

# 南方电网高压直流保护的 PSCAD/EMTDC 仿真模型研究

余江<sup>1</sup>, 周红阳<sup>1</sup>, 黄佳胤<sup>1</sup>, 梁旭<sup>2</sup>, 毛岚<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网电力调度通信中心, 广东 广州 510620; 2. 殷图科技发展有限公司, 北京 100083)

## Research of PSCAD/EMTDC Simulation Model for HVDC Protection System of China Southern Power Grid

YU Jiang<sup>1</sup>, ZHOU Hong-yang<sup>1</sup>, HUANG Jia-yin<sup>1</sup>, LIANG Xu<sup>2</sup>, MAO Lan<sup>2</sup>

(1. Dispatching Center of China Southern Power Grid, Guangzhou, Guangdong 510620, China;

2. In-To Technology Development Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper describes the necessity and key points of setting up simulation model of HVDC protection system of China Southern Power Grid (CSG). Based on the specification of control modes and the logic diagrams of HVDC protection system provided by SIEMENS, a simulation model of Gao-Zhao HVDC project is developed independently with PSCAD/EMTDC software package. By this model, the performance of HVDC functions, such as the wave front travelling protection, the over grounding-net current at the station, or the AC over current function is researched, which confirms that the simulation model can play an important role in security and stabilization of AC/DC system operation.

**Key words:** HVDC Protection; Simulation Model; Function Block; Software Logic; SIMADYN D

**摘要:** 详细阐述了建立直流保护仿真模型的重要性, 并根据西门子提供的控制保护模块说明以及直流保护逻辑图, 基于 PSCAD/EMTDC 软件平台, 建立了不依赖于厂家的高肇直流保护仿真模型。利用该模型分析了直流线路行波保护、站内接地网过流保护、交流过流保护等直流保护功能的动作特性, 充分说明直流保护仿真模型在提高直流运行水平、保障交

直流并联运行的电力系统的安全稳定运行能起到重要的作用。

**关键词:** 直流保护; 仿真模型; 功能模块; 保护逻辑; SIMADYN D

直流输电保护系统是直流输电的核心, 其性能的好坏决定着设备的安全性和系统运行的稳定性。建立直流保护仿真模型, 为直流保护的動作特性提供了有效工具, 为定量分析定值灵敏度、确定保护配置及整定原则提供了必要手段, 是分析直流保护事故, 验证措施合理性的有力工具, 对于提高直流运行水平、保障交直流并联运行的电力系统的安全稳定等方面有十分重要的现实意义。

### 1 南方电网直流保护仿真模型的重要性

仿真分析一直是研究保护的重要工具之一<sup>[1-3]</sup>。直流控制和保护联系非常紧密, 在研究直流控制系统时必须考虑直流保护, 尤其是直流线路保护的動作行为, 而在研究直流保护的特性时也必须考虑和极控的配合关系。在直流控制保护系统的设计及测试中, 如果完全依靠 RTDS 或其他类似装置, 不仅需要大量的人力和物力, 而且工作效率较低。

其次, 直流保护模型是直流保护的数字式波形回放系统的最重要环节, 直接关系到整个系统的正

确性，需要结合实际软件逻辑建立相应的模型。

此外，到2007年，南方电网已形成6交3直的西电东送通道，而且是一个多馈入的直流输电系统，如果均采用实际装置，所需的RTDS及保护装置的屏柜数量将十分庞大，对实验室的要求十分苛刻。采用数字仿真模型，仅对需要详细的直流保护采用实际装置，可以简化实验条件和提高了实验效率。

## 2 南方电网直流保护仿真模型建设

### 2.1 建立具有自主知识产权的控制保护模块元件库

建立直流保护控制保护系统所用的功能模块仿真元件库是建立直流保护仿真模型的先决条件。天广、高肇、兴安直流工程的直流保护由SIMADYN D可编程逻辑实现<sup>[4-6]</sup>，通过多个计算及逻辑功能模块连接组成。只要在指定的仿真平台上建立保护装置内部逻辑所用到的计算及逻辑功能模块的仿真模型，就可以实现整套保护仿真模型。

以DISA1模块为例介绍控制保护功能模块的建模。图1、图2、图3分别是DISA1模块的外观图、内部功能逻辑、动作特性曲线<sup>[7]</sup>，图4、图5是模型的自定义界面、模型外观及参数输入界面。自定义模块选择元件内置脚本语言方式进行编程，虽然编程及变量定义，但数据的导入导出比较方便，便于用户使用<sup>[8,9]</sup>。

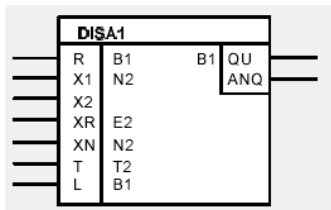


图1 模块输入/输出参数

Fig.1 Input and Output Parameter of DISA1 Block

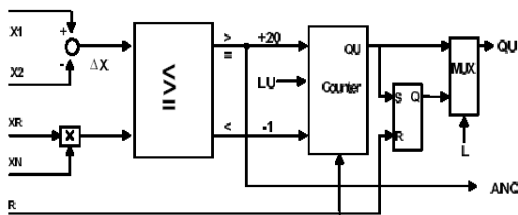


图2 模块内部功能逻辑

Fig.2 Internal Logic of DISA1 Block

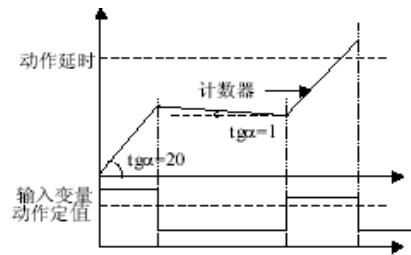


图3 模块动作特性曲线

Fig.3 Characteristic of DISA1 Block

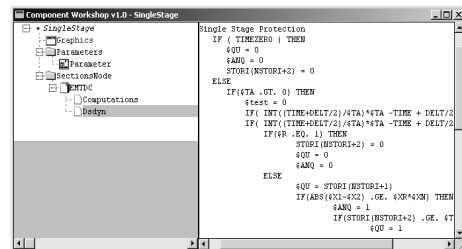


图4 自定义模块的编程

Fig.4 Program of User Defined Mode

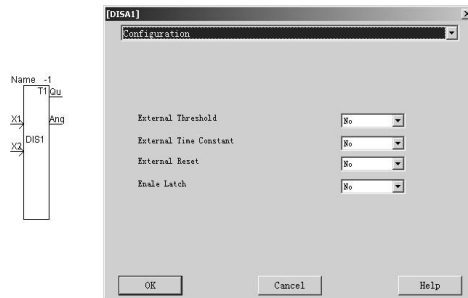


图5 自定义模块的外观及参数输入界面

Fig.5 Appearance and Parameter Interface of Defined DISA1 Block

本文参照西门子提供的SIMADYN D控制保护元件库中各元件的外观、管脚说明、内部逻辑描述，建立了用于直流保护的近50个控制保护元件模型。所建立的控制保护元件模型在模型外观、管脚名称、内部逻辑、参数界面、元件特性，都与西门子的模型保持高度的一致性<sup>[10]</sup>。

### 2.2 建立直流保护仿真模型

南方电网内的天广、高肇、兴安直流工程都是西门子公司产品，软件采用西门子公司自行开发的SIMADYN D的PLC编程语言。参照厂家提供的软件设计报告，可以清晰明了地看出各保护功能内部逻辑采用了哪些功能模块、各功能模块间的逻辑关

系及各功能模块的参数。但要将所有的保护功能模型集中到一个仿真模型中, 要注意以下几个问题:

——各保护功能的投退及闭锁条件。例如, 天广直流双极运行时广州侧的直流线路行波保护自动退出; 直流线路电流测量量突变时, 直流线路差动保护要闭锁一段时间等。

——数字滤波。在直流保护系统中运用了大量的数字滤波, 以避免谐波对保护性能的影响。在建立直流保护仿真模型时也要注意滤波环节, 确保所建立的模型能真实地反映实际装置中的软件逻辑。

——站间通讯对保护动作行为的影响。当站间通讯中断时, 有些保护的動作行为会受到影响, 例如直流线路差动保护会自动闭锁。

——采样环节。测量及数据采样是保护系统的重要组成部分之一, 直接影响到保护功能的实现及保护定值的整定, 尤其是采样环节中的限幅及前置滤波环节, 会在一定程度上影响保护模型的正确性。

本文所建立的直流保护仿真模型分为 5 个子模块, 分别为换流器保护模块、直流线路保护模块、接地极保护模块、直流母线保护模块和极控保护模块。每个子模块都有自己的输入和输出环节, 模块外观如图 6 所示。

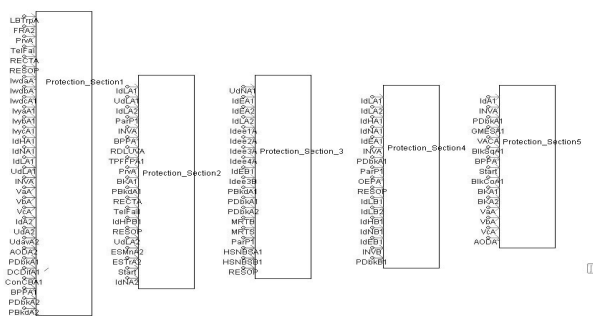


图 6 直流保护模型外观示意图

Fig.6 Appearance of Simulation Model of HVDC Protection

### 3 直流保护仿真模型应用实例

#### 3.1 直流线路行波保护动作特性分析

直流线路行波保护 (Wave Front Travelling Protection, WFPDL) 是直流线路故障的主要保护, 包含三个判据: 直流线路电压变化率判据 ( $dU/dt >$  定值)、直流线路电压变化量判据 ( $U >$  定值) 和直流线路电流变化量判据 ( $I >$  定值), 当 3 个判据都为 “1” 时, 行波保护才出口。其逻辑如图 7 所示。各

信号的说明详见表 1。

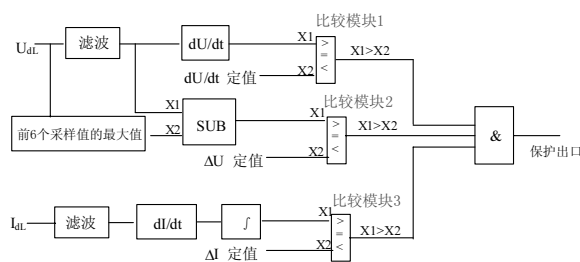


图 7 直流线路行波保护逻辑图

Fig.7 Logic of Wave Front Travelling Protection

表 1 信号清单

Table 1 Signal List

序号	输出信号	信号名称	示波器位置
1	DVDT_M	电压变化率	比较模块 1 的 X1 管角
2	DU_SET	电压变化率定值	比较模块 1 的 X2 管角
3	del_VdL	电压变化量	比较模块 2 的 X1 管角
4	VdLSET	电压变化量定值	比较模块 2 的 X2 管角
5	DIL_REC	电流变化量	比较模块 3 的 X1 管角
6	Thres_R	电流变化量定值	比较模块 3 的 X2 管角
7	TrpWFP	行波保护出口	—

直流双极运行, 输送额定功率。直流线路中点发生金属接地故障及带过渡电阻接地时直流线路电压、直流线路电流及电压变化率波形及各判据的波形如图 8 所示。

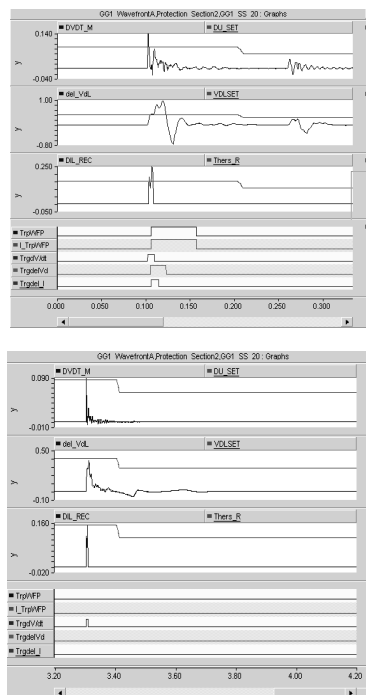


图 8 直流线路故障行波保护的响应波形

Fig.8 Response of WFPDL during DC Line Fault

带过渡电阻故障时,只有电压变化率超过定值,而电压变化量和电流变化量都未超过定值,行波保护没有动作。采用直流保护模型可以很清楚地看出究竟是什么判据不满足导致直流线路保护不出口。

### 3.2 站内接地网过流保护动作分析

2004年7月8日19:45:03,高肇直流极二直流线路发生高阻故障,高坡站和肇庆站的行波保护和低电压保护都未动作,高坡站极二直流线路纵联差保护87DCLL三套同时出口,全压重启动成功。大约2s后,直流线路再次发生故障,肇庆站接地网过流三段保护76SG-3动作而导致高肇直流极二闭锁。76SG-3定值(45 A/900 ms),直流线路差动保护定值(150 A/500 ms)。

图9是高肇直流工程中高速接地开关保护(HSGS)功能的原理示意图。 $I_{dec3}$ 是流过高速接地开关的电流。HSGS保护功能是定时限的过流保护,由DISA1模块实现。

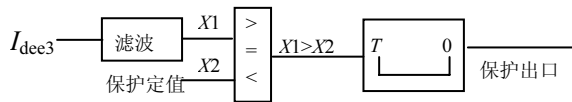


图9 高速接地开关保护原理示意图

Fig. 9 Principle of High Speed Ground Switch

#### Protection Function

单纯地从保护定值上分析,76SG-3不应该在87DCLL先动作。然而,由于站内接地网过流保护的返回时间较长,直流线路差动保护采用瞬时返回,发生第二次高阻接地故障时站内接地网过流保护还未返回,导致第二次故障时站内接地网过流保护动作,闭锁直流。要避免“7·8事故”发生,可以采用两种方案:

(1) 保护定值。延长站内接地网过流保护的动作时间,可以减小“7·8事故”发生的概率。由于站内接地网过流保护的延时受一次设备承受过流能力的限制,采用这种方案不能从根本上解决问题。

(2) 调整保护返回特性。缩短DISA1模块的返回时间,使计数器尽快复位,或者换用其他返回特性较快的模块。采用这解决方案,就必须依靠仿真分析手段,确定模块保护的返回方式。

### 3.3 交流过流保护动作特性分析

当整流侧和逆变侧发生短路故障、控制失效或短期过负荷时,该保护动作。保护定值和动作时间与直流极控的过负荷特性相配合。为了减小交流系

统故障对阀的危害,该保护还设有一段2ms延时的保护段。图10是交流过流保护的原理示意图,各段的保护原理相同。图中IDA、IDB、IDC、IYA、IYB、IYC分别是角形和星形换流变绕组阀侧的A、B、C三相电流。

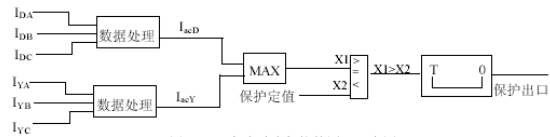


图10 交流过流保护原理示意图

Fig. 10 Diagram of AC over Current Function

2006年5月24日,高肇直流双极运行,极二因极控原因ESOF,极一在过负荷运行期间,交流过流保护动作跳闸。极一跳闸前处于过负荷运行状态(1867 MW),直流电流约为3734 A。

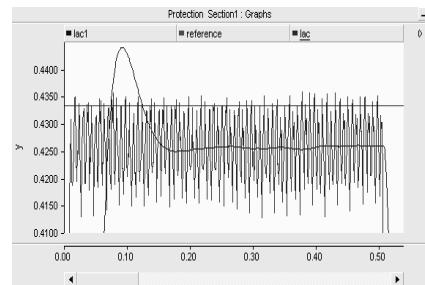


图11 “5·24”事故中换流变阀侧电流计算波形

Fig. 11 Calculated Valve Current of Converter

#### Transformer in “5·24”

由图11中的曲线 $I_{ac}$ 可以看出,在极一跳闸前的一段时间内,存在大量的超过3900 A(换流器交流过流保护50/51C-1定值)的电流,按照过流保护逻辑,满足保护动作跳闸的条件。经分析,由于换流变饱和导致三角形绕组阀侧套管CT测量到的电流有三次谐波成份,影响了交流过流保护的正确动作。为了避免“5·24事故”,可以在以下方面采取措施:

(1) 增加滤波环节。由于IDA、IDB、IDC、IYA、IYB、IYC是方波,含有很丰富的谐波分量,低通滤波器只能加在经过数据处理后形成的直流波形,如图12所示。

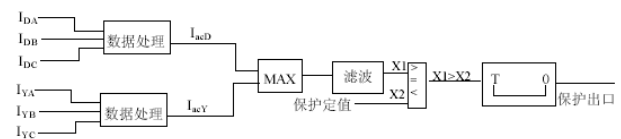


图12 改进后的交流过流保护逻辑

Fig. 12 Improved AC over Current Logic

图 11 中的曲线  $I_{ac1}$  是经过滤波后的波形,从中可以看出,滤除谐波后得到的直流分量是达不到保护定值的,可以避免保护出口,但是所有的滤波环节都有延时和超调,应避免超调过程导致保护误动作。对于长延时保护,由于定值比较低,谐波与直流分量的比值可能要高一些,可以采用增加滤波环节做法;对于短延时保护,增加滤波环节反而有可能增加保护误动的可能,应采用原逻辑。

(2) 改变模块特性。从波形中可以看出,大部分数据都低于保护定值,正是由于采用了 DISA1 模块,模块返回慢导致保护出口,如果改变模块特性如图 13,将保护返回速度增加一倍,保护就不出口。然而,如何保证改变模块特性必须与实际的物理过程相一致是很困难的。

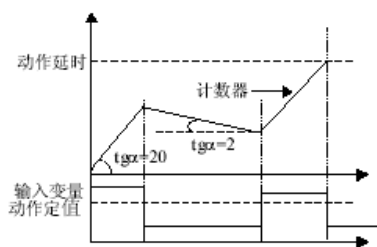


图 13 改变后的 DISA1 模块特性

Fig.13 Characteristic of Changed DISA1 Block

(3) 降低极控的过负荷特性曲线。修改极控的过负荷特性曲线,以保证其与交流过流保护定值之间有足够的配合裕度。由于暂时没有有效措施改进交流过流保护,“5·24 事故”后降低了极控的过负荷特性曲线。降低直流的过负荷曲线,不能充分发挥阀设备的过流能力,对于直流系统的运行多少会有影响。

## 4 结束语

建立直流保护仿真模型,不仅为直流保护的動作特性提供了有效工具,为定量分析定值灵敏度、确定保护配置及整定原则提供了必要手段,而且有助于掌握直流保护的核心技术,改进直流保护性能。

本文根据西门子提供的控制保护模块说明以及直流保护逻辑图,基于 PSCAD/EMTDC 软件平台,建立了不依赖于厂家的高肇直流保护仿真模型,并利用该模型分析了直流线路行波保护、站内接地网过流保护、交流过流保护等直流保护功能的動作特

性。结果显示,直流保护仿真模型在提高直流运行水平、保障交直流并联运行的电力系统的安全稳定等方面能起到十分重要的作用。

对“7·8 事故”和“5·24 事故”分析中所提到的改进措施需要专用工具或者研发新的保护功能模块,普通的实验室无法完成相应工作并进行效果测试,充分说明建立直流保护仿真模型在分析与改进直流保护動作特性方面具有非常突出的优越性。

## 参考文献:

- [1] 郭征,贺家礼,杨洪平,等. 电力系统故障时继电保护装置动态特性的数字仿真[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (11): 38-40.  
GUO Zheng, HE Jia-li, YANG Hong-ping et al. Digital Simulation of Dynamic Performance of Protective Relaying Devices during Faults[J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27 (11): 38-40.
- [2] 李兴志,蔡泽祥,李安华. 继电保护装置动作逻辑的数字仿真系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (14): 97-101.  
LI Zhi-xing, CAI Ze-xiang, LI Anhua. Digital Simulation System of Protection Movement Logic[J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27 (11): 38-40.
- [3] 周俊宇. 电力系统动态仿真中二次设备的建模研究[J]. 广东电力, 2006, 19(1): 14-17.  
ZHOU Jun-yu. Research on Modeling of Secondary Equipment for Dynamic Simulation in Power System, Guangdong Electric Power, 2006, 19 (1): 14-17.
- [4] DC protection software design report (TSQ)[Z]. Germany: SIEMENS, 1998.
- [5] DC protection software design report (GG1) [Z]. Germany: SIEMENS, 2005.
- [6] DC protection software design report (GG2) [Z]. Germany: SIEMENS, 2006.
- [7] Technical Description of SIMADYN D Digital Control System- User Function Modules EP3x[Z]. Germany: SIEMENS, 1999.
- [8] PSCAD USER'S GUIDE[Z]. Canada: Manitoba HVDC Research Center, 2003.
- [9] EMTDC USER'S GUIDE[Z]. Canada: Manitoba HVDC Research Center, 2003.
- [10] 高压直流输电的保护系统研究—技术报告[R]. 广州: 中国南方电网电力调度通信中心, 2006.  
Study Report of Protection System of HVDC[R]. Guangzhou: Dispatching Center of China Southern Grid, 2006.

收稿日期: 2007-08-06

## 作者简介:

余江 (1975-), 女, 高级工程师, 从事继电保护运行及研究工作。

周红阳 (1969-), 男, 高级工程师, 从事继电保护生产运行管理及研究工作。

黄佳胤 (1978-), 男, 工程师, 从事继电保护生产运行管理及研究工作。

(本文责任编辑 张亚拉)