

适用于直流配电网故障选线的电力电子变压器分步闭锁方案

刘宗焯¹, 于弘洋¹, 周丁¹, 郑涛^{2*}, 赵雨菲², 郭勇帆²

(1. 先进输电技术国家重点实验室(国网智能电网研究院有限公司), 北京市 昌平区 102209;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Step Locking Scheme of Power Electronic Transformer for DC Distribution Network Fault Line Selection

LIU Zongye¹, YU Hongyang¹, ZHOU Ding¹, ZHENG Tao^{2*}, ZHAO Yufei², GUO Yongfan²

(1. State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

Abstract: Power electronic transformer with cascaded H-bridge (CHB-PET) is one of the important components of flexible substation, which plays an important role in DC distribution network. When the bipolar short circuit fault occurs on the low-voltage DC side of CHB-PET, the fault current rises quickly and has a high amplitude, which easily leads to the rapid locking of power electronic devices, making it difficult for the low-voltage DC power grid protection to accurately obtain fault information. A fault traversal strategy based on PET stepwise locking is proposed for CHB-PET low-voltage side multi-branch DC distribution network. When PET after the low voltage side DC system fault is detected, the first locking PET input stage and the isolation level low H bridge inverter, delay 3 ms atresia isolation level after high pressure H bridge inverter, and through the step-by-step atresia can provide PET low voltage side branch line protection more short fault information, and can use a branch area fault current polarity identification on both ends of the line to locate the faulty branch line. Finally, through PSCAD/EMTDC simulation experiments, the feasibility and effectiveness of the power electronic transformer step-locking scheme suitable for DC distribution network fault line selection are verified.

Keywords: DC distribution network; power electronic transformer; step by step locking; fault traversal strategy; fault line selection

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5500-202058344A-0-0-00)。

Science and Technology Foundation of SGCC(5500-202058344A-0-0-00)。

摘要: 级联H桥型电力电子变压器(power electronic transformer with cascaded H-bridge, CHB-PET)是柔性变电站的重要组成部分之一,在直流配电网中具有重要作用。当CHB-PET低压直流侧发生双极短路故障后,故障电流上升速度快且幅值较高,易导致电力电子器件迅速闭锁,使低压直流电网保护难以准确获取故障信息。针对CHB-PET低压侧多分支直流配电网,提出一种基于PET分步闭锁的故障穿越策略。当检测到PET低压侧直流系统故障后,首先闭锁PET输入级及隔离级的低压H桥换流器,延迟3 ms后再闭锁隔离级的高压H桥换流器,分步闭锁可为PET低压侧多分支线路保护提供短时故障信息,进而可利用分支线路两端电流极性特征识别区内外故障,定位故障分支线路。最后,通过PSCAD/EMTDC仿真实验,验证了适用于直流配电网故障选线的电力电子变压器分步闭锁方案的可行性和有效性。

关键词: 直流配电网; 电力电子变压器; 分步闭锁; 故障穿越策略; 故障选线

0 引言

随着先进可再生能源发电的发展以及新型大容量储能、氢能及燃料电池等关键技术的突破,电力系统中新能源占比逐渐提高。柔性直流配电网可连接光伏、储能等直流电源和负荷,减少换流环节,减小体积,降低成本和损耗,应用前景广阔^[1-2]。级联桥型电力电子变压器(power electronic transformer with cascaded H-bridge, CHB-PET)^[3-4]可灵活控制功率双向流动,动态响应快^[5],被广泛应用于直流配电网。

CHB-PET的低压直流端口可连接光伏、风电、储能等设备, 优化配电网架构, 提高效率和经济性^[6-10]。

含CHB-PET的低压侧直流配电网发生双极短路故障后, 故障电流上升速度快且幅值较高^[11], 易导致电力电子设备迅速闭锁。CHB-PET的直接闭锁虽能实现故障阻断, 但会导致故障信息丢失, 线路保护存在拒动的风险^[12]。目前, 国内外学者针对此问题进行了广泛的研究, 主要分为PET的故障穿越策略^[13-14]和直流配电网保护两方面。文献[15]采用时域分析法, 得出了双有源桥变换器(dual active bridge, DAB)在移相控制下的短路电流计算表达式, 通过在DAB低压直流侧串联电感限制短路电流, 但未针对PET整体的故障特性进行分析。文献[16]通过在低压直流侧电容支路上串联IGBT模块阻断电容放电。文献[17]分析了DAB故障输出电流直流偏置的成因, 并提出了一种初步限制故障电流幅值的方案。文献[18]提出了一种适用于高电压、高功率场景的新型PET拓扑, 具备了在部分DC-DC模块故障时持续运行的能力。文献[19]通过调节PET故障期间的控制策略进行故障限流, 但未考虑CHB子模块电容电压的过充问题。上述方案实现了CHB-PET的局部故障穿越, 但仍存在故障特征减弱或换流器内部元件过压导致的闭锁问题, 使换流器提供的暂态信息持续时间短, 不利于故障识别和保护正确动作。

对于直流配电网的保护, 现有研究主要基于单端量保护和纵联保护。单端量保护无需通信, 动作速度较快, 主要包括过流、欠压保护^[20-21]、边界保护和行波保护^[22-26]。文献[27]利用电流微分判据识别区内外故障, 但算法耐过渡电阻能力较弱。文献[28]利用直流电抗器对高频电流的阻塞作用, 通过比较电抗器两侧电流高频暂态能量的差异, 区分直流区内外故障。文献[29]通过比较线路两端限流电抗器电压初始值判别区内外故障, 但750 V低压直流配电网线路通常不配置限流电抗器, 该方案的适应性有待提高。行波保护需提取首波头信息, 而配网中线路通常较短, 行波会发生多次折反射, 因此行波保护在配电网中适用性不佳^[30]。在纵联保护方面, 文献[31]根据区内外故障下线路两侧电流波形的差异, 提出基于改进动态时间弯曲距离算法的纵联保护方案, 该方案具有耐同步误差的能力。文献[32]借助故障电流采样数据拟合曲线斜率识别直流线路故障, 存在算法计算量较大的问题。文献[33]利用线路故障时直流电流过零特征快速识别直流故障, 防止可能由于分布电容的电流振荡而产生误

动。文献[34]针对双端CHB-PET直连的拓扑, 以PET低压直流侧电感为边界, 提出了一种双端故障测距方案, 但针对特定拓扑提出的保护方案在普适性上仍有待研究。文献[35]将端口变流器变为特征信号注入源, 通过检测特征信号构成保护判据, 无需额外附加设备, 但是保护动作时间较长。

本文针对CHB-PET低压侧多分支直流配电网在双极短路故障后直接闭锁换流器导致线路保护无法接收到故障信息的问题, 提出一种基于PET分步闭锁的故障穿越策略。在检测到PET低压直流系统故障后, 启动基于分步闭锁的故障穿越策略, 首先闭锁PET输入级及隔离级低压H桥换流器, 延时3 ms后闭锁隔离级的高压H桥换流器, 通过该策略为PET低压侧线路保护持续提供3 ms故障信息。在此基础上, 利用多分支线路两端电流极性识别区内外故障, 进行故障选线。通过PSCAD/EMTDC仿真实验, 验证了适用于直流配电网故障选线的电力电子变压器分步闭锁方案的可行性。

1 基于PET的柔性直流配电网基本结构

常见的直流配电网拓扑结构可以分为辐射状拓扑结构、两端拓扑结构和环状拓扑结构^[36], 其中辐射状拓扑结构在低压直流配网中应用较多, 本文以此拓扑为例, 搭建多分支低压直流配电网如图1所示。其中, 通过CHB-PET实现从10 kV中压交流到750 V低压直流的电压等级变换。光伏、储能等新能源及直流负荷经DC/DC变流器升压后, 接入低压直流母线。在PET所在主线路两端和各分支线路出口装设直流断路器, 线路两端装有保护测点。

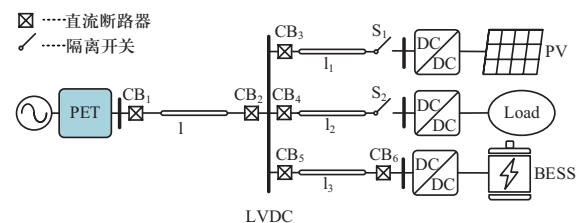


图1 基于PET的多分支直流配电网拓扑结构

Fig. 1 Topology of multi-branch DC distribution network based on PET

PET通常由输入级、隔离级和输出级3部分组成。输入级实现中高压交流到中高压直流的变换, 采用级联H桥(cascaded H-bridge, CHB)变流器或模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)。

CHB具有高度模块化、可扩展以及易实现冗余设计等优点,因此本文PET输入级采用CHB变流器实现交、直流变换,如图2所示。

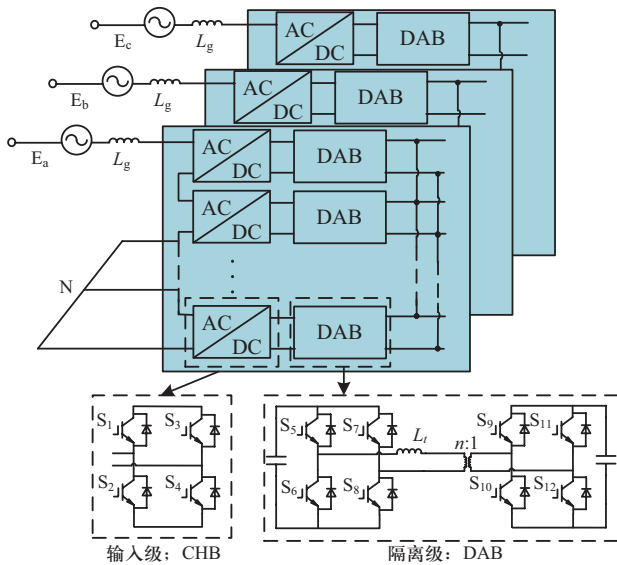


图2 CHB型PET结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CHB-PET structure

PET隔离级由DAB模块组成, DAB低压直流侧并联连接,可提供低压大功率直流端口,便于新能源电源及直流负荷的接入。DAB的拓扑结构如图3所示,由H桥变换器、高频变压器T和直流电容C₁、C₂组成。L_t为高频变压器漏感与外部串联电感之和, u_{H1}和u_{H2}分别为高压H桥换流器和低压H桥换流器的交流侧电压。

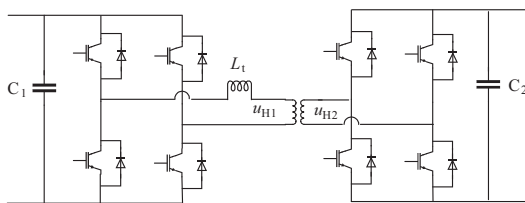


图3 DAB结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of DAB

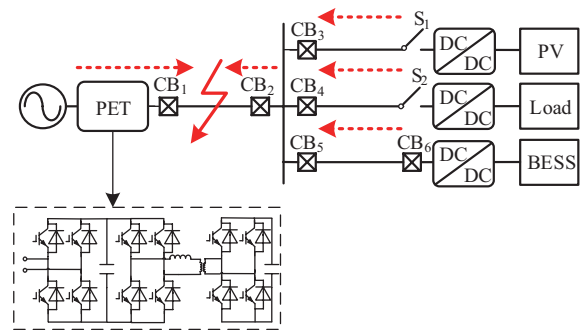
2 基于PET的不同故障穿越策略及其对故障特性影响

2.1 基于PET完全闭锁的故障穿越策略及其影响分析

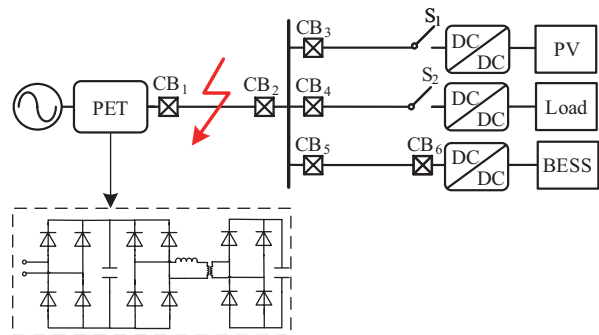
低压直流配电网一般采用不接地方式,单极接地故障并不会引起严重的过流,因此本文主要针对双极短路故障开展分析。以PET闭锁为时间分界点,双极

短路故障特性可分为PET闭锁前和闭锁后2个阶段。当流过PET内部IGBT的电流超过2 pu时,应迅速闭锁PET以防止过流损坏电力电子器件。

如图4所示为PET闭锁前后的故障电流示意图。闭锁前,故障电流主要由交流源经PET提供;闭锁后,交流源无法经PET继续向故障点提供短路电流。



(a) PET闭锁前



(b) PET闭锁后

图4 直流线路双极短路故障特性

Fig. 4 Fault characteristics of inter-pole short circuit in DC line

2.1.1 PET闭锁前故障特性分析

PET闭锁前的故障电流通路如图5所示,根据故障电流组成,可将其分为2部分。第一部分为DAB低压直流侧电容C₂经过渡电阻向故障点放电,如图5中红色通道所示。

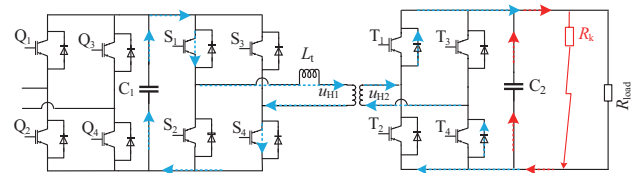


图5 直流线路双极短路下PET故障电流

Fig. 5 PET fault current under inter-pole short circuit of DC line

$$R_k C_2 \frac{dv_{c2}}{dt} + v_{c2} = 0 \quad (1)$$

式中: v_{c2}为电容C₂两端电压。解该方程可得故障后电容电压和故障电流表达式为

$$v_{c2}(t) = V_{dc} e^{-R_k C_2 t} \quad (2)$$

$$i_{dc}(t) = \frac{v_{c2}(t)}{R_k} \quad (3)$$

第二部分为DAB高压直流侧电容 C_1 经IGBT放电, 故障电流经高频变压器耦合到副边, 通过二极管整流流入故障点, 如图5中蓝色通道所示。本文从原边电流的计算出发, 计算电容 C_1 的放电电流, 列写微分方程式如下:

$$L_{eq} C_{eq} \frac{d^2 v}{dt^2} + R_{eq} C_{eq} \frac{dv}{dt} + v = 0 \quad (4)$$

式中: v 为原边电容 C_1 电压; L_{eq} 为原边电感和故障线路电感折算到原边的数值之和; R_{eq} 为开关管导通电阻和故障线路电阻折算到原边的数值之和, 解得:

$$v(t) = \frac{V_{c1}}{s_2 - s_1} (s_2 e^{s_1 t} - s_1 e^{s_2 t}) \quad (5)$$

$$i(t) = \frac{C_{eq} V_{c1} s_1 s_2}{s_2 - s_1} (e^{s_2 t} - e^{s_1 t}) \quad (6)$$

其中:

$$s_1 = -\frac{R_{eq}}{2L_{eq}} + \sqrt{\frac{R_{eq}^2}{4L_{eq}^2} - \frac{1}{L_{eq} C_{eq}}} \quad (7)$$

$$s_2 = -\frac{R_{eq}}{2L_{eq}} - \sqrt{\frac{R_{eq}^2}{4L_{eq}^2} - \frac{1}{L_{eq} C_{eq}}} \quad (8)$$

2.1.2 PET闭锁后故障特性分析

PET闭锁后, 其向故障点的放电通路被阻断, PET低压直流侧保护将无法获得故障信息。目前电力电子器件过流闭锁的时间通常为 μs 级, 而直流线路保护可靠动作的时间为 ms 级。若故障后PET立刻闭锁, 将对直流线路保护的绩效产生较大影响。

2.2 基于PET分步闭锁的故障穿越策略及其影响分析

当低压直流配电网发生双极短路故障后, PET的直接闭锁导致故障信息丢失, 线路保护存在拒动风险。而各换流器靠近直流线路一侧的电容的迅速放电会产生巨大的放电电流, 极易损坏电容, 给电容重新投入带来困难^[37]。因此本文提出基于PET分步闭锁的故障穿越策略, 在检测到PET低压侧直流系统故障后, 第一阶段将PET输入级CHB和隔离级DAB低压H桥换流器闭锁, 3 ms后为第二阶段, 将DAB高压H桥换流器闭锁, 保障器件安全。

利用低压直流配电网双极短路故障后的低电压和

过电流特征作为PET分步闭锁措施的启动判据^[19], 如式(9)所示:

$$u_{LVDC} < U_{set} \cap i_{LVDC} > I_{set} \quad (9)$$

式中: u_{LVDC} 和 i_{LVDC} 分别为PET低压直流侧端口电压和电流; U_{set} 和 I_{set} 分别为启动电压和启动电流, 取值为PET长期运行的最小允许电压和最大允许电流。

当式(7)判据满足时, PET启动分步闭锁第一步, 通过控制器闭锁CHB桥的IGBT和DAB低压H桥的IGBT, 高压H桥的IGBT正常开断。3 ms后进行第二步闭锁, 闭锁DAB高压H桥的IGBT。

2.2.1 PET分步闭锁第一阶段故障特性分析

第一阶段为闭锁PET的CHB和DAB的低压H桥换流器, 高压H桥换流器不闭锁, 具体如图6所示。

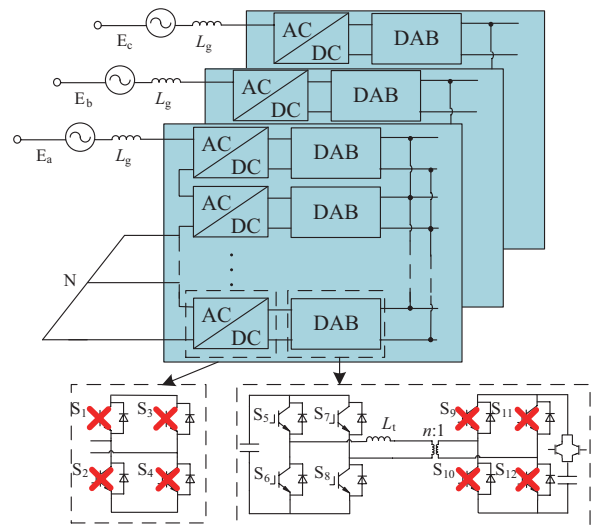


图6 分步闭锁第一阶段拓扑图

Fig. 6 Topology diagram of the first stage of stepwise locking

除此之外, 通过在换流器靠近直流线路侧电容支路配置IGBT开关, 在闭锁CHB和DAB低压H桥换流器的同时, 关断IGBT以阻塞电容放电, 将有利于系统的恢复与重启, 拓扑结构如图7所示。

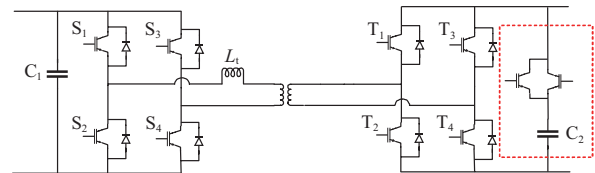


图7 DAB限流拓扑图

Fig. 7 DAB current-limiting topology

在PET分步闭锁第一阶段, PET内部的故障电流通路径如图8所示。

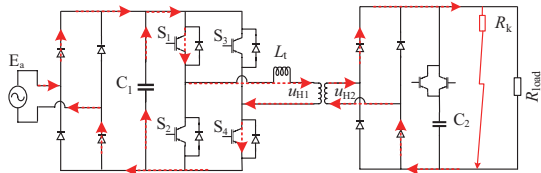


图8 分步闭锁第一阶段PET故障电流

Fig. 8 PET fault current of the first stage of stepwise locking

由图8可知，在分步闭锁的第一阶段，PET可通过CHB二极管，DAB高压桥和低压桥的二极管向故障电流提供短路电流，即PET向故障点提供的短路电流由交流侧馈流和原边电容 C_1 经DAB放电产生。

2.2.2 PET分步闭锁第二阶段故障特性分析

在第一阶段闭锁PET的CHB和DAB低压H桥换流器3 ms以后，进而闭锁DAB高压H桥换流器，此为PET分步闭锁的第二阶段，具体如图9所示。

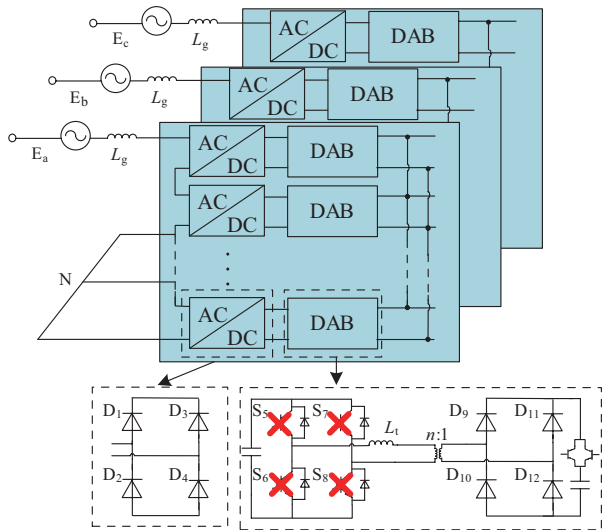


图9 分步闭锁第二阶段拓扑图

Fig. 9 Topology diagram of the second stage of stepwise locking

闭锁DAB高压H桥换流器后，交流源及原边电容 C_1 向故障点的馈流结束，PET不再提供短路电流。

由本节分析可知，PET低压侧直流线路发生双极短路故障后，相较于直接闭锁PET，基于分步闭锁的故障穿越策略保证故障后3 ms内，PET可为保护提供短时故障信息，有利于故障线路的判别。

3 基于PET分步闭锁的故障选线方案

3.1 故障选线方案

由第2.2.1节分析可知，采用PET分步闭锁故障穿越策略后，当PET的低压侧直流分支线路发生双极短

路故障时，PET可提供短时的故障电流，故障线路两端电流突变量的极性相同，非故障线路两端电流突变量极性相反。因此，可以利用线路两端电流突变量的极性特征来构成故障选线判据，具体实现方案可参见有关文献^[38]。

3.2 故障选线流程图

基于PET分步闭锁的低压直流故障选线方案流程图如图10所示。

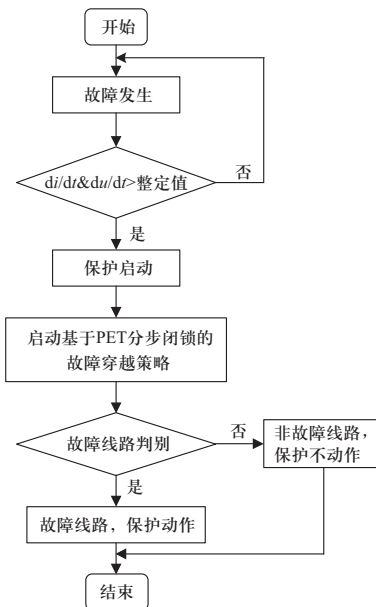


图10 故障选线流程图

Fig. 10 Flowchart of fault line selection

流程图相关部分说明如下。

- 1) 保护启动：通过 di/dt 、 du/dt 判别PET低压侧直流系统是否发生故障，进而启动保护。
- 2) 故障穿越策略：保护启动后，启动基于PET分步闭锁的故障穿越策略。
- 3) 故障选线：通过电流突变量极性进行故障选线并隔离故障线路。

4 仿真验证

基于PSCAD/EMTDC搭建如图11所示的10 kV柔性直流配电网仿真模型。PET输入级为CHB，每相由12个全桥子模块串联组成，隔离级采用12个DAB模块高压侧串联、低压侧并联组成。仿真步长与绘图步长为100 μ s。以下结合仿真模型，对本文所提出的分步闭锁故障穿越策略和故障选线方案进行分析验证。

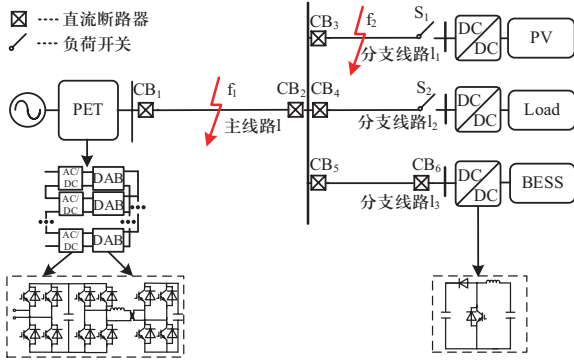


图 11 直流配电网示意图

Fig. 11 Topologies of the DC distribution system

4.1 基于PET分步闭锁的故障穿越策略仿真

本节在PET低压直流侧设置双极短路故障，验证本文所提基于分步闭锁的故障穿越策略。

如图12所示为PET分别采取基于直接闭锁和分步闭锁的故障穿越策略时，PET低压直流侧电流波形对比。图中 t 为时间， $t = 0$ ms时故障发生， $t < 0$ ms表示故障前， $t > 0$ ms表示故障后。

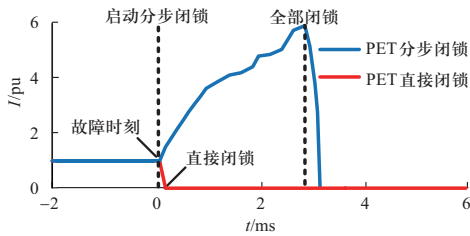


图 12 分步闭锁与直接闭锁下PET低压直流侧电流对比

Fig. 12 Comparison of line currents under stepwise and direct latching

根据图12可知，PET直接闭锁时，PET低压直流侧电流迅速降为0，线路保护丢失故障信息，存在拒动风险。PET分步闭锁时，故障电流将持续至少3 ms，可为保护提供故障信息，同时 di/dt 值迅速升高，保护可正常启动。

分步闭锁措施使得CHB-PET在故障情况下能持续输出3 ms故障电流，因此应考虑在此期间CHB-PET内部三相桥臂和子模块电容是否存在过流和过压风险。

图13和图14分别为PET采取分步闭锁措施时，PET输入级CHB直流侧电容电压和CHB桥臂三相电流的变化情况。

由图13可知，在基于PET分步闭锁的故障穿越策略下，故障发生后3 ms内CHB直流侧电容电压下降，3 ms时PET隔离级高压H桥换流器闭锁，CHB直流侧电容电压开始爬升，但均未超过最大耐受电压。根

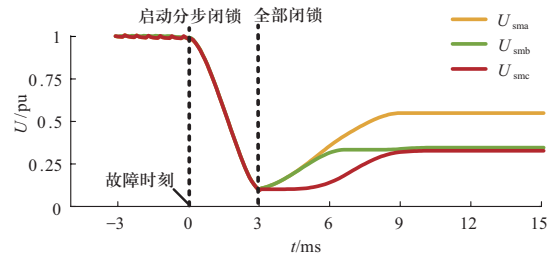


图 13 分步闭锁下PET输入侧电容电压

Fig. 13 The capacitor voltage on the PET input side closed step by step

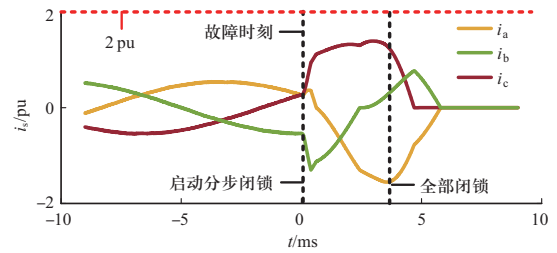


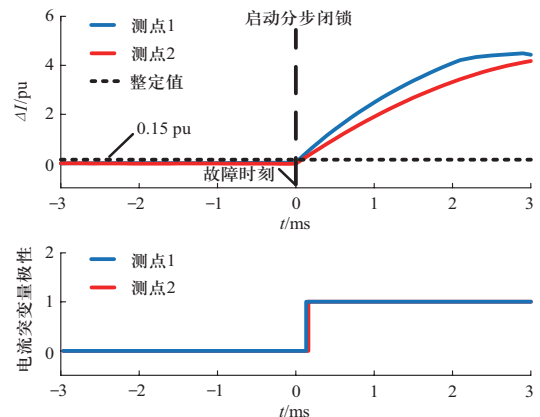
图 14 分步闭锁下PET输入侧电流

Fig. 14 Current on the PET input side closed step by step

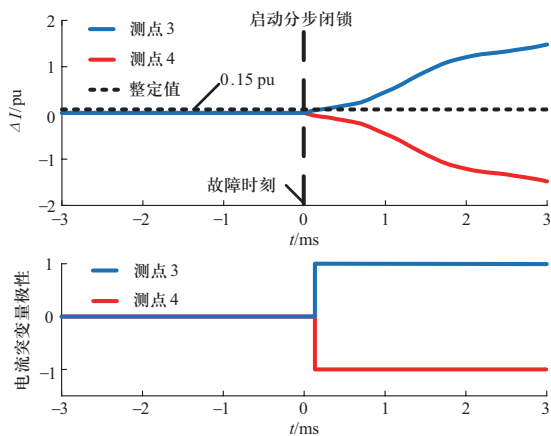
据图14可知，在基于PET分步闭锁故障穿越策略下，PET输入侧可短时提供电流，且在3 ms内，CHB-PET三相桥臂电流未超过稳态值的2倍，电力电子器件无过流风险。全部闭锁后，由于CHB桥臂串有电感，桥臂电流缓慢降为0，随后CHB子模块中的二极管截止，CHB-PET内部不再有故障电流。

4.2 故障选线方案验证

在图11所示拓扑图中的主线路1中点处设置双极短路故障 f_1 ，故障时刻为0 s，过渡电阻为0.01 Ω 。主线路1两端设置保护测点1、2，分支线路1两端设置保护测点3、4，分支线路1₃两端设置保护测点5、6。电流突变量及极性判别结果如图15所示。



(a) 主线路电流突变量及极性判别结果



(b) 分支线路电流突变量及极性判别结果

图 15 主线路金属性双极短路

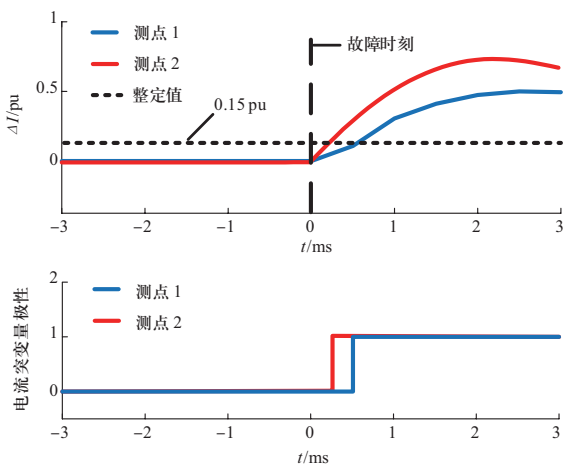
Fig. 15 Main line metal bipolar short circuit

如图15(a)所示,主线路1两端测点1、2所得电流故障特征均表现为增加,电流突变量远高于整定值,保护可准确识别故障线路;如图15(b)所示,线路1₁两端测点3、4所得电流突变方向相反,保护判别为非故障线路,保护不动作,线路1₂、1₃与线路1₁情况类似。

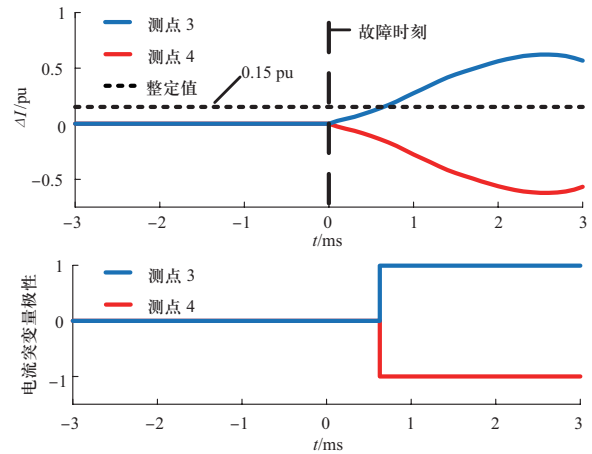
本文研究的配电网电压等级为750 V,5 Ω过渡电阻将使故障电流峰值变为负荷电流的1.5 pu左右,可等效为高阻故障。在主线路1中点设置5 Ω过渡电阻的双极短路故障,仿真结果如图16所示。

由图16可知,经过渡电阻短路时,故障电流幅值降低,但突变量仍高于整定值。

分别在主线路1及分支线1₁不同位置设置双极短路故障,极性判别结果如表1所示。表中,红色方框表示故障线路,判别结果对应的数字1—6分别为各线路两端测点。



(a) 主线路电流突变量及极性判别结果



(b) 分支线路电流突变量及极性判别结果

图 16 主线路经过渡电阻双极短路

Fig. 16 The main line through the transition resistance bipolar short circuit fault

表 1 极性判别结果

Table 1 Polarity discrimination result

故障线路	故障位置	过渡电阻 /Ω	极性判别结果					
			1		1 ₁		1 ₃	
			1	2	3	4	5	6
1	5%	0	1	1	-1	1	-1	1
		5	1	1	-1	1	-1	1
	95%	0	1	1	-1	1	-1	1
		5	1	1	-1	1	-1	1
1 ₁	5%	0	1	-1	1	1	-1	1
		5	1	-1	1	1	-1	1
	50%	0	1	-1	1	1	-1	1
		5	1	-1	1	1	-1	1
	95%	0	1	-1	1	1	-1	1
		5	1	-1	1	1	-1	1

4.3 仿真对比

如图17所示为线路距离PET低压直流侧30%处发生5 Ω过渡电阻短路,采用本文判据和文献[39]判据时的保护动作时序图。

如图17所示,经5 Ω过渡电阻短路故障发生在距离PET低压直流侧30%处时,文献[39]判据Ⅱ段保护动作,识别故障用时12.7 ms,本文判据识别故障用时2.1 ms。

由第3章和第4章的分析可知,线路较短的低压直流配电网通信延时较小,并且基于电流突变量的直流故障选线方案只需传送状态信息,通信量小,有一定的优越性。

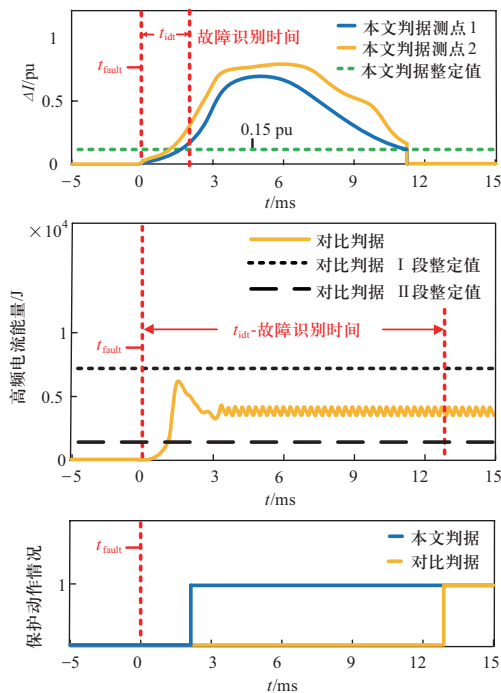


图 17 本文判据和文献[39]判据在相同故障情况时保护动作时序图

Fig. 17 The time sequence diagram of protection action under the same fault condition of the criterion in this paper and the criterion in reference [39]

5 结论

针对含CHB-PET的多分支低压直流配电网在直流线路故障后, CHB-PET闭锁时间较快而识别故障线路时间较长的问题, 提出了一种适用于直流配电网故障选线的电力电子变压器分步闭锁方案, 主要结论如下。

1) CHB-PET低压直流系统发生双极短路故障后, 采取直接闭锁PET的方式会使故障信息缺失, 难以识别故障线路。

2) 提出了基于PET的分步闭锁措施, 保证了在双极短路故障后3 ms内有明确的故障特征, 有利于故障线路的准确识别。利用此时间窗口的故障信息给出了基于电流突变量极性的故障选线方案, 并验证了基于PET分步闭锁的故障选线方案的有效性。

本文以辐射型电网为例进行分析, 后续将在低压直流环网中对故障选线方案开展进一步研究。

参考文献

[1] HE J H, CHEN K A, LI M, et al. Active injection protection scheme for flexible HVDC grids based on amplitude of input impedance[J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(6): 532-

542.

- [2] 杨景刚, 刘洋, 苏伟, 等. 苏州同里±10 kV柔性直流配电系统直流故障特性研究[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(6): 113-120.
YANG Jinggang, LIU Yang, SU Wei, et al. Grounding fault on DC side of Suzhou Tongli ±10 kV flexible DC distribution system[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(6): 113-120 (in Chinese).
- [3] LISERRE M, BUTICCHI G, ANDRESEN M, et al. The smart transformer: impact on the electric grid and technology challenges[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2016, 10(2): 46-58.
- [4] LIU T, YANG X, CHEN W J, et al. High-efficiency control strategy for 10-kV/1-MW solid-state transformer in PV application[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(11): 11770-11782.
- [5] 赵彪, 安峰, 宋强, 等. 双有源桥式直流变压器发展与应用[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 288-298.
ZHAO Biao, AN Feng, SONG Qiang, et al. Development and application of DC transformer based on dual-active-bridge[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 288-298 (in Chinese).
- [6] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(5): 1274-1289.
LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(5): 1274-1289 (in Chinese).
- [7] 袁宇波, 史明明, 舒良才, 等. 基于混频调制的电力电子变压器设计方法及实验验证[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(22): 176-183.
YUAN Yubo, SHI Mingming, SHU Liangcai, et al. Design method and experimental verification of power electronic transformer based on mixed-frequency modulation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(22): 176-183 (in Chinese).
- [8] 丁江萍, 高晨祥, 许建中, 等. 级联H桥型电力电子变压器的闭锁状态等效建模方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(5): 1831-1840.
DING Jiangping, GAO Chenxiang, XU Jianzhong, et al. Research on equivalent modeling method of cascaded H-bridge based PET under blocking state[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(5): 1831-1840 (in Chinese).
- [9] 涂春鸣, 葛钦, 肖凡, 等. 基于光伏电源支撑的多端口固态变压器故障穿越策略[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(16): 3498-3508.
TU Chunming, GE Qin, XIAO Fan, et al. Fault ride-through control strategy of solid state transformer with PV power generation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(16): 3498-3508 (in Chinese).
- [10] 熊飞, 聂川杰, 李骏驰, 等. 电力电子变压器的内部能量流动协调控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(15): 127-138.

- XIONG Fei, NIE Chuanjie, LI Junchi, et al. Coordination control strategy for energy flow inside power electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 127-138 (in Chinese).
- [11] 姜山, 范春菊, 黄宁, 等. 电力电子变压器直流端口极间短路故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1301-1309.
- JIANG Shan, FAN Chunju, HUANG Ning, et al. Fault characteristic analysis of DC pole-to-pole fault in power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1301-1309 (in Chinese).
- [12] 王守相, 刘琪, 薛士敏, 等. 直流配电系统控制与保护协同关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 23-30.
- WANG Shouxiang, LIU Qi, XUE Shimin, et al. Key technologies and prospect for coordinated control and protection in DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 23-30 (in Chinese).
- [13] CHEN L, DING M, CHEN H K, et al. Study on resistive SFCL for fault ride-through fulfillment of power electronic transformer interconnecting MV and LV power systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-6.
- [14] FANG T Z, SHEN L, HE W, et al. Distributed control and redundant technique to achieve superior reliability for fully modular input-series-output-parallel inverter system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 723-735.
- [15] 郑涛, 朴勇, 郭勇帆, 等. 直流变压器输出侧双极短路故障下的故障穿越方法[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3115-3122.
- ZHENG Tao, PIAO Yong, GUO Yongfan, et al. Fault ride-through of bipolar short-circuit fault on output side of DC transformer[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3115-3122 (in Chinese).
- [16] 卓超然, 张笑天, 张雄, 等. 支撑电容可分离的直流变压器短路故障电流限流控制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 424-432.
- ZHUO Chaoran, ZHANG Xiaotian, ZHANG Xiong, et al. Short-circuit fault current limiting control method of DC transformer with separable supporting capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 424-432 (in Chinese).
- [17] ZHAO B, SONG Q, LIU W H, et al. Transient DC bias and current impact effects of high-frequency-isolated bidirectional DC-DC converter in practice[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(4): 3203-3216.
- [18] ZHANG J P, LIU J Q, YANG J X, et al. A modified DC power electronic transformer based on series connection of full-bridge converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2119-2133.
- [19] 韩杰祥, 张哲, 冉启胜, 等. 低压直流配电网主动限流控制及保护方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 182-190.
- HAN Jiexiang, ZHANG Zhe, RAN Qisheng, et al. Active current-limiting control and protection scheme for low-voltage DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 182-190 (in Chinese).
- [20] 韩昆仑, 蔡泽祥, 徐敏, 等. 直流线路行波保护特征量动态特性与整定研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 255-260.
- HAN Kunlun, CAI Zexiang, XU Min, et al. Dynamic characteristics of characteristic parameters of traveling wave protection for HVDC transmission line and their setting[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 255-260 (in Chinese).
- [21] 高本锋, 董沛毅, 刘辛晔, 等. 高压直流输电线路微分欠压保护特性与定值整定[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2303-2311.
- GAO Benfeng, DONG Peiyi, LIU Xinye, et al. Research of HVDC transmission line differential under-voltage protection characteristics and value setting[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2303-2311 (in Chinese).
- [22] LIN X N, ZHAO F, WU G, et al. Universal wavefront positioning correction method on traveling-wave-based fault-location algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1601-1610.
- [23] HAMIDI R J, LIVANI H. Traveling-wave-based fault-location algorithm for hybrid multiterminal circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 135-144.
- [24] WU J Y, LI H F, WANG G, et al. An improved traveling-wave protection scheme for LCC-HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 106-116.
- [25] CHEN X, YIN X G, YIN X, et al. A novel traveling wave based fault location scheme for power distribution grids with distributed generations[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA, 2015.
- [26] TANG L X, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [27] 周嘉阳, 李凤婷, 陈伟伟, 等. 基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 42-48.
- ZHOU Jiayang, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 42-48 (in Chinese).
- [28] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.
- LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749 (in Chinese).
- [29] 陈少宇, 黄文焘, 邵能灵, 等. 基于单端暂态电压的含限流电抗器直流配电网保护方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 185-193.

- CHEN Shaoyu, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Protection method based on single-terminal transient voltage for DC distribution network with current limiting reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 185-193 (in Chinese).
- [30] 陈福锋, 杨阳, 宋国兵, 等. 单端量行波保护在中压柔性直流配电网的适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 50-55.
- CHEN Fufeng, YANG Yang, SONG Guobing, et al. Adaptability analysis of single terminal traveling wave protection in mid-voltage DC distribution based on VSC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 50-55 (in Chinese).
- [31] 冉启胜, 张哲, 韩杰祥, 等. 基于改进动态时间弯曲距离算法的直流配电网线路纵联保护方案[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 157-164.
- RAN Qisheng, ZHANG Zhe, HAN Jiexiang, et al. Pilot protection scheme for DC distribution network based on improved dynamic time warping distance algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 157-164 (in Chinese).
- [32] 张鑫宇, 樊艳芳, 马健, 等. 基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电网线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 128-136.
- ZHANG Xinyu, FAN Yanfang, MA Jian, et al. Pilot protection method for flexible DC distribution lines based on fitted current slope characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 128-136 (in Chinese).
- [33] 郑涛, 吴琼, 吕文轩, 等. 基于直流电流过零特征的柔性直流配电网保护方案研究[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1806-1815.
- ZHENG Tao, WU Qiong, LÜ Wenxuan, et al. Research on protection scheme of flexible DC distribution grids based on DC current zero-crossing characteristics[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1806-1815 (in Chinese).
- [34] JIANG S, FAN C J, HUANG N, et al. A fault location method for DC lines connected with DAB terminal in power electronic transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 301-311.
- [35] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于控保协同的多端柔性直流配电系统线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2559-2568.
- WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Line protection for multi-terminal flexible DC distribution system based on control and protection coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2559-2568 (in Chinese).
- [36] 杜翼, 江道灼, 尹瑞, 等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 139-145.
- DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topological structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 139-145 (in Chinese).
- [37] 陈杨帆, 张宇. 输出短路故障下的DAB暂态过流分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 667-681.
- CHEN Yangfan, ZHANG Yu. Transient overcurrent analysis of dual active bridges under short circuits of loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 667-681 (in Chinese).
- [38] 蔡新雷, 宋国兵, 高淑萍, 等. VSC-HVDC直流电缆线路电流突变量极性纵联保护适用性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 10-16.
- CAI Xinlei, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. Research on applicability of current fault component polarity pilot directional protection for VSC-HVDC cable lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 10-16 (in Chinese).
- [39] 贾科, 陈聪, 刘子奕, 等. 基于单端电流暂态量的柔性直流配电网保护及其整定[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 144-152.
- JIA Ke, CHEN Cong, LIU Ziyi, et al. Protection of flexible DC distribution network based on single-end current transient and its setting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 144-152 (in Chinese).

收稿日期: 2022-11-12; 修回日期: 2023-05-08。

作者简介:

刘宗焯(1987), 男, 工程硕士, 工程师, 研究方向为电力电子技术、次同步振荡抑制、实时仿真, E-mail: liuzongye_008@163.com。

郑涛(1975), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制。通信作者, E-mail: zhengtao_sf@126.com。



刘宗焯

(责任编辑 张宇 翁宇威)