

高压直流输电系统开路电压的解析计算

余敬秋, 徐 政

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 高压直流开路试验是高压直流工程的一项重要试验, 准确的原理分析及开路电压的计算是十分必要的。从换流阀的基本模型入手, 详细分析了不带直流线路和带直流线路的开路试验中换流阀的导通情况, 建立了开路电压可定量计算的等效电路。通过列写换流阀开通时等效电路的微分方程, 建立换流阀关断时的拉氏变换电路, 对不带直流线路和带直流线路工况下的开路电压进行解析计算, 并阐述开路电压建立的基本过程和物理本质。最后, 在PSCAD/EMTDC软件中利用CIGRE高压直流标准测试模型验证了所提公式的准确性。

关键词: 电力系统; 高压直流输电; 换流阀; 开路试验; 缓冲电路; 开路电压

中图分类号: TM 721.1

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202111023

0 引言

高压直流输电在远距离、大容量输电和交直流联网等方面都起到了十分重要的作用^[1-2]。高压直流开路试验OLT(Open Line Test)又称为空载加压试验(下文简称开路试验), 是在高压直流输电工程投运前或者检修后再次投入前都必须进行的一项基本试验。开路试验是检验直流控制保护系统能否正常运行, 以及直流设备和直流线路绝缘水平是否满足要求的重要手段^[3-4]。与直流输电系统稳态运行时不同, 开路试验中换流阀导通角小, 会出现仅有单阀导通的情况, 因此直流电压与触发角的关系与正常运行时完全不同。而在开路试验中, 操作人员需要根据开路电压理论值判断设备的工作状况, 因此准确地分析开路电压的建立过程是十分必要的。

开路试验可以分为不带直流线路和带直流线路2种。不带直流线路的开路试验开路点一般设在直流线路首端, 用于检测换流阀控制保护系统的工作状态; 带直流线路的开路试验开路点一般设在直流线路末端, 既能检测换流阀控制保护系统的工作状态, 又能检验直流线路和直流设备的绝缘水平。对于不带直流线路的开路试验输出电压公式, 很多文献都已给出; 而对于带直流线路的开路试验, 目前尚未有文献明确给出其开路电压与触发角的关系式。

文献[5]在不带直流线路工况下, 给出了3种触发角范围内直流电压与触发角的关系。对于带直流线路的工况, 通过对比实验结果与计算结果, 指出差异是由于直流侧存在电阻和电容。文献[6]给出了ABB公司在三常直流工程中采用的开路试验电压的理想计算式, 但其推导的前提是不考虑换流器的分压回路和阻尼回路, 所得出的结论与文献[5]有所不同。文献[7]从换流阀电路模型入手分析不带直流

线路的开路试验中换流阀的导通情况, 推导出理想情况下直流电压与触发角的关系式。文献[8]对穗东换流站与龙泉换流站的开路试验进行分析, 对比开路试验测量值和理想公式计算值, 认为理想公式不适用于带直流线路的开路试验。文献[9]借鉴不带直流线路开路电压公式的推导方法, 分别分析了带直流线路和不带直流线路工况下开路试验的试验原理和建立过程, 并对现有的开路电压计算公式进行了修正, 但是并未给出带直流线路工况下开路电压的表达式。文献[10]将直流侧等值为阻容回路, 给出了带直流线路工况下开路电压的表达式, 但是推导开路电压表达式的假设条件过于简化, 且缺乏对开路电压建立过程的分析。文献[11]基于换流阀的实际电路, 分别对带直流线路和不带直流线路时开路试验的试验原理及建立过程进行了解析分析和定量计算, 计算过程中考虑了换相电感的影响, 但并未对开路电压的建立过程进行分析, 仅推导了单阀导通时的开路电压, 难以用于工程实践。

现有文献在开路试验原理研究方面取得了一定的成果, 但是均未从换流阀等效电路入手分析开路电压的建立过程, 缺乏对开路电压建立过程的理论分析和详细推导。鉴于此, 本文从换流阀等效电路入手, 阐述了开路电压的建立过程, 结合换流阀导通和关断时的详细模型, 利用电力电子学理论和电路理论对带直流线路和不带直流线路工况下开路电压的建立过程进行了定性分析和定量计算。在阀导通时, 通过列写回路微分方程研究换流阀的导通情况和电压、电流特性; 在阀关断时, 建立换流阀关断后的拉氏变换电路, 分析换流阀阻容回路和直流侧的电压、电流特性。最后, 本文在PSCAD/EMTDC软件中利用CIGRE高压直流标准测试模型对所推导的开路电压表达式进行了仿真验证。

1 换流阀结构及其等值电路

高压直流系统多采用的是十二脉动换流器,十二脉动换流器由2个六脉动换流器串联构成,十二脉动换流器的输出电压为六脉动换流器的2倍^[12-14]。因此为了简化分析过程,本文仅对六脉动换流器开路电压的建立过程进行分析,且忽略交流侧电感的影响,图1为六脉动换流器拓扑。图中, e_a 、 e_b 、 e_c 为交流侧三相等值交流电源电压; u_a 、 u_b 、 u_c 为三相阀侧电压; V_1 、 V_3 、 V_5 为共阴极阀组, V_2 、 V_4 、 V_6 为共阳极阀组; R_0 、 C_0 分别为桥臂缓冲电路的等值电阻和电容; u_{po} 为共阴极点 p 相对于交流侧中性点 o 的电压; u_{no} 为共阳极点 n 相对于交流侧中性点 o 的电压; u_{dc} 为直流侧开路电压,且 $u_{dc} = u_{po} - u_{no}$ 。

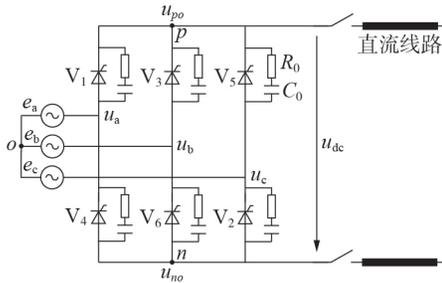


图1 六脉动换流器拓扑

Fig.1 Topology of six-pulse converter

设交流侧线电压有效值为 E ,电源角频率为 ω ,将线电压 e_{ac} 过零点设为起始时刻,则交流侧相电压如式(1)所示。

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

2 不带直流线路时开路电压的建立

由于直流侧开路,因此共阴极点 p 和共阳极点 n 之间没有直接回路。在触发脉冲来临前,六脉动桥是一个三相平衡电路,交流侧中性点 o 、共阴极点 p 和共阳极点 n 这3点等电位,直流侧开路电压为0。

根据电路理论可知,共阴极阀组和共阳极阀组之间无相互影响,因此可以单独对共阴极半桥电路进行分析, V_1 导通时共阴极半桥电流通路如图2所示。

假设 V_1 为第一个要触发导通的阀,则在 V_1 导通之前的瞬间,由于 o 点和 p 点等电位,即 $u_{po} = 0$,故 V_1 、 V_3 、 V_5 缓冲电路电容两端的电压如式(2)所示。

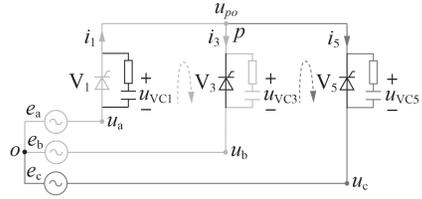


图2 V_1 导通时共阴极半桥电流通路

Fig.2 Current path of common cathode half-bridge when V_1 is triggered on

$$\begin{cases} u_{VC1}(t_\alpha) = -e_a(t_\alpha) = -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\alpha + 30^\circ) \\ u_{VC3}(t_\alpha) = -e_b(t_\alpha) = -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\alpha - 90^\circ) \\ u_{VC5}(t_\alpha) = -e_c(t_\alpha) = -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\alpha + 150^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为触发角; t_α 为阀触发导通时刻; u_{VC1} 、 u_{VC3} 和 u_{VC5} 分别为 V_1 、 V_3 和 V_5 缓冲电路电容电压。

在 V_1 导通后, V_1 的缓冲电路被短接,缓冲电路电容放电。而 V_3 、 V_5 两端的电压为相应的线电压,缓冲电路电容开始充电。充放电过程如下:

$$\begin{cases} R_0 C_0 \frac{du_{VC1}}{dt} + u_{VC1} = 0 \\ R_0 C_0 \frac{du_{VC3}}{dt} + u_{VC3} = e_a - e_b = \sqrt{2} E \sin(\omega t + 60^\circ) \\ R_0 C_0 \frac{du_{VC5}}{dt} + u_{VC5} = e_a - e_c = \sqrt{2} E \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

在 V_1 导通期间,共阴极阀组各缓冲电路电容电压及共阴极点电压表达式如附录A式(A1)所示。则流经 V_1 的电流 i_{V1} 为:

$$\begin{aligned} i_{V1} = & C_0 \frac{du_{VC1}(t)}{dt} + C_0 \frac{du_{VC3}(t)}{dt} + C_0 \frac{du_{VC5}(t)}{dt} = \\ & \frac{\sqrt{6} E \omega C_0}{\sqrt{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2}} \cos(\omega t + 30^\circ - \varphi_c) + \\ & \frac{\sqrt{6} E}{R_0 \sqrt{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2}} \sin(\alpha + 30^\circ - \varphi_c) e^{-\frac{t - \alpha}{R_0 C_0}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: φ_c 为电流 i_{V1} 的初始相位角。

从式(4)可以看出,流经 V_1 的电流在阀刚导通时最大,随后逐渐减小,在电流降为0之后 V_1 关断。换流阀缓冲电路电容数量级通常为 10^{-8} F,电阻数量级通常为 10^3 Ω ,因此缓冲电路充放电时间常数通常在 μs 级。而换流阀导通的时间通常在 ms 级,因此流经 V_1 的电流的暂态分量很快衰减为0,电路迅速进入稳态,此时流经 V_1 的电流可以表示为:

$$i_{V_1} = \frac{\sqrt{6} E \omega C_0}{\sqrt{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2}} \cos(\omega t + 30^\circ - \varphi_c) \approx \sqrt{6} E \omega C_0 \cos(\omega t + 30^\circ) \quad (5)$$

从式(5)可知:当 $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时, V_1 导通后在相电压峰值($\omega t = 60^\circ$)时因电流降为0而关断;当 $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 时, V_1 导通后在极短时间内就因电流降为0而关断。因此,在不带直流通路的开路试验中,单阀的导通角度不超过 60° ,每一时刻仅有单个阀处于导通状态,不存在2个或3个阀同时导通的情况,所以单独对三相半桥电路进行分析是合理的。

2.1 $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时开路电压的建立

当 $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时,在阀触发导通后,共阴极点电压随相电压变化而变化,达到相电压峰值后阀关断。在相电压峰值时刻 t_p 处,共阴极阀组缓冲电路电容电压为:

$$\begin{cases} u_{V_{C1}}(t_p) = 0 \\ u_{V_{C3}}(t_p) = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2}} \sin(60^\circ + 60^\circ - \varphi_c) \approx \frac{\sqrt{6}}{2} E \\ u_{V_{C5}}(t_p) = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2}} \sin(60^\circ - \varphi_c) \approx \frac{\sqrt{6}}{2} E \end{cases} \quad (6)$$

当 $\omega t \geq 60^\circ$ 时, V_1 关断,共阴极半桥的拉氏变换电路如图3所示。 V_1 的缓冲电容从零状态开始充电, V_3 和 V_5 的缓冲电容从式(6)所示的初始电压开始放电。

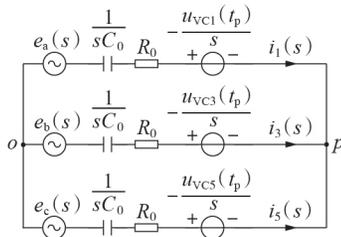


图3 V_1 关断后共阴极半桥的拉氏变换电路

Fig.3 Laplace transform circuit of common cathode half-bridge after V_1 is turned off

列写图3所示电路的回路电压方程和节点电流方程,如附录A式(A2)所示。根据式(A2)可以求得流经 V_1 阻容回路的电流 $i_1(s)$ 和共阴极点电压 $u_{po}(s)$ 的表达式如附录A式(A3)所示。经拉氏反变换后可得共阴极点电压为:

$$u_{po}(t) = \frac{\sqrt{6} E}{3} = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, V_1 关断后,共阴极点电压保持为相电压的幅值不变。即共阴极点电压在 V_1 导通后随相电压变化达到峰值,在 V_1 关断后保持为相电压峰值不变。

V_1 关断前和关断后,各缓冲电路所储存的电荷

总量分别为:

$$Q_{on} = C_0(u_{V_{C1}}(t_p) + u_{V_{C3}}(t_p) + u_{V_{C5}}(t_p)) = \sqrt{6} C_0 E \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Q_{off} &= C_0(u_{V_{C1}}(t) + u_{V_{C3}}(t) + u_{V_{C5}}(t)) = \\ &= C_0(3u_{po}(t) - e_a(t) - e_b(t) - e_c(t)) = \\ &= \sqrt{6} C_0 E = Q_{on} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: Q_{on} 和 Q_{off} 分别为 V_1 关断前和关断后共阴极桥缓冲回路电容所储存的电荷总量。

由式(8)和式(9)可以看出, V_1 关断后仅存在 V_1 、 V_3 和 V_5 缓冲电路电容电荷的再平衡过程,而共阴极点电压不受电荷平衡过程的影响。

由于共阴极点电压保持为相电压峰值不变,因此在 V_1 关断后,共阴极阀组均承受反向电压,后续无法再触发导通,共阴极点电压 u_{po} 始终保持为相电压峰值。

同理,对于共阳极阀组而言,在第1个阀触发导通后,共阳极点电压保持为负的相电压峰值不变。以 $\alpha = 30^\circ$ 为例,开路电压的建立过程如图4所示。

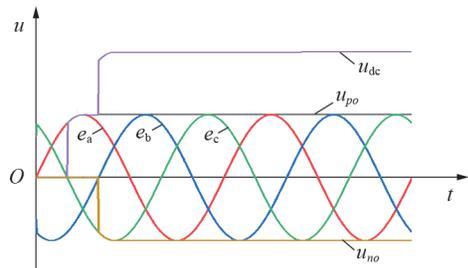


图4 $\alpha = 30^\circ$ 时开路电压的波形

Fig.4 Waveforms of open line voltage when $\alpha = 30^\circ$

则直流侧开路电压稳态值为:

$$u_{dc} = u_{po} - u_{no} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \quad (10)$$

2.2 $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 时开路电压的建立

当 $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 时, V_1 触发导通后即迅速因电流降为0而关断。 V_1 导通时间极短,因此可以认为在阀导通期间交流侧电压基本保持不变,可将交流电源当作直流源来求解直流侧开路电压。故而在阀导通期间,共阴极半桥可以简化为如附录A图A1所示的电路。

V_1 导通后,各阀缓冲电路的充放电方程可以用式(11)描述。

$$\begin{cases} R_0 C_0 \frac{du_{V_{C1}}}{dt} + u_{V_{C1}} = 0 \\ R_0 C_0 \frac{du_{V_{C3}}}{dt} + u_{V_{C3}} = e_a(t_p) - e_b(t_p) = \sqrt{2} E \sin(\alpha + 60^\circ) \\ R_0 C_0 \frac{du_{V_{C5}}}{dt} + u_{V_{C5}} = e_a(t_p) - e_c(t_p) = \sqrt{2} E \sin \alpha \end{cases} \quad (11)$$

在 V_1 导通前,各阀缓冲电路电容两端电压如式

(2)所示,则可求得各缓冲电路电容电压如附录A式(A4)所示。

则流经 V_1 的电流为:

$$i_{V1} = C_0 \frac{du_{VC1}(t)}{dt} + C_0 \frac{du_{VC3}(t)}{dt} + C_0 \frac{du_{VC5}(t)}{dt} = \frac{\sqrt{2}E}{R_0} \sin(\alpha + 30^\circ) e^{-\frac{t-t_\alpha}{R_0 C_0}} \quad (12)$$

从式(12)可以看出,流经 V_1 的电流和缓冲电路电容电压的衰减时间常数是相同的,因此在 V_1 关断时,缓冲电路电容电压即进入稳态。则 V_1 关断后共阴极点的电压为:

$$u_{po}(t) = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{3}} \sin(\alpha + 30^\circ) \quad (13)$$

此后共阴极阀组均承受反向电压,共阴极阀组无法再次导通,共阴极点电压保持式(13)所示的值不变。同理,在共阳极阀组关断后共阳极点电压保持不变。以 $\alpha=90^\circ$ 为例,开路电压的建立过程如附录A图A2所示。

直流侧开路电压稳态值为:

$$u_{dc} = u_{po} - u_{no} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\alpha + 30^\circ) \quad (14)$$

综上所述,不带直流线路的开路试验中开路电压的建立过程就是在阀导通期间由交流侧相电压对缓冲电路电容充电,阀关断后开路电压由缓冲电路电容维持,开路电压的大小由阀导通时刻决定,具体如下:

$$u_{dc} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E & 0^\circ \leq \alpha < 60^\circ \\ \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sin(\alpha + 30^\circ) & 60^\circ \leq \alpha < 150^\circ \\ 0 & 150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases} \quad (15)$$

3 带直流线路时开路电压的建立

对于带直流线路的开路试验而言,由于直流侧存在直流滤波器、平波电抗器和直流线路等元器件,共阴极点和共阳极点之间有直接电气回路,该情况下换流阀的导通情况与不带直流线路时有所不同,因此开路电压的建立需要同时计及共阴极阀组和共阳极阀组。为便于分析,将平波电抗器、直流线路和直流滤波器的串并联等值为RC并联电路^[6,10],等值简化电路如图5所示。图中, R 为等值电阻; C 为等值电容。

下面以 V_1 触发导通为例分析开路电压的建立过程。当直流侧电容电压小于交流侧线电压时,共阴极阀组和共阳极阀组同时有阀导通,交流侧线电压对直流侧电容直接进行充电。阀的导通取决于交

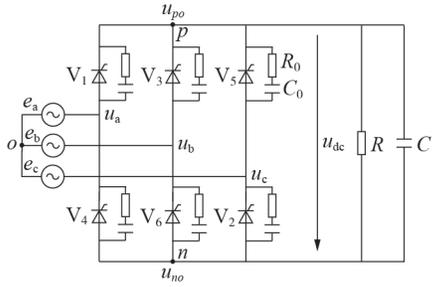


图5 带直流线路时六脉动换流器的等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of six-pulse converter with DC lines

流侧线电压值的相对大小,以 V_1 触发导通为例:当 $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时, V_6 导通,由线电压 e_{ab} 对直流侧电容进行充电;当 $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 时, V_2 导通,由线电压 e_{ac} 对直流侧电容进行充电。当直流侧电压达到导通期间线电压的最大值时,交流侧线电压小于直流侧电压,其中1个阀因承受反向电压而关断,此后进入仅有单阀导通的状态。

当仅有 V_1 导通时,交流侧相电压通过共阳极阀组的缓冲回路对直流侧电容充电,如图6所示。共阴极阀组 V_1 、 V_3 和 V_5 缓冲回路充放电过程与图2所示电路相同,下面分析交流侧通过共阳极阀组缓冲回路对直流侧电容的充电过程。

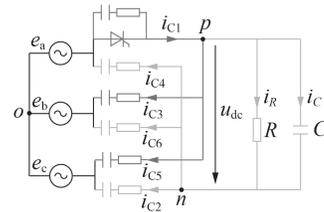


图6 仅 V_1 导通时六脉动桥的电流通路

Fig.6 Current path of six-pulse bridge when only V_1 is triggered on

直流侧电容充电方程为:

$$\begin{cases} u_c + R_0 i_{C2} + u_{VC2} = e_{ac} \\ u_c + R_0 i_{C4} + u_{VC4} = 0 \\ u_c + R_0 i_{C6} + u_{VC6} = e_{ab} \\ i_c + i_R = i_{C2} + i_{C4} + i_{C6} \end{cases} \quad (16)$$

式中: u_c 为等值电容两端电压; i_c 和 i_R 分别为流经等值电容和等值电阻的电流; i_{C2} 、 i_{C4} 、 i_{C6} 分别为流经 V_2 、 V_4 和 V_6 阻容回路的电流。

因此有:

$$R_0 C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + \left(3 + \frac{R_0}{R} + \frac{C}{C_0} \right) \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{RC_0} u_c = \frac{d(e_{ac} + e_{ab})}{dt} \quad (17)$$

考虑到 $C \gg C_0$,可以求得直流侧等值电容电压和电流为:

$$\begin{cases} u_c = k_1 e^{-\frac{1}{R_0 C_0}(t-t_d)} + k_2 + \frac{C_0}{C} \sqrt{6} E \cos(\omega t + 120^\circ) \\ i_c = -\frac{C}{R_0 C_0} k_1 e^{-\frac{1}{R_0 C_0}(t-t_d)} + \sqrt{6} E \omega C_0 \cos(\omega t + 30^\circ) \end{cases} \quad (18)$$

式中: k_1 和 k_2 为与阀导通时电路的初始状态有关的系数; t_d 为进入仅有单阀导通状态的时刻。

则结合式(12), 可求得流过 V_1 的稳态电流为:

$$i_{V1} = i_c + i_{V3} + i_{V5} + i_{VC1} \approx 2\sqrt{6} E \omega C_0 \cos(\omega t + 30^\circ) \quad (19)$$

从式(19)可以看出: 当 $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时, V_1 在导通后达到相电压峰值 ($\omega t = 60^\circ$) 即因电流降为 0 而关断; 当 $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 时, V_1 在导通后的短时间内就因电流降为 0 而关断, 导通时间极短。

V_1 关断后, 六脉动桥的拉氏变换电路如图 7 所示。

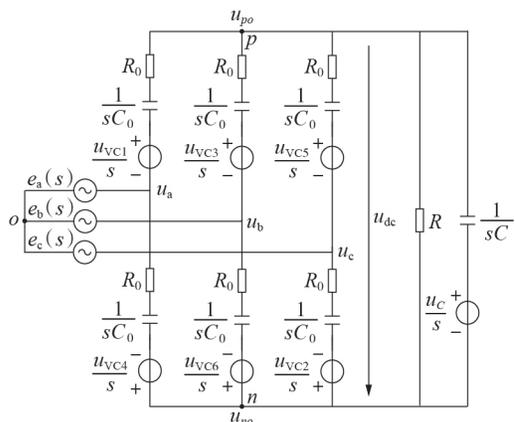


图 7 V_1 关断时六脉动桥的拉氏变换电路

Fig.7 Laplace transform circuit of six-pulse bridge when V_1 is turned off

若将 V_1 关断时刻定为起始时刻, 则阀关断时各阀缓冲电路电容上的电压为:

$$\begin{cases} u_{po}(0) = e_a(0), u_{no}(0) = e_a(0) - u_c(0) \\ u_{VC1}(0) = 0, u_{VC3}(0) = e_{ab}(0), u_{VC5}(0) = e_{ac}(0) \\ u_{VC2}(0) = -u_c(0), u_{VC4}(0) = e_{ab}(0) - u_c(0) \\ u_{VC6}(0) = e_{ac}(0) - u_c(0) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $e_a(0)$ 为 V_1 关断时刻 a 相电压; $u_c(0)$ 为 V_1 关断时刻直流侧等值电容电压; $e_{ab}(0)$ 为 V_1 关断时刻 ab 相线电压; $e_{ac}(0)$ 为 V_1 关断时刻 ac 相线电压。

列写图 7 所示电路的节点电压方程, 如附录 A 式(A5)所示。

则共阴极点和共阳极点电位为:

$$\begin{cases} u_{po}(s) = \frac{e_a(0)}{s} - \frac{u_c(0)}{sR \left[\frac{3}{R_0 + \frac{1}{sC_0}} + 2 \left(sC + \frac{1}{R} \right) \right]} \\ u_{no}(s) = u_{po}(s) - u_c(s) \end{cases} \quad (21)$$

若考虑到 $C \gg C_0$, 则共阴极点电位可以表示为:

$$u_{po}(t) \approx e_a(0) - \frac{u_c(0)}{2} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) = e_a(0) e^{-\frac{t}{RC}} \quad (22)$$

式(22)表明, 在 V_1 关断后, 共阴极点电位随着直流侧电容的放电而下降。从阀关断后电容储存的电荷转移角度看, 各阀缓冲电路电容上所储存的电荷重新被分配, 但总量基本保持不变。而直流侧等值电容所储存的电荷以直流侧电阻为回路释放, 导致共阴极点电位的变化。

从以上分析可以看出, 带直流线路的换流阀开路电压的建立因共阴极点和共阳极点之间存在通路而与不带直流线路时开路电压的建立过程不同。带直流线路的换流阀开路电压的建立是直流侧电容充电的过程, 开路电压的建立与导通角的大小和直流侧阻容参数有关。假设阀组开通瞬间, 电容充电的时间可以忽略, 且直流侧放电速度较慢, 直流电压不会断续, 则以 V_1 触发脉冲来临为例, 不同触发角下开路电压的建立过程及计算公式如下。

1) $0^\circ \leq \alpha < 30^\circ$: 以 $\alpha = 20^\circ$ 为例, 开路电压的建立过程如图 8 所示。 t_α 时 V_1 和 V_6 导通, 直流侧电容充电; t_1 时直流侧电容充电至 e_{ab} 峰值, V_6 因承受反向电压关断, 仅 V_1 导通; t_2 时相电压 e_a 达到峰值后, V_1 因电流过零而关断; (t_2, t_3) 时段, 直流侧电容以直流侧电阻为回路放电; t_3 时, V_2 和 V_1 导通; t_4 时直流侧电容充电至 e_{ac} 峰值, V_1 关断; (t_4, t_5) 时段, 直流侧电容再次以直流侧电阻为回路放电; 此后 V_3 和 V_5 的导通过程与 V_1 类似。以阀触发导通时刻为计时零点, 稳态时直流侧开路电压的平均值 \bar{u}_{dc} 为:

$$\bar{u}_{dc} = \frac{3}{\pi} \left[\int_\alpha^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{2} E \sin(\omega t + 60^\circ) d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{3}} \sqrt{2} E e^{-\frac{1}{RC}(t - \frac{\pi}{6\omega})} d(\omega t) \right] = \frac{3\sqrt{2} E}{\pi} \left[\cos(\alpha + 60^\circ) + \omega RC \left(1 - e^{-\frac{\pi/6 + \alpha}{\omega RC}} \right) \right] \quad (23)$$

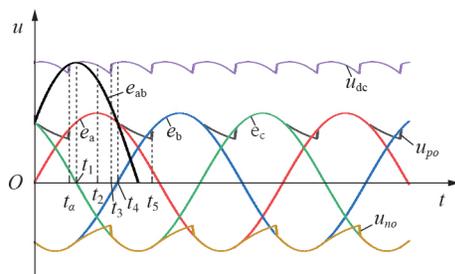


图 8 $0^\circ \leq \alpha < 30^\circ$ 时开路电压波形

Fig.8 Waveforms of open line voltage when $0^\circ \leq \alpha < 30^\circ$

若阀触发时, 直流侧电压大于交流侧线电压, 则求解直流电压与线电压的交点对应的电角度, 替换式(23)中的触发角 α 即可。

2) $30^\circ \leq \alpha < 60^\circ$: 以 $\alpha = 40^\circ$ 为例, 开路电压的建立过程如附录 A 图 A3 所示。 t_α 时 V_1 和 V_6 导通, 但 V_6 导通后即因承受反向电压而关断; t_1 时 u_{dc} 达到相电压 e_a 的峰值后 V_1 关断; (t_1, t_2) 时段, 直流侧电容以直流侧电阻为回路放电; t_2 时, V_1 和 V_2 导通后即因承受反向电压而关断; (t_2, t_3) 时段, 直流侧电容以直流侧电阻为回路放电; 此后 V_3 和 V_5 的导通过程与 V_1 类似。以阀触发导通时刻为计时零点, 稳态时直流侧开路电压平均值为:

$$\bar{u}_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} \sqrt{2} E \sin(\alpha + 60^\circ) e^{-\frac{1}{RC}t} d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2} E}{\pi} \omega RC \sin(\alpha + 60^\circ) \left(1 - e^{-\frac{\pi}{3\omega RC}}\right) \quad (24)$$

3) $60^\circ \leq \alpha < 120^\circ$: 以 $\alpha = 80^\circ$ 为例, 开路电压的建立过程如附录 A 图 A4 所示。 t_α 时 V_1 和 V_6 导通, 随后因承受反向电压而关断, 此后由线电压立刻充电的直流侧电容以直流侧电阻为回路放电; t_1 时, V_2 和 V_1 导通, 导通后因承受反向电压而关断; (t_1, t_2) 时段, 直流侧电容以直流侧电阻为回路放电; 此后 V_3 和 V_5 的导通过程与 V_1 类似。

稳态时直流侧开路电压的平均值为:

$$\bar{u}_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} \sqrt{2} E \sin(\alpha + 60^\circ) e^{-\frac{1}{RC}t} d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2} E}{\pi} \omega RC \sin(\alpha + 60^\circ) \left(1 - e^{-\frac{\pi}{3\omega RC}}\right) \quad (25)$$

4) $120^\circ \leq \alpha < 150^\circ$: 以 $\alpha = 140^\circ$ 为例, 开路电压的建立过程如附录 A 图 A5 所示。 t_α 时 V_1 触发导通, 此后由相电压 e_a 经共阳极阀组缓冲电路对直流侧电容充电, V_1 导通后即因承受反向电压而关断; (t_α, t_1) 时段, 由相电压立刻充电的直流侧电容以直流侧电阻为回路放电; t_1 时 V_2 导通, 共阴极点电压由 u_{po} 下降至 $e_b + u_{dc}$; (t_1, t_2) 时段, 直流侧电容再次以直流侧电阻为回路放电; 此后 V_3 和 V_5 的导通过程与 V_1 类似。

稳态时直流侧开路电压平均值为:

$$\bar{u}_{dc} = \frac{3C_0}{\pi C} \int_0^{\frac{\pi}{3}} \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{3}} \sin(\alpha + 30^\circ) e^{-\frac{1}{RC}t} d(\omega t) = \frac{\sqrt{6} E}{\pi} \omega RC_0 \sin(\alpha + 30^\circ) \left(1 - e^{-\frac{\pi}{3\omega RC}}\right) \quad (26)$$

5) $150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$: 各阀因承受反向电压而无法导通, 直流侧开路电压为 0。

综上所述, 当 $0^\circ \leq \alpha < 120^\circ$ 时, 带直流线路时开路电压的建立过程是先由交流侧线电压对直流侧电容充电, 再由相电压对直流侧电容充电, 最后直流侧电容以直流侧电阻为回路的放电过程; 当 $120^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ 时, 带直流线路时开路电压的建立过程是先由交流侧相电压对直流侧电容充电, 然后直流侧电容

以直流侧电阻为回路的放电过程; 当 $150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 时, 换流阀无法导通, 直流侧电压恒为 0。因此, 开路电压的平均值与触发角的大小有关, 即:

$$\bar{u}_{dc} = \begin{cases} \frac{3\sqrt{2} E}{\pi} \left[\cos(\alpha + 60^\circ) + \omega RC \left(1 - e^{-\frac{\pi/6 + \alpha}{\omega RC}}\right) \right] & 0^\circ \leq \alpha < 30^\circ \\ \frac{3\sqrt{2} E}{\pi} \omega RC \sin(\alpha + 60^\circ) \left(1 - e^{-\frac{\pi}{3\omega RC}}\right) & 30^\circ \leq \alpha < 120^\circ \\ \frac{\sqrt{6} E}{\pi} \omega RC_0 \sin(\alpha + 30^\circ) \left(1 - e^{-\frac{\pi}{3\omega RC}}\right) & 120^\circ \leq \alpha < 150^\circ \\ 0 & 150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases} \quad (27)$$

4 仿真验证

利用 CIGRE 高压直流标准测试模型验证以上分析结果及所提公式的正确性。交流侧线电压有效值取 200 kV, 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。为清晰地分析直流侧开路电压的建立过程, 直流侧阻容参数的选取保证较大的时间常数, 具体参数如附录 A 表 A1 所示。

4.1 不带直流线路时开路电压表达式的验证

在不带直流线路工况下, 附录 A 表 A2 给出了不同触发角下的仿真结果和式(15)计算的结果。从表中可以看出, 式(15)的计算结果与仿真结果的误差极小, 说明所分析的不带直流线路时开路电压的建立过程与实际基本一致。

4.2 带直流线路时开路电压表达式的验证

在带直流线路工况下, 表 1 给出了不同触发角下的仿真值和式(27)计算的直流侧开路电压的平均值。

表 1 带直流线路时开路电压计算值和仿真值

Table 1 Calculation results and simulative results of open line voltages with DC lines

$\alpha / (^\circ)$	仿真值 / kV	计算值 / kV	误差 / %
0	271.35	265.31	2.23
20	263.19	252.68	3.99
40	241.58	236.86	1.95
60	212.00	208.28	1.66
80	157.82	154.60	2.04
100	85.66	82.26	3.97
120	19.84	18.96	4.43
140	5.95	6.03	1.34

从表 1 中可以看出, 理论计算结果与仿真结果误差在可接受范围内, 误差产生的原因是在直流侧开路电压平均值表达式的推导中; 当 $\alpha < 60^\circ$ 时, 忽略了单阀导通时交流侧相电压对直流侧电容的充电过程, 仅计及交流侧线电压对直流侧电容的充电过程和直流侧电容以直流侧电阻为回路的放电过程; 当

$\alpha > 60^\circ$ 时,忽略了从阀导通到关断的过程,认为阀触发导通后,电路直接进入稳态过程。总体而言,第3节所分析的带直流线路时开路电压的建立过程与实际基本一致。

5 结论

本文从换流阀的基本电路出发,结合电力电子学理论和电路原理,针对带直流线路和不带直流线路工况下的开路试验,分析了换流阀的导通情况和开路电压的建立过程,通过CIGRE高压直流标准测试模型的仿真验证,可以得出以下结论。

1)在不带直流线路工况下的开路试验中,开路电压的建立过程是由交流侧电源对阀缓冲电路充电的过程,换流阀关断后开路电压由缓冲电路电容维持。

2)在带直流线路工况下的开路试验中,开路电压的建立过程与导通角有关。当 $0^\circ \leq \alpha < 120^\circ$ 时,开路电压的建立过程是首先由两阀导通时交流侧线电压对直流侧电容的充电过程,然后由单阀导通时交流侧相电压通过缓冲电路电容对直流侧电容的充电过程,最后是直流侧电容以直流侧电阻为回路的放电过程;当 $120^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ 时,开路电压的建立过程是交流侧首先通过缓冲电路电容对直流侧电容充电,而后直流侧电容放电的过程。换流阀关断后开路电压由直流侧电容和缓冲电路电容维持。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 景柳铭,王宾,董新洲,等. 高压直流输电系统连续换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):116-123.
JING Liuming, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Review of consecutive commutation failure research for HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):116-123.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 张翔,黄华,周晨,等. 不同系统频率下的换流阀运行试验等效研究[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):220-225.
ZHANG Xiang, HUANG Hua, ZHOU Chen, et al. Operational test equivalent study of converter valve under different system frequencies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2):220-225.
- [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,1990,14(2):15-19.
TAO Yu. Open line test of DC transmission line between Shanghai and Gezhouba[J]. Power System Technology, 1990,

14(2):15-19.

- [6] 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.
- [7] 李泰,荆雪记,孔令凯,等. 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, JING Xueji, KONG Lingkai, et al. 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.
- [8] 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.
- [9] 张烁,李永丽,李博通,等. 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, LI Yongli, LI Botong, et al. Open line voltage of HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):95-101.
- [10] 陈亦汉,方太勋,李海英,等. 换流阀开路电压的计算和应用[J]. 电力电子技术,2018,52(8):81-85.
CHEN Chihan, FANG Taixun, LI Haiying, et al. The calculation and application of converter valve open circuit voltage[J]. Power Electronics, 2018, 52(8):81-85.
- [11] 张秋实,傅闯,戴栋,等. 高压直流输电开路试验机理分析及解析计算[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(5):104-113.
ZHANG Qiushi, FU Chuang, DAI Dong, et al. Mechanism analysis and analytical calculation of open line test for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5):104-113.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 杜夏冰,赵成勇,吴方劼,等. LCC-HVDC系统混合型有源滤波器谐振抑制策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(4):115-122.
DU Xiabing, ZHAO Chengyong, WU Fangjie, et al. Resonance suppression strategy of hybrid active power filter in LCC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4):115-122.

作者简介:



余敬秋

余敬秋(1996—),男,湖北十堰人,博士研究生,主要研究方向为直流输电与柔性直流输电(E-mail:yujingqiu@zju.edu.cn);

徐政(1962—),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、风力发电技术与风电场并网技术(E-mail:xuzheng007@zju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

(下转第75页 continued on page 75)

Harmonic suppression control strategy of cascaded H-bridge grid-connected photovoltaic inverter under grid voltage distortion

YUAN Yisheng, LÜ Sen, ZHU Qihang

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The third harmonic compensation strategy can effectively solve the power imbalance problem of single-phase cascaded H-bridge grid-connected photovoltaic inverter, but it is prone to contributing to grid-connected current distortion under grid voltage distortion. To solve this problem, a current harmonic suppression loop is proposed to eliminate the effects of grid voltage distortion and reduce the distortion rate of grid-connected current. The mechanism of current distortion caused by the grid voltage distortion is analyzed. On this basis, it is proposed that the harmonic components of grid-connected current are taken as the control objects and fed back to the system in real time. The current harmonic components can be suppressed by closed-loop control. The current harmonic suppression loop does not need to change the original control strategy, but only serves as an additional supplementary link. Simulative and experimental results show that the proposed control strategy can greatly reduce the current distortion rate of the inverter when the grid voltage is distorted, which proves the effectiveness and feasibility of the control strategy.

Key words: cascaded H-bridge; photovoltaic; electric inverters; harmonic suppression; power balance control

(上接第59页 continued from page 59)

Analytical calculation of open line voltage for HVDC transmission system

YU Jingqiu, XU Zheng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: OLT (Open Line Test) is an important test in HVDC (High Voltage Direct Current) engineering, the accurate analysis of principles and calculation of open line voltage are very necessary. Based on the basic model of converter valves, their conduction situations with and without DC lines are respectively analyzed in detail. Besides, the equivalent circuit for quantitative calculation of open line voltage is established. The differential equations of equivalent circuit when the converter valve is triggered on are listed. And Laplace transformation circuit when the converter valve is turned off is performed. The open line voltages with and without DC lines are calculated analytically, and the basic process and physical essence of the establishment of open line voltage are described. Finally, the CIGRE HVDC standard test model is adopted in PSCAD / EMTDC software to verify the accuracy of the proposed formulas.

Key words: electric power systems; HVDC power transmission; converter valves; open line test; snubber circuit; open line voltage

附录 A

$$\begin{cases} u_{po}(t) = e_a(t) \\ u_{vC1}(t) = u_{vC1}(t_\alpha) e^{-\frac{t-t_\alpha}{R_0 C_0}} \\ u_{vC3}(t) = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{1+\omega^2 R_0^2 C_0^2}} \sin(\omega t + 60^\circ - \varphi_C) + \left[u_{vC3}(t_\alpha) - \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{1+\omega^2 R_0^2 C_0^2}} \sin(\alpha + 60^\circ - \varphi_C) \right] e^{-\frac{t-t_\alpha}{R_0 C_0}} \\ u_{vC5}(t) = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{1+\omega^2 R_0^2 C_0^2}} \sin(\omega t - \varphi_C) + \left[u_{vC5}(t_\alpha) - \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{1+\omega^2 R_0^2 C_0^2}} \sin(\alpha - \varphi_C) \right] e^{-\frac{t-t_\alpha}{R_0 C_0}} \\ \varphi_C = \arctan \omega R_0 C_0 \end{cases} \quad (\text{A1})$$

$$\begin{cases} -e_a(s) + \left(R_0 + \frac{1}{sC_0} \right) i_1(s) - \frac{u_{vC1}(t_p)}{s} = -e_b(s) + \left(R_0 + \frac{1}{sC_0} \right) i_3(s) - \frac{u_{vC3}(t_p)}{s} \\ -e_a(s) + \left(R_0 + \frac{1}{sC_0} \right) i_1(s) - \frac{u_{vC1}(t_p)}{s} = -e_c(s) + \left(R_0 + \frac{1}{sC_0} \right) i_5(s) - \frac{u_{vC5}(t_p)}{s} \\ i_1(s) + i_3(s) + i_5(s) = 0 \end{cases} \quad (\text{A2})$$

式中： i_1 、 i_3 和 i_5 分别为流经 V_1 、 V_3 和 V_5 阻容回路的电流。

$$\begin{aligned} i_1(s) &= \frac{e_{ab}(s) + e_{ac}(s)}{3\left(R_0 + \frac{1}{sC_0}\right)} - \frac{u_{vC3}(t_p) + u_{vC5}(t_p) - 2u_{vC1}(t_p)}{3s\left(R_0 + \frac{1}{sC_0}\right)} \\ u_{po}(s) &= e_a(s) - \left(R_0 + \frac{1}{sC_0} \right) i_1(s) + \frac{u_{vC1}(t_p)}{s} = \\ &= \frac{u_{vC1}(t_p) + u_{vC3}(t_p) + u_{vC5}(t_p)}{3s} \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

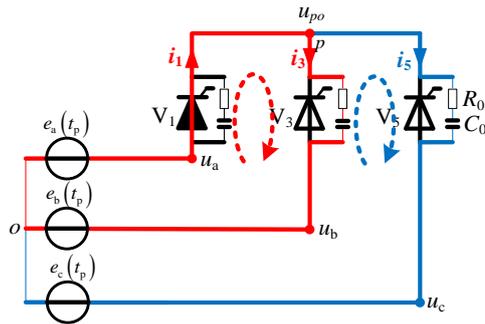


图 A1 $\alpha \geq 60^\circ$ 时阀 V_1 导通后共阴极桥电流通路

Fig.A1 Current path of common cathode converter after V_1 is triggered on at $\alpha \geq 60^\circ$

$$\begin{cases} u_{vC1}(t) = -e_a(t_\alpha) e^{-\frac{t-t_\alpha}{R_0 C_0}} \\ u_{vC3}(t) = \sqrt{2}E \sin(\alpha + 60^\circ) + \left[-e_b(t_\alpha) - \sqrt{2}E \sin(\alpha + 60^\circ) \right] e^{-\frac{t-t_\alpha}{R_0 C_0}} \\ u_{vC5}(t) = \sqrt{2}E \sin(\alpha) + \left[-e_c(t_\alpha) - \sqrt{2}E \sin(\alpha) \right] e^{-\frac{t-t_\alpha}{R_0 C_0}} \end{cases} \quad (\text{A4})$$

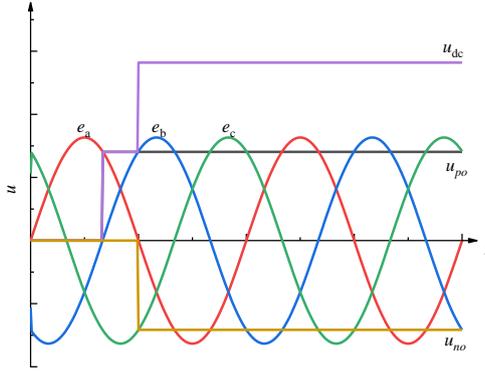


图 A2 $\alpha=90^\circ$ 时开路电压的波形

Fig.A2 Open line voltage waveform at $\alpha=90^\circ$

$$\begin{cases} \left(\frac{3}{R_0 + \frac{1}{sC_0}} + sC + \frac{1}{R} \right) u_{po}(s) - \left(sC + \frac{1}{R} \right) u_{no}(s) = \frac{u_{v1}(0) + u_{v3}(0) + u_{v5}(0)}{s \left(R_0 + \frac{1}{sC_0} \right)} + Cu_C(0) \\ \left(\frac{3}{R_0 + \frac{1}{sC_0}} + sC + \frac{1}{R} \right) u_{no}(s) - \left(sC + \frac{1}{R} \right) u_{po}(s) = \frac{u_{v2}(0) + u_{v4}(0) + u_{v6}(0)}{s \left(R_0 + \frac{1}{sC_0} \right)} - Cu_C(0) \end{cases} \quad (A5)$$

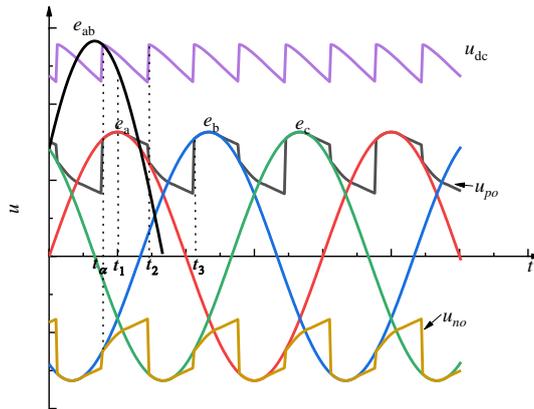


图 A3 $30^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时开路电压波形

Fig.A3 Open line voltage waveform at $30^\circ \leq \alpha < 60^\circ$

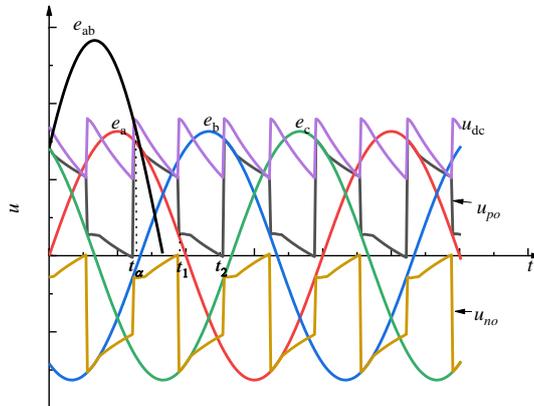


图 A4 $60^\circ \leq \alpha < 120^\circ$ 时开路电压波形

Fig.A4 Open line voltage waveform at $60^\circ \leq \alpha < 120^\circ$

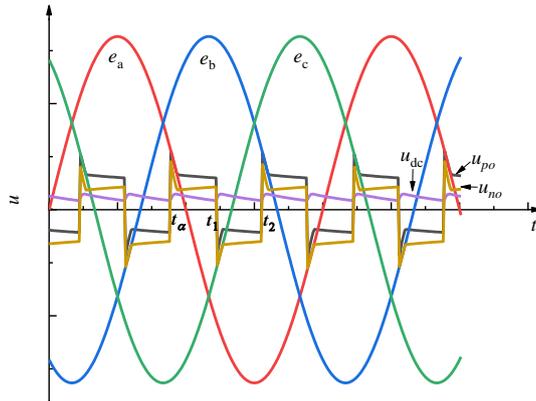


图 A5 $120^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ 时开路电压波形
 Fig.A5 Open line voltage waveform at $120^\circ \leq \alpha < 150^\circ$

表 A1 系统参数

Table A1 System parameters

参数	数值	参数	数值
缓冲电路电容 C_0	0.05 μF	直流侧电容	2 μF
缓冲电路电阻 R_0	5000 Ω	直流侧电阻	5000 Ω

表 A2 不带直流线路时开路电压计算值和仿真值

Table A2 Calculation results and simulative results of open line voltage without DC line

触发角 $\alpha / (^\circ)$	仿真值/kV	计算值/kV	误差/%
0	326.56	326.59	0
20	326.56	326.59	0
40	326.56	326.59	0
60	326.56	326.59	0
80	306.68	306.90	0.07
100	249.90	250.19	0.12
120	163.00	163.30	0.18
140	56.48	56.71	0.41