

# 基于拖尾电流识别的断路器失灵保护判据

董新涛<sup>1</sup>, 李宝伟<sup>1,2</sup>, 赵剑松<sup>1</sup>, 方正<sup>1</sup>, 李旭<sup>1</sup>, 邓茂军<sup>1</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**分析了影响断路器失灵保护动作时间的主要原因,针对失灵电流判据受电流互感器拖尾电流影响的问题,提出了一种利用最小二乘法三点窗算法计算基波幅值和直流幅值的直流比率制动判据。经仿真验证,在断路器跳开后发生电流互感器拖尾时该判据可在20 ms内动作闭锁断路器失灵保护,消除拖尾电流的不利影响。针对断路器失灵保护动作中间环节多和失灵出口需要重动的问题,提出了通过优化保护配置,综合集成保护功能,使用专用纵联通道、优化远跳就地延时及采用分相出口等方法,以减少断路器失灵保护和死区保护动作全过程参与的保护装置数量,提高动作速度。设计了综合集成断路器失灵保护方案,可在200 ms时间内快速切除断路器失灵故障及死区故障。设计了综合集成断路器失灵死区保护,增加了针对死区保护的差动逻辑,利用差动保护可在110 ms内快速切除死区故障。2种方案均已通过第三方检测,验证了方案的可行性。

**关键词:**断路器失灵保护;最小二乘法;直流比率制动判据;综合集成断路器失灵死区保护;继电保护

**中图分类号:**TM 77

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202201002

## 0 引言

断路器失灵保护的作用是在发生断路器失灵故障时跳开失灵断路器相邻的断路器,实现故障的切除,断路器拒动是在电网故障的同时发生断路器拒动,造成故障切除时间变长<sup>[1]</sup>。死区故障存在的主要原因是继电保护的测量设备和执行设备的安装位置无法完全重合,出现保护通过测量设备感受到故障,动作后无法通过执行设备切除故障的矛盾,造成多切断路器,且故障切除时间变长的严重后果<sup>[2]</sup>。随着电网规模的发展,系统对故障极限切除时间的要求越来越高,同时交直流混联的运行方式使稳定问题尤为突出<sup>[3-7]</sup>。文献[3]指出南方电网部分500 kV厂站的极限切除时间已短于350 ms;文献[4]指出经国家电网有限公司系统稳定核算,将断路器失灵和死区故障的切除时间缩短至200 ms以内,可有效降低直流连续发生2次换相失败的概率。高压交流系统中均配置有双套的速动主保护,在故障发生30 ms后动作出口,配合断路器全开断时间60 ms,基本能在90 ms切除故障。但由于历史原因,如系统中存在大量仅单侧安装电流互感器(TA)的断路器等,依然存在主保护死区,且在运行中也发生多次断路器失灵故障<sup>[8]</sup>,断路器击穿也偶有发生,若考虑故障情况下断路器拒动、死区故障等,故障将只能

通过断路器失灵保护、死区保护等切除,故障切除时间将延长至400 ms以上,已不满足系统稳定运行对故障切除时间的要求,可能会导致系统失去稳定。

本文通过分析现有工程中影响断路器失灵保护动作时间的主要因素,针对性地提出了基于拖尾电流识别的改进断路器失灵保护判据,设计了集成断路器失灵保护和死区保护的装置,并给出了详细的技术和工程实施方案。

## 1 断路器失灵故障时间分析

500 kV变电站中发生死区故障和断路器失灵故障时一般依靠断路器失灵保护动作切除故障,尤其是线路断路器的死区发生单相故障时,由于目前工程中的死区保护方案的判据为三相断路器跳开后故障依然未切除,所以在线路保护跳开单相断路器后,死区保护不能动作,无法快速切除故障。限制死区故障和断路器失灵故障下保护速动性的主要因素为断路器失灵保护的動作时间。

图1为断路器失灵保护动作时序示意图。图中: $t_1$ 为主保护动作出口时间,按30 ms考虑; $t_2$ 为断路器从收到跳令后到跳开的时间,由固有动作时间和灭弧时间两部分组成,按60 ms考虑;断路器失灵保护动作延时依据整定规程整定为200 ms,保护动作时间需要考虑断路器保护装置对跳令开入的消抖确认,以及出口继电器的动作时间,因此 $t_3$ 按210 ms考虑; $t_4$ 为相邻断路器从保护出口到断路器跳开的时间,包含操作箱的TJR继电器重动耗时约10 ms,以及断路器收到跳令后的全开断时间60 ms,共计70 ms; $t_5$ 为断路器失灵出口经光纤线路保护或数字

收稿日期:2020-12-20;修回日期:2021-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877090);国家电网有限公司科技项目(5500-202099517A-0-0-00)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877090) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5500-202099517A-0-0-00)

接口装置将跳闸信号发送到对侧的时间,由开入消抖确认、通道传输、继电器动作时间三部分组成,按45 ms考虑; $t_6$ 为对侧远跳保护收到远跳信号后,经就地电流判据后保护动作于出口的时间,包含远跳信号开入消抖确认、故障判别元件动作、继电器出口时间,按50 ms考虑; $t_7$ 为对侧远跳保护出口跳开对侧断路器的时间,包含操作箱的TJR继电器重动耗时约10 ms,以及断路器收到跳令后的全开断时间60 ms,共计70 ms,故障持续时间达到405 ms。

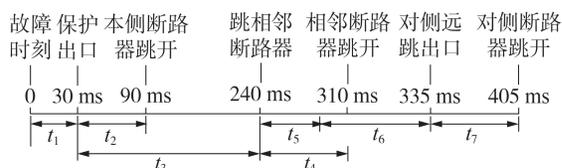


图1 断路器失灵保护动作时序示意图

Fig.1 Schematic diagram of action sequence of breaker failure protection

2014年5月1日,某500 kV变电站发生中断路器电流互感器闪络导致的死区故障,断路器失灵保护动作时序如图2所示。故障后6 ms主保护出口跳A相,死区故障未切除,145 ms时断路器失灵保护三跳本侧断路器,263 ms时断路器失灵保护跳相邻断路器,335 ms时对侧远跳保护动作,391 ms时对侧断路器跳闸,将死区故障点隔离。从死区故障发生至死区故障隔离共391 ms,与理论估算时间基本一致。

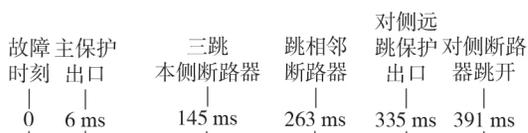


图2 实际工程中发生电流互感器死区故障时的动作时序

Fig.2 Protection action sequence of CT dead zone fault in actual project

因此,根据断路器失灵保护的整定计算和现场实际故障,当发生交流系统电流互感器死区故障或故障情况下断路器失灵时,故障切除时间将由主保护能够正常切除的100 ms延长至由死区保护或断路器失灵保护动作切除的400 ms。对于发生断路器失灵故障时主保护动作但故障无法切除,以及存在保护死区造成的主保护动作跳开断路器但故障依然没有被隔离的情况,通过以上分析可以得到其主要原因如下。

1)断路器失灵保护判据元件的返回速度慢。与过量保护不同,提高断路器失灵保护动作速度靠的是故障元件的快速返回,从而具备缩短失灵延时定值的条件。过量元件可以不满窗动作,但无法做到不满窗返回,尤其是在电流互感器拖尾无法被避免的情况下,电流元件在断路器跳开拖尾电流后依然

不能返回。断路器失灵保护判据元件的返回速度慢造成断路器失灵延时定值长,是失灵保护动作速度慢的主要原因。

2)断路器动作时间。断路器动作时间是断路器失灵保护需要躲过的时间,极限切除时间在减少,但断路器全开断时间不减少,通过提高继电保护动作速度来达到快速切除故障的目的,首先效果并不明显,其次需要冒很大的可靠性风险。

3)参与环节多。故障切除全过程包括故障所在区域的主保护动作、断路器失灵保护经延时动作、线路保护通道传输、对侧远跳保护动作、对侧操作TJR继电器重动、断路器全开断、不同保护之间衔接时的开入消抖确认和继电器出口,严重影响了速动性。

4)TJR继电器重动。分相跳闸不需要重动,三相跳闸需要经TJR继电器重动,TJR继电器重动耗时约10 ms,如果断路器失灵保护出口和远跳保护出口均采用分相出口,可提高动作速度。

## 2 断路器失灵保护判据优化

拖尾电流<sup>[4]</sup>影响断路器失灵保护电流元件的返回速度,因而限制了断路器失灵保护延时的缩短空间,造成断路器失灵故障切除慢和故障时间长。本文对电流互感器拖尾的物理原理和拖尾电流波形特征进行分析,优化断路器失灵保护的电流判据,使其能够不受拖尾电流影响,在断路器跳开后20 ms内快速返回。

### 2.1 电流互感器拖尾电流的波形特征

在电力系统发生故障时,保护跳闸断路器跳开,理想情况下在电流过零点熄弧切断和一次系统的联系,电流互感器的励磁支路、二次回路形成一阶电路,呈现为零输入响应,该过程中产生的电流即为二次拖尾电流,二次拖尾电流衰减过程如式(1)所示。

$$i_2(t) = Ie^{-t/\tau} \quad (1)$$

$$\tau = L_2/R_2 \quad (2)$$

式中: $i_2$ 为二次电流实时值; $t$ 为时间; $I$ 为断路器跳开后的二次电流初值; $\tau$ 为一阶电路时间常数; $L_2$ 为一阶电路等效电感; $R_2$ 为一阶电路等效电阻。

电流互感器拖尾电流的数学模型为指数函数,呈按指数衰减的特征,其初值为断路器跳开时的二次电流值,由于励磁回路参数与铁芯、磁通饱和度有关,所以拖尾电流的初值和持续时间均无法预知。根据式(1)得到理想的二次拖尾电流波形如图3所示。图中, $I=1$  A; $\tau=200$  ms。由图可见:经过 $\tau$ 后,二次拖尾电流衰减了63.2%,变为0.368 A;经过 $2\tau$ 后,变为了0.135 A;经过 $3\tau$ 后,变为了0.050 A;随着时间的增长衰减也越来越慢。

对式(1)进行拉普拉斯变换可得到其频域公

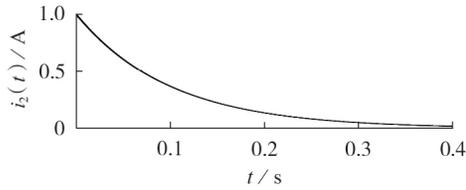


图3 电流互感器拖尾电流波形特征

Fig.3 Wave characteristics of CT tail current

式为:

$$I(f) = \frac{I}{1/\tau + j2\pi f} \quad (3)$$

式中: $I(f)$ 为幅值; $f$ 为频率。

$I(f)$ 是 $f$ 的递减函数, $f=0$ 时 $I(f)$ 取得最大值 $I\tau$ 。 $I_0=1$  A, $\tau$ 分别为0.03、0.06、0.1 s时,根据式(3)可得到理想的二次拖尾电流频谱如图4所示。由图可见,按指数衰减的非周期分量的频谱是连续的,不仅含有直流分量,还有很多的低频分量,集中在 $f < 15$  Hz部分。

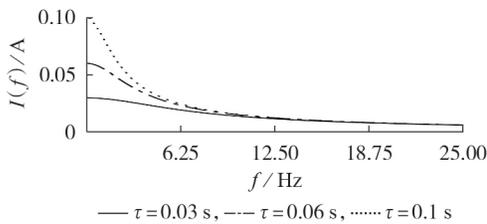


图4 电流互感器拖尾电流频谱特征

Fig.4 Spectrum characteristics of CT tail current

由以上分析可知,拖尾电流产生于断路器断开之后,由于一次系统无流,所以拖尾电流中几乎无工频分量,可以得出以下结论:

1)拖尾电流的直流分量很大,工频分量趋于0,所以直流分量和工频分量的幅值比值较大;

2)正常运行、故障发生时的直流分量和工频分量的幅值比值不大于1。

根据拖尾电流的特征以及正常运行、故障发生时的电流特征区别,可提出直流分量比率制动判据如式(4)所示。

$$B_\varphi > K_{\text{set}} A_\varphi \quad \varphi = A, B, C \quad (4)$$

式中: $A_\varphi$ 为基波幅值; $B_\varphi$ 为直流幅值; $K_{\text{set}}$ 为比率制动判据定值,考虑一定裕度取为1.2; $\varphi$ 为相别。

## 2.2 基于最小二乘法的三点窗滤波器

通过最小二乘法可以获得任意数据窗的基波余弦滤波器和基波正弦滤波器(下文分别简称为余弦滤波器和正弦滤波器)、直流滤波器。本节基于最小二乘法获得三点窗余弦滤波器、正弦滤波器和直流滤波器,使用直流和基波来拟合采样值,输入信号的预设模型选择为:

$$x(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) \quad (5)$$

式中: $x(t)$ 为实时值; $I_0$ 为直流分量幅值; $I_1$ 为工频分量幅值; $\omega$ 为工频角频率; $\alpha_1$ 为工频分量初相角。

则有:

$$x(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t) \cos \alpha_1 + I_1 \cos(\omega t) \sin \alpha_1 \quad (6)$$

$t$ 取值为 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 时可得:

$$\begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega T_1) & \cos(\omega T_1) \\ 1 & \sin(\omega T_2) & \cos(\omega T_2) \\ 1 & \sin(\omega T_3) & \cos(\omega T_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \cos \alpha_1 \\ I_1 \sin \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(T_1) \\ x(T_2) \\ x(T_3) \end{bmatrix} = \mathbf{X} \quad (7)$$

由式(7)可解出未知数矩阵,如式(8)所示。

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \cos \alpha_1 \\ I_1 \sin \alpha_1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x(T_1) \\ x(T_2) \\ x(T_3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_a \\ \mathbf{Y}_c \\ \mathbf{Y}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega T_1) & \cos(\omega T_1) \\ 1 & \sin(\omega T_2) & \cos(\omega T_2) \\ 1 & \sin(\omega T_3) & \cos(\omega T_3) \end{bmatrix}^{-1} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{Y}_a$ 为直流滤波器系数; $\mathbf{Y}_c$ 为余弦滤波器系数; $\mathbf{Y}_s$ 为正弦滤波器系数。

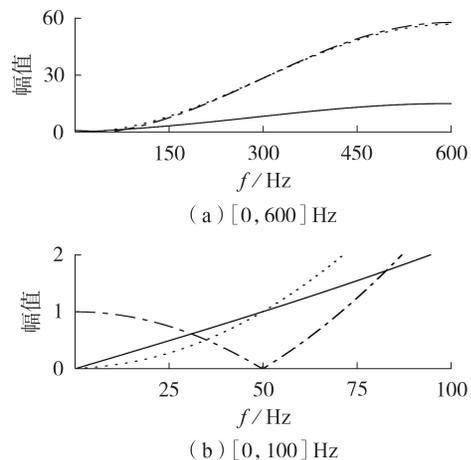
三点窗正弦、余弦滤波器的公式为:

$$I_1 = |\mathbf{Y}_c \mathbf{X} + j \mathbf{Y}_s \mathbf{X}| \quad (10)$$

三点窗直流滤波器的公式为:

$$I_0 = |\mathbf{Y}_a \mathbf{X}| \quad (11)$$

当系统频率为50 Hz、采样率为1200时,有 $T_1=0$ 、 $T_2=0.833333$  ms、 $T_3=1.666667$  ms,代入上述公式可以得到相应的幅频响应。余弦滤波器、正弦滤波器和直流滤波器在 $[0, 600]$  Hz和 $[0, 100]$  Hz频率范围内的幅频响应分别如图5(a)、(b)所示。由图5(a)可见,3种滤波器对高次谐波的滤除能力均较差;由图5(b)可见,余弦滤波器和正弦滤波器能够很好地滤除直流分量,而直流滤波器能够很好地滤除基波分量。



— 正弦滤波器, ..... 余弦滤波器, --- 直流滤波器

图5 不同频率范围内的三点窗滤波器幅频响应  
Fig.5 Amplitude-frequency response of three-point window filters in different frequency ranges

### 2.3 基于最小二乘法的三点窗直流分量比率制动判据

根据三点窗余弦、正弦和直流滤波器的幅频响应,仿照基于全周傅氏算法的直流分量比率制动原理,可以得到基于最小二乘法的三点窗直流分量比率制动判据为:

$$B_{\varphi,3} > K_{\text{set},3} A_{\varphi,3} \quad \varphi = A, B, C \quad (12)$$

式中: $A_{\varphi,3}$ 为采用式(10)计算得到的基波幅值; $B_{\varphi,3}$ 为采用式(11)计算得到的直流幅值; $K_{\text{set},3}$ 为比率制动判据定值,本文考虑一定裕度取为1.2。

设置延时元件,若式(12)成立10 ms,则判定三点窗直流分量比率制动判据满足。

当 $I \in [1, 20]$  A、 $\tau \in [1, 200]$  ms时,二次拖尾电流经三点窗基波滤波器、直流滤波器得到的基波幅值、直流幅值与 $I$ 的比值及两者的比值如图6所示。由图可见:基波幅值、直流幅值与 $I$ 成正比;基波幅值、直流幅值的比值不受 $I$ 大小影响,随着 $\tau$ 的增加迅速增加,在 $\tau > 2$  ms时大于1.359,随着 $\tau$ 的增加判据灵敏度迅速增加。基于最小二乘法的三点窗直流分量比率制动判据仅与 $\tau$ 有关,与 $I$ 无关,该判据基于三点窗滤波器,满窗为2.5 ms,并增设10 ms延时确认,所以当 $\tau > 2$  ms时,无论 $I$ 多大,均能在20 ms内判断出是否为断路器跳开。

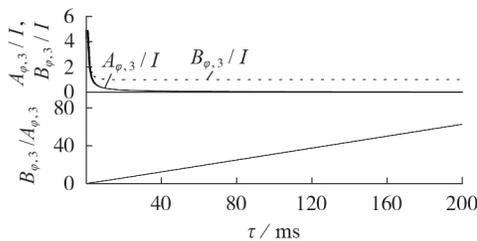
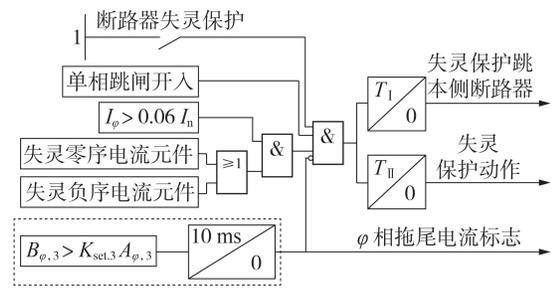


图6  $A_{\varphi,3}/I$ 、 $B_{\varphi,3}/I$ 、 $B_{\varphi,3}/A_{\varphi,3}$ 随 $\tau$ 的变化

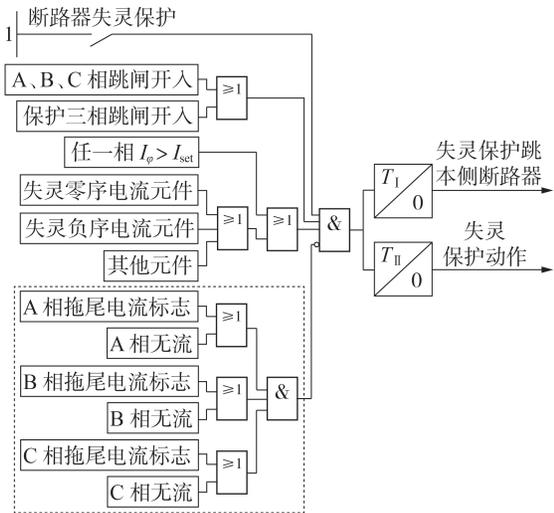
Fig.6 Change of  $A_{\varphi,3}/I$ ,  $B_{\varphi,3}/I$  and  $B_{\varphi,3}/A_{\varphi,3}$  along with  $\tau$

本文将断路器失灵保护判据与拖尾电流识别判据相结合,改进后的断路器失灵保护逻辑如图7所示。图中: $I_{\varphi}$ 为相电流; $I_n$ 为二次额定电流; $I_{\text{set}}$ 为失灵相电流定值; $T_I$ 为失灵保护三跳本断路器时间定值; $T_{II}$ 为失灵保护跳相邻断路器时间定值。其中,改进的单相断路器失灵保护逻辑在原有判据的基础上增加单相拖尾电流标志快速识别故障是否已被切除;三相断路器失灵保护逻辑在原有判据的基础上按相增加拖尾电流标志或无流判据快速识别三相故障是否已被切除。

断路器正常跳开时,如果发生电流互感器拖尾,则改进的断路器失灵保护逻辑能够在20 ms内准确识别拖尾电流,断路器失灵保护动作条件不满足;如果未发生电流互感器拖尾,则改进的单相断路器失灵保护的全周傅氏相电流判据( $I_{\varphi} > 0.06 I_n$ )返回,单相断路器失灵保护动作条件不满足;改进的三相断



(a) 改进的单相断路器失灵保护逻辑



(b) 改进的三相断路器失灵保护逻辑

图7 基于拖尾电流识别判据改进的断路器失灵保护逻辑

Fig.7 Logic breaker failure protection improved by tailing current identification criterion

路器失灵保护的无流判据在20 ms内满足,改进的三相断路器失灵保护动作条件不满足,可保证在20 ms内判断出是否为断路器跳开,极大地优化失灵时间定值的整定。

### 3 仿真实验

设置 $\tau$ 为30、60、200 ms,仿真分析衰减非周期拖尾电流对改进的断路器失灵保护的电流元件的影响。按照极端情况考虑,断路器跳开后的拖尾初始电流约为20%的故障电流峰值,但在电流互感器出现严重饱和情况下跳开断路器时,拖尾电流可能会非常大,超过20%的故障电流峰值,因此仿真时故障电流按照 $20 I_n$ 考虑,90°切除时的初始拖尾电流按照最大 $20 I_n$ 考虑,仿真验证结果如图8所示。故障切除后,式(12)所示判据能快速识别出拖尾电流从而使改进的断路器失灵保护的电流元件返回。基于全周傅氏算法的电流元件的门槛值为 $0.06 I_n$ ,元件返回时间受拖尾电流影响较大。基于全周傅氏一点差分算法的电流元件优于全周傅氏的电流元件,在 $\tau=30$  ms时其返回时间为62 ms,在 $\tau=60$  ms时其返回时间为32.5 ms,在 $\tau=200$  ms时其返回时间为19.5 ms。全周傅氏一点差分算法的本质是先进行

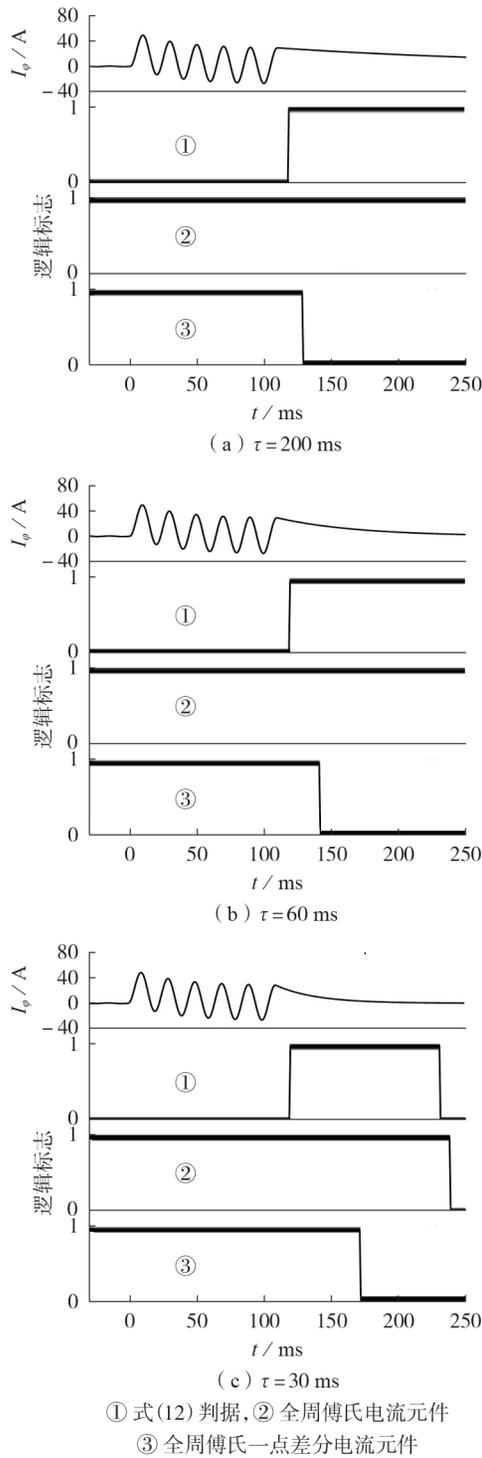


图8 仿真验证结果

Fig.8 Results of simulation verification

一点差分再进行全周傅氏滤波,在 $\tau$ 较大时一点差分能够消除大量的非周期分量,效果较好,在 $\tau$ 不大时,一点差分后的非周期分量依然较大,效果不理想,因此全周傅氏一点差分算法只在 $\tau$ 较大这种特定情况下有效,可靠性不足。

当出现拖尾电流时,拖尾电流识别判据在20 ms内可准确识别,当没有拖尾电流时,全周傅氏电流元件也能满足在20 ms内可靠返回,从而大幅缩短断

路器失灵保护整定延时,加快断路器失灵保护动作速度。

## 4 装置设计

### 4.1 综合集成的断路器失灵保护

将综合集成的断路器失灵保护应用于500 kV电压等级的3/2接线的断路器,按照一个断路器串双重化配置,集成断路器失灵保护功能、远跳保护功能,具备两路和对侧保护通信的纵联光口,可以实现两侧远跳信号的专用通道传输,其工程配置情况如附录A图A1所示。综合集成的断路器失灵保护支持接入1个线变串、线线串,也支持仅1条变压器支路或仅1条线路支路的不完整串;采集3台断路器的电流和2条支路上的电压;接收本串相关支路保护和2个母线保护的启失灵信号;支持通过纵联通道接收对侧的远跳信号,经就地判据后远跳保护动作,通过电缆分相直跳本串相关断路器;支持由过程层面向通用对象的变电站事件(GOOSE)网络接收其他串断路器失灵保护的跳闸命令,经启动判别后,失灵直跳保护动作,通过电缆分相直跳本串相关断路器,通过GOOSE网络向其他串断路器失灵保护发送跳闸命令,通过纵联通道向对侧发送远跳命令。相比于传统的按断路器配置的断路器失灵保护,综合集成的断路器失灵保护具有以下改进。

1) 优化断路器失灵保护判据,缩短失灵延时定值。

采用本文的改进断路器失灵保护,无论断路器跳开后是否存在拖尾电流,均能在20 ms内返回,所以失灵动作延时定值 $t_{set1}$ 可以减少,如式(13)所示。

$$t_{set1} = t_I + t_{II} + t_{III} \quad (13)$$

式中: $t_I$ 为断路器全开断时间; $t_{II}$ 为失灵电流元件返回时间; $t_{III}$ 为电流计算、保护开入识别、程序执行等环节的时间裕度。 $t_I$ 按最大60 ms考虑; $t_{II}$ 在采用改进的断路器失灵保护后可取为20 ms; $t_{III}$ 按10 ms考虑。则采用改进的断路器失灵保护后, $t_{set1}$ 可以按照90 ms考虑。

断路器失灵保护接收跳令开入启失灵信号的消抖时间一般为5~8 ms,由于失灵动作延时整定考虑的起点为断路器收到跳令,开入消抖的时间会造成断路器失灵保护动作时间的损失。由于断路器失灵保护为带延时确认的保护,其可采用未经消抖的开入作为断路器失灵故障判别的计时起点。失灵动作延时定值的裕度取决于失灵判据能够有效返回的时间,失灵判别的计时起点为未经消抖的启失灵信号开入,发生单相故障时,式(12)所示判据被满足同时断路器失灵保护闭锁,在发生三相故障时三相均有式(12)所示判据被满足或无流时断路器失灵保护

闭锁。按照采样率为1200进行分析,由断路器跳开后的3个数据点判断是否满足式(12)所示判据,若判据满足,经过10 ms延时确认后闭锁断路器失灵保护,整个过程约为12.5 ms,无流判据采用半周差分满窗11 ms动作,取一定裕度,断路器在经60 ms跳开时,断路器失灵保护在75 ms能够可靠返回,因此失流动作延时定值时间为90 ms时,存在15 ms的裕度。

2)减少传输环节。

由本文第1节的分析可知,发生死区故障或者断路器失灵故障时,切除故障的全过程需要多个保护装置接力完成,不同保护之间的衔接需要开入消抖确认和继电器出口时间,严重影响了速动性。采用综合集成的断路器失灵保护,故障切除全过程参与装置从原来的主保护、断路器保护、线路保护、对侧线路保护、对侧远跳保护(共计5个),变为了主保护、断路器失灵保护、对侧断路器失灵保护(共计3个),减少了多个开入消抖和继电器动作时间环节。

3)优化通道传输。

通过优化传输环节也可提升故障切除速度。图1中的 $t_5$ 按45 ms考虑,是考虑使用复用通道和线路长度的最大延时,以及线路保护的开入消抖和继电器动作时间。采用集成纵联通道的断路器失灵保护无需考虑开入消抖和继电器动作时间,其采用专用的光纤通道,基于500 kV线路的长度,通道传输时间可考虑为10 ms。

4)优化远跳就地时间定值整定。

远方跳闸的就地判据包括电流变化量、零序电流、负序电流、零序电压、负序电压、低电流、分相低功率因数、分相低有功元件,其需保证对各种故障有足够的灵敏度。在就地判据满足且收信,经整定延时确认后远跳保护动作,远跳经故障判据延时通常整定为30 ms,通常就地判据已有20 ms的确认时间,远跳就地时间定值可整定为0。

5)采用分相出口。

综合集成的断路器失灵保护装置设计为按断路器分相出口,不经操作箱的TJR继电器重动,减少约10 ms的重动耗时。以图A1中点 $F_2$ 发生A相接地故障为例,对应的断路器失灵保护动作时序见图9。

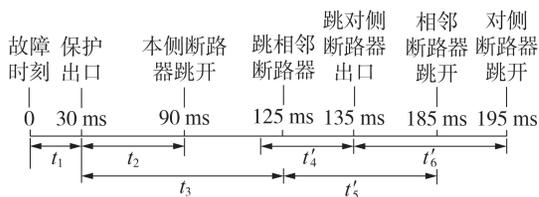


图9 点 $F_2$ 发生A相接地故障时,断路器失灵保护的  
动作时序

Fig.9 Action Sequence of breaker failure protection when phase-A grounding fault occurs at  $F_2$

图9中: $t_1$ 按照30 ms考虑; $t_2$ 按60 ms考虑;综合集成的断路器失灵保护可整定断路器失灵保护动作延时为90 ms,不考虑断路器保护装置对跳令开入的消抖确认,仅考虑出口继电器的动作时间, $t_3$ 按95 ms考虑; $t_4$ 为远跳命令的通道传输时间,由通道传输和继电器动作两部分组成,按15 ms考虑; $t_5$ 为相邻断路器从收到跳令到跳开的时间,采用分相出口后,可以按60 ms考虑; $t_6$ 为对侧断路器失灵远跳出口跳开对侧断路器的时间,采用分相出口后,可以按60 ms考虑。故障切除时间理论上为195 ms。

4.2 综合集成的断路器死区失灵保护

综合集成的断路器失灵保护将死区故障等同于失灵故障处理,针对具备改造为双侧电流互感器条件的500 kV变电站,在原来的综合集成的断路器失灵保护增加专门针对死区保护的逻辑,综合集成的断路器失灵死区保护装置如附录A图A2所示。

综合集成的断路器失灵死区保护装置采集3台断路器的两侧电流互感器的电流,构成基于差动原理的3台断路器死区差动保护。死区差动保护动作后跳相邻断路器,断路器1死区差动保护动作跳断路器5041、5042;断路器2死区差动保护动作跳本串的3台断路器;断路器3死区差动保护动作跳断路器5042、5043。对于主变间隔,通过主变保护的失灵联跳功能跳开主变各侧;对于线路间隔利用光纤通道直接远跳对侧断路器,该装置支持2路光纤接口,可完成线线串分别和对侧2条线路对侧装置通信的功能。

以图A2中点 $F_2$ 发生A相接地故障为例,其故障时序如图10所示。图中: $t'_1$ 为死区差动保护动作出口时间,按30 ms考虑; $t'_2$ 为断路器从收到跳令后到跳开的时间,由固有动作时间和灭弧时间两部分组成,按60 ms考虑; $t'_3$ 为远跳命令的通道传输时间,由通道传输和继电器动作两部分组成,按15 ms考虑; $t'_4$ 为对侧断路器失灵死区保护的远跳出口跳开对侧断路器的时间,采用分相出口后,可以按60 ms考虑。故障切除时间理论上为100 ms。

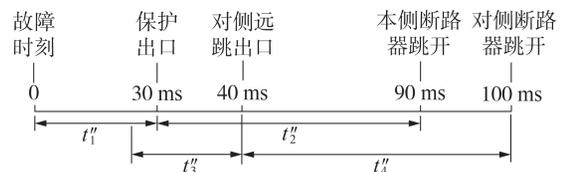


图10 死区差动保护动作时序

Fig.10 Action sequence of dead zone differential protection

4.3 测试验证

2种装置均进行了第三方检测机构测试,测试平台在实时数字仿真系统(RTDS)上建立。仿真系

统 RTDS 模型接线图和线路参数分别如附录 A 图 A3 和表 A1 所示。在整个试验过程中,所有断路器跳开后均有电流互感器拖尾。模拟各故障点、各种类型的故障,相关断路器跳开后,电流互感器产生不同程度的拖尾电流。断路器失灵保护优化专项集中除了测试保护装置在各类情况下的动作行为正确性之外,重点检测装置的整组动作时间。动作时间测试标准如下。

1) 断路器失灵保护:发生死区故障、失灵故障时,甲站、乙站断路器跳开时间均在 200 ms 以内。

2) 死区差动保护:死区故障时,甲站、乙站断路器跳开时间均满足 110 ms 内跳开。

3) 测试中断路器开断时间为 60~125 ms,模拟其他保护启失灵出口时间为 30 ms。断路器开断时间大于 60 ms 则认为断路器失灵,允许保护装置动作跳开本侧相邻及对侧断路器。

附录 A 图 A4 为模拟断路器失灵及断路器正确跳开后发生拖尾情况时的装置录波。图 A4(a) 为发生 A 相故障后,其他保护动作发 A 相跳令后断路器开断时间大于 120 ms,断路器失灵保护整定时间为 90 ms,断路器失灵保护在 91.5 ms 动作情况下的装置录波。故障初始时 A 相有较大的非周期分量,A 相电流全偏,此时 A 相基波幅值与直流幅值较为接近,比值约为 1,随着非周期分量的衰减,A 相直流幅值迅速下降,故障开始至故障结束过程中不满足拖尾判据,A 相拖尾标志不动作。图 A4(b)~(d) 分别为  $\tau$  为 30、60、200 ms 时,发生 A 相故障,其他保护动作发 A 相跳令,断路器 60 ms 切除故障,初始电流为  $20 I_n$ ,衰减时间常数断路器失灵保护整定时间 90 ms,A 相拖尾标志在 75 ms 前动作,失灵判据返回,断路器失灵保护不动作情况下的装置录波。故障初始至断路器跳开期间,A 相基波幅值、A 相直流幅值的情况与图 A4(a) 相同;断路器跳开 A 相发生电流互感器拖尾时,A 相拖尾标志在三点满窗后立即动作,经 10 ms 确认后,A 相拖尾标志在 75 ms 前置位,失灵判据返回,断路器失灵保护不动作。

经第三方检测,综合集成的断路器失灵保护和断路器死区失灵保护满足功能设计及指标要求。根据本方案研制的站域失灵保护装置正在河南进行挂网试运行,截至目前运行情况良好。

## 5 结论

本文提出了一种基于拖尾电流识别的断路器失灵保护优化方案,解决了电流互感器拖尾对断路器失灵保护的影响。仿真验证证明该方案的断路器失灵保护电流元件能够在 20 ms 内识别出拖尾电流,使断路器失灵保护电流元件快速返回。在此基础上可缩短断路器失灵保护的整定延时,加快断路器失灵保护的動作速度。

根据所分析的影响断路器失灵保护及死区保护动作速度的原因,设计了综合集成的断路器失灵保护,通过优化保护功能的配置,应用改进的失灵判据,综合集成的断路器失灵保护在 500 kV 变电站发生断路器失灵或死区故障时能够在 200 ms 内切除故障。针对具备改造为双侧电流互感器条件的 500 kV 变电站,设计了综合集成断路器失灵死区保护,利用差动保护可在 110 ms 内快速切除死区故障。经检测,综合集成的断路器失灵保护和综合集成的断路器死区失灵保护满足功能设计及指标要求。根据本方案研制的保护装置已进行挂网试运行,截至目前运行情况良好。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 陈永昕,尹项根,张哲,等. 基于邻域信息的 3/2 接线按串配置断路器保护方案及实现方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):218-223.  
CHEN Yongxin, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. String-based circuit breaker protection construction scheme based on neighborhood information under existing 3/2 connection mode and its implementation method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12):218-223.
- [2] 吴雨,柯联锦. 高压电网死区保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(6):148-154.  
WU Yu, KE Lianjin. A survey of relay protection for high voltage dead-zone fault[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6):148-154.
- [3] 余江,周红阳,陈朝晖,等. 计及系统稳定需求的 500 kV 断路器失灵及死区保护优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(2):142-146.  
YU Jiang, ZHOU Hongyang, CHEN Zhaohui, et al. Improvement of 500 kV breaker failure and dead-zone prevention based on requirement on stability of grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2):142-146.
- [4] 陈国平,王玉玲,王德林,等. 基于站域信息缩短 3/2 接线失灵(死区)故障切除时间的策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(21):119-124.  
CHEN Guoping, WANG Yuling, WANG Delin, et al. Strategy of shortening circuit breaker failure and dead zone removal time for 3/2 breaker connection based on substation area information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21):119-124.
- [5] 景柳铭,王宾,董新洲,等. 高压直流输电系统连续换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):116-123.  
JING Liuming, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Review of consecutive commutation failure research for HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):116-123.
- [6] 李晓栋,徐政,胡四全,等. 3 种混合直流输电系统的交流故障特性对比[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):228-235.  
LI Xiaodong, XU Zheng, HU Siqian, et al. Comparison of AC fault characteristics among three types of hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):228-235.
- [7] 石正,许寅,吴翔宇,等. 交直流混联电网系统保护策略核校与辅助决策方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):25-31.  
SHI Zheng, XU Yin, WU Xiangyu, et al. Assessment of system protection strategy and aided decision scheme for AC/

DC hybrid power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 25-31.

[8] 张晓彤, 陈青, 孙梦璇, 等. 针对智能变电站二次回路故障的高压断路器故障追踪[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 212-217, 224.

ZHANG Xiaotong, CHEN Qing, SUN Mengxuan, et al. Fault tracking of high-voltage circuit breakers in case of secondary circuit faults in intelligent substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 212-217, 224.

#### 作者简介:



董新涛(1987—),男,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: xjtc\_dongxintao@126.com)。

(编辑 任思思)

## Criterion of breaker failure protection based on identification of tail current

DONG Xintao<sup>1</sup>, LI Baowei<sup>1,2</sup>, ZHAO Jiansong<sup>1</sup>, FANG Zheng<sup>1</sup>, LI Xu<sup>1</sup>, DENG Maojun<sup>1</sup>

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The main reasons that affect the operation time of breaker failure protection are analyzed. Aiming at the problem that failure current criterion is affected by the CT (Current Transformer) tail current, the DC (Direct Current) ratio restraint criterion is proposed, which calculates the fundamental wave amplitude and DC amplitude by using three-point window algorithm based on least square method. The simulation verification shows that when CT tail occurs, the criterion can block breaker failure protection within 20 ms, eliminating the adverse effect of the tail current. In order to solve the problem of multiple intermediate links of breaker failure protection and repeat relay of the failure outlet, some methods such as protection configuration optimization, comprehensive integration of protection functions, using dedicated pilot channels, inter-tripping time optimization, and adopting split-phase outlets are put forward to reduce the protection devices involved in the whole process of breaker failure protection and dead zone protection, and improve the operation speed of breaker failure protection and dead zone protection. The comprehensive integrated breaker failure protection scheme is designed, which can quickly remove breaker failure and dead zone faults within 200 ms. The comprehensive integrated breaker failure and dead zone protection is designed, in which, the difference logic specifically for the dead zone protection is added, and the dead zone fault could be removed quickly within 110 ms by using the differential protection. Both of the two schemes have passed the third-party testing, which verifies the feasibility of the scheme.

**Key words:** breaker failure protection; least square method; DC ratio restraint criterion; comprehensive integrated breaker failure and dead zone protection; relay protection

# 附录 A

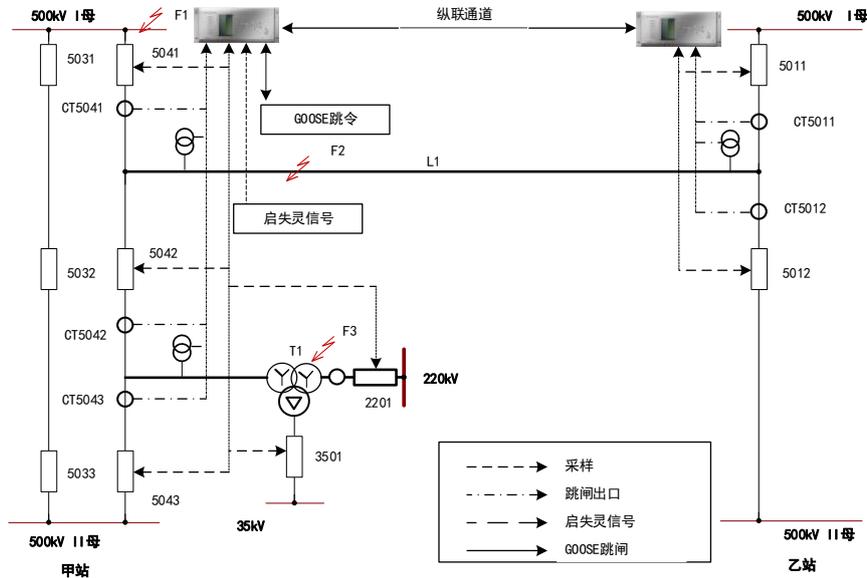


图 A1 断路器失灵保护工程配置示意图

Fig.A1 Engineering configuration of breaker failure protection in substation

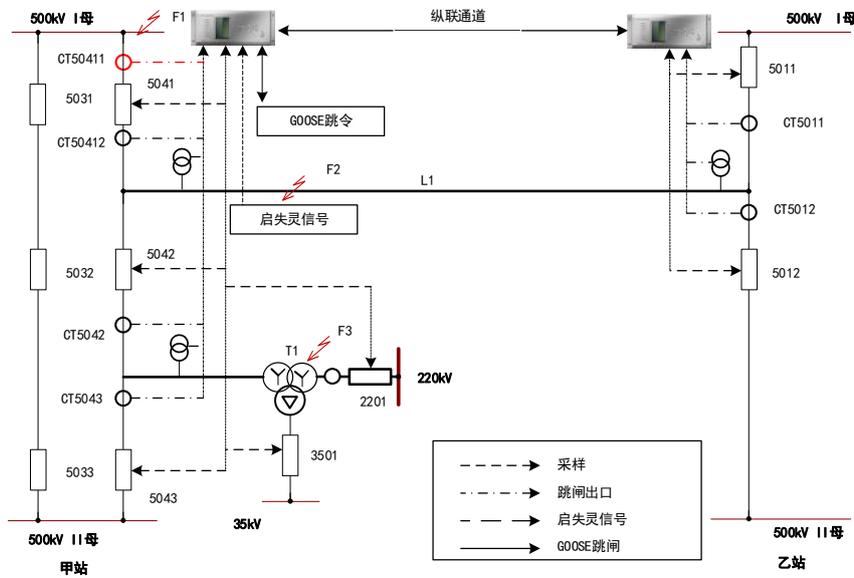


图 A2 断路器失灵死区保护工程配置图

Fig.A2 Engineering configuration of breaker failure and dead zone protection in substation

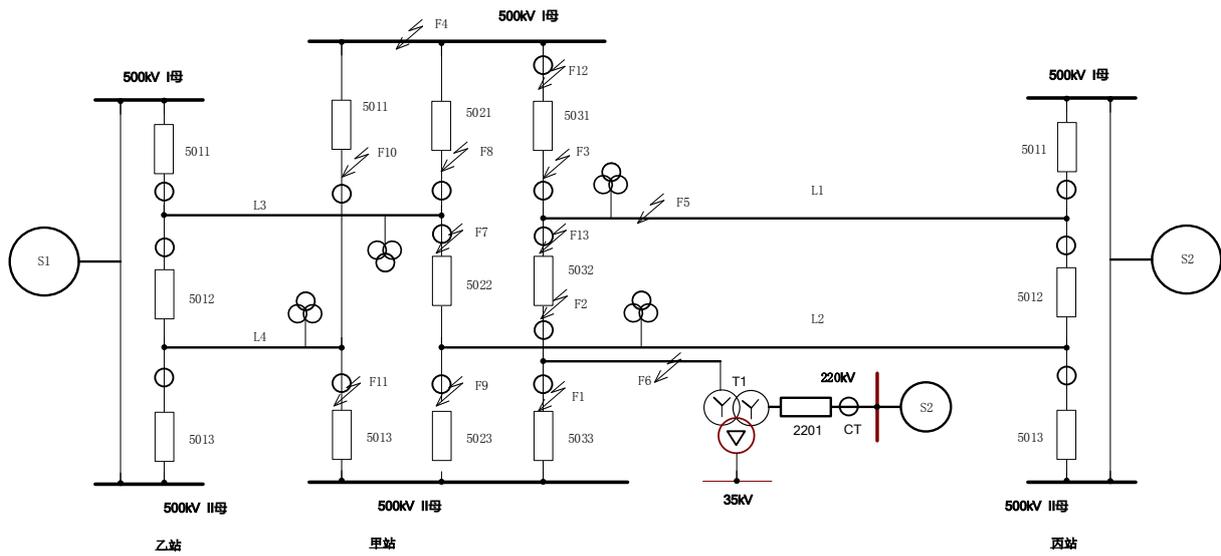


图 A3 RTDS 模型系统图

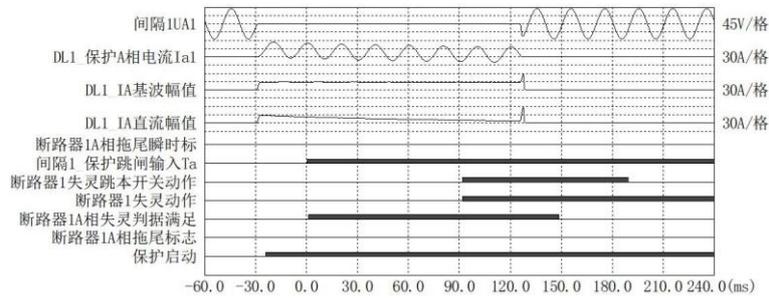
Fig.A3 Power system model based on RTDS simulation

表 A1 500kV 同杆并架线路参数表

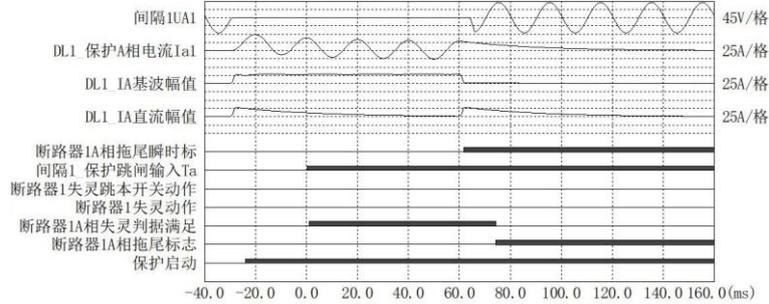
TableA1 Parameters of 500kV parallel transmission lines

正序参数			零序参数			互感参数 $X_m/\Omega$
$X_1/\Omega$	$\varphi_1/(^\circ)$	$C_1/\mu F$	$X_0/\Omega$	$\varphi_0/(^\circ)$	$C_0/\mu F$	
0.26	85.2	0.0132	1.45	81.8	0.0055	0.554

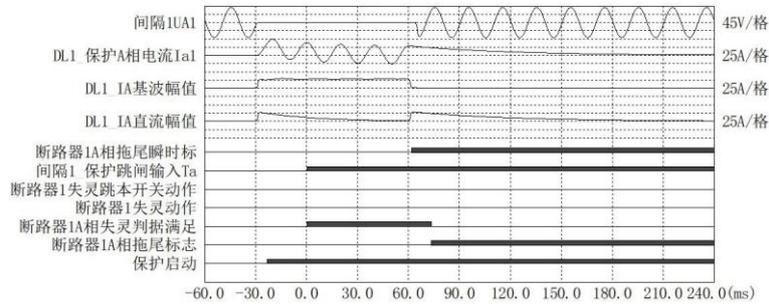
注： $X_1$ 、 $\varphi_1$ 、 $C_1$  分别为单位长度线路（1km）的正序感抗、正序灵敏角、正序电容； $X_0$ 、 $\varphi_0$ 、 $C_0$  分别为单位线路长度的零序感抗、零序灵敏角、零序电容； $X_m$  为单位线路长度的零序互感。



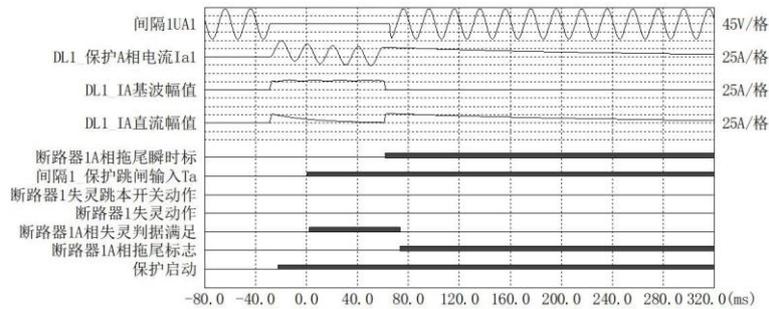
(a) 故障电流为  $20I_n$ ，模拟断路器失灵故障



(b) 初始拖尾电流为  $20I_n$ ， $90^\circ$  切除， $\tau = 30\text{ms}$



(c) 初始拖尾电流为  $20I_n$ ， $90^\circ$  切除， $\tau = 60\text{ms}$



(d) 初始拖尾电流  $20I_n$ ， $90^\circ$  切除， $\tau = 200\text{ms}$

图 A4 保护装置故障录波

Fig.A4 Fault recording of protection device