

# 中压侧双极短路故障下改进型ISOP直流变压器的 参数关系和直流电抗器电感计算

王志刚<sup>1,2,3,4</sup>, 侯凯<sup>1,2,3,4</sup>, 王小红<sup>1,2,3,4</sup>, 梁帅奇<sup>1,2,3,4</sup>, 王国宁<sup>1,2,3,4</sup>, 曾肖明<sup>1,2,3,4</sup>, 徐建松<sup>1,2,3,4</sup>

1. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106;
2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106;
3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;
4. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**讨论了改进型输入串联输出并联(ISOP)直流变压器发生双极短路故障时的电气特性和各个参数之间的关系。根据直流故障穿越的特性,在小时间尺度内,将中压侧直流电抗器电感作为因变量,推导了其与其他参数变量的显式方程,并提出了一定约束条件下的简化计算方法,更加有利于工程应用。工程应用结果验证了所提计算方法的准确性。

**关键词:**改进型ISOP;直流变压器;直流电抗器;中压短路故障;故障穿越;参数关系;计算方法;显式方程

**中图分类号:**TM 41;TM 47

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202202033

## 0 引言

近年来随着电力电子技术的发展,以及风光储、充电桩和数据中心等直流电源和直流负荷的大规模接入,中压直流配电技术蓬勃发展。直流变压器DCT(Direct Current Transformer)作为中压直流配电网中的关键设备,能够实现不同直流电压等级的电网互联、直流电压大变比变换、功率控制、电气隔离等功能。另外,随着直流配电网对可靠性和自愈性要求的提高,在直流变压器自身发生故障<sup>[1-2]</sup>或直流系统发生故障时<sup>[3-4]</sup>,要求直流变压器具有故障隔离和故障穿越能力。

当前工程实践中应用最多的是基于输入串联输出并联ISOP(Input Series Output Parallel)拓扑的直流变压器<sup>[5]</sup>(下文简称ISOP直流变压器),ISOP直流变压器具有高效率、模块化设计、易维护等优势,但是传统ISOP拓扑在面对模块冗余和直流系统故障时显得无能为力,因此改进型ISOP直流变压器<sup>[6]</sup>应运而生,其中最典型的结构是在每一级模块前增加半桥结构和直流电抗器<sup>[7-8]</sup>,该结构与增加平波电抗器的模块化多电平换流器MMC(Modular Multilevel Converter)类似<sup>[9-10]</sup>。文献[11-14]对MMC直流侧双极短路故障进行了机理分析和公式推导,但MMC双极短路故障下,毫秒级保护和几千安培的短路注入电流并不适用于故障穿越型直流变压器的设计。文献[15]针对MMC-ISOP型电力电子变压器(PET)的

中压母线短路故障隔离技术进行了探讨,其在200 μs内实现故障阻断,但是并未详述混合串接的ISOP型直流变压器的参数设计,更未涉及直流电抗器的设计原则。文献[16]探讨了直流变压器故障穿越方法,但是也并未对涉及故障穿越性能的中压侧电抗的取值方法进行研究。文献[17-18]通过大量的仿真数据来确定限流电抗器电感,并未明确给出其计算方法。文献[19]给出了柔性直流输电(VSC-HVDC)系统的直流电抗器电感设计方法,但是MMC闭锁后,交流系统侧依然会向短路点注入短路电流,并不能阻断短路电流的上升趋势,而纯直流系统不存在这样的问题,因此电感的设计原则与中压直流配电系统的直流变压器不同。

对于直流变压器而言,要求发生中压侧双极短路故障时注入系统的故障电流非常小(一般小于功率器件的额定电流),因此对闭锁时间要求苛刻,须要在更小的时间尺度下研究各可变参数之间的关系。本文基于改进ISOP拓扑结构,根据当前直流配电网对中压直流故障穿越的特定要求,重点分析与故障穿越紧密相关的半桥和直流电抗器部分,分析中压侧双极短路故障(下文简称中压短路故障)下的电气特性,研究系统中各可变参数之间的关系;以中压侧直流电抗器电感为因变量,通过分析给出直流电抗器电感的计算方法;通过对隐式方程进行必要的简化推导出显式方程,从而更便于工程应用。

## 1 中压短路故障过程

与传统的ISOP直流变压器相比,改进型ISOP直流变压器在前级串入了半桥和直流电抗器,因此在正常工作时,电流也会通过半桥和直流电抗器,如图1所示。图中: $n$ 为改进型ISOP直流变压器中串

收稿日期:2021-02-27;修回日期:2021-12-29

在线出版日期:2022-02-22

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(SG NR0000KJJS1808009)

Project supported by the Science and Technology Project of Headquarters of SGCC(SG NR0000KJJS1808009)

联子模块的总数; $Q_{i1}$ 、 $Q_{i2}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 分别为子模块  $i$  的半桥上管、下管 IGBT;  $D_{i1}$ 、 $D_{i2}$  分别为  $Q_{i1}$ 、 $Q_{i2}$  的反并联二极管;  $C_{i1}$  为子模块  $i$  的中压侧电容, 记  $C$  为中压侧等效电容, 则有  $C=(C_{11}+C_{21}+\dots+C_{n1})/n$ ;  $L_y$  为外置直流电抗器电感,  $L_x$  为线路等效电抗电感, 记  $L$  为中压侧等效电抗器电感, 则有  $L=L_x+L_y$ ;  $R$  为整个短路回路的等效电阻;  $u_{mv}$  为中压侧直流母线电压。

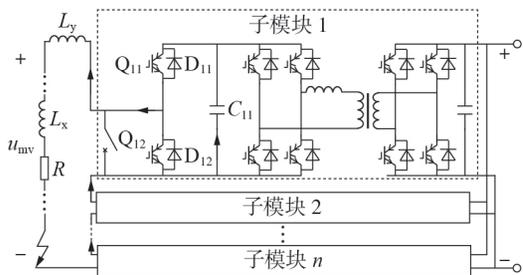


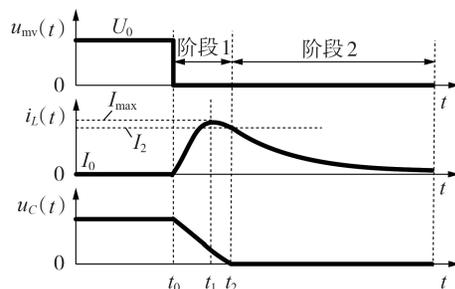
图1 改进型ISOP直流变压器及中压短路故障示意图

Fig.1 Schematic diagram of improved ISOP type DCT and medium voltage short circuit

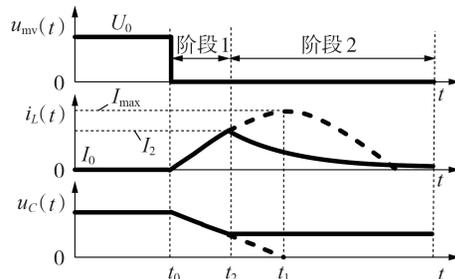
不同的算法对应不同的IGBT控制方式,例如半桥控制算法只在发生故障时运行,正常工作时,全部的半桥上管  $Q_{11}—Q_{n1}$  导通,全部的半桥下管  $Q_{12}—Q_{n2}$  关断;采用移相脉冲宽度调制(PWM)控制算法时,半桥上管  $Q_{11}—Q_{(n-2)1}$  导通、 $Q_{(n-1)1}—Q_{n1}$  关断,对应地,半桥下管  $Q_{12}—Q_{(n-2)2}$  关断、 $Q_{(n-1)2}—Q_{n2}$  导通。但是无论采用何种控制方式,在稳定控制周期内半桥的总输出直流电压与直流母线电压接近,即保持为额定电压附近的平衡值,因此对分析中压短路故障过程基本不影响。为便于阐述和分析,本文假定所有子模块的半桥在正常工作时均为上管  $Q_{11}—Q_{n1}$  导通、下管  $Q_{12}—Q_{n2}$  关断,如图1所示。

改进型ISOP直流变压器的中压短路故障过程与传统ISOP直流变压器相同,分为  $C_{11}—C_{n1}$  放电、 $D_{12}—D_{n2}$  续流2个阶段(分别记为阶段1、阶段2)。但2种直流变压器的阶段转换时刻不同,具体如图2所示。图中: $t_0$ 为发生中压短路故障的时刻; $t_1$ 为中压短路电流达到最大值  $I_{max}$  的时刻; $t_2$ 为阶段1转入阶段2的时刻; $I_2$ 为  $t_2$ 时刻的中压短路电流; $i_L$ 为中压短路电流; $u_C$ 为中压侧等效电容电压。

为便于推导和说明,图2(a)、(b)中均假设中压侧直流母线的初始电流  $I_0=0$ 、初始电压为  $U_0$ 。 $t_0$ 时刻前,直流变压器正常工作,在  $t_0$ 时刻进入阶段1。对于传统ISOP拓扑直流变压器,  $u_C$ 在  $t_2$ 时刻降低至0,被动进行状态切换。对于改进型ISOP直流变压器,  $t_2$ 时刻  $u_C$ 并未降低至0,而是因半桥上管  $Q_{11}—Q_{n1}$  闭锁而主动进行状态切换。由图2可知,  $I_2$ 为中压短路故障过程2个阶段的共有参数,与故障穿越要求紧密相关,因此在探讨故障穿越相关问题时只需关注阶段1。对于改进型ISOP直流变压器,由于



(a) 传统ISOP拓扑直流变压器



(b) 改进ISOP拓扑直流变压器

图2 发生中压短路故障时,2种直流变压器的参数变化

Fig.2 Parameters change of two types of DCT under medium voltage short circuit

$L_y$ 取值较大,一般满足  $R \ll 2\sqrt{L/C}$ ,因此  $R$ 可忽略不计,令  $t_0=0$ ,则对应的微分方程为:

$$\begin{cases} u_C(t) = U_0 \cos(\beta t) - \frac{I_0}{\beta C} \sin(\beta t) \\ i_L(t) = I_0 \cos(\beta t) + \frac{U_0}{\beta L} \sin(\beta t) \end{cases} \quad (1)$$

还可得:

$$\begin{cases} I_{max} = \sqrt{I_0^2 + \left(\frac{U_0}{\beta L}\right)^2} \\ t_1 = \frac{1}{\beta} \arctan \frac{U_0}{\beta I_0 L} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\beta = 1/\sqrt{LC}$ 。

在  $I_0=0$  的情况下,  $i_L$ 会在  $1/4$ 的谐振周期达到最大值,但是半桥IGBT的主动闭锁提前在  $i_L$ 的爬升过程中就阻断了其上升趋势,使得  $i_L$ 不会达到最大值,因此改进型ISOP直流变压器的  $t_2$ 时刻会极大地超前  $t_1$ 时刻。

## 2 参数隐式关系式与显式关系式

### 2.1 参数隐式关系式

由于在直流变压器出口处发生中压短路故障时情况最恶劣,因此本文假定在改进型ISOP直流变压器出口处发生中压短路故障,则  $L=L_y$ ,由式(1)可得:

$$I_0 \cos\left(\frac{1}{\sqrt{L_y C}} t_2\right) + U_0 \sqrt{\frac{C}{L_y}} \sin\left(\frac{1}{\sqrt{L_y C}} t_2\right) = I_2 \quad (3)$$

式(3)中,  $I_2$ 为设定值,即中压短路电流的最大

允许值,其与故障穿越特性紧密相关,一般由系统规划设计方提出,设定为已知量。稳态下 $U_0$ 等于中压侧额定电压,系统参数确定后其一般是固定值,若有必要 $U_0$ 也可作为自变量进行研究。 $I_0$ 为额定值范围内的某个值,发生中压短路故障时并不会预先知道该值,因此 $I_0$ 也是一个自变量。 $C$ 的取值同时受制于单级子模块的参数设计,可认为是一个有条件约束的自变量。 $t_2$ 一般受制于采样和控制电路的硬件参数,并不能无限制地小,因此也是一个有条件约束的自变量。与传统ISOP直流变压器相比,改进型ISOP直流变压器新增了外置直流电抗器,设计时主要考虑必须满足的故障穿越要求,需要考虑的其他因素不多,相对而言设计要求较为宽松,因此可将 $L_y$ 作为因变量。由此可知,式(3)为一个含多变量的隐式非线性方程,不能直接求解 $L_y$ ,只能利用相应的数学方法得到数值解<sup>[20]</sup>。假设 $C=220\ \mu\text{F}$ , $U_0=20\ \text{kV}$ , $I_2=450\ \text{A}$ ,则通过非线性求解可得到 $L_y$ 、 $t_2$ 和 $I_0$ 之间的关系如图3所示。由图可见: $t_2$ 越长, $L_y$ 越大,两者基本呈线性关系;对于特定的 $t_2$ ,当 $I_0$ 线性增大时, $L_y$ 并未随之呈线性增大的趋势。

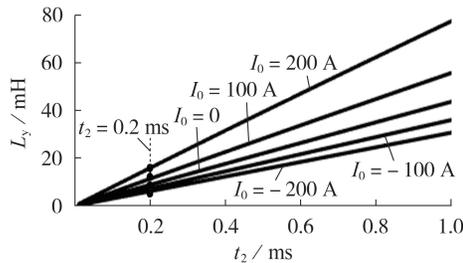


图3  $L_y$ 、 $t_2$ 和 $I_0$ 之间的关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of relationship among  $L_y$ ,  $t_2$  and  $I_0$

当 $t_2=0.2\ \text{ms}$ 时, $L_y$ 和 $I_0$ 之间的关系如图4所示。由图可见,随着 $I_0$ 的增加,所需的 $L_y$ 越来越大, $L_y$ 呈现急剧上升趋势。由此可知,为了在一定时间内将中压短路电流限制在设定值, $I_0$ 越大,需要的 $L_y$ 就越大。类似地, $C$ 和 $U_0$ 对 $L_y$ 的取值也有直接影响。

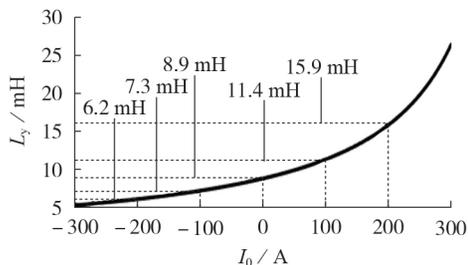


图4 当 $t_2=0.2\ \text{ms}$ 时, $L_y$ 和 $I_0$ 之间的关系示意图

Fig.4 Schematic diagram of relationship between  $L_y$  and  $I_0$  when  $t_2=0.2\ \text{ms}$

$L_y$ 与其他参数的关系如附录A部分1)所示。

## 2.2 式(3)的显式表示

由于式(3)为隐式非线性方程,求解是通过数据计算工具计算得到数值解,从非线性方程本身较难看出各参数间的关系,且不利于工程应用。因此有必要对式(3)进行一定的改造,以求得其显式解。

根据正弦、余弦函数的泰勒展开式,当 $\beta t$ 较小时,高阶分量较小,对正弦、余弦函数影响较小,可以忽略不计,则有:

$$\begin{cases} \sin(\beta t) \approx \beta t - \frac{(\beta t)^3}{3!} \\ \cos(\beta t) \approx 1 - \frac{(\beta t)^2}{2!} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)后求解可得:

$$L_y = \frac{U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C} \pm \sqrt{\left(U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C}\right)^2 - 2(I_2 - I_0) \frac{U_0 t_2}{3C}}}{2(I_2 - I_0)} t_2 \quad (5)$$

由式(5)可知,当 $C$ 取值过小时有:

$$U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C} < 0 \quad (6)$$

则无论式(5)中的“ $\pm$ ”取“+”或“-”,均有 $L_y < 0$ ,导致无解。如果式(5)中的“ $\pm$ ”号取“-”,则当 $C$ 为无穷大时, $L_y=0$ ,该解也是无意义的。将按照式(5)获得的 $L_y$ 值记为 $L_{y2}$ ,则 $L_{y2}$ 可确定为:

$$L_{y2} = \frac{U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C} + \sqrt{\left(U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C}\right)^2 - 2(I_2 - I_0) \frac{U_0 t_2}{3C}}}{2(I_2 - I_0)} t_2 \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C} \geq 0 \\ \left(U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C}\right)^2 - 2(I_2 - I_0) \frac{U_0 t_2}{3C} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

## 2.3 $L_{y2}$ 误差分析

定义 $L_{y2}$ 与 $L_y$ 的相对误差 $\Delta L'_{y2} = (L_y - L_{y2}) / L_y \times 100\%$ 。在 $I_2=450\ \text{A}$ 、 $U_0=20\ \text{kV}$ 、 $C=22\ \mu\text{F}$ 的情况下,当 $t_2 \in [0.1, 1]\ \text{ms}$ 、 $I_0 \in [-200, 200]\ \text{A}$ 时, $\Delta L'_{y2}$ 和 $t_2$ 、 $I_0$ 之间的关系如图5所示。由图可见,在上述设定的 $t_2$ 、 $I_0$ 范围内, $\Delta L'_{y2}$ 曲面平滑无奇点,正向相对误差不超过5%,负向相对误差的绝对值不超过2%。

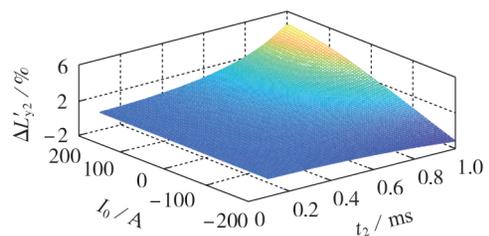


图5  $\Delta L'_{y2}$ 、 $t_2$ 、 $I_0$ 之间的关系示意图

Fig.5 Schematic diagram of relationship among  $\Delta L'_{y2}$ ,  $t_2$  and  $I_0$

在  $I_2=450\text{ A}$ 、 $I_0=100\text{ A}$ 、 $t_2=0.2\text{ ms}$  的情况下,当  $U_0 \in [5, 50]\text{ kV}$ 、 $C \in [22, 220]\text{ }\mu\text{F}$  时,  $\Delta L'_{y2}$ 、 $C$ 、 $U_0$  之间的关系如图6所示。由图可见:在上述设定的  $U_0$ 、 $C$  范围内,正向相对误差不超过2%,无负向相对误差;相对误差较大的地方集中在  $U_0$  和  $C$  取值较小的时刻,且有急速增大的趋势,只要  $U_0$  或  $C$  取值稍大一些,相对误差就能大幅减小;当  $U_0$  从  $5\text{ kV}$  增大至  $10\text{ kV}$  时,  $\Delta L'_{y2}$  从约2%减小为约0.3%;当  $C$  从  $22\text{ }\mu\text{F}$  增大至  $44\text{ }\mu\text{F}$  时,  $\Delta L'_{y2}$  从约2%减小为约0.3%。

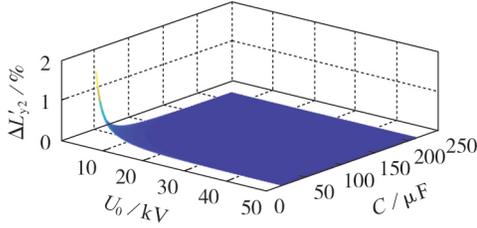


图6  $\Delta L'_{y2}$ 、 $C$  和  $U_0$  之间的关系示意图  
Fig.6 Schematic diagram of relationship among  $\Delta L'_{y2}$ ,  $C$  and  $U_0$

$t_2$  和  $I_0$  的变化对  $L_{y2}$  等其他参数的影响如附录A部分2)所示。

### 3 式(7)的简化

#### 3.1 约束条件下式(7)的简化

对于工程应用而言,式(7)依然较为繁琐,因此在一定条件下对其进行进一步的简化。令:

$$\begin{cases} F_1 = U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C} \\ F_2 = \sqrt{\left(U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C}\right)^2 - 2(I_2 - I_0) \frac{U_0 t_2}{3C}} \end{cases} \quad (9)$$

按照与式(7)的误差不超过10%的要求进行设计,可设定  $F_1$ 、 $F_2$  的误差分别不超过5%、10%,即分别满足式(10)、(11)所示的条件。

$$\text{条件1: } U_0 \geq 10 \frac{t_2 |I_0|}{C} \quad (10)$$

$$\text{条件2: } \left(U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C}\right)^2 \geq 10 \left[2(I_2 - I_0) \frac{U_0 t_2}{3C}\right] \quad (11)$$

根据条件1对  $F_1$  进行简化可得:

$$F_1 = U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C} \approx U_0 \quad (12)$$

根据式(10)可知,  $F_1$  简化前后的误差不超过5%。

根据条件2对  $F_2$  进行简化可得:

$$F_2 \approx \sqrt{\left(U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C}\right)^2} = U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C} = F_1 \quad (13)$$

根据式(11)、(13)可知,式(9)中  $F_2$  的根号内的部分在简化前后的误差不超过10%,则开根号后所得  $F_1$  与  $F_2$  相比误差不超过5%。

综上所述,从  $F_1$  到  $U_0$  经历1次简化,每次简化导致的误差不超过5%;从  $F_2$  到  $U_0$  经历2次简化,每次简化导致的误差不超过5%。由此可知,  $F_2$  简化为  $U_0$  后,导致的误差不超过10%,则式(7)可进一步简化为式(10),简化前后的总误差不超过10%。则有:

$$L_{y2} = \frac{F_1 + F_2}{2(I_2 - I_0)} t_2 \approx \frac{U_0 + U_0}{2(I_2 - I_0)} t_2 = \frac{U_0}{I_2 - I_0} t_2 \quad (14)$$

由于上述简化所使用的误差都是最大误差,实际上不一定在最大误差值处叠加,因此下文将根据实际参数取值范围进行进一步的误差核准。

将利用式(14)进一步简化后所得的  $L_{y2}$  值记为  $L_{y3}$ ,则  $L_{y3}$  与其他参数的显式关系式总结如下:

$$L_{y3} = \begin{cases} \frac{U_0 t_2}{I_2 - I_0} & \text{同时满足条件1、2} \\ \frac{U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C}}{I_2 - I_0} t_2 & \text{不满足条件1但满足条件2} \\ \frac{U_0 + \sqrt{U_0^2 - 2(I_2 - I_0) \frac{U_0 t_2}{3C}}}{2(I_2 - I_0)} t_2 & \text{满足条件1但不满足条件2} \\ \frac{U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C} + \sqrt{\left(U_0 - \frac{t_2 I_0}{2C}\right)^2 - 2(I_2 - I_0) \frac{U_0 t_2}{3C}}}{2(I_2 - I_0)} t_2 & \text{条件1、2均不满足} \end{cases} \quad (15)$$

#### 3.2 $L_{y3}$ 误差分析

定义  $L_{y3}$  与  $L_y$  的相对误差  $\Delta L'_{y3} = (L_y - L_{y3}) / L_y \times 100\%$ 。设定  $I_2=450\text{ A}$ 、 $U_0=20\text{ kV}$ 、 $C=44\text{ }\mu\text{F}$ ,当  $t_2 \in [0.1, 1]\text{ ms}$ 、 $I_0 \in [-200, 200]\text{ A}$  时,  $\Delta L'_{y3}$ 、 $t_2$ 、 $I_0$  之间的关系如图7所示,其为非平滑曲面,这是式(15)中不同条件对应不同的求解公式导致的。由图7可见:在上述参数设定下,  $L_{y3}$  与  $L_y$  相差不大,  $\Delta L'_{y3} < 10\%$ ,满足设定的误差范围;  $\Delta L'_{y3}$  的最大值约为8%,位于突变的截面处,  $t_2=0.45\text{ ms}$ 、 $I_0=200\text{ A}$  附近。

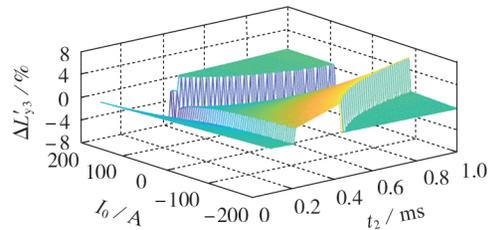


图7  $\Delta L'_{y3}$ 、 $t_2$ 、 $I_0$  的关系示意图  
Fig.7 Schematic diagram of relationship among  $\Delta L'_{y3}$ ,  $t_2$  and  $I_0$

在  $I_2=450\text{ A}$ 、 $I_0=350\text{ A}$ 、 $t_2=0.2\text{ ms}$ 、 $U_0 \in [5, 50]\text{ kV}$ 、 $C \in [22, 220]\text{ }\mu\text{F}$  时,  $\Delta L'_{y3}$ 、 $C$ 、 $U_0$  之间的关系见图8,

其也为非平滑曲线。由图可见:在上述参数设置下,  $L_{y3}$  与  $L_y$  相差不大,  $\Delta L'_{y3}$  小于 10%, 满足设定的误差范围;  $\Delta L'_{y3}$  的最大值约为 6%, 位于突变的截面处。

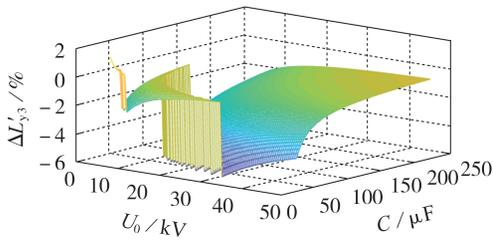


图8  $\Delta L'_{y3}$ 、 $C$  和  $U_0$  之间的关系示意图

Fig.8 Schematic diagram of relationship among  $\Delta L'_{y3}$ ,  $C$  and  $U_0$

综上所述, 在设定的  $C$ 、 $U_0$  和  $t_2$ 、 $I_0$  范围内,  $\Delta L'_{y3}$  均小于 10%, 满足设计要求。

参数  $t_2$  和  $I_0$  的变化对  $L_{y3}$  等其他参数的影响如附录 A 部分 3) 所示。

### 3.3 约束条件分析

3.1 节虽然在一定条件下对式(7)进行了简化, 使得参数关系式相对简单, 但实际上对应的约束条件并不直观。约束条件中包含  $U_0$ 、 $I_2$ 、 $I_0$ 、 $t_2$ 、 $C$  共 5 个参数, 在某个特定的工程中,  $U_0$ 、 $I_2$  一般是事先就确定好的, 因此可分析  $I_0$ 、 $t_2$ 、 $C$  这三个参数之间的关系。其中,  $I_0$  为系统运行参数,  $t_2$ 、 $C$  由用户进行设置, 因此将  $t_2$  和  $C$  其中的 1 个参数作为因变量, 剩余的 1 个参数和  $I_0$  作为自变量, 分析  $I_0$ 、 $t_2$ 、 $C$  间的关系。

设定  $U_0=20$  kV、 $I_2=450$  A, 当  $t_2 \in [0.1, 1]$  ms、 $I_0 \in [-300, 300]$  A 时,  $I_0$ 、 $t_2$ 、 $C$  间的关系如图 9 所示。

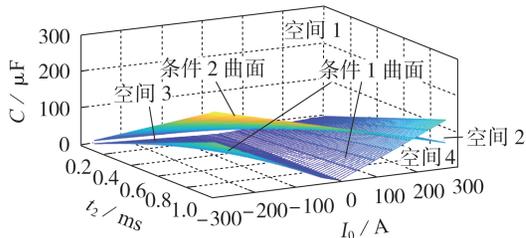


图9  $I_0$ 、 $t_2$ 、 $C$  之间的关系示意图

Fig.9 Schematic diagram of relationship among  $I_0$ ,  $t_2$  and  $C$

由图 9 可见: 条件 1 曲面关于  $I_0=0$  曲面呈镜面对称; 在  $I_0=200$  A 附近, 条件 1 曲面、条件 2 曲面有一定的交叉, 从而将空间分为 4 个部分, 高于 2 个曲面的部分定义为空间 1, 高于条件 2 曲面而低于条件 1 曲面的部分定义为空间 2, 高于条件 1 曲面而低于条件 2 曲面的部分定义为空间 3, 低于 2 个曲面的部分定义为空间 4, 这 4 个空间对应式(15)中从上至下的 4 个约束条件; 实际中, 绝大多数情况位于空间 1, 相当一部分情况位于空间 3、4, 小部分情况位于空间 2, 可见实际情况下基本可通过简化公式进行计算。

随着  $I_0$  逐渐减小, 条件 2 曲面呈上升趋势; 当  $I_0 < 0$  时, 随着  $I_0$  逐渐减小, 条件 1 曲面也呈上升趋势, 故关注设定范围内  $I_0$  最小值对应的曲面即可。

工程应用中  $t_2$  仅受制于控保系统性能, 一般不超过 300  $\mu$ s, 其他参数的取值范围可参照 2.3、3.2 节。即使在  $U_0$  和  $C$  取最小值、 $I_0$  取最大值时, 式(16)也可被满足, 则在实际工程应用中, 式(16)基本都成立。

$$U_0^2 \gg [t_2 I_0 / (2C)]^2 \quad (16)$$

综上所述, 根据条件 1、2 列出的分界线等式关系分别如式(17)、(18)所示。

$$C_1 = 10t_2 |I_0| / U_0 \quad (17)$$

$$C_2 = t_2 [(20I_2 - 17I_0) / (3U_0)] \quad (18)$$

式中:  $C_1$ 、 $C_2$  分别为条件 1、2 对应的  $C$  值。

由于  $I_0$  越小,  $C$  越大, 因此设定  $I_0 = -100$  A, 将  $C$  作为因变量、 $t_2$  作为自变量, 绘制式(17)对应的  $C_1$  曲线和式(18)对应的  $C_2$  曲线, 见图 10。图中: 区域 1 为同时高于 2 条曲线的部分; 区域 3 为高于  $C_1$  曲线而低于  $C_2$  曲线的部分; 区域 4 为低于 2 条曲线的部分。当  $I_0 < 0$  时,  $C_1$  可能大于  $C_2$ , 也可能小于  $C_2$ , 而图 10 对应  $C_1 < C_2$ , 因此图中没有高于  $C_2$  曲线而低于  $C_1$  曲线的部分(即区域 2), 仅存在区域 1、3、4, 这 3 个区域分别对应式(15)中从上到下第 1、3、4 个约束条件。

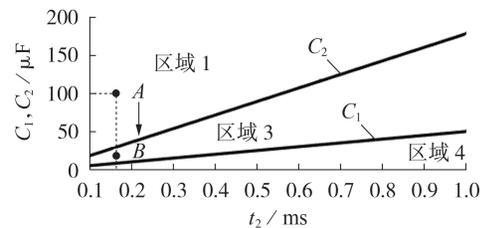


图10  $C_1$  曲线和  $C_2$  曲线的示意图

Fig.10 Schematic diagram of Curve  $C_1$  and  $C_2$

由此可知, 可取控保系统能所达到的  $t_2$  以及当前系统中  $C$  的交汇点, 如图 10 中虚线所示。如果交汇点落在区域 1 (例如点 A), 则采用式(15)中的第 1 个公式; 如果交汇点落在区域 3 (例如点 B), 则采用式(15)中的第 3 个公式。  $t_2$  越小、 $C$  越大, 交汇点越容易落到区域 1。随着宽禁带半导体的应用和电力电子技术高频化的发展, 对直流母线电容值的需求越来越小, 交汇点会逐渐落入区域 3。

传统计算方法将中压侧等效电容看成理想电压源, 将中压短路故障过程看成对电感的线性充电过程, 对应式(15)中的第 1 个公式, 但是根据第 3 节的分析, 式(15)中每个公式都是有约束条件的, 否则会产生较大的误差。在图 9 对应的参数设置下, 传统计算方法的  $\Delta L'_{y3}$  见图 11。由图可见, 传统计算方法的  $\Delta L'_{y3}$  在  $C$  变小时急剧变大, 在点 D ( $I_2=450$  A,  $I_0=350$  A,  $t_2=0.2$  ms,  $U_0=5$  kV,  $C=22$   $\mu$ F) 处达到 60%, 对比图 9 可知, 相同条件下式(15)的  $\Delta L'_{y3}$  只有约 6%。

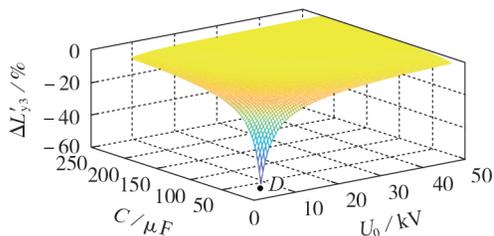


图11 与图9同等条件下,传统计算方法的 $\Delta L'_{y3}$   
Fig.11  $\Delta L'_{y3}$  of traditional calculation method under same conditions as in Fig.9

综上所述,根据式(15)中的约束条件,采用不同的简化公式,可以获得更为准确的结果。

#### 4 实验

以某工程实际参数为例,根据发生中压短路故障时各个参数之间的关系,利用式(15)快速给出直流电抗器电感的建议值。已知系统额定电流为100 A,电压初值 $U_0=20$  kV,双向功率传输。发生故障时短路电流越小,越有利于故障穿越,因此按照控保系统最快闭锁时间设置 $t_2=160 \mu\text{s}$ ,按照子模块工作需要的电容为 $3\,000 \mu\text{F}$ 和中压侧30级串联,可得 $C=100 \mu\text{F}$ 。由图10可知,交汇点落在区域1的中间位置,可采用式(15)中的第1个公式直接进行计算,中压短路电流与闭锁时间呈线性关系。因此可用空载试验工况下的 $I_2=350$  A、 $I_0=0$ ,代替 $I_2=450$  A、 $I_0=100$  A,考虑到裕量50 A,实际取 $I_2=300$  A、 $I_0=0$ ,计算可得 $L_{y3}=10.66$  mH。根据该计算值,实际中取 $L_y=10$  mH,得到中压短路故障试验波形,见附录B图B1。图B1与图2(b)所示的过程对应,在闭锁时间 $160 \mu\text{s}$ 内, $I_2=300$  A,与设计值一致,证明了本文所述直流电抗器电感简化计算方法的有效性。

#### 5 结论

本文讨论了在设计直流变压器中压短路故障穿越功能时,中压侧直流电抗器参数跟其他参数的关系,推导得到更直观的参数显式关系式,提出了在一定误差范围内适用于不同参数的简化方法。本文得到的主要结论如下:

1)若想得到较精确的各参数间的显式关系,则可采用式(7)直接进行参数计算,相对误差不超过 $\pm 5\%$ ;

2)如果需要根据参数关系快速设计参数,则可以通过简化的式(15)及其约束条件进行计算,相对误差不超过 $\pm 10\%$ ;

3)应注意工程用简化公式所带约束条件,闭锁时间越短,越容易满足其约束条件。

本文设置因变量为直流电抗器参数,同理可对任意其他参数进行类似推导。但是本文所述方法在

实际工程应用时,还要结合其他因素的影响,例如电抗器过载时的线性度等,进行综合考虑。

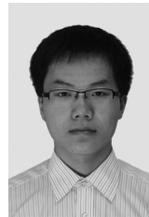
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [1] PAN Yiwei, YANG Yongheng, HE Jinwei, et al. A dual-loop control to ensure fast and stable fault-tolerant operation of series resonant DAB converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10994-11012.
- [2] 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.
- [3] CHEN Wu, FU Xinghe, XUE Chenyang, et al. Indirect input-series output-parallel DC-DC full bridge converter system based on asymmetric pulsewidth modulation control strategy [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3164-3177.
- [4] 章一新, 张建文, 施刚, 等. 一种中压直流短路故障下不间断运行的MMC-SST拓扑及控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2267-2276.  
ZHANG Yixin, ZHANG Jianwen, SHI Gang, et al. Topology and control strategy for an MMC-SST with uninterrupted power supply capability under medium voltage DC short circuit fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2267-2276.
- [5] 张航, 李耀华, 李子欣, 等. 基于扩张状态观测器的直流变压器模型预测控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 104-110.  
ZHANG Hang, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Model predictive control strategy of DC transformer based on extended state observer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 104-110.
- [6] 刘闯, 何达成, 徐鑫哲. 面向直流配电网尾端功率变换的组合式直流变压器研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 43-50.  
LIU Chuang, HE Dacheng, XU Xinzhe. Assembled DC transformer applied to DC distribution tail power conversion[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 43-50.
- [7] 陈东, 梅念, 孙谦浩, 等. 用于HVDC系统互联的高频模块化直流变压器优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 27-32.  
CHEN Dong, MEI Nian, SUN Qianhao, et al. Optimization control strategy of high-frequency modular DC-DC transformer for HVDC system integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 27-32.
- [8] 高泽盟, 李卫国, 杨洪达, 等. 应用于配网的MMC直流双极短路无闭锁故障穿越控制策略[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 274-281.  
GAO Zemeng, LI Weiguo, YANG Hongda, et al. Non-locking fault ride-through control strategy under DC bipolar short circuit of MMC for distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 274-281.
- [9] 李国庆, 杨勇, 辛业春, 等. 一种具有故障阻断能力的改进混合型半桥MMC[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 166-171.  
LI Guoqing, YANG Yong, XIN Yechun, et al. Modified hybrid half bridge MMC with fault blocking capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 166-171.
- [10] 张芳, 杜雪靓, 陈堃. MMC-HVDC系统换流器桥臂短路故障暂态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 180-187.  
ZHANG Fang, DU Xuejing, CHEN Kun. Transient characteristic analysis of converter bridge arm short circuit fault in

- MMC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(5):180-187.
- [11] 王琛,谭开东,王毅,等. 具备直流故障清除和自均压能力的MMC移位全桥子模块拓扑[J]. 电力系统自动化,2020,44(24):151-160.  
WANG Chen,TAN Kaidong,WANG Yi,et al. Topology of MMC oblique-connection full-bridge sub-module with capability of DC fault clearing and voltage self-balancing[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(24):151-160.
- [12] 孙吉波,王宇,刘崇茹,等. 基于MMC的多端直流电网双极短路故障电流计算[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):72-78.  
SUN Jibo,WANG Yu,LIU Chongru,et al. Pole-to-pole short circuit current calculation of multi-terminal DC grid based on MMC[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(11):72-78.
- [13] 姚良忠,杨晓峰,林智钦,等. 模块化多电平换流器型高压直流变压器的直流故障特性[J]. 电网技术,2016,40(4):1051-1058.  
YAO Liangzhong,YANG Xiaofeng,LIN Zhiqin,et al. DC fault characteristics of modular multilevel converter based HVDC transformer[J]. Power System Technology,2016,40(4):1051-1058.
- [14] 吕家乐,吴在军,窦晓波,等. 基于MMC的中压直流配电网极间短路故障保护策略[J]. 电力工程技术,2019,38(4):2-9.  
LÜ Jiale,WU Zaijun,DOU Xiaobo,et al. Bipolar short circuit protection strategy for MMC based medium voltage DC distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(4):2-9.
- [15] 林林,黄梅,杨波,等. 适用于直流配网的故障自清除型电力电子变压器[J/OL]. 电测与仪表. [2021-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200-421.1151.008.html>.
- [16] 张中锋,谢晔源,杨晨,等. 配网直流变压器双极短路故障穿越方法[J]. 电力工程技术,2020,39(4):16-21,41.  
ZHANG Zhongfeng,XIE Yeyuan,YANG Chen,et al. Bipolar short-circuit fault ride-through method of DC transformer[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(4):16-21,41.
- [17] 郑涛,汤哲,张滋行,等. 基于限流电抗器的统一潮流控制器故障穿越策略及其与保护的配合[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):8-18,20.  
ZHENG Tao,TANG Zhe,ZHANG Zihang,et al. Fault ride through strategy of unified power flow controller based on current limiting reactor and its coordination with protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(2):8-18,20.
- [18] 周光阳,李妍,何大瑞,等. 含限流器的多端柔直系统故障保护策略[J]. 电工技术学报,2020,35(7):1432-1443.  
ZHOU Guangyang,LI Yan,HE Darui,et al. Protection scheme for VSC-MTDC system with fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(7):1432-1443.
- [19] 钟建英,冯健,程铁汉,等. VSC-HVDC系统直流电抗器与直流断路器参数匹配特性[J]. 南方电网技术,2019,13(11):51-60.  
ZHONG Jianying,FENG Jian,CHENG Tiehan,et al. Parameter matching characteristics of DC reactor and DC circuit breaker in VSC-HVDC system[J]. Southern Power System Technology,2019,13(11):51-60.
- [20] 王志刚,董长城,侯凯,等. 全桥LLC电路时域模型及其分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):138-143,164.  
WANG Zhigang,DONG Changcheng,HOU Kai,et al. Time domain model of full bridge LLC circuit and its analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(20):138-143,164.

#### 作者简介:



王志刚

王志刚(1985—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为交直流配电网技术、直流变压器技术、大功率软开关技术(**E-mail**: wangzhigang2@sgepri.sgcc.com.cn);

侯凯(1981—),男,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为交直流配电网技术、大功率半导体应用技术、储能技术及电力系统宽频振荡和稳定控制技术(**E-mail**: houkai@sgepri.sgcc.com.cn);

王小红(1973—),女,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为交直流配电网技术、无功补偿技术、新能源发电及电力电子在电力系统中的应用(**E-mail**: wangxiaohong@sgepri.sgcc.com.cn)。

(编辑 任思思)

## Parameter relationship and inductance calculation of DC reactor for improved ISOP type DCT during bipolar short circuit fault at medium voltage side

WANG Zhigang<sup>1,2,3,4</sup>, HOU Kai<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Xiaohong<sup>1,2,3,4</sup>, LIANG Shuaiqi<sup>1,2,3,4</sup>,  
WANG Guoning<sup>1,2,3,4</sup>, ZENG Xiaoming<sup>1,2,3,4</sup>, XU Jiansong<sup>1,2,3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China;

2. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

4. NARI-TECH Nanjing Control Systems Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The electrical characteristics and relationship among parameters of improved ISOP (Input Series Output Parallel) type DCT (Direct Current Transformer) during bipolar short circuit fault at medium voltage side are discussed. According to the characteristics of DC fault ride-through, in a small time scale, the inductance of DC reactor at medium-voltage side is taken as the dependent variable, and the explicit equations between it and the other parameters are derived. Then, a simplified calculation method under certain constraints is proposed, which is more conducive to engineering application. Finally, the accuracy of the proposed calculation method is verified by engineering application.

**Key words:** improved ISOP; DCT; DC reactor; medium voltage short circuit fault; fault ride-through; parameter relationship; calculation method; explicit equation

附录 A

1)对于第 2.1 小节,为充分连续性显示  $L_y$  与其他参数的关系,绘制三维图形如图 A1 和图 A2 所示。图 A1 为在初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ 、 $C = 22\mu\text{F}$ 、 $U_0 = 20\text{kV}$  下,当  $I_0 \in [-200\text{A}, 200\text{A}]$  和  $t_2 \in [0.1, 1]\text{ms}$  时,  $L_y$  和  $I_0$ 、 $t_2$  的三维关系图。三维图投影到二维上以后,图 A1 (c) 与正文图 4 对应,图 A1 (d) 与正文图 5 对应。

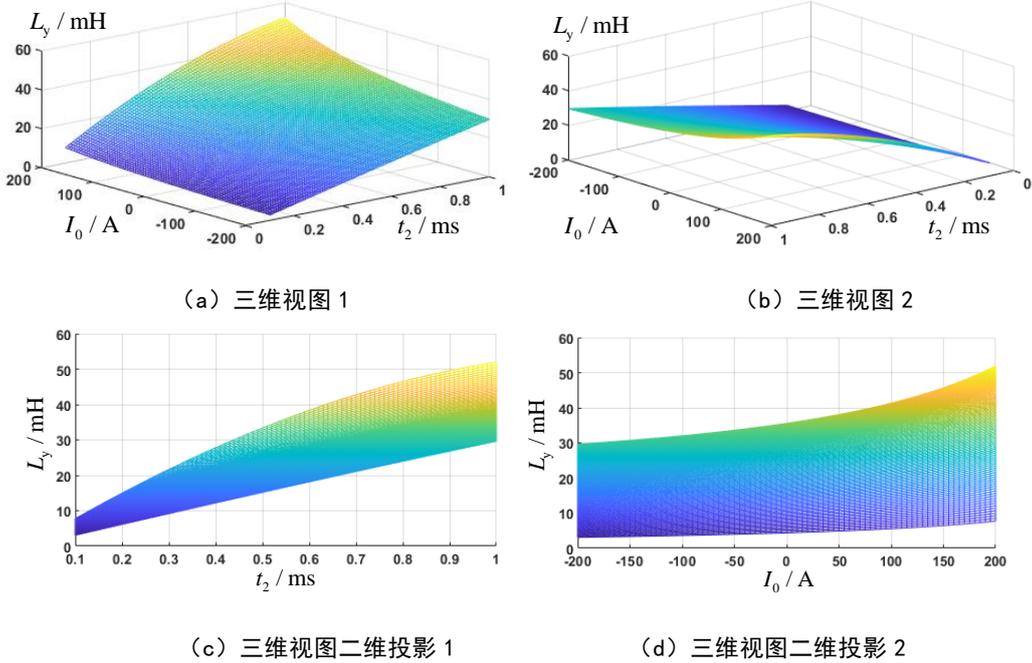


图 A1  $L_y$  和  $t_2$ 、 $I_0$  的三维关系图

Fig.A1 Three-dimensional diagram of  $L_y$ ,  $t_2$  and  $I_0$

在初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ 、 $I_0 = 200\text{A}$ 、 $t_2 = 0.2\text{ms}$  下,当  $U_0 \in [5, 50]\text{kV}$  和  $C \in [13, 220]\mu\text{F}$  时,  $L_y$  和  $U_0$ 、 $C$  的三维关系图如图 A2 所示。

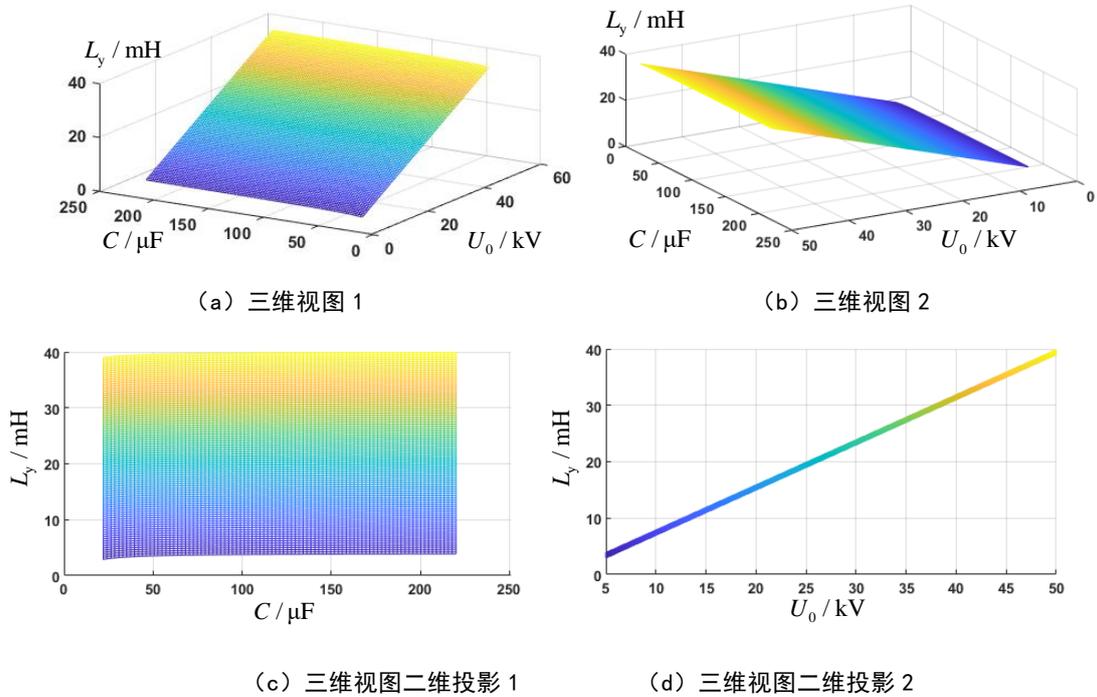


图 A2  $L_y$  和  $U_0$ 、 $C$  的三维关系图

Fig.A2 Three-dimensional diagram of relationship among  $L_y$ ,  $U_0$  and  $C$

在初始条件  $U_0 = 20\text{kV}$ 、 $I_2 = 450\text{A}$ 、 $I_0 = 200\text{A}$  下，当  $t_2 = 0.2\text{ms}$  时， $L_y$  和等效电容  $C$  关系曲线如图 A3 (a) 所示，可见在一定的  $t_2$  条件下，当  $C$  较小时，其变化对  $L_y$  有明显影响，当  $C$  较大时，其变化对  $L_y$  影响显著减弱。当设初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ ， $I_0 = 200\text{A}$ ， $t_2 = 0.2\text{ms}$ ， $C = 22\mu\text{F}$  时，附录 A 图 3 (b) 给出了  $L_y$  和直流母线电压  $U_0$  关系曲线，当  $U_0$  变化时，计算出来的  $L_y$  基本上也成比例上升，因此  $U_0$  对  $L_y$  的取值有直接影响。将三维图投影到二维图上时，图 A2 (c) 对应图 A3 (a)，图 A2 (d) 对应图 A3 (b)。

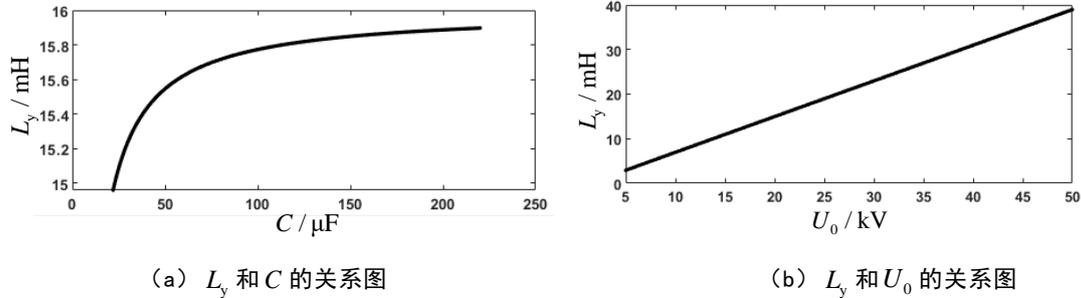


图 A3  $L_y$  和  $C$ 、 $U_0$  关系图

Fig.A3 Diagram of relationship between  $L_y$  and  $C$  and relationship between  $L_y$  and  $U_0$

2) 对于第 2.3 小节，分析参数  $t_2$  和  $I_0$  变化时对各参数的影响。记  $\Delta L''_{y2} = (L_y - L_{y2}) \times 10$ ，在初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ 、 $I_0 = -200\text{A}$ 、 $U_0 = 20\text{kV}$ 、 $C = 22\mu\text{F}$  下，当  $t_2 \in [0.1, 1]\text{ms}$  时， $L_y$ 、 $L_{y2}$ 、 $\Delta L''_{y2}$  和  $t_2$  的关系如图 A4 (a) 所示。在初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ 、 $C = 22\mu\text{F}$ 、 $U_0 = 20\text{kV}$ 、 $t_2 = 0.2\text{ms}$  下，当  $I_0 \in [-200, 200]\text{A}$  时， $L_y$ 、 $L_{y2}$ 、 $\Delta L''_{y2}$  和  $I_0$  的关系如图 A4 (b) 所示。

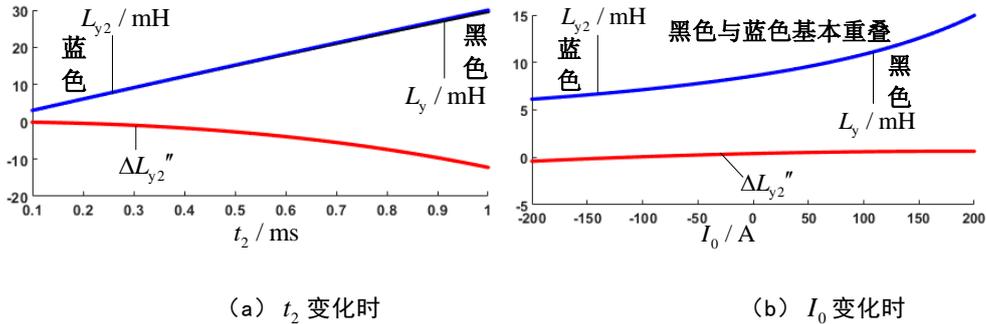


图 A4  $t_2$  或  $I_0$  独自变化时  $L_{y2}$  等相关参数的变化曲线

Fig.A4 Changing curve of  $L_{y2}$  and related parameters when  $t_2$  or  $I_0$  changes

对于参数  $C$  和  $U_0$  变化对各参数的影响，在初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ 、 $I_0 = 100\text{A}$ 、 $U_0 = 5\text{kV}$ 、 $t_2 = 0.2\text{ms}$  下，当  $C \in [22, 220]\mu\text{F}$  时，各参数与  $C$  的关系如图 A5 (a) 所示。在初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ 、 $I_0 = 100\text{A}$ 、 $C = 22\mu\text{F}$ 、 $t_2 = 0.2\text{ms}$  下，当  $U_0 \in [5, 50]\text{kV}$  时，各参数与  $C$  的关系如图 A5 (b) 所示。

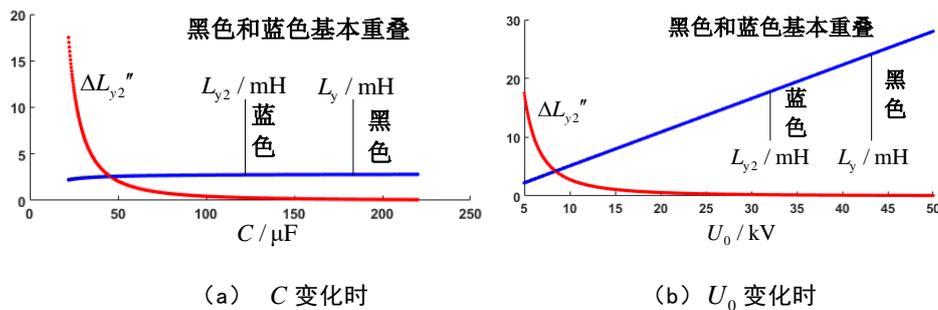


图 A5  $C$  或  $U_0$  独自变化时  $L_{y2}$  等相关参数变化曲线

Fig.A5 Changing curve of  $L_{y2}$  and related parameters when  $C$  or  $U_0$  changes

3) 对于第 3.2 小节, 分析参数  $t_2$  和  $I_0$  变化对各参数的影响。当设初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ ,  $I_0 = 100\text{A}$ ,  $U_0 = 20\text{kV}$ ,  $C = 22\mu\text{F}$  时, 当  $t_2 \in [0.1, 1\text{ms}]$  时,  $L_y$ 、 $L_{y3}$ 、 $\Delta L'_{y3}$  和  $t_2$  的关系如图 A6 (a) 所示。在初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ 、 $C = 22\mu\text{F}$ 、 $U_0 = 20\text{kV}$ 、 $t_2 = 0.2\text{ms}$  下, 当  $I_0 \in [-200, 200]\text{A}$  时,  $L_y$ 、 $L_{y3}$ 、 $\Delta L'_{y3}$  和  $I_0$  的关系如图 A6 (b) 所示。图 A6 中, 紫红色波形为根据式 (15) 对应的  $L_{y3}$  波形, 黑色波形为式 (3) 对应的波形, 为  $L_y$  的数值解。可见在条件切换时, 由于求解方程不一致, 紫红色波形发生断续, 而黑色波形为连续波形。红色波形对应简化求解和原始解的误差百分比  $\Delta L'_{y3}$ , 可见  $\Delta L'_{y3}$  不超过 10%。绿色波形为标志, 其值为 1、2、3、4 时, 分别对应式 (15) 中从上到下 4 种条件。图 A6 (a) 先是满足条件 1, 然后在  $t_2$  约大于 0.18ms 时满足条件 3, 然后在  $t_2$  约大于 0.43ms 时满足条件 4。图 A6 (b) 先是满足条件 3, 在  $I_0$  约大于 140A 时满足条件 1。

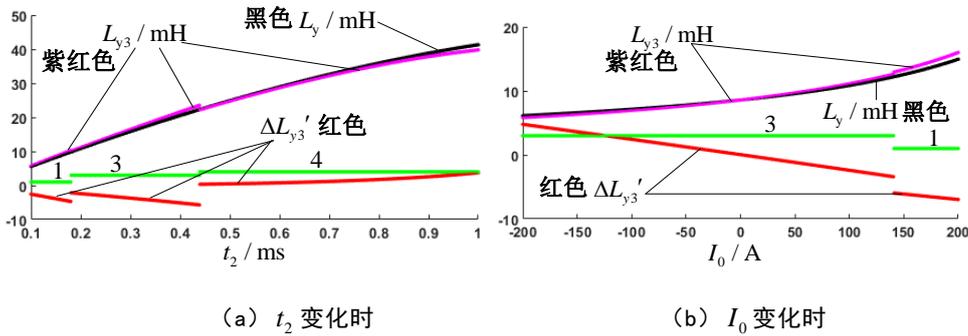


图 A6  $t_2$  或  $I_0$  独自变化时  $L_{y3}$  及其相关参数的变化曲线

Fig.A6 Changing curve of  $L_{y3}$  and related parameters when  $t_2$  or  $I_0$  changes

在初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ 、 $I_0 = -200\text{A}$ 、 $t_2 = 0.2\text{ms}$ 、 $C = 22\mu\text{F}$  下, 当  $U_0 \in [5, 50]\text{kV}$  时,  $L_y$ 、 $L_{y3}$ 、 $\Delta L'_{y3}$  和  $U_0$  的关系如图 A7 (a) 所示。在初始条件  $I_2 = 450\text{A}$ 、 $I_0 = 350\text{A}$ 、 $t_2 = 0.2\text{ms}$ 、 $U_0 = 20\text{kV}$  下, 当  $C = [22, 220]\mu\text{F}$  时,  $L_y$ 、 $L_{y3}$ 、 $\Delta L'_{y3}$  和  $U_0$  的关系如图 A7 (b) 所示。图 A7 中, 紫红色波形为简化后的电感  $L_{y3}$  的波形, 而黑色为简化前的  $L_y$  的数值解。由于求解方程不一致, 紫红色波形发生断续, 而黑色波形为连续波形。红色波形为简化求解和原始解的误差百分比  $\Delta L'_{y3}$ , 可见其不超过 10%。绿色波形为标志, 其值为 1、2、3、4 时, 分别对应正文中式 (15) 中从上到下 4 种条件。图 A7 (a) 先是满足条件 4, 在  $U_0$  约大于 18kV 时满足条件 3, 然后在  $U_0$  约大于 37.5kV 时满足条件 1。图 A7 (b) 先是满足条件 2, 在  $C$  约大于 37 $\mu\text{F}$  时满足条件 1。

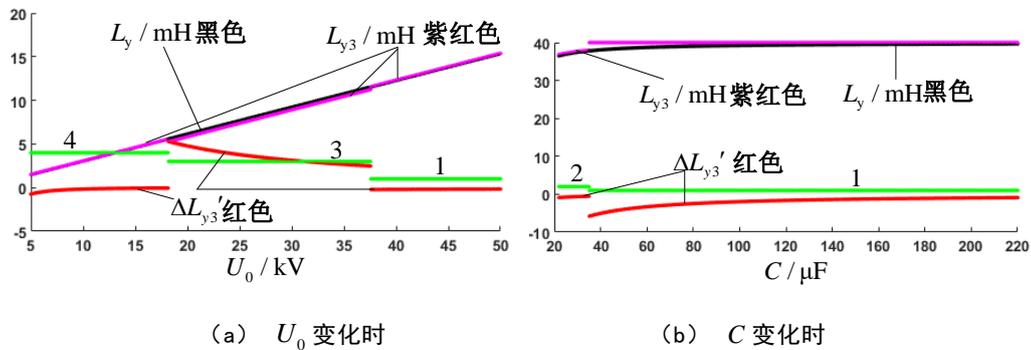


图 A7  $U_0$  或  $C$  独自变化时  $L_{y3}$  及其相关参数变化曲线

Fig.A7  $L_{y3}$  related parameter curves when  $U_0$  or  $C$  changes

附录 B

图 B1 为改进型 ISOP 中压短路快速保护电压、电流波形图。图中，紫红色波形为中压侧电流  $i_L(t)$ ，蓝色波形为中压侧母线电压  $u_{mv}(t)$ 。 $t_0$  时刻之前，系统工作在额定电压，空载状态。在  $t_0$  时刻发生中压侧金属性短路故障，中压侧电压在极短时间内下降至 0 附近，中压侧电流急剧上升。 $t_2$  时刻中压侧半桥主动闭锁，故障电流开始下降。 $t_0 \sim t_2$  为阶段 1， $t_2$  之后为阶段 2。

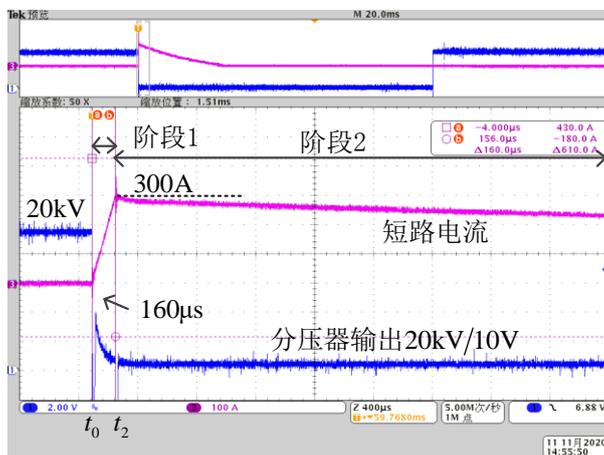


图 B1 改进型 ISOP 中压短路快速保护电压、电流波形图

Fig.B1 Medium voltage short circuit fast protection voltage and current waveforms of improved ISOP topology