

Study on the Relationship between the Commutation Failure of Multi-Infeed HVDC Transmission and AC Transmission Line Admittance

Chaorong He

State Grid Sichuan Electric Power Company Sunning Branch, Suining Sichuan

Email: c.r.he@163.com

Received: Feb. 8th, 2018; accepted: Feb. 20th, 2018; published: Feb. 28th, 2018

Abstract

In this paper, two AC/DC parallel multi infeed HVDC transmission system models are established. Based on the basic knowledge of circuit theory, the expressions of admittance and commutation voltage of AC transmission line with multi infeed and DC parallel connection are derived. In addition, the relationship between the admittance and the commutation failure of the AC transmission line is studied in detail. From the theoretical analysis that the inverter commutation failure admittance and transmission line relations are very complex, it is not only the equivalent admittance of AC power supply and DC transmission electronic system connected to the inverter side AC power supply, but also with the electronic rectifier DC transmission system connected to the value of admittance.

Keywords

HVDC, AC Transmission Line Admittance, Commutation Failure, Commutation Voltage

多馈入高压直流换向失败与交流传输线导纳关系的研究

何朝荣

国网四川省电力公司遂宁供电公司, 四川 遂宁

Email: c.r.he@163.com

收稿日期: 2018年2月8日; 录用日期: 2018年2月20日; 发布日期: 2018年2月28日

文章引用: 何朝荣. 多馈入高压直流换向失败与交流传输线导纳关系的研究[J]. 智能电网, 2018, 8(1): 76-86.

DOI: 10.12677/sg.2018.81009

摘要

本文建立了两条交、直流并联的多馈入高压直流输电系统模型，基于电路基本理论知识，推导出与多馈入交、直流并联的交流传输线导纳和换相电压关系表达式。并对此模型的交流传输线导纳和换相失败关系进行了详细的理论分析研究。从本文的理论分析可看出逆变侧换相失败与传输线导纳关系十分复杂，它不仅与各直流输电系统逆变侧相连的交流电源的等值导纳有关，而且还与各直流输电系统整流侧相连的交流电源的等值导纳有关。

关键词

高压直流输电，传输线导纳，换相失败，换相电压

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

交、直流并联输电系统不但增加了系统运行方式的灵活性，而且还扩大了输送容量。但也增加了系统结构的复杂性。对于交、直流并联输电系统，如果各个直流落点之间的电气距离较小、受端交流系统强度不够或者交直流系统之间的相互影响关系强，则换相失败问题的研究将更为复杂。当多个换流站交流换流母线间的电气距离较近时，在某一换流站交流母线附近发生故障，是否会导致多个逆变站同时发生换相失败？当交流系统故障切除后，由于多馈入交直流系统中存在着复杂的相互作用，使得多馈入直流输电系统的恢复也变得复杂，不利情况下，其恢复会后继换相失败的发生而减慢，有时甚至不能恢复。对于多馈入直流输电系统，一个换流站的换相失败故障可能会导致其它换流站换相失败，因此换流站之间的电气耦合关系是影响几个逆变站是否会同时或相继发生换相失败的重要因素[1] [2] [3]。文献[4]认为逆变侧换流母线间的电气距离越近，则当其中一子交流系统换流母线瞬时短路时两个逆变站同时发生换相失败的几率就越大。交流电压幅值的降低，直流电流的突增和交流换相电压过零点相角的偏移等因素也是导致直流系统发生换相失败的根本原因。而故障的发生地点及严重程度，各逆变站之间的电气距离等，是影响各逆变站是否会同时发生换相失败的主要因素。上述文献虽然较为详细地论证了多馈入直流输电系统影响换相失败的各种因素，但是它们都未考虑直流输电线与交流输电线并联运行问题，这与实际电力系统不相符合，而实际电力系统不可避免地或多或少有交流输电线与直流输电线相并联。C. W. Taylor 等的研究还表明[5]-[16]，当各换流器间的电气距离较近时，系统中的扰动常常会激发出一些特殊的系统动态，也可能会影响换相失败的发生。

因此，本文通过多馈入交、直流并联输电系统的研究，从理论上推导出了影响多馈入直流输电系统换相失败的换相电压和并联传输线导纳的公式表达式并进行了详细的理论分析和仿真研究。

2. 数学模型的建立及机理分析

2.1. 典型系统结构模型

由于交、直流间存在复杂的相互作用，除了考虑交流电压及其相角和直流电流等因数外，还需考虑

各直流系统之间的相互作用对换相失败的影响；除所考虑的逆变侧自身参数影响外[6] [7] [8] [9] [10]，还与其他逆变侧的影响有关[11]-[16]。现以一个具有两条直流输电线的交、直流输电系统为例进行研究，如图 1 所示。两条直流输电线由 HVDC 标准模型组成[6]，逆变侧接于相邻的同侧，相邻交流换流母线用耦合阻抗连接，直流系统整流侧相互独立。整流侧采用定电流控制，逆变侧采用定熄弧角控制。

2.2. 直流输电系统逆变侧对应的交流系统母线电压的计算

忽略输电线路的电阻，运用基尔霍夫电流定律计算每个逆变侧的相邻母线电压的表达式，具体推导如下。

对节点 1 有：

$$(E_1 - U_{ac1})y_{N1} = (U_{ac1} - U_{L1})y_{ac1} + \frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{d1} \tag{1}$$

对节点 2 有：

$$(E_2 - U_{ac2})y_{N2} = (U_{ac2} - U_{L2})y_{ac2} + \frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{d2} \tag{2}$$

对节点 3 有：

$$\frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{d1} + (U_{ac1} - U_{L1})y_{ac1} = (U_{L1} - U_{L2})y_p + (U_{L1} - U_c)y_{L1} \tag{3}$$

对节点 4 有：

$$\frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{d2} + (U_{ac2} - U_{L2})y_{ac2} + (U_{L1} - U_{L2})y_p = (U_{L2} - U_c)y_{L2} \tag{4}$$

对节点 5 有：

$$(E_s - U_c)y_{NS} + (U_{L1} - U_c)y_{L1} + (U_{L2} - U_c)y_{L2} = 0 \tag{5}$$

上式中 y_{N1} 、 y_{N2} 、 y_{NS} 为三台发电机联络线对应的等值导纳， E_1 、 E_2 、 E_s 为三台发电机对应的等值电动势， U_{L1} 、 U_{L2} (节点 3、节点 4 见 图 1)为两条直流输电线逆变侧对应的交流系统母线电压有效值， $U_{ac1} \sim U_{ac2}$ (节点 1~节点 2 见 图 1)为两条直流输电线整流侧对应的交流系统母线电压有效值， U_c (节点 5 见 图 1)为与两条直流输电线逆变侧对应的等值交流系统母线电压有效值， y_p 为两条直流系统逆变侧换流母线间的传输线导纳， $y_{ac1} \sim y_{ac2}$ 为与两条直流输电系统相并联的交流传输线导纳值， $y_{L1} \sim y_{L2}$ 为与两条直流输电系统逆变侧相对应的交流系统等值导纳值， $I_{d1} \sim I_{d2}$ 为两条直流输电线对应的直流系统输送的直流电流， $R_{d1} \sim R_{d2}$ 为两条直流输电线对应的直流输送系统的电阻。

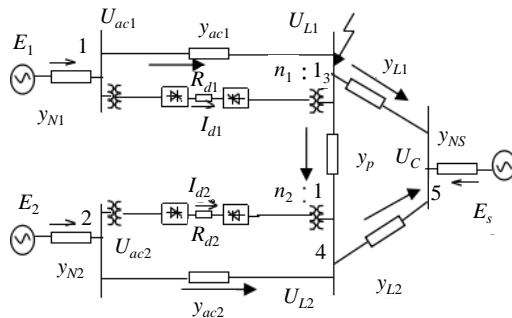


Figure 1. Test system model
图 1. 测试系统模型

化简式(1)~式(5), 可得到两条直流输电系统逆变侧对应的交流系统母线电压方程式:

$$A_1 U_{L1} - B_1 U_{L2} = C_1 \quad (6)$$

$$-A_2 U_{L1} + B_2 U_{L2} = C_2 \quad (7)$$

式中,

$$\begin{aligned} A_1 &= \left[(y_{L1} + y_{L2} + y_{NS})(y_p + y_{N1}) + y_{L1}(y_{L2} + y_{NS}) \right] y_{ac1} \\ &\quad + y_p y_{N1}(y_{L1} + y_{L2} + y_{NS}) + y_{L1} y_{N1}(y_{L2} + y_{NS}) \\ B_1 &= \left[y_p(y_{L1} + y_{L2} + y_{NS}) + y_{L1} y_{L2} \right] y_{ac1} \\ &\quad + y_p y_{N1}(y_{L1} + y_{L2} + y_{NS}) + y_{L1} y_{N1} y_{L2} \\ C_1 &= \left[y_{N1} E_1 (y_{L1} + y_{L2} + y_{NS}) + y_{L1} y_{NS} E_S \right] y_{ac1} \\ &\quad + y_{N1}(y_{L1} + y_{L2} + y_{NS}) \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{d1} + y_{L1} y_{N1} y_{NS} E_S \\ A_2 &= \left[y_p(y_{L1} + y_{L2} + y_{NS}) + y_{L1} y_{L2} \right] y_{ac2} \\ &\quad + y_p y_{N2}(y_{L1} + y_{L2} + y_{NS}) + y_{L1} y_{N2} y_{L2} \\ B_2 &= \left[(y_{L1} + y_{L2} + y_{NS})(y_p + y_{N2}) + y_{L2}(y_{L1} + y_{NS}) \right] y_{ac2} \\ &\quad + y_p y_{N2}(y_{L1} + y_{L2} + y_{NS}) + y_{L2} y_{N2}(y_{L1} + y_{NS}) \\ C_2 &= \left[y_{N2} E_2 (y_{L1} + y_{L2} + y_{NS}) + y_{L2} y_{NS} E_S \right] y_{ac2} \\ &\quad + y_{N2}(y_{L1} + y_{L2} + y_{NS}) \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{d2} + y_{L2} y_{N2} y_{NS} E_S \end{aligned}$$

解式(6)、(7), 得

$$U_{L1} = \frac{C_1 B_2 + B_1 C_2}{A_1 B_2 - B_1 A_2} \quad (8)$$

$$U_{L2} = \frac{C_1 A_2 + A_1 C_2}{A_1 B_2 - B_1 A_2} \quad (9)$$

2.3. 两条直流输电系统传输线导纳与换相电压的关系分析和计算

如果只考虑与两条直流并联的传输线导纳 y_{ac1} 和 y_{ac2} 与直流系统换相失败的关系, 可令除 y_{ac1} 和 y_{ac2} 外的其它导纳和相应参数为常数, 则式(8)和式(9)中的六个系数项均可以简化。

$$\text{则 } A_1 = a_1 y_{ac1} + a_{11} \quad B_1 = b_1 y_{ac1} + b_{11}$$

$$A_2 = a_2 y_{ac2} + a_{22} \quad B_2 = b_2 y_{ac2} + b_{22}$$

$$C_1 = c_1 y_{ac1} + c_{11} \quad C_2 = c_2 y_{ac2} + c_{22}$$

由式(8)和式(9)可得

$$\begin{aligned} U_{L1} &= \frac{(b_2 c_1 + b_1 c_2) y_{ac1} y_{ac2} + (b_{22} c_1 + b_1 c_{22}) y_{ac1} + (b_2 c_{11} + b_1 c_2) y_{ac2} + (b_{22} c_{11} + b_1 c_{22})}{(a_1 b_2 - a_2 b_1) y_{ac1} y_{ac2} + (b_{22} a_1 - a_{22} b_1) y_{ac1} + (a_{11} b_2 - a_2 b_{11}) y_{ac2} + (a_{11} b_{22} - a_{22} b_{11})} \\ &= \frac{[(b_2 c_1 + b_1 c_2) y_{ac2} + (b_{22} c_1 + b_1 c_{22})] y_{ac1} + (b_2 c_{11} + b_1 c_2) y_{ac2} + (b_{22} c_{11} + b_1 c_{22})}{[(a_1 b_2 - a_2 b_1) y_{ac2} + (b_{22} a_1 - a_{22} b_1)] y_{ac1} + (a_{11} b_2 - a_2 b_{11}) y_{ac2} + (a_{11} b_{22} - a_{22} b_{11})} \\ &= \frac{[(b_2 c_1 + b_1 c_2) y_{ac1} + (b_2 c_{11} + b_1 c_2)] y_{ac2} + (b_{22} c_1 + b_1 c_{22}) y_{ac1} + (b_{22} c_{11} + b_1 c_{22})}{[(a_1 b_2 - a_2 b_1) y_{ac1} + (a_{11} b_2 - a_2 b_{11})] y_{ac2} + (b_{22} a_1 - a_{22} b_1) y_{ac1} + (a_{11} b_{22} - a_{22} b_{11})} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
U_{L2} &= \frac{(a_2c_1 + a_1c_2)y_{ac1}y_{ac2} + (a_{22}c_1 + a_1c_{22})y_{ac1} + (a_2c_{11} + a_{11}c_2)y_{ac2} + (a_{22}c_{11} + a_{11}c_{22})}{(a_1b_2 - a_2b_1)y_{ac1}y_{ac2} + (b_{22}a_1 - a_{22}b_1)y_{ac1} + (a_{11}b_2 - a_2b_{11})y_{ac2} + (a_{11}b_{22} - a_{22}b_{11})} \\
&= \frac{[(a_2c_1 + a_1c_2)y_{ac2} + (a_{22}c_1 + a_1c_{22})]y_{ac1} + (a_2c_{11} + a_{11}c_2)y_{ac2} + (a_{22}c_{11} + a_{11}c_{22})}{[(a_1b_2 - a_2b_1)y_{ac2} + (b_{22}a_1 - a_{22}b_1)]y_{ac1} + (a_{11}b_2 - a_2b_{11})y_{ac2} + (a_{11}b_{22} - a_{22}b_{11})} \\
&= \frac{[(a_2c_1 + a_1c_2)y_{ac1} + (a_2c_{11} + a_{11}c_2)]y_{ac2} + (a_{22}c_1 + a_1c_{22})y_{ac1} + (b_{22}c_{11} + b_{11}c_{22})}{[(a_1b_2 - a_2b_1)y_{ac1} + (a_{11}b_2 - a_2b_{11})]y_{ac2} + (b_{22}a_1 - a_{22}b_1)y_{ac1} + (a_{11}b_{22} - a_{22}b_{11})}
\end{aligned} \quad (11)$$

从(10)和(11)式推导出的结果可以看出 U_{L1} 和 U_{L2} 与 y_{ac1} 和 y_{ac2} 强相关。为简单起见,我们研究 y_{ac1} 时,设定 y_{ac2} 为常量;研究 y_{ac2} 时,设定 y_{ac1} 为常量。则(10)和(11)式可以简化为下面表达式(这里只研究 y_{ac1} 为变量的情况,反之亦然)

$$U_{L1} = \frac{m_{10}y_{ac1} + h_{10}}{m_1y_{ac1} + h_1} \quad (12)$$

$$U_{L2} = \frac{m_{20}y_{ac1} + h_{20}}{m_1y_{ac1} + h_1} \quad (13)$$

上式中

$$\begin{aligned}
m_{10} &= (b_2c_1 + b_1c_2)y_{ac2} + (b_{22}c_1 + b_1c_{22}) \\
h_{10} &= (b_2c_{11} + b_1c_2)y_{ac2} + (b_{22}c_{11} + b_1c_{22}) \\
m_1 &= (a_1b_2 - a_2b_1)y_{ac2} + (b_{22}a_1 - a_{22}b_1) \\
h_1 &= (a_{11}b_2 - a_2b_{11})y_{ac2} + (a_{11}b_{22} - a_{22}b_{11}) \\
m_{20} &= (a_2c_1 + a_1c_2)y_{ac2} + (a_{22}c_1 + a_1c_{22}) \\
h_{20} &= (a_2c_{11} + a_{11}c_2)y_{ac2} + (a_{22}c_{11} + a_{11}c_{22})
\end{aligned}$$

且有 $m_{10} > 0, h_{10} > 0, h_{20} > 0$ 。

2.4. 两条交流传输线导纳与换相电压的关系分析

每个独立的直流子系统仍然运用两端直流输电系统已有的结论和公式[1] [2]。两端直流输电系统关断角的表达式为

$$\gamma = \arccos \left[\frac{\sqrt{2}n \cdot I_d X_L}{U_L} + \cos \beta \right] \quad (14)$$

其中 I_d 为直流电流; X_L 为换相电抗; U_L 为换流母线线电压有效值; β 为越前触发角; n 为换流变压器的变比。

如果只考虑传输线导纳与换相失败的关系,对于每条高压直流输电系统发生换相失败时总有对应的最低关断角 γ_{\min} 。设第一条直流输电线最低临界关断角为 $\gamma_{1\min}$,而第二条直流输电线最低临界关断角为 $\gamma_{2\min}$ 。再利用上式(14)可以求出当每条高压直流输电线发生换相失败时所对应的最低临界换相电压值 $U_{L\min}$ 。这里设第一条直流输电线逆变侧最低临界换相电压为 $U_{L1\min}$,第二条直流输电线逆变侧最低临界换相电压为 $U_{L2\min}$,且不妨假设 $U_{L1\min} < U_{L2\min}$ 。现在讨论式(12)~(13)。首先从式(12)~(13)可以看出 U_{L1} 与 U_{L2} 只差一个常数,这里不妨假设 $h_{10} < h_{20}$ 。同时从式(12)~(13)可以看出换相电压与传输线导纳的关系表达式为有条件限制($m_{10} > 0, h_{10} > 0, h_{20} > 0$ 且有传输线导纳 y_{ac1} 大于等于零)的双曲线。设横坐标为传输线导纳,纵坐标为换相电压。我们从上面的分析可知,只要作出传输线导纳为正的双曲线部分就可以了。

其中，双曲线的几个特征描述如下：纵坐标上的渐进线为 $U_{L\infty} = m_{10}/m_1$ ；横坐标上的渐进线为 $y_{ac1} = -h_1/m_1$ ；纵坐标上的初始值为 $U_{L10} = h_{10}/h_1$ ； $U_{L20} = h_{20}/h_1$ 。

- a) 当 $m_1 > 0, h_1 > 0$ 时，换相电压与传输线导纳的关系如图 2 所示。
- b) 当 $m_1 > 0, h_1 < 0$ 时，换相电压与传输线导纳的关系如图 3 所示。
- c) 当 $m_1 < 0, h_1 > 0$ 时，换相电压与传输线导纳的关系如图 4 所示。
- d) 当 $m_1 < 0, h_1 < 0$ 时，换相电压与传输线导纳的关系如图 5 所示。

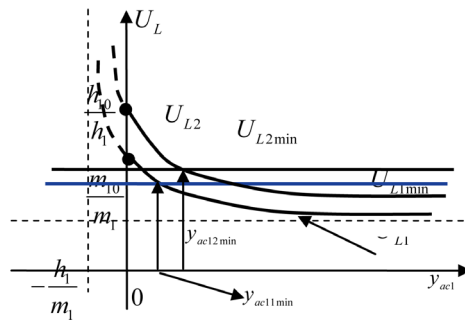


Figure 2. Relationship between AC transmission line admittance and commutation voltage
图 2. 交流传输线导纳与换相电压的关系

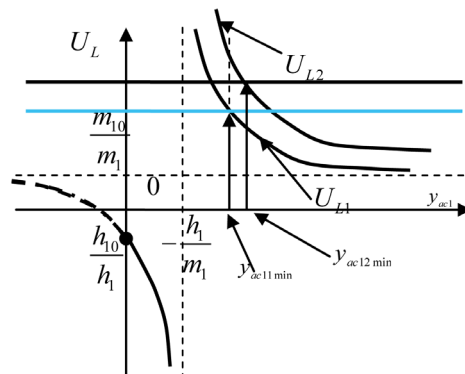


Figure 3. Relationship between AC transmission line admittance and commutation voltage
图 3. 交流传输线导纳与换相电压的关系

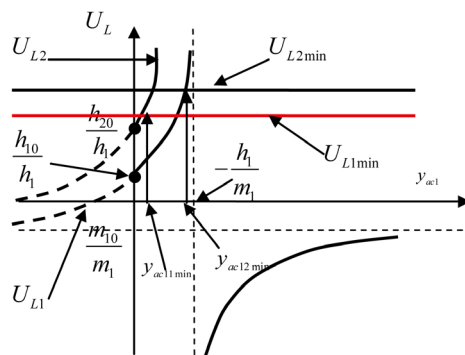


Figure 4. Relationship between AC transmission line admittance and commutation voltage
图 4. 交流传输线导纳与换相电压的关系

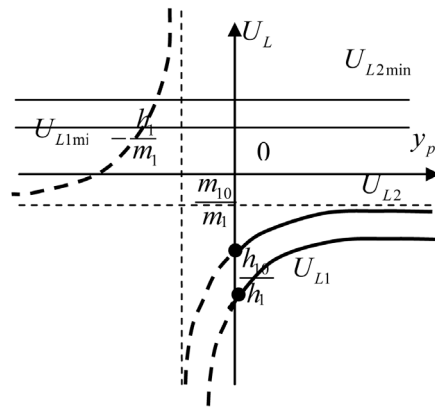


Figure 5. Relationship between AC transmission line admittance and commutation voltage
图 5. 交流传输线导纳与换相电压的关系

3. 理论分析

在图 1 所示的多馈入直流输电系统中，两个直流输电子系统 DC1 和 DC2（下文简称 DC1 和 DC2）间的相互作用主要通过其逆变侧交流母线间的传输线导纳来体现，取值的两种极端情况是：1) y_{ac1} 趋于零，意味着两个交流传输线与直流换流母线间无电气联系，图 1 所示的交、直流并联输电系统便退化为两个独立的直流输电子系统； y_{ac1} 趋于无穷大，即直流输电系统 DC1 换流母线与交流传输线间的电气联系十分紧密，同时其逆变侧交流系统强度提高了一倍。另外，还有从 m_1 的表达式可以看出， m_1 的符号是由各直流子系统所处的外环境的固有参数决定的——它与各直流输电子系统相并联的交流传输线的导纳以及与各直流输电子系统整流侧相连的交流电源的等值导纳和与各直流输电子系统逆变侧相连的交流电源的等值导纳密切相关。如果这对应的三项参数均大于其他的直流子系统，则它的抗换相失败的能力就会强于其他直流子系统。

在实际的多馈入直流输电系统中，对于特定的系统条件，存在两个临界值 y_{ac1min} 和 $y_{ac12min}$ 。它们分别对应于多馈入直流输电系统各自发生换相失败时的临界传输线导纳值。

如图 2 所示，随着 y_{ac1} 的增大，而两条直流输电系统逆变侧交流换流母线处的三相母线电压却相应减小。如果 $U_{L1min} > \frac{h_{10}}{h_1}$ 或者 $U_{L2min} > \frac{h_{20}}{h_1}$ 时，无论 y_{ac1} 的取值如何，DC1 和 DC2 逆变侧交流换流母线处的三相母线电压都小于两条直流线换相失败所需要的最小的临界电压。对应的直流输电子系统都会发生换相失败。

否则当 y_{ac1} 的取值小于 y_{ac1min} 时，此时两直流输电子系统间的耦合作用已很弱，DC1 和 DC2 逆变侧交流换流母线处的三相母线电压都大于换相失败所需要的最小电压。两直流输电子系统都不会发生换相失败。当 y_{ac1} 的取值属于 $y_{ac1min} < y_{ac1} < y_{ac12min}$ 时，虽能影响到 DC2 逆变侧交流换流母线的电压，但不足以引起 DC2 发生换相失败，此时两直流输电子系统间的耦合作用较弱，只有 DC1 逆变侧交流换流母线处的三相母线电压小于换相失败所需要的最小电压。则只有 DC1 会发生换相失败。当 y_{ac1} 的取值大于 $y_{ac12min}$ 时，DC1 和 DC2 逆变侧交流换流母线处的三相母线电压都小于两条直流线换相失败所需要的最小电压。DC1 逆变侧交流换流母线处的三相短路故障可引起 DC2 同时发生换相失败。

对于图 3 所示，情况已经相当复杂，随着 y_{ac1} 的值增大，而两条直流输电系统逆变侧交流换流母线处的三相母线电压也相应减小。当 y_{ac1} 的取值小于 $-\frac{h_1}{m_1}$ 而大于 0 时，此时两直流输电系统逆变侧交流换流母线处的三相母线电压已经反相，这已经失去了两条直流输电子系统的固有功能；当 y_p 的取值大于

$-\frac{h_1}{m_1}$ 后, 此时两直流输电系统的分析同图 2 所示的分析一样有相同的规律。

对于图 4 所示, 情况也和图 3 一样相当复杂, 随着 y_{ac1} 的值增大, 而两条直流输电系统逆变侧交流换流母线处的三相母线电压却相应减小。如果 $U_{L1\min} < \frac{h_{10}}{h_1}$ 或者 $U_{L2\min} < \frac{h_{20}}{h_1}$ 时, 无论 y_p 的取值如何, DC1 和 DC2 逆变侧交流换流母线处的三相母线电压都大于两条直流线换相失败所需要的最小的临界电压。对应的直流输电系统都不会发生换相失败。否则当 y_{ac1} 的取值大于 0 而小于 $-\frac{h_1}{m_1}$ 时, 此时两直流输电系统的分析同图 2 和图 3 所示的分析一样, 均不会发生换相失败。当 y_{ac1} 的取值大于 $-\frac{h_1}{m_1}$ 后, 此时两直流输电系统逆变侧交流换流母线处的三相母线电压已经反相, 这已经失去了两条直流输电系统的固有功能。

对于图 5 所示, 随着 y_{ac1} 的值增大, 而两条直流输电系统逆变侧交流换流母线处的三相母线电压幅值却相应减小。当 y_{ac1} 的取值大于 0 后, 此时无论 y_{ac1} 怎样变化, 两直流输电系统逆变侧交流换流母线处的三相母线电压已经反相, 这已经失去了两条直流输电系统的固有功能。

4. 模型的故障仿真和分析

4.1. 模型系统的初始运行值

这里利用 NETOMAC 仿真系统对图 1 假设 DC2 换流站逆变侧(节点 4 处)发生 100 ms 三相瞬时短路故障, 以图 1 模型为例, 两条直流输电系统在初始运行点处的运行参数如下。

对直流输电系统 1 有:

$$U_{L10} = 525 \text{ kV}, \beta_{10} = 132^\circ, n_{10} = 1.0(\text{p.u.}), I_{d10} = 1.0(\text{p.u.}) = 2 \text{ kA}, L_{cr10} = 52.2 \text{ mH}$$

直流输电系统 2 有:

$$U_{L20} = 525 \text{ kV}, \beta_{20} = 142^\circ, n_{20} = 1.0(\text{p.u.}), I_{d20} = 1.0(\text{p.u.}) = 2 \text{ kA}, L_{cr20} = 56.2 \text{ mH}$$

该网络自身的阻抗参数如下:

$$\begin{aligned} y_{ac1} &= 0.05818 \Omega^{-1}, y_{ac2} = 0.01358 \Omega^{-1} \\ y_{L1} &= 0.01758 \Omega^{-1}, y_{L2} = 0.02759 \Omega^{-1} \\ y_p &= 0.01758 \Omega^{-1} \end{aligned}$$

两条直流输电系统整流侧对应的交流系统的暂态等值电势参数如下:

$$E_1 = 1.34638(\text{p.u.}), E_2 = 1.3522(\text{p.u.})$$

两条直流输电系统整流侧交流系统的等值阻抗参数如下:

$$\begin{aligned} y_{N1} &= 3.1152 \Omega^{-1} \\ y_{N2} &= 3.1152 \Omega^{-1} \end{aligned}$$

两条直流输电系统逆变侧交流系统的等值阻抗参数如下:

$$y_{Ns} = 2.94118 \Omega^{-1}$$

两条直流输电系统逆变侧对应的交流系统的暂态等值电势参数如下:

$$E_s = 1.5235(\text{p.u.})$$

由此可得 U_{L1} 和 U_{L2} 表达式如下:

$$U_{L1} = \frac{141.94y_{ac1} + 2.8286}{-0.32763y_{ac1} + 0.143216} \tag{15}$$

$$U_{L2} = \frac{141.94y_{ac1} + 3.2027}{-0.32763y_{ac1} + 0.143216} \tag{16}$$

同时可以作出具体的曲线如下:

由公式(12)及两条直流输电系统的初始条件, 可以算出当两条直流输电系统各自发生换相失败时对应的最低换相电压值 U_{L1min} 和 U_{L2min} , 它们分别为:

$$U_{L1min} = 105(\text{kV}), U_{L2min} = 97.85(\text{kV})$$

再由公式(15)和(16)就可以算出各自对应的最低传输线导纳值 $y_{ac11min}$ 和 $y_{ac12min}$ 如下:

$$y_{ac11min} = 0.06923 \Omega^{-1}$$

$$y_{ac12min} = 0.06428 \Omega^{-1}$$

很显然传输线导纳 $y_{ac1} = 0.05818 \Omega^{-1}$ 均小于 $y_{ac11min}$ 和 $y_{ac12min}$, 因此, 从图 6 可以得出两条直流均会发生换相失败。换句话说, 它们都是同时发生并且同时恢复, 具体仿真结果见图 7 所示。

4.2. 逆变侧交流母线故障仿真和分析

以图 1 的研究系统为例, 分析影响高压直流输电系统换相失败的时域仿真。

假设 DC2 换流站逆变侧在 $t = 0.4$ 秒时刻(节点 4 处)发生 100 ms 三相瞬时短路故障, 时域仿真结果如图 7 所示。在图 7 中, 从上向下依次为两个换流站(DC1 换流站、DC2 换流站)逆变侧对应的直流电压(U/p.u)、直流电流(I/A)、关断角(度/秒)——时间特性曲线仿真波形图。

从仿真结果图中可见: DC2 换流站逆变侧发生三相短路瞬时故障时, 在故障时间内两条换流站逆变侧关断角同时小于换流阀恢复阻断能力时间所对应的关断角。关断角同时是减小, 并且小于最小关断角, 严重时可达零。在故障时间内两条直流换流站逆变侧直流电压都是同时处于同步变化状态。在故障时间内两条换流站逆变侧直流电流也是同时处于同步变化状态。这也验证了上面理论分析所得结论判断换相失败的准确性和正确性。

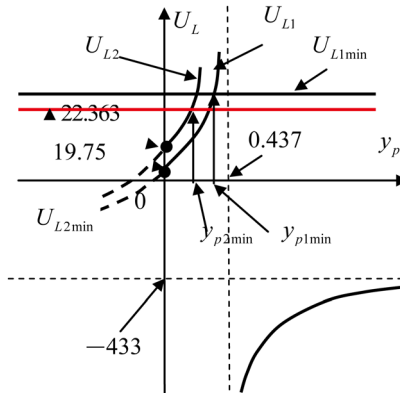


Figure 6. Relationship between AC transmission line admittance and commutation voltage

图 6. 交流传输线导纳与换相电压的关系

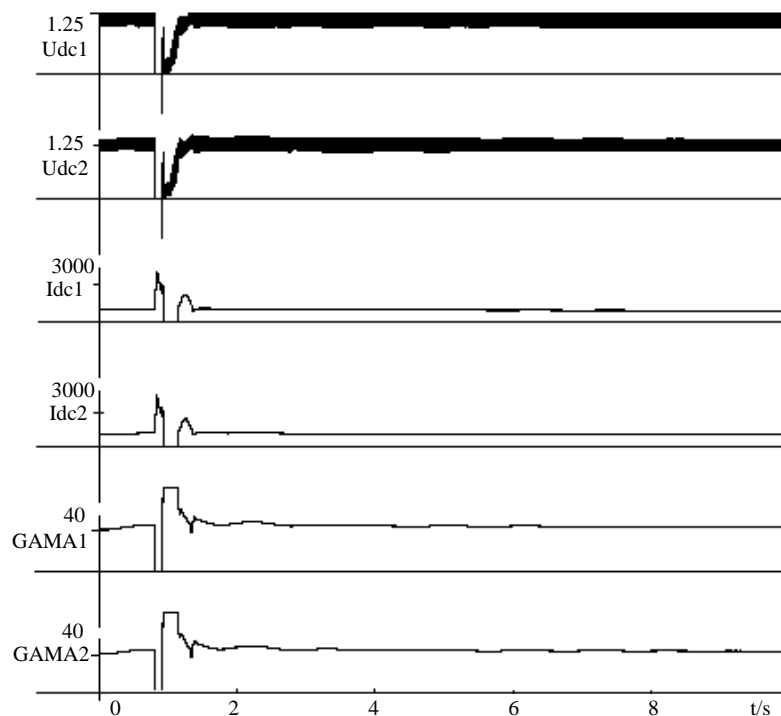


Figure 7. Systems simulation responses of U_{dc1} , U_{dc2} , I_{dc1} , I_{dc2} , $GAMA_1$, $GAMA_2$
图 7. 逆变侧直流电压、直流电流、关断角—时间特性曲线

5. 结论

从本质上讲,上述分析揭示了与两直流系统并联的交流传输线导纳和直流系统换相失败的关系;更进一步,得出两直流输电系统强耦合时与其并联的传输线导纳和直流系统避免换相失败所应具有取值范围。为进一步了解多馈入直流输电系统发生换相失败的原因及规律提供了一定的参考建议,并有助于制订出相应的预防措施。

1) 本文从理论上分析了与多馈入直流输电系统并联的传输线导纳和影响直流系统是否会同时或相继发生换相失败的关系;

2) 值得指出的是,影响多馈入直流输电系统中换相失败发生的主要因素是由网络结构决定的。它是与各直流输电系统相并联的交流传输线的导纳以及各直流输电系统整流侧相连的交流电源的等值导纳和与各直流输电系统逆变侧相连的交流电源的等值导纳密切相关;

3) 本文的仿真模型是一个典型的多馈入交、直流并联的现代电力系统的基本结构模型。模型仿真也验证了上面理论分析所得结论判断换相失败的准确性和正确性。对于实际的大规模交、直流并联的电力系统均可以通过适当的等值处理为该模型。因此该模型具有一定的科研和教学意义。

参考文献 (References)

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] PRABHA KUNDUR. 电力系统稳定和控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. NETOMAC 在直流输电系统仿真研究中的应用[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(4): 10-14.
- [4] Zhou, C.C. and Xu, Z. (2002) Study on Commutation Failure of Multi-Infeed HVDC system. *Proceedings of International Conference on Power System Technology*, 4, 2462-2466. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2002.1047228>
- [5] Taylor, C.W. and Hauer, J.F. (1989) Supplementary Controls in a Power System with Parallel AC and DC Transmis-

- sion. CIGRE International Colloquium on HVDC Power Transmission. Recife, Brasil. 13-15 August 1989, I-06.
- [6] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的理论分析[J]. 电网技术, 2006, 30(22).
- [7] Thio, C.V., Davies, J.B. and Kent, K.L. (1996) Commutation Failures in HVDC Transmission Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **11**, 946-957.
- [8] 荆勇, 李立涅, 任震. 天广交直流系统并联运行的稳定控制[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 49-52.
- [9] 欧开健, 任震, 荆勇等. 直流输电系统换相失败的研究(一) [J]. 电力自动设备, 2003, 23(5).
- [10] 任震, 欧开健, 荆勇等. 直流输电系统换相失败的研究(二) [J]. 电力自动设备, 2003, 23(6).
- [11] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 127-131.
- [12] 项玲, 郑建勇, 等. 多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 29-33.
- [13] 毛晓明, 管霖, 张尧, 吴小辰, 彭显刚. 含有多馈入直流的交直流混合电网高压直流建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 68-73.
- [14] 陈树勇, 李新年, 余军, 李涛, 吕鹏飞, 印永华. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 1-6.
- [15] Hansen, A. and Havemann, H. (2000) Decreasing the Commutation Failure Frequency in HVDC Transmission Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15**, 1022-1026. <https://doi.org/10.1109/61.871369>
- [16] 吴红斌, 丁明, 刘波. 交直流系统暂态仿真中换流器的换相过程分析[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 11-14.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org