天广直流输电系统换相失败的研究

荆 勇[1], 任 震[2], 欧开健[1]

(1. 中国南方电网超高压输变电公司, 广东 广州 510620; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 换相失败是逆变器最常见的故障之一, 分析了天广直流输电系统中直流电流、越前触发角、直流系统降压运行、直流系统满载率、换流变压器短路阻抗以及换流变压器变比等因素对广州换流站换相失败的影响, 所得的结果跟仿真研究中的结果相近。得到的天广直流输电系统换相失败一般规律对其运行有一定的借鉴意义。

关键词: 直流输电; 逆变器; 换相失败

中图分类号: TM 71; TM 721. 1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2003)10-0032-05

1 引言

天广直流工程直流额定容量为双极 1800 MW, 额定工作电压为±500 kV, 额定工作电流为 1800 A, 线路长度 965 km。该直流输电工程第一极于 2000 年 12 月投入运行, 第二极于 2001 年 6 月投入运行, 使我国南方电网成为第一个交直流输电混合运行的电网[1]。

换相失败是直流输电系统最常见的故障之一, 分析清楚换相失败与哪些因素有关以及各因素对换相失败的影响程度如何具有重要的理论和现实意义。本文根据天广直流工程的有关系统参数和运行参数, 对影响广州换流站换相失败的有关因素进行了分析, 得到了天广直流系统换相失败的一般规律, 本文的分析结果与在天广直流输电系统仿真模型上进行的仿真研究结果相近, 对其实际运行有一定的借鉴意义。

2 逆变器发生换相失败的最小电压降落

由文献[2]可得, 直流输电系统发生换相失败的最小换相电压降落为

$$\Delta U = 1 - \frac{U'}{U} = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \cdot \frac{\frac{I_d}{I_{dN}} X_K\%}{\cos\gamma_{min} - \cos\gamma + \frac{I_d}{I_{dN}} X_K\%} \tag{1}$$

其中 U 为换相电压的线电压有效值, U' 为使直流系统换相失败的换相电压, I_d 为直流电流, I_d' 为当关断角 γ 达到临界值 γ_{min} 时的直流电流, I_{dN} 为额定直流电流, $X_K\%$ 为换流变压器短路阻抗百分比。

越前触发角 β 与关断角 γ 的关系为[3]

$$\cos\gamma = \cos\beta + \frac{\sqrt{2} I_d X_K}{U} \tag{2}$$

式(2)中, 换流变压器短路阻抗

$$X_K = X_K\% \cdot Z_b = X_K\% \cdot \frac{U_N/\sqrt{3}}{\sqrt{2} I_{dN}/\sqrt{3}} = X_K\% \cdot \frac{U_N}{\sqrt{2} I_{dN}} \tag{3}$$

把式(3)代入式(2), 考虑到逆变器正常运行时 U_N/U 近似为 1, 可得

$$\cos\gamma = \cos\beta + \frac{I_d}{I_{dN}} X_K\% \tag{4}$$

把式(4)代入式(1)可得

$$\Delta U = 1 - \frac{U'}{U} = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \cdot \frac{\frac{I_d}{I_{dN}} X_K\%}{\cos\gamma_{min} - \cos\beta} \tag{5}$$

满载时, I_d/I_{dN} 为 1, 则

$$\Delta U = 1 - \frac{U'}{U} = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \cdot \frac{X_K\%}{\cos\gamma_{min} - \cos\beta} \tag{6}$$

由于换流变压器变比调整的时间常数较大(通常要几秒时间), 因此故障暂态时可认为换流变压器变比 k 不变。设逆变侧换流母线的线电压有效值为 E, 则由式(5)可得发生换相失败的最小换流母线电压降落为

$$\Delta E = 1 - \frac{E'}{E} = 1 - \frac{kU'}{kU} = 1 - \frac{U'}{U} = \Delta U =$$

$$1 - \frac{I_d'}{I_d} \cdot \frac{\frac{I_d}{I_{dN}} X_K\%}{\cos\gamma_{min} - \cos\beta} \tag{7}$$

式中, E' 为使直流系统换相失败的换流母线电压。满载时

$$\Delta E = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \cdot \frac{X_K\%}{\cos\gamma_{min} - \cos\beta} \tag{8}$$

电压降落是引起直流输电系统换相失败的主要原因, 所以式(7)和式(8)给出的使直流输电系统发生换相失败的最小电压降落的大小可以作为衡量直流输电系统抵抗换相失败的指标。

3　导致广州换流站换相失败的因素分析

由式(7)和式(8)可见, 使直流输电系统发生换相失败的最小换流母线电压降落 ΔE 与直流电流的上升 I_d'/I_d、直流系统的满载程度 I_d/I_{dN}、换流变压器短路阻抗百分比 $X_K\%$、临界关断角 γ_{min} 和越前触发角 β 有关。

下面考察天广直流输电系统中上述各因素对广州换流站换相失败的影响。假设该系统在额定状况下运行, 即整流侧直流电压 U_{dZ} 为 1.0 p.u. (500 kV), 直流电流 I_d 为 1.0 p.u. (1.8 kA), 逆变侧换流母线电压 E 为 1.0 p.u. (230 kV), 换流变压器变比 k 为 1.0 p.u. (230/198.5), 则可算得运行点的触发越前角 β_0 = 37.4°、运行点的关断角 γ_0 = 19.2°。

晶闸管需要一定的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 μs (约 7 电角度) 左右, 考虑到串联元件的误差, 一个可控硅阀的恢复时间 (γ_{min}) 约为 10°, 本文取 γ_{min} = 10°, 即当计算出来的关断角小于或等于 10 时就认为发生换相失败。

3.1　逆变器直流电流增大 I_d'/I_d 对换相失败的影响

对于天广直流输电系统, 当它在额定状况下运行时, 根据式(8)可得图 1。

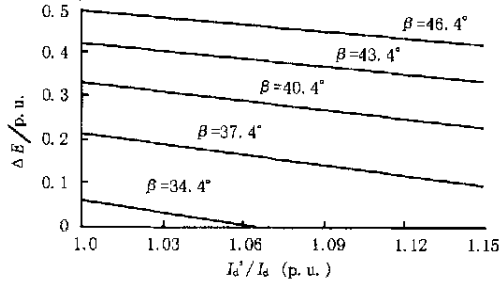

图 1　I_d'/I_d 和 ΔE 的关系曲线

Fig. 1　Curves of ΔE vs I_d'/I_d

该图为当 $X_K\%$ 和 γ_{min} 为额定值时, 在不同越前触发角 β 下 I_d'/I_d 与 ΔE 的关系曲线。由图可见, 当触发越前角 β_0 = 37.4 时, 如果故障后逆变器直流电流 I_d 保持不变 (即 I_d'/I_d 为 1.0), 则换流母线电压下降 0.212 p.u. (即 ΔE 为 0.212) 将导致逆变器发生换相失败; 随着 I_d'/I_d 的增大, 使逆变器发生换相失败所需的压降 ΔE 不断变小, 如果当关断角达到临界关断角 γ_{min} 时逆变器直流电流 I_d' 达到额定电流 I_d 的 1.15 倍, 则只要换流母线电压下降 0.094 p.u., 逆变器就会发生换相失败。由上图也可见, 增大触发越前角 β 能显著增大 ΔE, 提高系统抵抗换相失败的能力。

3.2　越前触发角 β 及直流系统降压运行对换相失败的影响

图 2 为当 $X_K\%$、γ_{min} 和 I_d'/I_d 都为额定值时 β 与 ΔE 的关系曲线。由图可见, 当越前触发角 β 增大时, 使逆变器发生换相失败所需的压降 ΔE 不断变大, 即换相失败的机会变小。因为 β 的增大将使关断角 γ 也迅速增大, 有利于避免换相失败的发生。

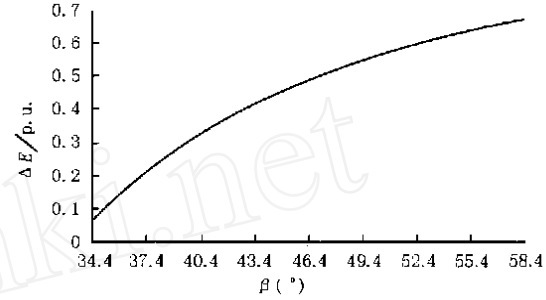

图 2　β 和 ΔE 的关系曲线

Fig. 2　Curves of ΔE vs β

当直流绝缘水平降低时, 直流系统将降压运行。天广直流输电系统有 80% 降压运行和 70% 降压运行两种降压运行方式。根据天广直流输电系统调度管理规程, 80% 降压运行和 70% 降压运行时换流变压器二次侧 (阀侧) 电压都应为 0.9 p.u., 而它们的整流侧直流电压分别为 400 kV (0.8 p.u.) 和 350 kV (0.7 p.u.), 逆变侧直流电压分别为 366 kV 和 316 kV, 故得 80% 降压运行和 70% 降压运行时的越前触发角 β 分别为 47.5 和 55.1°。由式(2)可得此时关断角 γ 分别为 32.6 和 42.4°, 远大于全压运行时的 19.2°。而由式(8)和图 2 可得, 当 β 为 47.5 和 55.1 时, ΔE 分别为 0.514 p.u. 和 0.636 p.u.。可见, 由于有较大的关断角裕度, 降压运行时发生换相失败的机会较小。

3.3　换流变压器短路电抗百分比 $X_K\%$ 对换相失败的影响

图 3 为当 β、γ_{min} 和 I_d'/I_d 都为额定值时 $X_K\%$ 与 ΔE 的关系曲线。由图可见, ΔE 随着 $X_K\%$ 的减小而增大。所以, 在直流输电系统设计时减少换流变压器漏电抗 $X_K\%$ 可以在运行中减少换相失败的发生机会。因为其他条件不变时, $X_K\%$ 越小, 换相所需的时间越短 (即换相角越小); 而当越前触发角一定时, 换相角越小, 关断角越大, 直流输电系统越不容易发生换相失败。

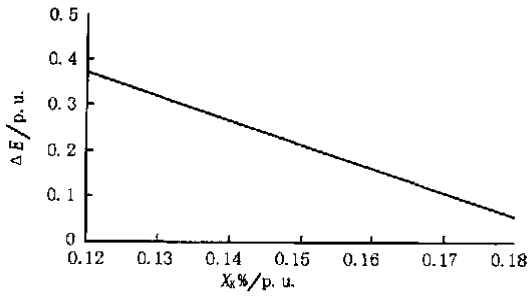

图 3 $X_K\%$ 和 ΔE 的关系曲线

Fig. 3 Curves of ΔE vs $X_K\%$

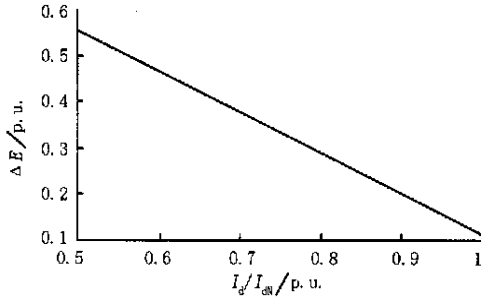

图 5 I_d/I_{dN} 和 ΔE 的关系曲线

Fig. 5 Curves of ΔE vs I_d/I_{dN}

3.4 临界关断角 γ_{min} 对换相失败的影响

高压直流输电系统中的阀元件是可控硅，可控硅元件中载流子复合和建立 P-N 结阻挡层所需的时间可以用固有临界关断角 γ_{min} 来表示，其大小与可控硅元件的参数有关，元件的额定电压和额定电流越大，γ_{min} 也越大[3]。根据天广直流输电系统的具体情况，本文取 $\gamma_{min}=10°$。

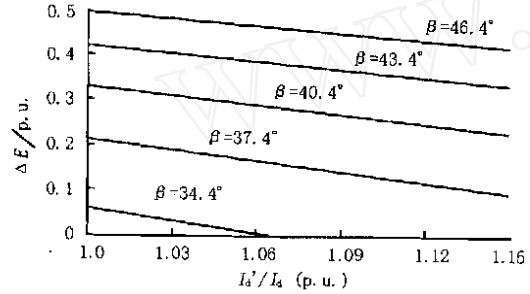

图 4 γ_{min} 和 ΔE 的关系曲线

Fig. 4 Curves of ΔE vs γ_{min}

图 4 为当 β、$X_K\%$ 和 I_d'/I_d 都为额定值时 γ_{min} 与 ΔE 的关系曲线。由图 4 可见，γ_{min} 取值增大，则逆变器发生换相失败所需的压降 ΔE 变小，所得结果要比 γ_{min} 取值较小时所得的结果保守。

3.5 满载率 I_d/I_{dN} 对换相失败的影响

对天广直流输电系统，当 β、γ_{min}、$X_K\%$ 和 I_d'/I_d 都为额定值时，根据式(7)可得 I_d/I_{dN} 与 ΔE 的关系，如图 5 所示。

由图 5 可见，ΔE 随着满载率 I_d/I_{dN} 的增大而减小。因为满载率增大，即直流电流增加，换相过程将拉长，即换相角增大，而越前触发角 β 一定，故关断角变小，逆变器发生换相失败所需的压降 ΔE 也变小。

3.6 换流变压器变比 k 对换相失败的影响

换流变压器变比调整的时间常数较大，因此故障暂态时它不能很好地防止换相失败的发生。但静态时，通过换流变压器分接头控制能使广州换流站的关断角保持在一定范围内，从而减少换相失败的发生机会。天广直流输电系统中，换流变压器分接头的调节范围是-6%～16%，档距为 1%，一共 23 档。当广州换流站的关断角 γ 小于 17.5 时，将降低分接头级数，提高换相电压；当 γ 大于 21.5 时，将增加分接头级数，降低换相电压，使 γ 保持在 17.5～21.5°；当直流电压或换流变压器二次电压大于 1.02 p.u. 时，将不再允许分接头降低，以防止换相电压太高。

图 6 给出了广州换流站在不同运行状况下换流变压器分接头位置与关断角的对应关系，其中曲线 1 为逆变器运行在初始运行点的情况；曲线 2 为 $\beta=39$ 的情况；曲线 3 和曲线 4 分别是当换流母线电压下降到 0.98 p.u. 和 0.95 p.u. 时的情况。

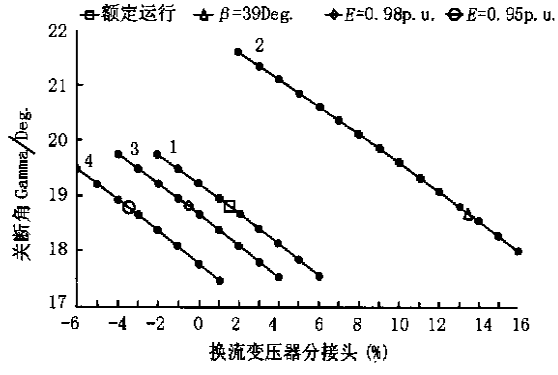

图 6 换流变压器分接头与 γ 的关系

Fig. 6 Relations between the taps of converter transfomer and γ

由图可见，通过调整换流变压器的分接头，可以使广州换流站关断角保持在 17.5～21.5°，既减少了换相失败的机会，也控制了逆变器的无功消耗。

4 天广直流系统换相失败仿真

本文利用以 SUN 工作站为硬件平台、以 PSCAD/EMTDC 为软件平台，采用与天广直流实

际控制保护相一致的基于单个 SMANDYN D 组件的详细的直流控制和保护仿真模型[4,5], 对天广直流输电系统的换相失败进行了详细的仿真分析, 所得的结果跟上述分析的结果是很相近的。

图 7 为当天广直流双极运行时, 广州换流站附近发生故障导致逆变侧换流母线电压降低到 0.6 p.u., 从而引起逆变器换相失败的仿真结果。图中 P Bipole_A、Q Bipole_A 和 VACA 分别为整流侧的有功、无功和换流母线电压, P Bipole_B、Q Bipole_B 和 VACB 分别为整流侧的有功、无功和换流母线电压, IdH_B1、UdL_B1、Gamma_B1、Iref_B1 分别为极 1 逆变侧直流电流、直流电流、关断角和直流电流参考值; IdH_B2、UdL_B2、Gamma_B2、Iref_B2 分别为极 2 逆变侧直流电流、直流电流、关断角和直流电流参考值, 横坐标均为时间(s), 纵坐标均为标幺值(p.u.)。由图 7 可见, 换相失败发生后, 广州侧双极直流电流均急剧增大, 直流电压则降到零; 天生桥侧和广州侧直流传输功率均暂时中断; 广州侧无功消耗下降很大; 而天生桥侧无功消耗则急剧上升。换相失败历时约 40 ms, 直流系统将在换相失败后约 180 ms 恢复。

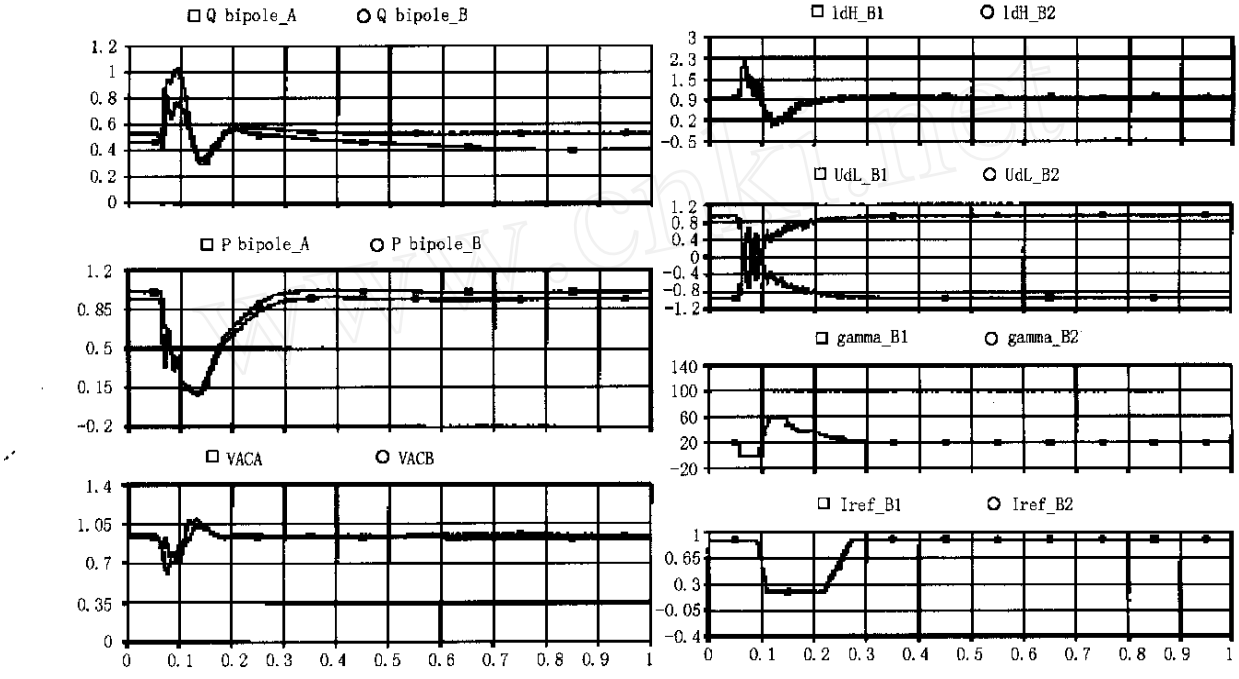

图 7　广州换流站换相失败仿真结果

Fig. 7　Simulation curves of commutation failure in Guangzhou converter station

5　天广直流系统换相失败工程实例

自天广直流输电系统投入运行以来广州换流站曾多次发生换相失败。图 8 为由于广州换流站附近 220 kV 交流线路发生单相接地故障引起的一次换相失败的录波图, 图中 U_d 为逆变侧直流电压, P_d 为逆变侧直流功率。由图可见, 换相失败发生后, 虽然直流电流上升, 但由于直流电压降低很多, 所以直流输送功率降低, 同时关断角一度降低到零, 不过通过采取增大越前触发角 β 等措施, 直流输电系统很快从换相失败中恢复过来。

6　结论

本文对天广直流输电系统中影响换相失败的有关因素进行了比较详细的分析, 得出了天广直流系统换相失败的一般规律。

在广州换流站, 直流电流的上升、直流系统满载率的增加、换流变压器短路阻抗的增大和临界关断角的增大都会导致逆变器发生换相失败的最小电压降落的减少, 容易导致换相失败; 而增大越前触发角有效地减少了换相失败的发生概率。当天广直流输电系统降压运行时, 由于有较大的关断角裕度, 逆变器发生换相失败的机会较小。通过换流变压器分接头控制能使广州换流站的关断角保持在 17.5～21.5°, 从而减少换相失败的发生机会, 不过由于换流变压器变比调整的时间常数较大, 因此故障暂态时它不能很好地防止换相失败的发生。

本文对广州换流站换相失败的分析结果与天广

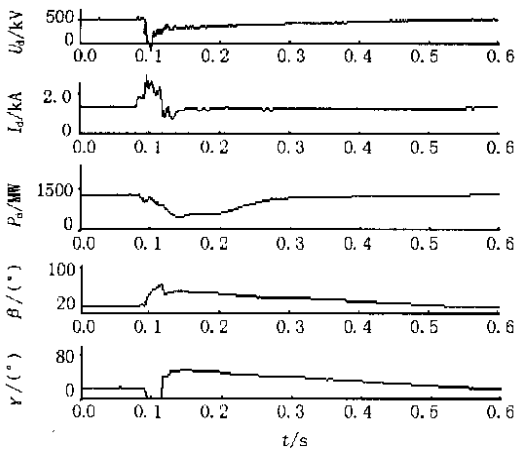

图 8 广州换流站换相失败录波图

Fig. 8 Recorded curves of commutation failure in Guangzhou converter station

直流输电系统仿真结果、实际故障录波相近。

参考文献:

[1] 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.

[2] Thio C V, Davies J B, Kent K L. Commutation Failures in HVDC Transmission Systems [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1996, 11(2): 946- 957.

[3] Padiyar K R. HVDC Power Transmission System: Technology and System Interactions[M], New York: John Wiley & Sons, 1990.

[4] Sadek K, Wild G, et al. Modelling of Digital HVDC Control Systems Using a GraphicalElectromagnetic Simulation Program[A]. Proceedings of International Conference on Power Systems Transients[C]. Lisbon: 3- 7 September, 1995. 391- 396.

[5] 任 震, 欧开健, 荆 勇, 余 军. 基于 PSCAD/EMTDC 软件的直流输电系统数字仿真[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(9): 11- 12.

收稿日期: 2003-07-28

作者简介:

荆 勇(1963-), 男, 博士, 高级工程师, 直流技术研究中心主任, 主要研究方向为高压直流输电、交直流电力系统运行控制和电力系统规划;

任 震(1938-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高压直流输电、电力系统可靠性、小波分析及其在电力系统中的应用等;

欧开健(1974-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为高压直流输电。

Research on commutation failure in Tian- Guang HVDC transmission system

JING Yong[1], REN Zhen[2], OU Kai- jian[1]

(1. EHV Power Transmission Filiale, China Southern Power Grid, Guangzhou 510620, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Commutation failure is one of the most common faults in inverter station. It would be affected by many factors, such as DC current, advance firing angle, DC dropping operation, full- load ratio, short circuit impedance and ratio of converter transformer. This paper analyzes the effects of these factors on the commutation failure in the inverter in Tian- Guang HVDC transmission system. What's more, the results are close to those of simulation study. The obtained general rule of commutation failure in the inverter in Tian- Guang HVDC transmission system is also helpful to its operation.

Key words: HVDC transmission; inverter; commutation failure

核电站事故影响范围和措施

核电站的安全指标中规定事故情况下对周围环境的影响是百万分之一的概率, 虽然这个数字已小到可以忽略不计, 但是, 核电站在正常运行过程中仍然设置了四级应急状态和三级管理体制的核事故响应与处理体系。以保证核事故情况下的应急响应和有效的处理, 最大限度地保证电站员工和周围居民的安全。

中国对核电厂事故应急工作实施国家、地方(省、直辖市、自治区)及核电厂营运单位的三级管理体制。

我国采用国际原子能机构推荐的核事故应急状态分级法, 根据核电厂事故的严重程度, 特别是对环境影响的严重程度, 将核电站的应急状态分为应急待命、厂房应急、厂区应急和总体应急四级, 以便于更有针对性地采取应急措施。