, i_{dc} 为开路电流。第 1.2 节分析不带线路开路试验是对缓冲电路电容充电的过程。结合 1.2 节对不带线路工况下开路电压建立过程分析与图 5 所示电路, 带线路工况开路试验中, 换流器和直流线路通过大地构成充电回路, 换流阀导通期间由交流侧向直流电路电容充电, 带线路开路电压为线路对地电容两端电压, 带线路开路试验开路电压建立的过程是向对地电容充电的过程^[25]。在换流阀导通阶段开路电流通过对地电容和另一阀组形成回路, 换流阀导通由交流侧向直流侧注入的能量只有小部分以热能的形式消耗在线路电阻上, 大部分能量对对地电容和另一个阀组缓冲电路电容充电^[26-27]。以阀 6 导通为例, 图 6 为阀 6 和阀 1 通过线路对地电容和对地电导构成回路电路图。

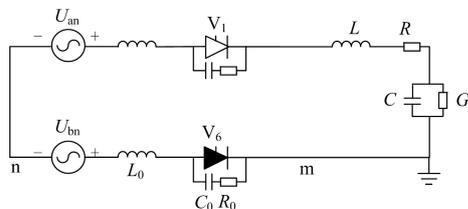


图 6 带线路开路试验二阶电路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of two order circuit with open line test

3.2 带线路开路电压计算

带线路开路试验电压的建立过程本质是通过对地电容与另一阀组构成回路, 在每个阀导通阶段对对地电容充电, 其电容电压就是开路电压。图 7 为阀 6 导通时刻带线路开路试验电路图, 共阳极阀组可以分为 v6v4 和 v6v2 两个二阶电路计算, 放电回路与不带线路工况相同, 电路图参考图 4; v6 通过对地电容回路与共阴极阀组形成回路, 可以分为 v6v1 和 v6v5 两个二阶电路计算, 电路如图 6 所示, 其中电路参数为: $L_0=0.0511$ mH, $C_0=0.0179$ μ F, $R_0=2808$ Ω , $L=0.5968$ H, $C=2.6$ μ F, $R=2.5$ Ω , $G=100$ M Ω 。

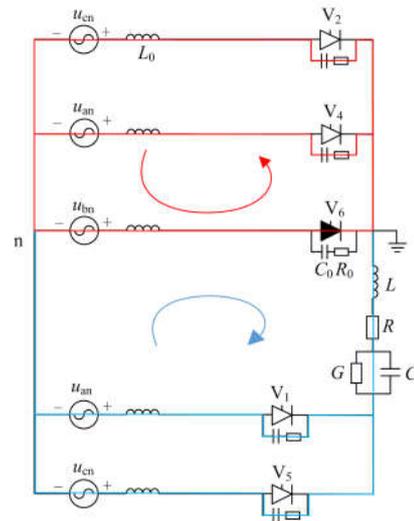


图 7 带线路开路试验二阶电路图

Fig. 7 Two stage circuit diagram with open line test

结合图 7 与 3.1 节分析可知, 达到稳态后缓冲电路电容上电压保持不变, 对地电容和对地电导回路形成自放电电路, 在阀关断期间会损失一部分电荷, 所以到达稳态后换流阀会间断性导通补充电荷。计算中假设电路已达到稳态, v6 导通时 v6v4 回路与 v6v2 回路与不带线路工况下充电回路相同, 其缓冲电路电容电压计算过程与第 2 章相同, v6v1 和 v6v5 回路中, 因为过程中缓冲电路电容比对地电容小三个数量级, 所以可以忽略缓冲电路电容简化二阶电路, 通过能量守恒快速求取稳态工况下对地电容电压。

结合图 7 对阀 6 导通期间各个回路列写微分方程, 其中 v6v2 和 v6v4 回路计算方法与第 2 章相同, 下面对 v6v1 和 v6v5 回路进行计算, 以 v6v1 回路为例, 根据 KVL 定理列写微分方程:

$$L_1 C_1 \frac{du_{C1}^2}{dt^2} + R_1 C_1 \frac{du_{C1}}{dt} + u_{C1} = u_{ab} \quad (44)$$

式中: $L_1 = 2L_0 + L$; $R_1 = R_0 + R$; $C_1 = C_0$ 。

可得特征方程:

$$L_1 C_1 p^2 + R_1 C_1 p + 1 = 0 \quad (45)$$

设正弦激励为

$$u_{ab}(\alpha) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (46)$$

$$\varphi_0 = 60^\circ + \alpha \quad (47)$$

设特解为 $U_{C1m} = \sqrt{2}U_m \sin(\omega t + \varphi)$, 利用向量分析法, 可得特解参数为

$$U_m = \frac{U}{\sqrt{R^2 + [\omega L_1 - \frac{1}{\omega C}]^2}} \cdot \frac{1}{\omega C}$$

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\omega L_1 - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

其次计算特征方程的通解, 设:

$$a = \frac{R_1}{2L_1} = 2010.37, b = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = 741.78 \quad (48)$$

方程特征根为

$$s_{3,4} = -a \pm \sqrt{a^2 - b^2} \quad (49)$$

与第 2 节不同之处在于, 忽略缓冲电路电容之后线路呈感性, $a^2 - b^2 > 0$, 二阶电路为过阻尼系统, 特征方程有两个不相等的负实数根, 设其通解为

$$u_{ch}(t) = K_3 e^{-\alpha_1 t} + K_4 e^{-\alpha_2 t} \quad (50)$$

令 $\alpha_1 = -S_3$, $\alpha_2 = -S_4$ 。

其暂态响应通解系数为

$$K_3 = \frac{-\alpha_2(u_{C1}(0) - U_{Cm} \sin \varphi) + \omega U_{Cm} \cos \varphi}{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (51)$$

$$K_4 = \frac{-\alpha_1(u_{C1}(0) - U_{Cm} \sin \varphi) + \omega U_{Cm} \cos \varphi}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (52)$$

所以可得阀 6 导通时 v6v4 回路对地电容电压与回路电流为

$$u_{C1}(t) = K_3 e^{-\alpha_1 t} + K_4 e^{-\alpha_2 t} + \sqrt{2}U_m \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (53)$$

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{du_{C1}(t)}{dt} \quad (54)$$

同理可求得 v6v5 回路对地电容电压与回路电流为

$$U_{C5}(t) = K_3 e^{-\alpha_1 t} + K_4 e^{-\alpha_2 t} + \sqrt{2}U_m \sin(\omega t + \varphi_3) \quad (55)$$

$$i_{C5}(t) = C_1 \frac{du_{C5}(t)}{dt} \quad (56)$$

而阀 6 导通期间电流为

$$I_{C6}(t) = I_{C1}(t) + I_{C5}(t) + I_{C4}(t) + I_{C6}(t) + I_{C2}(t) \quad (57)$$

令阀 6 导通期间电流为 0, 可求得阀 6 导通时

间 t , 代入式(53)、式(55)中求得对地电容电压为

$$u_{dc} = u_{C1} + u_{C5} \quad (58)$$

4 仿真验证

利用 CIGRE HVDC 标准测试模型验证以上分析结果及所提公式, 线路参数采用集中参数, 交流侧线电压有效值 $U = 232 \text{ kV}$, 其中换流阀阻尼回路参数采用实际高压直流工程换流阀典型参数。具体参数如表 1 所示。

在不带线路工况下, 分别在无缓冲电路、理想工况、考虑换相电感工况下进行仿真试验, 开路电压波形如图 8 所示。

表 1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of simulation system

参数	参数值	参数	参数值
换相电感 L_0	0.051 1 H	线路电感 L	0.596 8 H
缓冲电路电容 C_0	0.017 9 μF	线路电容 C	2.6 μF
缓冲电路电阻 R_0	2 808 Ω	线路电阻 R	2.5 Ω

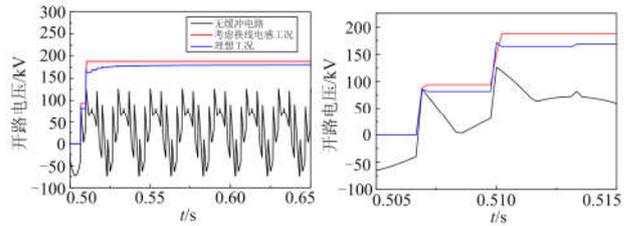


图 8 不带线路开路试验仿真结果(触发角 120°)

Fig. 8 Simulation results of OLT without line ($\alpha=120^\circ$)

从图 8 中可以看出, 在不带线路开路试验中, 如不考虑无缓冲电路, 开路电压无法维持, 证明了缓冲电路电容上储存的能量是维持开路电压的关键, 与第 1 章结论吻合。而考虑换相电感工况下, 由于电感储能, 阀导通时间较理想工况长, 开路电压稳态值也高于理想工况, 仿真结果与之前计算结果一致。

表 2—表 4 分别是理想工况和考虑换相电感工况在不同触发角下的仿真结果, 其中表 3、表 4 中传统公式计算结果分别由式(16)(6 脉动工况)和式(17)(12 脉动工况)计算所得, 新方法计算电压利用第 2 章所提方法计算所得。

从表 2 对比结果可以看出, 传统公式计算结果和仿真结果在理想工况下误差极小。从表 3、表 4 可以看出, 考虑换相电感工况下开路电压稳态值有显著提高。而利用本文在第 2 章所提计算方法, 考虑换相电感与缓冲电路参数利用二阶电路计算开路电压可以显著减少误差。

表 2 理想工况仿真结果

Table 2 Simulative results of OLT in ideal conditions

触发角 $\alpha(^{\circ})$	6 脉动 仿真 电压/kV	6 脉动 计算 电压/kV	6 脉动 误差/%	12 脉动 仿真 电压/kV	12 脉动 计算 电压/kV	12 脉动 误差/%
30	384.61	378.85	1.49	769.60	757.71	1.54
45	384.61	378.85	1.49	769.59	757.71	1.54
60	384.33	378.85	1.50	769.59	757.71	1.54
75	369.16	365.95	0.87	735.89	731.80	0.56
90	332.16	328.10	1.22	657.49	656.20	0.20
105	267.77	267.89	0.04	533.55	535.78	0.42
120	187.16	184.91	1.21	376.52	378.86	0.62
135	98.23	98.05	0.18	195.20	196.11	0.47
140	65.83	65.79	0.06	130.90	131.57	0.51
145	32.91	33.02	0.33	66.50	66.04	0.69

表 3 带感工况仿真结果(6 脉动)

Table 3 Simulative results of OLT without DC line considering communication inductance (six pulse converter)

触发角 $\alpha(^{\circ})$	6 脉动 仿真电 压/kV	传统公式 计算 电压/kV	传统公式 误差/%	新方法计 算电压/ kV	新方法 误差/%
30	384.64	378.85	1.50	378.85	1.50
45	384.66	378.85	1.50	378.85	1.50
60	385.08	378.85	1.56	378.85	1.56
75	375.94	365.95	2.66	377.84	0.51
90	352.28	328.10	6.86	356.66	1.24
105	281.39	267.89	4.79	285.37	1.41
120	190.77	184.91	3.07	189.43	0.60
135	99.01	98.05	0.97	99.27	0.26
145	33.68	33.02	1.97	33.16	1.54

表 4 带感工况仿真结果(12 脉动)

Table 4 Simulative results of OLT without DC line considering communication inductance (twelve pulse converter)

触发角 $\alpha(^{\circ})$	12 脉动仿真 电压/kV	传统公式 计算电压/kV	传统公 式误差/ %	新方法 计算电压/kV	新方法 误差/%
30	789.26	757.71	3.99	757.71	3.18
45	789.26	757.71	3.99	757.71	3.18
60	789.27	757.71	3.99	757.71	3.59
75	753.27	731.80	2.85	755.68	1.47
90	683.03	656.20	3.97	689.89	0.99
105	542.75	535.78	1.29	544.97	0.22
120	378.37	378.86	0.13	378.85	0.12
135	198.95	196.11	1.43	198.54	0.21
145	66.24	66.04	0.31	66.32	0.12

表 5、表 6 是带线路开路试验仿真结果与本文提出方法计算结果对比, 误差为对应计算结果与仿

真结果之差与仿真结果的相对误差。

表 5 带线路开路试验仿真结果(6 脉动)

Table 5 Simulative results of OLT with DC line (six pulse converter)

触发角 $\alpha(^{\circ})$	6 脉动仿真 电压/kV	传统公式计算 电压/kV	传统公式 误差/%	新方法计算 电压/kV	新方法 误差/%
30	370.60	378.85	2.23	373.64	0.42
45	370.89	378.85	2.15	372.77	0.54
60	371.26	378.85	2.04	372.16	0.24
75	353.35	365.95	3.57	357.54	1.19
90	313.76	328.10	4.57	319.38	1.79
105	253.28	267.89	5.77	259.04	2.28
120	175.13	184.91	5.58	181.39	3.43
135	86.60	98.05	13.22	89.71	3.59
145	26.92	33.02	22.66	28.20	4.77

表 6 带线路开路试验仿真结果(12 脉动)

Table 6 Simulative results of OLT with DC line (twelve pulse converter)

触发角 $\alpha(^{\circ})$	12 脉动 仿真电压/kV	传统公式计算 电压/kV	传统公式 误差/%	新方法计算 电压/kV	新方法 误差/%
30	749.17	757.71	1.14	747.28	0.25
45	749.05	757.71	1.16	745.54	0.47
60	750.59	757.71	0.95	744.32	0.84
75	718.71	731.80	1.82	715.48	0.51
90	640.01	656.20	2.53	638.76	0.20
105	518.48	535.78	3.34	518.08	0.08
120	362.89	378.86	4.40	362.78	0.03
135	183.23	196.11	7.03	179.42	2.08
145	57.28	66.04	15.29	56.40	1.54

通过对表 5、表 6 的仿真结果进行分析可知: 在带线路开路试验中, 传统公式的计算结果与测量结果之间存在较大差值, 且随着触发角的增加, 误差逐渐增大; 而采用本文计算方法可显著提高精度。

5 结论

1) 基于高压直流晶闸管换流器电路模型推导了理想工况下开路电压试验直流电压公式, 分析了不带线路开路试验直流电压的建立过程。分析结果表明, 不带线路开路试验直流电压的建立过程是对缓冲电路电容充电的过程, 并由缓冲电路电容维持开路电压。

2) 在开路试验直流电压传统计算公式推导的基础上考虑了换相电感对开路电压建立过程与稳态值的影响, 可列写微分方程开路电压进行计算。计算与仿真结果证明换相电感会增加换流阀导通时输入到直流侧的能量, 引起开路电压稳态值上升。

3) 分析了带线路开路试验工况下电压建立过

程, 其试验本质是对线路对地电容充电的过程, 同样可列写微分方程计算开路电压。

4) 将实际高压直流工程换流阀参数用在 CIGRE 标准测试模型中建立了开路试验仿真模型, 仿真结果解析计算结果的对比验证了本文理论分析和解析计算方法。

参考文献

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 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.
- [3] 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. Load pressure test of Gezhouba Dam Shanghai DC transmission line[J]. Power System Technology, 1990, 5(2): 15-19.
- [4] 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.
- [5] 李泰. 高压直流输电系统开路试验原理分析与工程建议[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 134-141.
LI Tai. Analyses on the principle of open line test in HVDC and some suggestion for its practice[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 134-141.
- [6] 张烁. 高压直流输电系统开路电压的研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 95-101.
ZHANG Shuo. Open line voltage of HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 95-101.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 林磊, 陈川, 胡鑫, 等. 不同故障下特高压换流变压器差动保护动作特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 123-133.
LIN Lei, CHEN Chuan, HU Xin, et al. Research on the characteristics of ultra-high voltage converter transformer differential protection under the internal and external faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 123-133.
- [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] 周国伟, 顾用地, 周建平, 等. 特高压直流输电系统非特征谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 122-128.
ZHOU Guowei, GU Yongdi, ZHOU Jianping, et al. Analysis of non-characteristic harmonic in UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 122-128.
- [16] 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 & Energy, 2012, 33(6): 521-525.
- [17] 祁招, 杨会磊, 胡子健, 等. 一种基于直流输电换流阀阀控设备的触发测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 125-129.
QI Zhao, YANG Huilei, HU Zijian, et al. Design of automatic test system for triggering function of HVDC

- valve control equipment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 125-129.
- [18] 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.
- [19] 田杰. 高压直流控制保护系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 10-14.
- TIAN Jie. Design and realization of HVDC control and protection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 10-14.
- [20] 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.
- [21] 那虎, 丁正平, 孙晋峰, 等. 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, et al. Arc current characteristic of DC circuit breaker in HVDC transmission and distribution system[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 67-71.
- [22] 裴昂, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
- PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.
- [23] 石岩, 徐玲玲, 陶瑜, 等. 背靠背换流站极控系统的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(9): 832-835.
- SHI Yan, XU Lingling, TAO Yu, et al. Study on BTB HVDC pole control system[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9): 832-835.
- [24] 邓文斌, 王世荣, 朱俊, 等. ± 500 kV 贵广直流输电系统空载加压试验分析[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 126-130.
- DENG Wenbin, WANG Shirong, ZHU Jun, et al. Analysis on ± 500 kV Gui-Guang HVDC system open line test[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 126-130.
- [25] 刘颖, 戴栋, 汪娟娟, 等. 基于逆变侧定电压控制的 HVDC 系统稳态和暂态响应特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 1-8.
- LIU Ying, DAI Dong, WANG Juanjuan, et al. Transient and steady responses in HVDC system based on constant voltage control at inverter side[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 1-8.
- [26] 宋军英, 王炜宇, 姜学皎, 等. 网络参数对电网暂态稳定性的影响[J]. 中国电力, 2017, 50(8): 87-92.
- SONG Junying, WANG Weiyu, JIANG Xuejiao, et al. The impact of grid parameters on transient stability[J]. Electric Power, 2017, 50(8): 87-92.
- [27] 刘丽娜, 陶加祥, 张业茂, 等. 特高压交流示范工程输电线路电磁环境实测分析[J]. 中国电力, 2017, 50(10): 46-51.
- LIU Lina, TAO Jiexiang, ZHANG Yemao, et al. Onsite measurement and analysis of transmission line electromagnetic environment for UHV AC demonstration project[J]. Electric Power, 2017, 50(10): 46-51.

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-05-28

作者简介:

张秋实(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流输电系统; E-mail: 512900897@qq.com

傅 闯(1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事大功率电力电子、高压直流输电、电能质量控制等方面的研发和应用工作; E-mail: fuchuang@csg.cn

戴 栋(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为大气压介质阻挡放电的非线性行为。E-mail: ddai@scut.edu.cn

(编辑 葛艳娜)