

HVDC 系统换相失败的临界指标

刘建¹, 李兴源¹, 吴冲², 艾飞¹

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610065;

2. 西南电力设计院, 四川省 成都市 610021)

Research on Critical Index of Commutation Failure in HVDC System

LIU Jian¹, LI Xing-yuan¹, WU Chong², AI Fei¹

(1. School of Electrical Engineering & Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;

2. Southwest Electric Power Design Institute, Chengdu 610021, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The distribution of commutation failure immunity index (CFII) is given while single- or three-phase grounding fault happens in AC system at inverter side of HVDC power transmission system, and a method to quickly determine the critical impedance by optimal simulation module at a certain time point when commutation failure occurs is proposed. According to the calculated CFII, the affects of reduced-voltage operation and reduced-power operation of HVDC power transmission system on commutation failure are analyzed, the relation between the strength of AC system and commutation failure is analyzed and the relation among coupling impedance of multi-infeed HVDC power transmission, the risk of critical local commutation failure and the risk of critical simultaneous commutation failure is also researched.

KEY WORDS: commutation failure; immunity index; critical impedance; optimal simulation; coupling impedance

摘要: 在电阻性、电感性和电容性条件下, 给出了直流系统逆变侧发生单相和三相接地故障时换相失败免疫因子(commutation failure immunity index, CFII)的分布情况。提出了用优化仿真模块快速确定某一故障时刻点换相失败临界阻抗的方法。根据计算得出的 CFII 分析了直流系统降压运行和降功率运行对换相失败的影响, 探讨了交流系统强度与换相失败的关系以及多馈入系统中耦合阻抗与临界当地换相失败风险、临界同时换相失败风险的关系。

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217901); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAA13B01); 国家自然科学基金资助项目(50595412)。

Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China (2004CB217901); Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2008BAA13B01); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (50595412).

关键词: 换相失败; 免疫因子; 临界阻抗; 最优仿真; 耦合阻抗

0 引言

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, 或者在反向电压作用期间换相过程未结束, 当阀电压变为正向时, 被换相的阀将向原来预定退出导通的阀倒换相, 即换相失败^[1]。换相失败将导致直流电压下降和直流电流增大, 若采取的控制措施不当, 还会引发后继的换相失败, 严重时将导致直流传输功率中断, 使整个系统失去稳定, 影响电网安全运行^[2-5]。

发生换相失败的本质是逆变器熄弧角 γ 小于极限熄弧角 γ_{\min} ^[6]。换流器的阀是一种可控电力电子开关, 它需要一定时间完成载流子负荷, 恢复正向阻断能力, 其去游离恢复时间为 400 μs 左右^[7], 本文认为当 $\gamma \leq 7^\circ$ 时发生换相失败。换相失败本身属于随机事件, 要了解随机事件的特性必须掌握反映其本质的统计量。换相失败一般由交流系统大扰动引起, 如单相和三相接地短路故障。本文以引起换相失败的临界熄弧角和最大接地阻抗为切入点, 对换相失败的随机特性进行研究。

文献[8]以临界电压为判据判断换相失败, 但其结论是在假定无穷大交流系统的情况下基于换流器准稳态方程得出的, 有时可能发生错误。文献[9]给出了直流系统在电阻性、电感性和电容性条件下发生三相及单相接地故障时换相失败免疫指标图, 但未进行具体分析。本文以最小熄弧角为判据, 用电磁暂态仿真程序得出各种故障情况下换相失败

的临界指标，并对其特点进行分析，提出快速确定某一故障时刻点换相失败临界阻抗的方法。同时，本文还分析降压运行和降功率运行对换相失败临界指标的影响以及交流系统强度与换相失败的关系，探讨耦合阻抗与当地换相失败^[9]风险、同时换相失败^[9]风险的关系。

1 换相失败临界指标

1.1 不同故障情况下换相失败免疫因子的分布情况

引起换相失败的最大阻抗为临界阻抗，用 Z_{fault} 表示。在确定的系统条件下，临界阻抗取决于故障类型和故障发生时刻。因此，求取临界阻抗本质上是一个寻优过程，在可能出现的故障类型和故障发生时刻的集合里，搜寻刚好发生换相失败的故障条件。采用连续仿真求解换相失败临界阻抗的基本思想如下：令故障接地阻抗、故障发生时刻、故障类型为变量，设置变量范围，求解临界阻抗。

用 CIGRE 标准模型作为系统模型，直流控制器仅实现基本控制，不考虑任何附加控制，设故障点在逆变侧交流母线上。考虑交流电气量的周期特性，故障在一个周期内发生的时刻点不同，换相失败的临界阻抗也会发生相应的变化，因此在一个周期内等间隔地设置 100 个故障点，每个故障时刻点对应一个临界值。在电阻性、电感性 and 电容性条件下发生三相接地故障时，一个周期内不同时刻点的换相失败临界阻抗 Z_{fault} 见图 1。

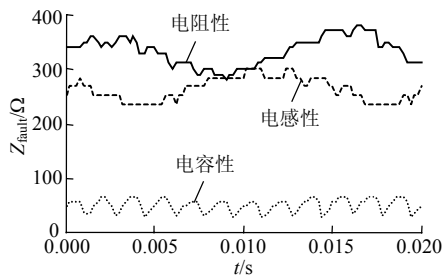


图 1 三相接地短路时的换相失败临界阻抗
Fig. 1 Commutation failure critical impedance of three-phase grounding fault

将临界阻抗作为换相失败判据不够直观，本文采用换相失败免疫因子 (commutation failure immunity index, CFII)^[9] 衡量发生换相失败的容易程度，其定义为

$$I_{\text{CFII}} = \frac{U_{\text{AC}}^2}{Z_{\text{fault}} P_{\text{DC}}} \quad (1)$$

式中： P_{DC} 是直流额定功率； U_{AC} 是线电压额定值； Z_{fault} 是引起换相失败的临界阻抗。由式(1)可以看

出，CFII 与额定线电压、直流传输额定功率和临界阻抗有关。CFII 越大，说明逆变器抵御换相失败的能力越强。

额定运行条件下， $U_{\text{AC}}=230\text{ kV}$ ， $P_{\text{DC}}=1\ 000\text{ MW}$ ，由式(1)可计算得出换相失败免疫指标。图 2、3 分别给出了在电阻性、电感性 and 电容性条件下，发生三相和单相接地短路故障时，一个周期内不同时刻点的换相失败临界因子。

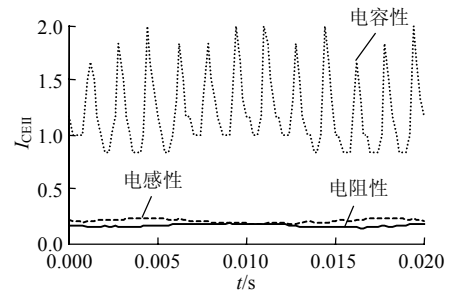


图 2 三相接地短路时的换相失败免疫因子
Fig. 2 Commutation failure critical indices of three-phase grounding fault

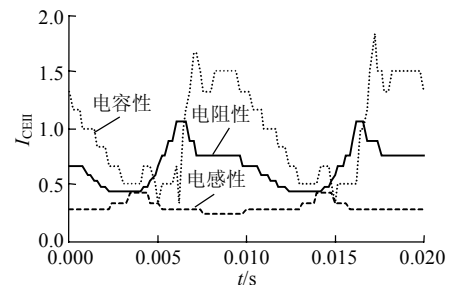


图 3 单相接地短路时的换相失败免疫因子
Fig. 3 Commutation failure critical indices of single-phase grounding fault

对比图 2 与图 3 可知，经电阻和电感接地的三相短路故障比单相短路故障更易导致换相失败。这是因为三相短路故障导致三组换相电压同时下降，一个周期内 6 次换相的换相裕度同时减小，而单相短路只有一相电压下降，因而一个周期内只有 2 次换相存在因换相电压下降而使换相裕度减小的风险。

单相电阻和电感接地故障对故障发生时刻的敏感度较三相故障要高，这是因为单相电阻接地故障导致换相电压过零点漂移，当实际过零点提前时，换相裕度减小，较大的接地阻抗就能导致换相失败；当实际过零点滞后时，换相裕度增大，更小的接地阻抗才能导致换相失败。

电感性接地短路是实际系统中最常见的故障形态，它对故障发生时刻不敏感。在三相和单相故障下，电感性接地短路故障基本上是最容易导致换相失败的故障形态。电容性接地故障的临界指标较

高,但在实际系统很少发生电容性接地故障。

1.2 换相失败临界阻抗的求解方法

在确定的系统条件下,CFII 主要是由临界阻抗得出的,上文对换相失败临界阻抗的研究是基于连续仿真做出的,但连续仿真求解某一故障时刻点换相失败临界阻抗的效率较低。新版 EMTDC 程序增加了优化仿真模块^[10],将优化算法集成于模块 Optimum Run 当中。该模块中提供了 3 种优化方法,适合于不同的优化问题。用户需指定目标函数作为该模块的输入及收敛误差。本节分别采用黄金分割法^[11]和 Simplex^[12]法进行优化仿真。

优化仿真的关键是构造合适的目标函数和选择适当的优化方法。换相失败临界状态要满足 2 个要求:发生换相失败,即熄弧角为小于 7° ;故障期间电压与稳态电压的偏差最小。令电压幅值的标幺值为 U , $1-U$ 为电压跌落大小,熄弧角为 γ ,选择目标函数为 $f=\min(1-U)^2+k\gamma^2$,其中 k 为加权系数,合理选择该系数可以使结果趋近于真值。

黄金分割算法的原理与二分法相似,该算法通过不断缩小搜索范围寻找最优解。以单条 CIGRE 模型逆变侧交流母线发生单相电阻接地短路故障为例,设故障发生时刻为 0.32 s,电阻可变范围为 0~1 000 Ω ,收敛误差为 0.001。优化仿真计算 15 次后,算法收敛,其计算出的临界电阻为 90.34 Ω ,即 CFII 为 0.5856;而连续仿真须进行 1 000 次,计算出的临界电阻为 84 Ω ,即 CFII 为 0.629 8。由此可见优化仿真大大提高了仿真效率,且与连续仿真的结果较接近。

Simplex 是基于平面几何的启发式优化方法^[13],可以对 20 个变量以内的多变量进行优化。可以将 Simplex 视为一个几何对象,该对象由 N 维空间的 $N+1$ 个点构成。优化算法启动后,在初始 Simplex 的每个顶点计算目标函数,丢弃计算结果最大的点并产生一个新的顶点,该点是被丢弃点以剩余顶点的几何中心为中点的镜像对称点。重复该过程,Simplex 将逐渐向更小的目标函数值滚动。通过比较新产生节点与已有节点目标函数值的大小,可以加速收敛过程。同样,以单条 CIGRE 模型逆变侧交流母线发生单相电阻接地短路故障为例,设临界阻抗初始值为 150 Ω ,临界故障发生初始时刻为 0.32 s,初始步长为 20。优化仿真计算 121 次后算法收敛,其计算出的临界电阻为 89.34 Ω ,即 CFII 为 0.592 1,与连续仿真得到的结果(CFII 为 0.629 8)较接近。

值得注意的是,优化仿真只能快速确定某一个故障时刻点的换相失败临界阻抗,因此欲求出一个周期内不同故障时刻点的临界阻抗需进行多次优化仿真。求解一个周期内的 CFII 平均值的过程较麻烦,但它是快速确定某一故障时刻点 CFII 的有效方法。

2 两端直流系统换相失败临界指标

2.1 不同运行条件下的换相失败临界指标

高压直流系统的运行条件包括额定功率运行、降功率运行和降压运行。由上文分析可知,电感性接地短路是实际系统中最常见的故障形态,对故障发生时刻不敏感。当发生三相和单相故障时,电感性接地短路基本上是最容易导致换相失败的故障形态。因此利用电感性故障接地分析不同运行条件对一个周期内平均换相失败临界指标的影响更具现实意义。

送端输送功率不足会使直流系统降功率运行。直流系统降功率运行条件下,三相和单相故障时的 CFII 见表 1。由表 1 可知,在降功率运行条件下,随着输送功率降低,换相失败临界指标明显增加,而当直流绝缘水平降低或在特殊天气情况下,直流系统将降压运行。提高关断角的整定值可以达到降压运行的目的,而当直流系统降压运行时,为避免直流电压较低时触发越前角 β 过大,应该适当降低换流变压器阀侧电压,本文设换流变压器阀侧电压均为 0.9 pu^[14-15]。直流系统降压运行条件下三相和单相故障时的 CFII 见表 2。由表 2 可知:直流电压降得越小,CFII 越高;70%降压运行最不容易发生

表 1 直流系统降功率运行条件下
三相和单相故障时的 CFII

Tab. 1 CFII of HVDC system by reducing power with three-phase and single-phase fault

输送功率占额定功率百分比/%	CFII	
	三相故障	单相故障
50	0.301 4	0.415 0
70	0.259 1	0.356 4
90	0.225 3	0.318 4
100	0.194 9	0.287 9

表 2 直流系统降压运行条件下
三相和单相故障时的 CFII

Tab. 2 CFII of HVDC system by reducing voltage with three-phase and single-phase fault

负荷电压占额定电压的百分比/%	CFII	
	三相故障	单相故障
70	0.259 1	0.372 7
80	0.227 5	0.316 3
100	0.194 9	0.287 9

换相失败。可见降压运行可以提高系统运行可靠性，但同时会增大输电损耗、降低系统可用率。

2.2 不同交流系统强度下的换相失败临界指标

弱交流系统难以提供较强的无功功率，交流电压下降时往往会引起电压不稳定，这将对换相产生不利影响。下文将以电感性接地的三相和单相故障为例，分析交流系统强度对一个周期内的平均换相失败临界指标的影响。表 3 列出了不同短路比下的三相和单相故障时的 CFII，短路比从 2.50 变到 5.00 时，三相故障情况下的 CFII 由 0.1949 增加到 0.2820；在单相故障情况下的 CFII 由 0.2879 增加到 0.4272。由此可见，交流系统强度越强，换相失败的免疫指标越大，即发生换相失败的可能性越低。

表 3 不同短路比下三相和单相故障时的 CFII
Tab. 3 CFII of three-phase and single-phase fault with different short-circuit ratio

短路比	CFII	
	三相故障	单相故障
2.50	0.1949	0.2879
3.13	0.2009	0.3100
3.75	0.2190	0.3410
4.38	0.2432	0.3794
5.00	0.2820	0.4272

3 多馈入情况下电气距离对 CFII 的影响

在多馈入直流系统中，耦合的逆变站会相互干扰，一个换流站的换相失败可能会导致其它换流站的换相失败，其影响程度随耦合阻抗的变化而变化。因此换流站之间的电气耦合关系是影响几个逆变站是否同时或相继发生换相失败的重要因素。双馈入直流系统模型见图 4。

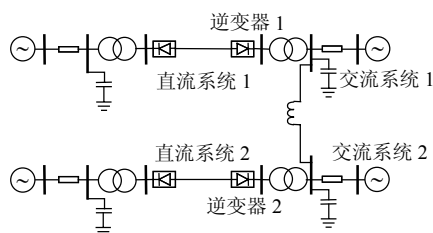


图 4 双馈入直流系统模型

Fig.4 Dual-infeed HVDC system model

文献[9,16]就多馈入直流系统中短路比与当地换相失败风险和同时换相失败风险的关系进行了分析。本文以由 2 条 CIGRE 模型组成的双馈入直流系统为研究对象，以最常见的单相电感性接地为故障类型，对 2 个逆变站电气距离改变引起当地换相失败和同时换相失败的临界指标进行分析。设故障处在第一条直流系统逆变侧交流母线上。表 4 为

表 4 不同耦合阻抗发生当地换相失败和同时换相失败时的 CFII

Tab. 4 CFII when local commutation failure and concurrent commutation failure happened with different coupling impedance

耦合阻抗/pu	CFII	
	当地换相失败	同时换相失败
0	0.560 4	0.560 4
0.59	0.424 8	0.473 8
1.78	0.337 0	2.654 9
2.97	0.313 0	9.310 3

不同耦合阻抗发生当地换相失败和同时换相失败时的 CFII。

由表 4 可知：2 个直流系统逆变端交流系统耦合很强，耦合阻抗为 0 时，仅发生当地换相失败时的 CFII 最大，这是因为第二条直流系统的交流侧对第一条交流侧电压支撑最有力；随着耦合阻抗的增大，2 个逆变站的交互影响减弱，第二条直流系统对第一条交流系统的电压支撑减弱，发生当地换相失败的几率增加，第二条直流系统交流侧受第一条故障的影响也相应减小，因此发生同时换相失败^[9]时的 CFII 增加，发生同时换相失败的可能性降低。同理，耦合阻抗越小，逆变侧交流系统的交互影响越大，越易发生同时换相失败。

4 结论

1) 利用 EMTDC 的连续仿真功能，用 CFII 描述了发生换相失败故障时的时空分布规律，详细分析了 6 种具有代表性的接地短路故障下换相失败的基本特点。将换相失败临界阻抗的求解归纳为最优化问题，提出了考虑临界换相失败条件的目标函数，并利用 EMTDC 优化仿真程序快速确定出了某一故障时刻点的 CFII。

2) 分析了不同的运行条件对 CFII 的影响，得出降压运行和降功率运行均可以减小换相失败风险的结论，指出交流系统强度越弱，换相失败临界指标越小，越易发生换相失败；在多馈入情况下，耦合阻抗越大，逆变侧交流系统的交互影响越小，越易发生当地换相失败，而发生同时换相失败的几率越小。

参考文献

- [1] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1985: 180-186.
- [2] 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: 192-202.
- [3] 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仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.

- He Chaorong, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. Simulation analysis on commutation failure criteria for HVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24(in Chinese).
- [4] 任景, 李兴源, 金小明, 等. 多馈入高压直流输电系统中逆变器站滤波器投切引起的换相失败仿真研究[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 17-22.
- Ren Jing, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. Simulation study on commutation failure caused by switching AC filters of inverter stations in multi-infeed HVDC system[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 17-22(in Chinese).
- [5] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.
- Lin Lingxue, Zhang Yao, Zhong Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46(in Chinese).
- [6] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电换相失败的判断标准[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 19-24.
- He Chaorong, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. Criteria for commutation failure in HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 19-24(in Chinese).
- [7] 荆勇, 欧开健, 任震. 交流单相故障对高压直流输电换相失败的影响[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 60-62.
- Jing Yong, Ou Kaijian, Ren Zhen. Analysis on influence of AC single phase faults on HVDC commutation failure[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 60-62(in Chinese).
- [8] Thio C V, Davies J B, Kent K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [9] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure in single and multi-infeed HVDC systems[J]. The 8th IEEE International Conference, 2006.
- [10] Gole A M, Filizadeh S. Electromagnetic transients simulation as an object function evaluator for optimization of power system performance[C]. International Conference on Power Systems Transients, New Orleans, USA, 2003.
- [11] Gole A M, Filizadeh S. Inclusion of robustness into design using optimization-enabled transient simulation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 1991-1997.
- [12] Gole A M, Filizadeh S. Optimization-enabled electromagnetic transient simulation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 512-518.
- [13] Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization[J]. The Computation Technology, 1965, 7(4): 308-313.
- [14] 荆勇, 任震, 欧开健. 天广直流输电换相失败的研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 32-36.
- Jing Yong, Ren Zhen, Ou Kaijian. Research on commutation failure in Tian-Guang HVDC transmission system[J]. Relay, 2003, 31(10): 32-36(in Chinese).
- [15] 欧开健, 任震, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一): 换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 6-9.
- Ou Kaijian, Ren Zhen, Jing Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 1: commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 6-9(in Chinese).
- [16] Zhou Changchun, Xu Zheng. Study on commutation failure of multi-infeed HVDC System[C]. 2002 International Conference on Power System Technology, Kunming, 2002.



刘建

收稿日期: 2008-10-27。

作者简介:

刘建(1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统稳定与控制, E-mail: mypetdog@126.com;

李兴源(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制等方面的研究工作;

吴冲(1981—), 男, 工程师, 从事安全自动装置和继电保护规划设计工作。

(责任编辑 杜宁)

《中文核心期刊要目总览》第5版出版

北京大学出版社于2008年12月出版了《中文核心期刊要目总览》第5版, 该书前4版分别在1992、1996、2000和2004年出版。它将国内8412种中文期刊分成73个学科, 评出1983种核心期刊, 比例是24%; 其中科技期刊1236种。电工技术类(TM)期刊总数为208种, 核心期刊32种, 占该类期刊总数的15%, 具体排名如下:

名次	期刊名称	名次	期刊名称	名次	期刊名称
1	中国电机工程学报	12	电力系统及其自动化学报	23	电机与控制应用
2	电力系统自动化	13	电力电子技术	24	华东电力
3	电工技术学报	14	高压电器	25	绝缘材料
4	电网技术	15	微特电机	26	低压电器
5	电池	16	电化学	27	电瓷避雷器
6	电源技术	17	电机与控制学报	28	蓄电池
7	高电压技术	18	华北电力大学学报	29	电气应用
8	电工电能新技术	19	变压器	30	大电机技术
9	中国电力	20	微电机	31	电测与仪表
10	继电器	21	电气传动	32	照明工程学报
11	电力自动化设备	22	磁性材料及器件		