

· 运行分析 ·

智能变电站 FACTS 组合装置的应用及其跳闸事件分析

杨光, 李斌

(国网南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要:智能变电站安装静止型无功发生器(SVG)和晶闸管投切电容器(TSC)等柔性交流输电系统(FACTS),可综合利用两类装置优点,实现智能、柔性、动态地补偿所需无功。文中从原理、结构、性能及控制策略几个方面介绍了GM(GMRP 动态组播管理协议)智能变电站 SVG 及其与 TSC 构成的 FACTS 装置智能协调控制系统,同时剖析了一起试运期间的 SVG 保护跳闸事件,找出了跳闸原因,即系统电压谐波含量突增,引发相关保护误动。最后给出相关整改措施及建议,希望为同类柔性输变电设备(如 STATCOM、UPFC 等)的设计、运检提供一定参考和帮助。

关键词:柔性交流输电系统; 静止型无功发生器; 晶闸管投切电容器; FACTS 装置智能协调控制系统; 保护跳闸
中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3203(2018)01-0130-06

0 引言

晶闸管投切电容器(TSC)设备通过晶闸管实现电容器组的电压过零投入与电流过零切除。而最新一代静止型无功发生器(SVG)则突破了传统机械式并联电抗器、投切电容器的静止型调压手段,灵活性及柔性更优于 TSC^[1-4]。

110 kV GM 智能变电站则试装了江苏省电力有限公司首套 SVG + TSC 柔性交流输电系统(FACTS),充分利用了二者各自的优点和长处,对二者进行协调控制和输出,继而智能、柔性、动态地补偿所需无功,达到整体最优化。文中将重点介绍 SVG 装置及其与 TSC 的协调控制系统在 GM 变电站中的应用,同时剖析一起试运行阶段的保护跳闸事件。

1 GM 变电站 FACTS 组合装置

1.1 GM 变电站 SVG 装置

1.1.1 SVG 介绍

SVG 作为一种静止型无功发生器,为图 1 中第三代无功补偿装置,相当于一个可变的无功电流源,其无功电流可以快速跟随负荷无功电流变化,自动补偿系统所需的无功功率,并且可从感性到容性全范围内连续调节,响应速度快,满足系统运行方式快速变化时的需求,可以提高供用电系统及负载的功率因数,稳定受电端及电网电压,抑制电压闪变,改善系统电压稳定性^[5-7]。

SVG 利用可关断电力电子器件(如 IGBT)组成的桥式电路,经过电抗器并联在电网上,通过调节桥式电路交流侧输出电压的幅值和相位就可以吸

收或者发出满足要求的无功电流,实现动态无功补偿的目的^[8-9]。

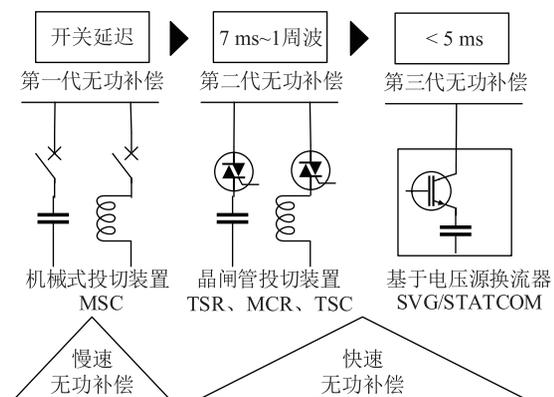


图1 无功补偿装置发展示意

Fig. 1 Development of reactive power compensation device

SVG 装置的优越性有^[10-11]:为输电系统提供有效的电压支撑;减小电压和电流的不平衡,抑制不对称负荷;滤除流入系统的谐波电流;减小电压波动引起的闪变;线性补偿无功,响应速度快;可在较大电压范围内进行调节。

SVG 可适当地调节交流侧输出电压幅值与系统电压幅值的关系来确定输出功率的性质与容量,当其幅值大于系统侧电压幅值时输出容性无功,小于时输出感性无功。

1.1.2 SVG 装置构成

GM 变电站 SVG 装置一次接线如图 2 所示,主要由以下部分组成:

- (1) 连接电抗器。防止合闸涌流和高次谐波。
- (2) 启动柜。在主开关合闸后,通过充电电阻对功率单元进行充电,当充电电压达到设定值,将电阻旁路。
- (3) 功率柜。主要组件是功率单元,共 6 个功

率柜,每相 12 个功率单元。

(4) 控制柜。包含核心主控及保护装置、阀组触发控制单元。主要完成信号采集,阀组脉冲的发生,控制策略的实现,SVG 系统的自检、监视和保护等。

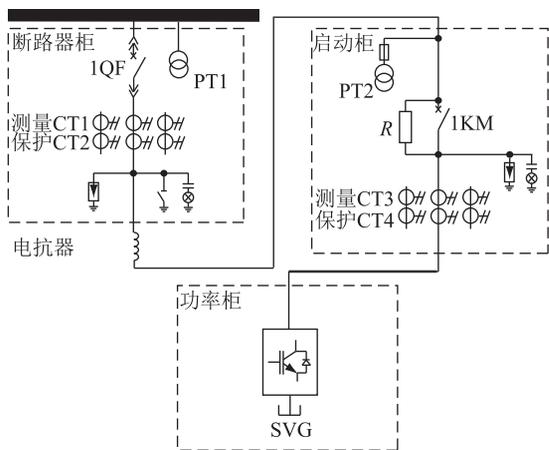


图 2 GM 变电站 SVG 装置一次接线

Fig.2 Primary wiring diagram of SVG device

1.1.3 SVG 装置控保系统

本站静止无功发生器(SVG)控制系统由 PCS-9583 主控单元(PCP)、PCS-9589 阀控单元(VBC)和子单元控制(SMC)组成。其中,PCP 完成采样数据收集、处理,有功、无功控制,对上位机通信,接收 VBC 上送的阀组汇总信息并发送控制命令至 VBC。VBC 将阀组状态信息上送至 PCP,同时通过光纤接收 PCP 下发的信号,完成各阀组功率分配。SMC 对各功率阀组状态信息进行监视、采集并上送至 VBC,同时接受 VBC 下发的命令。

1.1.4 SVG 装置状态说明

(1) 预充电过程。若无任何故障,接受到起机命令后,闭合主断路器。当直流电压充电到设定值时,自动闭合预充电旁路开关。等待解锁命令后转入运行状态。

(2) 运行状态。可以补偿无功功率和功率因数、稳定电压或抑制谐波。当发生系统严重故障或者某相冗余链节不足时,控保将发跳闸命令,并转入跳闸故障状态^[12-13]。

(3) 跳闸故障状态。当出现系统级严重故障,或者控制装置故障、严重通信故障时,发出跳闸命令,断开主断路器(图 2 中 1QF),断开预充电旁路开关。

(4) 正常停机状态。当不需要 SVG 投入运行或者进行检修维护时,可以通过后台遥控或就地控制系统进行停机,当发出停机命令后,系统自动断开主断路器,断开预充电旁路开关,进入停机状态。

1.2 GM 变电站 TSC 装置

TSC 为图 1 中第二代无功补偿装置,其电容器组投切单元由晶闸管、真空接触器共同组成,采用电容器残压实时检测技术,当检测到残压与供电系统电压大小相等、方向相同时,使开关导通,提高了电容器的运行寿命与工作可靠性,其响应速度快,可频繁投切。

1.2.1 TSC 装置构成

GM 变电站 TSC 装置由触发控制系统、投切单元、检测系统及配套电容器、开关柜等组成,其一次接线示意图 3。

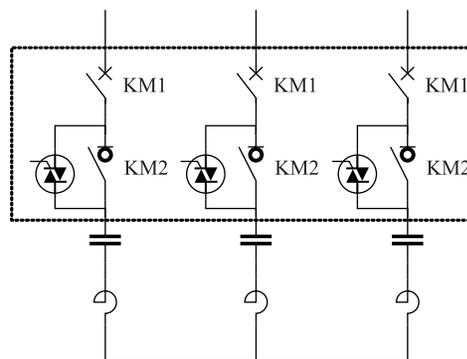


图 3 GM 变电站 TSC 装置一次接线

Fig.3 Primary wiring diagram of TSC device

非检修状态时开关柜的真空断路器始终处于闭合状态,对电容器组的操作由无损投切装置完成。而电容器组的故障保护由高压开关柜完成(硅堆不具备拉断短路电流的能力)。

1.2.2 TSC 装置投切过程

(1) 投入过程。上位真空接触器 KM1(和硅堆串联)—晶闸管导通(自动)—下位真空接触器闭合 KM2(和硅堆并联)(自动)—关断晶闸管(自动)。

(2) 切除过程。导通晶闸管(自动)—断开下位真空接触器 KM2(自动)—关断晶闸管(自动)—关断上位真空接触器 KM1(自动)。

1.3 FACTS 设备智能协调控制系统

FACTS 协调控制系统由协调控制柜、TSC 和 SVG 装置组成,协调控制柜通过交换机对 TSC 和 SVG 下发控制指令(见图 4),并接收装置的状态信号。其中单母线 TSC 容量为 6 Mvar,SVG 调节范围为±2 Mvar,电压等级都为 10 kV。协调控制器可控制 TSC 装置的分合闸(即电容器组的相关接触器、晶闸管)以及 SVG 装置的无功输出值,并与调度 AVC 进行通信。

1.3.1 基本控制策略

(1) 当系统无功负荷从小变大时,优先调节 SVG 的无功输出,当 SVG 发出的容性无功不足以补

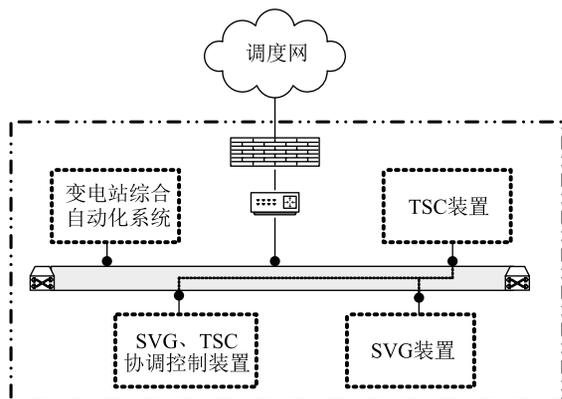


图4 GM变电站FACTS智能协调控制系统

Fig.4 Topology of FACTS's intelligent coordinated control system

偿时,投入TSC组,SVG进行辅助调节。

(2) 当系统无功负荷从大变小时,协调控制器优先调节SVG补偿容量,当SVG发出的感性无功不足以补偿时,协调控制器切除TSC,SVG作为辅助调节。

1.3.2 联合控制的优点

TSC可无损投切电容器,单位容量成本低,但不能无级及反向调节。SVG可按需无级、正反调节无功,但单位容量成本高。而本站FACTS协控系统充分发挥了其互补效应,增强了调控灵活性,可根据电网情况高效投切电容器、补偿无功功率。

2 GM变电站SVG跳闸事件分析

在试运期间,110 kV GM变电站SVG于2015年1月16日发生保护动作跳闸事件:由SVG本体主控单元PCS-9583跳开1号动态无功补偿装置(SVG)的开关柜主断路器1QF(调度编号1D1),对应开关柜上的WCB-822C保护未动作。相关分析如下^[16-17]。

2.1 保护构成

110 kV GM变电站SVG相关保护由设于相应10 kV开关柜的WCB-822C保护装置及设于SVG现场控制柜的PCS-9583主控单元共同组成。

其中WCB-822C投过流、过负荷、负序、零序、低压等功能,保护范围为开关柜流变至SVG装置末端,动作后跳开图2中的主断路器(调度编号1QF)。而PCS-9583的保护功能是为了SVG装置的安全、稳定运行,本体、母线及上端电源故障或异常(如过流、过负荷、欠频、过频、失压、过温及零序、负序、谐波超标等)都有可能引起保护动作,保护动作后跳开图2中的主断路器1QF及SVG启动柜内预充电旁路开关1KM。

2.2 跳闸分析

提取SVG控保装置录波图(图5、图6)。

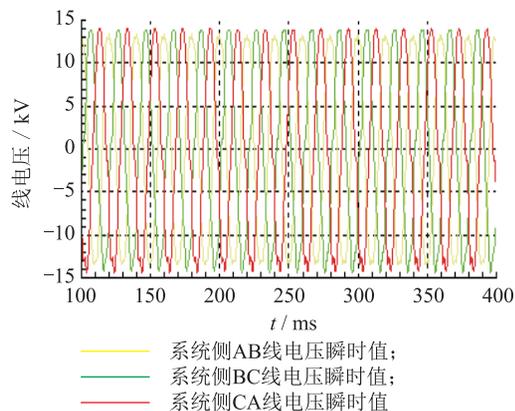


图5 GM变电站系统侧电压波形

Fig.5 Voltage waveform of Grid side

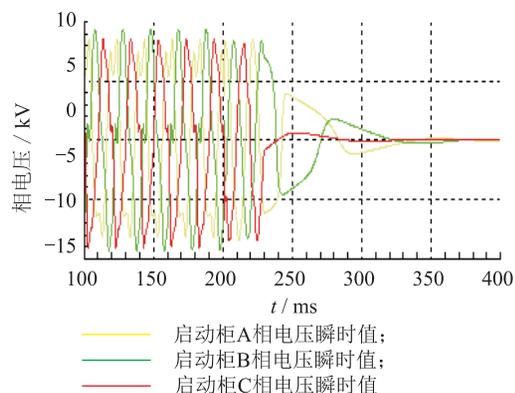


图6 GM变电站SVG相电压波形

Fig.6 Current waveform of SVG device

对保护动作前后的电网电压波形进行分析,如图7、图8所示,期间系统电压(10 kV母线电压)含有较高含量的2~8次谐波。

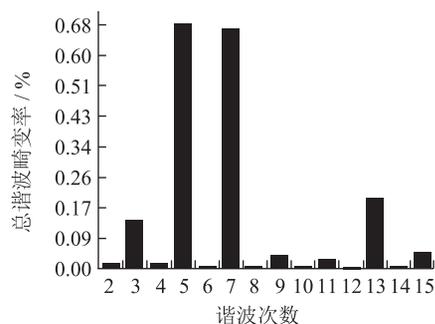


图7 动作前谐波含量

Fig.7 Harmonic contents before relay protection action

由总谐波畸变率计算式(1),取最高6项计算保护动作时的谐波畸变率超过13.13%(GB/T 14549—1993电能质量公用电网谐波国家标准规定10 kV电压等级正常谐波畸变率不超过4%)。

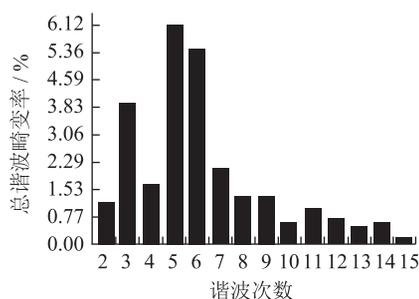


图8 动作时谐波含量

Fig.8 Harmonic contents during relay protection action

$$U_{\text{xb}} = \sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2} / U_1 \quad (1)$$

式中: U_i 为除基波 U_1 外的其他高次谐波。

由 PCS-9583 装置保护定值单可知,电网电压谐波闭锁定值为超过 10% 动作,低于 5% 返回,显然此刻 13.13% 的谐波含量已超过定值。

调取 GM 变电站智能故障录波器的相关录波记录文件,发现故障后短时间内的谐波依然不小,其中较高的 2,3,5,7,9 次谐波含有率如下。

(1) 主变高压侧电压:

A 相 6.9%, 1.6%, 2.3%, 0.1%, 1.6%, 不计其他额外谐波的谐波畸变率为 7.62%;

B 相 10.5%, 1%, 1.6%, 0.8%, 0.1%, 不计其他额外谐波的谐波畸变率为 10.7%;

C 相 5.3%, 1.0%, 2.0%, 1.2%, 0.8%, 不计其他额外谐波的谐波畸变率为 5.93%。

(2) 主变低压侧电压:

A 相 6.5%, 6.1%, 2.2%, 0.5%, 0.9%, 不计其他额外谐波的谐波畸变率为 9.23%;

B 相 7.7%, 3.4%, 1.4%, 1.1%, 0.6%, 不计其他额外谐波的谐波畸变率为 8.62%;

C 相 3.3%, 1.7%, 1.8%, 1.0%, 1.0%, 不计其他额外谐波的谐波畸变率为 8.62%。

2.3 原因小结

(1) 整个跳闸事件的前后,同一站内的电容器组无损投切 TSC 装置的相关接触器、真空开关都无状态变动,故首先排除投切电容器组造成的电压波动。

(2) 其次 SVG 装置所连真空断路器 1D1 跳闸后,系统侧相关谐波依旧存在,故排除 SVG 相关电力电子元件故障造成的谐波过量。

(3) 通过故障录波分析,可以确定此次 SVG 保护动作原因如下:

系统电压谐波含量突增,导致 SVG 输出电流中

含有较高的谐波分量,而 SVG 主控单元 PCS-9583 的相关“2, …, 13 次谐波抑制”、“电网电压谐波闭锁”的软压板、控制字都未投,所以 SVG 的相关谐波保护并未出口。

当系统发生不对称故障,电压不平衡度较大时,则会产生负序电压,可能会导致相间电容电压不平衡,影响 SVG 运行安全。若系统发生瞬时严重不对称故障时,相关控保系统将发脉冲闭锁 IGBT 功率模块,若系统发生永久严重不对称故障时,则需要跳闸。

而本站 SVG“负序电压闭锁保护”投入,如图 7、8 所示,保护动作时的系统侧负序性谐波含有率(2, 5, 8, 11…次)特别是 5 次谐波很高(超过 6%)。咨询设备厂家技术人员,谐波分量过大会影响 SVG 负序电压的计算结果。

通过其相关计算可知,故障后系统侧电压谐波含有率依然超标,最终导致 PCS-9583 装置在“SVG 负序电压动作”闭锁阀组之后,跳开对应开关柜主断路器,这也与当时保护信息相符。

开关柜内的 WCB-822C 保护装置并没有谐波、负序电压跳闸功能,虽然投了负序过流,但其定值为 60 A,在没有短路、换路故障情况下不可能达到,所以其并未动作。

2.4 整改方案

(1) 升级 SVG 主控装置(PCS-9583)的控保程序,优化电网电压谐波检测功能模块,防止误判为系统不对称性故障,并且根据现场及设备工况自动投入各次谐波抑制,发挥有源滤波功能,提升系统电压质量。

(2) 控保系统实时检测电网电压,当确实发生不对称性故障或谐波含量超过设备补偿能力时,则首先封锁 SVG 所有功率模块 IGBT 的驱动脉冲,SVG 系统停止与电网系统进行有功、无功交换(即进入预充电状态),同时设置二级延迟(当前只设了一个 20 ms 的延迟,而电网瞬时故障恢复时间显然多于这个,建议超过相关重合闸及备自投时间),待瞬时故障电压恢复后,重新解锁相关 IGBT 功率模块进入运行状态,防止保护动作直接跳开真空断路器与电网断联系。

通过以上方案,可有效避免电网电压谐波对 SVG 持续运行产生的不利影响,同时延长了 SVG 的上网时间,使其能够最大限度的发挥无功及电压补偿、调节作用^[18]。

3 结语

文中从原理、结构及控制策略等方面,介绍了

110 kV GM 智能变电站的 SVG、TSC 及其协调控制系统。此类新式组合型 FACTS 的应用,充分利用了 TSC、SVG 各自的长处和优点,改变了现有高压电容器组投切模式,有效延长了电容器组的寿命,达到了自适应、动态、协调无功补偿的目的,提升了电网侧电压电能质量,夯实了优质保电基础。

文中同时剖析了一起试运行阶段的 SVG 跳闸事件及其原因,并给出了相关建议,自整改后运行良好,未发生同类事件。其相关定值及软压板的设置经验还可用到同类柔性输变电设备(如 STATCOM、UPFC 等)相关控制保护之中,提升装置的故障穿越能力,保障其持续安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 巩庆. 晶闸管投切电容器动态无功补偿技术及其应用[J]. 电网技术, 2007(s2):118-122.
GONG Qing. Thyristor switching capacitor dynamic reactive power compensation technology and its application [J]. Power Grid Technology, 2007 (s2): 118-122.
- [2] 赵伟, 罗安, 唐杰, 等. 静止无功发生器与晶闸管投切电容器协同运行混合无功补偿系统[J]. 中国电机工程学报, 2009(19):92-98.
ZHAO Wei, LUO An, TANG Jie, et al. Synchronous operation of hybrid reactive power compensation system with static reactive power generator and thyristor switching capacitor [J]. Proceedings of the CSEE, 2009 (19): 92-98.
- [3] 张帆, 岳理远, 闫青. 动态无功补偿装置(SVG)在 LNG 接收站供电系统中的设计应用[J]. 电工文摘, 2014(6):21-25.
ZHANG Fan, YUE Liyuan, YAN Qing. Design and application of dynamic reactive power compensation device (SVG) in LNG receiving station power supply system [J]. Journal of Electrical Engineering Abstracts, 2014 (6): 21-25.
- [4] 王宏波. 新型动态无功补偿及谐波治理装置(SVG)的应用[J]. 科技信息, 2011(3):113+425.
WANG Hongbo. Application of new dynamic reactive power compensation and harmonic treatment device (SVG) [J]. Science and Technology Information, 2011 (3): 113 + 425.
- [5] 朱夏, 王杰. FACTS 技术在智能电网中的应用与发展[J]. 水电能源科学, 2013(8):158-160.
ZHU Xi, WANG Jie. Application and development of FACTS technology in smart grid [J]. Hydropower Engineering, 2013 (8): 158-160.
- [6] 王华昕. 柔性输电技术概论[M]. 中国水利水电出版社, 2012.
Wang Huaxin. Introduction of flexible transmission technology [M]. China Water Resources and Hydropower Press, 2012.
- [7] 李晋园, 汤强, 向晖. FACTS 技术及其在电力系统中的应用[J]. 电工电气, 2011(10):38-41.
LI Jinyuan, TANG Qiang, XIANG Hui. Application of FACTS technology and its application in power system [J]. Electrical Engineering, 2011 (10): 38-41.
- [8] 衣斌. 浅谈柔性交流输电(FACTS)技术[J]. 中国科技信息, 2007(10):24-25.
YI Bin. Discussion on (FACTS) technology [J]. China Science and Technology Information, 2007 (10): 24-25.
- [9] 杨安民. 柔性交流输电(FACTS)技术综述[J]. 华东电力, 2006, 34(2):74-76.
YANG Anmin. Study on flexible AC transmission technology [J]. East China Electric Power, 2006, 34 (2): 74-76.
- [10] 何大愚. 我国电力系统及其所需 FACTS 技术的新发展[J]. 大功率变流技术, 2006(2):9-12.
HE Dayu. New development of power system and its required FACTS technology [J]. High Power Converter Technology, 2006 (2): 9-12.
- [11] 郭继坤, 牛俊涛, 姚健. 静止无功发生器(SVG)的分析与研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2014(2):11-15.
GUO Jikun, NIU Juntao, YAO Jian. Analysis and research on static reactive power generator (SVG) [J]. Industrial Instrumentation & Automation Devices, 2014 (2): 11-15.
- [12] 段军鹏. 基于 FACTS 技术的智能变电站无功补偿[J]. 云南电力技术, 2012, 40(6):47-49.
DUAN Junpeng. Reactive power compensation of intelligent substation based on FACTS technology [J]. Yunnan Electric Power Technology, 2012, 40 (6): 47-49.
- [13] 李亚平, 姚建国, 黄海峰, 等. SVG 技术在电网调度自动化系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23):80-82.
LI Yaping, YAO Jianguo, HUANG Haifeng, et al. Application of SVG technology in grid dispatching automation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (23): 80-82.
- [14] 许大卫, 陈天华, 陈建华, 等. 地区电网与新能源无功电压协调控制[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2):41-44.
XU Dawei, CHEN Tianhua, CHEN Jianhua, et al. The coordination control of reactive power and voltage in the regional grid with new energy resource [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2015, 34 (2): 41-44.
- [15] 张文, 阙波, 韦古强, 等. 双馈型风电场双层无功分配策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):79-83.
ZHANG Wen, QUE Bo, WEI Guqiang, et al. Hierarchical distribution strategy of reactive power for DFIG wind farm [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36 (1): 79-83.
- [16] 乐钰. 静止型动态无功发生器(SVG)故障分析与处理[J]. 华东科技(学术版), 2016(10):283-283.
LE Yu. Analysis and processing of static dynamic reactive power generator (SVG) [J]. East China Science and Technology: Academic Edition, 2016 (10): 283-283.
- [17] 胡海宁. 试析输变电 FACTS 技术在无功补偿及谐波治理中的应用[J]. 科技创新与应用, 2015(20):207-207.
HU Haining. Application of power conversion FACTS in reactive power compensation and harmonic treatment [J]. Sci-

ence and Technology Innovation and Application, 2015 (20): 207-207.

[18] 王 澍, 翁利民. 基于 D-FACTS 的无功补偿与谐波抑制研究[J]. 大众用电, 2007(4):22-24.

WANG Shu, WENG Liman. Study on reactive power compensation and harmonic suppression based on D-FACTS [J]. Popular Electric Power, 2007 (4) : 22-24.

作者简介:



杨 光

杨 光(1983—),男,工程师,从事智能变电站、柔性交直流输电技术应用工作(E-mail: ygsjtu@163.com);

李 斌(1963—),女,研究员级高级工程师,从事电力系统调度规划、智能电网技术前瞻应用工作。

Application of FACTS Combination Device in Intelligent Substation and Analysis of Its Trip Event

YANG Guang, LI Bin

(State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: The intelligent substation equipped with both SVG and TSC devices can use the combination advantage of them to achieve smart, flexible and dynamic compensation for the required reactive power. This paper mainly introduces the GM intelligent substation's SVG and its intelligent coordination control system with TSC from the aspects of principle, structure, performance and control strategy. At the same time, it analyzes the SVG protection tripping event, and finds out the reason, That is, the system voltage harmonic surge triggering related protection malfunction. In the end it gives the relevant rectification measures and recommendations, hopping useful for the design and inspection of the similar FACTS equipments' (such as STATCOM, UPFC, etc.).

Key words: FACTS; SVG; TSC; FACTS intelligent coordinated control system; protection tripping event

(编辑 杨卫星)

(上接第 129 页)

Research and Application of VLAN Configuration Tables Automatic Generation Technology in Smart Substation

LI Peng¹, FAN Wei², WANG Gang², GU Junjie¹, XIA Cheng¹

(1. Nanjing Five-C Smart Power Grid Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. State Grid Tianjin Economic Research Institute, Tianjin 300450, China)

Abstract: At present, the traffic management of the switches at the smart substation process level mainly adopts VLAN division method. Need to understand the working principle of VLAN and design artificially by information flow, so efficiency is not high. By analyzing the SPCD and SCD, the port topological relations of the switches are established, and the information flow of each intelligent electronic device (IED) device in the switch is analyzed, and the port VLAN ID is automatically assigned according to the ports (PVID) to auto-complete the generation of VLAN configuration tables in the switch. An automatically generated test case of 220 kV typical interval VLAN configuration table is designed. The test proves that this method can automatically generate the VLAN configuration table of intelligent station switch and control the flow direction according to the expected refinement, greatly improving the working efficiency of the site, has a certain practical value.

Key words: smart substation; switch; VLAN; automatic generation

(编辑 方 晶)