

高压直流输电系统换相失败的概率分析

任 震, 陈永进, 梁振升, 黄雯莹

(华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510641)

摘要: 换相失败是直流逆变系统最常见的动态故障, 其概率分析是对传统确定性分析的一种重要补充。提出了换相失败的概率分析方法, 给出了一组不同故障在不同时刻发生时熄弧角的计算公式。充分利用影响换相失败的因素之间的概率关系, 考虑控制装置的快速调节作用, 用 Monte-Carlo 模拟法统计计算换相失败的概率指标。所得结论对避免换相失败、保证直流系统稳定运行具有一定的指导意义。

关键词: 高压直流输电系统; 换相失败; 概率分析; Monte-Carlo 模拟

中图分类号: TM732; TM721.1

0 引言

换相失败是直流逆变系统最常见的动态故障, 影响换相失败的原因除了控制系统的故障外, 主要有交流电压幅值的突然降低、换相电压过零点相角的偏移、直流电流突然升高等^[1~3], 其中最原始的原因在于阀侧交流电压幅值的突然降落。

在概率分析方法中, 文献[4]提出一种基于能量函数的电力系统概率稳定分析方法, 减少了概率稳定性分析的计算量, 文献[5]将静态电压安全和概率充分性结合起来, 建立了考虑各种因素的概率分析模型, 并将其应用到电力系统分析中, 简化了问题的分析。因此概率分析是一种重要的分析工具。

本文用概率的方法对高压直流输电系统换相失败进行了研究, 在三相电压突然变化以及相应产生的换相相角偏移、直流电流升高的条件下, 充分考虑控制装置的调节作用, 得到可能的最大熄弧角满足设定的最小熄弧角约束的概率关系, 统计换相失败发生的概率指标。所得结论对避免换相失败、保证直流系统稳定运行具有一定的指导意义。

1 熄弧角的计算公式

直流系统两个阀之间的换相过程如图 1 所示。

以阀 5 向阀 1 换相为例, 以 e_a 和 e_c 正向电压交点为参考 0° , 负向电压交点为 180° , 在此期间触发阀 1 将进行阀 5 对阀 1 的换相过程, 有以下公式:

$$2L_r \frac{di_1}{dt} = e_a - e_c \quad (1)$$

式中: e_a, e_b, e_c 表示换流变压器阀侧相电压瞬时值, $e_a = \sqrt{2/3}U \sin(\omega t + 30^\circ)$; $e_c = -\sqrt{2/3} \sin(\omega t - 30^\circ)$; U 为三相线电压有效值; L_r 为换相电感。

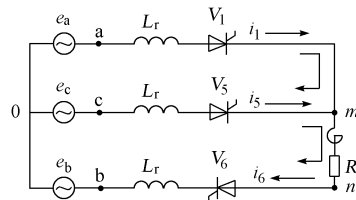


图 1 换相过程示意图

Fig. 1 Commutation procedure from valve 5 to valve 1

对于三相电压对称变化, 即 U 变到 U' , 不会发生换相电压过零点相位的偏移, 若电压降落发生在阀 1 触发之前, 熄弧角 δ 的计算公式为:

$$\delta = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}I_d X_C}{U'} - \cos \alpha\right) \quad (2)$$

式中: X_C 为换相电抗; I_d 为直流电流; α 为触发角; U' 为变化后的换流母线阀侧交流线电压有效值。

若电压降落发生在换相过程中, 设为 $\alpha + \theta_0$ (θ_0 表示电压降落发生在阀触发之后相对于触发角 α 的某个角度) 的电角度处, 则 δ 的计算公式为:

$$\delta = \arccos\left\{\frac{\sqrt{2}I_d X_C}{U'} - \frac{U}{U'}[\cos \alpha - \cos(\alpha + t_0)] - \cos(\alpha + \theta_0)\right\} \quad (3)$$

若令式(3)中的 $\theta_0 = 0$, 则可得到式(2)。

对于单相故障的情况, 研究表明, 在换相过程中, e_a 的幅值降低有利于换相成功, e_c 幅值降低对成功换相不利。故这里考虑 e_c 幅值降低的情况。若 e_c 幅值由 $\sqrt{2/3}U$ 降低到 $\sqrt{2/3}U'$ 的同时保持 e_a 的幅值不变, 则可得到 e_a 和 e_c 电压过零点相角向前偏移

的量 ϕ_0 为:

$$\phi_0 = \arctan \frac{U - U'}{\sqrt{3}(U + U')} \quad (4)$$

对于 e_c 幅值降低的情况,若故障发生在阀 1 触发之前,则熄弧角 δ 的计算公式为:

$$\delta = \arccos \left\{ \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} [\sqrt{6} I_d X_C - U \cos(\alpha + 30^\circ) - U' \cos(\alpha - 30^\circ)] \right\} \quad (5)$$

式中: $A = \sqrt{3}/2(U + U')$; $B = (U - U')/2$ 。

若故障发生在换相过程中 $\alpha + \theta_0$ 的电角度处,则熄弧角 δ 的计算公式为:

$$\delta = \arccos \left\{ \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} [\sqrt{6} I_d X_C - \sqrt{3} U \cos \alpha + \sqrt{3} U \cos(\alpha + \theta_0) - U \cos(\alpha + \theta_0 + 30^\circ) - U' \cos(\alpha + \theta_0 - 30^\circ)] \right\} \quad (6)$$

若令式(6)的 $\theta_0 = 0$,则可得到式(5)。

2 影响换相失败的因素分析

由式(1)~式(6)可知,影响换相失败的因素主要有阀侧交流电压的幅值、直流电流、换相电抗、触发角、交流电压不对称引起的相角偏移等。传统换相失败的分析是在考虑确定性负荷水平、电压降落的幅值、故障类型等的基础上进行。概率分析的特点是将影响分析结果的这些确定性因素作为随机变量来处理,并选取其中的主要因素作为随机变量,舍弃概率性小且对换相失败影响不大的次要的随机变量。这些主要因素有:

a. 交流电压故障。在换相失败的确定性分析中,一般假设阀侧交流电压故障类型为单相故障和三相短路故障,在概率性分析中,电压故障类型是离散型的随机变量,并假设有 N 种故障类型,如单相短路故障、两相接地短路、两相间短路、三相短路等。将第 i 种故障发生的概率计为 p_i 。若不考虑复合故障,则这 N 种故障是互不相容的,其概率之和为 1。对引起换相失败的电压故障,一般考虑阀侧交流电压幅值的降落,在概率分析中,单相电压降落和三相电压对称降落是其中主要的随机变量。

电压幅值是连续型随机变量,研究的对象不同,对其幅值的处理方式也不同,一般可分为均匀分布、正态分布、对数正态分布、指数分布等。在换相失败的概率分析中,阀侧交流电压幅值降落处理为服从某参数的指数分布。

b. 故障发生的时刻。由第 1 节公式可见,故障发生的时刻不同,其对换相的影响也不同。在换相

失败的确定性分析中,一般考虑故障发生在阀触发时,在概率分析中,故障发生的时刻是一个连续型的随机变量,它在整个换相周期中服从均匀分布,若以电角度为时间单位,对单个换相周期来说,故障发生的时刻在换相的 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间服从均匀分布。

c. 系统运行方式。由于负荷水平和直流系统绝缘水平的变化,直流系统可工作在多种电压水平的运行方式下,一般为有限种。如天广直流系统有两种不同的运行方式(降压 80% 和 70%)^[6]。不同的运行方式对应不同的额定工况点,对换相失败发生的影响也不同。系统运行方式是一种离散型的(随机)变量,假设系统有 M 种不同的运行方式,则这 M 种运行方式的概率之和为 1。若只研究某一种运行方式,则 $M=1$ 。

d. 直流电流。交流电压降落及直流极故障都会引起直流电流上升,通常直流电流上升有一定的限度,当阀侧交流电压下降到一定值后,系统会启动“低压限流”控制,从而控制直流电流的持续上升,保证直流输电系统的稳定运行,根据交流电压降落幅值的大小以及持续时间,用概率的方法建立直流电流上升的百分比和阀侧交流电压变化的概率、直流电流上升的概率以及上升的幅值是阀侧交流电压降落幅值和持续时间的非线性函数,通常,可从直流系统运行方式曲线上确定直流电流上升的幅度,从而求得直流电流上升的概率及上升的幅值。

e. 触发角。触发角提前触发会增加逆变侧无功消耗,但对换相有利。在换相失败的概率分析中,假定电压降落是理想的(可当做电压降落的期望事件),即假定电压在某时刻突然降落,然后持续到换相结束,可用高速 DSP 检测装置监测故障发生的时刻^[7],判断是否会引起换相失败,若系统运行方式确定后,在概率分析中触发角是一个连续型随机变量,它根据故障发生的时刻来确定。

3 换相失败的概率分析方法

换流系统在本质上是一个随机系统,因此可用概率的方法对其进行整体和宏观的评价。本文采用 Monte-Carlo 法对换相失败进行概率分析。首先建立换相过程的样本空间,用 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 表示, m 为参数的个数。本文 X 中的元素为电压故障类型、电压降落的幅值、故障发生时刻、触发角控制、直流电流变化、系统运行方式。根据 x_i 的性质其取值可为连续型或离散型,这样当状态空间的元素取不同值时,样本空间就包含了所有的系统状态,根据第 i 个运行状态可得到 δ_i ,令熄弧角裕度 $\Delta\delta = \delta_i - \delta_{\min}$,若 $\Delta\delta > 0$,则换相成功,若 $\Delta\delta < 0$,则换相失败。

图 2 表示了每次换相情况下 $\Delta\delta$ 在每个换相周期内的变化情况,图中阴影部分是换相失败的部分,其纵向长度为成功换相所缺的电角度。

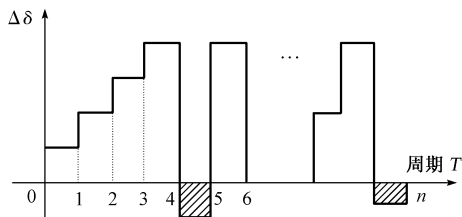


图 2 求解换相失败概率关系图

Fig. 2 Diagram of probability relation of commutation failure

图 2 完全表达了换相失败的概率关系,据此用 Monte-Carlo 模拟法计算换相失败的概率指标的公式可表示为:

$$P(\delta < \delta_{\min}) = \frac{\sum_{i=1}^n |\delta_i - \delta_{\min}|}{\sum_{i=1}^n |\delta_i - \delta_{\min}|} \quad (7)$$

式中: n 表示模拟的次数; $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

在模拟中,计算得到的电角度 δ_i 可能为复数,但 δ_i 表示换相之后晶闸管阀的熄弧角,应为实数,出现这种情况的原因是由于阀侧交流电压幅值下降过大或直流电流上升过多,使得无论如何调节阀的触发时刻,都不能避免换相失败,从而出现换相还没有结束,熄弧并未开始的事件,因此可令 $\delta_i = 0$ 。

4 分析

以高压直流(HVDC)标准模型系统为例进行分析。该系统额定参数为:交流系统频率 f 为 50 Hz;直流系统额定电压 U_{dN} 为 500 kV;直流系统额定功率 P_d 为 1 000 MW;直流额定电流 I_d 为 1.0(标么值,基值为 2 kA);阀侧交流系统电压 U 为 1.0(标么值,基值为 230 kV);换流变压器变比 k 为 1.0(标么值,基值为 230 kV/209.23 kV);初始触发越前角 β 为 39° ;初始运行点关断角 γ_0 为 16.8° 。晶闸管的关断时间一般在 $400 \mu s \sim 500 \mu s$ 之间,对于交流电压频率为 50 Hz 的系统,对应的电角度为 $7.2^\circ \sim 9^\circ$,考虑一定的裕度,取最小熄弧角为 10° ,若模拟得到的熄弧角小于 10° ,便认为存在换相失败。

考虑三相对称故障和单相故障两种故障类型,逆变侧交流电压幅值降落服从指数分布,取参数为 10,两种故障发生的概率分别为 0.8 和 0.2,故障发生的时刻服从均匀分布,用公式表示为, $U' = (1 - e^{-10x})U$,其中 $x \in [0, 1]$; $\theta_0 \in (0^\circ \sim (180^\circ - \alpha))$,系统的运行方式取为正常运行方式, $M = 1$ 。

在系统额定工况点处,用 Monte-Carlo 法,模拟

1 万次得到换相失败的概率值为 3.25×10^{-4} 。

图 3 表示了换相失败的概率指标随触发角变化时的情况。考虑两种控制方式,第 1 种方式为故障发生后不调整触发角计算得到的概率指标,用 PCF1 表示;第 2 种情况为故障发生后及时调整触发角计算得到的概率指标,用 PCF2 表示,由图可见,故障发生后将触发角提前能有效降低换相失败发生的概率。图中的两条曲线均出现了局部不单调的现象,这是由于 Monte-Carlo 法的统计特性造成的。

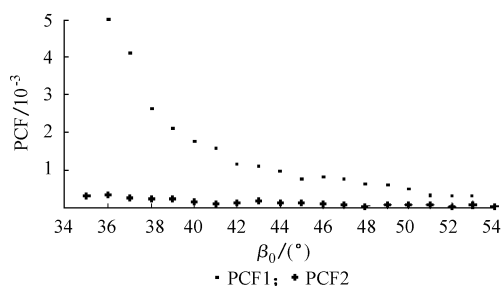


图 3 触发角 β_0 对 PCF 指标的影响

Fig. 3 Effect of β_0 on probability indices

图 4 横坐标表示三相对称故障所占百分比,纵坐标表示概率指标。随着三相故障比例的增加,换相失败的概率指标变化却很小, Monte-Carlo 法的统计特性使得概率指标值在一定范围内变化,由图可见,换相失败的概率受电压故障类型的影响较小。影响换相失败的电压因素不在于某种故障的类型,而是电压降落的幅值。研究得知,换相失败的概率指标主要受退出导通的相的电压幅值变化的影响,得到的结果是,退出导通的阀的电压幅值降落对换相失败的影响最大。因此,若安装高速 DSP 数字监测装置实时检测阀侧交流电压幅值可有效降低换相失败的概率。

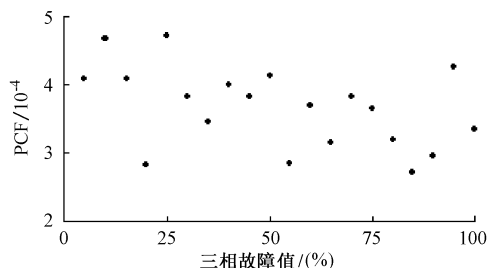


图 4 三相故障比例对 PCF 指标的影响

Fig. 4 Effect of three-phase symmetric faults on probability indices

5 结论

a. 换相失败的发生主要受即将退出导通的相的电压幅值的影响;因此,安装高速数字监测装置实

时检测阀侧交流电压的幅值可有效避免换相失败的发生。

b. 增大越前触发角 β 能有效避免换相失败及连续换相失败的发生。

参考文献

- 1 Thio C V, Davies J B, Kent K L. Commutation Failures in HVDC Transmission Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946~957
- 2 Kristmundsson G M, Carroll D P. The Effect of AC System Frequency Spectrum on Commutation Failure in HVDC Inverters. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 1121~1128
- 3 徐政, 蔡晔, 刘国平(Xu Zheng, Cai Ye, Liu Guoping). 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题(Some Problems in the Simulation of Large Scale AC-DC Power Systems). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(15): 4~8
- 4 王成山, 余旭阳(Wang Chengshan, Yu Xuyang). 基于能量函数的暂态稳定概率分析方法(Transient Stability Probability Analysis Method Based on Fitting Curve). 电力系统自动化

- (Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(6): 5~9
- 5 李生虎, 丁明, 汪兴强(Li Shenghu, Ding Ming, Wang Xingqiang). 电力系统静态电压安全问题的概率评价(Probabilistic Evaluation to Static Voltage Security of Power Systems). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(20): 26~30
 - 6 荆勇, 任震, 欧开健(Jing Yong, Ren Zhen, Ou Kaijian). 天广直流输电系统换相失败的研究(Research on Commutation Failure in Tian-Guang HVDC Transmission System). 继电器(Relay), 2003, 31(10): 32~36
 - 7 Hansen A, Havemann H. Decreasing the Commutation Failure Frequency in HVDC Transmission Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1022~1026

任震(1938—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 研究方向为直流输电、电力系统可靠性、电力市场、小波分析及其在电力系统中的应用。

陈永进(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为高压直流输电和电力系统可靠性. E-mail: hyperchen@sina.com

梁振升(1980—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电和电力系统可靠性。

PROBABILISTIC ANALYSIS OF COMMUTATION FAILURES IN HVDC TRANSMISSION SYSTEMS

Ren Zhen, Chen Yongjin, Liang Zhensheng, Huang Wenyang
(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Commutation failures are frequently occurred dynamic faults in high voltage direct current (HVDC) inverter stations. Probabilistic analysis of the commutation failures is an important reinforcement for the traditional deterministic analysis. A method of probabilistic analysis based on the commutation mechanism, including a set of formula used to calculate the maximum extinction angle under different dynamic conditions, is established. Making the best use of the effect of AC (alternating current) voltage disturbance at different time and magnitude on commutation failures and taking into account the rapid adjustment of controller, the probabilistic relation between the maximum extinction angle and the preset one is obtained and then the probabilistic indices are calculated by adopting Monte-Carlo simulation. The results of the CIGRE benchmark model show that by installing a supervisory equipment to detect the real-time voltage of valve side can avoid commutation failures effectively.

This work is supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 50337010).

Key words: high voltage direct current (HVDC) transmission; commutation failure; probabilistic analysis; Monte-Carlo simulation