

串补放电限流阻尼装置故障特征研究与保护实现

田宝江¹, 喻劲松², 李 勇³, 肖逾男², 郭 培⁴, 刘 洋²

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000; 2. 中电普瑞科技有限公司, 北京 102200;

3. 国家电网有限公司华中分部, 湖北 武汉 430077;

4. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要:近年来国内外超/特高压串补已发生数次放电限流阻尼装置(DCLDE)故障,因无有效的保护手段,存在DCLDE带故障投运的隐患,甚至可能引发电容器组燃爆等。为此,面向工程应用,开展了DCLDE失效保护研究:基于DCLDE故障机理分析,推导电容器放电电流数学表达式,提取关键故障特征;解析实际故障录波,验证机理分析和关键故障特征的正确性;基于数学表达式和测试参数逼近仿真计算方法,搭建故障设备仿真模型;穷举系统故障叠加DCLDE故障的复杂工况,验证故障特征的普遍性;基于可量化的故障特征,提出DCLDE装置失效保护策略。研发保护软件,实现保护动作误差不超过 $\pm 5.0\%$,保护动作时间不超过30 ms;提出试验方法,验证保护的准确性和可靠性。DCLDE失效保护完善了串补保护范畴,可有效提高超/特高压串补运行的可靠性。

关键词:放电限流阻尼装置;阻尼电阻;放电限流电抗;阻尼异常放电电流频率;阻尼异常放电电流幅值衰减率
中图分类号: TM772 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16081/j.epae.202510016

0 引言

串联电容器补偿装置(下文简称串补)的核心部件——放电限流阻尼装置(discharge current-limiting and damping equipment, DCLDE),与旁路设备串联后并联于电容器组两端。旁路设备是由并联的火花间隙和旁路开关组成,正常运行时处于分断状态,此时DCLDE不带电,因此其被认为工况简单、不易发生损坏^[1]。国内外针对DCLDE正常阻尼放电过程的研究已较为透彻,但对于更为复杂多变的DCLDE故障放电过程,尚缺乏深入研究;且现有相关研究多停留在理论分析层面,未见面向工程应用的DCLDE失效保护研究成果。

近年来国内外均发生过DCLDE故障,国内有据可查的DCLDE故障共4起,均出现在2009年前投运的串补。我国在运的超/特高压串补已经超过120套,其中2009年前投运的约占40%,接近50套,预计未来数年发生DCLDE故障的风险会持续增加。串补可靠性要求较高,尤其是串联在千万千瓦级电源外送通道上的特高压串补,是影响区域电网可靠

性和稳定性的重要因素^[2]。因此,亟需面向工程应用开展串补DCLDE失效保护研究,扩大超/特高压串补保护范畴,提高电网运行可靠性。

针对上述问题,本文分析DCLDE故障机理,推导电容器放电电流的数学表达式,揭示故障特性的变化规律,并提取关键故障特征;基于数学表达式与测试参数逼近的仿真计算方法,搭建故障设备仿真模型;基于可量化的故障特征,提出DCLDE失效保护的判别逻辑及保护定值的设置方法;研发DCLDE失效保护软件,其能够实现保护动作误差不超过 $\pm 5.0\%$ 、保护动作时间不超过30 ms。

1 DCLDE故障实例与机理分析

1.1 串补和DCLDE基本结构

DCLDE通常采用限流放电电抗器(discharge current-limiting reactor, DCLR)并联阻尼电阻(damping resistor, DR)的技术方案。DCLR为干式空心电抗器,用于限制电容器放电电流的频率;DR由线性电阻 R 串联金属氧化物限压器(metal oxide varistor, MOV)组成,用于限制放电电流的幅值。 R 为无感陶瓷电阻片,串联的MOV能够在电容器组放电过程中瞬时投入和退出 R ,从而避免线路电流长期流过 R 引起的损耗。这种在放电过程中瞬时投、退的工作模式,可有效降低对 R 的热容量要求,但也增加了DR在结构和电气特性上的复杂性^[2-3]。据统计,DCLR运行相对稳定,上述4起DCLDE故障均为DR击穿所致。串补和DCLDE的典型电路拓扑见附录A图A1。

收稿日期:2025-02-26;修回日期:2025-06-25

在线出版日期:2025-10-20

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目:超特高压串补二次系统可靠性提升关键技术研究(5100-202424025A-1-1-ZN)

Project supported by the State Grid Corporation of China Headquarters Management Science and Technology:Key Technology Research on Reliability Improvement of Extra-High/Ultra-High Voltage Series Capacitors Compensation Secondary System(5100-202424025A-1-1-ZN)

1.2 DCLDE 故障实例及隐患分析

国内有据可查的 DCLDE 故障实例可参见附录 B 表 B1。其中,故障实例 2 出现了 DCLDE 带故障投运的情况;而故障实例 3 和故障实例 4 均是借鉴故障实例 2 的经验,通过查阅故障录波确认了设备故障。究其根源,具体如下:当线路发生故障,电容器组承受较高过电压时,保护装置将依据保护逻辑闭合旁路设备,此时 DCLDE 会对电容器组放电过程中的暂态冲击电流起到阻尼作用。该冲击电流由线路故障电流和电容器组放电电流叠加而成,因其幅值较大,会对 DCLDE 形成一定的电气应力冲击^[4-7]。随着设备运行年限的增加,其受冲击发生损坏的风险也随之上升。DCLDE 安装于串补高压绝缘平台上,其中 DR 采用密封和防爆结构,运行人员难以通过巡查发现其是否存在故障;加之正常运行时 DCLDE 不带电,由此形成了设备带故障投运的风险。设备带故障投运情况下,当再次对电容器组进行旁路操作时,电容器组将发生阻尼异常放电,甚至无阻尼放电。这会对电容器组和旁路设备造成巨大冲击,不仅可能导致故障范围扩大,甚至有可能引发电容器组燃爆等电网设备重大安全事故。

1.3 DCLDE 故障机理分析和故障特征提取

DCLDE 故障机理分析和特征提取的关键是:

①掌握 DCLDE 故障机理,梳理故障过程中不同表象间的因果关系和变化规律;②提取的故障特征能通过定量的技术指标,准确区分 DCLDE 的正常和故障状态^[8]。

1.3.1 DCLDE 故障机理

纵观 DCLDE 整个故障过程,从时序上可以分为 3 个阶段:①串补正常运行;②电容器组被旁路,经 DCLDE 正常阻尼放电;③阻尼放电过程中 DCLDE 发生故障。由图 A1 可知,电容器电流 i_{cn} ($n=1,2,3$) 能反映这 3 个阶段不同的电气特性,且后 2 个阶段的电气特性差异是研究 DCLDE 故障机理的关键。

$n=1$ 时,电容器电流 i_{c1} 与线路电流 i_{TL} 大小相等、方向相反,见式(1)。

$$i_{c1} = -i_{TL} \quad (1)$$

$n=2$ 时,电容器组被旁路,由于电容器组等效阻抗大于 DCLDE 的等效阻抗, i_{TL} 转移至旁路回路, i_{c2} 仅为电容器组经正常 DCLDE 的阻尼放电电流,见式(2)。

$$i_{c2} = i_{DR} + i_{DCLR} = \frac{U_0}{R_{DR}} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L_{DCLR}}{C}}} \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

式中: $\tau = R_{DR}C$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{DCLR}C}}$, R_{DR} 为 DR 电阻值, L_{DCLR} 为 DCLR 电抗值, C 为电容器组电容值; U_0 为旁路设备动作时的电容器组电压初始值。不同的系统故障

下,流过电容器组的故障电流越大,电容器过电压就越高,存储的电能也越多。旁路时 U_0 越大, DCLDE 的阻尼放电工况也越严苛^[9-11]。

$n=3$ 时, DCLDE 中 DR 发生故障, 放电回路拓扑和电气参数均发生变化, 等效电路拓扑见图 1。图中: u_c 为电容器电压; TL 表示输电线路; GAP 表示火花间隙; BS 表示旁路开关; R_0 、 L_0 构成等效短路回路。

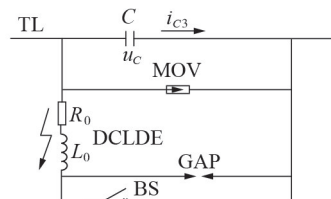


图1 DCLDE 中 DR 发生故障时的等效电路拓扑

Fig.1 Equivalent circuit topology of DR fault in DCLDE

图 1 中, i_{c3} 为电容器组 C 经等效短路回路 R_0 - L_0 放电的衰减振荡电流, 该 RLC 串联电路的放电过程见式(3)。

$$L_0 C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_0 C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (3)$$

式中: $R_0 < 2\sqrt{\frac{L_0}{C}}$ 时, 可计算得到 DR 单元击穿时的电

容器衰减振荡电流, 见式(4); $R_0 > 2\sqrt{\frac{L_0}{C}}$ 时, 为非振荡放电过程, 与实际的衰减振荡过程不符, 因此本文不做进一步分析。

$$i_{c3} = C \frac{du_c}{dt} = \frac{U_0}{\omega L_0} e^{-\delta t} \sin(\omega_t t) \quad (4)$$

$$\text{式中: } \delta = \frac{R_0}{2L_0}; \omega_t = \sqrt{\frac{1}{L_0 C} - \left(\frac{R_0}{2L_0}\right)^2}.$$

综上所述, DCLDE 故障过程中的因果关系体现为:“因”是 DR 发生击穿;“果”是电路拓扑由电容器组对 DR 和 DCLR 的并联回路放电变为电容器组对 R_0 和 L_0 所在串联回路放电, 以及放电回路电气参数从 DR 和 DCLR 的设备参数变为 R_0 和 L_0 的杂散参数电弧^[12-14]。

DCLDE 故障过程中不同表象间的变化规律可通过电容器放电电流 i_{c2} 、 i_{c3} 的数学表达式——式(2)、(4)加以反映。它们不仅能够反映 DCLDE 故障前、后 i_{cn} 的幅频特性变化规律, 也反映出 i_{cn} 的幅频特性由电容器组和 DCLDE 的设备参数共同决定。当电容器组处于正常状态时, i_{cn} 的幅频特性变化就源于 DCLDE 的性能变化^[15-16]。

1.3.2 关键故障特征

由图 A1 和 DCLDE 故障机理可知, 能提取到

DCLDE故障特征的电气量包括电容器电流、GAP电流、BS电流,分别由电流互感器CT₅、CT₇、CT₈提取。其中,GAP电流和BS电流代表不同旁路设备动作时流过旁路设备的电流。

GAP和BS旁路电容器组时,两者动作特性存在差异:GAP触发击穿时间短,小于1 ms,属于快速旁路;BS合闸时间长,为35~45 ms,属于长期稳定旁路。此外,一旦BS合闸成功,GAP回路的电流会立刻向BS回路(回路阻抗小)转移。2个电流相互独立,但幅频特性基本一致。以GAP为例,其动作后,由于DCLDE的等效阻抗小于电容器组等效阻抗, i_{TL} 会转移至旁路回路,因此GAP电流并非单纯的电容器放电电流,还会叠加线路电流,见式(5)。

$$i_{GAP} = i_{TL} + i_{Cn} \quad n=2, 3 \quad (5)$$

式(5)中的2个电流相互叠加、相互作用,难以直接反映DCLDE的特性,尤其是叠加线路故障电流后,一定程度上会影响DCLDE故障特征的准确提取。因此,本文将DCLDE故障特征提取对象确定为电容器电流 i_{Cn} 。

由式(2)可知,DCLDE处于正常状态时,其电容器放电电流 i_{C2} 的频率 f 取决于回路中电容器组 C 和电抗 L_{DCLR} 的串谐特性,见式(6)。

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{DCLR} C}} \quad (6)$$

DCLR发生故障后,电容器放电电流 i_{C3} 的频率可定义为阻尼异常放电电流频率 f_i ,由式(4)可知 f_i 由 R_0 、 L_0 和 C 的串谐特性决定,见式(7)。

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C - \left(\frac{R_0}{2L_0}\right)^2}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C}} \quad (7)$$

式中: $\frac{1}{L_0 C} \gg \left(\frac{R_0}{2L_0}\right)^2$,故 $f_i \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C}}$ 。因为 $L_0 < L_{DCLR}$,故 $f_i > f$ 。

本文定义电容器放电电流的幅值衰减特性 D_y 表示第 y 个波峰与第 $y+1$ 个波峰的衰减幅度,可反映电容器放电电流的幅值衰减趋势,具体见式(8)。

$$D_y = \frac{P_y - P_{y+1}}{P_y} \quad (8)$$

式中: P_y 为第 y 个波峰峰值, $y=1, 2, 3, \dots$ 。

由式(2)可知, i_{C2} 的衰减特性 D_y 基本按照指数规律衰减,衰减速度取决于指数中的 $\frac{1}{R_{DR} C}$ 。定义阻尼异常幅值衰减特性为 D_{fi} ,由式(4)可知, i_{C3} 同样呈现出衰减振荡状态,其衰减速度取决于 $\frac{R_0}{2L_0}$ 。由于

$$\frac{1}{R_{DR} C} > \frac{R_0}{2L_0}, \text{故 } D_y > D_{fi}。$$

DCLDE处于正常状态时,设计的 $D_1 \geq 50\%$,即经过 D_1 的阻尼过程后,电流幅值已衰减过半,对设备的暂态冲击也大幅下降。因此,首个半波是放电过程中最恶劣的工况,故障也通常发生在首个半波。只要故障发生在第2个峰值之前,阻尼异常放电电流幅值衰减率 D_{fi} 会明显小于 D_1 。为简化判别逻辑,将 D_{fi} 定义为阻尼异常放电电流幅值衰减率,即 $D_1 > D_{fi}$ 。

综上,将 f_i 和 D_{fi} 作为DCLDE关键故障特征。

1.4 基于DCLDE故障实例的故障特征验证

表B1的故障实例2中线路发生A、B相间故障,线路联动串补保护动作后,A、B相GAP触发导通,A相电容器组经DCLDE放电时DCLDE故障,B相放电过程正常。该实例的故障录波能同时体现出DCLDE故障和正常2种暂态过程,如图2所示。

表B1的故障实例2中,线路发生AB相间故障;线路联动串补保护动作后,A、B两相的GAP触发导通。其中,A相电容器组经DCLDE放电时,DCLDE发生故障,而B相的放电过程则保持正常。该实例的故障录波可同时呈现DCLDE故障与正常这2种暂态过程,具体波形如图2所示。

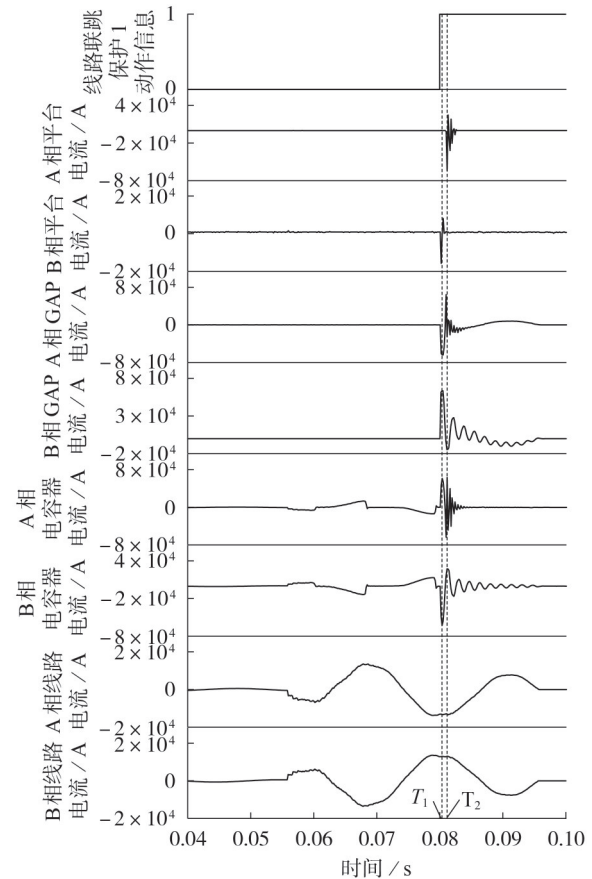


图2 故障实例2的电容器放电电流录波

Fig.2 Recording waveforms of capacitors discharging current in Fault Case 2

图2中,B相电容器放电电流周期约为1.65 ms,放电频率约为606 Hz。放电电流的第1个峰值(位于 T_1 时刻)为69 625 A;0.937 ms后,放电电流出现第2个峰值(位于 T_2 时刻)30 627.5 A,第2个峰值衰减至第1个峰值的44%, $D_1=56\%$ 。这是DCLDE的正常状态。而A相电容器电流在 T_1 时刻的0.313 ms后,即第1个半波内(GAP触发导通0.625 ms后,小于0.94 ms的半波时长)进入较高频率的振荡放电状态。该高频放电电流周期约0.46 ms,放电频率约为2 174 Hz,且 T_1 时刻电容器电流峰值为68 827 A,0.625 ms后,电容器电流峰值出现第2个峰值70 702.5 A,放电电流幅值不仅没有衰减,反而增加, $D_1=-2.7\%$ 。由此推断,A相DCLDE在 T_1 时刻的0.313 ms后发生故障,进入DCLDE故障状态。

综合分析4个DCLDE故障实例的录波数据后发现,其关键故障特征基本一致。以故障实例2为例,相应串补工程中 $C=153\ \mu\text{F}$, $L_{\text{DCLR}}=0.425\ \text{mH}$,由式(6)可计算得到 $f=624\ \text{Hz}$ 。由图2可知,B相电容器正常放电电流频率约为606 Hz。二者基本吻合,误差源于设备投运后性能指标变化和放电回路杂散参数。图2中:阻尼异常相(A相)电容器电流的 $f_i=2\ 174\ \text{Hz}$,约为 $f(624\ \text{Hz})$ 的3.48倍;阻尼正常相(B相)的 $D_1=56\%$,阻尼异常相(A相)的 $D_1=-2.7\%$ 。由此可见,无论是频率特性还是幅值衰减特性,实例录波数据均与故障特征理论分析结果一致。

2 DCLDE故障特性深入研究

串补建模仿真技术在输电系统和串补设备建模、系统故障仿真等方面已经成熟,但在设备故障建模方面还不成熟。早期由于缺少实际故障数据支撑,难以精确搭建故障设备模型,对故障特性的认知也不够深入^[17]。而4起DCLDE故障实例的录波数据,为实现理论结合实际、突破上述瓶颈奠定了基础。

2.1 系统和串补仿真模型搭建

由于有据可查的DCLDE故障实例仅4起,难以确保DCLDE故障特征 f_i 和 D_1 在其他故障工况下的普遍适用性。因此,需要搭建输电系统和串补仿真模型,利用该模型计算发生各类系统故障(区内、区外、远端、近端、单相、多相故障等)后,电容器组旁路时DCLDE正常状态下的阻尼放电特性;然后,计算各类系统故障叠加不同DCLDE故障(不同设备、不同故障时刻)时的异常放电特性,对 f_i 和 D_1 的普遍适用性进行校核。为便于验证仿真计算结果,参照表B1中4个故障实例的串补工程技术参数,进行输电系统和串补建模^[18]。其中,与故障实例2对应的模型见附录C图C1。

2.2 故障DCLDE仿真模型搭建

故障DCLDE模型的电路拓扑参照了实际工程,以故障实例2为例,实际工程中每相DR(3 Ω)由3个DR单元(9 Ω)并联组成,每个DR单元由R和MOV_{dr}串联组成,且其中1个DR单元应在设定时刻发生击穿,如图3所示。

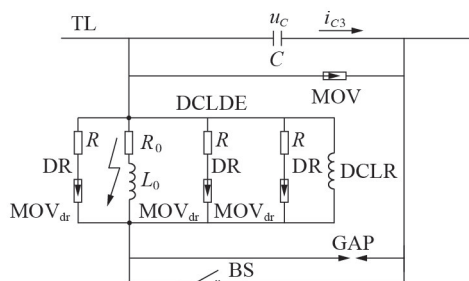


图3 DR故障的仿真模型

Fig.3 Simulation model of DR fault

图3中,当DR单元发生击穿时,DCLR被短接,此时故障DCLDE模型可等效为 R_0 和 L_0 的串联电路。从故障实例录波中读取 f_i 后,参照式(7)即可计算出等效短路电抗 L_0 ,具体计算结果见附录D表D1。

图3中等效短路电阻 R_0 的计算采用了测试参数逼近法,具体流程如下。依据故障实例模拟系统和设备故障,不断调整DCLDE故障模型中的 R_0 ,直至复现实例中故障DCLDE的 D_1 。以故障实例2为例,系统故障仿真设置如下:模拟故障前线路电流450 A,在输电线路中部设置AB相间短路故障点,单相最大故障电流约为10 142 A;故障发生24 ms后,收到线路保护发送的线路联动串补信号,保护动作,A、B相GAP触发导通;A相GAP触发导通0.625 ms后,1个DR单元发生击穿。当系统故障叠加DCLDE故障时,设置故障DCLDE模型中的 $L_0=35.1\ \mu\text{H}$,然后设置不同的 R_0 值,通过对比仿真波形与相应故障实例波形的 D_1 的相似性,不断调整 R_0 直至二者基本一致^[19-20]。计算结果表明,4起故障实例的 R_0 均为0.01 Ω 左右,差异较小。进行 R_0 值选取时,若具备 f_i 等故障数据,则参照测试参数逼近法计算确定;若缺少故障数据支撑,则推荐采用0.01 Ω 作为 R_0 值。

将 R_0 和表D1中的 L_0 值代入 $f_i'=\{1/(L_0C)-[R_0/(2L_0)]^2\}^{1/2}/(2\pi)$ 进行精度验算,计算得到的 f_i' 与从实际故障录波数据中提取的 f_i 基本一致,具体如附录D表D2所示。

2.3 DCLDE故障特性仿真分析

当DCLDE处于正常状态时,电容器放电电流的仿真波形如附录E图E1所示。在附录E所设定的系统故障工况基础上,叠加DCLDE故障(即DR击穿),并设置2种DR击穿场景:①GAP触发后

0.625 ms(处于放电电流第1个半波内)发生DR击穿;②GAP触发后1 ms(处于放电电流第2个半波峰值前)发生DR击穿。2种场景的仿真波形分别如图4(a)和图4(b)所示。

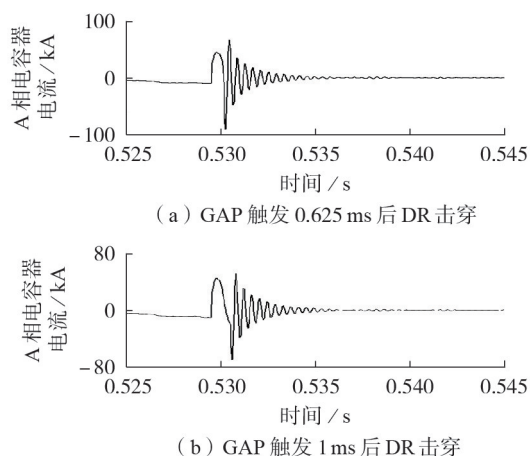


图4 GAP触发后DR击穿的仿真波形

Fig.4 Simulative waveforms of DR fault after GAP triggering

由图4(a)和图4(b)可见,DR击穿后,虽然系统故障工况与4起故障实例完全不同,但它们的 f_i 和 D_n 特性是一致的。

图4(a)中,电容器放电电流的首个半波内DR发生击穿,前2个放电电流峰值分别为45.6、91.4 kA, $D_n = -100\%$,远小于50%; $f_i = 2200$ Hz。

图4(b)中,电容器放电电流的首个半波正常,随即在第2个半波峰值前发生DR击穿,前2个放电电流峰值分别为45.6、70.3 kA, $D_n = -54\%$,远小于50%; $f_i = 2200$ Hz^[21-22]。

穷举系统故障叠加DCLDE故障后可知:故障特征 f_i 和 D_n 相较于DCLDE正常时,普遍存在明显的定量差异,可作为具备普适性的DCLDE故障基础判据。

截至目前,尚无DCLR故障的检修记录。统计干式空心电抗器的常见故障可知,其中70%以上为匝间短路故障。该故障发生后,短路位置局部温度会急剧升高,加速短路匝附近的绝缘老化,导致短路故障不断发展,继而扩大为多匝短路故障,甚至短时间内引发电抗器起火^[23-26]。其故障现象直观,发生DCLR带故障投运的可能性很小。如图3所示,DR和DCLR为并联关系,任一设备击穿后, f_i 和 D_n 均取决于短路回路的 L_0 和 R_0 ,因此DCLR故障建模、仿真计算的思路和结果与DR类似。

3 DCLDE失效保护

3.1 保护逻辑

DCLDE失效保护逻辑如图5所示,保护三相

独立判断。图5中: I_{cap_X} ($X=A, B, C$)为X相电容器电流。

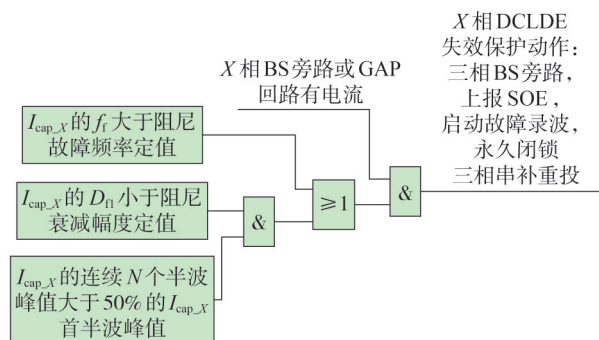


图5 串补DCLDE失效保护逻辑框图

Fig.5 Logic block diagram of SC DCLDE failure protection

首先,通过高通滤波保留三相电容器电流高频分量,滤除工频分量,再进行特征量计算。

1) f_i 的计算采用过零点计数法:将电容器电流相邻2个过零点的时间间隔计算值作为半周波时长,然后计算多个半周波时长的平均值(半周波数量可设计为保护参数),将其作为 f_i 的计算基础。

2) D_n 可参照式(8)进行计算,并将计算结果与“连续 N (N 可设计为放电电流峰值异常保护定值)个半波峰值大于50%的首半波峰值”的条件进行逻辑与运算,如图5所示。电容器组并联回路较多(MOV击穿,电容器组直接短接放电),但仅在旁路设备动作放电时,DCLDE才可能发生故障,为提高保护动作可靠性,判据应同时关联GAP回路有流或BS回路有流的情况^[27-29]。

由于DCLDE故障发生在电容器组旁路过程中,在DCLDE失效保护动作前,若已有其他串补保护动作,则保护出口设计应考虑2种情况:①MOV过电流保护等导致串补单相自动重投的串补保护动作后,应立刻合三相BS,永久闭锁串补重投;②平台闪络保护等直接合三相BS,永久闭锁串补重投的串补保护动作后,应通知运检人员DCLDE发生故障,需要开展检修工作。若无保护动作,仅在操作BS合闸时发生DCLDE故障,则应永久闭锁串补重投。

综上,DCLDE失效保护出口包括:合三相BS;上报时间顺序记录(sequential event recording, SOE)“DCLDE失效保护动作”;启动暂态故障录波;永久闭锁串补重投;点亮保护装置面板LED指示“事故”和光字牌指示“DCLDE失效保护动作”。

3.2 保护定值和保护参数

DCLDE失效保护定值和保护参数设置主要基于实际工程DCLDE设备技术参数、DCLDE故障特征、保护软件应用需求等方面。

1) DCLDE故障频率定值设置。DCLDE处于正

常状态时,电容器组阻尼放电频率低于1000 Hz,通常在500~700 Hz内。DCLDE发生故障时, f_f 可达设计放电频率的3~6倍(1500~4200 Hz)。考虑到由测量回路和环境导致的测量系统误差,以及频率计算过程中的计算误差,该定值可按不低于DCLDE设计放电频率的1.8倍整定,即可在900~1260 Hz之间选择,具体数值需结合工程实际情况确定^[30]。

2) 阻尼衰减幅度定值设置。DCLDE处于正常状态时, D_f 的决定因素是DR。DCLDE故障时 D_f 则由阻尼放电回路杂散参数决定。串补工程中阻尼放电回路的结构和导体材料基本是固定的,故该定值可依据DCLDE故障实例计算出的工程经验值来整定。由工程经验可知DCLDE故障后的 D_{ff} 远小于DCLDE正常时的 D_{f1} ($\geq 50\%$),依据工程经验该定值范围在 $\pm 60\%$ 之间,可按20%整定。

3) 放电电流峰值异常定值设置。DCLDE处于正常状态时,放电电流第2个半波峰值就应小于50%的首半波峰值。DCLDE发生故障后,电流幅值不降反增,导致超过首半波峰值50%的峰值个数增加。依据工程经验,该定值不超过10,可按2整定。

4) 保护参数是计算放电频率所需半周波数量:结合不同DCLDE的设计参数,考虑放电电流过小时对计算精度的影响,放电电流衰减至首半周波峰值的10%以后的半周波不再计入。

4 保护性能指标验证

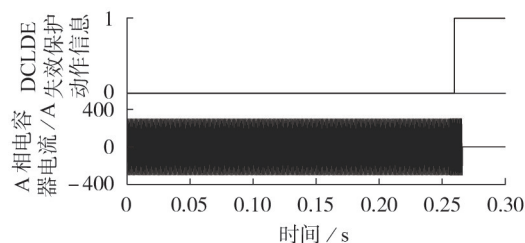
4.1 验证方法

验证方法除采用宽频同步向量测试仪模拟输出满足保护动作条件的电气量给保护装置并检验保护动作情况外,提出一种故障录波回放验证方法^[15]。采用实际故障波形,通过录波回放单元向保护单元回放故障波形来校验保护。因DCLDE故障实际录波有限,可利用仿真所得各类故障录波进行更充分的验证。回放DCLDE故障波形时,DCLDE失效保护均能可靠动作;回放DCLDE正常波形时,DCLDE失效保护均不能动作^[31-33]。

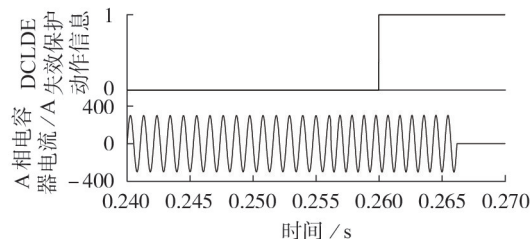
4.2 关键性能指标验证

DCLDE失效保护应重点验证保护动作精度、可靠性和动作时间3个性能指标^[16]。

保护动作精度、可靠性验证方面,设定DCLDE故障频率定值为1000 Hz。保护精度方面,通过宽频同步向量测试仪向A相电容器电流通道输入0.1 A(对应一次电流300 A)、950 Hz的电流(保护定值的95%),持续200 ms后,电流频率变为1050 Hz(保护定值的1.05倍),频率变化4个周期(保护参数可设)后DCLDE失效保护动作,如图6所示。保护可靠性方面,连续测试5次,保护均仅在电流频率变成1050 Hz后,连续动作5次,电流频率在950 Hz时保护不动^[34]。



(a) DCLDE 失效保护动作精度完整录波



(b) DCLDE 失效保护动作精度局部录波

图6 DCLDE失效保护动作精度录波图

Fig.6 Protection accuracy recording of DCLDE failure protection

保护动作时间是指从检测到满足DCLDE失效保护动作条件开始,到合BS出口继电器的触点闭合为止^[35]。回放故障实例2对应的故障录波,保护动作情况见图7。检测到满足DCLDE失效保护动作条件时刻为 T_1 ,辅助试验回路中模拟BS合闸成功时刻为 T_2 ,总时长约为72 ms。经测试可知,所用模拟BS

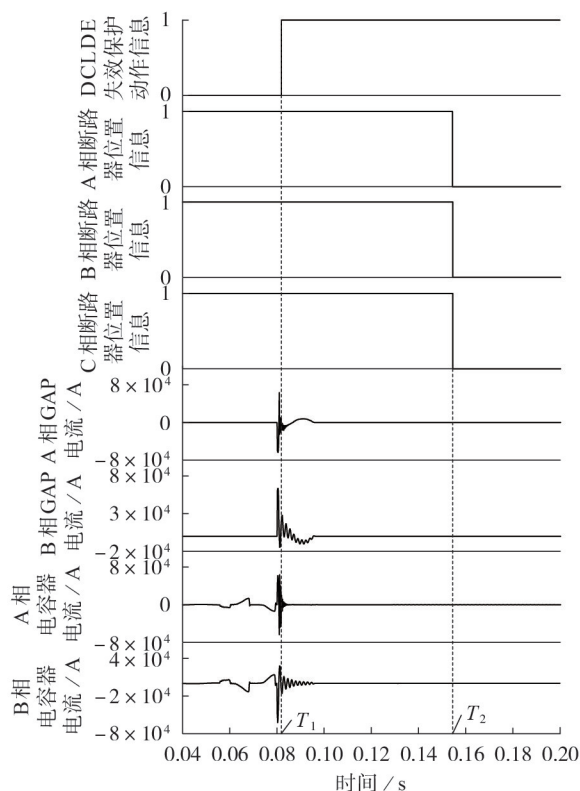


图7 DCLDE失效保护动作时间录波图

Fig.7 Action time recording of DCLDE failure protection

合闸时间(接触器动作时间)约为41 ms,保护装置设置的开关量输入信号消抖时间为5 ms(接触器闭合状态采集消抖时间),故DCLDE失效保护动作时间约为26 ms,满足保护动作时间不超过30 ms的指标要求。

5 结论

未来数年发生超/特高压串补DCLDE故障的潜在风险将持续增加,必须掌握面向工程应用的DCLDE失效保护技术,完善串补保护体系。为了解决上述问题,本文从电容器组过电压、旁路设备动作、DCLDE故障3个暂态过程出发,分析了DCLDE故障机理,推导了电容器放电电流的数学表达式,定义了 f_t 和 D_{in} 2个关键故障特征。利用现有的DCLDE故障数据初步验证故障机理和故障特征的正确性。基于推导出的数学表达式和测试参数逼近仿真计算方法,搭建了故障设备仿真模型。穷举系统故障叠加DCLDE故障的复杂故障工况,计算并验证故障机理和故障特征的普适性。提出DCLDE失效保护策略,研发面向工程应用的保护软件,实现保护动作误差不超过 $\pm 5.0\%$,保护动作时间不超过30 ms。DCLDE失效保护是新提出的串补保护,现阶段在动作判据和保护定值的选择上,倾向于避免保护误动。后期可依据实际工程应用效果,考虑是否需要在这两方面进一步优化。工程应用成熟后,可结合串补保护企标、行标,乃至国标的修编工作将其增补进相关标准。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 赵永光,艾力西尔·亚尔买买提,汤波,等. 串补电容对锁相环主导下变流器振荡问题的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6): 102-109.
Zhao Yongguang, Yaermainaiti Ailixier, Tang Bo, et al. Analysis of influence of series complement capacitor on converter oscillation dominated by phase locked loop[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 102-109.
- [2] GB/T 6115.2—2017 电力系统用串联电容器 第2部分: 串联电容器组用保护设备[S].
GB/T 6115.2-2017 Series capacitors for power systems: Part 2: Protective equipment for series capacitor banks[S].
- [3] IEC 60143-1-2015 Series capacitors for power systems Part 1: General[S].
- [4] 任孟干,吴保义,刘涛,等. 串补间隙触发控制系统故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(2): 32-40.
Ren Menggan, Wu Baoyi, Liu Tao, et al. Failure analysis of the FSC GAP's control system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(2): 32-40.
- [5] 武岳,范开俊,徐丙垠,等. 计及拓扑结构变化的分布式自适应电流保护方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 50-56, 80.
Wu Yue, Fan Kaijun, Xu Bingyin, et al. Distributed self-adaptive current protection method considering topological changes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 50-56, 80.
- [6] 刘涛,郭果. 特高压固定串补火花间隙拒触事故分析及解决方案[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 218-224.
Liu Tao, Guo Guo. Analysis of spark gap refusal trigger accident in UHV fixed series compensation and corresponding solutions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 218-224.
- [7] 周启文,潘勇斌,王德昌,等. 500 kV串补系统中火花间隙系统研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 40-44.
Zhou Qiwen, Pan Yongbin, Wang Dechang, et al. Improvement of spark gap system for 500 kV series compensation system[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 40-44.
- [8] 吴玉璋,嵇兴康,李华忠,等. 同步发电机励磁变压器低压侧单相接地故障识别与定位方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(10): 165-171.
Wu Yuzhang, Ji Xingkang, Li Huazhong, et al. Method for identifying and locating single-phase grounding fault at low-voltage side of excitation transformer in synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(10): 165-171.
- [9] 夏海涛,周小平,刘一锋,等. 含串补及STATCOM的交直流系统稳定性分析及改善方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 151-162.
Xia Haitao, Zhou Xiaoping, Liu Yifeng, et al. Stability analysis and improvement method for AC/DC system with series compensation and STATCOMs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 151-162.
- [10] 于思奇,孙大卫,吴林林,等. 新能源汇集系统短路故障清除后的暂态过电压机理[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 179-185.
Yu Siqi, Sun Dawei, Wu Linlin, et al. Transient overvoltage mechanism after short circuit fault removal of renewable energy collection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 179-185.
- [11] 祁宝才,李永滨,马顺绪,等. 超高压串补测量系统接触类故障深入性研究[J]. 电气工程学报, 2020, 15(4): 106-113.
Qi Baocai, Li Yongbin, Ma Shunxu, et al. In-depth study on the contact fault of ultra-high voltage SC measurement system[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(4): 106-113.
- [12] 刘艳丽,张晓乐,吕正阳,等. 多负载回路串联型故障电弧智能诊断及选线方法研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(4): 378-388.
Liu Yanli, Zhang Xiaole, Lü Zhengyang, et al. Research on intelligent diagnosis and route selection method of multi-load circuit series fault arc[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(4): 378-388.
- [13] 颜雅迪,何柏娜,孟涛,等. 特高压高补偿度串补线路潜供电弧特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 78-86.
Xie Yadi, He Baina, Meng Tao, et al. Research on secondary arc characteristics of UHV lines with high compensation degree series compensation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 78-86.
- [14] 康乐,田云博,杨骥,等. 串联故障电弧电流时频域特性的仿真与实验研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 104-112, 119.
Kang Le, Tian Yunbo, Yang Kun, et al. Simulation and experimental research on time-frequency domain characteristics of series arc-fault current[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 104-112, 119.
- [15] 李振兴,王玲,黄悦华,等. 大串补线路电流差动保护拒动因素及改进保护方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 199-205.
Li Zhenxing, Wang Ling, Huang Yuehua, et al. Analysis of current differential protection maloperation in power transmission line with high series compensation and corresponding improved

- protection method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1):199-205.
- [16] 李璿,吴士普,王平,等. 串联阻尼元件的特高压小电容量电容式电压互感器的设计及性能验证[J]. 高电压技术, 2018, 44(6):1844-1852.
Li Xuan, Wu Shipu, Wang Ping, et al. Design and performance verification of small capacitance UHV CVT series with damping elements[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6):1844-1852.
- [17] 常鹏,宋国兵,侯俊杰,等. 传统交流线路保护在换流器并网系统中的适应性分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(3):57-66.
Chang Peng, Song Guobing, Hou Junjie, et al. Adaptability analysis of traditional AC line protection in inverter-interfaced system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3):57-66.
- [18] 徐树文,卓谷颖,李壮,等. 基于PSD-BPA数据的ADPSS大电网电磁暂态转换建模方法与软件实现[J]. 中国电力, 2024, 57(8):182-189.
Xu Shuwen, Zhuo Guying, Li Zhuang, et al. Large-scale power grid ADPSS electromagnetic transient modeling method and software implementation based on PSD-BPA data[J]. Electric Power, 2024, 57(8):182-189.
- [19] 赵琳,叶丽雅,詹花茂,等. GIS隔离开关特快速瞬态过电压试验重复击穿全过程仿真模型研究[J]. 高压电器, 2020, 56(11):130-138.
Zhao Lin, Ye Liya, Zhan Huamao, et al. Investigation of repeated breakdown process during very-fast transient overvoltage test of overall switching process of disconnector in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11):130-138.
- [20] 邹明,许建中,赵成勇. 具备内部故障仿真能力的永磁同步发电机电磁暂态建模与仿真方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4):151-157.
Zou Ming, Xu Jianzhong, Zhao Chengyong. Electromagnetic transient modeling and simulation method of PMSG with internal fault simulation ability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4):151-157.
- [21] 吕亚洲,霍超,吴兴扬,等. 计及FACTS的暂态安全稳定紧急控制策略[J]. 中国电力, 2019, 52(1):96-101.
Lü Yazhou, Huo Chao, Wu Xingyang, et al. Transient stability emergency control strategy considering FACTS[J]. Electric Power, 2019, 52(1):96-101.
- [22] 李振兴,朱益,王杨斌,等. 小级差需求下基于故障首半波比较的快速电流保护[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6):153-160, 201.
Li Zhenxing, Zhu Yi, Wang Yangze, et al. Fast current protection based on fault first half-wave comparison under small stage difference demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6):153-160, 201.
- [23] 马宏忠,侯鹏飞,严岩,等. 高压电抗器绕组和铁芯机械故障的混沌特性分析与特征识别[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5):204-211.
Ma Hongzhong, Hou Pengfei, Yan Yan, et al. Chaotic characteristic analysis and feature recognition of mechanical failure of high voltage reactor winding and iron core[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5):204-211.
- [24] 刘贺千,张健,张海月,等. 基于高频阻抗谱的干式空心电抗器匝间短路故障诊断方法[J]. 中国电力, 2024, 57(10):218-224.
Liu Heqian, Zhang Jian, Zhang Haiyue, et al. A fault diagnosis method for interturn short circuit of dry-type air-core reactor based on high frequency impedance spectrum[J]. Electric Power, 2024, 57(10):218-224.
- [25] 刘传永,王明,赵普志,等. 基于电抗器开断过电压特征分析的匝间绝缘短路故障在线辨识[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(8):7-15, 23.
Liu Chuanyong, Wang Ming, Zhao Puzhi, et al. On-line identification of inter-turn insulation short circuit faults based on analysis of reactor breaking overvoltage characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8):7-15, 23.
- [26] 陈继瑞,李宝伟,田宝江,等. 基于微分域电流过零点偏移特征的电抗器匝间保护新方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2):212-217.
Chen Jirui, Li Baowei, Tian Baojiang, et al. Novel method of shunt reactor inter-turn protection based on current zero-crossing offset characteristic in differential domain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2):212-217.
- [27] 李振兴,包文亮,陈艳霞,等. 适用于含串补设备的输电线路电流差动保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5):11-19.
Li Zhenxing, Bao Wenliang, Chen Yanxia, et al. New criterion for current differential protection used for a transmission line with series compensation equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5):11-19.
- [28] 戚宣威,叶雨田,王松,等. 基于异构边界的串补输电线路单端量全线速动保护原理[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23):226-233.
Qi Xuanwei, Ye Yutian, Wang Song, et al. Heterogeneous boundary based principle of full-line accelerated protection applying single-terminal information for series compensated transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23):226-233.
- [29] 田波,张越,蒙飞,等. 电网故障处置信息自适应理解框架及关键技术[J]. 中国电力, 2024, 57(7):188-195.
Tian Bo, Zhang Yue, Meng Fei, et al. Adaptive understanding framework and key technology of power grid fault disposal information[J]. Electric Power, 2024, 57(7):188-195.
- [30] 刘阳,陈祥文,王玉龙,等. 超、特高压交流线路反时限零序过流后备保护的整定建议[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1):217-224.
Liu Yang, Chen Xiangwen, Wang Yulong, et al. Setting suggestions of inverse-time zero-sequence overcurrent backup protection for EHV and UHV AC lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1):217-224.
- [31] 刘清泉,杨鹏,李铁成,等. 应对继电保护多场景的数字仿真测试方法[J]. 中国电力, 2025, 58(2):118-125.
Liu Qingquan, Yang Peng, Li Tiecheng, et al. Digital simulation test method for multiple scenarios relay protection[J]. Electric Power, 2025, 58(2):118-125.
- [32] 王志华,郑涛,窦仁辉,等. 电力系统宽频测量技术方案与展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11):218-224.
Wang Zhihua, Zheng Tao, Dou Renhui, et al. Wide-frequency measurement technology solution and prospect of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11):218-224.
- [33] 柴斌,喻劲松,卢泓治,等. 强制触发型火花间隙现场试验方法研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(4):68-74.
Chai Bin, Yu Jinsong, Lu Hongye, et al. Study on field test method of forcibly triggered spark gap[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(4):68-74.
- [34] NB/T 10677—2021 串联电容器补偿装置控制与保护技术要求[S].
NB/T 10677-2021 Specification for control and protection device of series capacitor installation[S].
- [35] 李友军,周华良,徐广辉,等. 基于龙芯处理器的继电保护装置平台及关键技术[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3):218-224.
Li Youjun, Zhou Hualiang, Xu Guanghui, et al. Relay protection

tion device platform and key technologies based on Loongson chip processor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 218-224.

作者简介:

田宝江(1982—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为继电保护运行及整定计算(E-mail: tianbaoj@163.com);

喻劲松(1972—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力电子装备继电保护与控制(E-mail: 2571043246@qq.com);

郭培(1985—),男,高级工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为继电保护运行及整定计算(E-mail: 929948449@qq.com)。

(编辑 任思思)

Research on fault characteristics and protection implementation of series capacitor compensation DCLDE

Tian Baojiang¹, Yu Jinsong², Li Yong³, Xiao Yunan², Guo Pei⁴, Liu Yang²

(1. State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;

2. China EPRI Science & Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China;

3. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China;

4. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In recent years, there have been several failures of discharge current-limiting damping equipment (DCLDE) in extra-high/ultra-high voltage series capacitor compensation (SC) engineering at home and abroad. Due to the lack of effective protection measures, DCLDE is at risk of being put into operation with faults, it may even cause issues such as capacitor bank explosion. For this purpose, research on DCLDE failure protection has been conducted for engineering applications. Based on the failure mechanism of DCLDE, the mathematical formula of capacitor bank discharge current is derived, and the key fault characteristics are extracted. Actual DCLDE fault recording waveforms are analyzed to verify the correctness of the mechanism analysis and key DCLDE fault characteristics. Then, a simulation model of faulty equipment is established based on the mathematical formulas and test parameter approximation simulation calculation method. Various complex operating conditions where power system faults overlap with DCLDE faults are exhaustively simulated to verify the universality of fault characteristics. Based on quantifiable fault characteristics, a DCLDE failure protection strategy is proposed. The protection software is developed, with the protection action error controlled within $\pm 5.0\%$ and the protection action time limited to less than 30 ms. Experimental methods are proposed to verify the accuracy and reliability of the protection. The DCLDE failure protection expands the scope of SC protection, which effectively improves the operational reliability of extra-high/ultra-high voltage SC systems.

Key words: discharge current-limiting and damping equipment; damping resistor; discharge current-limiting reactor; frequency of abnormal damping discharge current; amplitude attenuation rate of abnormal damping discharge current