

±200 MVar STATCOM 保护策略配置与优化

郑传材, 江文东, 张锐冬, 徐强超, 伊洋

(广州供电局有限公司, 广州 510620)

摘要: ±200 MVar STATCOM 是迄今世界上最大容量的动态无功补偿设备, 因其对电网电压支撑作用和较高的设备造价, 需要深入探讨对换流器件和辅助设备保护策略, 以确保设备安全可靠运行。文中在简要分析多级联 H 桥 STATCOM 主电路、H 桥结构和元件特性的基础上, 从装置级保护策略、功率单元保护策略和失灵保护策略 3 个方面, 分析 STATCOM 在工程应用中的保护配置策略, 并提出优化措施。保护配置策略的明晰和优化, 对多 H 桥级联 STATCOM 工程应用有较大的指导意义。

关键词: 静止同步补偿器 (STATCOM); 主电路分析; 保护策略配置; 保护优化; 工程应用

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0060-06

Relay Protection Strategies Composition and Optimization of ±200 MVar STATCOM

ZHENG Chuancail, JIANG Wendong, ZHANG Ruidong, XU Qiangchao, YI Yang

(Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: ±200 MVar STATCOM is by far the largest-capacity dynamic reactive power compensation device in the world. Because of the voltage-supporting function and higher cost, it is necessary to discuss protection strategies of commutation devices and auxiliary equipment; and then, to make it safety and reliable. In this paper, on the basic of analyzing main circuit design and H-bridge structure of cascaded STATCOM, select and discuss several aspects of relay-protection including device-level protection strategies of STATCOM, module-level protection strategies of STATCOM, breaker malfunction protection strategies; finally propose optimizations for protection scheme. A Clearer protection configuration and optimization strategies have a greater significance for multi-H-bridge cascade STATCOM in engineering applications.

Key words: static synchronous compensator(STATCOM); main circuit analysis; relay-protection strategies; relay-protection optimization; engineering applications

静止同步补偿器 (Static Synchronous Compensator, STATCOM) 作为柔性交流输电 FACTS 的组成部分, 能在系统发生故障后 1~2 个周波内起到暂态电压支撑、增加系统振荡阻尼的作用。在结构上, STATCOM 装置以减少谐波输出和提高电压型逆变器输出容量为目标, 常用多重化结构^[1], 二极管钳位多电平结构^[2]、链式连接结构^[3-4]等模式。

±200 MVar STATCOM 作为迄今为止世界上最大容量的动态无功补偿装置, 采用多 H 桥级联的主回路形式^[5-7], 已在南方电网 4 个 500 kV 站投入运行, 为交直流混联运行提供有效的动态电压无

功支撑并减少直流换相失败。

±200 MVar STATCOM 造价相对昂贵、设备安全可靠要求较高。目前针对 STATCOM 的研究主要集中在 STATCOM 的原理及控制策略方面, 在保护尤其是自身保护与接入系统元件的保护配合方面的研究较少。本文在简要分析多级联 H 桥 STATCOM 主电路、H 桥组成和元件特性的基础上, 深入分析了装置级保护策略配置、功率单元保护策略配置级和失灵保护策略, 并对对现有保护配置进行了优化, 为多级联 STATCOM 的工程应用提供了参考。

1 多 H 桥级联主电路和功率单元结构

±200 MVar STATCOM 主电路以“Δ 型”主接线方式接入以实现分相独立控制。该接线方式可以解决单相接地时中性点电压偏移时, 功率单元上电

收稿日期: 2015-09-26

作者简介: 郑传材(1983), 男, 广东汕头人, 工程师, 工学硕士, 主要从事电力系统电力系统分析运行与控制, 继电保护自动化研究工作(e-mail)gdchzcc@126.com。

力电子器件受到较大冲击电压的问题, 有利于保护器件。根据每套额定容量 ±100 MVar 额定输出功率, 额定工况下各相的电流如式(1)所示。

$$I_N = \frac{Q_N}{3U_N} = \frac{100 \times 10^3}{3 \times 35} = 952 \text{ A} \quad (1)$$

考虑暂态支撑, 采用最大过负荷倍数 1.5 p. u.^[8], 此时电流有效值为 1 429 A。根据过负荷倍数, 可选用 IEGT 可控晶闸管^[9-10] 耐压等级和电流等级为 4 500 V、1 500 A, 该型号器件长期直流耐压水平为 2 800 V。考虑到交流电压峰值和过电压等因素, 设定 IEGT 最高可承受的交流电压有效值为 1 500 V, 以上这些参数是整个保护配置分析的基础。

每套设备各相由一个换流链构成, 采用级联的方式。由此可换流链级数 N 如式(2)所示。

$$N = \frac{U_N}{1\,500} = \frac{35 \times 10^3}{1\,500} = 24 \quad (2)$$

按上述分析采用 24 级设计时, 当任一级退出运行将危及其余运行 H 桥的安全性, 因而设备需要设置一定冗余功率单元。按每个换流链留取设备 10% 的冗余单元, 即冗余功率单元为 3 级, 因而每相换流链 H 桥的级联级数为 27 级。

由于 STATCOM 装置一次为 35 kV 的电压等级, 当接入系统时通过连接变压器连接 220 kV 或 500 kV 电压等级, 需通过连接变压器。根据分析, 主电路的结构如图 1 所示。

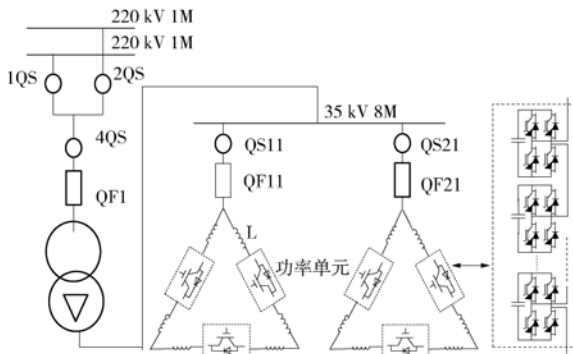


图 1 ±200 MVar STATCOM 接入主电路图
Fig. 1 Main Circuit of ±200 MVar STATCOM

每个 H 桥为一个功率单元, 由电容器、撬杠电路、缓冲电路、并联电阻、换流相模块和旁路模块等部分组成, 其基本组成原理如下图 2 所示

电容器 C 为电压源换相(VSC)提供电源, 有储能和滤波作用。电容的选择考虑 IEGT 的工作电压、

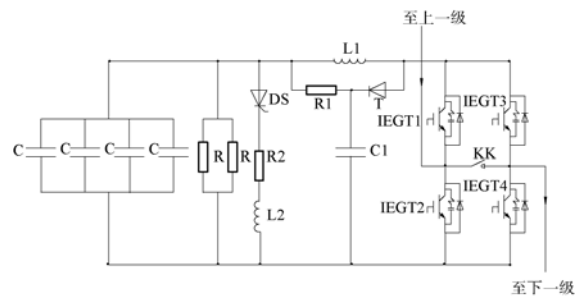


图 2 功率单元结构

Fig. 2 Configuration of Power Unit

直流电压波动和输出电流峰值因素^[11]。

并联电阻 R 考虑在停机的情况下, 将单元直流侧的电压消耗掉; 作为直流电容的负载, 用于功率单元封锁脉冲后, 为谐波激磁提供去磁电流通路, 防止由于变压器铁芯饱和导致二次波形传变畸变, 造成直流电容过电压。

撬杠电路由 DS、R2、L2 组成, 考虑功率单元发生故障(包括单元过压、相模块内部短路等)时, 触发晶闸管 DS 导通, 使电流通过撬杠模块内部的晶闸管、电感和电阻形成通路, 快速消耗电容器的储存能量并使流过故障电路的短路电流进行分流。

缓冲电路由 L1、R1、T 和 C1 组成, 保护功率单元由于误触发或不能关断引起的上下 IEGT 桥臂直通。考虑到 IEGT 器件的关断特性, 当短路电流的上升速度 di/dt 过大, IEGT 将无法关断。利用二极管 T 单向导通特性, 正常时直流电流 I_d 流经 T 和 R1, 而桥臂直通时故障电流将流经 L1, 起到限流作用, 保证 IEGT 可靠关断

相模块用于换流的主要元件, 每个相模块电路由 4 只 IEGT、4 只续流二极管及阻尼电路组成。旁路模块是一个真空开关 KK, 并联在进线的两侧。旁路开关采用在线旁路模式, 用于将退出故障的功率单元旁路, 可以减少整套设备的停运次数^[12]。

2 STATCOM 保护功能配置

#1、#2 STATCOM 通过变压器接入 220 kV 系统, 因而保护应涵盖变压器保护、STATCOM 装置级保护、功率单元保护、失灵保护等方面。由于变压器保护较与常规保护并无特殊要求, 在此不再赘述。

2.1 STATCOM 系统保护功能配置

STATCOM 装置级保护动作结果分别为: (1) 闭锁脉冲; (2) 闭锁跳闸: 闭锁脉冲并跳开进线断

路器,如图1中的 QF11 或 QF21。

闭锁跳闸用于保护危及设备或其它设备无法恢复的故障情况。闭锁脉冲用于可恢复性故障,保护速度为微秒级。当装置级保护功能动作时,通过脉冲控制柜下行光纤,将闭锁命令传至各功率单元。功率单元由于某些故障造成设备无法运行的,如过流或功率单元故障旁路失败,将通过上行光纤传至装置中心控制器,再由中心控制器传送下行命令至其它相功率单元控制板再闭锁触发脉冲。

STATCOM 装置级保护配置如下图3所示。

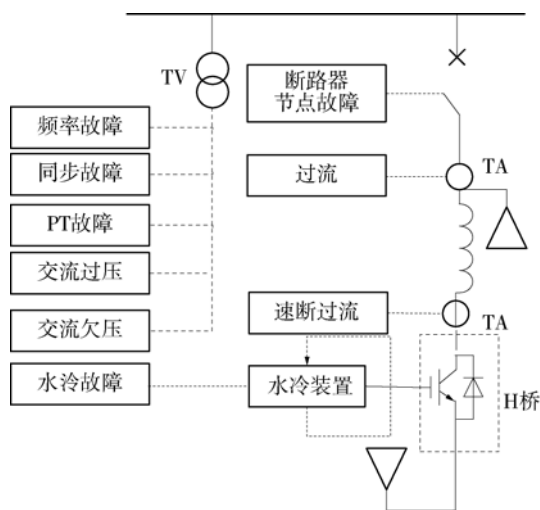


图3 STATCOM 装置级保护配置

Fig. 3 Device-level Protection Configuration of STATCOM

原设计考虑到 220 kV 母差保护、失灵保护、主变保护等影响保护跳开 QF1 时,将使两套 STATCOM 断开与系统的连接。同样,当 QF11 或 QF21 断路器断开将影响相应的 STATCOM 运行,为简化保护间的连接和配合,因而采集以上开关常开辅助接点,设置接点开入异常保护。若有 QF1 常开接点断开,则闭锁并同时跳开 QF11 或 QF21;若运行中 QF11 或 QF21 接点开入异常,则闭锁相应的 STATCOM 装置。

IEGT 的运行的冷却受制于水冷系统。水冷系统是一个串联的水路,当出现泄露、水冷系统由于压力流量或水泵停运等原因造成的水冷系统无法支持正常的冷却功能时,水冷会向对应的装置控制柜发送请求停机跳闸和请求停水冷却开入,也会使对应的 STATCOM 装置闭锁并跳闸。

过压保护用于保护 IEGT 关断时所承受的反向耐受电压在允许范围。考虑 IEGT 耐受电压安全裕

度 k_k 为 1.8., 通过下式(3)可以得出 35 kV 母线过压保护定值约为 42 kV, 动作闭锁并跳开两个变低开关。其中 N_{\min} 为最小运行的级数。

$$V_{OL} = \frac{4500}{\sqrt{2} \times k_k} \times N_{\min} \quad (3)$$

PT 故障和欠压都会造成 STATCOM 无法正常运行。以上两种故障都有可能由于暂时熔丝熔断或二次空开跳闸造成,属于暂时性故障。欠压保护取 $U_{ac} < 0.2 \text{ pu}$, 时间 0.1 s 动作闭锁脉冲,等故障恢复时快速投入。PT 断线可按 PT 断线判据,线电压最大与最小值之差大于 0.4 pu,并持续 0.2 s。

IEGT 的正常工作电流约为 1 500 A, 与 1.5 倍 5 s 过负荷配合。因而将过负荷电流设置动作时间设置为 10 s, 保护定值 I_2 设置为 1.5 倍额定工作电流,动作为闭锁脉冲。

过流速断为 $1.2I_2$ 过流定值。当串联在各相中的直流电流互感器 LEM 连续采到 8 个点超过保护定值,即通过串行光纤闭锁本相各功率单元,同时通过上行光纤送至对应的装置控制装置,由装置级控制装置发送闭锁命令给其它两相。闭锁时间间隔 Δt (Δt 取 2.5 s) 后检查电容电压、交流电压和交流电流正常后重启装置。若重启后仍过流,则重新闭锁并跳闸旁路功率用于保护当旁路的功率单元超过 3 个的情况。如第 1 节中分析,将危及设备的安全,因而此时不允许设备运行,需将设备停运。另外由于功率单元与脉冲控制柜通信故障,或是由于故障功率单元旁路失败,也会使设备停运。

2.2 STATCOM 功率单元保护功能配置

功率单元保护分为两类:(1)是不影响整套 STATCOM 装置的功能的故障形式;(2)为影响 STATCOM 装置的功能或危及设备安全,需要将整套设备停运。

第一类通常是由于故障使本功率单元功能失效但不会影响整体功能和安全,例如电容器过压、电容器欠压、电容器压力过大、触发故障、IEGT 驱动电路、隔离电源失效等。第二类包括通常为某个 H 桥故障后无法隔离或某个部分故障后影响到整套 STATCOM 装置的控制。如过压时撬杠失效、单元板与脉冲控制柜通信中断、功率单元检测到漏水、旁路失败、撬杠失效等。

过压保护是用于保护当电容器超过额定工作电压时,防止电容器击穿。定值设置为工作电压

2 800 V 的基础上增加一定的裕度, 保护定值为 3 000 V。欠压保护取 1 400 V, 主要考虑当低于该电压时合闸会存在较大冲击电流。欠压保护和过压保护动作都是瞬时动作旁路阀组。

第一类故障发生后, 位于功率单元上的单元控制板将自动触发, 使撬杠电路动作, 并使两个上部 IEGT 或两个下部 IEGT 导通, 使桥臂导通提供 0 电压状态, 为电流提供通路。同时, 将故障 H 桥的上的旁路接触器接通, 然后闭锁该 H 桥的触发脉冲并将本相除故障功率单元外的其它功率单元进行移相。

装置控制器检测到某一功率单元故障时, 在上述过程的同时, 将调整同相其它功率单元的移相角 $2\pi/N \rightarrow 2\pi/(N-1)$, 在此调整过程中, 依靠直流电压、交流电流控制反馈电路, 防止其它功率单元过压、欠压或过流, 从而完成在线旁路的过程。

撬杠电路提供直流电容的能量消耗, 而且此时旁路接触器闭合。由于存在缓冲电路且撬杠电路的分流作用, 确保 IEGT 保护可靠关断。

撬杠失败的判别方法是判别在撬杠命令发出 0.1 s 内, 单元板在检测到电容电压仍大于 500 V。旁路失败为发出旁路命令 0.5 s 后, 仍检测不到 KK 合位开入, 则认为旁路开关动作异常仍然, 进入第二类故障动作序列。

整个功率单元的故障判别逻辑如图 4 所示。

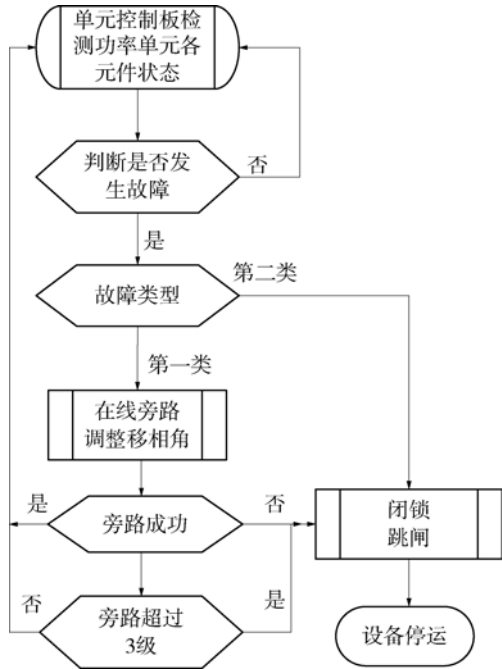


图 4 功率单元故障判别流程

Fig. 4 Fault Detection Flow of the Power Unit

2.3 STATCOM 失灵保护策略功能配置

失灵保护作为主保护的近后备保护, 能防止断路器拒动所对设备的损害。在 500 kV 北郊站和 500 kV 木棉站 STATCOM 工程中, 失灵配置按电压等级分层设备, 包括变高开关失灵、变低开关电量失灵保护、STATCOM 保护启动失灵保护等 3 个部分。

变高开关配置与 220 kV 开关相同的失灵保护, 为配合站内旧失灵回路, 仍采用 RCS974 判电流判据, 开关动作接点和操作箱三跳接点并接的办法。满足失灵电流判据, 时间和动作条件, 经失灵屏电压闭锁条件后, 经较短时限(一般整定为 0.2 s)跳开母联开关, 再经一个时限(一般整定为 0.4 s)后, 切除失灵断路器所在母线的各个连接元件, 保护配置动作如图 5 所示。

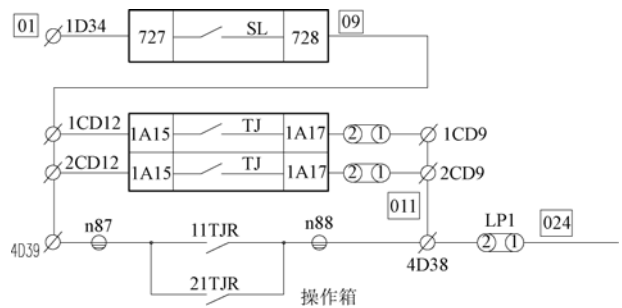


图 5 变高开关失灵保护回路

Fig. 5 Malfunction Protection of 220 kV Breaker

变低开关针对非短路故障配置的失灵保护。STATCOM 变低和内部短路故障时, 主变高后备保护达不到灵敏度要求, 起不到远后备的作用, 因此变低需配置断路器失灵保护。断路器失灵保护采用断路器保护装置的电流判据, 同时收到 STATCOM 系统控制柜发出的跳闸命令, 到时限动作切相邻断路器, 保护配置动作如图 6 所示。

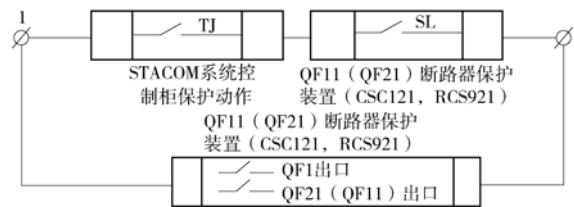


图 6 变低短路保护失灵回路

Fig. 6 Short-circuit Malfunction Protection of 35 kV Breaker

失灵相电流和负序整定一次值按规程固定取 240 A, 经 0.3 s 跳本断路器, 经 0.5 s 跳开相邻变高开关和另一变低开关。

STATCOM 保护启动失灵保护。当 STATCOM 出现除了短路故障外的其它故障时, 由于电流达不到断路器失灵保护的動作电流, 将造成断路器失灵保护不起作用。若此时对应 STATCOM 的出线开关拒动, 将严重损害到 IEGT 和其它电力电子器件, 这是绝对不允许出现的。短路外的故障可能包括 STATCOM 工作电源失电、各柜体工作电源失电、水冷系统故障、通信故障等非电量因素, 还有欠压和过压等电量因素。

为了克服非短路故障无失灵保护的不足, 通过设计针对上述非电量因素和过压欠压等电量因素所造成的跳闸出口回路。出现非电量故障或过压欠压等故障跳闸时, 在判断对应进线 DL 开关辅助接点达不到常开接点为 0、常闭接点为 1 的条件, 经过 1 s 延时(与变低短路失灵 0.5 s 配合), 经时间继电器两组辅助接点通过变高操作箱 TJF 跳变高 QF1 两组跳闸线圈, 此时由于 QF1 经 TJF 跳闸属于 QF11 或 QF21 非电量保护启动的失灵动作, 跳闸后不再启动 QF1 失灵。保护配置如图 7 所示。

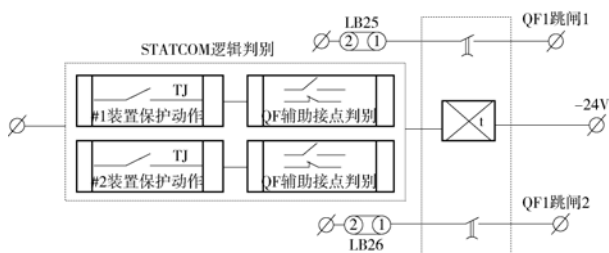


图 7 STATCOM 非短路故障失灵保护回路

Fig. 7 Malfunction Protection of 35 kV Breaker Excluding Short-Circuit Fault

以上三项失灵设计完备地解决了由于 STATCOM 系统保护、功率单元保护、变压器保护或开关元件拒动时及时隔离故障, 优化了整个保护各环节的配合

3 STATCOM 工程保护配置的优化

3.1 开关位置异常保护的优化

原设计考虑到 220 kV 母差保护、失灵保护、主变保护等保护跳开 QF1 时, 将使两套 STATCOM 断开与系统的连接, 此时 STATCOM 正常应闭锁退出。

现有解决该问题的方法是当 STATCOM 正常运行过程中, 通过判断 QF1 开关辅助接点是否发生变位, 若是即闭锁 STATCOM 触发脉冲并跳开 QF11、

QF21 开关。而在运行中出现由于 QF1 接点异常的情况而导致 STATCOM 停运。这些情况包括: 开入板 IO 故障、开入板失电、QF1 \ QF11 \ QF21 开关辅助接点损坏或未到位, 信号回路松脱等情况。

通过上述分析可见, 采用只判断开关辅助接点位置的方法来判据 STATCOM 是否应退出运行显然容易导致 STATCOM 误动, 而且降低了设备的可用率和增加维护成本。

首先采用的解决由于原判据只采用开关单位位置接点的问题, 将 QF1 的接点位置从单位位置改为双位置接点。

再者考虑引入电气量辅助判据, 即电流或电压判据, 即“电流判据 + 双位置开关辅助接点模式”和“电压判据 + 双位置开关辅助接点模式”。

1) 电流判据 + 双位置开关辅助接点模式, 可以解决大部分情况下该类型异常带来的误动问题。然而考虑到当系统电压接近于电压控制目标或处于零无功状态时, 此时电流量为 0 或接近于 0。若此时开关跳开, 电流仍然没有变化, 该模式将无法判别。

2) 电压判据 + 双位置开关辅助接点模式。STATCOM 系统正常运行方式, 35 kV 母线电压必然是在正常的范围内; 若此时 QF1 由于某种原因跳开, 此时 STATCOM 系统因无法锁相且和电源侧失去连接, 故 35 kV 母线将会电压将会降低到 0 附近, 因而可以引入 35 kV 母线电压较大突变为电气量辅助判据。

通过上述分析, 将最终的逻辑优化为下列判据:

(1) 电压判据满足; (2) 双位置开关辅助接点动作; (3) 达到断路器固有动作延时 t_1 。断路器固有动作时间可取为 80 ~ 100 ms。经过优化后可以防止由于上述原因造成的 STATCOM 误跳闸, 判据如式(7)所示: 其中 DL_{QF11} 为 QF1 开关常开辅助接点的位置, DL_{QF10} 为 QF1 开关常闭辅助接点的位置。

$$\begin{cases} (DL_{QF11-n0} = 1) \cap (DL_{QF10-n0} = 0) \\ (DL_{QF11-n1} = 0) \cap (DL_{QF10-n1} = 1) \\ \Delta U_{35 \text{ kV}} \leq 0.2 \text{ p} \cdot u \\ t \in ([t_0, t_1]) \end{cases} \quad (7)$$

若系统且满足式(7)进入闭锁状态, 如果只是开关接点检测回路故障, 则系统正常工作, 此时只将 QF1 接点变位信息通过 SER 上传至后台。

3.2 非电流量故障的失灵配置优化

2.3 节中所设的 STATCOM 保护启动失灵保

护, 用于防止非电量因素和过压欠压等电量因素可能造成对设备损害。通过保护动作和时间继电器去跳变高 QF1 的逻辑。在原理上没有问题, 但运行中会存在极大不可靠性。不可靠性有下列几个方面:

1) 外置时间继电器动作时间难以准确整定, 在受振动时会导致整定的时间不精确。

2) 采用同一时间继电器的两个辅助接点, 增加共因故障概率; 外置时间继电器的辅助接点的工作质量不如集成装置。

3) 两套 STATCOM 共用时间继电器, 使一套 STATCOM 检修时, 另一套 STATCOM 不允许投入非短路故障失灵保护。

4) 采用跳变高的方式, 跳变高后 STATCOM 装置控制柜检测到 35 kV 无压或 QF1 变位的方式再去跳开另一组运行中的 STATCOM 装置, 不如直接跳开进线开关 QF11(QF21) 时间快。

综上所述可以在不增加成本的前提下, 将接入回路修改为如下图 8 所示:

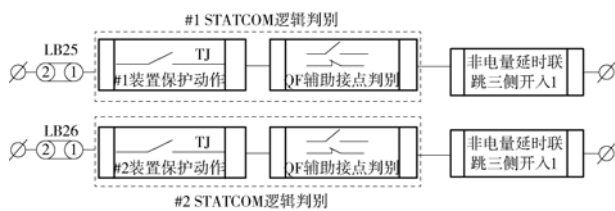


图 8 STATCOM 非短路故障失灵保护回路优化

Fig. 8 Malfunction Protection Optimizing of 35 kV Breaker Excluding Short-Circuit Fault

优化后, 采用非电量开入带延时联切主变三侧中的时间来代替时间继电器, 两套 STATCOM 非电量故障失灵保护独立工作, 可以保证一套 STATCOM 检修, 另一套 STATCOM 运行, 提高整个 STATCOM 装置的运行可靠性。失灵保护动作后联跳三侧, 使另一套运行中的 STATCOM 最直接可靠地切除。

4 结论

± 200 MVar STATCOM 作为柔性交流输电的重要元件, 在南方电网主网架中得到首次工程应用, 至今在多次暂态过程中起到很好的电压支撑作用。文中基于 STATCOM 的设计和元件特性, 保护整定导则和保护配合原则, 从多 H 桥级联 STATCOM 的主电路结构设计和元件选型入手, 分析级

联 H 桥的故障特性。基于设备的特性和参数, 从 STATCOM 装置级保护、功率单元保护和失灵保护 3 个方面, 进一步明晰和优化保护策略配置。研究成果确保保证 STATCOM 在安全运行的前提下, 更好地服务于电网动态无功支撑, 同时为 STATCOM 或其它电力电子设备的保护配置在工程上的应用提供借鉴。

参考文献:

- [1] 陈阿莲, 邓焰, 何湘宁. 一种具有冗余功能的多电平变换器拓 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 34-39. CHEN Alian, DENG Yan, HE Xiangning. A Multilevel Converter Topology with Redundancy Ability [J]. Proceedings of The CSEE, 2003, 23(9): 34-39.
- [2] PENG F Z. A Generalized Multilevel Inverter Topology with Self-Voltage Balancing [C]. Industry Applications Conference, 2000(8): 2024-2031.
- [3] 倪喜军, 赵剑锋, 郑良广, 等. 级联型 STATCOM 直流电压他励控制 [J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 1188-1193. NI Xijun, ZHAO Jianfeng, ZHENG Lianguang, et al. Separately Excited Control for The DC-voltage of Cascaded STATCOM [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 1188-1193.
- [4] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器的原理与实现 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [5] 陈兴华, 朱长胜, 王海龙, 等. H 桥级联 STATCOM 的控制策略及仿真 [J]. 电网技术, 2009, 33(19): 119-122. CHEN Xinghua, ZHU Changsheng, WANG Hailong, et al. Control Strategies and Simulation of STATCOM Based on Cascaded H-Bridge [J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 119-122.
- [6] 黄剑. 南方电网 ± 200 Mvar 静止同步补偿装置工程实践 [J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 15-20.
- [7] 魏伟, 饶宏, 许树楷, 等. 大容量静止同步补偿器在南方电网的应用 [J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 7-12.
- [8] 蔡海青, 张建设, 韩伟强, 等. 南方电网东莞 STATCOM 过负荷与暂态逻辑控制仿真研究 [J]. 南方电网技术, 2013, 7(4): 75-77.
- [9] 雷烈波, 李勇, 胡广振. 高压大容量静止同步补偿器的优化节能运行 [J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 488-494.
- [10] 饶宏. 南方电网大功率电力电子技术的研究和应用 [J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 1-5.
- [11] 胡应宏, 任佳佳, 王建勋, 等. 级联 STATCOM 阀组直流侧电压不平衡现象及原因分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 96-99.
- [12] 许树楷, 陈名, 傅闯, 等. 南方电网 ± 200 Mvar 静止同步补偿装置系统调试 [J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 21-25.

(责任编辑 黄肇和)