

# 联于弱交流系统的 HVDC 换相失败研究

黎敬霞<sup>1</sup>, 王肩雷<sup>1</sup>, 钱晶<sup>1</sup>, 李捷<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 电力工程学院 云南 昆明 650051; 2. 昆明理工大学 机电工程学院 云南 昆明 650093)

**摘要:** 高压直流输电 (HVDC) 系统逆变侧换流器处交流系统的强度直接影响 HVDC 系统的动态性能, 换相失败是 HVDC 系统最常见的故障之一。通过分析逆变器换相失败的机理, 归纳了联于弱交流系统的 HVDC 换相失败的各种影响因素, 包括直流电流、换相电抗、换相电压、越前触发角、受端系统不对称等。利用 Matlab 的 Simulink 对交直流系统模型的动态特性及换相失败进行了仿真。

**关键词:** 高压直流输电; 弱交流系统; 换相失败; 逆变器

**中图分类号:** TM 721.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-855X(2006)02-0048-05

## Research on Commutation Failure in HVDC Connected to Weak AC System

LI Jing-xia<sup>1</sup>, WANG Jian-lei<sup>1</sup>, QIAN Jing<sup>1</sup>, LI Jie<sup>2</sup>

(1 Faculty of Electric Power Engineering Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650051, China)

(2 Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract** The strength of AC system to which the inverter side of the HVDC is connected directly exerts great influence on the dynamic performance of HVDC. Commutation failure is one of the most common faults in HVDC. The mechanism related to commutation failures has been analyzed to induce various triggering factors such as DC current, commutation impedance, commutation voltage, leading firing angle and unmatched receiving system etc. It is facilitated by simulations on AC-DC model using Matlab/Simulink.

**Key words** HVDC transmission; weak AC system; commutation failure; inverter

## 0 引言

高压直流输电系统 (HVDC) 换流器处交流系统的强弱直接影响 HVDC 系统的动态性能, 对联于弱交流系统的 HVDC 系统特性的研究始自最早的直流输电工程, 近年来, CIGRE 和 IEEE 也专门组成联合小组对此开展了研究。参考文献 [1, 5] 提出了划分 HVDC 系统所联交流系统强弱的准则, 文献 [4] 对大规模交流电力系统仿真计算的一些相关问题进行了阐述, 文献 [6] 分析了交直流系统中交流系统的频谱特性对 HVDC 换相失败的影响。在现有对联于弱交流系统的直流输电系统特性的研究中, 在研究模型的选择上多数为标准弱交/直流系统模型<sup>[1] 153~191</sup>, 而弱交流系统更为实际的考虑是交流系统发生故障时其强度变弱的情况。由于弱交/直流系统中交流系统故障会引起的直流系统持续换相失败以至停运, 本文从弱交/直流系统间相互作用着手对联于弱交流系统的 HVDC 换相失败进行研究, 并进行计算机仿真, 分析研究其动态特性, 这对交直流互联电网的安全稳定运行具有重要现实意义。

## 1 交直流系统模型

对于交直流系统相互作用机理的分析, 采用如图 1 所示的系统模型, 其中交流系统采用 Thevenin 等效电路<sup>[3] 61~70</sup>, 即用一固定阻抗  $Z$  串联一固定电动势  $E$  来模拟。在该系统模型中, 交流量只计及基波分量; 交

收稿日期: 2005-08-21. 基金项目: 云南省教育厅科研基金项目 (项目编号: 04Y459D); 校青年基金项目 (项目编号: 2003-12).

第一作者简介: 黎敬霞 (1973~), 女, 讲师. 主要研究方向: 电力系统分析与控制研究工作. E-mail: bbttbc@163.com  
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

流等效电动势  $E$  可变, 可近似计及交流系统的电压调节特性; 并联导纳  $B_c$  可变, 可计及静止无功补偿器的作用. 由于逆变运行时, 直流输电对交流系统强度的要求更为突出, 因此假定系统模型中的换流器为逆变器.

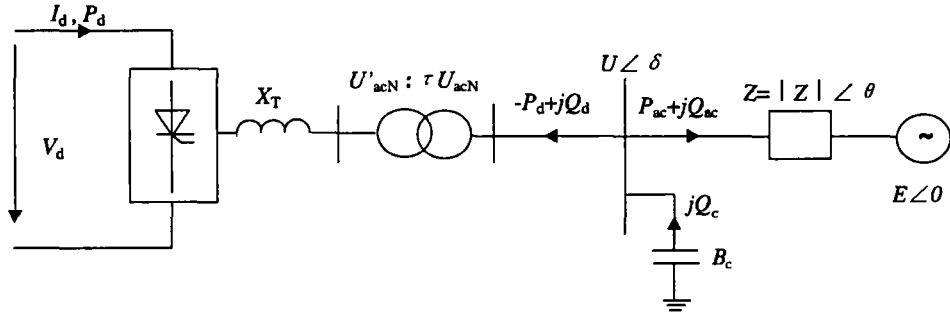


图1 交直流系统相互作用的系统模型  
Fig.1 The AC-DC interaction model

交直流间相互作用的性质以及相关问题上在很大程度上取决于交流系统与所联直流系统容量的相对大小, 主要表现在两方面: 一是换流器接入点处交流系统的等效阻抗; 二是交流系统的机械性能即旋转惯量. 对于交流输电系统, 限制其输送能力的主要因素是功角稳定和动态无功支持. 对于直流输电系统, 其本身已不存在功角稳定问题, 但直流输电系统的输送能力也是有限制的, 其决定性因素是所联交流系统的强度. 从两个方面可以把交流系统看成是弱的<sup>[1]153-165</sup>: (1) 交流系统的阻抗较高; (2) 交流系统的机械惯性较小.

交流系统的强弱是相对于直流系统的输送能力而言的, 弱交流可以理解为所联交流系统本身强度较弱或者交流系统发生故障时其强度变得很弱, 更为实际的考虑是交流系统发生故障时其强度变弱的情况. 逆变侧交流系统的强度直接影响 HVDC 系统的动态性能, 因此对与弱交流系统连接的 HVDC 系统所出现的换相失败研究系统模型确定为换流器的逆变侧.

## 2 换相失败的机理

### 2.1 逆变器的换相过程

逆变器工作方式下的电压波形及阀的导通时段如图 2 所示, 只要换相电压  $e_{ba} = e_b - e_a$  为正, 并且只要退出阀在其截止后承受个反向电压, 换相总是可以实现的. 为使换相成功, 必须在换相电压变为负值以前完成从退出阀到加入阀的转换. 即: 从阀 1 到阀 3 的电流转换必须在  $e_a > e_b$  之前完成, 而且需要足够的裕度使阀完成去游离.

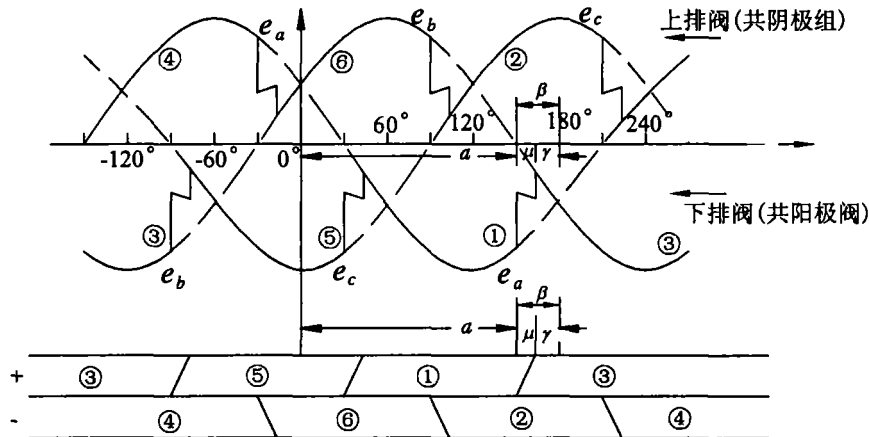


图2 逆变器电压波形及阀导通时段

Fig.2 The voltage waveforms & conducting periods of inverter

## 2.2 逆变器的换相失败

当两个桥臂之间换相结束后,刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内,如果未能恢复阻断能力,或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完毕,这两种情况在阀电压转变为正向时被换相的阀都将向原来预定退出导通的阀倒换相,这就叫做换相失败<sup>[2]</sup>. 直流输电系统中大部分换相失败都发生在逆变器,换相失败是逆变器最常见的故障.

直流输电系统需要交流系统提供换相电流,换相电流实际上是相间短路电流,因此要保证换相可靠,受端交流系统必须具有足够容量,即必须有足够的短路比 SCR(Short Circuit Ratio),所以受端电网较弱的直流输电系统更容易发生换相失败.

晶闸管需要一定时间完成载流子复合,恢复阻断能力,其去离子恢复时间在  $400 \mu\text{s}$ (约  $7^\circ$ 电角度)左右,考虑到串联元件的误差,晶闸管阀的恢复时间以电角度  $\gamma_{\min}$  表示约为  $10^\circ$ ,即当计算出的关断角  $\gamma < 10^\circ$ 时就认为发生换相失败.

当受端系统对称时逆变器关断角为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}I_d X_C}{U_C} + \cos\beta\right) \quad (1)$$

$$U_C = U_L K$$

式中  $I_d$  为直流电流;  $X_C$  为换相电抗;  $U_C$  为换相电压的线电压有效值;  $\beta$  为越前触发角;  $U_L$  为换流母线线电压的有效值;  $K$  为换流变压器的变比.

当受端系统发生不对称故障时,会使换相线电压过零点前移一个角度  $\phi$ ,则逆变器的关断角为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}I_d X_C}{U_C} + \cos\beta\right) - \phi \quad (2)$$

可见,当受端交流系统发生不对称故障时,由于换相线电压过零点前移的角度  $\phi$  会导致逆变器的关断角变得更小,从而更容易发生换相失败.

## 2.3 逆变器换相失败的影响因素

由式(2)可见,逆变器换相失败的影响因素包括直流电流  $I_d$ 、换相电抗  $X_C$ 、换相电压的线电压  $U_C$ 、 $\beta$  为越前触发角,当受端系统发生不对称时,逆变器换相失败的影响因素还包括换相线电压过零点相位移  $\phi$  角.此外,直流系统的触发脉冲控制方式和交流系统的频谱特性对换相失败也有一定的影响<sup>[3/101-129]</sup>.

当逆变侧交流系统发生故障时,换流母线电压必然下降,换相电压的线电压  $U_C$  也下降,逆变器的关断角减小,从而导致换相失败.

当其它变量一定时,降低换流变压器的分接头级数(即减小变比  $K$ )可以使逆变器的关断角增大,避免静态时关断角过小,使其保持在一定的范围内,从而减少换相失败的发生几率.但是,因为换流变压器分接头调整的时间常数较大,所以它不能防止故障暂态情况下的换相失败.

当越前触发角  $\beta$  和换流变压器变比  $K$  保持在初始值不变,直流电流的增大会导致逆变器的关断角减小,从而引起换相失败.

换相电抗也是影响换相失败的因素之一,换相电抗主要是换流变压器短路电抗,换流变压器漏抗越大,则关断角越.

随着越前触发角  $\beta$  的增大,关断角显著增大,这对避免逆变器换相失败是十分有利的.但是  $\beta$  的增大会减少直流系统传输的功率、增大系统消耗无功功率,所以,通过增大  $\beta$  的整定值避免换相失败是以降低直流输电系统运行经济性为代价的.

现代 HVDC 系统一般都采用等间隔触发脉冲控制方式,它不直接依赖于同步电压,而独立地产生等相位间隔触发信号,但这并不意味着各阀的触发角持续不变,因为触发角取决于换相电压过零点与对应的触发脉冲之间的相位差,当系统受到扰动或故障而使换相电压过零点移动时,各阀的触发角就不对称,关断角也不对称,当某个阀的关断角  $\gamma$  小于其最小关断角  $\gamma_{\min}$  时就会发生换相失败.

### 3 数字仿真

采用 Matlab 的 Simulink 对交直流系统模型进行动态特性的仿真, 仿真系统采用典型 12 脉冲桥 HVDC 输电系统仿真原理如图 3 所示. 整流器和逆变器均采用两个 6 脉冲桥串联而成的 12 脉冲桥结构, 直流架空线路长 300 km, 整流侧交流源是短路容量为 3 000 MVA (电压为 500 kV, 频率为 50 Hz); 逆变侧则连接 5 000 MVA 的 345 kV 交流网络 (频率为 50 Hz). 换流器所需的无功功率由一组滤波器提供, 逆变侧交流系统设置了故障发生器模拟交流系统故障.

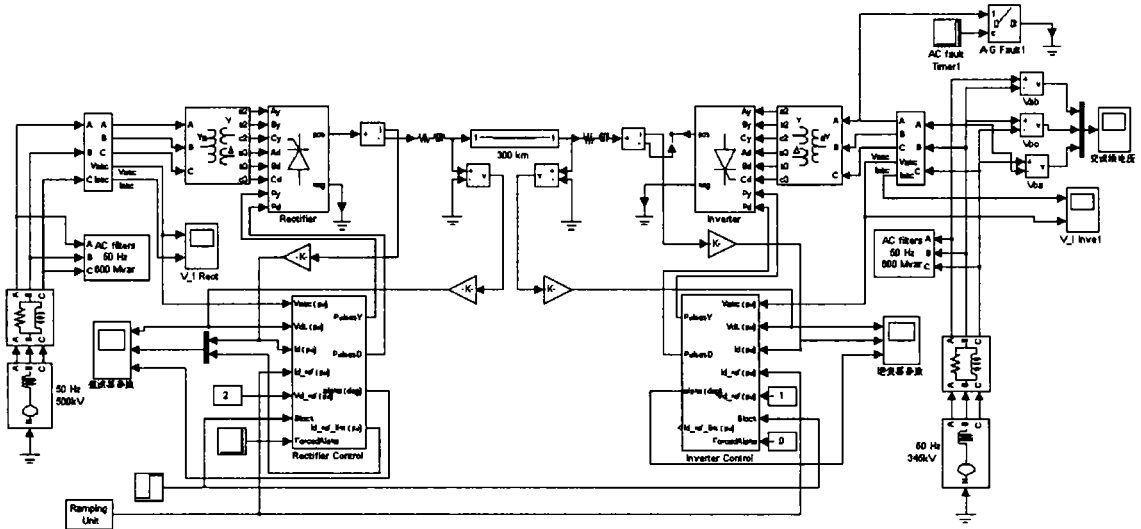


图3 典型12脉冲桥HVDC系统Matlab仿真原理图

Fig.3 The simulation schematic of HVDC 12-pulse system

当逆变侧变压器交流侧 0.8 s 时发生单相对地故障, 0.9 s 故障切除, 逆变侧换流母线电压波形如图 4 所示, 逆变器的直流线路电压  $V_d$ 、直流电流  $I_d$ 、逆变器的触发延迟角  $\alpha$  仿真结果如图 5 所示. 由仿真结果可见, 逆变侧交流系统发生单相对地故障过程中, 换流母线电压下降, 触发延迟角  $\alpha$  增大, 逆变器的关断角必然减小, 出现了换相失败. 故障切除后, 在逆变器控制系统的作用下, 约在 1.3 s 时系统恢复到故障前的状态. 该交直流输电仿真系统能较准确地反映暂态过程中直流输电系统的动态特性, 当逆变侧交流系统发生单相对地故障而使交流系统变弱时, 直观地反映了 HVDC 系统逆变器换相失败的动态过程.

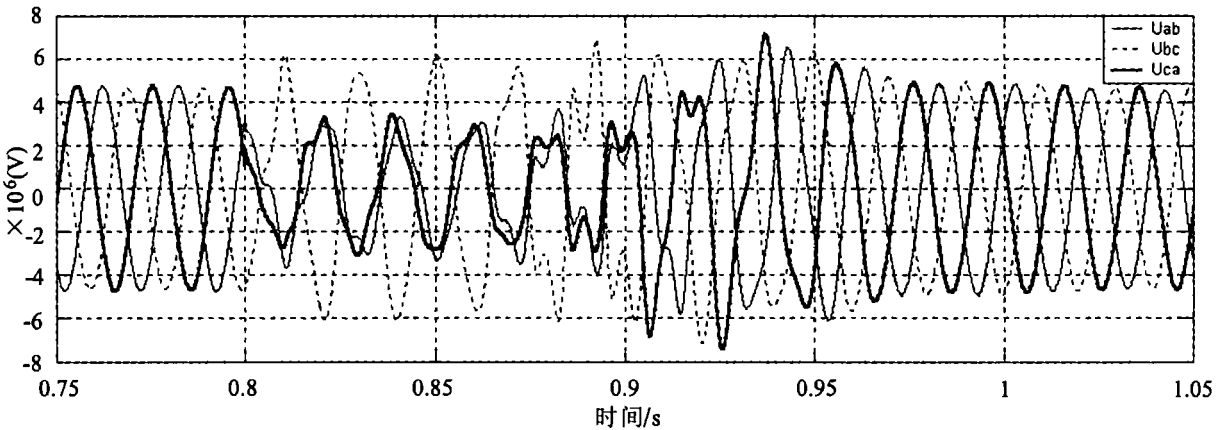


图4 逆变侧交流系统单相对地故障线电压波形

Fig.4 The AC voltage waveform of single line-to-ground fault at inverter side

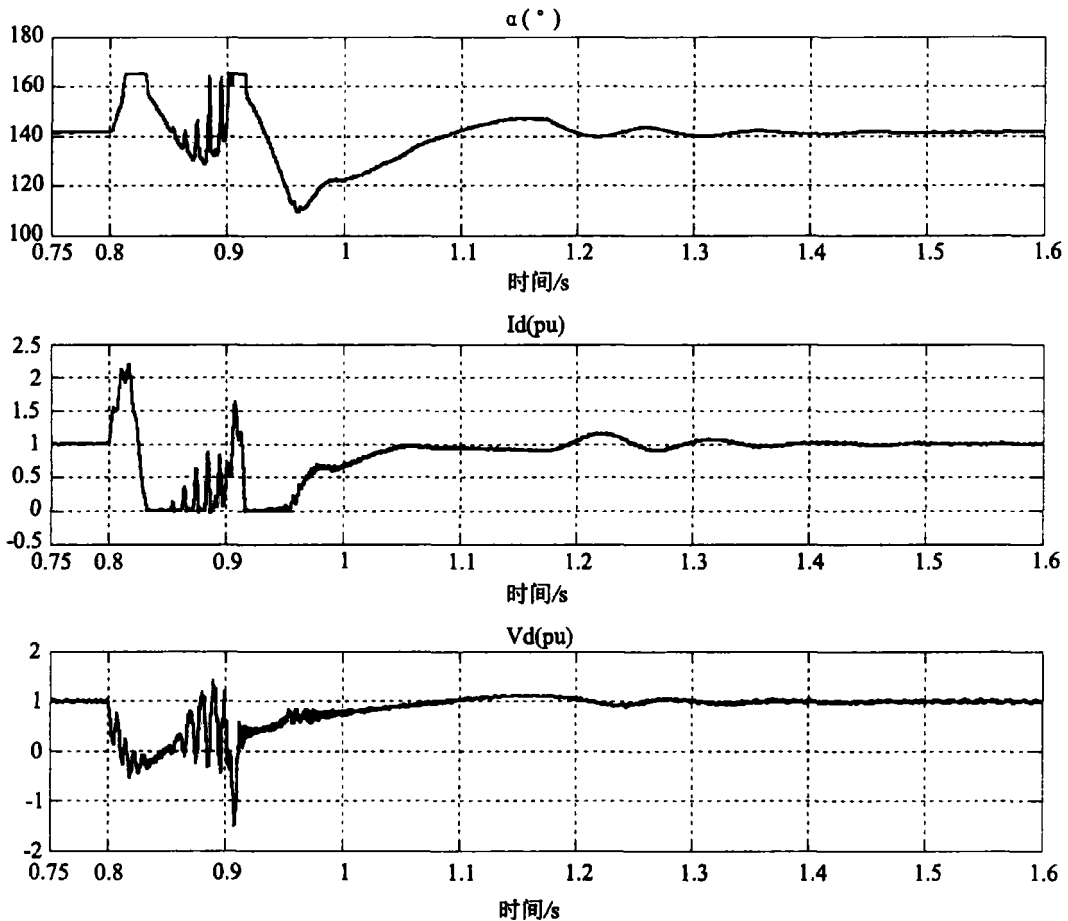


图5 逆变侧交流系统单相对地故障仿真结果  
Fig.5 The simulation of single line-to-ground fault at inverter side

#### 4 结论

换相失败是逆变器最常见的故障, 本文对换相失败的机理作了推导和分析, 并用 Matlab 的 Simulink 对交直流系统模型进行了动态特性仿真, 结果表明 HVDC 系统所联交流系统发生故障时其强度变弱, 与该弱交流系统连接的 HVDC 系统逆变器会出现换相失败, 但故障切除后, 由于 HVDC 系统的高度可控性, 采用适当的控制措施可以避免后续换相失败的发生或控制其发展以避免输电系统运行条件的恶化, 使系统恢复到原来的输送功率。

#### 参考文献:

- [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 153-191.
- [2] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1982 52-80
- [3] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004 61-129.
- [4] 徐政, 蔡晔, 刘国平. 关于大规模交直流电力系统仿真计算的一些相关问题 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 4-8
- [5] IEEE Std 1204-1997 IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-Circuit Capacities
- [6] KRISTMUNDSSON C.M, CARROLL D.P. The effect of AC systems frequency spectrum on commutation failure in HVDC inverters [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 1121-1128