

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181504

稳定控制装置特高压交流线路无故障跳闸判据的改进

夏海峰¹, 刘一民², 董希建¹, 李雪明¹, 郑少明², 李明应¹, 刘平¹, 王菊隆¹

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国家电网公司华北分部, 北京 100053)

摘要: 以全电流为主要判断对象的传统无故障跳闸判据基于电流全量。当线路跳闸前的运行电流幅值与跳闸后的充电电流幅值相当时发生无故障跳闸, 将不能可靠地识别出线路跳闸。提出安全稳定控制装置特高压交流线路无故障跳闸判据的改进方法, 该判据以电流的有功分量作为主要判断对象, 在线路跳闸后最大程度地滤除电流的无功分量。新判据在保持传统判据逻辑不变的基础上进行适应性升级, 适用于跳闸前后全电流幅值变化不大的线路无故障跳闸的识别。理论分析及动模试验证明了判据的可靠性。

关键词: 安全稳定控制系统; 特高压交流输电线路; 无故障跳闸; 有功电流; 电流幅值

Improvement of non-fault UHV AC line trip criterion in power system stability control equipment

XIA Haifeng¹, LIU Yimin², DONG Xijian¹, LI Xueming¹, ZHENG Shaoming², LI Mingying¹, LIU Ping¹, WANG Julong¹

(1. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

Abstract: The traditional method of identifying non-fault line tripping is based on full current. When the amplitude of running current before fault and the amplitude of reactive current after fault is close to being equal, the traditional method of identifying non-fault tripping cannot reliably recognize it. In this paper, a new method of non-fault UHV AC line trip criterion in security and stability control system is proposed, which identifies the non-fault tripping based on active current. It can filter the reactive components of the line's current after the line trip. The new method is upgraded on the basis of the traditional criteria logic. When the non-fault tripping aforementioned occurs, the new method can recognize it reliably. The theoretical analysis and dynamic simulation validate the reliability of the new method.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/17-JS-199) "Standard Research on Primary Substation Equipment of Safety and Stability Control System".

Key words: security and stability control system; UHVAC; non-fault tripping; active current; amplitude of current

0 引言

线路无故障跳闸是《电力系统安全稳定导则》明确要求的在电力系统安全稳定计算分析时必须考虑的一种故障类型^[1]。当安全稳定计算分析结果表明线路无故障三相断开不重合后系统存在安全稳定问题时, 需要通过安全稳定控制系统(装置)判别无故障跳闸、采取安全稳定控制措施, 以保证事故后系统的稳定运行^[2]。

目前, 在安全稳定控制系统(装置)中得到广泛

应用的传统无故障跳闸判据主要基于本地电气量, 以电流和有功功率作为判别量。该判据能够识别线路的本侧、对侧无故障跳闸和直流闭锁故障, 一般情况下, 能够准确区分短路故障、失步振荡、低频振荡、潮流转移和真正的无故障跳闸^[3-4]; 在一些极端的、可能引起判据误判的情况下, 或者直流闭锁故障, 辅以无故障发生特征明显的辅助判据, 也能够保证判据的可靠性^[5]。

传统无故障跳闸判据以全电流为判断量, 判定线路无故障跳闸的一个基本特征是: 两相(含)以上的电流有明显的跌落过程^[6]。在特定情况下, 若线路对侧开断、本侧监测到的充电电流幅值与跳闸前的运行电流幅值相当, 就有不能准确识别线路无故障

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(SGTYHT/17-JS-199)
“安全稳定控制系统主站装置标准化研究”

障跳闸乃至拒动的风险^[7]。

特高压交直流混合电网是中国电网的发展趋势^[8-9]，特高压交流输电作为大容量、远距离输电的重要桥梁，其稳定可靠运行至关重要^[10-13]。特高压交流输电线路充电功率大^[14-15]，在相同长度下约为 500 kV 线路的 4~6 倍，为防止充电功率过高引起工频过电压危及设备绝缘^[16-17]，我国主要使用大容量的高压电抗器进行限制^[18-19]。高抗补偿度有上限，过高会产生非全相运行谐振过电压，某特高压交流输电工程中的某输电线路的高抗补偿度约为 75%，在线路对侧开断后，本侧监测到的充电电流幅值与线路无故障跳闸时对稳定有影响的最小电流幅值相当，存在拒动风险，亟需对传统无故障跳闸判据进行改进以适应新情况^[20-23]。

在上述情况下，针对传统无故障跳闸判据的升级有两个方案：方案一是接入线路两侧的开关量，通过开关变位和开断识别线路跳闸；方案二是基于已采集的电气量进行明显电气特征提取，以准确识别上述情况。方案一需要接入线路两侧 4 个开关的位置信号(3/2 接线方式、分相操作机构，每回线 12 个开入)。按照技术规范，稳控装置所用的断路器辅助接点应是其本体的机械接点或者考虑防干扰措施后经继电器转接扩展^[24]，这势必造成稳控装置的二次回路复杂，增加施工工作量的同时也不易保证开入信号的可靠性；另外，接入线路两侧开关量，还需将对侧开关信息传入本侧，造成稳控系统通道信息组织复杂化，与“宜采用满足要求、原理简单、独立性强的设计方案”原则相违背。因此，倾向于采取方案二，即从采集的电流、电压量中进行有效信息挖掘，提取出该情况下的明显的电气特征，进行无故障跳闸的判断和识别。

1 典型特高压交流系统概况

1.1 系统简介

该特高压交流输电工程包括新建 A、B、C 三个 1 000 kV 特高压变电站。线路长度、高抗配置及高抗容量等如图 1 中标识所示。

变电站 A-变电站 B 双回 1 000 kV 线路为单回路架设，变电站 B-变电站 C 双回和变电站 C-变电站 D 双回均为同塔架设。LINE_AB 线路两侧均配置高抗，LINE_BC 和 LINE_CD 线路单侧配置高抗，为降低工频电压和限制操作过电压，线路运行时不得退出高抗^[25]。

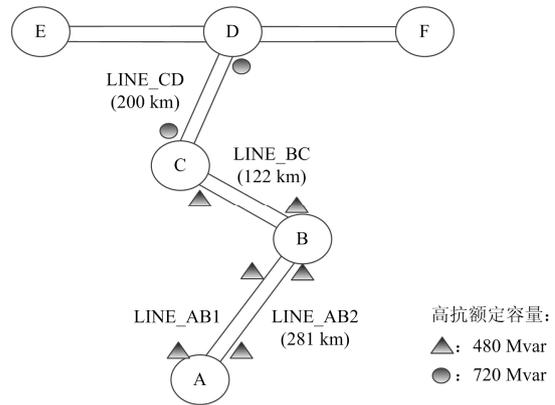


图 1 某特高压交流输电工程系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of UHV AC transmission and transformation project

1.2 断面稳定极限控制情况

根据稳定分析计算结果，当 A 站至 B 站输电断面的功率输送达到 900 MW 及以上时，若发生断面开断即 LINE_AB1、LINE_AB2 同时无故障跳闸，需要采取安全稳定控制措施切除 A 端电网一定数量的火电机组，才能保证系统稳定。

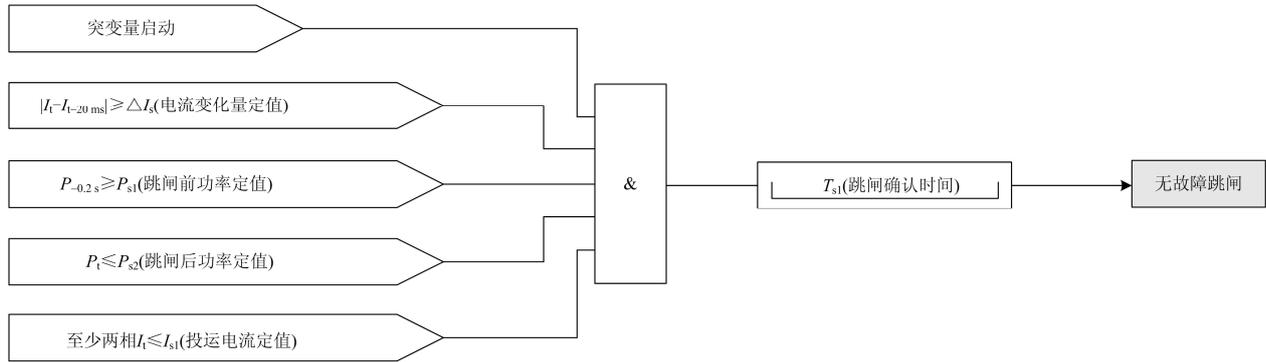
2 传统无故障跳闸判据遇到的新情况

2.1 传统无故障跳闸判据

目前，在安全稳定控制装置中使用的典型无故障跳闸判据主要有传统无故障跳闸判据^[6]、改进型无故障跳闸判据^[26-27]和阻抗判据^[28]三种。这些判据都基于本地电气量变化特征来识别无故障跳闸，其中，电流都是用全量判断。以传统无故障跳闸判据为例，判据描述为：1) 扰动前有有功功率大于定值 P_{s1} ；2) 扰动后有有功功率小于定值 P_{s2} ；3) 扰动后至少有两相电流小于定值 I_{s1} ；4) 扰动过程中电流有效值在一个基波周期前后之差大于定值 ΔI_s ；5) 满足扰动过程、同时避免将系统中发生的其他扰动引起的潮流转移误判为无故障跳闸，再增加一个跳闸延时确认定值。判据逻辑如图 2 所示。

2.2 传统无故障跳闸判据特殊情况下的不适应性

如前所述，断面输送功率 900 MW，对应 LINE_AB1、LINE_AB2 每回线输送功率 450 MW。而 LINE_AB 单线充电功率高达 1 276 Mvar(每百公里约 454 Mvar)，扣除高抗容量 960 Mvar，仍高达 316 Mvar。这意味着，双线运行、单线发生无故障跳闸，装置监测到的事故前、后的电流幅值变化量很小。



注: I_t 为当前电流有效值; I_{t-20ms} 为一个周波前电流有效值; $P_{-0.2s}$ 为启动前 200 ms 有功功率; P_t 为当前有功功率。

图 2 传统无故障跳闸判据逻辑框图

Fig. 2 Logic diagram of traditional non-fault tripping

图 3 所示为 LINE_AB2 运行在 450 MW 时跳闸的 A 相电流的瞬时值、有效值及有效值变化量的变化情况, 跳闸过程中全电流有效值变化量的最大值仅约 12 A (CT 变比 3 000:1, 电流变化量对应一次值为 3000×0.004 , 约等于 12 A), 由于判断无故障跳闸的电流变化量门槛定值 ΔI_s 含义为: 当接入元件的电流有效值一个周波 (20 ms) 内发生突变超过定值时, 认为电流突降条件满足。该定值整定原则是按躲开由于系统正常波动引起的电流变化进行整定, 考虑装置采样误差的裕度, 同时应大于或等于 0.03~0.05 倍 CT 的一次侧额定电流, 避免由于测量误差造成装置频繁启动。本情况下 ΔI_s 最小应该整定为 $3000 \text{ A} \times 0.03 = 90 \text{ A}$, 因为跳闸过程中全电流有效值变化量约 12 A, 小于 ΔI_s (90 A) 定值, 故传统无故障跳闸判据将不能可靠地识别出本工程下的跳闸。

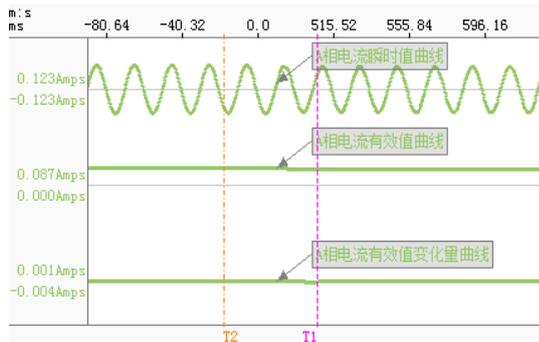


图 3 单线运行在 450 MW 跳闸时 A 相电流变化过程

Fig. 3 A phase current's changing process when non-fault tripping happens at 450 MW

3 判据的适应性升级

根据上述情况, 对于事故前运行电流幅值与跳闸后无功充电电流幅值相当的无故障跳闸, 基于全电流量的传统无故障跳闸判据无能为力, 如确要识

别, 就必须对判据进行升级、改进。

既然对侧跳闸后在本地监测到的基本全是无功电流, 用有功电流, 即电流的有功分量作为判断量是否可行呢?

3.1 有功电流的计算方法

典型稳控装置均采用 24 点采样, 即一个周波采样 24 点, 后文式(1)~式(7)中的 $n=24$ 。以 A 相电流为例, 采用 FFT 方法计算 A 相全电流的有效值如下:

$$I_{R1} = \frac{1}{24} \sum_{k=1}^n i_k \cos \left(k \cdot \frac{\pi}{24} \right) \quad (1)$$

$$I_{X1} = \frac{1}{24} \sum_{k=1}^n i_k \sin \left(k \cdot \frac{\pi}{24} \right) \quad (2)$$

$$I_a(1) = \sqrt{(I_{R1}^2 + I_{X1}^2)} \quad (3)$$

A 相有功电流的计算方法是:

$$I_{a_act} = I_a \times \frac{P}{S} = I_a \times \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4)$$

式中: I_{a_act} 为电流的有功分量, 简称有功电流; I_a 为全电流有效值, 计算方法如式(1)~式(3)所示, 其中, i_a 为 A 相电流采样瞬时值; P 、 Q 、 S 分别为有功功率、无功功率、视在功率, 计算方法如式(5)~式(7)所示。

$$P = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c)_k \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (u_a i_b - u_b i_a + u_b i_c - u_c i_b + u_c i_a - u_a i_c)_k \quad (6)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (7)$$

式中: u_a 、 u_b 、 u_c 分别为三相电压采样瞬时值; i_a 、 i_b 、 i_c 分别为三相电流采样瞬时值; $u_{a(k-6)}$ 、 $u_{b(k-6)}$ 、 $u_{c(k-6)}$ 分别为三相电压移相 90° , 即 1/4 周波前的采样瞬时值。

3.2 基于有功电流判据的有效性

根据以上有功电流计算方法, LINE_AB2 运行在 $P=450\text{ MW}$ 时, 理论分析:

$$P = 3U_{aN} I_{a_act} \cos \varphi \quad (8)$$

对于特高压交流线路, 取 A 相相电压 $U_{aN} = 1000\text{ kV} / \sqrt{3}$, 功率因数 $\cos \varphi = 1$, 由式(8)可得出跳闸前 A 相对应有功电流最小值应该为 259.8 A 。跳闸后该线路有功功率变为 0, 有功电流有效值也为 0, 变化量 ΔI 约为 259.8 A 。

图 4 所示 LINE_AB2 运行在 450 MW 时跳闸的 A 相有功电流的瞬时值、有效值及有效值变化量的变化情况波形, 跳闸过程中有功电流有效值变化量的二次最大值为 0.086 A , 对应一次电流值为 $3000 \times$

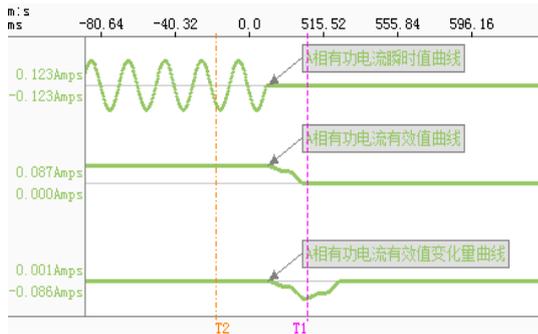


图 4 单线运行在 450 MW 跳闸时 A 相有功电流的变化过程

Fig. 4 A phase active current's changing process when non-fault tripping happens at 450 MW

0.086 , 即为 258 A (该值远大于图 3 全电流有效值变化量, 也大于判断无故障跳闸的电流变化量门槛定值 ΔI_s , 约为 90 A 或者 150 A), 可见, 用有功电流作为判断量是有效的。

图 4 初步证明了以有功电流作为主要判别量的无故障跳闸判据对于识别跳闸前后全电流幅值变化不大的无故障跳闸的有效性。但在该判据中, 有功电流的计算方法、判据逻辑和防误也很关键。

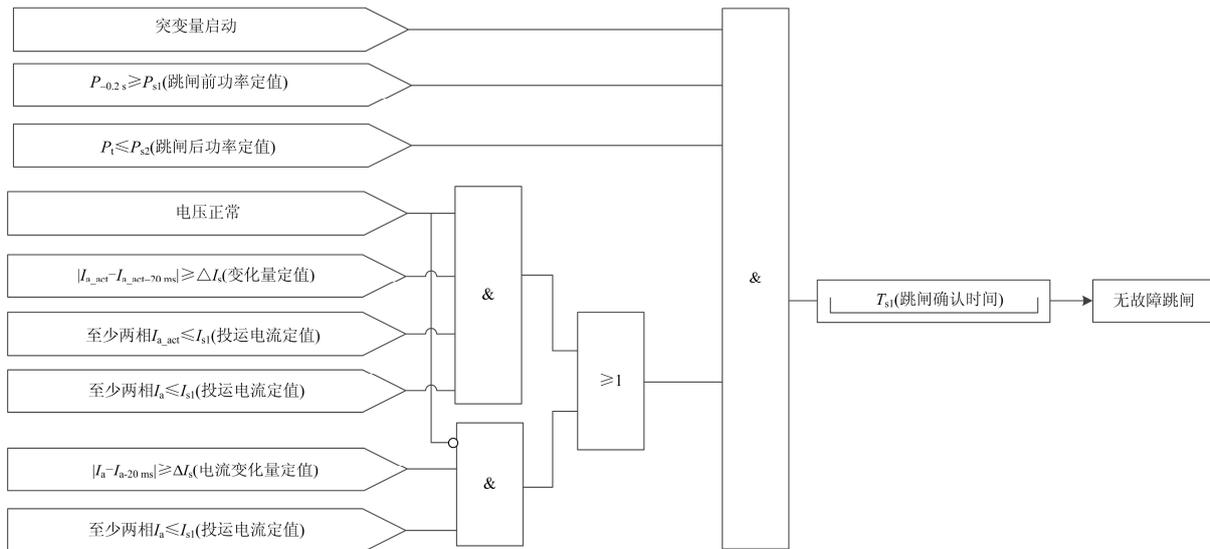
4 基于有功电流的无故障跳闸判据的可靠性论证

由于发生线路双侧开断、装置电压空开跳闸、PT 三相断线或短路故障时, 线路电压极小或功率计算不准确, 会导致式(4)的有功电流计算不准确, 从而直接影响判据的逻辑判断。因此, 必须要有足够的防误以保证判据的可靠性。

4.1 判据逻辑

基于有功电流的无故障跳闸判据可描述为:

- 1) 扰动前有功功率大于定值 P_{s1} ;
- 2) 扰动后有功功率小于定值 P_{s2} ;
- 3) 电压正常(不正常)时, 扰动后至少有两相有功电流(全电流)小于定值 I_{s1} ;
- 4) 电压正常(不正常)时, 扰动过程中有功电流(全电流)有效值在一个基波周期前后之差大于定值 ΔI_s ;
- 5) 满足扰动过程、同时避免将系统中发生的其他扰动引起的潮流转移误判为无故障跳闸, 再增加一个跳闸延时确认定值。判据逻辑如图 5 所示。



注: I_a 为当前全电流有效值; I_{a-20ms} 为一个周波前全电流有效值; I_{a_act} 为当前有功电流有效值; $I_{a_act-20ms}$ 为一个周波前有功电流有效值; $P_{-0.2s}$ 为启动前 200 ms 有功功率; P_t 为当前有功功率; 电压正常: 指该元件三相电压未判出低电压或零序电压等瞬时异常。

图 5 基于有功分量的无故障跳闸判据逻辑框图

Fig. 5 Logic diagram of no-fault trip based on active currents

可见, 判据逻辑与传统无故障跳闸判据基本相同, 只是作为主要判断量的电流根据电压是否正常在有功分量电流和全电流间切换。

4.2 判据的可靠性论证

一般情况下, 判据的可靠性有不能拒动和误动两个方面的内容。也就是说, 如果发生无故障跳闸, 应该能够可靠判出, 不发生拒动; 而任何其他不应该动作的情况尤其是三相对称短路发生时都不应该动作, 不发生误动。

4.2.1 判据防拒动

依据上述思路对典型无故障跳闸判据进行改

表 1 特高压交流线路实测参数

Table 1 Actual parameters of UHV AC line

线路	长度	阻抗	模型参数(实际值)
晋东南至南阳段	360 km	正序阻抗 96.175 Ω	$Z_1=0.98+j38.45=38.47\angle 88.53^\circ$
		零序阻抗 300.5 Ω	$Z_0=21.49+j118.27=120.2\angle 79.7^\circ$

由于常见的单相瞬时故障、单相永久故障或相间故障判据已经成熟可靠^[30-31], 本文不再详述, 本试验将研究重点放在新判据在 1 000 kV 线路本侧、对侧发生无故障跳闸试验上。即研究全电流中有空充电流时, 新判据的判别结果。

线路发生无故障跳闸, 有本侧跳、对侧跳、双侧跳 3 种情况, 表 2 描述了 3 种情况下的电压、电流特征, 并给出判据的动作情况。

表 2 无故障跳闸时的电压和电流特征

Table 2 Characteristics of voltage and current when non-fault tripping occurs

跳闸点	电压	全电流	有功电流	判断结果
本侧	正常	0	0	正确
对侧	正常	空充电流	0	正确
双侧	不正常(0)	0	0	正确

图 6、图 7 反映了稳控装置针对 1 000 kV 特高压交流线路发生本侧、对侧无故障跳闸的动作行为及故障录波数据情况。

实际上, 传统无故障跳闸判据对线路无故障跳闸的电气量特征把握是准确的, 其性能在一般情况下都有良好的表现, 只是在前文所述工况下发生对侧无故障跳闸时会拒动, 而基于有功电流的无故障跳闸判据很好地弥补了这一不足。

4.2.2 判据防误

近端两相及以上金属性短路, 导致电压不正常, 电流判断量切换为全电流, 即传统的无故障跳闸判据, 故障发生期间不会误动; 远端短路或近端高阻接地故障, 若电压正常, 电流判断量切换为有功电流, 故障期间, 电流幅值变大, 不表现为电流幅值

进, 并在 SCS-500 型稳定控制装置中实现。为了全面掌握改进后的判据对特高压交流线路发生无故障跳闸时的判断及动作性能, 特在电力系统动态模拟实验室进行了动模试验。在实验中模拟在 1 000 kV 长线路上发生各种形态的无故障跳闸, 同时对故障录波数据、装置的动作行为结果进行了记录。

为使试验结果具有针对性, 本文搭建了 1 000 kV 晋东南至南阳段系统模型, 其中线路参数正序阻抗、零序阻抗和并联电抗器均根据实测参数如表 1 来模拟特高压线路^[29]。

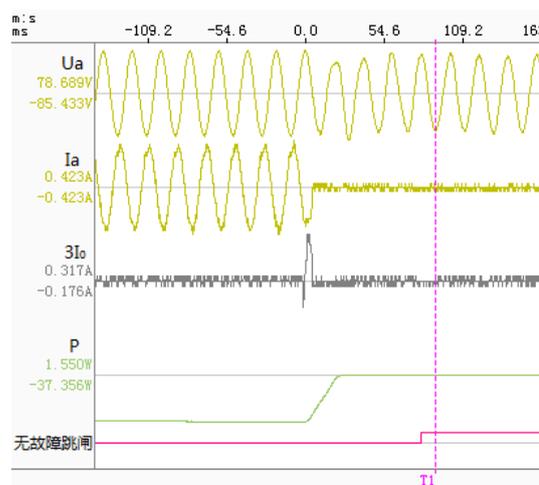


图 6 特高压交流线路本侧无故障跳闸录波图

Fig. 6 Waveform chart of non-fault UHV AC line trip (this side)

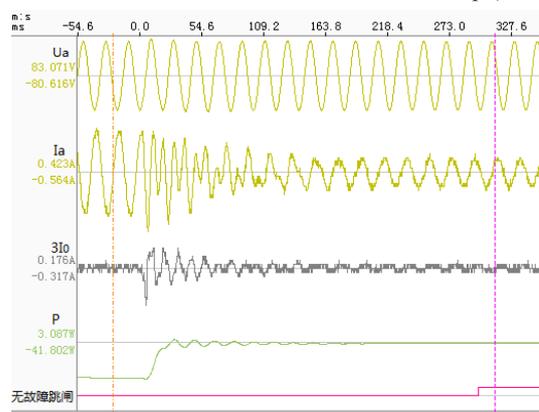


图 7 特高压交流线路对侧无故障跳闸录波图

Fig. 7 Waveform chart of non-fault UHV AC line trip (opposite side)

下降特征,也不满足事故后有功电流和全电流均小于投运电流定值 I_{s1} 的条件。短路故障切除之后,若满足无故障跳闸条件,则准确动作。

若正常运行期间,装置屏后电压空气开关跳闸或发生 PT 断线,电压出现瞬时异常,电流判断量切换为全电流,即传统的无故障跳闸判据,不会误动。

5 结语

在主网中,线路跳闸前的输送功率与跳闸后的充电功率相当时发生无故障跳闸、需要采取安全稳定控制措施的情况不多见。在此次特高压交流输变电工程安全稳定控制系统策略设计时,第一次遇到当与特高压交流线路形成环网的两回 500 kV 线路单线检修时,特高压线路跳闸(事前输送功率与事后无功功率相当)引起 500 kV 线路越稳定极限或 500 kV 电网内机组对于主网功角失稳的情况。在业界专家呼吁安全稳定控制装置二次回路简单化、少(不)依赖继电保护装置或相关设备的背景下,设计、开发了基于有功电流的无故障跳闸判据。并将该判据应用到该特高压交流输变电工程的安全稳定控制装置中,经厂内静态测试和动态模拟试验验证后,于 2015 年在现场投运,三年来运行效果良好。为类似工况下安全稳定控制系统(装置)无故障跳闸判据的选用提供了一种有益参考。

参考文献

- [1] 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Guide on security and stability for power system: DL 755—2001[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] 电力系统安全稳定控制技术导则: GB/T 26399—2011[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2011.
Technical guide for electric power system security and stability control: GB/T 26399—2011[S]. Beijing: China National Standardization Management Committee, 2011.
- [3] 赵丽莉, 李雪明, 倪明, 等. 继电保护与安全稳定控制系统隐性故障研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 128-135.
ZHAO Lili, LI Xueming, NI Ming, et al. Review and prospect of research on hidden failures of protection system and security and stability control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 128-135.
- [4] 罗剑波, 董希建, 崔晓丹, 等. 关于大型安全稳定控制系统可靠性研究的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 65-72.
LUO Jianbo, DONG Xijian, CUI Xiaodan, et al. Discussion on reliability of large scale security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 65-72.
- [5] 李德胜, 罗剑波. 特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 151-157.
LI Desheng, LUO Jianbo. Typical design of security and stability control system for UHVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 151-157.
- [6] 蔡敏, 孙光辉, 吴小辰, 等. 稳定控制所用交流设备跳闸判据的分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 46-51.
CAI Min, SUN Guanghui, WU Xiaochen, et al. Analysis and application of AC fault criterion in power system stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 46-51.
- [7] 董希建, 李雪明, 秦天, 等. 稳控装置无故障跳闸判据存在的问题及解决方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 113-118.
DONG Xijian, LI Xueming, QIN Tian, et al. Problems and solutions of no-fault trip criterion in security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 113-118.
- [8] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [9] 舒印彪. 1000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 1-5.
SHU Yinbiao. Research and practice of 1000 kV AC transmission system[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 1-5.
- [10] 张文亮, 周孝信, 印永华, 等. 华北-华中-华东特高压同步电网构建和安全性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 1-5.
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, YIN Yonghua, et al. Composition and security analysis of "North China-Central China-East China" UHV synchronous power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 1-5.

- [11] 张刘春. ± 1100 kV 特高压直流输电线路防雷保护[J]. 电工技术学报, 2018, 33(19): 4611-4617.
ZHANG Liuchun. Lightning protection of ± 1100 kV UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(19): 4611-4617.
- [12] 张帆, 段雄英, 吕洋, 等. 选相投切特高压线路及其操作冲击绝缘的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1151-1157.
ZHANG Fan, DUAN Xiongying, LÜ Yang, et al. Controlled switching UHV line and its effect on line switching impulse insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1151-1157.
- [13] 贺静波, 伦涛, 陈刚, 等. 特高压交流联络线潮流和电压波动特性分析[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 56-60.
HE Jingbo, LUN Tao, CHEN Gang, et al. Analysis on power flow and voltage fluctuation of tie line in UHVAC power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 56-60.
- [14] 杨昊, 王丹, 刘涤尘. 特高压交流输电模型的建立与经济性优选分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 91-96.
YANG Hao, WANG Dan, LIU Dichen. Establishment of UHV AC transmission model and economical optimization strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 91-96.
- [15] SHIRASAKA Y, KOBAYASHI T, LI G, et al. Reliability of UHV transformers on behalf of CIGRE SC A2-AG A2.5 (UHV AC & DC transformers)[J]. Power Engineer Journal, 2014, 16(2): 4-17.
- [16] 王玲, 文俊, 司瑞华, 等. UHVDC 分极分层接入方式及其运行特性[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 730-738.
WANG Ling, WEN Jun, SI Ruihua, et al. The connection mode and operation characteristics of UHVDC with hierarchical connection by pole[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 730-738.
- [17] 翟海保, 李兆伟, 黄慧, 等. 特高压直流分层接入电网的落点选择研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 65-71.
ZHAI Haibao, LI Zhaowei, HUANG Hui, et al. Terminal location selection study for UHVDC hierarchical connection to power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 65-71.
- [18] 易强, 周浩, 计荣荣, 等. 交流特高压线路高抗补偿上限[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 6-18.
YI Qiang, ZHOU Hao, JI Rongrong, et al. Upper limit of compensation degree of high voltage shunt reactor for UHVAC transmission lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 6-18.
- [19] 易强, 周浩, 计荣荣, 等. 交流特高压线路高抗补偿度下限的研究[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 18-25.
YI Qiang, ZHOU Hao, JI Rongrong, et al. Research on lower limit of compensation degree for UHVAC transmission lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 18-25.
- [20] 王锐, 李瑞生, 李文霞, 等. 特高压交流 1000 kV 示范工程故障电流谐波分析[J]. 继电器, 2007, 35(23): 1-4, 8.
WANG Rui, LI Ruisheng, LI Wenxia, et al. Fault current harmonic analysis of 1000 kV UHV AC power transmission demonstration project[J]. Relay, 2007, 35(23): 1-4, 8.
- [21] 官澜, 刘菲, 文卫兵, 等. 特高压交流变电站无功补偿装置直接接入 500 kV 母线方案研究[J]. 中国电力, 2019, 52(8): 98-104.
GUAN Lan, LIU Fei, WEN Weibing, et al. Research on reactive power compensation device in UHV AC substation connected directly to 500 kV bus bar[J]. Electric Power, 2019, 52(8): 98-104.
- [22] 刘丽娜, 陶加祥, 张业茂, 等. 特高压交流示范工程输电线路电磁环境实测分析[J]. 中国电力, 2017, 50(10): 46-51.
LIU Lina, TAO Jiexiang, ZHANG Yemao, et al. Onsite measurement and analysis of transmission line electromagnetic environment for UHV AC demonstration project[J]. Electric Power, 2017, 50(10): 46-51.
- [23] 戴志辉, 严思齐, 张程, 等. 基于电流特征量相关系数的 UHVDC 线路纵联保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 31-38.
DAI Zhihui, YAN Siqi, ZHANG Cheng, et al. A new pilot protection for UHVDC lines based on correlation coefficient of designed current variables[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 31-38.
- [24] 电网安全稳定自动装置技术规范: Q/GDW 421—2010[S]. 2010.
Technical specification for security & stability control equipment: Q/GDW 421—2010[S]. 2010.
- [25] 任大伟, 易俊, 韩彬, 等. 浙北-福州特高压交流输电工程系统调试中电网运行方式的调整[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 54-59.
REN Dawei, YI Jun, HAN Bin, et al. Adjustment of

- power grid operation modes during commissioning of UHVAC transmission project from North Zhejiang to Fuzhou[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 54-59.
- [26] 王伟, 陈军, 余锐, 等. 区域型安全稳定控制装置无故障跳闸判据运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 120-124, 130.
WANG Wei, CHEN Jun, YU Rui, et al. Analysis of non-fault tripping criterion operation for area-based stability control device[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 120-124, 130.
- [27] 张勇, 李建设, 黄河, 等. 安全稳定控制装置线路跳闸判据的改进[J]. 南方电网技术, 2009, 3(3): 74-76.
ZHANG Yong, LI Jianshe, HUANG He, et al. Improvement of line trip criterion of power system security and stability control equipment[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(3): 74-76.
- [28] 方勇杰, 徐海波. 基于本地电气量的无故障跳闸新判据[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 33-35, 65.
FANG Yongjie, XU Haibo. A new method of identifying non-fault line tripping based on local electrical measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 33-35, 65.
- [29] 杨德先, 陈德树, 陈卫, 等. 特高压交流输电系统的动态物理模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 36-40.
YANG Dexian, CHEN Deshu, CHEN Wei, et al. Dynamic physical model of 1 000 kV UHV AC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 36-40.
- [30] 董希建, 李德胜, 李惠军, 等. 电网安全稳定控制装置线路故障跳闸判据的改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 73-78.
DONG Xijian, LI Desheng, LI Huijun, et al. Improvement of line fault trip criterion of power system security and stability control equipment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 73-78.
- [31] 徐海波, 李雪明, 颜云松, 等. 稳定控制装置故障跳闸判据在特高压交流电网中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 148-153.
XU Haibo, LI Xueming, YAN Yunsong, et al. Application of stability control device fault tripping criterion in UHV AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 148-153.

收稿日期: 2018-12-03; 修回日期: 2019-03-18

作者简介:

夏海峰(1986—), 男, 通信作者, 工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: xiahai Feng@sgepri.sgcc.com.cn

刘一民(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制。

董希建(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制。

(编辑 葛艳娜)