

直流输电工程模块化最后断路器保护策略分析

王杨正, 陈乐, 俞翔

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:文中综述了目前直流工程最后断路器保护研究及应用现状,针对目前各种最后断路器保护策略在实际工程应用中存在的缺点,提出了一种模块化的最后断路器保护策略。模块化指按阀组配置最后断路器保护功能模块,功能模块由输入信号、输出信号、逻辑判据组成。保护策略为:在最后断路器保护使能的情况下,与运行阀组存在电气连接的交流母线上无交流出线相连且满足功能辅助判据则最后断路器保护动作,立即闭锁该运行阀组。理论分析和工程实际案例表明,该保护策略适用于不同的直流运行方式和交流场接线方式,模块化配置灵活便于校验和重用,无需新增硬件设备节省投资,无额外延时动作迅速,模拟量辅助判据避免保护误动,更好地保障了设备和电网安全。

关键词:高压直流输电;最后断路器;模块化;滇西北特高压直流工程

中图分类号: TM723

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)02-0086-07

0 引言

高压直流输电工程中,在直流带负荷运行工况下,若逆变侧交流场某台断路器因偷跳、故障等原因分开或线路对侧断路器因故分开,导致运行阀组与交流场所有出线都失去电气联系,由于换流母线上的交流滤波器无法立即切除,会引起站内交流系统过压,严重影响设备安全^[1-6],该台断路器被称为最后断路器。为避免最后断路器分开引起的交流过压问题,在逆变站一般都会配置最后断路器保护,尽快闭锁该运行阀组,保证设备安全^[7-9]。

目前直流输电工程中,直流断路器保护一般基于如下3种设计原理。(1)通过收集交流场间隔开关刀闸状态、保护动作等信号,将出现最后断路器的工况人工列举或自动枚举出来,以此作为最后断路器保护的判据,这是目前实际工程应用较多的方法。人工枚举^[10-13]一般适用于交流串数较少的换流站,并且该类方法仅考虑交流出线所在串,未考虑跨串的联系,灵活性及可靠性不高,在应用该设计原理的直流工程运行过程中,曾出现过多起因最后断路器保护误动导致的直流系统闭锁事故^[14-17]。自动枚举比人工枚举更智能,文献^[18-19]提出的基于图论的自适应判断策略等,存在软件设计复杂且难以开展完整工况校验的缺点,在交流场扩建或改造直流工程中需要重新更新自动枚举逻辑。(2)通过电压电流积分计算换流变出线避雷器能量,并与参考定值相比较,作为最后断路器保护的判据,在国内早期ABB、SIEMENS承建的直流工程中有部

分应用。在避雷器接地端加装电流互感器(CT),需要避雷器的准确的伏安曲线,且不同位置的避雷器能量积分特性不同,存在依赖一次设备、依赖直流运行方式、参数不易整定、延时过长等问题^[20-24]。

(3)在前两种原理的基础上,采用证据理论等方法综合决策,基于不同的权重将(1)、(2)原理进行合成,通过信息的融合和表决来实现最后断路器保护的决策方案^[5],在目前实际工程中尚未得到应用。这种综合设计方法引入了前两种原理的缺点,同时不同的定值整定及权重选择会产生不同的结论。由于设计原理的限制,(2)、(3)均无法提供“最后一个断路器”等报警提示及相关联锁。

文中提出了一种新设计的最后断路器保护策略,可以有效克服已有最后断路器保护存在的缺陷,更好地保障了设备和电网安全。

1 模块化最后断路器保护

1.1 保护概述

文中提出了一种新的设计思路,即将最后断路器保护中的运行阀组和出线的关系通过交流母线这一中介联系起来。具体逻辑判据为:在最后断路器保护使能的情况下,与运行阀组存在电气连接的交流母线上无交流出线相连且满足功能辅助判据则最后断路器保护动作,立即闭锁该运行阀组。

该最后断路器保护策略采用模块化配置,每个阀组都配置最后断路器保护功能模块,功能模块由输入信号、输出信号、逻辑判据组成,该功能模块(如图1所示)适用于不同的交流场接线方式,并且可重用于不同的直流工程。

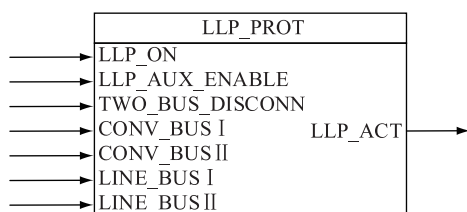


图1 最后断路器保护模块

Fig.1 Last line protection model diagram

文中首先以较为常见的双母接线为例,介绍模块化最后断路器保护的实现策略,然后再推广至单母线和多母线应用场合。

1.2 信号说明

1.2.1 输入信号

(1) 功能投退使能信号(LLP_ON, 缩写为 O)。当本阀组处于运行状态且最后断路器保护功能投入时,则 O 为 1。

(2) 功能辅助判据信号(LLP_AUX_ENABLE, 缩写为 E)。当本阀组模拟量数据满足预设的模拟量判据时,则 E 为 1。

辅助判据不作为主判据,用于防误。对于逆变侧,常见的功能辅助判据为阀组交流侧电压过压,辅助判据中的过压定值比过压保护定值小,一般选择为有效值达到 1.07 p.u.。对于整流侧,最后断路器保护目的不再是防止过压,而是失去交流源后尽快闭锁阀组并送往稳控系统以避免更大范围的停电事故,辅助判据可采用交流低电压或直流低电流判据。

(3) 双交流母线之间无联络判据信号(TWO_BUS_DISCONN, 缩写为 D)。当交流场中每一串都至少有一个开关或隔刀处于分开状态时,则 D 为 1。文中闭合状态指三相均为合位,分开状态指三相至少有一相为分位。

(4) 本运行阀组连接于交流母线 I/交流母线 II 判据信号(CONV_BUS I/ CONV_BUS II, 缩写为 C_1/C_2)。当本阀组运行且连接于交流母线 BUS I 侧的所有开关及隔刀处于闭合状态时,则本运行阀组连接于交流母线 I (C_1) 为 1。本运行阀组连接于交流母线 II 判据信号(C_2) 同理。

(5) 有出线连接于交流母线 I/交流母线 II 判据信号(LINE_BUS I/ LINE_BUS II, 缩写为 L_1/L_2)。当交流场中任意一条交流出线连接于交流母线 BUS I 侧的所有开关及隔刀处于闭合状态时,则有出线连接于交流母线 I 判据信号(L_1) 为 1。有出线连接于交流母线 II 判据信号(L_2) 同理。

需要说明的是,上述交流场所有串的开关及隔

刀分合状态,由交流场所有串的开关及隔刀位置信号、开关保护动作信号、开关预分信号等表征开关及隔刀状态组合而成。对于线路串还考虑线路对侧开关状态或开关保护信号,采用稳控等接口设备将相应信号传送至本站,然后再参与最后断路逻辑。

1.2.2 输出信号

最后断路器保护动作信号(LLP_ACT, 缩写为 A)。当输出信号 A 为 1,则表明最后断路器保护动作。

1.3 保护动作判据

模块化最后断路器的保护判据如图 2 所示。

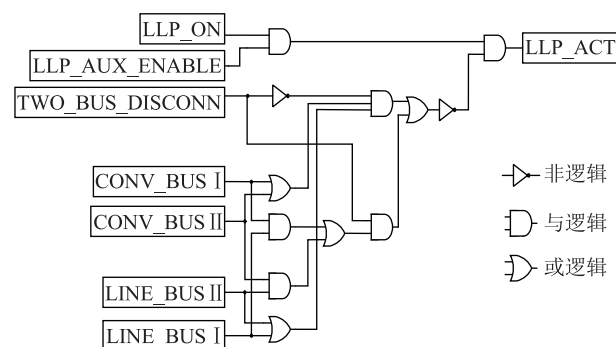


图2 最后断路器保护判据

Fig.2 Last line protection criterion

由图 2 可知,当最后断路器保护功能投退使能时,满足功能辅助判据,与本运行阀组存在电气连接的交流母线上无交流出线相连,则最后断路器保护动作。判据公式如下:

$$A = O \wedge E \wedge \neg \{ [D \wedge ((C_1 \wedge L_1) \vee (C_2 \wedge L_2))] \vee (\neg D \wedge (C_1 \vee C_2) \wedge (L_1 \vee L_2)) \} \quad (1)$$

式中: \neg 表示非逻辑,如 $\neg A$ 表示 A 值取反; \wedge 表示与逻辑; \vee 表示或逻辑。括号的层级关系依次表示为 $\{ \} > [] > () > < >$ 。

1.4 事件及联锁提示

(1) 合环串数提示。每串单独计算仅涉及本串开关和隔刀的双交流母线之间无联络判据信号(D),该信号为 0,表明本串为合环串。依此可统计出交流场的合环串数,当合环串数为 1 时,设置“合环串仅剩一串”报警提示。

(2) 出线条数提示。每串单独计算仅涉及本串开关和隔刀的有出线连接于交流母线 I 判据信号(L_1)和有出线连接于交流母线 II 判据信号(L_2),并考虑某条出线即连接母线 I 又连接母线 II 的情况下不重复计算。汇总后计算出整个交流场的出线条数,当出线条数为 1 时,设置“交流出线仅剩一条”报警提示。

(3) “最后 1 台断路器”报警提示及联锁。以交流场中某 1 台断路器 A.Q0 为例,在模块化最后断路器保护逻辑中,将输入信号 O 和 E 置位为 1,将 A.Q0 的状态置位为分位,并保持交流场中其他开关刀闸等信号保持实际状态不变。若模块化最后断路器保护的输出信号 A 为 1,则表明在当前工况下,当 A.Q0 为分位时,最后断路器保护会动作,即说明断路器 A.Q0 为最后 1 台断路器,可设置“A.Q0 为最后 1 台断路器,禁止分闸”报警提示,并设置开关联锁避免人为操作分闸引起最后断路器保护动作闭锁阀组。

1.5 最后断路器保护应用场合

文中提出的模块化最后断路器保护策略配置灵活方便,适用于新建直流工程和直流工程改造。

新建直流工程:按照阀组配置最后断路器保护功能模块,并收集最后断路器功能投退状态信号、阀组交流侧交流电压、阀组运行状态和交流场所有串的开关及隔刀分合状态,形成最后断路器保护功能模块的输入信号。

直流工程改造:(1) 对于直流场改造,若涉及增减阀组,针对新增的阀组,配置与其他阀组相同的最后断路器保护功能模块及相应输入信号;针对取消的阀组,将待取消阀组的最后断路器保护功能模块删除或将模块输入信号中的“功能投退使能信号(O)”置为 0。若不涉及阀组增减,如仅对直流场开关刀闸改造等,最后断路器保护功能无需修改。(2) 对于交流场改造,无需更改现有的最后断路器保护功能模块,只需根据交流场改造内容更新模块的部分输入信号。

模块化最后断路器保护策略不依赖直流运行方式,适用于多种交流接线方式:3/2 接线双母线接线、普通双母线接线方式以及单交流母线运行方式,也可推广至三母线、四母线等多母线运行方式。

(1) 单母线。令式(1)中 D 为 1, C_1 为 0, L_1 为 0,则得到模块化最后断路器保护应用于单母线结构时的保护动作判据:

$$A_1 = O \wedge E \wedge \neg < C_1 \wedge L_1 > \quad (2)$$

式中: A_1 是单母线结构中最后断路器保护动作信号。

(2) 双母线。当最后断路器保护应用于双母线结构时,如 3/2 接线或普通双母接线方式,则最后断路器保护的判据按照式(1)计算。

(3) 多母线。当最后断路器保护应用于多母线结构(母线 1、母线 2、……、母线 N)时,则 N 条母线最后断路器保护的判据信号(LLP_ACT_BUS12... N ,缩写为 $A_{123...N}$)的计算步骤如下:

(a) 将 N 母线结构中所有交流母线两两组合后,按照式(1)计算交流母线 m 和交流母线 n 组合的双母线结构中最后断路器保护动作信号 LLP_ACT_BUS mn (缩写为 A_{mn})值;

(b) 根据所述计算得到的所述 A_{mn} 值,则 $A_{123...N}$ 值的计算按照式(3)进行:

$$A_{12...N} = A_{12} \wedge A_{13} \wedge \dots \wedge A_{mn} \wedge \dots \wedge A_{(N-1)N} \quad (3)$$

式中: N 为多母线结构中的母线条数; $N \geq 3$; $m = 1, 2, \dots, N$; $n = 1, 2, \dots, N$; $m \neq n$ 。如: A_{12} 值是交流母线 1 和母线 2 组成的双母线结构中最后断路器保护动作信号。

1.6 验证试验

基于 RTDS 仿真平台,针对模块化最后断路器保护策略进行仿真验证试验,采用真值表验证方式,交流场双母线接线的仿真结果如下(假定最后断路器保护功能投入且已满足模拟量辅助判据):

(1) 交流场中交流母线 I 和母线 II 无联络时,运行阀组连接于母线 I,仿真结果如表 1 所示。

表 1 母线无联络时母线 I 最后断路器仿真验证结果
Table 1 Bus-I LLP simulation results
(two bus are disconnected)

序号	输入信号		输出信号 LLP_ACT	试验结果
	CONV_BUS I	LINE_BUS I		
1	1	0	1	正确
2	1	1	0	正确

(2) 交流场中交流母线 I 和母线 II 无联络时,运行阀组连接于母线 II,仿真结果如表 2 所示。

表 2 母线无联络时 II 母最后断路器仿真验证结果
Table 2 Bus-II LLP simulation results
(two bus are disconnected)

序号	输入信号		输出信号 LLP_ACT	试验结果
	CONV_BUS II	LINE_BUS II		
1	1	0	1	正确
2	1	1	0	正确

(3) 交流场中交流母线 I 和母线 II 有联络时,仿真试验结果如表 3 所示。仿真试验结果表明:文中提出的模块化最后断路器保护策略正确,功能模块化便于灵活配置,同时便于校验和重用。

2 滇西北工程最后断路器保护实施案例

2.1 滇西北工程简介

滇西北特高压直流工程调度名为新东直流,西起大理白族自治州剑川县羊岑乡新松换流站,落点位于广东省深圳市宝安区松岗街道东方换流站,线路全长约 1 953 km,额定电压 ± 800 kV,额定输送容

表 3 母线有联络时最后断路器仿真验证结果
Table 3 LLP simulation results
(two bus are connected)

序号	输入信号				输出信号 LLP_ACT	试验 结果
	CONV_ BUS I	LINE_ BUS I	CONV_ BUS II	LINE_ BUS II		
1	0	0	1	0	1	正确
2	0	0	1	1	0	正确
3	0	1	1	0	0	正确
4	0	1	1	1	0	正确
5	1	0	0	0	1	正确
6	1	0	0	1	0	正确
7	1	0	1	0	1	正确
8	1	0	1	1	0	正确
9	1	1	0	0	0	正确
10	1	1	0	1	0	正确
11	1	1	1	0	0	正确
12	1	1	1	1	0	正确

量 5 000 MW^[25-26]。2018 年 6 月, 滇西北至广东 ±800 kV 特高压直流输电工程正式投入商业运行。

滇西北工程仅在逆变站东方换流站配置了最后断路器保护, 东方站的交流场配串结构示意图如图 3 所示, 交流场为直流输电系统中最常见的 3/2 接线的双母线结构, BUS I 和 BUS II 表示两条交流母线, 母线之间并联有 11 条串, 第 10 串为不完整串; 双极四阀组(分别如图 3 中的 C11、C12、C21 和 C22)接入点的位置和 10 条交流出线(分别如图 3 中的 L₁、L₂、…、L₁₀)接入点的位置以及阀组详见图 3。

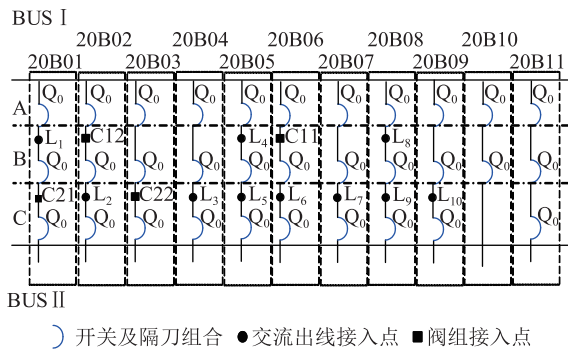


图 3 东方站交流场配串示意图

Fig.3 Dongfang station AC yard schematic diagram

2.2 最后断路器保护实例

滇西北直流控制保护系统中, 交流场每串分别配置了冗余的交流站控系统(ACC1 A/B、ACC2 A/B、…ACC11 A/B), 双极四阀组都配置了冗余的阀组控制系统(CCP11 A/B、CCP12 A/B、CCP21 A/B、CCP22 A/B), 交流站控系统和阀组控制系统通过冗余的站层控制 LAN 网通信, 如图 4 所示, 站层 LAN

网传输速率高, 通信延时短(一般为 5 ms 以内), 满足最后断路器保护的快速性要求。

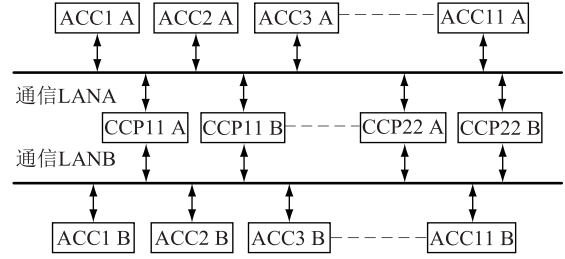


图 4 交流站控和阀组控制系统通信示意图

Fig.4 Schematic diagram of communication LAN between ACC&CCP

最后断路器保护功能基于目前的硬件, 无需额外增加其他硬件设备, 最后断路器保护由交流站控系统和阀组控制系统配合完成:

(1) 交流站控系统负责采集交流场开关刀闸位置、开关保护动作信号、线路对侧开关位置以及保护动作信号等, 并实现最后断路器开关联锁逻辑;

(2) 阀组控制系统负责实现最后断路器功能逻辑运算、报警提示及保护动作闭锁出口逻辑。

以图 3 所示的东方站交流场配串结构为例, 详细说明模块化最后断路器保护的具体应用方案。

(1) 收集最后断路器功能投退状态信号、阀组交流侧交流电压、阀组运行状态和交流场所有串的开关及隔刀分合状态。

(2) 依据上述信号, 生成最后断路器保护的输入信号。按照上文信号说明计算输入信号, 部分输入信号详细说明如下:

(a) 双交流母线之间无联络判据信号(D):

$$D = (\neg B_{01a} \vee \neg B_{01b} \vee \neg B_{01c}) \wedge (\neg B_{02a} \vee \neg B_{02b} \vee \neg B_{02c}) \wedge \dots \wedge (\neg B_{11a} \vee \neg B_{11b} \vee \neg B_{11c}) \quad (8)$$

式中: B_{XY} 为 20BX.Y 的缩写, 其值为 1, 即 20BX.Y 值为 0, 则指示第 X 条串中 Y 位置的开关及隔刀处于闭合状态; X=01, 02, …, 11; Y=a, b, c。对于不完整串第 10 串, 开关 C 间隔默认始终为合位。

(b) 本运行阀组连接于交流母线 I/交流母线 II 判据信号(C₁/C₂):

$$C_{1-11} = P_{11} \wedge B_{06a} \quad (9)$$

$$C_{1-12} = P_{12} \wedge B_{02a} \quad (10)$$

$$C_{1-21} = P_{21} \wedge B_{01a} \wedge B_{01b} \quad (11)$$

$$C_{1-22} = P_{22} \wedge B_{03a} \wedge B_{03b} \quad (12)$$

$$C_{2-11} = P_{11} \wedge B_{06b} \wedge B_{06c} \quad (13)$$

$$C_{2-12} = P_{12} \wedge B_{02b} \wedge B_{02c} \quad (14)$$

$$C_{2-21} = P_{21} \wedge B_{01c} \quad (15)$$

$$C_{2-22} = P_{22} \wedge B_{03c} \quad (16)$$

式中: C_{1-11} , P_{11} 分别为阀组 C11 连接于交流母线 BUS I、阀组 C11 处于运行状态的指示值,其他信号同理。

(c) 有出线连接于交流母线 I/交流母线 II 判据信号(L_1/L_2):

$$L_1 = B_{01a} \vee (B_{02a} \wedge B_{02b}) \vee (B_{04a} \wedge B_{04b}) \vee B_{05a} \vee (B_{06a} \wedge B_{06b}) \vee (B_{07a} \wedge B_{07b}) \vee B_{08a} \vee (B_{09a} \wedge B_{09b}) \quad (17)$$

$$L_2 = (B_{01b} \wedge B_{01c}) \vee B_{02c} \vee B_{04c} \vee B_{05c} \vee B_{06c} \vee B_{07c} \vee B_{08c} \vee B_{09c} \quad (18)$$

L_1/L_2 值的计算,包括针对图 3 中 10 条交流出线 L_1, L_2, \dots, L_{10} 中每一条交流出线是否连接于交流母线 BUS I 或 BUS II 的计算。

(3) 基于输入信号,以及预设的逻辑判据,判断所述最后断路器保护是否动作,若动作则闭锁阀组。可以将所述最后断路器保护按照阀组 C11、C12、C21 和 C22 进行模块化配置,功能模块如图 1 所示。

以阀组 C11 为例,最后断路器模块的输出为: C11_LL_P_ACT(缩写为 A_{11}),用于指示阀组 C11 所对应的最后断路器保护是否动作。结合前述式(1),则得到如下结果:

$$A_{11} = O \wedge E \wedge \neg \{ [D \wedge (< C_{1-11} \wedge L_1 > \vee < C_{2-11} \wedge L_2 >)] \vee (\neg D \wedge < C_{1-11} \vee C_{2-11} > \wedge < L_1 \vee L_2 >) \} \quad (19)$$

综上所述,最后断路器保护按照阀组进行模块化配置,每套阀组控制系统(CCP11 A/B、CCP12 A/B、CCP21 A/B、CCP22 A/B)中配置一个最后断路器保护模块,保护模块的输入信号由最后断路器功能投退状态信号、阀组交流侧交流电压、阀组运行状态和交流场所有串的开关及隔刀分合状态等组合形成,该功能模块根据实际运行工况实时自动输出最后断路器保护的信号,以实现最后断路器保护功能。

3 结语

文中将最后断路器保护中的运行阀组和出线的关系通过交流母线这一中介联系起来,依据新的设计原理提出了模块化的最后断路器保护策略。基于直流工程已有的硬件,通过收集预设的采集信号,生成最后断路器保护的输入信号;基于输入信号以及预设的逻辑判据,判断最后断路器保护是否动作,从而可以实现保护模块化,具有如下优点。

(1) 不依赖一次设备,无需额外新增避雷器、避雷器 CT 等一次设备,不必与一次设备相关参数相

配合;(2) 配置灵活,采用模块化配置,只需提供接口信息就可以实现保护功能,便于校验和重用;(3) 动作快速,采用快速 LAN 网通信,功能无额外延时;(4) 可靠防误,该策略不仅仅局限于换流变和出线所在交流串,充分考虑跨串联系,同时设置有阀组交流过压辅助判据,对于开关信号连接点松动等工况不会引起保护误动,另外有完整的“最后一条断路器”等报警提示和相应操作联锁;(5) 便于工程化,适用于各种交流场各种母线接线方式,便于交流场扩建和改造,可以重用于不同的直流工程。目前该策略已成功应用于滇西北特高压直流工程、金中高压直流工程以及溪洛渡双回直流工程。

参考文献:

- [1] 汲广,刘茂涛,张志朝,等. ± 800 kV 云广工程逆变站阀组最后断路器保护逻辑改进分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(4):130-133.
JI Guang, LIU Maotao, ZHANG Zhichao, et al. Improvement on last breaker protection logic for valve group in inverter station of ± 800 kV Yun-Guang DC system [J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(4): 130-133.
- [2] 刘云,王明新,曾南超. 高压直流输电系统逆变站最后断路器跳闸装置配置原则[J]. 电网技术,2006,30(6):35-40.
LIU Yun, WANG Mingxin, ZENG Nanchao. Configuration principle of last breaker trip equipment in inverter station of HVDC [J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 35-40.
- [3] 林湘宁,刘畅,汪致洵,等. 基于动态权重修正 D-S 证据理论的最后断路器多判据保护跳闸策略[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):1-12.
LIN Xiangning, LIU Chang, WANG Zhixun, et al. Tripping strategy of multi criteria of last breaker protections based on dynamic weight correction D-S evidence theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 1-12.
- [4] 许卫刚,张志宏,单哲,等. 特高压直流与常规直流工程最后断路器保护浅析[J]. 江苏电机工程,2010,29(5):6-10.
XU Weigang, ZHANG Zhihong, SHAN Zhe, et al. Analysis of the last breaker protection in UHVDC and conventional HVDC project [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2010, 29(5): 6-10.
- [5] 田丰伟. 特高压直流最后断路器保护改进策略及协调机制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
TIAN Fengwei. Study of improved strategy and coordination mechanism of the last circuit breaker protection for UHVDC [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.
- [6] 曹俊龙,肖筱煜,邹荣盛. 特高压直流输电工程中最后断路器策略的分析[J]. 湖北电力,2014,38(12):8-10,21.
CAO Junlong, XIAO Xiaoyu, ZOU Rongsheng. Analysis of last circuit breaker tripping strategy in HVDC project [J]. Hubei Power, 2014, 38(12): 8-10, 21.
- [7] 陶冶,王继伟,裴丽莹. 断路器短路试验引起的电压扰动分析[J]. 供用电,2017,34(6):82-84,91.

- TAO Ye, WANG Jiwei, PEI Liying. Analysis of voltage disturbance caused by short circuit test of circuit breaker [J]. *Distribution & Utilization*, 2017, 34(6): 82-84, 91.
- [8] 张吼, 杨勇, 许琤, 等. 200 kV 高压直流断路器操作拒动故障原因分析及建议[J]. *浙江电力*, 2018, 37(2): 48-52.
ZHANG Hou, YANG Yong, XU Cheng, et al. Causes analysis and suggestions on operation rejection failure of 200 kV HVDC circuit breaker [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2018, 37(2): 48-52.
- [9] 罗峰, 张冰, 纪祥贞, 等. 特高压交直流馈入下省级电网分区优化研究[J]. *浙江电力*, 2018, 37(7): 36-42.
LUO Feng, ZHANG Bing, JI Xiangzhen, et al. Study on provincial grid partitioning optimization with infeed of UHVAC and UHVDC transmission systems [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2018, 37(7): 36-42.
- [10] 武哲. ± 500 kV 广州换流站最后断路器及线路保护逻辑改进分析[J]. *科技资讯*, 2016, 14(20): 30-32.
WU Zhe. Analysis and improvement of the last circuit breaker and line protection at Guangzhou ± 500 kV converter station [J]. *Science & Technology Information*, 2016, 14(20): 30-32.
- [11] 陈海永, 朱志海, 黄华, 等. 兴安直流输电工程最后断路器出口逻辑分析[J]. *机电信息*, 2015(27): 140-141.
CHEN Haiyong, ZHU Zhihai, HUANG Hua, et al. Xing-An HVDC last circuit breaker protection logic analysis [J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2015(27): 140-141.
- [12] 郭卫明, 黄华, 蔡国淮, 等. 一起交流滤波器保护误动引起直流极闭锁的故障分析[J]. *广东电力*, 2017, 30(1): 121-125.
GUO Weiming, HUANG Hua, CAI Guozhun, et al. Fault analysis on DC bipolar blocking caused by AC filter protection malfunction [J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(1): 121-125.
- [13] 李歆蔚, 厉天威, 王程嘉, 等. 4 种典型交流滤波器断路器灭弧室电场分析[J]. *广东电力*, 2017, 30(6): 103-109.
LI Xinwei, LI Tianwei, WANG Chengjia, et al. Analysis on electric field in Arc extinguish chambers of four typical AC filter circuit breakers [J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(6): 103-109.
- [14] 江一, 夏拥. 深圳换流站最后断路器及线路保护的改进建议[J]. *南方电网技术*, 2009, 3(1): 69-71.
JIANG Yi, XIA Yong. Suggestion to improve the last circuit breaker and line protection at Shenzhen converter station [J]. *Southern Power System Technology*, 2009, 3(1): 69-71.
- [15] 许烽, 李继红, 朱承治, 等. 直流断路器对直流电网过电压特性的影响分析[J]. *浙江电力*, 2017, 36(9): 13-18.
XU Feng, LI Jihong, ZHU Chengzhi, et al. Analysis on the influence of DC circuit breaker on the over-voltage characteristics of DC grid [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2017, 36(9): 13-18.
- [16] 张少凡, 蔡燕春, 杨咏梅. 110 kV 桥断路器保护整定原则的改进[J]. *广东电力*, 2018, 31(2): 95-99.
ZHANG Shaofan, CAI Yanchun, YANG Yongmei. Improvement of protection setting principles of 110 kV bridge breaker [J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(2): 95-99.
- [17] 邓洁清, 项巍. 政平换流站最后断路器保护逻辑分析[J]. *电力自动化设备*, 2008, 28(7): 177-179.
DENG Jieqing, XIANG Wei. Analysis and optimization of interior logic for final breaker protection [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2008, 28(7): 177-179.
- [18] 于海, 曾丽丽, 杨亚璞, 等. 基于图论的特高压直流工程最后断路器自适应判断策略[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(5): 121-126.
YU Hai, ZENG Lili, YANG Yapu, et al. Self-adaptive strategy for the last breaker in UHVDC project based on graph theory [J]. *Automation of Electric Power System*, 2016, 40(5): 121-126.
- [19] 于海, 富银芳, 于锋, 等. 计及母联开关的高压直流工程最后断路器智能判断方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(5): 152-158.
YU Hai, FU Yinfang, YU Feng, et al. Intelligent judgment method for the last breaker in HVDC project including bus-tie switch [J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(5): 152-158.
- [20] 童重立. 避雷器型最后断路器保护改进方案及后备策略研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
TONG Chongli. Study of improved scheme and backup strategy of arrester based last circuit breaker protection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.
- [21] 林湘宁, 何英发, 谢志成, 等. 基于电压-能量反比特性的避雷器型最后断路器保护优化策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(12): 3400-3408.
LIN Xiangning, HE Yingfa, XIE Zhicheng, et al. Study of improved arrester based last breaker protection strategy based on voltage-energy inverse proportional characteristics [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(12): 3400-3408.
- [22] 张婷, 张小亮. 特高压奉贤换流站最后断路器保护调试异常原因及改进建议[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(11): 156-158, 218.
ZHANG Ting, ZHANG Xiaoliang. Abnormal causes and improved suggestion of last circuit breaker protection during test process in Fengxian UHVDC converter station [J]. *Water Resource and Power*, 2012, 30(11): 156-158, 218.
- [23] 李明, 童重立, 李岩, 等. 小负荷下避雷器型最后断路器保护策略仿真分析[J]. *电气应用*, 2013(S2): 688-693.
LI Ming, TONG Chongli, LI Yan, et al. Protection scheme and simulation of arrester based last circuit breaker protection in light loaded power system [J]. *Electro-technical Application*, 2013(S2): 688-693.
- [24] 乔峰, 何英发, 李浩, 等. 应对特高压特殊运行工况的最后断路器保护改进策略[J]. *陕西电力*, 2016, 44(11): 78-83.
QIAO Feng, HE Yingfa, LI Hao, et al. Improved strategies for last circuit breaker protection in UHVDC special operating mode [J]. *Shaanxi Electric Power*, 2016, 44(11): 78-83.
- [25] 谢惠藩, 梅勇, 周剑, 等. 计及母联开关的高压直流工程最

后断路器智能判断方法新东特高压直流孤岛运行闭锁策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(1):1-5.

XIE Huifan, MEI Yong, ZHOU Jian, et al. Blocking strategy for Xinsong-Dongfang UHVDC project in island operation mode [J]. Automation of Electric Power System,2018,42(1):1-5.

[26] 张力飞,郭琦,夏成军,等. 滇西北直流频率限制控制研究及工程应用[J]. 电力工程技术,2018,37(5):109-114.

ZHANG Lifei, GUO Qi, XIA Chengjun, et al. Frequency limitation control and engineering application in DXB UHVDC transmission system [J]. Electric Power Engineering Technol-

ogy,2018,37(5):109-114.

作者简介:



王杨正

王杨正(1984),男,硕士,工程师,从事直流输电控制保护系统研究开发工作(E-mail:wangyangzheng@nrec.com);

陈乐(1985),男,硕士,工程师,从事直流输电控制保护系统研究开发工作;

俞翔(1989),男,硕士,工程师,从事直流输电控制保护系统研究开发工作。

Analysis of modular last line protection strategy of HVDC project

WANG Yangzheng, CHEN Le, YU Xiang

(NR Electric Co.,Ltd., Nanjing 211102,China)

Abstract: The current research and application status of last line protection in HVDC project are summarized. To overcome its disadvantages in existing engineering application, a modular LLP strategy is proposed. The module is equipped in the controller of each valve group, and it consists of input signals, output signals and corresponding LLP logic. When LLP is activated, if there is no power line connected to the valve group in service through the busbar and moreover certain auxiliary criterion is met, LLP would act and block the corresponding valve group immediately. Theoretical analysis and practical applications prove that the modular LLP can adapt to different kinds of HVDC and AC yard topology. The modular LLP is easier to configure, reuse and test. Without additional investment in hardware, the modular LLP can also achieve good performance in operating speed and reliability, and it will contribute to the safety and stability of the grid.

Keywords: HVDC; last line protection; modular; Dianxibei UHVDC project

(编辑 钱悦)