

华东 500 kV 电网 串联谐振型故障电流限制器的保护配置

喻劲松¹, 荆平¹, 戴朝波¹, 赵勇², 粘中元²

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192;

2. 齐齐哈尔超高压局, 黑龙江省 齐齐哈尔市 161000)

Protection Configuration of Series Resonant Type Fault Current Limiter in Eastern China 500 kV Power Grid

YU Jin-song¹, JING Ping¹, DAI Chao-bo¹, ZHAO Yong², NIAN Zhong-yuan²

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. Qiqihaer Extra High Voltage Branch, Qiqihaer 161000, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: The series resonant type fault current limiter is a new technology to limit the excessive short-circuit current of the extra high voltage power grid. This paper firstly provides the basic information of the fault current limiter(FCL) which will be installed in East China 500kV Power Grid, such as site-selection and basic parameter design. Then followed by the fundamental principles and main structure of the FCL which based on the technology of TPSC (Thyristor Protection Series Capacitor), a detailed introduction of the protection configuration of the FCL prototype and the analysis of impact on the power system protection was detailed in this paper. Finally the paper analyzes the test results of the line over-current protection and MOV over-current protection of the FCL to verify that the FCL' protection configuration is reasonable and effective.

KEY WORDS: fault current limiter; control and protection; thyristor protection series capacitor (TPSC); series resonant

摘要: 采用串联谐振型故障电流限制器(fault current limiter, FCL)是解决超高压电网短路电流超标问题的一种新技术手段。文章介绍了华东 500kV 电网 FCL 示范工程的选址和主要参数设计等基本情况,阐述了基于晶闸管保护串联电容器(TPSC)技术的 FCL 的基本原理和主体结构,以及 FCL 控制保护样机的系统结构和主要功能,详细描述了样机所采用的各类保护配置,并分析了 FCL 对系统继电保护的影响。对保护配置中最具代表性的线路过电流瞬时保护和金属氧化物限压器(MOV)过电流保护试验数据进行了分析,验证了 FCL 控制保护样机保护配置的合理性和实用性。

关键词: 故障电流限制器(FCL); 控制保护; 晶闸管保护型串联电容器(TPSC); 串联谐振

0 引言

当前,我国电力系统各级电网的短路电流水平不断增加,部分地区的短路电流已经达到甚至超过了断路器的遮断容量,而且有继续上升的趋势。这种情况已经严重威胁到系统的安全运行,一旦发生短路故障,很可能造成故障线路中相关设备烧毁^[1]。针对该问题最直接的解决方法就是采用具有更大遮断能力的断路器及其相关设备。然而在超高压系统中,这种解决方法导致的高额成本使人望而却步。如何通过更经济、更合理的技术手段解决超高压系统中短路电流超标问题就成为一个亟待解决的新课题。

随着相关研究的逐步深入,电力系统中短路电流抑制手段也越来越丰富。从实施层次来看,可以简单地分为系统级措施和设备级措施 2 大类。

在系统级措施中,电网解裂运行和母线分裂运行是我国电网中经常采用的 2 个措施,用以降低系统短路电流水平,但这 2 个措施也降低了电力系统运行的稳定性和可靠性,给系统运行所带来的各类影响不容忽视。

在设备级措施中,采用较多的是串联电抗器和高短路阻抗变压器。串联电抗器是目前广泛应用于高、中、低压系统的故障电流限制技术,也是最为成熟的故障电流限制器(fault current limiter, FCL)。高短路阻抗变压器也是一种切实可行的故障电流限制技术。但这 2 种限流技术不但会增加网损,还会降低系统稳定性^[1]。

目前更新、更合理的故障电流限制技术主要有 2 种: 1) 在原有串联电抗器的基础上, 采用各种可靠开关技术实现串联电抗器的可控化; 2) 基于其它创新原理实现的 FCL, 如基于超导技术的 FCL。本文将介绍基于晶闸管保护串联电容器(TPSC)技术的串联谐振型 FCL, 这也是现阶段解决超高压系统短路电流超标问题的比较可行的新技术手段^[2-3]。文中将详细阐述该类 FCL 控制保护样机保护配置的研究内容, 并通过对试验数据的分析来验证其保护配置的合理性和实用性。

1 华东 500 kV 超高压电网串联谐振型 FCL 的基本原理和组件

1.1 工程选址和主参数选择

在国家电网公司统一安排下, 相关科研单位通过全面计算分析 2010 年华东电网 500 kV 变电站的短路电流水平, 并结合配套的技术经济分析, 决定将华东 500 kV 电网串联谐振型 FCL 示范工程的实施位置选择在瓶窑变电站内, 即在华东电网瓶窑—杭北单回线上安装一台 8.0Ω、额定电流为 2.0kA 的 FCL。该 FCL 可大幅度降低支路的短路电流, 并能把短路点的总电流降低到 47kA 以下^[4-6]。

1.2 基本原理和组件

串联谐振型 FCL 的基本工作原理是: 当电力系统正常运行时其等效工频阻抗为零, 不改变潮流正常分布; 当电力系统发生故障时, FCL 在适当的时间内迅速投入限流电抗器, 增大线路的等效阻抗, 从而有效限制故障电流。

华东 500 kV 超高压电网 FCL 的简化结构如图 1 所示^[7]。主要组件及功能如下:

1) 限流电抗器, 在短路期间起限流作用。

2) 电容器组, 在正常工作条件下补偿限流电抗器的感抗, 在系统短路期间电容器组被快速旁路, 使得限流电抗器发挥限流作用。

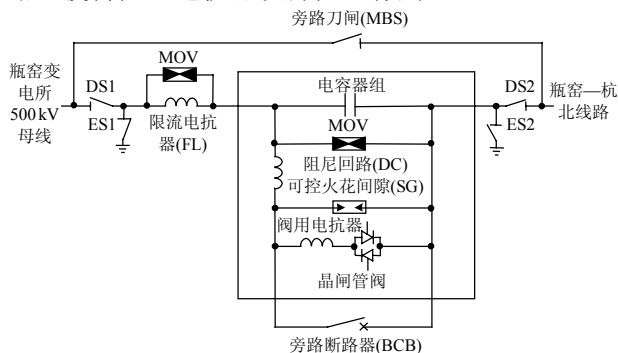


图 1 故障电流限制器的结构简图
Fig. 1 Main circuit diagram of FCL

3) 晶闸管阀, 作为旁路电容器的主要手段。当发生短路故障后应快速导通, 旁路电容器组。

4) 金属氧化物限压器(metal oxide varistor, MOV), 是电容器组过电压保护的必要措施。线路故障时为避免电容器组承受高电压, 在电容器组两端并联 MOV, 从而限制住电容器组两端电压的上升范围实现对其的过电压保护。

5) 可控火花间隙(spark gap, SG), 是电容器组的过电压后备保护装置。

6) 旁路断路器(bypass circuit breaker, BCB), 在几十 ms 内实现电容器组的可靠短接, 也为电容器组投入、退出操作提供手段。

7) 阻尼回路, 即图 1 中的 DC 和阀用电抗器, 限制并阻尼放电电流, 确保电容器组、晶闸管阀、火花间隙、旁路断路器的安全。

8) 旁路刀闸(MBS)及隔离刀闸(DS1、DS2、ES1、ES2), 为系统操作及检修提供手段。

这种型式的 FCL 还有一个重要特点: 在出现低频功率振荡时, 通过适当控制策略(如 Bang-bang 控制), FCL 可以利用就地或远方测量的功率/电压信号, 调节 FCL 总电抗, 起到抑制低频功率振荡的作用, 即功率振荡阻尼器(power oscillation damping, POD)的作用^[8-11]。

图 1 所示方案的优点是整套 FCL 可以统一投入运行、退出检修, FCL 检修期间线路可继续运行; 缺点是 FCL 投切时需要瓶窑—杭北线路停电, 才能操作旁路刀闸。需要指出的是: 瓶窑—杭北线路在没有 FCL 时能正常运行的前提是系统的运行方式保证故障电流不会超标。

2 串联谐振型 FCL 控制保护系统

2.1 控制保护系统整体结构

串联谐振型 FCL 控制保护样机基于 DSP 和大规模可编程器件等先进技术, 由功能相同、独立运行、互为备用的 2 套系统组成, 系统结构见图 2。

2 套控制保护系统分别安装在图 2 所示的独立屏柜中, 各自具有独立的输入和输出接口、数据传输系统、控制保护处理单元, 从而确保 2 者运行时相互独立, 检修时互不影响, 为整套 FCL 的长期稳定可靠运行打下了坚实的基础^[10-11]。

2.2 控制保护系统的主要功能

FCL 控制保护系统完成对 FCL 主要电气量和运行状态的监控, 实现 FCL 的安全、可靠运行。FCL 控制保护系统的功能模块见图 3。其主要功能包括:

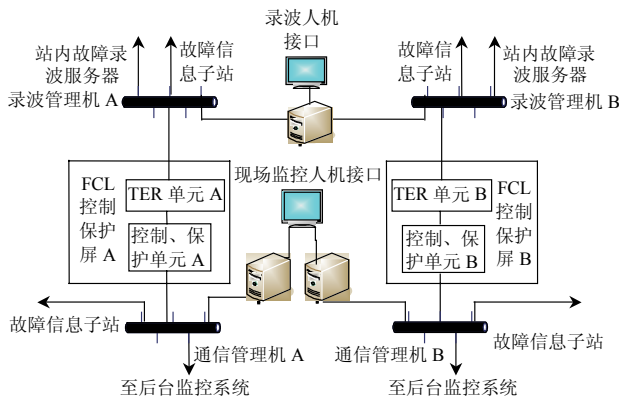


图 2 串联谐振型 FCL 控制保护样机的双系统结构
Fig. 2 Structure of double control and protection system for FCL

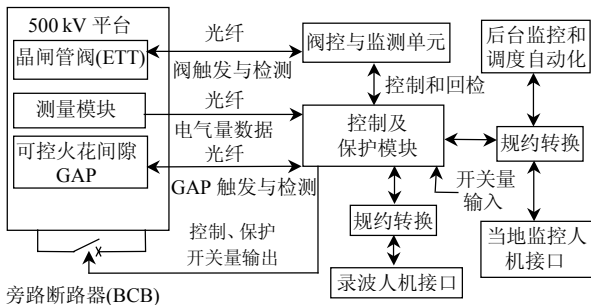


图 3 控制保护系统的功能模块

Fig. 3 Block diagram of measuring, control and protection

1) 测量功能。采集 FCL 高压绝缘平台上各种电气量数据, 进行光电转换后通过光通道将其传递到地面控制保护装置。

2) 输入输出功能。采集 FCL 装置所需的开关量信息, 依据控制保护命令输出相关信号。

3) 保护功能。依据信号采集系统提供的模拟量和开关量信息检测线路和 FCL 装置自身的运行状况, 正确动作相关保护(即触发阀、SG), 闭合旁路断路器。快速、准确地隔离或切除故障, 保证系统其他设备和装置自身的安全与稳定运行^[12]。

4) SG 触发与检测功能。对平台上可控火花间隙进行触发控制, 检测其工作状态并上报检测结果。

5) 晶闸管阀控制与检测功能。对平台上所有晶闸管阀进行触发和工作状况检测, 并上报检测结果。

2.3 控制保护系统的保护配置

串联谐振型 FCL 控制保护系统的保护配置以保证 FCL 设备安全和电网运行安全为目的。其中部分保护配置借鉴了可控串联电容器装置的保护配置。这些保护配置的合理性、实用性是 FCL 工程化和可靠运行的前提和基础。下面将重点介绍 FCL 不同于可控串联电容器装置的各项保护配置, 以及

FCL 对系统继电保护的影响。

1) 线路过电流保护。

FCL 线路过电流保护的策略是以线路电流瞬时值为判据, 当线路发生短路故障时线路电流瞬时值会急剧增大, 当其大于线路过电流保护整定值时, 线路过电流保护动作, 快速触发阀和暂时闭合旁路断路器接入限流电抗, 限制故障电流^[9]。当线路恢复正常(即满足重投条件)后, 允许重新投入电容器组, 退出限流电抗。

2) 线路电流斜率保护。

线路电流斜率保护是以线路电流斜率为判据, 主要目的是缩短故障检测时间, 进而缩短限流电抗器的投入时间。线路电流斜率主要是指线路电流中工频分量的斜率。线路发生短路故障时, 故障电流可以用式(1)来表示:

$$i_s = I_{SDC}e^{-t/\tau} + \sqrt{2}I_{SAC} \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

式中: I_{SDC} 为故障电流中的直流分量; I_{SAC} 为故障电流中的交流分量; ω 为故障电流交流分量角频率; τ 为故障电流直流分量时间常数。

短路故障瞬间, 若忽略直流分量的衰减, 可得

$$di_s/dt = -\sqrt{2}\omega I_{SAC} \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

当 $\phi=90^\circ$ 时, 用 di/dt 作为判据可迅速判断出短路故障。线路电流斜率保护比较线路电流斜率与线路电流斜率保护整定值, 当线路电流斜率大于整定值时, 保护动作, 快速触发阀和暂时闭合旁路断路器^[13]。当满足重投条件后, 允许重新投入电容器组。

3) 主动旁路保护。

主动旁路保护即阀裕度不足和阻尼回路损坏保护。在正常运行时, 晶闸管阀会留有一定的裕度, 随着晶闸管阀片的损坏, 晶闸管阀的裕度会越来越小, 如果情况继续发展, 就有可能造成剩余的阀组因过压等情况而损坏。阀裕度不足保护就是为此而设置的。当晶闸管阀的裕度低于规定的下限时, 主动旁路保护动作。

在 FCL 装置正常运行时, 如果某个晶闸管阀在闭锁状态时二极管击穿保护(break over diode, BOD)动作次数在规定的时间内超过定值, 则说明晶闸管阀的阻尼电路可能损坏, 需要退出高压绝缘平台进行相应的检修和维护。此时, 主动旁路保护也会动作。主动旁路保护动作出口为闭合三相旁路断路器, 永久旁路电容器组。

4) 阀保护。

FCL 装置中阀的作用是快速旁路串联电容器

组限制短路电流，以及保护电容器组和 MOV 装置。阀保护有 2 种类型：阀拒触发保护和阀自触发保护。

① 阀自触发保护。当 FCL 装置正常运行时，控制保护系统对晶闸管阀电流进行监视，如果控制保护系统没有发出晶闸管阀触发命令，而晶闸管阀却有电流流过，说明晶闸管阀自触发。当发生晶闸管阀自触发时，阀自触发保护动作，闭合旁路断路器。当满足重投条件后，允许重新投入电容器组。如果晶闸管阀自触发次数在规定的时间内达到定值，则永久旁路电容器组^[14-15]。

② 阀拒触发保护。当线路发生故障时，控制保护系统应立即触发晶闸管阀或 SG。如果该触发命令发出后，SG 电流和晶闸管阀电流都小于预定值，则说明晶闸管阀无法正常触发，需要退出高压绝缘平台进行相应的检修和维护。阀拒触发保护的动出口是闭合旁路断路器，永久旁路电容器组^[14-16]。

5) 线路电流监视告警。

线路电流的大小能直观反映线路的运行状态，另一方面也直接影响到晶闸管阀控制与监测功能的实现。当任一相线路电流高于线路电流监视告警高整定值时，可认为线路处于故障状态，于是线路电流监视告警动作，闭锁电容器组重投。当任一相线路电流低于线路电流监视告警低整定值时，晶闸管阀控制与监测电路由于不能储存足够多的能量，无法正常工作，线路电流监视告警也应动作。

线路电流监视告警的返回条件：三相线路电流低于线路电流监视告警高整定值的时间和三相线路电流满足高于线路电流监视告警低整定值的时间均大于解除重投闭锁延时时间。

6) 旁路断路器合闸失灵保护。

旁路断路器合闸失灵保护是在其他保护启动合旁路断路器的情况下，经过设定的延时，对旁路断路器的实际位置进行检测，判断旁路断路器是否出现拒合的情况。考虑到动作结果的严重性，程序对断路器合闸失灵的判据是较为严格的。检测时如果断路器接点位置不正确并且晶闸管阀电流或 SG 电流超过设定值，则认为断路器未合上，本保护动作；如果断路器接点位置不正确但上述的电流模拟量都没有超过设定值，则认为断路器已合上但返回接点不正确或者断路器虽未合上但线路已被切除，此时本保护不应动作，只上报 SOE 事件。在出现断路器未合上的情况下保护动作，动作出口为闭合三相断路器，永久旁路电容器组，跳开线路断路器。

7) 旁路断路器分闸失灵保护。

旁路断路器分闸失灵保护是在 FCL 重新投入的情况下，经过设定的延时，对断路器的实际位置进行检测，判断断路器是否出现拒分闸的情况。在出现断路器分闸失灵的情况下保护动作，保护的动出口为闭合三相断路器，永久旁路电容器组。

8) 旁路断路器三相不一致保护。

旁路断路器三相不一致保护是对断路器设置的在三相断路器分别处在不同分合位置情况下的一项保护。该保护通常要求延时的设定可以躲过单相保护的動作特性，同时该保护动作失败后启动三相断路器合闸失灵保护。断路器三相不一致保护在投入后会连续监测旁路断路器的三相不一致情况，并且在手动操作断路器时也起作用。该保护的动出口为闭合三相断路器，永久旁路电容器组。

9) 刀闸三相不一致告警。

刀闸三相不一致告警是出现三相刀闸处在不同分合位置的情况下，对刀闸设置的一项告警。投入刀闸三相不一致告警后，FCL 控制保护系统会连续监测各个刀闸的三相位置不一致情况，并且在手动操作刀闸时该告警功能也起作用，相应的动出口是经过延时发出告警信号。

10) MOV 保护。

当 FCL 线路发生故障时，若串联电容器组电压高于保护电压，则 MOV 开始限压。此时 MOV 上将流过很大的故障电流，该故障电流可能造成 MOV 损坏。因此必须配置 MOV 保护对 MOV 进行设备级保护，其具体配置包括：MOV 电流保护、MOV 能量保护、MOV 温度保护。它们的基本原理和出口设计与可控串联电容器装置的保护配置类似^[2]。

11) 电容器组保护。

串联电容器组是 FCL 装置中的主要设备，影响电容器组安全的主要因素是 FCL 线路故障时故障电流在电容器两端产生的高电压。故障电流产生的高电压由 MOV 装置限制在电容器可以承受的范围內，使其免受损坏。此外，串联电容器组的保护还有电容器过负荷保护和电容器不平衡保护。它们的基本原理和出口设计与可控串联电容器装置的保护配置基本类似^[17-18]。

12) 其他保护配置。

FCL 保护配置除上述几个主要保护配置外还包括：GAP 拒触发保护、GAP 延迟触发保护、GAP 自触发保护、平台闪络保护、线路联动保护。它们

的基本原理和出口设计与可控串联电容器装置的保护配置基本类似^[19]。

2.4 FCL 对系统继电保护的影响

由于 FCL 是安装在线路上,因此两侧线路保护会受到一定的影响。目前,500 kV 线路保护中最常用的继电保护原理为分相电流差动保护、距离保护以及零序过电流保护。其中差动保护由于具有绝对的选择性,通常做为主保护,而距离保护和零序过电流保护则为后备保护^[20]。

1) FCL 对电流差动保护的影响。

电流差动保护是基于基尔霍夫电流定律构成的,常用的电流相量差动判据的动作量和制动量的选取方案为

$$I_{op} = |\dot{I}_m + \dot{I}_n| \quad (3)$$

$$I_{res} = \frac{1}{2} |\dot{I}_m - \dot{I}_n| \quad (4)$$

式中: \dot{I}_m 和 \dot{I}_n 分别是本侧和对侧测得的电流相量。

差动保护的判据为

$$I_{op} > I_0 \quad (5)$$

$$I_{op} - kI_{res} > 0 \quad (6)$$

式中: I_0 为差流动作门槛; k 为比例制动系数。当式(5)(6)同时成立时,保护才会动作。

图 4 为差动保护的判据特性,阴影部分为保护动作区。对于发生的区内故障,由于在线路中间产生了支路,两侧电流均流过故障点,因此差动保护测量到的动作量大而制动量小,差动保护能够动作;对于发生在区外的故障,由于线路内部无支路,两侧保护测量到的动作量很小而制动量很大,因此差动保护不会动作。

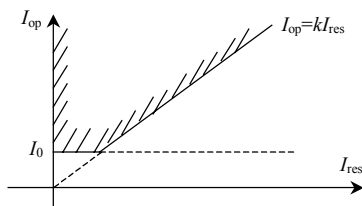


图 4 电流差动保护动作特性

Fig. 4 Characteristic of differential current protection

由于 FCL 是串联入线路中的,只要 FCL 内部不产生对地或者相间短路故障,无论 FCL 是正常动作还是晶闸管和旁路断路器以及 MOV 异常动作,都不会在线路内部形成额外支路引起差流。因此 FCL 的动作行为不会给线路差动保护带来额外影响,并且只要 FCL 安装在两侧 CT 之间,差动保护就能够保护 FCL 内部的相间以及对地短路故障。由

此可见作为线路保护的主保护,电流差动保护不会受到线路中安装的 FCL 的影响。

2) FCL 对距离保护的影响。

距离保护是反映故障点至保护安装点之间的电气距离(阻抗),并根据距离远近而确定动作与否的一种保护装置。距离保护作为一种原理和性能较为完善的保护,在复杂的高压电网中得到了广泛应用。以图 5 中安装在 M 处的距离保护为例,其保护范围为 M、P 之间的线路。

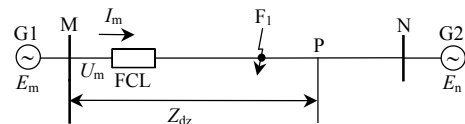


图 5 FCL 对距离保护的影响示意图

Fig. 5 Schematic diagram of FCL impact on distance protection

FCL 未动作时,若故障发生于 F_1 点,此时 M 侧距离保护测量到的阻抗 Z_{F1} 小于整定值 Z_{dz} ,因此距离保护能动作。而当 FCL 动作后,增加了 M 与故障点 F_1 之间的电气距离, M 侧距离保护测量到的阻抗由 Z_{F1} 增加到 $Z_{L1} + Z_{F1}$,一般情况下有 $Z_{L1} > Z_L$ 。其中 Z_{L1} 为限流电抗器阻抗, Z_L 为线路等效阻抗。这时如果整定值 Z_{dz} 保持不变,距离保护将会拒动。因此线路中安装 FCL 将对距离保护产生直接影响。

3) FCL 对系统零序网络及其继电保护的影响。

这取决于 FCL 的控制保护策略。当检测到单相故障时,如果 FCL 三相同时动作,那么通常情况下 FCL 都是三相对称的,其零序阻抗为 0,故 FCL 不会影响到系统零序网络。当检测到单相故障时,如果 FCL 仅故障相动作,这种情况下 FCL 会出现不对称,因此必须考虑其零序阻抗的影响。

3 串联谐振型 FCL 功能试验数据分析

完成故障电流限制器低压模型的搭建工作和控制保护样机的研制工作后,相关科研单位依据 IEC60654-1,2,4、GB/T 14047 和 DL/T 478—2001 中的相关规定对样机进行了多项型式检验,包括功能试验、绝缘试验、干扰试验、连续通电试验,并记录了大量试验数据。下面针对试验数据中最有代表性的线路过电流瞬时保护和 MOV 过电流保护 2 组试验数据进行详细分析,以验证 FCL 控制保护系统的保护配置的合理性和实用性。

1) A 相线路过电流瞬时保护动作情况。

A 相线路过电流瞬时保护动作后现场监控人机接口软件 SOE 列表记录了保护动作的整个流程。

①当 A 相线路电流达到 7537.5A(一次瞬时值)时, 阀保护单元 A 相线路过电流瞬时保护动作。动作后其保护出口如下: 发出 A 相阀触发信号, 通过阀快速投入限流电抗器; 启动 TFR 录波记录暂态波形; 向平台保护发送合 BCB 命令; 向平台保护发送暂时闭锁 BCB 命令。

②阀保护单元应上报: “A 相线路过电流保护动作”, 动作值应大于保护定值; “阀保护暂时闭锁”; “A 相阀触发信号已发送”; “阀保护解除暂时闭锁”; “阀触发信号恢复初始状态”。

③平台保护单元应上报: “平台保护收到阀保护合旁路断路器命令”; “A 相旁路断路器合位”、“B 相旁路断路器合位”、“C 相旁路断路器合位”; “平台保护收到阀保护分旁路断路器命令”。

④TFR 单元应上报“阀保护单元启动 TFR 录波”。

2) A 相线路过电流瞬时保护录波图分析。

图 6 为 A 相线路过电流瞬时保护动作时的暂态录波图。从图中可看到保护动作处 A 相线路电流(模拟产生的故障量)达到 7 537.5 A 时, 阀保护单元 A 相线路过电流瞬时保护动作, 1 ms 后低压模型上的阀组件被触发产生了阀电流(模型中的电气量), 其阀电流瞬时值为 80A。

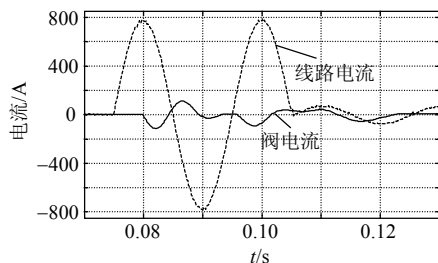


图 6 A 相线路过电流瞬时保护录波

Fig. 6 Waveforms record of line A over-current fault test

3) C 相 MOV 过电流保护动作情况。

C 相 MOV 过电流保护动作后现场监控人机接口软件 SOE 列表记录了保护动作的整个流程:

①当 C 相 MOV 电流达到 16217.5A(一次瞬时值)时, 阀保护单元 C 相 MOV 过电流保护动作。保护动作后, 其控制保护出口如下: 发出 C 相阀触发信号, 通过阀快速导通旁路电容器组; 向平台保护发送合 C 相 BCB 命令; 向平台保护发送暂时闭锁 BCB 命令。

②阀保护单元应上报: “C 相 MOV 过电流触发阀保护动作”, 动作值应大于保护定值; “阀保护暂时闭锁”; “C 相阀触发信号已发送”; “阀保护解除暂时闭锁”; “阀触发信号恢复初始状态”。

③平台保护单元应上报: “平台保护收到阀保护合旁路断路器命令”; “A 相旁路断路器合位”、“B 相旁路断路器合位”、“C 相旁路断路器合位”; “平台保护收到阀保护分旁路断路器命令”。

④TFR 单元应上报“阀保护单元启动 TFR 录波”。

4) C 相 MOV 过电流保护录波图分析。

图 7 为 C 相 MOV 过电流保护动作时的暂态录波。从图中可看到保护动作处 C 相 MOV 电流(模拟产生的故障量)达到 16217.5 A(MOV1 电流+MOV2 电流)时, MOV 保护单元 C 相 MOV 过电流保护动作。1 ms 后低压模型上的阀组件被触发产生了阀电流(模型中的电气量), 其阀电流瞬时值为 275 A。

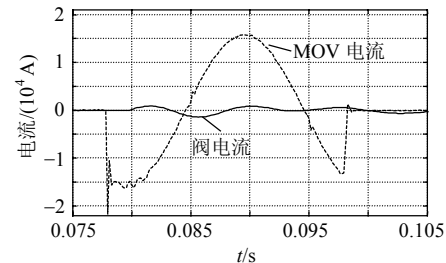


图 7 C 相 MOV 过电流保护录波

Fig. 7 Waveforms record of MOV C over-current fault test

5) 试验结论。

线路单相故障期间, FCL 控制保护样机将在小于等于 1 ms 的时间内将低压模型中的电容器组快速旁路, 从而有效限制线路上的短路电流。FCL 样机保护动作正确, 无误动、拒动, 暂态故障记录仪 (TFR) 记录了故障及保护动作全过程。

4 结论

1) 串联谐振型 FCL 样机保护配置是合理、可靠的, 能够满足 FCL 工程高灵敏度、高速度、高精度的实际需要。

2) 考虑到保护配置对 FCL 乃至电力系统都会产生重大影响, 需继续深入研究其对继电保护等二次系统的影响以及提高装置可靠性的措施, 为解决电网短路电流问题提供更优化的技术手段。

参考文献

- [1] 武守远, 荆平, 戴朝波, 等. 故障电流限制技术及其新进展[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 23-32.
Wu Shouyuan, Jing Ping, Dai Chaobo, et al. Fault current limiting measures and their recent progress[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 23-32(in Chinese).
- [2] 荆平, 武守远, 邱宇峰, 等. 220 kV 成碧可控串补装置的保护配置[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 5-9.

- Jing Ping, Wu Shouyuan, Qiu Yufeng, et al. Protection configuration for thyristor controlled series compensation device in 220 kV power transmission line from Cheng County to Bikou[J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 5-9(in Chinese).
- [3] 钱家骊, 刘卫东, 关永刚. 非超导型故障电流限制器的技术经济分析[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 42-43,61.
Qian Jiali, Liu Weidong, Guan Yonggang. Economical and technical analysis of non superconducting fault current limiter[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 42-43,61(in Chinese).
- [4] 华东电网有限公司, 华东电力试验研究院有限公司. 超高压电网故障电流限制器选点方案讨论[R]. 上海: 华东电网有限公司, 2007.
- [5] 林集明, 项祖涛, 申洪. 关于华东电网短路电流限制器示范工程选点和设备主参数选择的意见[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [6] 温家良, 习贺勋, 王华昕. 500 kV 电网故障电流限制器的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [7] 钱峰, 徐平, 劳建明. 超高压电网故障电流限制器示范工程设备布置方案研究可行性研究报告[R]. 杭州: 浙江省电力设计院, 2008.
- [8] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.
Ruan Qiantu. Present situation of short circuit current control in Shanghai power grid and countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 78-83(in Chinese).
- [9] 林集明, 项祖涛, 申洪. 华东 500 kV 超高压电网故障电流限制器基本设计与保护控制研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [10] 李伟, 李兴源, 洪潮, 等. 抑制次同步谐振的可控串补线性最优控制器设计[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 10-14.
Li Wei, Li Xingyuan, Hong Chao, et al. Linear optimal controller design of thyristor controlled series compensation to suppress subsynchronous resonance[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 10-14(in Chinese).
- [11] 王华昕, 习贺勋, 汤广福, 等. 谐振型限流器最优投切策略研究[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 36-39,51.
Wang Huaxin, Xi Hexun, Tang Guangfu, et al. Study on optimized switching on/off strategy for resonant-type fault current limiter[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 36-39,51(in Chinese).
- [12] 荆平, 戴朝波. 华东 500 kV 超高压电网故障电流限制器控制保护设计研制方案[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [13] 金雪芬, 戴朝波, 武守远, 等. 依据线路电流斜率快速识别故障信号的方法[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 29-34.
Jin Xuefen, Dai Chaobo, Wu Shouyuan, et al. Fast fault signal identification method using line current slope[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 29-34(in Chinese).
- [14] Yamazaki Y, Sugimoto S, Ogawa S, et al. Development of TCSC application to fault current limiters[J]. Electrical Engineering in Japan, 2002, 140(3): 53-63.
- [15] 曾琦, 李兴源, 温海康. 采用脉宽调制控制的新型故障限流器[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 20-23.
Zeng Qi, Li Xingyuan, Wen Haikang. A new type of fault current limiter controller by pulse width modulation[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 20-23(in Chinese).
- [16] 蓝元良, 栾洪洲, 王华锋, 等. 华东 500 kV 超高压电网故障电流限制器晶闸管阀的设计研制方案[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [17] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.
Yuan Juan, Liu Wenyong, Dong Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in Northwest China Power Grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 42-45(in Chinese).
- [18] 温荣, 谭建成. 串联电容补偿线路的相差保护特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 86-90.
Wen Rong, Tan Jiancheng. Study on phase comparison protection for series compensated lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 86-90(in Chinese).
- [19] 王维洲, 彭夕岚, 何世恩. 成碧 220 kV 可控串补装置的运行与维护[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 50-55.
Wang Weizhou, Peng Xilan, He Shien. Operation and maintenance of the first home-made 200kV TCSC equipment for transmission line from Cheng County to Bikou in Gansu province[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 50-55(in Chinese).
- [20] 华东电网有限公司, 华东电力试验研究院有限公司. 超高压电网故障电流限制器对系统继电保护的影响研究技术报告[R]. 上海: 华东电网有限公司, 2007.



喻劲松

收稿日期: 2009-03-21。

作者简介:

喻劲松(1972—), 男, 工程师, 从事检测技术与自动化装置、电力系统继电保护方面的研究,
E-mail: jinsongyu@epri.ac.cn;

荆平(1965—), 男, 高级工程师, 从事 TCSC 控制与保护、电力系统继电保护及电力系统故障诊断方面的研究;

戴朝波(1972—), 男, 高级工程师, 从事电力电子技术、电力系统自动化、电力系统数字仿真技术方面的研究;

赵勇(1979—), 男, 工程师, 从事电力系统自动化、电气工程方面的研究;

粘中元(1980—), 男, 工程师, 从事电力系统自动化、电气工程方面的研究。

(责任编辑 李兰欣)