

南京 UPFC 工程控制保护系统架构与配置研究

鲁江¹, 秦健², 潘磊¹, 董云龙¹, 邱德锋¹, 黄如海¹

(1.南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211102; 2.江苏省电力公司, 江苏南京 210024)

摘要:统一潮流控制器(UPFC)可以快速灵活地控制线路潮流,改善电网的潮流分布特性,适用于电网发展比较成熟、网架结构较为稳定、存在潮流不均衡问题的电网。文中以南京西环网 UPFC 工程为例,结合该双回线路 UPFC 工程一次系统结构特点,对其控制保护系统的架构及配置方案进行了详细研究,给出了适合该工程的最终方案,该方案满足双回线路 UPFC 工程的经济性、灵活性和可靠性要求。

关键词:UPFC; 双回线路; 控制保护系统; 分层配置

中图分类号:TM761

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2015)06-0001-05

统一潮流控制器(UPFC)作为迄今最全面的柔性交流输电系统(FACTS)设备,既能在电力系统稳定方面实现潮流调节,合理控制有功功率、无功功率,提高线路的输送能力,实现优化运行;又能在动态方面,通过快速无功吞吐,动态地支撑接入点的电压,提高系统电压稳定性;还可以改善系统阻尼,提高功角稳定性^[1,2]。对于规划比较成熟、网架结构较为稳定的电网,受老线路输电能力的限制,通常会存在潮流输送能力不足的问题;同时,由于输电走廊及变电站占地面积紧张,通过增加输电通道提高输电能力的代价巨大,甚至不可能实现。利用 UPFC 可以均衡电网的潮流分布,将潮流从重载线路转移至轻载线路,从而提升电网的输电能力,可推迟或避免新建输电线路^[3,4]。

1 南京 UPFC 工程概况

南京西环网是南京城网的主要负荷中心,其网架结构如图 1 所示。

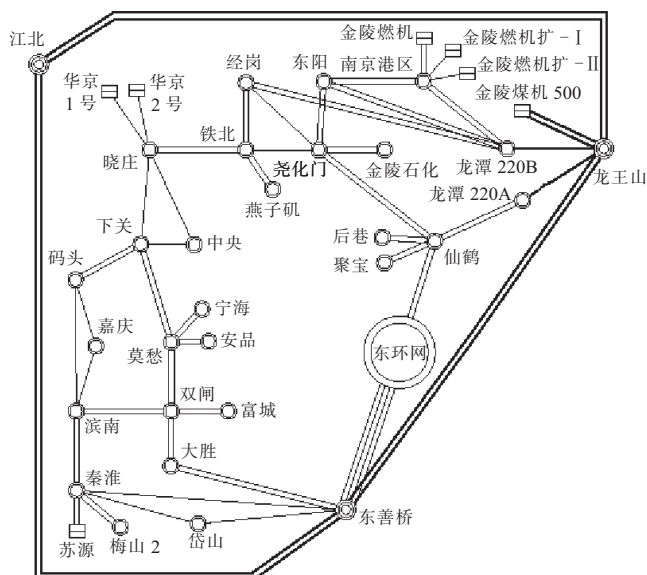


图 1 南京主城西环网结构示意图

由于电网结构特殊,目前南京主城区西环网的沿江输电通道受限,南北输电通道负荷分布严重不均,且新增线路和扩容改造的成本高、施工难度大。经研究论证,在西环网北通道的铁北至晓庄双回线路上安装 UPFC,利用其快速调节电网潮流的能力,可以优化南京西环网潮流,解决晓庄南送断面潮流过重以及近远期部分断面潮流无法满足 N-1 校核的问题,因此江苏省电力公司决定建设南京西环网 UPFC 示范工程。

南京西环网 UPFC 示范工程在铁北—晓庄 220 kV 双回线路上安装一套 UPFC,安装地点为 220 kV 铁北变电站。采用 3 个相同容量的电压源型 UPFC 换流器背靠背连接的方式,其一次系统结构如图 2 所示。其中 UPFC 换流器采用基于 IGBT 的模块化多电平换流器(MMC)技术^[5],换流器容量设计为 $3 \times 60 \text{ MV} \cdot \text{A}$,各换流器通过隔离刀闸连接至直流公共母线上。

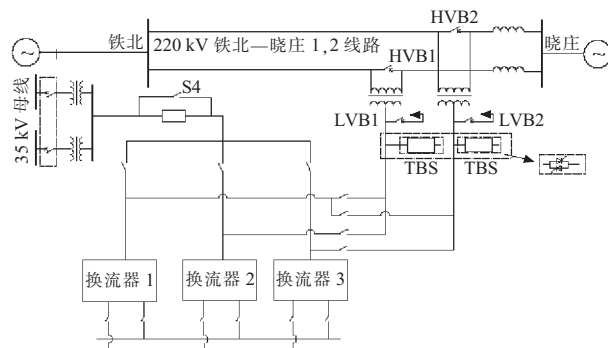


图 2 南京 UPFC 工程一次系统结构图

该工程在正常双回线路 UPFC 方式运行时,2 个换流器串联接入 220 kV 线路,分别控制双回线路的潮流,并可以对线路的有功功率和无功功率独立控制;另一个换流器并联接入 35 kV 交流系统,控制 UPFC 系统的直流电压,并可以提高 35 kV 交流系统的无功储备能力、控制交流系统电压。

考虑到双回线路 UPFC 系统运行的经济性、灵活性和可靠性,该工程的一次系统通过增加转换刀闸,使串、并联侧换流器互为备用,3 个换流器均可以分别并

联接入 35 kV 交流系统,而换流器 1、换流器 2 可以分别串联接入 220 kV 线路 1,换流器 1、换流器 3 可以分别串联接入 220 kV 线路 2,连接方式的切换通过转换刀闸实现;另外,考虑到并联侧系统的重要性,配置 2 台并联变压器分别接入 35 kV 系统的 2 个分段母线,2 组并联变压器互为备用。

在串联侧每组串联变压器两侧分别配置 1 台高压侧机械旁路开关 (HVB)、1 台低压侧机械旁路开关 (LVB) 和 1 台快速晶闸管旁路开关(TBS)。TBS 开关采用晶闸管反并联技术,当线路故障、串联变压器故障或者串联换流器区故障时,TBS 能够迅速导通(导通延时小于 2 ms),将串联侧换流器旁路,隔离换流阀和交流线路,避免交流系统和阀区故障的相互影响,提高系统的可靠性。

采用上述结构后,提高了该工程的经济性、灵活性和可靠性,其具有多种运行方式,各运行方式的基本结构如下:

(1) UPFC 运行方式。1 个换流器通过并联变压器接入 35 kV 交流系统,另外 1 个或 2 个换流器通过串联变压器串联接入 220 kV 的一回或双回线路,换流器直流侧连接。此为该工程的正常运行方式。

(2) SSSC(静止同步串联补偿器)运行方式。1 个或 2 个换流器分别通过串联变压器串联接入 220 kV 的一回或双回线路,换流器直流侧断开。该运行方式在 1 个或 2 个换流器故障情况下采用,此时仍可以实现对交流线路的潮流控制目标。

(3) STATCOM(静止同步补偿器)运行方式。1 个换流器通过并联变压器接入 35 kV 交流系统,换流器直流侧断开。该运行方式在 2 个换流器故障等某些特殊情况下采用,可以实现对 35 kV 交流系统的无功、交流电压控制。

2 南京 UPFC 工程控制保护系统架构

2.1 控制保护系统架构方案研究

根据南京 UPFC 工程一次系统的结构特点,有 2 种可行的 UPFC 控制保护系统架构方案。

2.1.1 方案 1

方案 1 中 UPFC 控制保护装置按换流器分区配置,且控制和保护合并配置,配置结构如图 3 所示。

方案 1 特点是按照换流器分别配置 3 套双重化配置的 UPFC 控制保护装置,对各串联侧换流器和并联侧换流器进行分区控制;保护也采用分区方式,将 3 个换流器分为 3 个独立的保护区,由对应的控制保护装置进行保护,并分别与变压器保护、交流线路保护配合,实现整个系统的保护功能。图 3 中,浅色虚线为并联侧控制保护区,深色虚线为串联侧控制保护区。

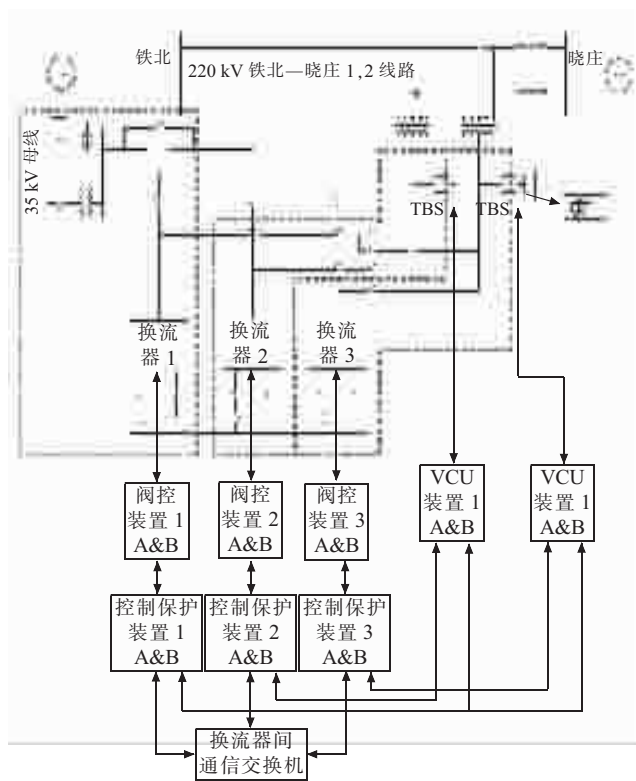


图 3 方案 1 结构图

方案 1 中交流系统的控制和 UPFC 协调控制策略需要通过各换流器间配置的通讯来实现。由于换流器可以在接入并联侧或串联侧之间进行切换,因此每个控制保护装置均需要接入串并联交流侧、转换刀闸及本换流器直流侧的所有相关开关量和模拟量,保护逻辑需要根据换流器的接入方式进行适应性切换。

各换流器配置独立的 MMC 阀控制装置(VBC),VBC 接收对应控制保护装置下发的参考波对换流阀进行直接控制;当控制保护装置检测到故障,则经晶闸管旁路开关的阀控制装置(VCU)触发 TBS 开关。另外,由于换流器 1 通过转换刀闸的操作可作为换流器 2 和换流器 3 的备用,与串联变压器连接控制线路潮流,因此换流器 1 控制保护装置需要可分别触发 2 个 TBS 开关导通,每个 TBS 开关的 VCU 装置也需要可接收 2 个换流器控制保护装置晶闸管触发信号。

2.1.2 方案 2

方案 2 中将控制和保护分开,控制分区配置、保护整体配置,配置结构如图 4 所示。

方案 2 的特点是控制与保护独立配置,控制系统采用双重化配置方案,配置 3 套双重化的换流器控制装置分别控制 3 个换流器,配置 1 套双重化的交流站控装置用于控制交流系统;保护系统采用三取二配置方案,配置 1 套三重化的 UPFC 保护装置及双重化的三取二装置,保护整个 UPFC 设备区,并与变压器保护、交流线路保护配合,实现整个系统的保护功能。方案 2 中交流系统控制和 UPFC 协调控制策略由交流

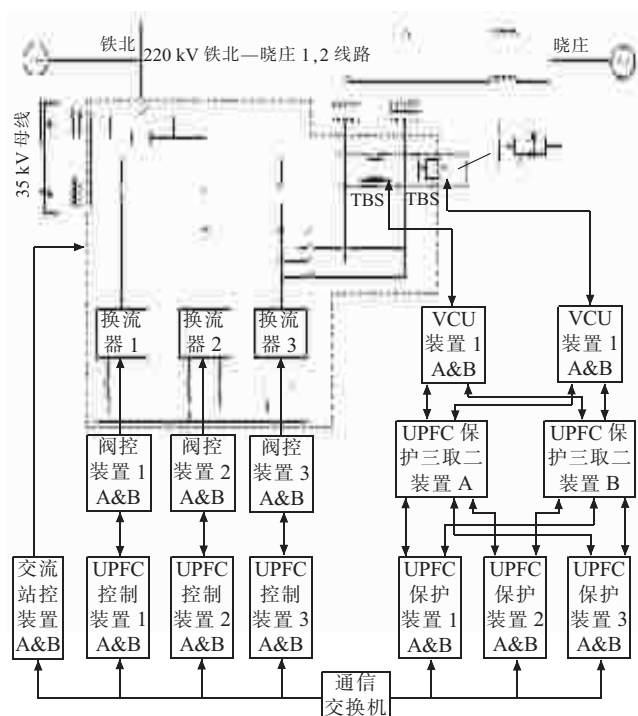


图4 方案2结构图

站控装置来实现。因负责保护整个 UPFC 设备区,每个保护装置均接入所有换流器的交流侧、转换刀闸及直流场所有相关开关量和模拟量。各换流器配置独立的 MMC 阀控制装置 (VBC), VBC 接收对应控制装置下发的参考波对换流阀进行直接控制;当 UPFC 保护检测到故障,则通过三取二装置经 VCU 触发 TBS 开关。

2.1.3 方案比较

2 种方案的比较结果如表 1 所示。

表1 南京 UPFC 工程控制保护系统架构方案比较

方案	优点	缺点
方案 1	软件功能集成度较高;设备集成度高,装置数量少;节约硬件成本。	控制和保护功能集成在一起,装置负荷率较高;装置间需要交换的数据量大;保护逻辑需要根据换流器接入方式进行切换,软件逻辑复杂;控制保护与 TBS 开关的 VCU 接口数量加倍;1 台 VCU 装置需要处理 2 个换流器发送的控制信号控制同 1 台 TBS 开关,VCU 的控制策略非常复杂,软硬件开发的成本增加,系统可靠性降低。
方案 2	分区结构清晰,控制保护逻辑比较简单;装置间交换信息相对较少;对不同装置间的通信或电气接口无特殊要求;结构合理,控制保护可靠性高。	装置数量较多;硬件成本偏高。

由表 1 可见,方案 2 中分区结构更为清晰,控制保护逻辑较为简单,各装置间交换的信息相对较少,该方案充分考虑了控制保护系统的可靠性,因此该工程的控制保护系统架构最终确定采用方案 2。

2.2 控制保护系统分层结构

在该工程的控制保护系统架构方案确定后,控制保护系统的总体分层结构划分如下:

(1) 远方调度控制层。远方调度中心经由电力数据网或专线通道,经过站内的远动工作站对 UPFC 控制站的设备实施远方监视与控制。

(2) UPFC 控制站运行人员控制层。通过站内运行人员工作站对 UPFC 控制站的所有设备实施监视与控制。

(3) UPFC 控制站控制保护设备层。含交流站控、UPFC 控制保护及辅助系统控制设备等。

(4) 就地测控单元(I/O 单元)层。执行其他控制层的指令,完成对应设备的操作控制。

3 南京 UPFC 工程控制保护系统配置

3.1 控制系统功能配置

该工程中采用的 UPFC 典型控制方式为并联侧换流器控制直流系统电压恒定,同时控制与并联侧交流系统的无功功率交换或者控制并联侧系统的交流电压;串联侧换流器控制双回交流线路的有功和无功功率、或者晓庄断面的有功潮流等。

3.1.1 估值功能分层结构

参照 IEC 60633—1998 标准中确定的分层配置原则^[6],经研究将该工程中的 UPFC 控制功能设计划分为 3 个层次:系统级控制、换流器控制和阀控制,控制功能的分层结构如图 5 所示。

(1) 系统级控制。实现对晓庄断面的潮流控制、南京西环网其他线路的功率越限控制以及 UPFC 换流器间协调控制策略等。

(2) 换流器控制。包括外环功率控制、交流电压控制和直流电压控制,以及内环电流的控制,实现 UPFC,SSSC 和 STATCOM 方式起停控制策略等。

(3) 阀控制。实现最近电平逼近调制控制、换流器子模块电容电压平衡控制等。

各层次的功能配置如表 2 所示。

3.1.2 不同运行方式下对应的控制功能

(1) UPFC 方式运行。① 并联侧换流器控制:直流电压控制、35 kV 系统交流电压控制、与 35 kV 系统交换的无功功率控制。② 串联侧换流器控制:线路有功功率控制、线路无功功率控制、双回线路功率协调控制、晓庄断面功率控制、西环网其他线路功率过载限制控制。

(2) SSSC 方式运行。串联侧换流器控制:直流电压控制、线路有功功率控制、直流电压控制、双回线路功率协调控制、晓庄断面功率控制、西环网其他线路功率过载限制控制。

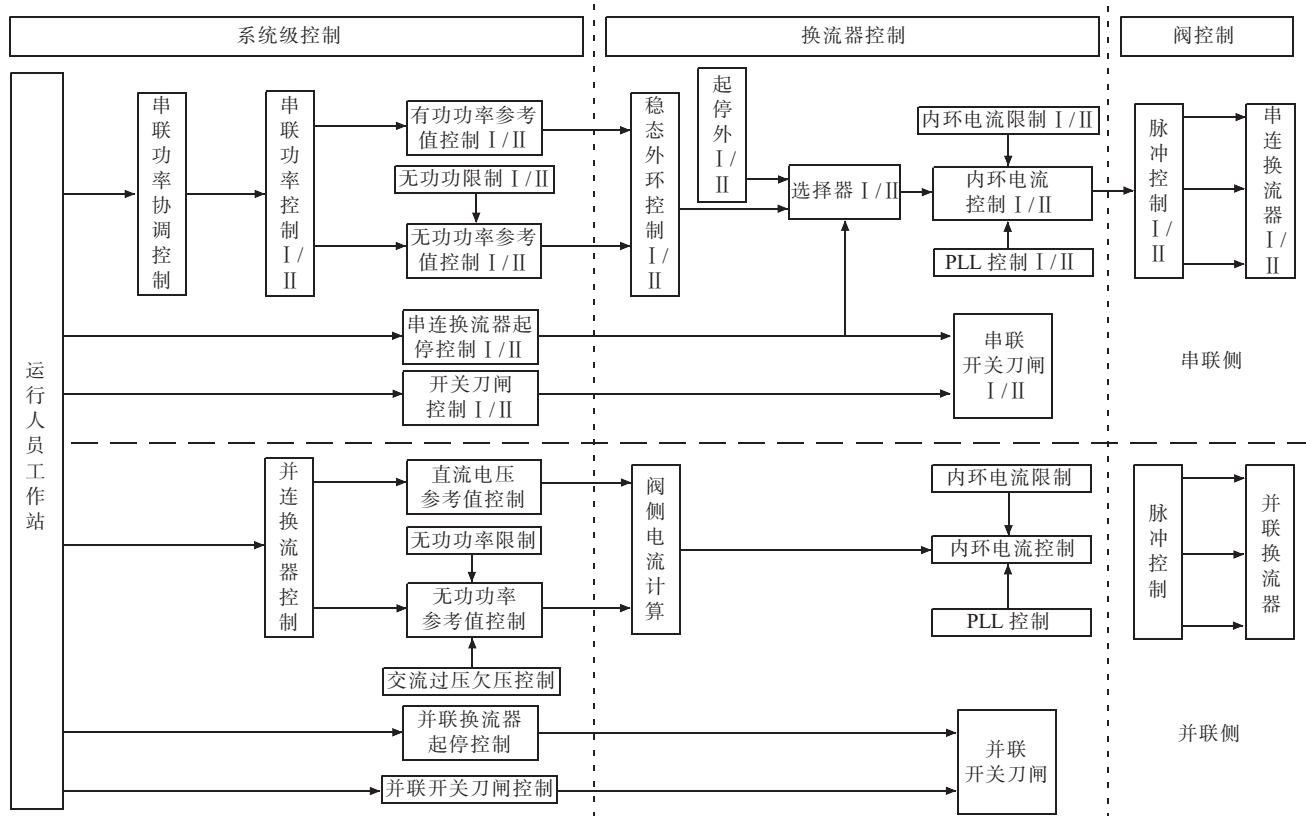


图5 南京UPFC工程控制功能分层结构示意图

表2 南京UPFC工程控制功能配置表

系统级控制	换流器控制	阀控制
开关刀闸顺序控制	并联侧无功功率控制	最近电平逼近调制控制
起停顺序控制	外环控制	并联侧交流过压/欠压控制
运行方式转换	直流电压控制	子模块电容电压平衡控制
双回线路功率协调控制	串联侧线路有功功率控制	
晓庄断面功率控制	串联侧线路无功功率控制	
西环网其它线路功率过载限制控制	内环控制	N.A.
功率调制控制	锁相环	
并联变压器备自投控制	电流控制器	
	电流指令限制	
	调制比限制	

(3) STATCOM方式运行。并联侧换流器控制:直流电压控制、35 kV 系统交流电压控制、与 35 kV 系统交换的无功功率控制。

UPFC 的并联侧换流器用于控制直流系统的电压恒定,保证串联侧换流器能正常工作,一旦并联侧交流系统失电,UPFC 系统将停运,为提高系统整体运行的可靠性,该工程配置了并联变压器备自投功能,当运行的并联变压器故障或者进线电源丢失时,该功能通过快速切除故障支路并投入备用变压器,可以使 UPFC 系统继续保持正常运行。

3.2 保护系统功能配置

南京 UPFC 工程的保护系统配置如图 6 所示。

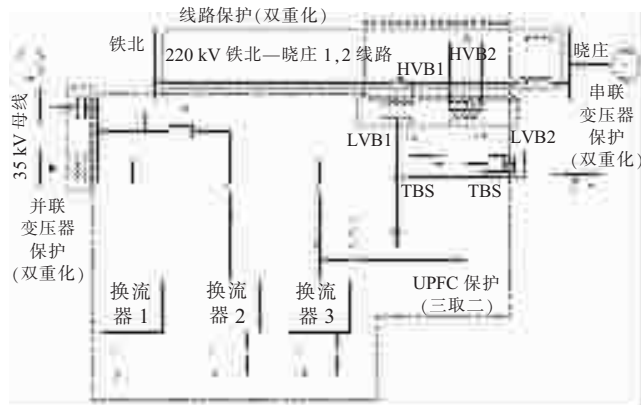


图6 南京UPFC工程保护系统配置图

UPFC 保护的保护区为并联变压器的阀侧以及串联变压器阀侧之间的区域,其对 3 个换流器区及串、并联连接区模拟量进行采样,对 UPFC 整个区域进行保护,同时与变压器保护、线路保护配合,保证设备的安全运行。UPFC 保护按照自身保护区又被划分为交流连接区保护区和换流器保护区,两区的保护区相互交叉,保证无死区;另外,为保证换流器免受线路故障时的过电流冲击,在三取二装置里还配置了快速保护功能。UPFC 保护配置的主要保护功能如表 3 所示。UPFC 保护的后果如表 4 所示。

当 UPFC 保护检测到故障时,立即通过三取二装置发出跳并联侧交流断路器及合串联变压器 3 个旁路

表3 南京 UPFC 工程保护功能配置表

UPFC 保护装置		三取二装置
短引线差动	交流连接母线差动	换流器过流快速保护
交流过压保护	阀侧过流保护	阀侧过电压快速保护
交流欠压保护	阀侧过电压保护	避雷器过流快速保护
交流过流保护	阀侧零序电压保护	
交流连接 保护区	交流零序 过流保护	直流欠压过流保护
	TBS 避雷器 能量保护	直流低电压保护
		直流过电压保护
		直流电压 不平衡保护
	N.A.	桥臂电抗差动保护
		阀差动保护
		桥臂过流保护
		桥臂环流监视

表4 南京 UPFC 工程 UPFC 保护动作后果表

并联侧	串联侧
报警	报警
请求控制系统切换	请求控制系统切换
永久性闭锁	永久性闭锁
开通阀晶闸管	开通阀晶闸管
跳开并联侧交流断路器	触发串联变压器二次侧晶闸管旁路开关
N.A.	紧急合闸串联变压器一次侧机械旁路开关
	紧急合闸串联变压器二次侧机械旁路开关

开关的命令,其中晶闸管旁路开关 TBS 会最先动作,待串联变压器的机械旁路开关中任一个合闸后,TBS 开关自动断开。

4 结束语

综上所述,对于双回线路 UPFC 工程,控制保护系统在架构设计上宜采用控制与保护独立、控制系统按换流器分区配置、保护系统整体配置的方案,在设备配置上宜采用控制系统双重化配置、保护系统三取二配置的方案,以满足双回线路 UPFC 工程的经济性、灵活

性和可靠性要求。按照分层配置的原则,UPFC 控制系统可设计划分为系统级控制、换流器控制和阀控制 3 个层次,各层次相互配合实现系统的整体控制目标;UPFC 保护按照自身保护区域可划分为交流连接线保护区和换流器保护区,两区对应保护功能的保护范围应相互交叉,保证无死区,并与串联/并联侧变压器保护、交流线路保护配合,实现对整个系统的保护。以上可作为后续双回线路 UPFC 工程控制保护系统方案确定的参考。

参考文献:

- [1] 马凡. 统一潮流控制器动态特性及相关控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [2] 朱鹏程,刘黎明,刘小元,等. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):45-51.
- [3] 王旭,祁万春,黄俊辉,等. 柔性交流输电技术在江苏电网中的应用[J]. 电力建设,2014,35(11):92-96.
- [4] 付俊波,朱炳铨,田杰,等. UPFC 在浙江金华电网的应用研究[J]. 浙江电力,2015:1-4.
- [5] 连霄壤. 基于模块化多电平的统一潮流控制器拓扑设计[J]. 机电工程,2012,29(5):563-567.
- [6] IEC 60633—1998, Terminology for High-voltage Direct Current (HVDC) Transmission[S].

作者简介:

鲁江(1979),男,江苏江阴人,高级工程师,从事高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术研究工作;
秦健(1970),男,江苏启东人,高级工程师,从事电网工程建设管理、智能电网应用、电网新技术应用等方面的工作;
潘磊(1985),男,湖北荆州人,工程师,从事高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术研究工作;
董云龙(1977),男,安徽安庆人,高级工程师,从事高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术研究工作;
邱德锋(1986),男,江苏泰州人,工程师,从事高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术研究工作;
黄如海(1987),男,江苏南通人,工程师,从事高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术研究工作。

Study on Architecture and Configuration for Control and Protection System of Nanjing UPFC Project

LU Jiang¹, QIN Jian², PAN Lei¹, DONG Yunlong¹, QIU Defeng¹, HUANG Ruhai¹

(1. NR Electric Co.Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: The unified power flow controller (UPFC) can improve the power flow distribution in power grid by regulating the line power flow quickly and flexibly. For the maturely developed region grid with stable grid structure, the UPFC device is a suitable solution for the unbalanced power flow problem. Taking the Nanjing west grid UPFC project as an example and considering the primary system structural characteristics of this double-circuit line UPFC project, the architecture and configuration of the control and protection system is studied in detail. The final scheme of this project is proposed, and the proposed scheme can meet the requirements of the double-circuit line UPFC project in terms of economy, flexibility and reliability.

Key words: unified power flow controller (UPFC); double-circuit line; control and protection system; hierarchical configuration