

电网广域监测系统的数据库集成方案

戴则梅¹, 葛云鹏¹, 张珂珩¹, 徐春雷²

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061; 2. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024)

摘要:提出了综合利用商用关系型数据库和商用时间序列数据库的集成方案, 结合广域监测系统(WAMS)的数据特点, 分析了 WAMS 系统对于数据存储的要求, 并对比了两类数据库的特点。这一方案可以充分发挥两种数据库的优点, 同时满足 WAMS 系统数据存储实时性、海量性和安全性的要求, 从而为调度中心的各个专业部门(调度、远方、保护)提供统一的集成数据平台, 有利于 WAMS 应用功能的扩展应用。该方案的有效性得到了实际工程应用的验证。

关键词:广域监测系统; 时间序列数据库; 集成数据平台

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2013)01-0001-04

广域监测系统(WAMS)^[1]基于同步相量测量单元(PMU)和高速通信技术, 实现对地域广阔的电力系统动态行为的监测和分析, 已成为保证大电网安全的重要手段, 是近十几年来各国电力公司在电网监测方面投资建设的重点。能量管理系统^[2,3](EMS)基于远程终端单元(RTU), 其数据特点是低密度、静态, 但布点全, 可对系统的静态安全进行有效监视; PMU 的数据特点是高密度、动态, 可对系统的动态行为例如低频振荡过程进行有效分析; 有效整合调度自动化二次系统的信息^[4], 构建集 EMS 稳态信息、PMU 动态信息以及故障录波等暂态信息(简称三态数据)于一体的广域信息集成数据平台, 在此基础上, 就可以将 WAMS 功能从单纯的动态监测扩展到广域动态监测分析保护控制^[5-9]。

数据库是 WAMS 系统存储数据的载体, 既是一个系统的数据存储中心, 也是应用软件进行分析和计算的基础。因此, 数据库设计的优劣以及性能的高低, 对 WAMS 系统的稳定可靠运行有重要的作用。基于上述考虑, 文中提出了综合利用商用关系型数据库和动态信息数据库的解决方案, 为调度中心的各个专业部门(调度、远方、保护)提供统一的集成数据平台, 从而为构建现代电力系统安全稳定协调防御体系实现智能输电网提供重要的数据支撑。

1 WAMS 系统数据的特点及存储访问要求

WAMS 系统的数据可大致分为以下 3 类。

(1) 电网正常运行时实时采集的动态相量数据, 即 PMU 子站以 25~100 Hz 实时上送的动态向量数据, 以下简称实时动态数据。

(2) 电网发生扰动时的三态数据, 包括来自 EMS 系统的稳态数据、PMU 采集的基波动态向量数据和

扰动过程中 PMU 记录的录波数据或来自故障管理信息系统的故障录波数据的暂态数据, 其中波形瞬时值记录是电网动态过程的原始信息资源; 可用作电力系统中期和长期动态过程异常现象分析, 如低频振荡^[9]、振荡传播等, 因此这类数据有必要长时间存储, 以下简称扰动三态数据。

(3) 模型、统计及告警等, 包括所有的静态数据, 电网设备、参数、拓扑、图形、系统配置、告警和事件记录、历史统计信息等一切需要永久保存的数据, 以下简称模型和统计数据。

1.1 实时动态数据的特点及存储访问要求

基于 GPS 同步对时技术的 PMU 主要是解决跨空间测量的同时性问题, 它需要在全局统一时钟协调下, 对各测点的电压、电流相量作同步测量, 确保全局范围内的测量结果具有同时性, 便于分析计算。和 RTU 数据相比, PMU 数据具有以下几个特点。

(1) 海量性: 点相对较少, 但数据采集密度非常高, 其数据量可以说是海量的;

(2) 带时标: 时标是数据的重要特征;

(3) 快速、连续性: RTU 秒级更新, 且送变化数据, 但 PMU 以 25~100 Hz 频率送全数据。

实时基波动态向量数据, 25 帧/s、50 帧/s 或 100 帧/s, 可以用来进行实时应用分析(例如功角稳定中的小干扰造成的电网振荡分析等)。电网正常运行时, 为保证事后事故追忆的要求, 至少需存贮 30 d 动态监测数据的历史数据, 所有 PMU 25 帧/s 的动态数据(按 10 000 个量计算)如果不压缩, 存 30 d 的数据需要的存贮空间约为 3.888 TB。

这一类数据对数据的存储有快速、大容量和高效性的要求。首先要保证快速连续的写入数据库; 其次要实现大容量的存储; 再次要满足历史数据查询检索的实时性。

怎样保证数据库的高效是最具难度的问题, 高效

性不但要求系统具备快速响应各种查询的能力,而且要求系统在写入数据时快速高效,少占用系统 I/O 资源。但是高效性和大容量又是互相矛盾的,数据库容量越大,读/写效率将越低。由此可见,WAMS 主站系统需要实时承受大容量数据写入,如果数据写入占用太多的 I/O、内存资源,则数据库无法对外提供快速的数据服务,也即应用程序查询数据的速度将大大降低。

1.2 扰动三态数据数据的特点及存储访问要求

电网发生扰动时的三态数据,包括来自 EMS 系统的稳态数据、PMU 采集的基波动态向量数据和扰动过程中 PMU 记录的录波数据或来自故障管理信息系统的故障录波数据的暂态数据。这一类数据的特点:

(1) 录波数据(离线)和实时数据(在线),数据点的采集密度不同,实时数据没有时间段的的概念,录波数据为一段时间的数据。

(2) 波形瞬时值记录是电网动态过程的原始信息资源;可以用来进行电力系统中期和长期动态过程异常现象分析(如超低频振荡、振荡传播等),因此这类数据有必要长时间存储。

动态(小扰动)数据,100 帧/s。扰动过程记录存储每次触发事件前 1 min 到最后一次事件的 1 min 以后为止。动态监测数据存储需要的存储容量为(故障过程按 10 s 考虑)720 MB。

暂态(大扰动)数据、暂态录波数据,4 800 帧/s 或更高。录波长度按 >7 s,频率为 4 800 Hz,则每个 COMTRADE 文件的大小约为 6 M/PMU,录波数据存储需要的存储容量为 600 MB。

(3) 为实现历史扰动事件的回放和事后分析功能,还需要保存扰动当时的模型,而不是拿现在的模型去匹配过去的运行方式数据。只有使用扰动当时的电网模型、当时的运行方式,这样分析结果才是有意义的。这部分数据,建议采用增量方式保存,需要的存储空间和动态方式数据相比可忽略。

1.3 模型和统计数据的特点及存储访问要求

模型和统计数据,包括所有的静态数据,电网设备、参数、拓扑、图形、系统配置、告警和事件记录、历史统计信息等一切需要永久保存的数据等。

模型数据包括电力系统的模型和 WAMS 系统自身运行需要的模型数据,主要有:维护系统正常运转的数据字典;系统运行参数和配置信息;描述电力系统结构和元件物理特性的电网设备和参数;电网的静态拓扑连接信息;采集模型数据:PMU 通道、规约、点号、系数等参数;告警定义与计算公式定义;图形等。

这一类数据的特点是静态,不更新或很少更新。但这类参数是系统的稳定、可靠、正确运行的基础数据,需要可靠、稳定的保存。

告警和事件记录可分为动态电力系统应用的告警(例如低频振荡、短路扰动等)和 WAMS 系统自身运行需要的告警信息(例 PMU 故障、WAMS 某一进程异常等)。前一类主要服务对象是调度运行人员,后一类主要服务对象是自动化系统维护人员。

统计数据包括日、周、月、年的各种统计数据,例如 PMU 通道的平均延时、平均运行率等。

告警和事件记录及统计数据,是电力企业的宝贵财富,基于这些信息,可以反演电网运行的历史情况、进行事故分析等。需要在线保存 10 年以上。

2 关系型数据库和时间序列数据库的比较

时间序列数据库主要针对带时间标记的时序数据存储和检索而设计,可以很好地满足实时动态数据是海量(TB 级别)、写入极其频繁、很高压缩性能、检索效率要求特别高的要求。时间序列数据库虽然提供了历史数据的高速缓冲区,但本质上是一种纯文件系统的存储方式。商用数据库例如 Oracle 在存储、查询、分布式访问、管理上均好于纯文件系统。两种数据库的比较如表 1 所示。

3 综合运用关系型数据库和时间序列数据库的实现方案

在 WAMS 系统中,通过集成商用实时数据库产品(例如美国 OSIsoft 公司的 PI 数据库、美国 InSTEP 公司的 eDNA 数据库或者南瑞的海迅数据库)来实现时间序列数据库的功能。主要用于保存不断变化的 PMU 实时数据。

时间序列数据库虽然提供了历史数据的高速缓冲区,但本质上是一种纯文件系统的存储方式。关系型商用数据库例如 Oracle 在存储、查询、分布式访问、管理上均好于纯文件系统。Oracle 主要用来保存电网设备、参数、静态拓扑连接、系统配置、告警和事件记录、历史统计信息等一切需要永久保存的数据。

在 WAMS 的体系结构中,应用对数据的访问是通过支撑平台的数据访问服务实现的,即应用本身并不直接和数据库打交道,而是通过向数据访问服务提交申请,再由数据访问服务来访问具体的数据库。应用程序或者第三方嵌入式程序无须了解具体的细节,也无须了解各类数据存储的位置和存储结构。因此,两类数据库的综合使用并不会给应用带来使用上的不方便。

数据访问的流程图如图 1 所示。

(1) WAMS 应用程序向支撑平台的数据访问服务提交数据读/写的申请;

(2) 数据访问服务进程分析所提交的数据类型,如果是 PMU 动态数据,则调用时间序列数据库的读/

表 1 Oracle 和时间序列数据库比较

比较项	时间序列数据库	Oracle
快速性	有非常好的数据读写操作性能,写入效率可达每秒几万个事件;有高效的时间索引,数据查询和检索的速度非常快;读取速度不受数据量增加的影响	没有对时标作特别的处理,和数据的其他属性作相同的处理;对时标的检索效率较低,且随着时间的增长,数据量的增加,效率会更低。
海量性	采用高精度压缩技术,数据还原精度高,相同硬盘空间下可保存更多数据	不采用压缩技术,不适合处理海量(TB 级别)的 PMU 实时动态数据
层次模型数据	主要面向数据,点与点之间没有关系,本身对电网模型和结构的描述的支持很弱	实现层次关系、父子关系、引用关系的设置,适合于表达电网的层次和对象特征
大字段	不支持大字段(eDNA)或者支持长度有限(PI)	支持,适合图形、报表等数据
约束	不支持	可设立数据校验规则(商业规则),包括数值范围、唯一性检验、默认值、约束关系、引用等等
事务支持	不支持	采用事务机制来保证数据的完整性,一个事务包含的操作要么都做,要么都不做
集群技术	直接利用操作系统的集群技术(HA,High Availability)实现 2 台数据库服务器冷主备,即只有 1 台数据库服务器保持在线,主服务器故障,备服务器才工作;故障切换慢,且不能保证切换时不丢失数据	并行处理软件 RAC 的应用可以使 2 台服务器均在线,故障切换将非常迅速,对数据库的访问可以采用并发分流机制,将数据库读取操作平均分配在两台服务器上进行,且保证切换时不丢失数据
跨平台	对 Windows 的支持很好,但对 UNIX 平台的支持很差	对 Windows 和 UNIX 平台的支持都很好

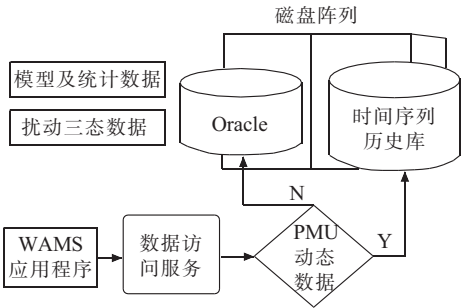


图 1 WAMS 系统的数据访问流程

写接口;否则可能是电网模型、统计类数据或者是扰动案例数据,则调用关系型数据库(例如 Oracle)的读/写接口;

(3) 时间序列数据库通过高效的数据压缩和高速缓存技术满足对海量 PMU 动态数据快速及高效的读/写要求,即不仅提供实时响应的读/写能力,而且要求写入数据时,少占用系统 I/O 资源和存储空间。关系型数据库通过事务机制、并行处理软件 RAC 等技术保

证模型、统计及案例的数据可靠、完整,但相对低速地进行存储。

(4) 考虑到动态数据的海量性及模型类数据的可靠性要求,通常两类数据库均将数据存在磁盘阵列上,同一系统可以共用一组阵列。

综上所述,推荐 WAMS 系统使用商用关系型数据库 Oracle 和商用时间序列数据库的集成方案,综合利用两套数据库的优点。

如果仅使用时间序列数据库,对于模型数据及三态数据的处理,只能采用两种方式,一是将其转换为时间序列能处理的数据存入数据库,这样会影响数据库的处理效率,也难以保证数据使用的方便性;另外是将其存入私有格式的数据文件(早期的 EMS 基本都采取这种方式,现在依然有少量系统使用),尽管可能称为实时数据库,本质上采用本地硬盘、文件方式管理这些数据,这样的处理方式下数据的完整性、一致性、主备机的同步性都很难保证。

4 集成方案的数据流程

WAMS 系统的数据流程如图 2 所示,根据各应用功能对数据的需求可将 WAMS 系统的功能分为 4 类。

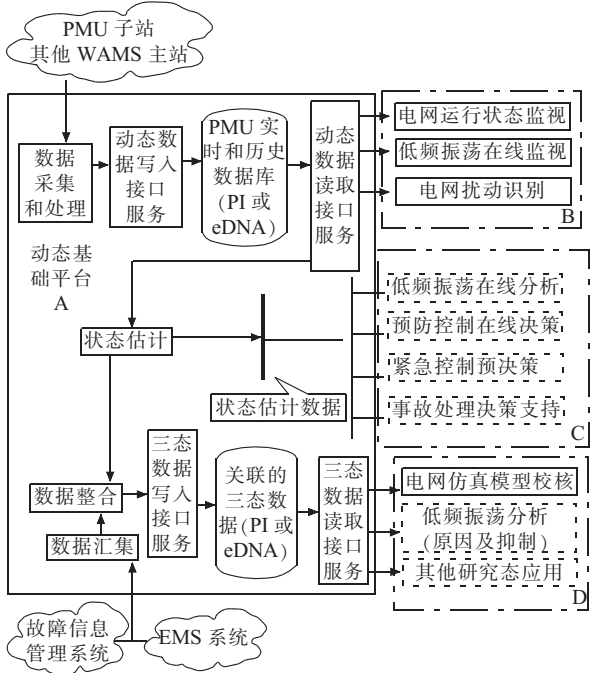


图 2 WAMS 系统的数据流程

A 类:数据准备类,完成 WAMS 系统的数据采集、汇集、处理、整合与管理功能,构造电网综合动态信息数据平台,包括 PMU 数据采集处理软件;扰动时数据整合与管理软件;优化状态估计。

B 类:在线监视类,主要利用 25 Hz PMU 实时动态数据,包括电网动态过程监视;低频振荡在线监视;电网扰动识别。

C类:在线分析类,主要利用 25 Hz PMU 实时动态数据和状态估计实时数据;包括动态安全评估及预警^[10];极限功率计算软件;其他线分析应用等。

D类:离线分析类,主要利用三态数据的整合与管理整合后的历史研究数据,包括故障发生前的状态估计断面、故障过程动作序列、故障时 PMU 采集的 25 帧/s 实时动态数据(故障前 1 min 至故障后 1 min)。包括模型和参数校核等;其他离线分析应用等。

5 结束语

结合基于 OPEN-3000 支撑平台的 WAMS 系统的设计、开发和工程实践经验,提出了综合利用商用关系型数据库和商用时间序列数据库的集成方案。该方案可以充分发挥两种数据库的优点,满足 WAMS 系统数据存储实时性、海量性和安全性的要求。同时应用对数据的访问都是通过支撑平台的数据访问服务实现,两类数据库的综合使用并不会给应用带来使用上的不方便。这一方案在西北、福建、安徽、甘肃等电网 WAMS 系统中得到成功应用,同时在华东、南网、江苏、浙江、宁夏、江西等众多电网的 EMS/WAMS 一体化系统中应用,积累了重要的案例数据,推动了 WAMS 应用从单纯的动态监测扩展到广域动态监测分析保护控制的发展,初步构建了大电网安全防御信息平台,为智能输电电网的建设提供重要的数据支撑。

参考文献:

[1] 张启平,曹路,励刚,等.广域测量系统及其在华东电网的应用[J].华东电力,2005(1):1-5.

- [2] 于尔铿,刘广一,周京阳,等.能量管理系统[M].北京:北京科学出版社,2001.
- [3] 姚建国,高宗和,杨志宏,等.EMS 应用软件支撑环境设计与功能整合[J].电力系统自动化,2006,30(4):49-53.
- [4] 高宗和,戴则梅,翟明玉,等.基于统一支撑平台的 EMS 与 WAMS 集成方案[J].电力系统自动化,2006,30(16):41-45.
- [5] 洪宪平.建设电网动态安全防御系统[J].华东电力,2007(3):45-48.
- [6] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架.(一)从孤立防线到综合防御[J].电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
- [7] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架.(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J].电力系统自动化,2006,30(2):1-10.
- [8] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架.(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J].电力系统自动化,2006,30(3):1-10.
- [9] 薛禹胜,徐伟, Dong Zhaoyang,等.关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J].电力系统自动化,2007,31(15):1-5.
- [10] 张洪喜.基于 PMU 的支路电压稳定指标研究[J].江苏电机工程,2012,31(2):59-61.

作者简介:

戴则梅(1973),女,江苏南京人,高级工程师,从事调度自动化系统高级应用软件、广域相量策略系统设计、研发和管理工作;
葛云鹏(1978),男,江苏南京人,高级工程师,从事广域相量策略系统设计和研发工作;
张珂珩(1973),男,湖北武汉人,高级工程师,从事调度自动化系统的数据库应用软件的设计和研发工作;
徐春雷(1978),男,江苏南通人,高级工程师,从事电力系统调度自动化研发和管理工作。

Database Integration Solution for Power System Wide-area Monitoring System (WAMS)

DAI Ze-mei¹, GE Yun-peng¹, ZHANG Ke-heng¹, XU Chun-lei²

(1.NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 210061, China; 2.Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: The database solution for WAMS which is integrative utilization of commercial relational database and business time series database is proposed in this paper. Combined with the data characteristics of WAMS, the demands for Data Storage is discussed, the characteristics of two types of database are also compared. This scheme not only plays the advantages of the two databases, but also sufficiently meets the requirements of real-time, mass and safety and efficiently improves the convenience for data sharing in control center. The validity of this scheme has been verified by practical engineering applications.

Key words: wide area monitoring system; time series database; integrated data platform

广告索引

思源电气股份有限公司	封面	《江苏电机工程》协办单位	前插 6、7
远东电缆有限公司	封二	《江苏电机工程》协办单位	前插 8
南京南瑞继保电气有限公司	前插 1	宿迁电力设计院有限公司	(黑白) 文前 1
江苏省电力公司江苏省电机工程学会	前插 2、3	南京远能电力工程有限公司	封三
江苏省电力公司电力科学研究院	前插 4、5	国电南瑞科技股份有限公司	封底

基于模块化多电平换流器结构的柔性直流控制策略

胡兆庆,董云龙,田杰,李海英,曹冬明
(南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

摘要:介绍了模块化多电平换流器(MMC)在高压直流输电系统中应用,比较了各种多电平方案,推导了模块化多电平换流器结构下高压直流控制方案,在此基础上提出一种适用于MMC的高压直流系统中控制策略,利用动模系统对控制策略进行验证,并给出模拟试验结果。试验结果表明,提出的控制策略对柔性直流系统稳定运行有帮助作用,并且能满足柔性直流基本的控制功能方面的要求。

关键词:电压源换流器;控制;模块化多电平;动模

中图分类号:TM721.1

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)01-0005-04

在电压源(VSC)型高压直流换流站中,换流器扮演着交直流转换的重要角色,可关断器件则是构成这类换流站的基础。两电平或者三电平结构受单个开关器件耐压限制,需要使用大量开关器件串联,对器件开通关断一致性、串联器件均压特性要求高^[1,2],模块化多电平换流器(MMC)使用子模块串联方式其电容电压进行平衡控制^[3,4],调制方式选择的研究表明^[5],采用合适的换流器控制方式可以降低器件开关频率,减少换流器损耗。这种结构在西门子 TransBay 工程中得到应用^[6]。文献[7]中对单换流器结构的换流器级和系统级控制进行研究,采用离线软件仿真方式验证控制方式可行性;基于 dq 坐标分解的有功和无功解耦控制方法被引入电压源型 HVDC 控制^[8,9],这种控制方式对于换流器连接有源网络或者无源网络,通过软件仿真的方式证明是一种合适的方法。目前对于模块化多电平结构换流器控制研究多集中在换流器级离线仿真方面,由于条件限制,难于进行实时仿真。文中在推导模块化多电平结构换流器数学模型基础上,提出了模块化多电平柔性直流输电的系统级控制策略,用物理模型通过按等比例缩小的方式模拟了上海南汇柔性直流输电示范工程参数,采用实际的上位机控制设备和阀控电子设备,对控制策略进行实时仿真研究。

1 换流器拓扑

两电平或者三电平换流器结构的共同特点是在直流母线上并联电容器,一旦出现半导体器件故障时,可能会引起最严重的直通故障。另外实际需要使用的二极管、电容数量随着电平数量增加而增加,同时需要滤除高次谐波滤波器。

H 桥串联是一种构成大功率逆变器的结构方式,

但由于这种串联方式需要独立的直流电源作为逆变电源,在进行直流功率传输应用时使用受限制。

MMC 是一种新型的电压源型的换流器结构(如图1所示),通过半桥子模块串连达到提高承受电压等级和功率水平的目的,交流侧不需要滤波器,直流侧没有高压电容器组,可以在半导体器件发生故障时避免桥臂直通故障。桥臂电抗器 L 的使用有以下优点:

- (1) 限制故障时电流,发生短路故障,可以限制电流上升速度,让半导体器件有足够的时间可靠关断;
- (2) 限制开通瞬间 di/dt , 避免造成半导体器件开通瞬间过大的电流变化率损害器件;
- (3) 在各桥臂电容电压不平衡情况下产生环流,电抗器起到抑制环流作用,同时能够通过给环流的控制提供帮助。

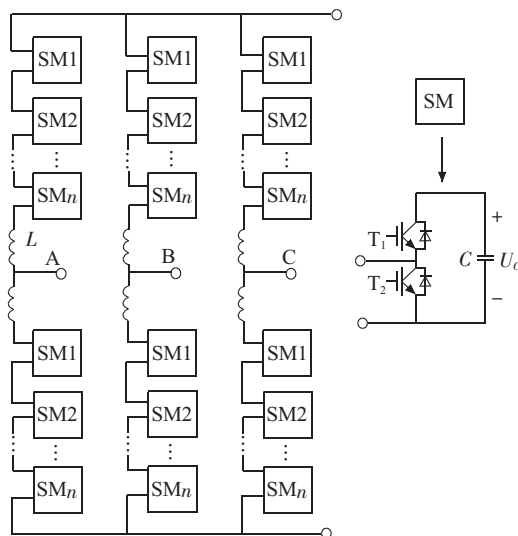


图1 模块化多电平换流器单站结构

2 控制模型和策略

在推导数学模型的基础上提出适用于 MMC 结构的柔性直流输电系统的控制策略。

2.1 数学模型

收稿日期:2012-09-03;修回日期:2012-10-22

国家电网公司重点科技项目(SGKJJSKF[2009]633)。

定义单相电压电流的方向如图 2 所示, 正常运行时, 上下桥臂电流为各分阀侧电流的一半, 除此之外, 桥臂电流中还包括直流成分。上桥臂和下桥臂的所有子模块电容可以等效为可控电压源 u_{C1}, u_{C2} , 其中:

$$\begin{cases} u_{C1} = \sum_{i=1}^n S_{pi} U_C \\ u_{C2} = \sum_{i=1}^n S_{ni} U_C \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_{pi}, S_{ni} 分别为上、下桥臂每个 SM 模块对应的开关函数; U_C 为电容电压 (假定所有子模块电容电压都相等, 为 U_C); n 为上或者下桥臂子模块总个数。

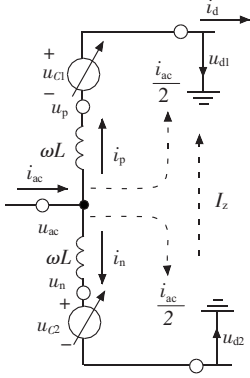


图 2 模型定义电压电流的参考方向

子模块中上下管 T_1, T_2 状态是互补的, 对于 1 个 SM 子模块而言, 输出电压在 U_C 和 0 两者之间切换, 对应开关函数如表 1 和表 2 所示。

表 1 上桥臂其中 1 个 SM 的开关函数

状态	i_p	T_1	T_2	输出电压	S_{pi}
1	$i_p > 0$	ON	OFF	U_C	1
2		OFF	ON	0	0
3		OFF	OFF	0	0
4	$i_p < 0$	ON	OFF	U_C	1
5		OFF	ON	0	0

表 2 下桥臂其中 1 个 SM 的开关函数

状态	i_n	T_3	T_4	输出电压	S_{ni}
1	$i_n > 0$	ON	OFF	U_C	1
2		OFF	ON	0	0
3		OFF	OFF	U_C	0
4	$i_n < 0$	ON	OFF	U_C	1
5		OFF	ON	0	0
6		OFF	OFF	0	0

正常运行时, 对于 1 个子模块而言, 不会出现上下 2 个开关管同时导通或关断的情况, 从表 1 和表 2 可以看出, 正常运行时, 不论桥臂电流的方向如何, 上管开通是将子模块投入, 下管导通是将子模块退出。

在不考虑冗余子模块情况下, 图 2 结合表 1 和表

2 可以推导出:

$$u_{ac} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (S_{ni} - S_{pi}) U_C + \frac{1}{2} L \frac{di_{ac}}{dt} \quad (2)$$

$$u_d = \sum_{i=1}^n (S_{ni} + S_{pi}) U_C - L \frac{d(i_p - i_n)}{dt} \quad (3)$$

由于桥臂电流 i_p, i_n 两者的差仅仅剩下直流成分, 可以认为式(3)右边第二项为 0, 当采用固定投入上下桥臂子模块总数方式, 可以认为:

$$u_d = N U_C \quad (4)$$

式中: $N = \sum_{i=1}^n (S_{ni} + S_{pi})$ 。

式(2)右侧第一项为上下桥臂投入子模块的电压的差值, 实际为控制输出参考电压, 定义:

$$u_{ref} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (S_{ni} - S_{pi}) U_C \quad (5)$$

得到:

$$u_{ac} = u_{ref} + \frac{1}{2} L \frac{di_{ac}}{dt} \quad (6)$$

这与两电平结构下的控制模型是类似的^[10,11]。以上式(6)在旋转 dq 坐标系下表达式为:

$$\frac{di_{acd}}{dt} = \omega i_{acq} + \frac{1}{L_1} u_{acd} - \frac{1}{L_1} u_{refd} \quad (7)$$

$$\frac{di_{acq}}{dt} = -\omega i_{acd} + \frac{1}{L_1} u_{acq} - \frac{1}{L_1} u_{refq} \quad (8)$$

式中: $L_1 = 0.5L$; i_{acd}, i_{acq} 分别为阀侧电流 i_{ac} 在 dq 轴的分量; u_{acd}, u_{acq} 分别为交流电压 u_{ac} 在 dq 轴的分量; u_{refd}, u_{refq} 分别为控制输出参考电压在 dq 轴的分量。

模块化多电平结构中实际被控制量为上、下桥臂的可控电压源, 上位机控制系统发给阀基控制部分的参考电压实际为:

$$u_{C1}^* = \frac{u_d}{2} - u_{ref} \quad (9)$$

$$u_{C2}^* = \frac{u_d}{2} + u_{ref} \quad (10)$$

式中: u_{C1}^* 为上半桥电容参考电压; u_{C2}^* 为下半桥电容参考电压。对于每个站而言, 三相 6 个桥臂分别需要接收六路参考电压。

2.2 相位检测

相位检测关系到系统控制保护检测电压相位的准确性, 采用的检测手段如图 3 所示。

DSP 将采集到的三相交流同步电压测量实时值经过 $\alpha\beta$ 变换后, 变换为 u_α, u_β , 通过计算得到 q 轴分量 u_q , 将 u_q 经过 PI 调节环节得到角频率误差 $\Delta\omega, \Delta\omega$ 与额定角频率 ω_0 相加后得到实际角频率 $\hat{\omega}$, 最后再经过积分环节得到相位 $\hat{\theta}$ 。

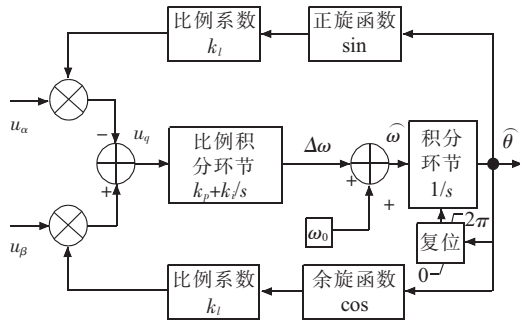


图3 锁相环

2.3 控制策略

在柔性直流系统中,交流侧控制策略应能满足交流电压控制以及无功功率控制方面的要求,直流侧则能够保持换流站直流电压的稳定需要^[12]。实际换流站控制策略如图4所示。

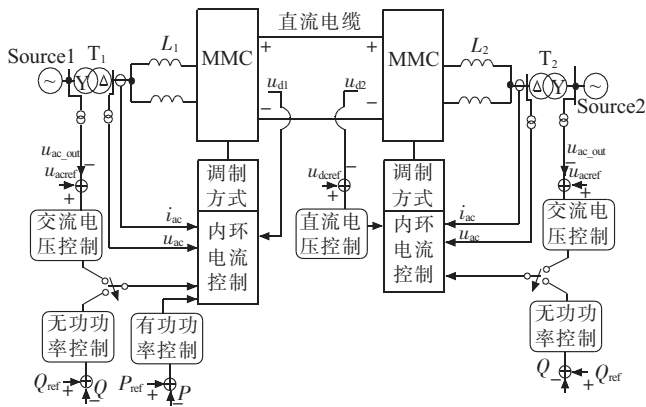


图4 柔性直流控制策略

整流侧以有功功率、交流电压以及无功功率为控制目标,逆变侧以直流电压、交流电压以及无功功率为控制目标。图中内环电流控制是根据外环控制器产生的有功功率和无功功率参考值以及三相电流实时值,通过矢量控制得到的电流参考值,该电流参考值通过参考波生成环节得到电压参考值 u_{refi} ,以及 u_{refj} 。

参考电压 u_{refi} 以及 u_{refj} 经过变换得到三相基波参考电压,利用三角载波对其进行调制,即可产生脉冲调制波形^[13]。

3 动模仿真验证

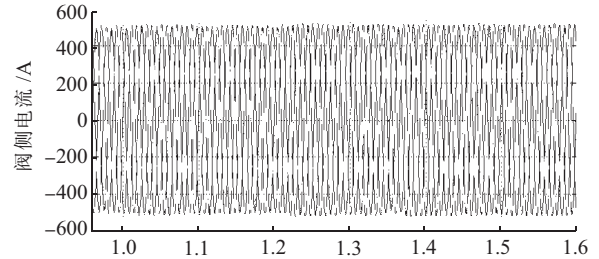
建立图4所示的两端动模系统,动模系统模型以上海柔性直流输电示范工程为依据,具体参数如表3所示。动模阀部分采用49电平MMC,其他一次设备包括变压器、桥臂电抗器物理模型,开关、刀闸用真空接触器来模拟。

利用实际的控制保护装置,与动模系统连接检测控制系统的功能,采用图4所示控制策略,图5为系统满功率运行时站1的波形图,可以看出,控制器输出稳定,交流侧电流平衡性良好,直流电压稳定,交流侧送

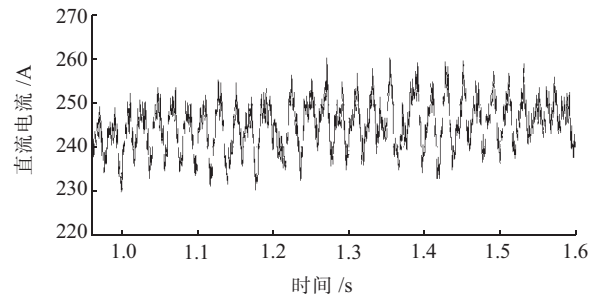
出有功功率稳定在18 MW。

表3 动模系统模拟的上海柔性直流输电系统参数

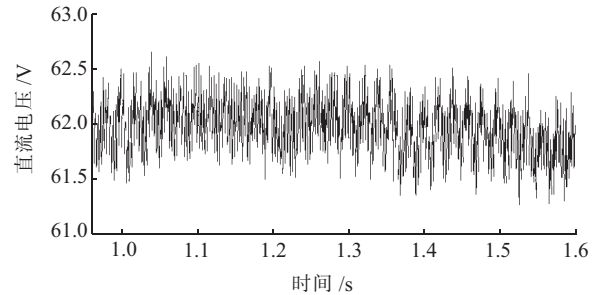
名称	南汇风电场 (送端)	书柔站(受端)
换流器额定容量/(MV·A)	19	19
额定直流功率/MW	18	18
交流系统电压/kV	35	35
额定直流电压/kV	± 30	± 30
额定直流电流/A	300	300



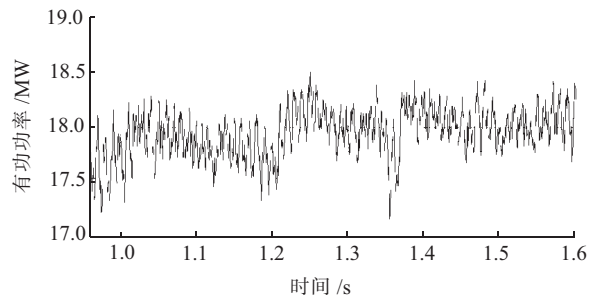
(a) 站1 阀侧电流



(b) 正负极直流电流



(c) 站1 直流电压



(d) 站1 有功功率

图5 动模系统满功率运行

在站1交流侧正送有功功率2 MW情况下,模拟直流正极母线发生金属接地故障100 ms的波形如图6所示。可以看出,大约在0.51 s发生永久闭锁跳闸,

故障期间,正极母线电压接近 0,直流电压调节器将总直流电压控制在 60 kV 左右,直流电压不平衡保护经过一段时间闭锁跳闸。

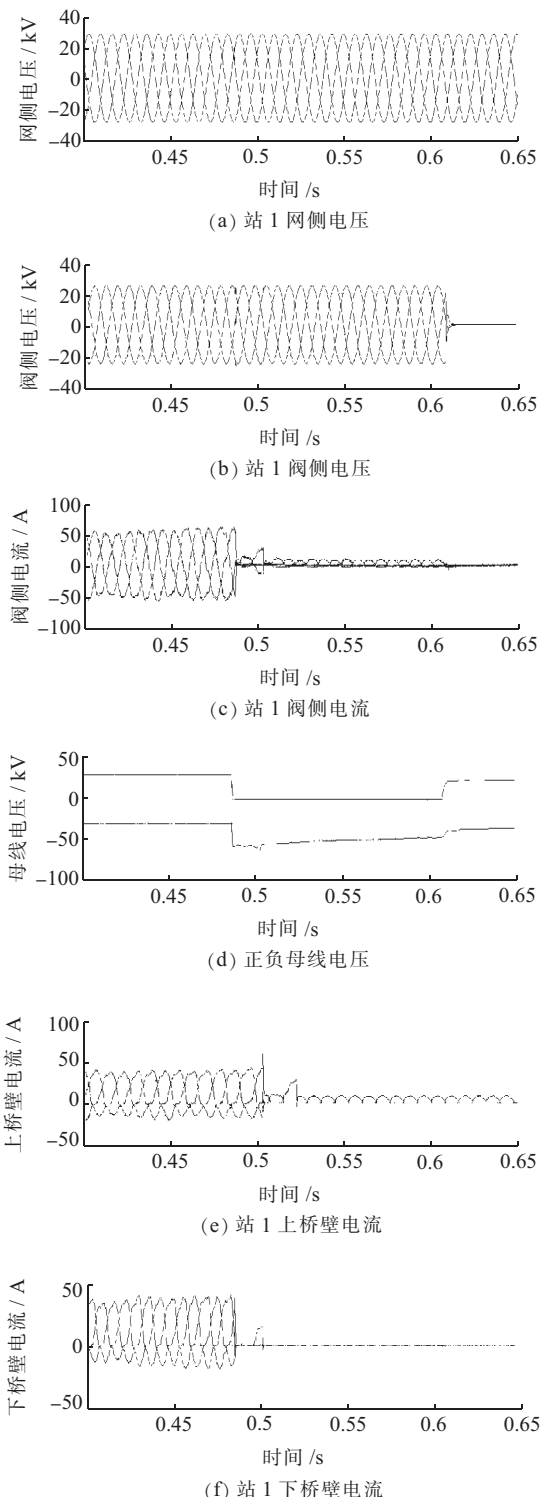


图 6 模拟直流正极母线接地故障

4 结束语

在推导 MMC 模型基础上提出适用于模块化多电平柔性直流换流站的控制策略,根据上海柔性直流输

电示范工程进行了动模实验,在动模平台考察了控制系统满功率运行控制能力,以及控制器在发生系统故障时控制性能,结果表明,控制器在稳态以及暂态过程中具有良好的调节性能,证明了文中提出的柔性直流控制策略适用于实际工程。

参考文献:

- [1] LIU Y H, ZHANG R H, ARRILLAGA J, et al. An Overview of Self-commutating Converters and their Application in Transmission and Distribution [C]. IEEE/PES transmission and distribution conference & exhibition: Asia and Pacific Dalian, 2005.
- [2] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
- [3] 丁冠军, 丁明, 汤广福, 等. 新型多电平 VSC 子模块电容参数与均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1-6.
- [4] 李笑倩, 宋强, 刘文华, 等. 采用载波移相调制的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 49-55.
- [5] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 48-52.
- [6] DORN J, HUANG H, RETZMANN D. A New Multilevel Voltage-sourced Converter Topology for HVDC Application [C]. CIGRE symposium Osaka 2008.
- [7] 刘钟淇, 宋强, 刘文华, 新型模块化多电平换流器的控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 5-8.
- [8] 陈谦, 唐国庆, 胡铭. 采用 $dq0$ 坐标的 VSC-HVDC 稳态模型与控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 61-66.
- [9] 梁海峰, 李庚银, 李广凯, 等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 45-50.
- [10] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 采用 MMC 变流器的 VSC-HVDC 系统故障态研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(9): 69-71.
- [11] 胡兆庆, 包海龙, 刘隽, 等. 基于 MMC 换流器的高压直流控制策略及接口实现[C]. 第五届江苏省电机工程青年科技论坛文集, 2011.
- [12] OOI B T, WANG X. Voltage Angle Lock Loop Control of the Boost Type PWM Converter for HVDC Application [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 229-235.
- [13] 潘武略, 徐政, 张静. 基于电压源换流器的高压直流输电系统混合调制方式[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 54-58.

作者简介:

胡兆庆(1976),男,湖北钟祥人,工程师,从事超高压直流输电及柔性直流输电研究及开发工作;
董云龙(1977),男,安徽安庆人,工程师,从事超高压直流输电及柔性直流输电研究及开发工作;
田杰(1969),男,四川秀山人,教授级高级工程师,从事超高压直流输电及柔性直流输电研究及开发工作;
李海英(1972),男,河北饶阳人,高级工程师,从事超高压直流输电及柔性直流输电研究及开发工作;
曹冬明(1972),男,江苏泰兴人,高级工程师,从事电力系统自动化工作。

(下转第 12 页)

日发电计划安全校核系统开发与应用

丁 恰¹,王 岗²,唐 然¹,杨乐勇¹,张丙金¹

(1.国网电力科学研究院,江苏 南京 210003;2.江苏省电力公司,江苏 南京 210024)

摘 要:安全校核是推进调度计划精细化管理的重要手段。在分析安全校核需求和功能总体设计基础上,依照数据流转中心、流程控制中心和数据展示中心的 3 条主线设计,提出基于预测-校正技术的功率平衡方法和计划拓扑分析管理方法,形成日计划潮流,在校核出现越限后采用基于安全约束经济调度(SCED)算法的多时段安全校正调整。实际电网运行结果表明系统计算速度和精度满足安全校核工作要求。

关键词:安全校核;安全校正;安全约束经济调度

中图分类号:TM734

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)01-0009-04

电网调度最基本的要求是安全运行,随着大区电网互联和特高压电网建设的快速发展,电网调度运行的技术水平和复杂程度越来越高。在节能发电调度模式下,进一步要求挖掘电网输电能力,输电设备接近极限运行,电网安全运行的难度日益增大。调度计划编制部门迫切需要安全校核分析功能,在发电计划的编制过程中充分考虑各类发电约束和输电约束,使发电计划编制既符合电网安全要求,又能充分挖掘电网的经济潜力,提高短期发电调度计划的可操作性,为精细化的电力电量平衡、检修计划的编制等工作提供强有力的技术支持,实现调度计划流程的精细化管理。安全校核系统最初用于电力市场模式下发电计划的安全分析^[1,2],是发电计划制定流程中的关键环节,其关键是将未来时段的各类计划数据整合^[3,4],形成可供潮流分析使用的方式数据,并在出现潮流越限时,通过安全校正计算消除越限,国内外研究人员为此开展了大量的研究工作^[5-8]。从工程实用角度出发,在讨论日发电计划安全校核整体结构的基础上,针对方式数据生成过程中涉及的功率平衡、拓扑管理等问题展开讨论,提出了一种基于安全约束经济调度(SCED)算法的多时段安全校正算法,形成综合最优的调整方案。

1 系统结构

日发电计划安全校核应用采用服务方式实现,可灵活构建于基于面向服务的体系结构(SOA)支撑平台上,以数据流转中心、流程控制中心和数据展示中心的三大中心建设为核心。数据流转中心完成与调度自动化系统安全 I 区的 EMS、安全 II 区发电计划、III 区的调度管理(OMS)等相关应用以及上下级调度间进行数据交换和共享;流程控制中心实现对安全校核计算过程的灵活干预控制;数据展示中心提供的丰富

手段,快速准确地获取安全校核分析结果信息。系统整体架构如图 1 所示。

1.1 数据流转模块

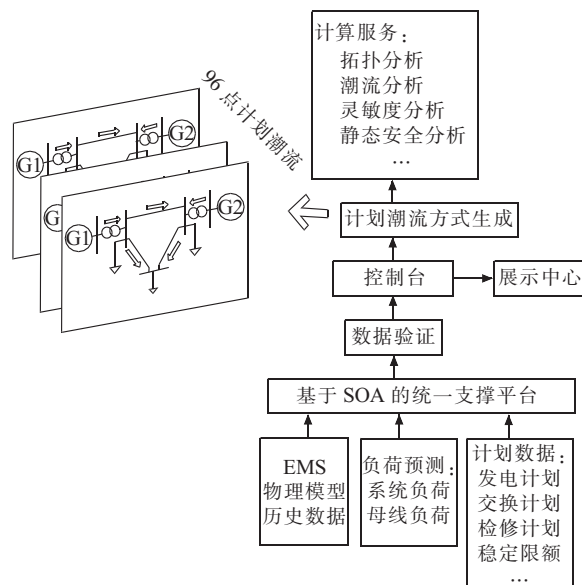


图 1 系统整体架构

安全校核是对电网在未来时段的运行方式的研究,需要获知电网未来运行方式的全部数据,同时计算的结果数据还需要返回到相关应用和单位。安全校核应用首先应构建成一个数据流转中心,保证各类数据流转正常。数据流转模块中心需要处理电网物理参数、电网运行计划数据、未来需求预测数据以及历史运行数据,整体数据流向如图 2 所示。

1.2 流程控制模块

安全校核计算内容多,包含基态潮流、灵敏度分析、静态安全分析等多项内容,需要具有从数据获取、各类计算引擎的调用过程到上传上报整个过程完整的流程控制功能。

1.3 数据展示模块

安全校核牵涉的数据类别和数量巨大,包括流转数据和完整计算结果,需要完整丰富的展示手段用于

维护。作为正常位方案的补充信息,临时定义特殊运行方式,如站内设备改造等。

检修反演方式需要维护的信息较少,在系统建设初期可结合状态估计和检修计划进行处理,但受到检修计划实际完成情况影响。正常位方案管理需要维护信息较多,但处理偏差较小,特殊方式维护是对上述处理特殊情况的补充信息,多种方式可互为补充,便于在实际使用中灵活应用。

2.3 并行计算

对典型的日发电计划安全校核应用而言,96点发电计划对应的96个时段断面之间的校核计算的耦合度较低,计算量大,采用并行化处理,可以将计算任务分配到多个硬件资源上完成。

3 安全校正

当出现设备或稳定断面越限时,需要启动校正计算。校正计算是在机组开停方式确定的情况下,根据系统负荷预测,以与初始计划(或目标计划)的偏差量最小为目标优化机组发电计划,满足系统负荷需求和机组的运行约束,并且满足电网运行的潮流约束。

目标函数为:

$$\min F = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^I [C_i(k_i \cdot |p(i,t) - p_0(i,t)|)] \quad (2)$$

式中: T 为系统调度期间的时段数; I 为系统机组数; $p(i,t)$ 为机组 i 在 t 时段的有功功率; $p_0(i,t)$ 为机组 i 在 t 时段的初始(或目标)有功功率; C_i 为机组 i 的偏差惩罚系数; k_i 为机组 i 出力偏差的模拟成本,是分段线性的凸曲线,对机组不同的有功偏差量加入相应的成本,随着偏差量的增加,成本增大,达到发电计划与初始计划偏差最小的要求。

可以看出,该校正计算模型不再是对每个越限时段孤立点的调整,而是对全部时段统一建模,获得全局的最小调整量。系统主要考虑的约束如下。

(1) 机组运行约束。发电机组的输出功率上下限约束:

$$p_i u_i(t) \leq p_i(t) \leq \overline{p_i u_i(t)} \quad (3)$$

式中: $\overline{p_i}$, $\underline{p_i}$ 分别为发电机组 i 输出功率的上下限。

(2) 机组加减负荷速率约束:

$$-\Delta_i \leq p_i(t) - p_i(t-1) \leq \Delta_i \quad (4)$$

式中: Δ_i 为机组 i 每时段可加减负荷的最大值。

(3) 电网安全约束。电网支路潮流约束:

$$p_{ij} \leq p_{ij}(t) \leq \overline{p_{ij}(t)} \quad (5)$$

式中: p_{ij} , $\underline{p_{ij}}$, $\overline{p_{ij}}$ 分别为支路 i,j 的潮流功率以及正反向限值。

稳定断面潮流约束:

$$\underline{P_{ij}} \leq P_{ij}(t) \leq \overline{P_{ij}(t)} \quad (6)$$

式中: $\underline{P_{ij}}$, $\overline{P_{ij}}$ 分别为联络线断面 i,j 潮流功率及上限。

4 应用效果

文中安全校核系统已成功应用于某省网智能调度技术支持系统。统计了该系统在2012年5月运行期间的计算结果,未出现不收敛的情况,说明日前计划潮流采用该方法后能保证计算收敛性,采用固定网损系数和采用文中预测校正方法后计划潮流中机组出力最大偏差情况对比如表1所示。

表1 计划潮流机组出力调整情况对比

日期	最大机组出力偏差/MW		调整机组个数	
	固定网损系数	文中方法	固定网损系数	文中方法
5月9日	104.8	2.5	1	1
5月10日	30.6	1.8	4	1

可以发现文中方法最大机组出力偏差和调节机组个数均小于固定网损系数方法,其中5月10日固定网损系数方法由于采用了多平衡机方式进行潮流计算,不平衡量进行了分摊导致最大出力偏差降低。

日发电计划15 min间隔96时段计划潮流的生成和计算分析采用多机多核技术后,计算时间由8 min左右缩减为不到1 min完成,采用不同计算资源计算时间统计结果如图4所示。可见,随着计算资源数增加,计算时间降低,但超过12个并行计算资源后计算时间下降速度变缓,甚至出现增加,因为此时主要计算时间消耗在数据交换上。

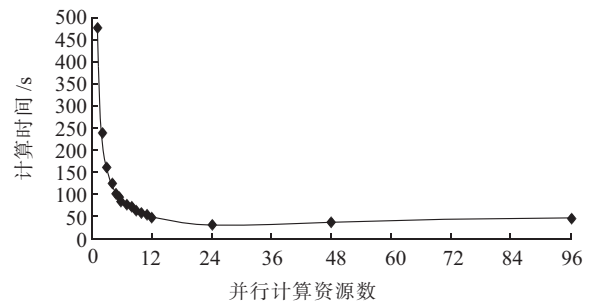


图4 并行计算时间

5 结束语

随着调度精细化管理需求日益提高,安全校核已成为调度大计划流程中重要一环,是保证电网安全稳定的一道重要防线。文中在分析安全校核需求和功能总体设计基础上,依照数据流转中心,流程控制中心和数据展示中心的3条主线设计,提出基于预测-校正技术的功率平衡方法和计划拓扑分析管理方法,形成

日前计划潮流,校核出现越限后采用基于安全约束经济调度(SCED)算法的多时段安全校正算法技术。实际电网运行表明所提算法的有效性。

参考文献:

- [1] 武亚光,邓佑满,张锐,等.发电侧电力市场中安全校核算法的研究与实现[J].中国电机工程学报,2001,21(6):49-53.
- [2] 葛朝强,汪德星,葛敏辉,等.华东网调日计划安全校核系统及其扩展[J].电力系统自动化,2008,32(10):49-52.
- [3] 丁 恰,李 鹏,杨胜春.EMS 系统日计划安全校核的功能设计[J].电力系统自动化,2007,31(S).
- [4] 王 毅,侯俊贤,马世英,等.用于调度计划安全稳定校核的潮流数据自动整合调整方法[J].电网技术,2010,34(4):105-109.
- [5] 徐 田,於益军,钱玉妹.能量管理系统中发电计划安全校核功能的设计[J].电力系统自动化,2006,30(10):92-96.
- [6] 陈金富,陈海焱,段献忠,等.广西电网运行方式在线自动校核系统设计与应用[J].电力系统自动化,2004,28(14):86-88,92.

[7] 胡世骏,陈中元,刘允许,等.华东区域电力市场省(市)发电竞价结果安全校核及优化调整系统[J].现代电力,2006,23(6):93-97.

[8] 李 旻,凌 亮,张 蓓,等.日发电计划的安全校核与校正[J].现代电力,2008,25(2):87-92.

作者简介:

丁 恰(1974),男,江苏徐州人,高级工程师,从事电力系统运行优化研究与系统开发工作;

王 岗(1978),男,浙江绍兴人,高级工程师,从事电力系统调度运行工作;

唐 然(1990),男,江苏南京人,本科,从事电力系统调度计划与安全校核的研究与开发工作;

杨乐勇(1985),男,江苏南通人,工程师,从事电力系统运行分析与系统开发工作;

张丙金(1987),男,重庆人,助理工程师,从事电力系统运行分析与系统开发工作。

Security Checking System (SCS) for Daily Generation Scheduling

DING Qia¹, WANG Gang², TANG Ran¹, ZHANG Bing-jin¹

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: Security is an important approach to promote delicacy management of daily dispatch scheduling. Based on analysis of the needs of security checking and design of overall function, in accordance with three master line design which includes data flow center, process control center and data display center, power balance method and plan topology analysis management method based on predictor-corrector thchenology is proposed to form daily schedule power flow, and implement security correction adjustment based on the security constrained economic dispatch (SCED) algorithm after out-of-limit. The calculation speed and accuracy of system for security checking is proved by practical example.

Key words: security checking; security correction; security constrained economic dispatch

(上接第8页)

Control strategy research of VSC-HVDC based on modular multilevel converter

HU Zhao-qing, DONG Yun-long, TIAN Jie, LI Hai-ying, CAO Dong-ming

(Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Application of modular multilevel converter (MMC) in VSC-HVDC is introduced, and varies of multilevel schemes are compared. This paper induces the HVDC control scheme for modular multilevel converter, and a suitable control strategy for MMC in HVDC system is proposed, which is verified by using dynamic model with test results. The results manifest that the control strategy is helpful for the stable operation and satisfy the basic control function requirements of HVDC.

Key words: voltage source converter; control; modular multilevel converter; dynamic model

下 期 要 目

- 变电站户外电气设备防火距离研究
- 换流变压器直流偏磁与饱和保护
- 换流变保护改造分析及试验技术研究
- 一种大规模智能电能表全自动检定系统设计
- 继电保护装置自动化测试系统的设计与实现
- 全光纤电流互感器现场运行误差特性研究
- 江苏省燃煤电厂脱硫石膏排放利用状况及综合利用对策
- 基于随机规划理论的含异步风机的配电网故障重构
- 继电保护装置运行失效性分析与状态检修策略

一起 110 kV 主变差动保护误动作原因分析

陆志平

(泰州供电公司, 江苏 泰州 225300)

摘要: 介绍一起在 110 kV 主变差动保护接线组别整定错误的情况下, 因 10 kV 线路故障导致穿越电流增大而引起 110 kV 主变差动保护误动作的实例, 分析了误动作、误整定、带负荷试验未发现误整定的原因, 并提出改进措施, 以便实际工作中加以防范。

关键词: 差动保护; 接线组别; 误整定; 误动作

中图分类号: TM77

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)01-0013-02

变压器差动保护原理简单、使用电气量单纯、保护范围明确、动作不需延时, 一直用作变压器主保护。目前变压器微机差动保护装置均采用具有比率制动特性的差动元件, 原则上在区外故障时不会发生误动作现象。但各微机保护差动保护在实现方式细节上的各不相同, 增加了其在具体使用中的复杂性, 人为出错机率增大, 正确动作率降低。某日兴化地区 110 kV 罗么变发生了一起 10 kV 线路故障引起 110 kV 主变差动保护误动作跳闸, 导致全所失电。

1 事故描述

110 kV 罗么变为单母分段接线方式, 母联 710 开关热备用, 1 号、2 号主变分列运行, 运行方式如图 1 所示。

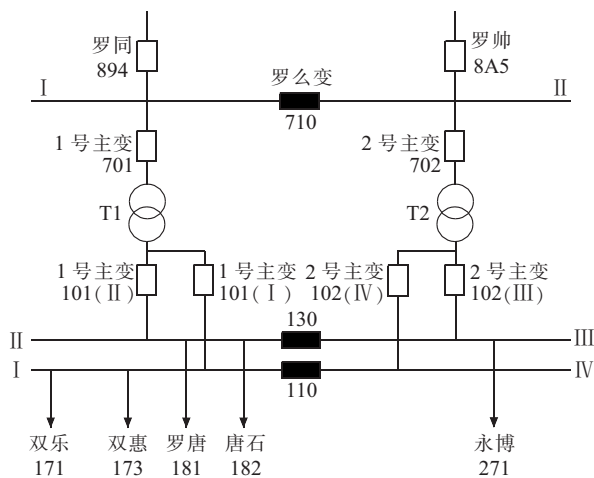


图 1 事故前罗么变电站运行方式

某日 2:20, 110 kV 罗么变 2 号主变差动动作, 跳开 2 号主变 702、102(III)、102(IV) 开关; 同时, 永博 271、唐石 182、罗唐 181 线路速断动作, 唐石 182 线路重合未成。2:22, 罗么变 1 号主变差动动作, 跳开 1 号主变 701、101(I)、101(II) 开关; 同时, 双乐 171、双惠 173 线路速断动作。全所失电, 所有负荷无法转移。6:

47, 地调将 1 号主变恢复运行后, 兴化调试送唐石 182 线, 唐石 182 线速断动作, 重合未成, 1 号主变主变未动作。6:50 兴化调试送双乐 171 线, 1 号主变差动动作, 同时双乐 171 线速断动作。

2 原因分析

发生事故当天为雷暴雨天气, 罗么变 2:20 永博 271、双乐 171、双惠 173 线路发生永久性相间故障, 因而流过罗么变 1 号、2 号穿越电流非常大, 同时主变差动保护接线组别整定错误, 最终导致主变差动保护误动作跳三侧开关。

2.1 接线组别整定错误造成较大差流

不平衡电流产生的原因大致分为^[1]: 稳态情况下不平衡电流; 暂态情况下不平衡电流。其中稳态情况下不平衡电流的原因主要有: (1) 变压器绕组接线方式不同。 (2) 带负荷调分接头引起变压器变比的改变。 (3) 变压器各侧电流互感器的型号和变比不相同。

罗么变 1 号、2 号主变高压侧 CT 变比为 1 200/5, 低压侧 CT 变比为 4 000/5, 线路 CT 变比为 600/5。

2:22 双惠 173 跳闸时, 1 号主变同时跳闸。双惠 173 线路保护动作电流二次值为 78.6 A, 反映到一次电流为 9 432 A, 此时主变低压侧的一次电流为 9 432 A。差动保护检测到的二次电流 I_d 为 11.8 A, 反映到主变高压侧的一次电流为 900.3 A, 差动保护检测到的二次电流 I_g 为 3.75 A。

接线组别整定为 Y/△/△, 装置的平衡系数: 高压侧 K_1 为 1/1.732; 低压侧 K_2 为 0.318; 差流 I_{cd} 为:

$$I_{cd} = I_g \times K_1 \times 1.732 - I_d \times K_2 = 0.002 \text{ A} \quad (1)$$

接线组别整定为 Y/Y/△, 装置的平衡系数为: 高压侧 K_1 为 1/1.732; 低压侧 K_2 为 0.1836, 差流 I_{cd} 为:

$$I_{cd} = I_g \times K_1 \times 1.732 - I_d \times K_2 = 1.58 \text{ A} \quad (2)$$

差动保护的启动值 I_{qd} 整定为 1.4 A 小于 1.58 A, 此时差动保护将启动。差动保护装置采样到的差流为 2.85 A 大于 1.4 A。可见 1 号主变跳闸是由接线组别整

定错误产生的。

2.2 试送唐石 182 线路 1 号主变差动未误动的原因

罗么变 2 台主变容量均为 8 万 $\text{kV}\cdot\text{A}$, 主变有 110 $\text{kV}/10.5 \text{ kV}$ 2 个额定电压等级, 接线组别 Y/Δ 接线, 低压侧采用双分支接线。差动保护配置为南瑞科技(城乡所) DSA-2321-3 型变压器差动保护, 该型号保护全称为三圈变高中低三侧差动主保护。查阅 110 kV 罗么变主变电压电流回路设计图, 图中差动保护电流回路标有 110 kV 侧进线、10 kV 分支一、10 kV 分支二, 而没有标明中压侧接有电流回路(如图 2 所示)。继电保护整定人员按照常规思路, 认为 10 kV 分支一与 10 kV 分支二的电流回路同时接在保护装置的低压侧电流回路上, 并在装置内部进行电流矢量计算, 因此将接线组别整定成了 $\text{Y}/\text{Y}/\Delta$ 。而现场检查装置背板的电流端子发现, 实际将 10 kV 分支一电流接入了中压侧电流回路, 10 kV 分支二接入了低压侧电流回路, 据此, 接线组别应该整定成 $\text{Y}/\Delta/\Delta$ 。

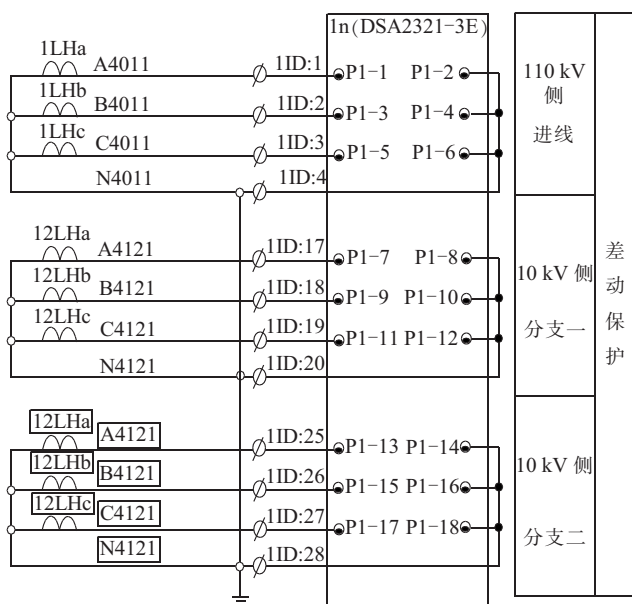


图 2 差动保护电流回路

对罗么变 10 kV 的 4 段母线来说, 10 kV II 段母线及 IV 段母线的电流接入主变差动回路是正确的, 而 10 kV I 段母线及 III 段母线的电流接入主变差动回路则会产生差流, 且差流随着电流的增大而增大。因此在试送 10 kV II 母线上的唐石 182 线路时, 唐石 182 线路速断保护动作, 而 1 号主变差动保护未动作; 在试送 10 kV I 段母线上的双乐 171 线路时, 双乐 171 线路速断保护动作的同时 1 号主变差动也动作。由此也说明这次主变跳闸是由接线组别整定错误产生的。

2.3 主变带负荷试验未发现有差流的原因

主变带负荷试验时, 带 2 组电容器, 容量为 12 000 kVar , 约占主变容量的 15%。2 台电容器的一次负荷电流 I_e 为 660 A , 即 I_{d1} 为 330 A , I_{d2} 为 330 A 。此时, 反映

到主变低一侧及低二侧的一次电流为 330 A 。低压侧 CT 变比为 4 000/5, 差动保护检测到的二次电流 I_{d1} , I_{d2} 均为 0.412 5 A 。此时, 反映到主变高压侧的一次电流为 63 A 。高压侧 CT 变比为 1 200/5, 差动保护检测到的二次电流 I_g 为 0.262 5 A 。

如果整定成 $\text{Y}/\Delta/\Delta$, 装置的平衡系数: 高压侧 K_1 为 1/1.732; 低一侧 K_2 为 0.316; 低二侧 K_3 为 0.316, 差流 I_{cd} 为:

$$I_{cd} = I_g \times K_1 \times 1.732 - I_{d1} \times K_2 - I_{d2} \times K_3 = 0 \quad (3)$$

如果整定成 $\text{Y}/\text{Y}/\Delta$, 装置的平衡系数: 高压侧 K_1 为 1/1.732; 低一侧 K_2 为 0.183 6; 低二侧 K_3 为 0.316 差流 I_{cd} 为:

$$I_{cd} = I_g \times K_1 \times 1.732 - I_{d1} \times K_2 - I_{d2} \times K_3 = 0.055 \quad (4)$$

由此可以判断, 考虑到装置精度, 带负荷试验无法验证有差流。

3 暴露的问题

由于对罗么变 1 号、2 号主变差动保护均与 10 kV 线路速断保护同时动作认识不够, 现场没有检查差动保护电流回路。当 1 号主变差动保护再次因 10 kV 线路故障引起误动时, 才检查了差动保护电流回路。整定人员业务水平有待提高, 工作不够严谨, 对保护装置电流回路接线方式的多样性和复杂性认识不足, 按照常规方式进行整定, 导致差错发生。对于主变差动保护带负荷试验认识不足, 没有认识到双分支、负荷电流小, 在带有限负荷进行带负荷试验及保护装置精确度限制的情况下可能无法暴露差动保护接线组别整定错误。

4 改进措施

(1) 做好日常的事故预想工作, 尽可能考虑各变电站的不同情况、各类事故, 针对恶劣天气做好危险点分析。制定具体的事故应急处理预案、事故预想等应急措施, 经常进行事故演练。

(2) 加强检修人员、操作人员及调度员的培训。针对保护装置电流、电压回路接线方式的多样性和复杂性, 多学习一些事故案例, 增加见识, 以提高对事故原因分析和判断能力, 确保事故处理准确无误。

(3) 要深入现场, 熟悉有关图纸、现场设备情况, 认真进行定值计算, 严格按照规定进行审批和核对。加强与施工单位、设计单位沟通, 对于不同于常规做法的地方, 将其作为重点内容特别提供给运行运行、生技、调度等部门, 从源头防止类似事故的发生。

(4) 应定期对差动保护二次回路进行检查, 利用每年进行的设备年检, 对差动保护二次回路进行试验, 保证设备的安全运行。

一起 220 kV 主变跳闸事故分析与对策

孔 军¹, 郎燕娟²

(1.泰州供电公司,江苏 泰州 225300;2.苏州供电局,江苏 苏州 215004)

摘 要:根据监控系统信号、保护动作检查情况、故障录波图、一二次设备检查情况,详细分析了一起因线路保护死机、主变低压侧开关跳圈烧毁而导致的主变低后备保护动作、主变三侧开关跳闸的事故原因,对有关设备损坏情况及保护装置信号进行了简要分析,总结了该次事故暴露出来的设备运行、设计方面存在的缺陷,并提出改进建议。

关键词:主变跳闸;低后备保护;保护装置闭锁;防范措施

中图分类号:TM407

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0015-03

随着电力系统的发展,变电站由有人值守逐步向现场无人值守、集中监控模式转变。为提高监控效率、优化监控模式,在设计、验收、投运的过程中将现场一二次信号加以合并或筛选传到监控,此过程中会出现一些重要信号的遗漏,可能导致设备或保护装置的异常不能及时发现,就会扩大事故范围,造成大面积停电事故,降低了供电可靠性。文中以一起 220 kV 主变跳闸为例,分析了事故原因,提出改进建议。

1 事故简要经过

事故前运行方式如图 1 所示,变电站仅有 1 台主变,观兴线 4962 开关运行于 220 kV 副母,1 号主变 2601 开关、观盛线 4961 开关运行于 220 kV 正母,220 kV 母联 2610 开关合环运行;1 号主变经 701 开关供 110kV 正母,110 kV 母联 710 开关合环运行供 110 kV 副母;1 号主变 101 开关供 10 kV I 段母线,10 kV 母联 110 开关运行供 10 kV II 段母线。

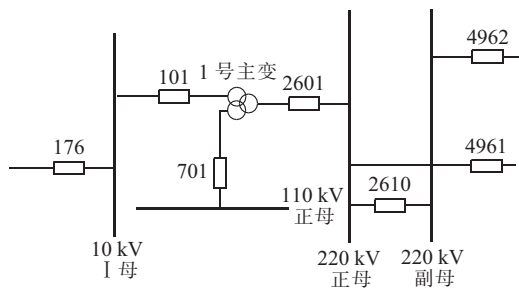


图 1 一次运行方式

2011 年 8 月 2 日 19:44,220 kV 观五变 1 号主变低后备速断过流 I 段保护动作,跳开 1 号主变高压侧 2601 开关、中压侧 701 开关,低压侧 101 开关保护出口跳闸但未能跳开。事故导致下级 2 座 110 kV 变电站、1 座 35 kV 变电站全站停电。

2 事故原因分析

2.1 观五变 1 号主变低后备保护动作情况

事故发生时,观五变 1 号主变 A/B 柜低后备保护(保护型号为国电南自 PSL-1200)启动,速断过流 I 段出口,跳开 1 号主变高压侧 2601 开关、中压侧 701 开关,保护出口跳低压侧 101 开关,但未能跳开,现场仍在合闸位置。

初步分析动作报告,故障开始时 B,C 相相间故障,二次故障电流为 6 A,低后备保护启动,2 757 ms 后,发展为 A,B,C 三相短路,二次故障电流达到 11 A,大于速断过流保护定值,延时 2 825 ms 后保护出口跳主变三侧开关。

2.2 一、二次设备检查分析

2.2.1 保护范围内一次设备情况

经检查 1 号主变低后备保护范围内的 101 开关进线,10 kV 母线无故障放电现象,且 1 号主变后备保护装置无异常非保护误动跳闸。考虑到越级跳闸的可能性,对 10 kV 母线上的出线进行检查,发现 10 kV 周梓 1 号线 157 开关保护装置(保护型号为南瑞科技 NSR612)运行灯不亮,装置闭锁,后巡线发现该线 34 号塔向南支线瓷瓶被击穿,判断是因线路保护拒动引起主变后备保护动作。

2.2.2 观五变主变低后备保护配置情况

观五变 1 号主变保护为双重化配置,型号为国电南自生产的 PST1202 A/B 系列主变保护,低后备保护版本号为 1.35,配置两段复压过流保护和一段速断过流保护。复压过流 I 段设置 2 个时限,复压 II 段设置 1 个时限,速断过流保护设置 2 个时限。

依据文献[1],复压过流 I 段保护整定为 11.25 A,0.6 s 跳低压侧母联 110 开关,0.9 s 跳低压侧主变开关 101 开关;复压过流 II 段保护整定为 5.5 A,2.5 s 跳低压侧 101 开关;低电压和负序电压定值按照整定规程,分别整定为 65 V 和 6 V。速断过流保护作为纯电流保护,整定为 6.19 A,动作时间与复压 II 段配合,2.8 s 跳主变三侧开关。

2.2.3 观五变主变低后备复压过流保护未动作的原因

从主变保护低后备保护故障录波(如图 2 所示)可以看出,保护启动 11 ms 时,B,C 两相电压明显下降,电流明显增大,B 相电流达到 7.07 A,C 相电流达 6.24 A,大于速断过流保护定值和复压过流 II 段保护定值,负序电压为 8.885 V(大于 6 V),负序电压开放复压保护闭锁,后备保护中复压过流 II 段保护和速断过流保护启动;但故障 241 ms 时,负序电压为 5.443 V(小于 6 V),复压元件重新闭锁,复压过流 II 段保护启动返回;保护启动后 320 ms,A 相电压也跌落至 41 V,A 相电流达到 9.37 A,B,C 相故障电流始终大于速断过流保护定值,速断过流保护保持启动,低电压为 68.21 V,负序电压上升为 6.2 V(大于 6 V),复压元件重新开放,复压过流 II 段保护启动。保护启动后 320 ms 至 341 ms,低电压上升为 71 V,负序电压下降为 5.06 V(小于 6 V),复压元件重新闭锁,复压过流 II 段保护再次启动返回;保护启动后 2 432 ms 期间,由于故障点放电电弧燃烧不稳定,造成 10 kV 母线电压波动,复压元件多次开放和闭锁,复压过流 II 段保护启动元件随之启动和返回。

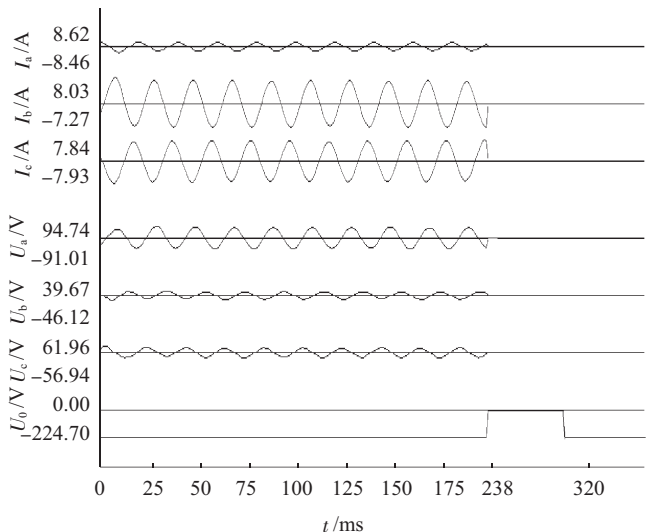


图 2 低后备保护故障录波

在此期间 A,B,C 相电流始终大于速断过流保护定值,保护启动后 2 797 ms,速断过流保护出口,跳主变三侧开关。保护出口时,A 相电流为 8.27 A,B 相电流为 7.43 A,C 相电流为 7.85 A,负序电压为 1.26 V,低电压为 73.26 V。

2.2.4 观五变主变低后备速断保护动作的原因

检查发现周梓 1 号线线路测控保护装置运行灯灭,进入“事件记录”菜单,发现装置报“CPU 异常”信号。巡线人员检查发现线路有多处瓷瓶爆裂,一处电缆头爆炸,但保护装置未动作,判断为 10 kV 周梓 1 号线线路保护拒动,造成主变低后备速断保护越级动作。

2.2.5 1 号主变 101 开关拒动原因

现场检查 101 开关,发现保护动作后出现控制回路断线的信号,测量分闸线圈的电阻值很小,判断为保护发出跳闸脉冲后跳闸线圈烧坏。更换跳闸线圈后,101 开关手动分合正常,保护模拟传动开关正确。

2.2.6 10 kV 周梓 1 号线保护装置死机监控未发现原因

10 kV 周梓 1 号线采用南瑞科技 NSR612 保护测控装置,具备完善的自检功能,其逻辑框图如 3 所示。据南瑞科技厂方分析结论,因外部极端条件干扰造成装置 DPRAM 区内部数据异常,装置自检出错,闭锁了保护功能,因此在线路发生故障时无法正确动作。但设计图纸(如图 4 所示)中,南瑞科技 NSR612 保护装置有“闭锁”、“报警”2 个信号,其中“报警”用于二次回路、过负荷等情况,“闭锁”用于装置故障、装置闭锁、保护功能退出等严重情况。在设计时未将“闭锁”信号引至测控装置,更未上传至监控,所以当故障装置死机时,后台与监控均未收到装置故障闭锁的信号,未能及时处理设备异常,导致了偶发的越级跳闸事故。

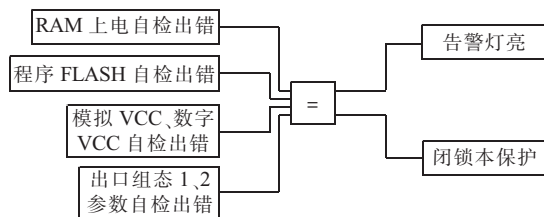


图 3 NSR612 装置自检逻辑

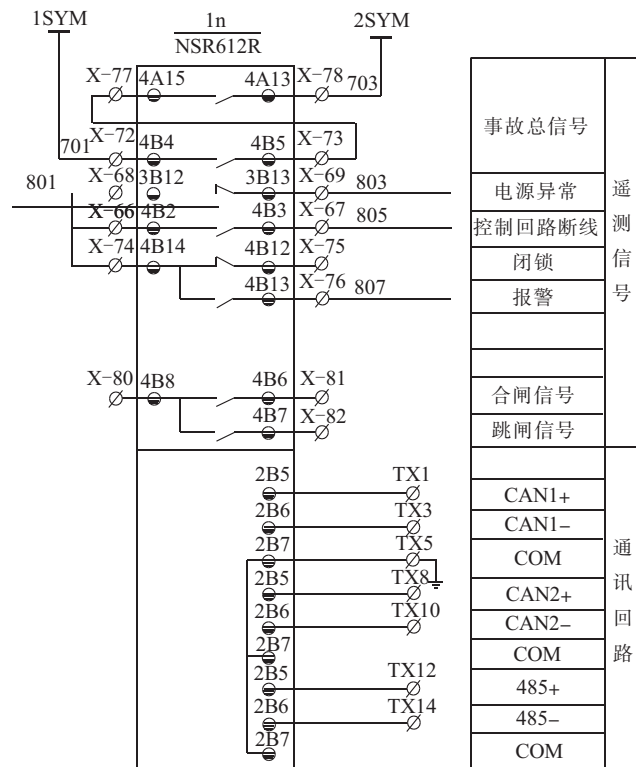


图 4 保护二次设计

综上所述,当时 10 kV 线路周梓 1 号 176 线由于遭雷击,绝缘瓷瓶爆裂,造成 B,C 两相短路,线路保

护因死机拒动后,进而发展成三相短路故障;主变后备保护在感受到故障电流时正确启动,但由于故障点放电电弧燃烧不稳定,造成 10 kV 母线电压波动,主变后备复压元件频繁启动复归,复压过流保护多次启动后返回,最终由主变后备保护速断过流保护于保护启动后 2.8 s 时动作,跳主变三侧开关,切除了故障。该事故发生的主要原因是设计中未充分认识“装置告警”、“装置闭锁”信号的来由和区别,导致“保护装置闭锁”信号未接入监控,保护死机时未能及时发现,此时 10 kV 线路上出现故障而保护拒动扩大了事故停电范围。

3 结束语

该次事故发生后,该公司已对观五变二次保护设

备“装置闭锁”、“装置故障”信号输出接点短接并进行了相关试验,且对辖区内所有该类保护信号进行了排查整改,防止有重要信号在设计时未接入监控系统,确保监控人员实时掌握设备状态。

参考文献:

- [1] DL/T584—2007,3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程 [S].

作者简介:

孔 军(1977),男,江苏泰州,助理工程师,从事变电运维管理工作;

郎燕娟(1974),女,河北清苑人,工程师,从事智能小区阶梯电价用电信息采集工作。

Analysis and Countermeasures on a Tripping Accident of 220 kV Transformer

KONG Jun¹, LANG Yan-juan²

(1. Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, China;2. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 210054, China)

Abstract: The reasons of the accident that low voltage side backup protection acting and the three-side switch tripping of main transformer caused by line protection crash and low-side switch hoops burned are analyzed in detail, according to the signals from monitoring system, the action of relay protection, the record of fault wave and the examination of electrical main and secondary equipment. The damage of some equipment and the signals from the protective devices are also analyzed. The defects of equipment operation and design which revealed from this accident are summarized, and the related suggestions are given.

Key words: transformer tripping; back up protection; the block of relay protection; preventive measures

(上接第 14 页)

(5) 建立健全运行分析制度,特别是对继电保护运行分析,应每月进行一次,做到有分析有总结。

5 结束语

运行实践表明,如果主变差动保护接线组别整定错误,只要有穿越电流流过主变,主变差动回路就会产生差流,且差流随着电流的增大而增大。由于负荷电流跟区外故障电流相比小得多,在带有限负荷进行带负荷试验时,很可能不能发现接线组别整定存在问题。因而这种误整定具有一定隐蔽性,只有误动后才会发现。这起误整定部分原因是整定人员按照常规方式进行整

定,导致差错发生。影响变压器差动保护动作可靠性的因素很多,除文中所述之外,差动回路接线不正确、TA 特性不良、调整不当、整定值不合理等都会造成不正确动作。因此,要从事故中汲取教训,举一反三,提高差动保护动作可靠性和电网的稳定运行水平。

参考文献:

- [1] 国家电力调度通信中心编.电力系统继电保护实用技术问答 [M].2 版.北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

陆志平(1976),男,江苏姜堰人,本科,现从事电力调度工作。

Analysis of the reason of an 110 kV main transformer differential protection malfunction

LU Zhi-ping

(Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, China)

Abstract: A practical example of an 110kV main transformer differential protection malfunction caused by the increase through currents in 10kV line fault with error setting of wiring group is introduced in this paper. The reason of disoperation and error setting is analyzed. Improvement method is put forward in order to prevent such situation in practical work.

Key words: differential protection; wiring group; error setting; malfunction

基于改进牛顿法的 VSC-HVDC 潮流计算

黄曙¹, 何桦², 卫志农³, 季聪³

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

3. 河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据电压源换流器(VSC)新型高压直流输电(HVDC)的稳态特性和控制方式, 建立了含 VSC-HVDC 稳态潮流计算数学模型, 分别采用牛顿法、简化牛顿法、三阶收敛牛顿法和六阶收敛牛顿法进行潮流求解, 仿真验证了各算法在 VSC-HVDC 不同控制方式下的有效性, 并对各种算法的计算速度作了比较, 并在此基础上提出了 2 种混合算法, 仿真验证了其优越性。

关键词: 电压源换流器; 高压直流输电; 改进牛顿法; 交直流系统; 潮流计算

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2013)01-0018-05

随着电网建设的发展, 直流输电在电网中越来越广泛, 将出现越来越多的交直流混合系统。以全控型开关器件和电压源换流器(VSC)为基础的新一代高压直流(HVDC)输电, 相比基于晶闸管的直流输电, 具有直接向孤立的远距离负荷供电、更经济地向负荷中心送电、运行控制方式灵活多变等优点。因此 VSC-HVDC 的研究成为近年来众多学者研究的热点^[1-6]。目前采用的交直流混合系统的潮流计算^[7-10]方法大部分是在交流潮流计算方法的基础上扩展形成的, 主要分为统一迭代求解法和交替迭代求解法两类。统一法是以极坐标形式下的牛顿拉夫逊法(下简称牛顿法)为基础, 将交流节点变量和直流节点变量进行统一迭代求解。交替法是在迭代计算过程中对交直流系统方程分别进行处理, 实现了交流潮流解和直流潮流解的分开迭代, 但由于迭代过程中没有考虑交直流之间的耦合, 因此收敛性不佳, 精度低。

随着电力系统规模的日益扩大以及安全分析等在线计算问题的提出, 潮流计算速度成为一个迫切需要解决的问题。国内外的学者对此进行了广泛的研究, 并提出了许多有益的改进。文中基于 VSC-HVDC 的稳态模型, 导出含 VSC-HVDC 的交直流混合系统潮流计算的数学模型, 在此基础上针对牛顿法进行一些改进, 同时通过数学方法证明这些算法的有效性, 并通过多个算例仿真验证这些改进算法在计算时间和收敛性上的优势。

1 VSC-HVDC 潮流计算的数学模型

1.1 VSC-HVDC 稳态特性

交直流系统由交流系统和直流系统组成, 如图 1 所示。图中 i 表示接入直流网络的第 i 个 VSC, 假设其输出的基波电压相量为 $\dot{U}_{ci} = U_{ci} \angle \theta_{ci}$, 与之相连的交流

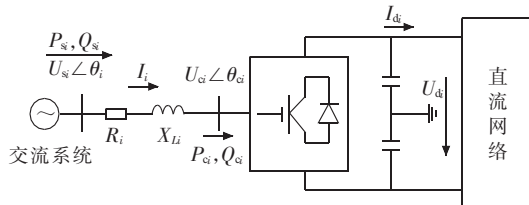


图1 VSC-HVDC 稳态模型

节点电压相量为 $\dot{U}_{si} = U_{si} \angle \theta_{si}$; 换流变压器阻抗为 jX_{Li} ; R_i 为第 i 个换流器内部损耗和换流变压器损耗的等效电阻; P_{si} 和 Q_{si} 分别为交流系统流入换流变压器的有功、无功功率; P_{ci} 和 Q_{ci} 分别为流入换流桥的有功、无功功率; I_i 为流过换流变压器的电流。则:

$$\dot{I}_i = (\dot{U}_{si} - \dot{U}_{ci}) / (R_i + jX_{Li}) \quad (1)$$

由交流系统流入换流变压器的复功率 $\dot{S}_{si}$ 满足如下关系式:

$$\dot{S}_{si} = P_{si} + jQ_{si} = \dot{U}_{si} (\dot{I}_i)^* \quad (2)$$

$$\text{令 } \delta_i = \theta_{si} - \theta_{ci}, |Y_i| = 1 / \sqrt{R_i^2 + X_{Li}^2}, \alpha_i = \arctan(X_{Li} / R_i),$$

将式(1)代入式(2), 进一步推导可得:

$$P_{si} = -|Y_i| U_{si} U_{ci} \cos(\delta_i + \alpha_i) + |Y_i|^2 U_{si}^2 \cos \alpha_i \quad (3)$$

$$Q_{si} = -|Y_i| U_{si} U_{ci} \sin(\delta_i + \alpha_i) + |Y_i|^2 U_{si}^2 \sin \alpha_i \quad (4)$$

同理可得:

$$P_{ci} = |Y_i| U_{si} U_{ci} \cos(\delta_i - \alpha_i) + |Y_i|^2 U_{ci}^2 \cos \alpha_i \quad (5)$$

$$Q_{ci} = -|Y_i| U_{si} U_{ci} \sin(\delta_i - \alpha_i) - |Y_i|^2 U_{ci}^2 \sin \alpha_i \quad (6)$$

VSC 换流桥臂的损耗已由 R_i 等效, 所以直流功率 P_{di} 应与流入换流桥的功率 P_{ci} 相等, 因此可得:

$$P_{di} = U_{di} I_{di} = |Y_i| U_{si} U_{ci} \cos(\delta_i - \alpha_i) - |Y_i|^2 U_{ci}^2 \cos \alpha_i \quad (7)$$

式中: U_{di} , I_{di} 分别为直流节点的电压和电流。另外, 电压方程为:

$$U_{ci} = \frac{\sqrt{6}}{4} M_i U_{di} \quad (8)$$

式中: M_i 为第 i 个 VSC 的调制度。

式(1)至(8)则构成了标幺制下 VSC-HVDC 的稳态潮流计算模型^[11]。

1.2 VSC-HVDC 的控制方式

在 VSC-HVDC 中, 直流电压的稳定与否直接关系到系统能否正常运行和交流侧电压的稳定性。若有功发送端的 VSC 从该端交流系统吸收的有功功率大于接受端 VSC 发送到对应端交流系统的有功功率, 直流电压升高, 反之则降低。因此为了实现这种功率上的平衡, 其中一端 VSC 必须采用定直流电压控制。此外, 若直流电压恒定, 则直流电流的变化量正比于有功功率的不平衡量, 定直流电压控制和定有功功率控制是等效的。综合上述分析, VSC 的控制方式可选以下几种^[7]: ① 定直流电压、定无功功率控制; ② 定直流电压、定交流电压控制; ③ 定有功功率、定无功功率控制; ④ 定有功功率、定交流电压控制。

文中对直流支路两端的 VSC-HVDC 采用以下 4 种控制方式组合: (1) ①+③; (2) ①+④; (3) ③+②; (4) ④+②。

1.3 潮流方程

对于系统中的纯交流节点, 其潮流计算方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_{ai} = P_{ai}^s - U_{ai} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_{ai} = Q_{ai}^s - U_{ai} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: 下标 i 表示第 i 个节点; 下标 a 表示此节点为纯交流节点; U, θ 分别为节点电压幅值和相角; G, B 分别为节点导纳矩阵。而对于直流节点, 潮流计算方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_{ti} = P_{ti}^s - U_{ti} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{si} \\ \Delta Q_{ti} = Q_{ti}^s - U_{ti} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{si} \end{cases} \quad (10)$$

式中: 下标 t 表示此节点为直流节点; P_{si}, Q_{si} 分别为交流系统流入换流变压器的有功功率和无功功率。

根据上节推导建立的 VSC-HVDC 的稳态模型, 可得到直流系统的潮流计算方程为:

$$\begin{cases} \Delta d_{i1} = P_{si} + \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \cos(\delta_i + \alpha_i) - U_{si}^2 |Y_i| \cos \alpha_i \\ \Delta d_{i2} = Q_{si} + \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \sin(\delta_i + \alpha_i) - U_{si}^2 |Y_i| \sin \alpha_i \\ \Delta d_{i3} = U_{di} I_{di} - \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \cos(\delta_i - \alpha_i) + \frac{1}{2} (\mu_i M_i U_{di})^2 |Y_i| \cos \alpha_i \end{cases} \quad (11)$$

对于复杂的多端直流网络, 有:

$$\Delta d_{i4} = I_{di} - \sum_{j=1}^{nc} g_{dij} U_{dj} \quad (12)$$

式中: g_{dij} 为直流网络电导矩阵元素。

2 改进牛顿法的数学描述

在数学上, 电力系统潮流计算可以描述为非线性方程组的求解问题。近年来, 非线性代数方程组的求解问题在数学上有了很大的进展。

设变量 $x = [U, \theta, U_d, I_d, \delta, M, P_s, Q_s]^T$, 而各不平衡量 $f = [\Delta P, \Delta Q, \Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3, \Delta d_4]^T$, Jacobian 矩阵用 J 表示。

2.1 简化牛顿法

简化牛顿法的单变量迭代公式如下:

$$x_{k+1} = x_k - f(x_k) / f'(x_0) \quad (13)$$

该算法计算量小, 但只具备线性收敛性。其多变量矩阵形式如式(14)所示:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - J(x_0)^{-1} f(x^{(k)}) \quad (14)$$

整个计算过程中只需计算一次 Jacobian 矩阵, 计算量大大减少, 但迭代次数会因此有所增加。

2.2 三阶收敛牛顿法

文献[12]提出了一种具有三阶收敛性的牛顿法:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k - f(x_k) / f'(x_k)) + f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (15)$$

它是牛顿法与简化牛顿法的结合, 相当于在原有牛顿法每一次的迭代基础上进行一次简化牛顿法迭代:

$$\begin{cases} \tilde{x}_{k+1} = x_k - f(x_k) / f'(x_k) \\ x_{k+1} = x_k - (f(x_k) + f(\tilde{x}_{k+1})) / f'(x_k) \end{cases} \quad (16)$$

该算法吸取了牛顿法收敛性好和简化牛顿法计算量小的优点, 其多变量矩阵形式如下:

$$\begin{cases} y^{(k)} = x^{(k)} - J(x^{(k)})^{-1} f(x^{(k)}) \\ x^{(k+1)} = x^{(k)} - J(x^{(k)})^{-1} (f(x^{(k)}) + f(y^{(k)})) \end{cases} \quad (17)$$

2 次计算中 Jacobian 矩阵不变, 减少了形成 Jacobian 矩阵和进行三角分解的计算量, 节省了一定的计算量。

2.3 六阶收敛牛顿法

文献[13]探讨了一种充分利用已计算的 $f(x_k)$ 的三阶牛顿法:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{2f(x_k)}{f'(x_k - f(x_k) / f'(x_k)) + f'(x_k)} \quad (18)$$

其迭代过程类似于 2.2 所述三阶收敛牛顿法, 同样分两步进行:

$$\begin{cases} y_k = x_k - f(x_k) / f'(x_k) \\ z_k = x_k - 2f(x_k) / (f'(x_k) + f'(y_k)) \end{cases} \quad (19)$$

其中 z_k 即为第 k 次迭代后得到的 x_{k+1} 。由于该算法每一步迭代都要重新计算 $f'(x)$, 计算量和牛顿法相比没有实质性的提高。文献[14]提出在此基础上再增加一次迭代:

$$x_{k+1} = z_k - f(z_k)/f'(z_k) \quad (20)$$

为了减少计算量, 采用一种近似方法计算 $f'(z_k)$ 的近似值。根据 $(x_k, f'(x_k))$ 和 $(y_k, f'(y_k))$, 可根据两点法求得 $f'(x)$ 的近似表达式:

$$f'(x) \approx \frac{x - x_k}{y_k - x_k} f'(y_k) + \frac{x - y_k}{x_k - y_k} f'(x_k) \quad (21)$$

则可得到 $f'(x)$ 在 z_k 处的近似值为:

$$f'(z_k) \approx \frac{z_k - x_k}{y_k - x_k} f'(y_k) + \frac{z_k - y_k}{x_k - y_k} f'(x_k) \quad (22)$$

将式(19)代入(22), 可得:

$$f'(z_k) \approx \frac{f'(x_k)(3f'(y_k) - f'(x_k))}{f'(x_k) + f'(y_k)} \quad (23)$$

式(19)、(20)、(23)组成了一种新的六阶收敛方法^[14]:

$$\begin{cases} y_k = x_k - f(x_k)/f'(x_k) \\ z_k = x_k - 2f(x_k)/(f'(x_k) + f'(y_k)) \\ x_{k+1} = z_k - \frac{f(z_k)}{f'(z_k)} \end{cases} \quad (24)$$

其多变量矩阵形式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{x}^{(k)} - \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)}) \\ \mathbf{z}^{(k)} = \mathbf{x}^{(k)} - 2(\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)}) + \mathbf{J}(\mathbf{y}^{(k)}))^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)}) \\ \mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{z}^{(k)} - \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)}) + \mathbf{J}(\mathbf{y}^{(k)})}{3\mathbf{J}(\mathbf{y}^{(k)}) - \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})} \mathbf{f}(\mathbf{z}^{(k)}) \end{cases} \quad (25)$$

该算法只计算 2 次 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{J}(\mathbf{x})$, 无需计算海森矩阵, 但具备六阶收敛性, 减少了计算量, 节省了计算时间。

3 算例分析

3.1 基本算例测试

下面以经修改的 IEEE-14 节点系统为例, 验证上述算法的有效性。将 IEEE-14 节点系统的 13-14 支路替换为直流支路, 并在交流节点接入 VSC 装置后得到的交直流系统如图 2 所示。直流系统参数如表 1 所示, 均为标幺值。

其中: N_{Bus} 表示 VSC 所在的交流母线号; P_s, Q_s 分别为直流系统的注入有功、无功功率; U_d 为直流电压; R, X_L 由系统给定。 P_s, Q_s 初值设为与修改前系统支路功率相等, 由原系统的潮流计算得到。 I_d, δ, M 由式(26—28)得到。

$$I_{di} = (P_{gi} - P_{li}) / U_{di} \quad (26)$$

$$\delta_i = \arctan(P_{li} / (U_{li}^2 / X_{Li} - Q_{li})) \quad (27)$$

$$M_i = 2\sqrt{6} P_{li} X_{Li} / (3U_{li} U_{di} \sin \delta_i) \quad (28)$$

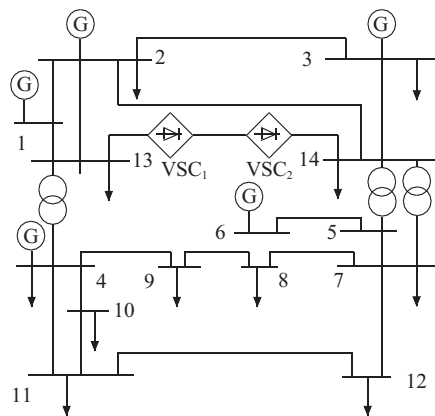


图 2 经修改的 IEEE-14 节点交直流混合系统

表 1 直流系统参数

N_{Bus}	R	X_L	P_s	Q_s	U_d
13	0.006	0.150	0.919	0.122	2.000
14	1.006	0.150	-0.899	0.173	2.000

式中: P_{gi} 为节点发电有功。

经修改的 IEEE-14 节点系统在牛顿法以及文中所述 2 种改进算法下进行潮流计算, 其迭代次数、计算时间和误差比较如表 2 所示。所有算法均在 Windows 平台下用 matlab 编程实现。为保证计算时间尽可能准确, 采取计算 100 次潮流取平均时间的方法进行仿真。所用电脑主频 1.8 GHz, 内存 2 G。

表 2 迭代次数和计算时间比较

控制方式 ③+②	迭代次数	计算时间 /ms	误差
牛顿法	4	6.50	1.70e-11
简化牛顿法	13	8.18	2.72e-10
三阶牛顿法	2.5*	5.76	4.22e-15
六阶牛顿法	2	7.00	6.22e-15

* 表示只进行了前半次迭代即达到收敛要求。

可见, 三阶收敛牛顿法在计算时间和收敛精度上, 都有比较明显的优势; 而简化牛顿法虽然无需多次计算 Jacobian 矩阵, 但由于迭代次数远大于其他算法, 时间反而有所增加; 六阶牛顿法迭代次数最少, 但迭代时间略长。

3.2 控制模式测试

在实际电力系统运行中, 为了实现稳定运行、减少损耗、控制潮流等功能, VSC-HVDC 常常需要在多种控制模式下运行。在不同控制方式下, 4 种算法的迭代次数和计算时间上的比较如表 3 所示。A 表示牛顿法, B 为简化牛顿法, C 为三阶收敛牛顿法, D 为六阶收敛牛顿法。

由表 3 可知, 不同控制方式下, 这 4 种方法均能有效解决含 VSC-HVDC 的潮流计算问题, 且 4 种控制

表 3 不同控制方式下计算结果比较

①+③	迭代次数	计算时间 /ms	①+④	迭代次数	计算时间 /ms
A	4	6.52	A	4	6.62
B	13	8.25	B	13	8.11
C	2.5	5.79	C	2.5	5.85
D	2	7.07	D	2	7.06
③+②	迭代次数	计算时间 /ms	④+②	迭代次数	计算时间 /ms
A	4	6.50	A	4	6.51
B	13	8.18	B	11	7.05
C	2.5	5.76	C	2.5	5.84
D	2	7.00	D	1.5	6.05

方式下,三阶收敛牛顿法在计算时间上一直占有比较明显的优势;而六阶收敛牛顿法迭代次数最少。

3.3 算法效率测试

表 4 列出了牛顿法、简化牛顿法、三阶收敛牛顿法和六阶收敛牛顿法对各经修改的 IEEE 标准系统进行潮流计算时的迭代次数和计算时间,各系统直流支路两端的 VSC 控制方式组合为③+②。

表 4 各算例迭代次数和计算时间比较

算例	迭代次数			
	A	B	C	D
IEEE-30	4	12	2.5	1.5
IEEE-57	4	17	2.5	1.5
IEEE-1184	4	15	2.5	1.5
算例	计算时间 /ms			
	A	B	C	D
IEEE-30	14.78	14.80	12.97	13.90
IEEE-57	45.59	47.05	37.16	41.58
IEEE-1184	372.19	203.67	301.04	257.00

结果表明,当系统较小时,高阶收敛牛顿法计算时间较短,原因在于 Jacobian 矩阵的形成和三角分解计算量不大,简化牛顿法因迭代次数远大于三阶收敛牛顿法而使得其他计算量增加;当系统较大时,Jacobian 矩阵的形成和三角分解计算量所占比重较大,简化牛顿法由于 Jacobian 恒定,减少了大量的计算量,计算时间最短。

表 5 列出了误差精度从 10^{-3} 到 10^{-9} 时,IEEE-57 系统计算时间比较。

表 5 精度对计算时间的影响

误差	计算时间 /ms			
	A	B	C	D
10^{-3}	34.00	26.88	27.68	41.58
10^{-5}	34.00	32.46	29.81	41.58
10^{-7}	45.59	38.12	37.16	41.58
10^{-9}	45.59	47.05	37.16	41.58

简化牛顿法在精度要求比较低的时候速度最快,但随着精度要求的提高,计算时间的增加速度较快;而三阶收敛牛顿法在几种精度要求下,计算速度均比较快;六阶收敛牛顿法一次迭代即可达到比较高的精度(3.04×10^{-10}),但计算时间的优势相较于三阶收敛牛顿法略有不足。

可见在精度要求较低时,采用低阶牛顿法计算速度比较快;而精度要求较高时,采用高阶牛顿法效果更佳。由此提出混合迭代算法,即在初期先进行一两次高阶牛顿算法的迭代,然后采用简化牛顿法进行后续迭代。为说明问题,将精度定为 10^{-13} ,算例结果如表 6 所示。AB 表示该算法为算法 A(牛顿法)和 B(简化牛顿法)的混合,CB 表示该算法为算法 C(三阶收敛牛顿法)和 B(简化牛顿法)的混合。

表 6 迭代次数和计算时间比较

IEEE-57	A	B	C	D	AB	CB
迭代次数	5	24	3	2	3+3	2+4
计算时间 /ms	63.09	74.02	49.55	58.74	49.05	44.56

AB 算法的迭代次数为 3+3,指的是该算例仿真进行了 3 次牛顿法迭代和 3 次简化牛顿法迭代,同理,CB 算法进行了 2 次三阶收敛牛顿法迭代和 4 次简化牛顿法迭代。算例结果表明,混合算法比前面涉及的 4 种算法计算速度都要快。原因在于:低阶牛顿法在处理精度要求高的问题时迭代次数增加而导致计算量上升;高阶牛顿法在处理精度要求低的问题时,迭代次数虽少,但单步迭代计算量较大,而且往往结果精度高于要求值,最终计算速度反而比较慢。文中通过高低阶牛顿法的合理搭配,求解时间大大减少。

4 结束语

在 VSC-HVDC 稳态潮流方程的基础上,从以下几个方面对含 VSC-HVDC 的交直流混合系统的稳态潮流问题进行了研究:将牛顿法、简化牛顿法、三阶收敛牛顿法和六阶收敛牛顿法用于解含 VSC-HVDC 的交直流潮流计算;通过算例仿真验证了各算法在各控制方式下的有效性;考虑在不同精度下,上述各算法在解含 VSC-HVDC 的交直流潮流时的计算时间差异和变化趋势;提出 2 种高低阶混合迭代算法,通过算例仿真验证了它们的有效性,并与前述 4 种算法进行比较,验证了新算法在计算速度上的优势。

参考文献:

[1] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等.轻型高压直流输电技术的发展与展望[J].电力系统自动化,2003,27(4):77-81.
 [2] 胡 弢.VSC-HVDC 的谐波分析[J].江苏电机工程,2009,28(4):9-13.

- [3] 文俊,张一工,韩民晓,等.轻型直流输电:一种新一代的 HVDC 技术[J].电网技术,2003,27(1):47-51.
- [4] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VS-C based HVDC Power Transmission Systems; an Overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [5] 汤广福.基于电压源换流器的高压直流输电技术[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [6] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等.轻型高压直流输电技术的发展与展望[J].电力系统自动化,2003,27(4):77-81.
- [7] ANGELES-CAMACHO C, TORTELLI O L, ACHA E, et al. Inclusion of a High Voltage DC-voltage Source Converter Model in a Newton-Raphson Power Algorithm [J]. IEE Proceedings Generation Transmission & Distribution, 2003, 150(6): 691-696.
- [8] PIZANO-MARTINEZ A, FUERTE-ESQUIVEL C R, AMBRIZ-PEREZ H, et al. Modeling of VSC-based HVDC Systems for a Newton-Raphson OPF Algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1794-1803.
- [9] 郑超,周孝信,李若梅,等.VSC-HVDC 稳态特性与潮流算法的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(6):1-5.
- [10] ZHANG X P. Multiterminal Voltage-sourced Converter-based HVDC Models for Power Flow Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1877-1884.
- [11] 孙国强,李育燕,卫志农,等.含 VSC-HVDC 的交流混合系统状态估计[J].电力系统自动化设备,2010,30(9):6-12.
- [12] NOOR M A, NOOR K I. Three-step Iterative Methods for Nonlinear Equations [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 183(1): 322-327.
- [13] WEERAKOON S, FERNANDO T C I. A Variant of Newton's Method with Accelerated Third-order Convergence [J]. Applied Mathematics Letters, 2000, 13(8): 87-93.
- [14] PARHI S K, GUPTA D K. A Sixth Order Method for Nonlinear Equations [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 203(1): 50-55.
- [15] SHARMA J R, GUHA R K. A Family of Modified Ostrowski Methods with Accelerated Sixth Order Convergence [J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 190(1): 111-115.

作者简介:

黄曙(1979),男,广东广州人,工程师,从事电力系统二次专业研究及技术管理工作;

何桦(1977),男,江西南昌人,硕士,从事 EMS 系统应用软件的开发与研究工作;

卫志农(1962),男,江苏江阴人,博士生导师,研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等;

季聪(1988),男,江苏如东人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行分析与控制。

Power Flow Calculation of VSC-HVDC Based on Improved Newton Method

HUANG Shu¹, HE Hua², WEI Zhi-nong³, JI Cong³

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. Nanjing NARI-Relays Electric Power Co. Ltd., Nanjing 211102, China; 3. Research Center for Renewable Energy

Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: On basis of the steady characteristics and the control patterns of high voltage direct current (HVDC) transmission system with voltage source converter (VSC), a mathematical model is built for power flow calculation of VSC-HVDC, which use Newton method, simplified Newton method, third-order convergence Newton method and six-order convergence Newton method respectively for power flow calculation. Results from simulation prove that the algorithms are effective for various kinds of control patterns of VSC-HVDC. Calculation speeds of each algorithm are also compared. Based on those simulation results, two hybrid algorithms are proposed and simulated to verify their superiority.

Key words: voltage source converter; high voltage direct current transmission; improved Newton's method; ac-dc power system; power flow calculation

国外页岩气的开发

页岩气的最早研究开始于美国,可追溯到 1821 年。当时钻探的第一口天然气生产井就是页岩气井,在井深达到 121 m 处,从 8 m 厚的页岩裂缝中就产出了天然气,这时纽约州弗里多尼亚乡村地区已将页岩气用于家庭照明。

一直以来页岩都被认为是一种盖层,因此钻井人员在钻井过程中都是直接穿越页岩层段去开采其他储层。在过去的 100 多年里,所钻的数百万口油气井在达到其目标深度之前,都钻透了大量的页岩层段。直到 20 世纪 20 年代,美国才开始页岩气的现代化工业生产,到 70 年代中期开始步入规模化发展阶段。据美国地质调查局报道,2006 年美国页岩气产量占年天然气总产量的 6%,2007 年占 8%,2010 年这一比例达到 13%。

目前,美国和加拿大等国已实现了页岩气的商业性开发,但是其他国家页岩气的发展并不乐观,主要原因不是缺少页岩气盆地,而是在于页岩气产量低、开发技术难度大等。页岩气采收率比常规天然气低,常规天然气采收率在 60%以上,而页岩气仅为 5%~60%(采收率是指在现代技术和经济条件下可能采到的油气数量与油气藏中原始储量的比值),再加上生产周期和回收成本时间长,导致很多国家的页岩气资源开发缺乏充足的投资。

摘自《国家电力信息网》

SVC 电压稳定控制和抑制低频振荡交互影响研究

王云洁¹, 胡 骏²

(1.东南大学电气工程学院,江苏 南京,210096;2.盐城供电公司,江苏 盐城,224005)

摘 要:静止无功补偿器(SVC)可以提供电压支持,提高系统电压稳定性,其附加阻尼控制又可以改善系统的阻尼状态,抑制低频振荡,这2种功能之间可能存在一定的相互作用。理论分析了单机无穷大系统中 SVC 的电压控制与阻尼控制的相互作用,研究表明 SVC 的阻尼控制与电压控制存在矛盾,增强系统阻尼振荡的能力将会牺牲电压品质。在二区域四机系统中进行仿真,验证了 SVC 加入附加控制器后有效提高系统阻尼比,但电压稳定性变差,此结果与理论分析相一致。

关键词:SVC;电压稳定性;低频振荡;交互影响

中图分类号:TM761

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0023-03

随着我国西电东送、南北互联和全国联网的战略实施,为提高输电的能力和系统稳定性,我国输电系统引进了静止无功补偿器(SVC),分别装设在广东江门、湖南云田、湖北凤凰山(2套)、河南小刘以及辽宁沙岭的500 kV变电站和鞍山红一变中,这些示范工程投运对电网运行产生明显的效果,对系统的稳定运行产生积极作用^[1]。传统的电力电子控制装置在电力系统中的控制目标通常只有一个,如潮流控制、电压控制或增强系统稳定性等。而在 SVC 电压环加入附加信号可以同时提供电压支持和阻尼控制,其特点是电压和阻尼控制的双重功能。近几年来,多柔性交流输电系统(FACTS)间的交互影响问题正在研究中。文献[2]指出了 PSS 与 SVC 的交互影响并对其进行了多目标协调设计,但是对于单 FACTS 器件的不同控制目标间的交互影响很少有深入研究;文献[3]分析了静止同步补偿器多目标协调控制。文中从理论上分析了 SVC 2种功能间的交互影响,建立了装有 SVC 的二区域四机系统的模型,通过仿真验证了以上分析研究的有效性。

1 SVC 控制作用

1.1 SVC 的电压控制作用

SVC 的电压控制可用1个简化的 SVC 和电力系统的框图来表示(见图1)。

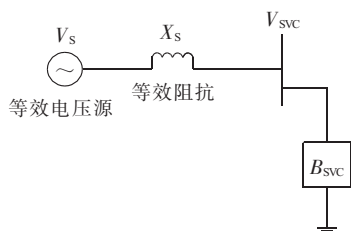


图1 简化电力系统框图

其中系统等效阻抗对应于 SVC 母线端的短路容量,关系式为:

$$X_s = \frac{V_b^2}{S_c} S_B (pu) \quad (1)$$

式中: X_s 为系统等效阻抗; S_c 为 SVC 母线三相短路容量; V_b 为线电压基准值; S_B 为系统基准容量。如果 SVC 吸入无功电流 I_{SVC} ,无 SVC 电压调节时,SVC 母线的电压为:

$$V_s = V_{SVC} + I_{SVC} X_s \quad (2)$$

可见 SVC 电流导致了与系统电压同相位的电压降。SVC 母线电压随着 SVC 感性电流的增加而减小,随着容性电流的增加而增加。式(2)反映了系统特性和系统负荷线的关系,意味着在一个弱的交流系统中(高值)SVC 电压控制作用比在一个强的交流系统中(低值)更为有效^[3]。

1.2 SVC 附加阻尼控制抑制低频振荡作用

SVC 具有电压控制功能,在纯粹进行电压控制时基本没有提高系统阻尼的作用,应增加附加控制器来实现阻尼控制^[4]。附加阻尼控制器可用相角补偿原理,降低区域间振荡能量从而实现阻尼控制,设计的具体步骤为:(1)对系统进行小干扰分析,分析系统低频振荡特征根,进而分析系统的振荡模式;(2)在相应的振荡频率下,计算滞后角 α ;(3)计算附加控制器的超前滞后角 φ ,确定超前滞后控制参数。

SVC 及其附加阻尼控制作用原理^[5]。单机无穷大系统如图2所示,SVC 将中点电压调节到 V_m 。假设送端的电压保持恒定,即 $\Delta V_1=0$,则发电机的经典二阶模型为:

$$T_j \Delta \delta_s^2 + D \Delta \delta_s + \omega_0 \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta + \omega_0 \frac{\partial P_e}{\partial V_m} \Delta V_m = 0 \quad (3)$$

式中: T_j 为发电机惯性时间常数; D 为系统的自然阻尼功率系数; δ 为发电机功角; ω_0 为发电机同步速; P_e 为发

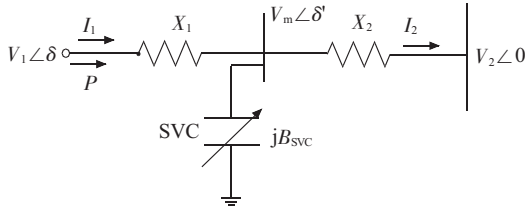


图2 装有 SVC 的单机无穷大系统

电机电磁功率。式(3)描述了系统的小信号动态行为。如果 SVC 严格按照保持中点电压 V_m 恒定的控制方式运行,则 $\Delta V_m = 0$, 发电机的经典二阶模型为:

$$T_j \Delta \delta s^2 + D \Delta \delta s + \omega_0 \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (4)$$

D 一般情况下可以忽略,故式(4)对应特征根方程式的根实部为 0,导致转子角作不衰减振荡。由式(4)可以看出,按恒定电压控制方式运行时不能提供任何系统阻尼^[6]。然而,如果允许对中点电压进行调制,即可以对系统阻尼做出贡献。若中点电压 $\Delta V_m = K \frac{d\delta}{dt}$, K 为常数,则:

$$T_j \Delta \delta s^2 + (D + \omega_0 K \frac{\partial P_e}{\partial \delta}) \Delta \delta s + \omega_0 \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (5)$$

引入附加控制器对电压进行适当调制后, SVC 将系统转化为一个具有正阻尼的系统。从式(5)可以看到,新特征根实部为负,转子角的任何振荡都会随时间而衰减。这种控制特性被称为附加阻尼控制。

2 SVC 电压控制与阻尼作用间的交互影响分析

SVC 附加阻尼控制后能有效抑制低频振荡^[7,8]。图2所示的单机无穷大系统中, SVC 的作用相当于在中间母线处并联了一个可变电纳,改变了整条线路的等效阻抗。

未安装 SVC 时,发电机输出的有功功率为:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_1 + X_2} \sin \delta \quad (6)$$

装设 SVC 后,发电机输出有功功率为(利用 Y-Δ 变换):

$$P = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_1 + X_2 - B_{SVC} X_1 X_2} \quad (7)$$

调节 SVC 的输出,使 SVC 的并联电纳变化 ΔB_{SVC} , 则有有功功率的增量 ΔP 为:

$$\Delta P = \frac{-X_1 X_2 V_{1,0} V_{2,0} \sin \delta_0}{X_1 + X_2 - B_{SVC,0} X_1 X_2} \Delta B_{SVC} = K_p \Delta B_{SVC} \quad (8)$$

式中: $V_{1,0}, V_{2,0}, B_{SVC,0}$ 分别为 V_1, V_2, B_{SVC} 的初始值。SVC 安装处的母线电压为:

$$\dot{V}_m = \dot{V}_2 + jX_2 (\dot{I}_1 - jB_{SVC} \dot{V}_m) \quad (9)$$

解得:

$$\dot{V}_m = (V_{2,0} + \frac{X_2}{X_1} \dot{V}_1) / (1 + \frac{X_2}{X_1} - B_{SVC} X_2) \quad (10)$$

调节 SVC 的输出,使之变化 ΔB_{SVC} , 则 SVC 母线电压的增量 ΔV_m 为:

$$\Delta V_m = [X_2 (\dot{V}_2 + \frac{X_2}{X_1} V_{1,0}) / (1 + \frac{X_2}{X_1} - B_{SVC,0} X_2)^2] \Delta B_{SVC} = K_v \Delta B_{SVC} \quad (11)$$

由式(8)可得, SVC 附加控制产生的发电机电磁转矩为:

$$\Delta T_e \approx \Delta P = K_p \Delta B_{SVC} \quad (12)$$

由文献[9]可知, ΔT_e 由 2 个分量组成:

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (13)$$

式中: T_s 为系统的同步转矩系数; T_D 为阻尼转矩系数。将其代入式(5)并简要写出其特征根方程:

$$T_j \Delta \delta s^2 + D \Delta \delta s \approx -T_s \Delta \delta - T_D \Delta \delta s \quad (14)$$

所以 T_s 主要影响振荡频率, 而 T_D 主要影响系统机电振荡的稳定性。为保证阻尼控制的效果,要产生大的阻尼转矩, ΔB_{SVC} 需增加较大。而 ΔB_{SVC} 的增加会使 ΔV_m 变大,从而母线电压发生较大的振荡,影响电压控制效果。因此, SVC 的阻尼控制与电压控制存在矛盾,增强系统阻尼振荡的能力会降低电压的控制水平。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

文中采用 2 区域 4 机系统进行仿真, (如图3所示), SVC 装置安装于节点 8。

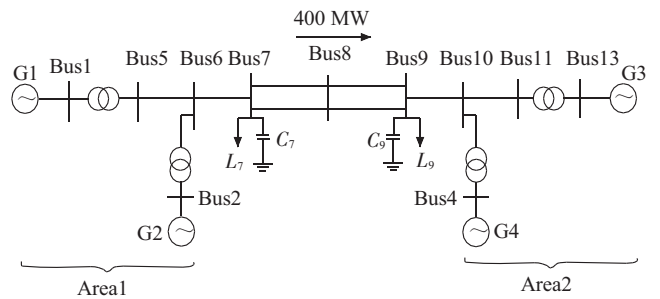


图3 2区域4机系统接线

3.2 SVC 电压控制仿真

在仿真系统中加入 SVC, 验证其对电压稳定控制的作用。仿真方案: 节点 8 处 1.0 s 发生瞬时三相短路故障, 1.1 s 故障解除。仿真时间为 30 s, 安装 SVC 前后节点 8 电压幅值曲线如图4所示。

从图4的电压曲线可以看出, 未安装 SVC 的情况下, 故障消失后系统电压的波动比较大; 而加装 SVC 后, 系统电压波动有所减弱, 并能较快达到稳定。

3.3 SVC 附加阻尼控制抑制低频振荡仿真

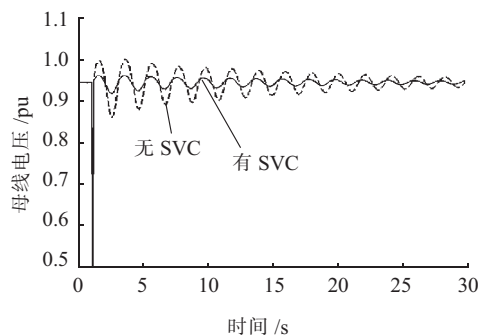


图4 瞬时故障母线8电压曲线对比

对系统进行小干扰稳定分析,发电机1、2和3、4区域间低频振荡模式特征根为 $-0.053\ 194+j3.401\ 198$,其阻尼比小于2%,需要利用SVC的附加阻尼控制器进行抑制该低频振荡模式。在附加控制信号输入处输入一个区域振荡频率的正弦量,其频率与低频振荡模式相同, ω 为3.4016。分析由此信号引起的联络线上功率的振荡,通过对比得到滞后角 α 约为 88° 。由于两级滞后,附加控制器的超前滞后角 $\varphi=(180-\alpha)/2=46^\circ$ 。由此可得: t_1 为0.12s, t_2 为0.73s。

在系统中仿真验证SVC及其附加控制的阻尼效果。仿真方案:利用电力系统分析综合程序(PSASP)的小扰动分析功能,对不同控制情况下的系统进行小扰动稳定分析,得到低频振荡特征根的变化如表1所示。

表1 不同控制情况下的振荡阻尼比

控制方法	特征根	频率/Hz	阻尼比/%
无 SVC	$-0.053\ 2+j3.401\ 2$	0.541 317 5	1.563 8
SVC	$-0.060\ 6+j6.596\ 7$	0.570 191 7	1.691 1
SVC(含附加阻尼)	$-0.181\ 1+j3.188\ 3$	0.507 438 0	5.670 8

由表1可知,无附加阻尼控制的SVC对系统低频振荡的阻尼比基本没有影响;加装附加阻尼控制之后,阻尼比有明显提高,从1.56%左右提高到了5.67%。可见SVC加装附加阻尼控制器能更好地增加系统阻尼比,抑制低频振荡。

3.4 SVC附加阻尼控制对电压稳定的影响仿真

仿真方案:节点8在1.0s至1.1s间发生瞬时三相短路故障,仿真时间为30s,安装SVC前后节点8电压幅值曲线如图5所示。

对比可知,无SVC的情况下系统电压的波动比较大;在加装无附加控制的SVC后,系统电压波动有所减弱,特别在故障瞬间,电压有一个比较明显的上升过程;加装带有附加阻尼控制的SVC后,在故障消失开始一段时间,电压的波动比较大,甚至比未装SVC情况下的电压波动更大,这从前面的理论分析中也可看到,未装SVC时,三相短路发生后,电压瞬间降低到接

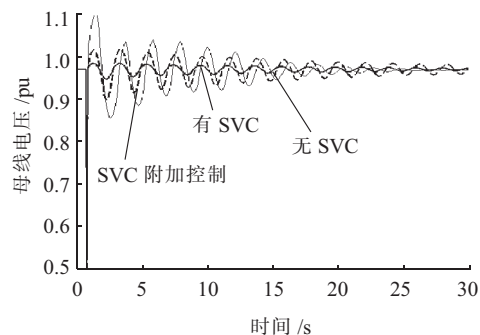


图5 节点8电压曲线对比

近0,当故障切除后,电压振荡回复到稳态。而加了附加阻尼控制后,其作用使电压波动变得更大。

从以上的现象看,SVC的电压控制与阻尼控制之间存在负的相互作用。

4 结束语

研究了SVC电压控制与抑制低频振荡功能之间可能存在的交互影响问题。在研究SVC的电压控制功能及SVC附加阻尼控制对电力系统低频振荡的抑制的基础上,明确了SVC按恒定电压控制方式运行时不能提供系统阻尼,只有附加阻尼控制才能向系统提供正阻尼。而附加阻尼控制提高系统阻尼的同时,理论上对电压控制的稳定性又有不利影响,从而得出SVC的两种控制功能间存在负的交互作用的结论。并在PSASP中进行了时域仿真,证明了SVC电压控制与阻尼控制间存在负的交互影响。

参考文献:

- [1] 邹振宇,江全元,张鹏翔,等. PSS与SVC多目标协调设计[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(4):66-70.
- [2] 刘宪林,王鑫.单机-SVC-无穷大系统机电模式阻尼特性分析[J].郑州大学学报(工学版),2007,8(3):89-90.
- [3] 栗春,姜齐荣,王仲鸿,等.静止同步补偿器多目标协调控制器的设计[J].电工技术学报,1999,14(2):21-29.
- [4] 严伟佳,蒋平.抑制区域间低频振荡的FACTS阻尼控制[J]. 高压技术,2007,33(1):189-192.
- [5] 张彦魁,张焰.静止无功补偿器建模及其在电压稳定研究中的应用[J].上海交通大学学报,2007,41(3):488-496.
- [6] 李林,康积涛,刘永江,等.电力系统小扰动电压稳定性的研究现状及展望[J].电气技术,2010(6):6-8.
- [7] ABIDO M A, ABDEL-MAGID Y L. Analysis of Power System Stability Enhancement via Excitation and Facts-Based Stabilizers[J].Electric Power Components and Systems, 2004,32(1):75-91.
- [8] LERCH E, POVH D, XU L. Advanced SVC Control for Damping Power System Oscillations[J].IEEE Transactions on Power Systems, 1991,6(2):524-535.
- [9] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2008.

智能变电站中合并单元设置与否的技术经济比较

鲁东海, 苏 麟, 姜 悦

(江苏省电力设计院, 江苏 南京 211102)

摘 要:智能变电站中合并单元设置与否应根据工程实际情况进行分析比较,以求整个设计方案更加合理、经济、资源利用最大化。针对智能变电站采用常规互感器的设计方案,对合并单元设置与不设置 2 种方式的优缺点进行了比较,并根据合并单元安装位置的不同,阐述了合并单元设置与否的影响因素。结合智能变电站工程建设实例,给出了 2 种方式下详细的技术、经济指标比较,提出了智能变电站合并单元是否设置的合理建议。

关键词:智能变电站;合并单元;技术指标;经济指标

中图分类号:TM63

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0026-04

目前,在国家电网公司(以下简称国网公司)主导的智能变电站试点站建设中,关于保护、测控、计量等装置的电压电流输入有电子式互感器+合并单元输入^[1]、常规互感器+合并单元输入^[2]及直接由常规互感器输入^[3]3 种模式。在试点站建设过程中,电子式互感器暴露出较多的问题^[4,5],变电站设计与运行人员越来越倾向于采用后 2 种方式。国网公司《智能变电站通用设计》中推荐采用常规互感器+合并单元的设计方案^[6],但在实际建设过程中,合并单元设置与否与一次配电装置形式、二次设备布置方式等因素密切相关。根据智能变电站实际工程建设经验,对采用常规互感器的智能变电站中合并单元设置与不设置的优缺点进行分析和比较,并提出了智能变电站合并单元是否设置的合理建议。

1 智能变电站合并单元设置与否的设计方案

当智能变电站采用常规互感器+合并单元(即设置合并单元)的设计方案时,根据国网公司《智能变电站继电保护技术规范》以及目前智能变电站的实现方式,合并单元至保护按点对点采样,至测控、计量、故障录波等按网络模式采样^[7]。智能变电站为户内站时,合并单元通常安装在配电装置智能控制柜内或断路器端子箱内;智能变电站为户外站时,合并单元可安装在配电装置智能控制柜内或断路器端子箱内,也可集中组屏安装在继电器小室内。智能变电站不设置合并单元时,保护、测控、计量、故障录波等装置模拟量输入与常规变电站相同。

2 合并单元设置与否的优缺点分析

2.1 设置合并单元的优缺点

合并单元就地安装时,有如下主要优点:

(1) 互感器与合并单元距离较近,不必用铠装电

缆连接,可采用电缆穿保护套管,减少控制电缆用量。

(2) 互感器二次容量可减小为 $10\text{ V}\cdot\text{A}$,减小了互感器体积,节省了互感器布置空间。

合并单元继电器小室安装时,有如下主要优点:

(1) 在同一控制室或继电器小室内,设备之间可采用带 ST 头的室内尾缆或尾纤连接,施工方便,避免了使用长距离的光缆,且减少了光缆熔接的施工量。

(2) 保护装置、合并单元均位于同一面屏或同一小室,保护装置的校验十分方便。

(3) 合并单元集中组屏安装在继电器小室内,运行环境优越,可配置液晶显示器显示较大的信息量,无需借助 PC 机及相应软件即可查看信息,合并单元的使用寿命较长。

无论合并单元就地安装还是继电器小室安装,还有一个优点,即线路保护与母线保护可共用一个电流互感器保护次级,减少了电流互感器次级数量。

当合并单元就地安装时,其缺点如下:

(1) 按目前智能变电站的实现方式,户外就地安装的合并单元需通过铠装光缆熔接至室内的所有接收装置(如保护、测控、交换机等)。由于接收端二次设备的物理位置较为分散,在室内熔接端光纤需考虑多个走向,光纤熔接及相关的布线工作较为繁琐,熔接工作量较大。

(2) 在目前的智能变电站中,从合并单元端输入数据校验保护装置较为合理,可校验从合并单元至保护、测控、计量、故障录波等所有合并单元后端装置通信回路的正确性。目前虽有数字化校验器,但均为基于接收端设计,绕过了合并单元,直接从保护接入,这种方式仅能验证保护,不能对整个采样值回路进行校验。如需从合并单元端输入数据,由于保护在主控室,合并单元在就地,保护试验至少需室内外两人配合进行。

(3) 合并单元就地安装,为延长合并单元的使用寿命,对于在冬季寒冷地区和夏季炎热地区控制柜的

材料及结构、温湿度调节性能、温湿度告警功能、机械性能、绝缘性能及防护等级等的技术要求较高。智能控制柜应能适应各种气候环境,其内部的温度、湿度应可调,其造价将升高。

当合并单元继电器小室安装,其缺点如下:

(1) 互感器与合并单元距离较远,二者需用铠装电缆接至小室内,使用的控制电缆较长。

(2) 合并单元与保护测控等二次设备集中组屏,安装在继电器小室内,若合并单元单独组屏,则使二次设备屏柜的数量增加,建筑面积增大;若合并单元与其他二次设备共同组屏,则由于生产厂家的不同而存在设备安装配合问题,增加协调工作量。

2.2 不设置合并单元的优缺点

不设置合并单元的优点如下:

(1) 保护、测控、录波、计量所需模拟量采用传统电缆接线回路,减少了模拟量传输中间环节,减少了设备安装、调试、维护工作。

(2) 减少了合并单元安装位置,节省了布置空间。

不设置合并单元的缺点如下:

(1) 采用传统电缆接线回路,每个装置都要使用较长的控制电缆与互感器连接,且电压电流回路所用控制电缆截面一般需采用 4 mm² 和 6 mm² 高规格的铠装电缆,增加了电缆用量及铜等有色金属用量。

(2) 由于电缆增加,相应电缆沟规格也需恢复到传统的 1 100 mm×1 000 mm 规格的电缆沟,电缆支架规格亦相应增加。

(3) 对于母线保护、故障录波等需接入多个间隔模拟量的装置来说,柜内电缆接线较采用合并单元时明显增加,且电缆集中,增加了施工难度。

(4) 取消合并单元后,模拟量的传输仍采用传统的铠装屏蔽控制电缆,若电缆屏蔽出现问题,则可能把高压场地的电磁干扰传导至二次设备,导致保护误动或二次设备故障。

(5) 目前,采用 GOOSE 网输入的产品尚不成熟,许多工程都要临时定制、研发,工程周期长,产品质量、性能不稳定,型号种类多,后期升级、改造、维护困难。

(6) 与设置合并单元相比较,增加了电流互感器保护次级数量,同时增加了互感器二次容量伏安数。

通过上述分析可以看出,当变电站为全户内 GIS 变电站时,配置合并单元较合理;当变电站为敞开式 AIS 变电站时,不配置合并单元较合理;当变电站为户外 GIS 或 HGIS 变电站时,需要根据工程实际情况进行比较确定是否配置合并单元。

3 工程实例综合比较

以某 500 kV 变电站中户外 220 kV GIS 建设方案

为例,对合并单元设置与不设置 2 种方式下的技术和经济指标进行比较。

该 500 kV 智能变电站户外 220 kV GIS 电气一次接线及规模如下:2 台主变,220 kV 出线 12 回、220 kV 采用双母双分段接线;远景规模 4 台主变,220 kV 出线 12 回,220 kV 系统采用常规互感器。

全站采用基于 DL/T 860(IEC 61850)标准的自动化系统。当设置合并单元时,每个间隔合并单元按双重化配置,保护装置采样采用点对点方式,测控、录波、计量装置采样采用网络方式。保护、测控、录波、计量及对时装置均集中布置于二次设备室,合并单元、智能终端下放布置于户外智能控制柜内。当不设置合并单元时,保护、测控、录波、计量装置采样直接由互感器输入,二次设备布置方式同设置合并单元。技术指标比较如表 1 所示,经济指标比较如表 2~4 所示。

表 1 合并单元设置与不设置方式的技术指标比较

技术指标	设置合并单元	不设置合并单元
维护工作量	较大	无需维护
小室内二次屏位数量及建筑面积	合并单元户外布置,小室内二次屏位数量及建筑面积均不需增加	间隔较多,母线保护、故障录波等柜数量略有增加,建筑面积有所增加
厂家协调配合工作量	合并单元由二次厂家提供,智能控制柜由 GIS 厂家提供,配合协调量大	较小
户外智能控制柜大小及防护等级	控制柜大,防护等级高	控制柜较小,防护等级一般
至户外智能控制柜光缆、电缆消耗量	光缆较多,电缆较少	电缆较多,光缆较少
至二次设备采样接线	长距离的铠装光缆,采用光纤熔接方式	长距离的铠装电缆,采用传统端子排接线方式
二次电缆沟	可采用 800 mm×600 mm 小沟	需采用传统 1 100 mm×1 000 mm 沟

在经济指标中,主要设备及材料件价格参考了电力规划设计总院限额设计控制指标及某二次设备生产厂的报价^[8]。另外,为解决合并单元至户内接收端二次设备物理位置较分散,合并单元至户内光纤需考虑多个走向,光纤熔接、布线工作较为繁琐的问题,该工程采用从合并单元敷设 1 根 12 芯光缆至户内过程层交换机柜,小室内保护(含线路保护和母线保护)、测控、计量、故障录波所需数据由户内过程层交换机柜光配单元转接,同时合并单元的对时亦从户内过程层交换机柜转接再通过该光缆下方的方案,该方案优点有二:一是户内转接可采用带 ST 头的室内尾缆或尾纤连接,施工方便,减少了熔接工作量;二是户内至户外只需敷设 2 根 12 芯光缆(A、B 网各 1 根),接线清晰,施工维护方便。表 2 中至户外智能控制柜光缆的数量比较即是基于上述方案做出的。

表 2 1 个典型 220 kV 间隔的经济指标比较 万元

经济指标	设置合并单元			不设置合并单元		
	技术参数及单价	数量	价格	技术参数及单价	数量	价格
线路保护装置	采用 SV 点对点,跳闸采用 GOOSE 点对点,其余采用组网,12 万元 / 台	2 台	24	采用模拟量输入,跳闸采用 GOOSE 点对点,其余采用组网,12 万元 / 台	2 台	24
线路测控装置	采用 SV 网络 /GOOSE, 6 万元 / 台	1 台	6	采用模拟量输入,开关量采用 GOOSE 网,6 万元 / 台	1 台	6
合并单元	3 万元 / 台	2 台	6		0	0
至户外智能控制柜光缆	12 芯非金属加强型多模阻燃光缆,平均每根约 110 m	2 根	0.54	芯非金属加强型多模阻燃光缆,平均每根约 110 m	2 根	0.49
光缆熔接点		36 个	6.6		20 个	3.6
至户外智能控制柜电缆		0	0	铠装屏蔽控制电缆,平均每根约 110 m	12 根	4.65
智能控制柜	控制柜大,防护等级高,需采取温湿度控制措施,3 万元 / 面	2 面	6	控制柜较小,防护等级高,需采取温湿度控制措施,2 万元 / 面	2 面	4
二次电缆沟	可采用 800 mm × 600 mm 小沟	150 m	4.8	采用传统 1 100 mm × 1 000 mm 沟	150 m	10.8
电缆沟支架	沟架-3-250(双)	200 套	2.2	沟架-6-300(双)	200 套	5.1
电流互感器	5P/5P/0.2S/0.2S, 10/10/10/10V·A	3 台	10.5	5P/5P/5P/5P/0.2S/0.2S, 15/15/15/15/10/10V·A	3 台	11.4
合计			57.64			70.04

表 3 母线保护与故障录波及母线 PT 的经济指标比较 万元

经济指标	设置合并单元			不设置合并单元		
	技术参数及单价	数量	价格	技术参数及单价	数量	价格
母线保护柜	采用 SV 点对点,跳闸采用 GOOSE 点对点,其余采用组网, 12.5 万元 / 面	4 面	50	采用模拟量输入,跳闸采用 GOOSE 点对点,其余采用组网, 12.5 万元 / 面	4 面	50
故障录波器柜	采用 SV 网络 /GOOSE, 12.5 万元 / 面	2 面	25	采用值采用模拟量输入,开关量采用 GOOSE 网,10 万元 / 面	4 面	40
母线电压互感器	0.2/0.5(3P)/0.5(3P)/6P, 10/10/10/10VA	3 台	9.6	0.2/0.5(3P)/0.5(3P)/6P, 75/50/50/100VA	3 台	10.5
合计			84.6			100.5

表 4 总经济指标比较 万元

经济指标	配置合并单元	不设置合并单元	差价
18 个 220 kV 间隔合计	1037.52	1260.72	223.2
母线保护、故障录波、母线 PT 合计	84.6	100.5	15.9
总计	1122.12	1361.22	239.1

由表 1 可以看出,以该变电站 220 kV 一、二次设备的布置方式,不设置合并单元在技术指标上有较多优势,其劣势主要是使用电缆较多,母线保护、故障录波屏内接线较多,及电缆沟规格相应变大。由表(2—4)

可以看出,设置合并单元在经济指标上较有优势,虽然在合并单元装置、光缆熔接施工上增加了费用,但在电缆、电缆沟及支架、母线保护、故障录波等方面节约了费用和工程量。综合以上因素该工程不设置合并单元,虽然在投资上有所增加,但技术上更加可靠合理,因此建议该工程采用不设置合并单元的方式。

4 结束语

智能变电站中合并单元设置与不设置 2 种方式各有优缺点,影响合并单元设置与否的主要因素有:一次配电装置形式,如敞开式还是 GIS,户内布置还是户外布置等;二次设备布置方式,如保护、测控等装置就地

布置还是集中布置;合并单元就地布置还是继电器小室布置;安装、调试、维护的合理性及方便性;经济性,如投资费用、节约占地、减少耗材及环保节能等。

结合工程实际情况,经过技术经济比较提出了符合该站的方案,为今后类似工程提供了很好的借鉴。

参考文献:

- [1] 兰金波,钱国明,季玮,等.无锡 220 kV 西泾智能变电站关键技术[J].江苏电机工程,2012,31(2):26-29.
- [2] 刘琳,王向平,沈斌.常规变电站智能化改造的技术探讨[J].华东电力,2011,39(8):1288-1290.
- [3] 范金华,卢波.500 kV 海宁变电站数字化方案研究与工程应用[J].华东电力,2009,37(6):907-909.
- [4] 葛遗莉,葛慧,鲁大勇.数字化变电站设计、运行中面临的问题[J].电力自动化设备,2010,30(12):113-116.
- [5] 黄建华,王佳.光学电流互感器的关键技术[J].电力自动化设

备,2009,29(12):94-97.

- [6] 刘震亚主编.国家电网公司输变电工程通用设计 110(66)~750 kV 智能变电站部分(2011 年版) [M].北京:中国电力出版社,2011.
- [7] Q/GDW 441—2010,智能变电站继电保护技术规范[S].
- [8] 电力规划设计总院.电网工程限额设计控制指标(2009 年水平) [M].北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

鲁东海(1981),男,湖北襄阳人,工程师,从事智能变电站设计工作;

苏麟(1980),男,四川泸州人,高级工程师,从事智能变电站设计工作;

娄悦(1983),女,江苏南京人,工程师,从事智能变电站设计工作。

Technical and Economic Comparison of With or Without Merging Unit in Smart Substations

LU Dong-hai, SU Lin, LOU Yue

(Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: It is necessary for analyzing and comparing the configuration scheme of with or without merging unit in smart substations based on practical engineering situation. Good energy efficiency and low engineering cost can be achieved because of a good configuration scheme. Due to the smart situation which applied conventional mutual inductors to sample, the advantage and shortage of the two schemes for merging unit are compared. According to the different locations of merging unit in smart substation, the influencing factors of with or without merging unit are illuminated. Finally, the detailed technical and economic index comparison of the two schemes are given based on a construction project of smart substation, and the reasonable suggestions on the choices of with or without merging unit are put forward.

Key words: smart substation; merging unit; with or without; technical index; economic index

(上接第 25 页)

作者简介:

王云洁(1988),女,江苏金坛人,硕士研究生,研究方向为电力系统

稳定分析;

胡弢(1986),男,江苏盐城人,硕士,从事电力系统运行控制工作。

Interaction Study of SVC Voltage Stability Control and Inhibiting of Low-frequency Oscillation

WANG Yun-jie¹, HU Tao²

(1.College of Electric Engineering of Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Yancheng Power Supply Company, Yancheng 224005, China)

Abstract: Static Var Compensator (SVC) can provide voltage support and improve voltage stability of power system. The additional damping control of SVC can improve the system's damping state to inhibit low-frequency oscillation. But there may be certain interaction between the two functions. The interaction between SVC voltage stability control and inhibiting of low-frequency oscillation in the one machine - infinity bus system is studied theoretically in this paper. Research shows that contradiction exist between SVC damping control and voltage control, enhance the system damping oscillation ability will sacrifice voltage quality. At last, a simulation using two-area four-machine system as an example, which verifies the SVC can effectively improve the voltage stability, adding additional controllers to effectively improve the system damping ratio, but the voltage stability becomes worse. The results and the theoretical analysis are consistent.

Key words: SVC; voltage stability; low-frequency oscillation; interaction

2.2 系统电源电路的设计

电源模块主要完成控制系统各单元的供电, 其性能好坏直接影响系统的可靠运行。根据系统的要求, 采用电源输入工频变压器后级加六路隔离变压器驱动晶闸管的整体方案。电源变压器提供 20 W 的输出能力作为控制系统总的供电, 后级输出 +5 V, +12 V, +24 V 作为各个单元电路供电。系统电源分配如图 3 所示。晶闸管驱动板输入输出部分与系统电气隔离, 保证系统的安全性。

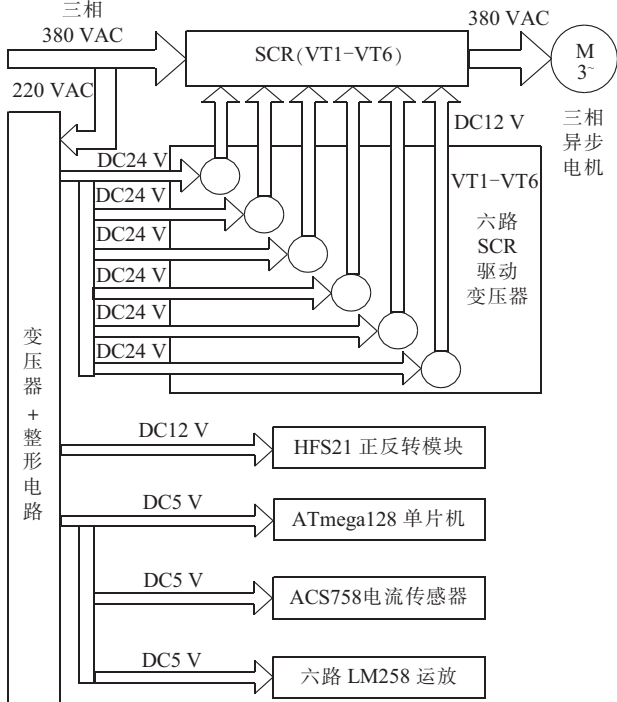


图 3 系统电源分配

2.3 系统控制电路的设计

软启动器控制电路以高性能、低功耗 8 位微处理器 ATmega128 单片机为控制核心, 包括电流检测电路, 电压过零检测电路, 脉冲触发电路以及正反转控制电路。软启动控制电路结构如图 4 所示。

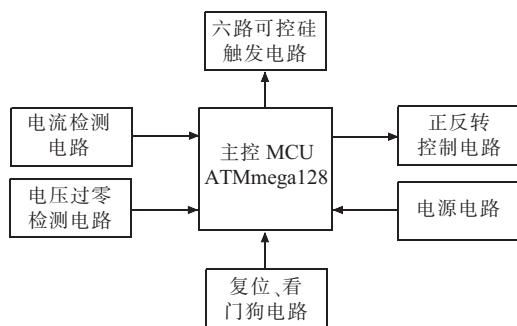


图 4 系统控制电路结构

2.4 电压过零检测电路

过零检测电路的作用是把高压过零信号采集后送给单片机, 作为单片机定时器的标准。该设计采用光耦与大功率电阻采集高压信号, 电阻降压, 光耦过零触

发。光耦后级接上拉电阻, 相电压过零后光耦导通, 电平信号有高低会产生变化。单片机通过采集到的电平变化信号来确定相电压过零导通的时间, 并且可以通过过零导通的时序对三相电进行相序检测。电压过零检测电路如图 5 所示。

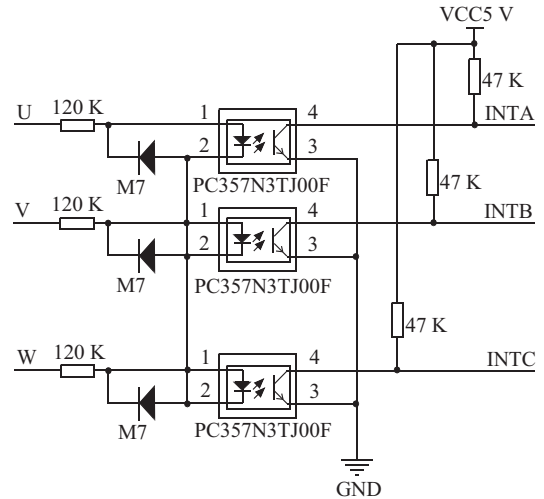


图 5 过零检测电路

2.5 晶闸管驱动电路

利用 ATmega128 单片机发出的六路 PWM 脉冲控制 A、B、C 三相 6 个晶闸管的触发。由于单片机输出触发信号不足以触发晶闸管, 故需将 PWM 脉冲触发信号通过晶闸管触发变压器将触发功率放大。由于主电路中没有中线, 为了保证可控硅的导通以及触发时序的正确, 在同一时刻必需有 2 个晶闸管导通。考虑到可靠性的要求, 该设计采用大于 60° 的宽 PWM 脉冲列触发信号。

脉冲驱动电路如图 6 所示, 单片机发出一串宽 PWM 脉冲, 经过三极管进行功率放大, 然后将放大信号通过晶闸管触发变压器使晶闸管控制极和阴极之间加正向电压, 从而触发晶闸管导通。

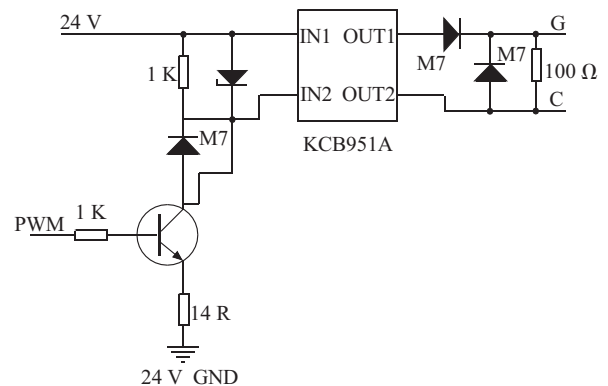


图 6 晶闸管触发电路

3 系统软件设计

软启动器的软件主要包括系统主程序和中断脉冲触发程序, 并采用模块化设计。

3.1 系统主程序设计

系统主程序主要包括系统上电初始化、缺相检测、电机正反转控制、软启动与软停车模式选择、软启动控制方式的选择,以及按预定方式实现电机软启动。主程序流程如图 7 所示。

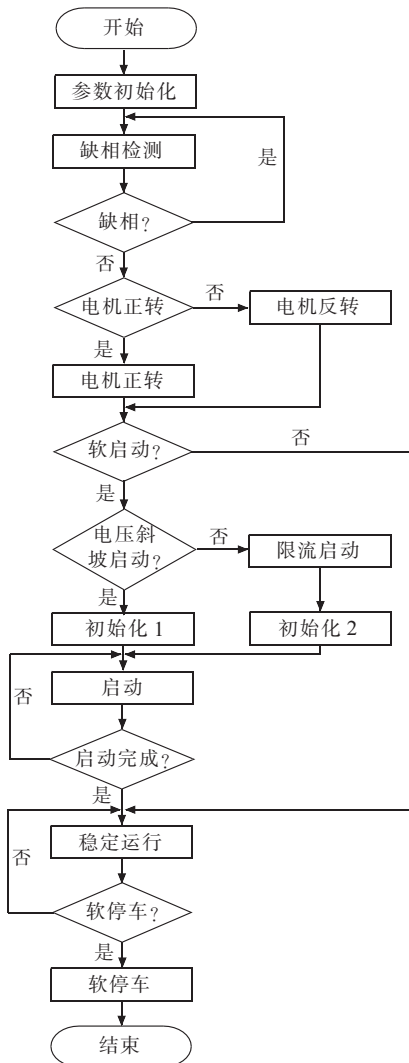


图 7 主程序流程

3.2 中断脉冲触发程序

由于晶闸管触发变压器本身伏秒特性的限制,不能给出宽脉冲触发信号,故该设计采用宽 PWM 触发脉冲,即给需要导通的晶闸管 1 个大于 60° 的 PWM 脉冲列,这样可至少保证两相之间构成通路,并且该触发方式比双脉冲触发方式有更高的可靠性^[5]。设计中 PWM 脉冲频率为 5 kHz,占空比 25%。

ATmega128 单片机通过 3 个外部中断 INT2, INT6, INT7 分别检测到电压过零检测电路送来的相电压过零中断信号,并按照触发角的变化延时相应的角度,给出触发信号,然后延时大约 3.5 ms 停止触发脉冲的发送。利用单片机的 2 个 16 位定时器/计数器 T/C1 和 T/C3 的定时功能,将 T/C1 和 T/C3 的工作模式设置为快速 PWM 模式,利用定时器比较匹配中断

和溢出中断实现脉冲列的定时。同时利用定时器/计数器 T/C0 实现触发角和脉冲列宽度的定时^[6]。其中 A 相中断脉冲触发程序流程如图 8 所示。

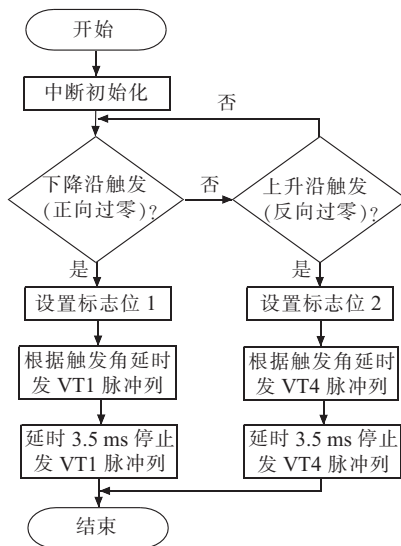


图 8 A 相脉冲触发程序流程

4 实验结果及分析

根据上述软硬件设计方案,设计并制作了 1 台电动执行机构软启动器样机并进行实验。三相异步电机额定功率为 1.5 kW,额定转速为 1 440 r/min。图 9 为晶闸管 VT1 与 VT6 触发脉冲列的关系,脉冲列宽度为 3.5 ms 且 VT6 脉冲列比 VT1 脉冲列超前 60° 。由于 A 相正半周期和 C 相负半周期相位差 60° ,按照触发顺序,在 A 相导通的同时,需同时将 C 相导通,这样就保证两相之间构成了通路,说明了触发脉冲相序的正确性。

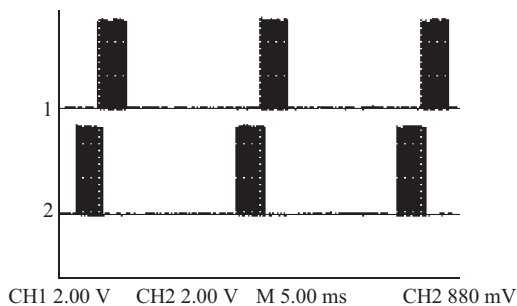
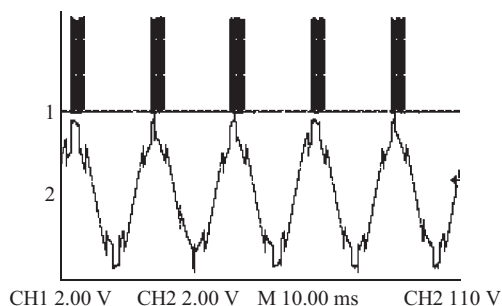
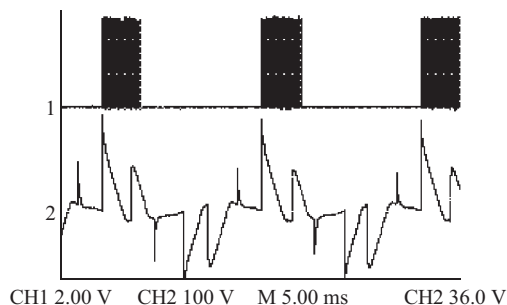
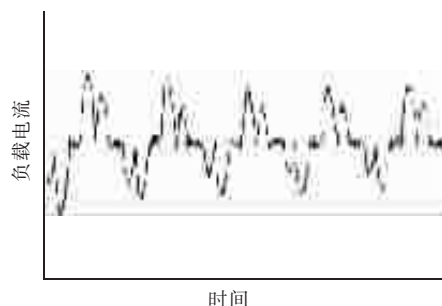


图 9 晶闸管 VT1 与 VT6 触发脉冲关系

图 10 为当触发角为 90° 时,输出线电压 U_{ab} 与晶闸管 VT1 触发信号之间的关系。图 11 为当触发角为 90° 时,负载相电压 U_a 与晶闸管 VT1 触发信号之间的关系。图 12 为 A 相负载电流的变化情况。从相电压 U_a 及相电流 I_a 的波形可以看出加在电机定子两端的电压电流发生了变化,说明软启动器起到了调压调速的效果,同时表明单片机输出的脉冲列通过隔离、放大之后可以成为可靠触发晶闸管的触发脉冲信号。

图 10 $\alpha=90^\circ$ 线电压 U_{ab} 与 VT1 脉冲列的关系图 11 $\alpha=90^\circ$ 相电压 U_a 与 VT1 脉冲列的关系图 12 $\alpha=90^\circ$ A 相负载电流变化

5 结束语

提出了一种采用六路晶闸管控制有多种启动控制方式的电动执行机构软启动器,并介绍了其硬件组成和软件设计。文中所做的工作验证了其硬件电路设计的可靠性和中断触发程序的正确性,为下一步电动执行机构软启动器多种控制方式的研究做准备。

参考文献:

- [1] 季 锋.国产电动执行机构发展与现状[J].世界仪表与自动化, 2009(3):24-25.
- [2] GHODHBANI L, REBHI B, KOURDA F, et al. Comparison Among Electronic Start up Methods for Induction motors [A]. Systems Signals and Devices(SSD), 2010 7th International Multi-Conference on, Amman, 2010.
- [3] 刘 利,王 栋.电动机软启动器实用技术[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 王艳杰,曾 毅,吕 凤.基于 ATmega128 的智能软启动器的设计[J].自动化技术与应用,2010,19(2):72-75.
- [5] 黄美成,卢 洁,彭永进.晶闸管交流调压电路的触发方案研究[J].电子电力技术,2004,38(2):54-55.
- [6] 金钟夫,杜 刚,王 群. AVR ATmega128 单片机 C 程序设计与实践[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.

作者简介:

沈德明(1969),男,副教授,高级工程师,主要从事自动控制等方面研究;

袁 栋(1987),男,硕士研究生,主要从事电动执行机构等方面研究。

Design of Soft-Starter in Electric Actuator

SHEN De-ming¹, YUAN Dong²

(1. Nanjing SCIYON automation group Co. Ltd, Nanjing 211100, China;

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: In order to reduce the impacts of electric actuator on the mechanical device when starting and control the start of the high torque electric actuator, a soft starter device for three-phase AC asynchronous motor based on AVR ATmega128 as control core and thyristors as voltage adjustable element is proposed in this paper, then the hardware composing and software designing of the device are analyzed. The results that the soft start designing is correct and soft starter device could achieve the effect of control motor stator voltage are shown by the experiments.

Key words: electric actuator; microcontroller; soft starter; thyristor

两手空空的教训

老虎正在觅食,发现不远处有一只兔子正在睡觉,它正准备美餐一顿时,忽然看见一只鹿在前面行走,于是决定先去追赶鹿,一会儿再来处置兔子。老虎迅速向鹿冲去,但是鹿凭借自己极快的奔跑速度逃走了,老虎没能追到鹿,于是转头对付兔子,可兔子早在听到附近的动静后逃走了,老虎最后落得两手空空。

在一定的期限内,同时有两个目标,等于没有目标。两鸟在林,不如一鸟在手。企业在制定目标时,要分清主次,明确重点。管理者千万不要眺望远方模糊的东西,而忽略了眼前切实的目标,否则将一事无成。

发电机注入式定子接地保护方案改造及现场应用

梁少华, 申建彬, 张 杰, 李华忠, 陈佳胜, 张琦雪

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要:四川 YL 水电站 2 台 120 MW 发电机, 中性点直接经过电阻接地。国产常规的注入式定子接地保护方案中, 注入电源输出端不允许承受很高的电压, 因而无法直接将电源输出端加在高压电阻两端。阐述了该情况下注入式定子接地保护方案, 保留了中性点接地的高压电阻, 节省了改造费用。现场模拟定子接地故障实验结果表明, 保护装置能准确测量一定阻值范围内的接地过渡电阻, 相对误差可控制在 $\pm 5\%$ 内。

关键词:发电机; 注入式; 定子接地保护

中图分类号: TM31

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)01-0034-03

中性点经配电变压器电阻接地 (又称高阻接地) 的发电机倾向于安装注入式定子接地保护, 该保护与发电机的运行工况无关, 在发电机起停机过程中也可以监视定子绕组对地绝缘。目前, 该技术已成熟, 在国内许多大型发电机组上得到应用^[1-5]。四川 YL 水电站 2 台 120 MW 的发电机, 其中性点直接经高压大电阻接地, 没有使用接地变压器, 其注入式定子接地保护, 过去使用 ABB 公司的保护装置 REG216、注入电源装置 REX010 和隔离变压器 REX011 共同实现。现在保护国产化改造, 国产常规的注入式定子接地保护方案中, 注入电源输出端不允许承受很高的电压, 因而无法直接将电源输出端加在高压电阻两端, 注入式定子接地保护方案需重新设计。文中阐述了发电机中性点直接经高压大电阻接地的情况下注入式定子接地保护的设计方案, 同时给出现场调试实验结果。

1 原 ABB 的注入式定子接地保护方案

发电机组的基本参数如下: 额定功率 120 MW; 额定电压 13.8 kV; 额定功率因数 0.9。发电机中性点接地方式及原 ABB 注入式定子接地保护方案^[6]如图 1 所示。

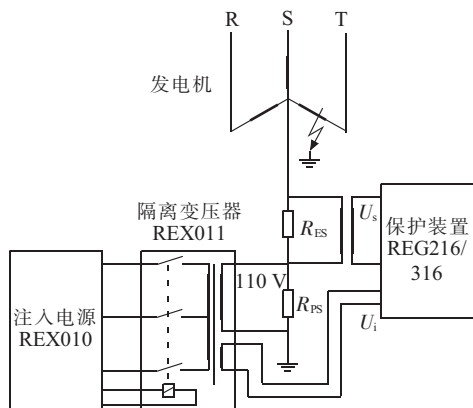


图 1 原 ABB 注入式定子接地保护方案

发电机直接经过高压大电阻接地, 接地电阻参数: R_{ES} 为 $1\,328\,\Omega$, R_{PS} 为 $2\,66\,\Omega$ 。注入电源 REX010, 输出幅值为 $\pm 110\text{ V}$ 的方波电压, 经过中间隔离变压器 REX011, 电压变比为 $110\text{ V}/110\text{ V}$, 将 12.5 Hz 的低频电压加在电阻 R_{PS} 上。保护装置 REG216 测量注入的电压信号 U_i 和注入的电流信号, 通过计算, 得到接地故障的过渡电阻。当接地故障过渡电阻阻值降低至报警定值以下, 经短延时, 保护报警; 当过渡电阻阻值进一步降低, 低于跳闸定值, 经短延时, 保护跳闸。当发生较为严重的接地故障, 发电机中性点会有较高的基波零序电压, 为防止过高的电压反馈至注入电源, 导致电源损坏, 保护装置检测到较大的基波零序电压时, 立刻通过辅助接触器将注入电源断开。

2 注入式定子接地保护改造方案

国产常规的注入式定子接地保护方案注入 20 Hz 低频电压, 如图 2 所示。发电机中性点经配电变压器电阻接地, 低频注入电源输出端加在接地变压器低压侧负载电阻 R_n 上。在一次设备的参数设计上, 通常 R_n 阻值在 $0.2\sim 1.5\,\Omega$ 间; 接地变压器电压变比 U_1/U_2 , U_1 通常等于 U_{rated} (U_{rated} 为发电机额定电压), U_2 在 $220\sim 900\text{ V}$ 之间, 因设计上的习惯, 230 V 或 240 V 较为常见。

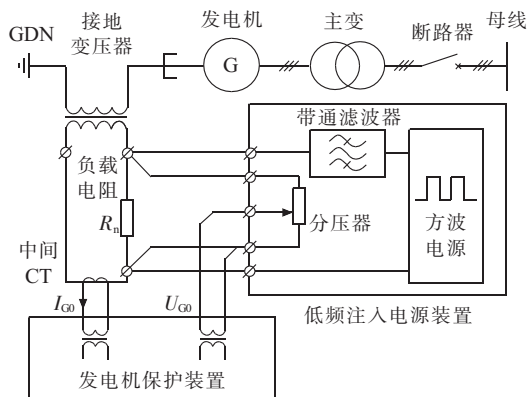


图 2 国产常规注入式定子接地保护方案

该方案中,注入电源输出较小的低频电压,经接地变压器升至高压侧,发电机零序回路对地产生一个不超过 $3\%U_{\text{rated}}$ 的低频电压。由于注入电压较小,不影响发电机的正常运行。当发电机发生较为严重的接地故障时,例如发电机机端发生金属性接地故障,发电机中性点电压被抬高至相电压,接地变压器低压侧电压也被抬高,但是一般只有几百伏 ($U_2/1.732$),不会造成注入电源的损坏。

四川 YL 水电站的机组保护国产化改造费用有限,不允许更换发电机中性点接地电阻,一次设备改造费用往往很高,但用户同时想保留注入式定子接地保护的功能。为满足用户要求,注入式定子接地保护改造方案如图 3 所示。

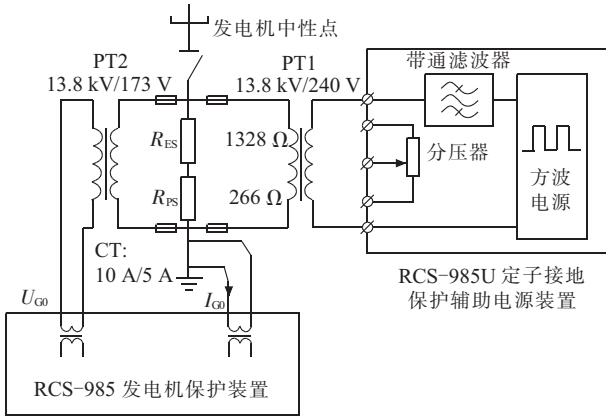


图 3 注入式定子接地保护改造方案接线

该技术方案保留了高压电阻 $R_{\text{ES}}, R_{\text{PS}}$ 。改换了原有的 PT,在高压电阻与注入电源之间增加一级 PT,低频电压通过 PT1 施加在发电机中性点接地电阻上。为了准确测量发电机对地零序电压,又增加了 PT2。注入式定子接地保护的电流测量取自接地电阻上的 CT,电流变比为 10 A/5 A。

3 改造方案核算

主要核算内容包括:(1) 发电机正常运行时注入的低频电压应在合理的范围内;(2) 发生严重的定子接地故障时,反馈的工频电压应在合理的范围内。

正常运行情况下注入的低频电压一次值 $U_{20\text{Hz},\text{nmI}}$ 可由下式估算:

$$\begin{cases} U_{20\text{Hz},\text{nmI}} = \frac{R_n \cdot U_{s,20\text{Hz}}}{R_n + R_{\text{in}}} \cdot n_{\text{PT1}} \\ R_n = \frac{R_{\text{ES}} + R_{\text{PS}}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_{s,20\text{Hz}}$ 为低频注入电源电压; R_{in} 为电源等效内阻; R_n 为接地电阻 ($R_{\text{ES}} + R_{\text{PS}}$) 折算至 PT1 低压侧的值; n_{PT1} 为电压互感器 PT1 的电压变比。

对于该项目, R_{ES} 为 1 328 Ω , R_{PS} 为 266 Ω , n_{PT1} 为

13.8 kV/240 V, 计算得 R_n 为 0.482 1 Ω 。 $U_{s,20\text{Hz}}$ 为 25 V, R_{in} 为 8 Ω , 计算得 $U_{20\text{Hz},\text{nmI}}$ 为 81.7 V。发电机正常运行时,注入的低频电压一次值约占发电机额定电压 (13.8 kV) 的 0.6%, 未超过 $3\%U_{\text{rated}}$ 。

当发电机出现严重接地故障时,假设机端发生金属性接地故障,此时发电机中性点对地电压为 7 968 V (13.8 kV/1.732); 流过接地电阻 ($R_{\text{ES}} + R_{\text{PS}}$) 的电流为 5 A (7 968 V / ($R_{\text{ES}} + R_{\text{PS}}$)); 反馈至注入电源端口的电压约为 240 V (13.8 kV / n_{PT1}), 未超过 550 V (低频注入电源输出端口可承受 550 V, 1 min 反馈的工频过电压)。

因此,上述设计方案总体上是合理的。

4 现场实验

先后对 2 台发电机进行了注入式定子接地保护的模拟实验,发电机静止运行工况下,选择多个电阻值,在发电机中性点处模拟接地故障。其测试结果分别如表 1、表 2 所示。

表 1 1 号机定子接地故障实测结果

序号	接地电阻 /k Ω	保护装置实测 /k Ω	相对误差 /%
1	0.5	0.496	-0.8
2	1.0	1.000	0.0
3	2.0	1.992	-0.4
4	3.0	2.984	-0.5
5	4.0	3.991	-0.2
6	5.0	4.986	-0.3
7	6.0	5.966	-0.6

表 2 2 号机定子接地故障实测结果

序号	接地电阻 /k Ω	保护装置实测 /k Ω	相对误差 /%
1	0.5	0.508	1.6
2	1.0	1.013	1.3
3	2.0	2.076	3.8
4	3.0	3.048	1.6
5	4.0	4.017	0.4
6	5.0	5.116	2.3
9	6.0	6.146	2.4

因现场实验时间仓促,且事先未准备阻值较大的电阻,上述模拟实验没有采用更高阻值的电阻。从模拟实验结果看,保护装置实测的接地过渡电阻比较准确,误差控制在 $\pm 5.0\%$ 内。

5 保护定值

注入式定子接地保护的补偿定值与现场实验情况相关。以该项目的 1 号发电机为例,2 号发电机和 1 号发电机的定值相似。

(1) 相角补偿定值。由相角补偿实验确定。实测注

入的 20 Hz 电压、电流之间的相角,相角补偿定值设定为 350.0 deg。

(2) 电阻补偿定值、电抗补偿定值。因没有接地变压器,这 2 个补偿值均设定为 0。

(3) 电压回路监视定值。模拟金属性接地故障时,实测得到最低的注入电压 $U_{\min}$ 为 0,因此电压回路监视定值同样取 0。

(4) 电流回路监视定值。在正常状态下得到最低的注入电流 $I_{\min}$ 为 7.44 mA,可得电流回路监视定值。

$$I_{\text{LF0.SET}} = K_{\text{rel}} \times I_{\min} \quad (2)$$

式中: K_{rel} 取 0.4~0.6。最终取 $I_{\text{LF0.SET}}$ 为 0.4 mA。

(5) 零序电流跳闸定值。除了接地过渡电阻判据外,注入式定子接地保护还有一个零序电流判据作为后备,其反映流过中性点接地设备的零序电流,按 10%的零序电压进行整定:

$$I_{\text{E.SET}} = \frac{10\% (U_{\text{rated}} / \sqrt{3})}{R_{\text{es}} + R_{\text{ps}}} \times \frac{1}{N_{\text{CT}}} \quad (3)$$

计算结果 $I_{\text{E.SET}}$ 为 0.25 A,该判据保护 90%范围的定子单相接地故障。

(6) 电阻折算系数定值。理论上的电阻折算系数,按下式计算:

$$K_{\text{R}} = \frac{n_{\text{PT2}}}{n_{\text{CT}}} = \frac{13.8 \text{ kV} / 173 \text{ V}}{10 \text{ A} / 5 \text{ A}} = 39.88 \quad (4)$$

其中, n_{PT2} 为电压互感器 PT2 的变比。考虑到测量环节的误差,按实际测量到的接地电阻一次值与二次值之比进行整定,实测结果是 40.7。

6 结束语

以四川 YL 水电站 120 MW 容量的发电机为例,阐述了发电机中性点直接经高压大电阻接地的情况下注入式定子接地保护的设计方案,保留了高压电阻,更换了原有的 PT,在高压电阻与注入电源之间增加一级

PT,完成低频电压的注入;另增加一组 PT 用于电压的测量。经过估算,说明设计方案合理。该方案不更换发电机中性点接地设备,改造费用小。同时给出现场模拟接地故障的实验结果,表明保护装置能准确测量一定阻值范围内的接地过渡电阻,相对误差可控制在 $\pm 5\%$ 之内,满足工程需要。可为国内相似机组注入式定子接地保护的改造提供参考。

参考文献:

- [1] 毕大强,王祥珩,余高旺,等.高准确度外加 20 Hz 电源定子单相接地保护的研制[J].电力系统自动化,2004,28(16):75-78.
- [2] 李德佳,毕大强,王维俭.大型发电机注入式定子单相接地保护的调试和运行[J].继电器,2004,32(16):51-56.
- [3] 张琦雪,席康庆,陈佳胜,等.大型发电机注入式定子接地保护的现场应用及分析[J].电力系统自动化,2007,31(11):103-107.
- [4] 张琦雪,陈佳胜,陈俊,等.大型发电机注入式定子接地保护判据的改进[J].电力系统自动化,2008,32(3):66-69.
- [5] 张琦雪,黄献生,陈佳胜,等.岩滩发电公司 300 MW 发电机定子接地故障的多重化保护[C].第 11 届全国保护和控制学术研讨会,2007.
- [6] ABB Power Automation. Numerical Generator Protection, REG 316*4[R]. 1999.

作者简介:

- 梁少华(1963),男,江苏海门人,高级工程师,从事继电保护及自动化产品技术管理及市场推广工作;
- 申建彬(1989),男,四川大邑人,助理工程师,从事电厂继电保护调试工作;
- 张杰(1982),男,湖北武汉人,工程师,从事电厂继电保护设计工作;
- 李华忠(1983),男,福建三明人,助理工程师,从事电厂继电保护设备研发工作;
- 陈佳胜(1975),男,湖北大冶人,高级工程师,从事电厂继电保护设备研发工作;
- 张琦雪(1974),男,江苏沭阳人,高级工程师,从事电厂继电保护设备研发工作。

Modification Scheme and Application of the Generator Stator Earth Fault Protection with Voltage Injection

LIANG Shao-hua, SHEN Jian-bin, ZHANG Jie, LI Hua-zhong, CHEN Jia-sheng, ZHANG Qi-xue
(NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: There are two 120MW generators, which with resistor connected directly between generator neutral and ground, in YL hydropower station in Sichuan province, China. The voltage injecting stator earth fault (SEF) protection is in common use. However, it can't be directly used in the generators in YL hydropower station, because the terminators of the injection voltage source can't be connected directly to the grounding resistor, which probably with high voltage when SEF occurs. A new scheme of SEF is presented, and it is verified by the experimental results. The relative errors of measuring results of earth fault resistors are not greater than $\pm 5\%$. Moreover, the high voltage grounding resistor is reserved and the engineering cost is reduced.

Key words: generator, voltage injection, stator earth fault protection

银东直流西北侧电网稳定控制系统实现

丁留宝,王 健

(国网电力科学研究院,江苏 南京 210003)

摘 要:安全稳定控制系统是电网安全稳定运行的重要保障。基于银东直流西北侧电网地理接线图分析了其突出的安全稳定问题,介绍了银东直流西北侧电网安全稳定控制系统的组成及各站主要功能,总结了银东直流西北侧电网安全稳定控制系统的特点。现场联调结果表明,该稳定控制系统能够保障银东直流西北侧电网的安全稳定运行。

关键词:银东直流;安全稳定;稳定控制;信息交互

中图分类号:TM76

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0037-03

随着特高压交直流电网的逐步建设及全国互联电网的基本实现,电网安全稳定运行与控制问题越来越重要。为了解决 $N-2$ 严重故障、部分主变跳闸或直流极闭锁故障等可能引起的电网稳定破坏或设备过载问题,采取切机、切负荷或解列等控制措施,避免主网失稳、瓦解甚至大面积停电事故以及重大设备损坏事故的发生,同时为了尽量提高电网送出功率,提高电网的送电能力,构建安全稳定控制系统势在必行,我国各大电网均建立了不同规模的区域电网稳定控制系统^[1-4]。文中分析了银东直流西北侧电网的安全稳定问题并提出解决方案,针对提出的解决方案对安全稳定控制系统各站功能进行了详细设计。

1 银东直流西北侧电网安全稳定问题分析

银东直流西北侧电网的地理接线如图 1 所示,其中银川东、黄河变和白银变为 750 kV/330 kV 变电站,宁安变为 220 kV 变电站。750 kV 白银—黄河—银川东双回是陕甘青宁电网东西部之间水火电功率交换的主要通道,它加强了西北主网与宁夏南部 330 kV 电网之间的联络,较大提高了甘宁省间交换功率水平,能够满足西北(宁夏)—华北(山东)第一回 4 000 MW 直流工程的需要,同时也满足了宁东火电基地大型电源的送出。

文中将银东直流西北侧电网分为南北断面和黄川断面来分析。受局部地区 750 kV/220 kV、750 kV/330 kV 电磁环网的影响,部分线路检修或停运时系统可能存在一些安全稳定问题,主要表现在宁夏省内黄川断面和甘宁省间联络的南北断面上。

1.1 直流单极或双极闭锁导致的问题

西北—新疆联网后,当银川东直流单极投运单极闭锁或双极投运双极闭锁后,西北电网会出现高频问题,潮流也会出现大幅度转移。故当发生直流单极或双极闭锁后应根据功率不平衡量由近及远立即切除

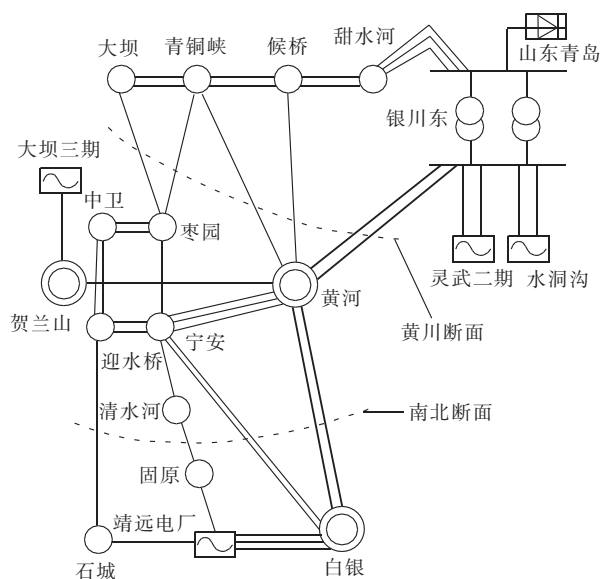


图 1 银东直流西北侧电网地理接线

银川东直流近区机组。

1.2 银川东双主变运行时存在的问题

银川东换流站直流双极投运后,银川东主变下网压力较大。正常方式下,如发生银川东主变 $N-1$ 故障,则另 1 台主变会严重过载,限制银川东 2 台主变下网功率可避免主变过载问题,但将造成接于 750 kV 的灵武电厂二期及水洞沟电厂无法满发,不能实现最大送电能力,同时运行方式安排也存在一定困难。

1.3 银川东单主变运行时存在的问题

当银川东单主变运行时,如发生运行主变跳闸,灵武电厂二期和水洞沟电厂被甩至黄河变,黄川断面仅通过 4 回 330 kV 线路与主网联系,330 kV 黄侯线或黄铜线可能会严重过载。为避免该问题的发生,正常运行方式下,需控制 330 kV 黄侯线+330 kV 黄铜线+750 kV 黄川双回线+750 kV 灵武电厂二期及 750 kV 水洞沟电厂的总出力。

1.4 灵武电厂二期送出 750 kV 同杆双回线存在的问题

灵武电厂二期 2×100 万 kW 机组出力通过 750 kV

同杆双回线送出,存在同时失去的可能,如发生 $N-2$ 故障,则系统失去200万kW出力,系统频率将迅速降低,有可能会造成系统第三道防线低频减载装置动作。

1.5 黄川断面 $N-2$ 故障导致线路过载问题

750 kV 黄川双回线 $N-2$ 跳闸,黄川断面仅通过4回330 kV线路与主网联系,330 kV 黄侯线或黄铜线可能会严重过载。为避免问题的发生,需控制330 kV 黄侯线+330 kV 黄铜线+750 kV 黄川双回线+750 kV 灵武电厂二期及750 kV 水洞沟电厂总出力。

1.6 南电北送断面 $N-2$ 故障导致线路过载问题

如发生750 kV 白黄双回线跳闸,南电北送断面仅通过4回330 kV线路与主网联系,330 kV 白安双回线可能会严重过载。

针对银东直流西北侧电网突出的安全稳定问题,为保证西电东送的安全可靠性,防止大面积事故的发生,最大限度提高西电东送能力,需在银东直流西北侧配置相应的安全稳定控制系统。

2 银东直流西北侧电网稳定控制系统介绍

银东直流西北侧电网稳定控制系统主站设在银川东换流站和黄河变,均双重化配置SCS-500E^[5]分布式稳定控制装置,银川东换流站主辅运行,黄河变双柜并列运行。宁安变为控制子站,配置单套FWK-300稳定控制柜,与黄河变双柜通信。在灵武电厂一期、灵武电厂二期、鸳鸯湖电厂、水洞沟电厂、景泰电厂、大坝电厂三期设切机执行装置,均双重化配置,主辅运行,与银川东换流站通信。站间通信均以2 M 光纤通道联系,其站间通道如图2所示。

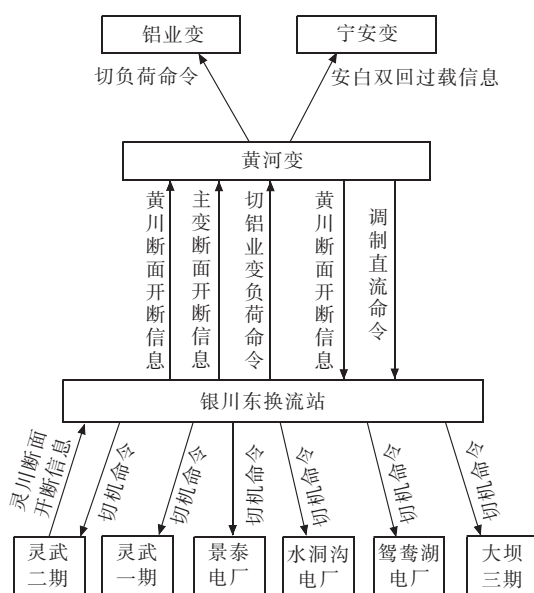


图2 系统通道配置

2.1 银川东换流站功能

(1) 银川东直流外送(银川东至山东)发生极故障

时,按容量执行切机措施。(2) 主变功率下网(主变高压侧功率为正),发生 $N-1$ 故障(2台主变投运1台主变跳闸)时,按策略表执行调制银川东直流措施。(3) 川灵断面功率为负(灵武二期至银川东),发生 $N-2$ 故障(川灵双回运行 $N-2$ 或川灵单回运行 $N-1$)时,按策略表调制银川东直流或向黄河变发送需切容量。(4) 向各切机执行站发送切机命令。(5) 向黄河变发送黄川I、II线投停及跳闸信息,主变断面(主变高压侧)功率及主变断面开断信息(仅指1台主变检修另1台主变跳闸)。(6) 接收灵武电厂二期发来的川灵I、II线投停及跳闸信息。(7)接收黄河变发来的按容量调制银川东直流命令。

2.2 黄河变功能

(1) 根据方式压板判别系统运行方式。(2) 不同运行方式下,750 kV 黄川断面断开时,检测330 kV 黄铜线或黄侯线是否过载(功率为正),如过载则根据所选断面查策略表,按容量向银川东发送调制银东直流功率命令或向铝业变发切负荷命令。(3) 不同运行方式下,750 kV 黄白断面断开时,检测330 kV 安白任一回路是否过载(功率为负),如过载则根据所选断面查策略表,按容量向银川东发送调制银东直流功率命令或向铝业变发切负荷命令。(4) 银川东主变下网(主变高压侧功率为正),发生1台主变检修,另1台主变跳闸时,检测330 kV 黄铜线或黄侯线是否过载(功率为正),如过载则根据所选断面查策略表,按容量向银川东发送调制银东直流功率命令或向铝业变发切负荷命令。(5) 向银川东换流站发送按容量调制银东直流命令。(6) 向铝业变发送按容量切负荷命令。(7) 接收银川东发来的川黄I、II线投、停及跳闸信息,主变断面(主变高压侧)功率及主变断面开断信息。(8) 接收银川东发来的需切容量,执行按容量切铝业变负荷措施。

2.3 宁安变功能

判安白双回线过载(功率为负),向黄河变发送安白双回线过载信息。

2.4 电厂切机执行站功能

(1) 判主变高压侧两轮高周,每轮切1台机。(2) 收银川东换流站切机命令。其中灵武电厂二期兼具向银川东换流站发送灵川I、II线跳闸信息功能。

3 银东直流西北侧电网安全稳定控制系统特点

3.1 站内信息交互功能

银东直流西北侧电网安全稳定控制系统可以分解为A套系统和B套系统。银川东换流站和黄河变A套系统和B套系统都配有另柜通道压板,用于异常情况下互相传递信息。如果运行正常,A套系统和B套系统独立决策,互不影响。但在某些异常情况下,A套系

统和 B 套系统需要相互交换信息以完成决策。

以银川东换流站和灵武电厂二期的 4 台柜子举例说明,柜间通信如图 3 所示。

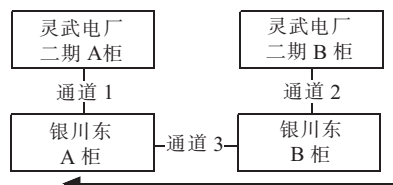


图 3 柜间通信示意图

当银川东柜间通道正常时,若发生以下(1)~(2)中任一种情况,则银川东 A 柜需通过黑箭头的方向即银川东 B 柜收到的机组信息统计机组信息。(1) 灵武电厂二期 A 柜总功能压板退出。(2) 灵武电厂二期 A 柜装置异常闭锁。(3) 银川东 A 柜对灵武电厂二期 A 柜通道压板退出。(4) 通道上银川东 A 柜接收灵武电厂二期 A 柜异常或灵武电厂二期 A 柜接收银川东 A 柜异常。当银川东 A 柜和 B 柜间通道异常时,如果发生以上(1)~(4)中任一种情况,则银川东 A 柜装置闭锁,整个 A 套系统退出运行。在该情况下可退出银川东 A 柜与另柜通道压板以解除银川东 A 柜装置闭锁,从而开放整个 A 套系统。

3.2 站间信息交互功能

传统意义上的稳控系统站与站之间是主站与执行站的关系,而银东直流稳控系统站与站之间除了主站与执行站的关系外,还具备信息交互功能。

一方面,站与站之间互相传递断面开断信息,起辅助补充作用。银川东换流站和灵武电厂二期都采集灵川双回线信息并判断其跳闸,如灵武电厂二期一旦判出灵川双回跳闸,立即通过 2 M 通道将灵川双回跳闸信息实时上送给银川东换流站;同样黄河变和银川东换流站也同时判断黄川断面跳闸,并互相传递黄川断面开断信息。这样就避免了线路实际已跳闸而单站可能没判出跳闸造成装置拒动的可能性。

另一方面,站与站之间传递的信息是逻辑的重要组成部分。例如黄河变不方便采集安白双回的过载信息,这就需要从宁安变获取安白双回线的故障信息。一

旦黄河变南北断面开断,黄河变又获得了安白线的过载信息,则立即查表采取措施;同样如黄河变收到银川东主变断面开断信息,一旦检测到本地黄侯线过载,则立即采取措施。

4 结束语

为了验证该稳定控制系统能否发挥应有的作用,调试人员在各厂站模拟各种故障下进行了联调实验。结果表明,各厂站均能按照预定的切机切负荷逻辑执行,达到了预定的效果。

银东直流西北侧安全稳定控制系统提高了银东直流西北侧电网的安全稳定运行水平,对预防系统元件跳闸、过载以及极故障事故有可能引起更严重事故的发生起到了重要作用,为西北电网安全可靠地向山东输电提供了安全保障。随着“十二·五”期间特高压互联电网的全面建设,全国将形成“三纵三横一环网”的局面,电网结构日趋复杂,对电网的安全稳定要求相应会有更高的要求。相信银东直流西北侧电网安全稳定控制系统的成功投运对特高压交直流电网的稳定控制有着一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 任祖怡,赵明君,夏尚学,等.安全稳定控制系统在新疆南部电网的应用[J].电力系统自动化,2008,32(12): 104-107.
- [2] 田力.安全稳定控制系统在三峡电源电站的应用[J].华中电力,2008,21(3):57-60.
- [3] 孟伟洁,陆敏珏,杜科.安全稳定控制系统在上海电网的应用[J].上海电力,2010(3):214-216.
- [4] 宋锦海,李雪明,罗建裕,等.FWK-300 在苏北安全稳定控制系统中应用[J].电力自动化设备,2006,26(3):95-97.
- [5] 宋锦海,余文杰,宣筱青,等.适应特高压互联电网的 SCS-500E 安全稳定控制平台研制[J].电力系统自动化,2009,33(5): 91-95.

作者简介:

丁留宝(1983),男,江苏泰兴人,工程师,从事电力系统安全稳定控制研究工作;

王健(1983),男,青海西宁人,助理工程师,从事电力系统安全稳定控制研究工作。

The Realization of Stability Control System to Northwest Power Grid of Yinchuan-Shandong DC System

DING Liu-bao, WANG Jian

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The security and stability control system is the important guarantee of power system. Based on the geographic connect graph of northwest power grid of Yinchuan-Shandong DC system, this paper analyses the serious problems of security and stability, and introduces the configuration and main function of security and stability control system, the characteristics of control system are also summarized. The result of local combined adjusting indicated that the introduced stability control system can guarantee the safety and stability of northwest power grid of Yinchuan-Shandong DC system.

Key words: Yinchuan-Shandong DC system; security and stability; stability control; information interaction

负荷优化运行模型及其算法研究

张志福, 苏宜强, 曹海猛

(连云港供电公司, 江苏 连云港 222004)

摘要:借助分时电价, 企业通过优化负荷的运行方式, 可避开峰时电价, 节约用电成本。介绍了企业生产流程中影响负荷优化运行的重要因素, 建立了基于分时电价的负荷优化运行模型, 提出了用启发式求解方法, 算例表明, 基于分时电价的负荷优化运行模型及其算法, 符合实际, 具有一定的实用性。

关键词:需求侧管理; 负荷优化运行; 分时电价

中图分类号: TM714

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)01-0040-03

分时电价(TOU)作为电力系统错峰的重要手段, 在我国已得到了广泛的应用^[1]。电力用户通过合理安排用电时间, 优化负荷的运行方式节约电费开支。目前很多用户缺少负荷优化运行的技术手段, 使得用户对分时电价的灵敏度不高^[2], 一定程度上影响了分时电价的实施效果。所谓负荷的优化运行是指优化和调整负荷的运行时段, 达到节约用电成本的目的。在负荷优化运行方面, 国外学者有不少研究, 针对具体生产流程提出了负荷优化运行模型。文献[3]运用模糊逻辑理论建立了能量管理模型, 文献[4]应用整数规划方法建立负荷最优控制模型, 消减钢铁生产过程中高峰负荷, 文献[5]运用混合整数规划方法模拟和优化钢铁厂的电力负荷, 文献[6]应用0-1规划方法建立负荷优化控制模型。国内相关研究较少, 文献[7]介绍了蒸馏装置负荷优化运行的应用, 文献[8]建立了钢铁企业生产的能源动态分配模型, 以上研究基本局限于具体的生产流程。文中主要探讨考虑分时电价的负荷优化运行, 即将TOU高峰时段的负荷转移至TOU低谷时段, 应用0-1规划理论提出了一种较为通用的负荷优化运行模型及其求解方法, 算例表明该模型符合实际, 具有一定的实用性。

1 负荷优化运行的制约因素

负荷优化运行受到多种因素的限制, 在现代企业中, 生产环节繁多, 协作关系复杂, 某一环节没有按计划实施, 将会影响整个生产系统的运行^[9]。因此, 负荷优化运行首先要满足生产过程中工序、工艺、设备、环保、安全、质量、供应、销售、服务等方面的动态性限制, 再考虑将TOU高峰时段的负荷转移到TOU低谷时段。例如, 在铸造行业, 高温炉的工作都要经过加温和保温的交替过程, 交替周期较长, 通过改变生产计划和班次将加温过程放在TOU谷段, 保温过程安排在TOU峰段。另外, 用电企业实施负荷优化运行的同

时, 还需考虑其所带来的附加成本, 如负控装置, 生产工艺改造等费用。

2 负荷优化运行模型

企业的生产流程往往由多个单线程组合而成, 每个单线程又由多个工序构成。考虑到多线程的复杂性, 仅针对单线程实施负荷优化, 建立负荷优化运行模型。

分析生产过程中的能耗结构之后, 根据实际情况假设如下:

- (1) 企业的容量电价为 M , 元/(kV·A);
- (2) 分时电价函数为 $p(t)$, 元/(kW·h);
- (3) 某时刻的用电功率为 $P(t)$, kW;
- (4) 企业生产流程的最大负荷为 D , kW;
- (5) 该生产流程的电度费用为 W , 元;
- (6) 生产流程各单元开关状态向量矩阵 U , U 为待求向量矩阵。

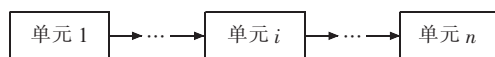


图1 企业生产流程结构

如图1所示, 将企业的某一生产流程分为 n 个单元, 运行时段为 $[t_0, t_f]$, 负荷优化将造成最大负荷的变化, 需要考虑电度费用和容量费用总和, 即以企业用电成本最小化函数为:

$$\min W = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^n P_i(t) u_i(t) p(t) dt + M \cdot \left\{ \max_{i=1}^n \sum_{i=1}^n P_i(t) u_i(t) \right\} \\ \text{st } g(u_1(t), u_2(t), u_3(t), \dots, u_n(t)) \leq 0 \quad (1)$$

式中: $p(t)$ 为电价函数; $P_i(t)$ 为 i 单元 t 时刻的功率; $u_i(t)$ 为 i 单元 t 时刻的运行状态函数, $u_i(t)=1$, 表示第 i 个单元处于运行状态, $u_i(t)=0$, 表示第 i 个单元处于关闭状态; $g(u_1(t), u_2(t), u_3(t), \dots, u_n(t)) \leq 0$ 为生产工艺约束条件的数学表达式, 描述了生产工艺中流量速度、能量大小、最大负荷、传输速度、损耗以及工序对调整负荷运行方式的约束。

在最优控制问题中,求解时变函数最优模型的方法一般取决于 Pontryagin 最大化定理^[10]和时变函数的决策变量,而这些方法不适合公式(1)的求解,为了应用计算机求解,需将公式(1)离散化,转化为 0-1 整数规划问题。将 $[t_0, t_f]$ 时段 N 等份, $t_s = (t_f - t_0)/N$, 于是以企业用电成本最小化函数为:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N P_i^j u_i^j p^j T_s + M \cdot \left\{ \max \sum_{i=1}^n P_i^j u_i^j \right\} \quad (2)$$

$$\text{st } g(U) \leq 0$$

其中:

(1) $P_i^j = P_i((j-1)T_s)$, $u_i^j = u_i((j-1)T_s)$, $p^j = p((j-1)T_s)$, i 和 j 的变量范围 $\{u_i^j: 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq N\}$ 。

$$(2) U = \begin{bmatrix} u_1^1 & u_1^2 & \cdots & u_1^N \\ u_2^1 & u_2^2 & \cdots & u_2^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_n^1 & u_n^2 & \cdots & u_n^N \end{bmatrix}, \text{是待求的变量矩阵,它表示}$$

了所有单元在所有时刻的状态。

(3) $g(U) \leq 0$ 是生产工艺约束条件的数学表达式,即生产工艺中流量速度、能量大小、最大负荷、传输速度、损耗以及工序的约束。

3 求解方法的选择

对于有 n 个变量的 0-1 规划问题,由于每个变量只取 0,1 两个值,故 n 个变量所有可能的 0-1 组合数有 2^n 个。目前最普遍的解法就是枚举法,在此基础上人们采用了隐枚举法、遗传算法、动态规划法等方法,虽然在一定程度上加快了求解速度、缩短了问题的解决时间,但这些方法只能当变量较小时可达到优化的目的。

文献[11]介绍的大型 0-1 目标规划的启发式算法具有运算速度快、精度高的优点,适合解决模型系数无限制、变量多的大规模实际问题。文中将结合案例建立基于分时电价的负荷优化运行模型,并运用完全枚举法和启发式算法对其进行求解。

4 案例应用

以某煤矿运输系统的改造为例,选取煤矿生产系统中的成品煤传输系统(Q -group)作为研究对象,对传送带 Q_1 的运行时间进行优化控制。

如图 2 所示, Q -group 存储仓中的成品煤由传送带 Q_1 输送至装载仓,再由传送带 Q_2 装入运煤车。表 1 给出了 2010 年 11 月 4 时至 2010 年 11 月 8 时段运煤车的到站时刻。当运煤车到站时,为了节约装载时间, Q_2 将立即运行。装载过程中, Q_1 一旦发现装载仓有空

余,将第一时间将装载仓填满。通过分析发现,参照分时电价适当调整 Q_1 的运行时间,可以节约电费开支。

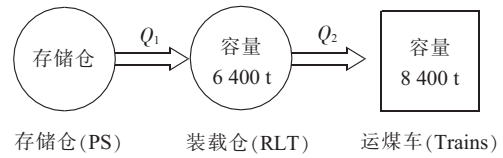


图 2 出口煤传输系统 (Q -group) 流程

表 1 运煤车到站时刻表

车次	日期	时间	统一时刻
1	2010-11-04	04:00	0+4=4
2	2010-11-04	22:00	0+22=22
3	2010-11-05	07:00	24+7=31
4	2010-11-06	04:00	48+4=52
5	2010-11-06	15:00	48+15=63
6	2010-11-07	01:00	72+1=73
7	2010-11-08	03:00	96+3=99
8	2010-11-08	23:00	96+23=119

4.1 Q -group 参数及建模分析

根据 Q -group 系统的实际运行情况,将实际问题转化为数学问题。

(1) Q -group 中具体的参数如下:装载仓 (RLT) 的容量 M_{RLT_max} 为 6 400 t;运煤车 (Trains) 容量 M_{Trains_max} 为 8 400 t; Q_1 输送能力 r_{Q_1} 为 995 t/h; Q_2 输送能力 r_{Q_2} 为 2 100 t/h。

(2) 参照式(1),建立 Q_1, Q_2 运行状态函数 $u_{Q_1}(t)$, $u_{Q_2}(t)$ 。现场运煤车装煤所需时间 T_L 为 4 h (M_{Trains_max} / r_{Q_2}), 根据表 1 中列车到站时刻,得出 Q_2 运行状态函数,如图 3 所示。

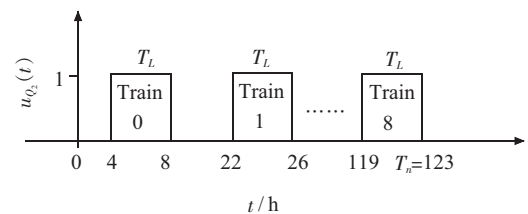


图 3 Q_2 运行状态函数

(3) 装载仓 (RLT) 某一时刻的煤存量为:

$$m_{RLT}(t) = m_{RLT}(t_0) + \int_{t_0}^t [r_{Q_1} \cdot u_{Q_1}(\tau) - r_{Q_2} \cdot u_{Q_2}(\tau)] d\tau \quad (3)$$

其中 t_0 为起始时间, $r_{Q_1}, r_{Q_2}, u_{Q_2}(t)$ 均为已知, $u_{Q_1}(t)$ 为待求量。

(4) 当地实施的分时电价为:

$$p(t) = \begin{cases} p_p & t \in [8, 12) \cup [17, 21) \text{ 峰} \\ p_s & t \in [12, 17) \cup [21, 24) \text{ 平} \\ p_0 & t \in [0, 8) \text{ 谷} \end{cases}$$

4.2 目标函数及约束条件

为使企业用电成本最小,结合式(1),建立最优化模型:

$$\begin{aligned} \min J &= \int_{t_0}^{t_n} p(\tau) u_{Q_1}(\tau) d\tau \\ \text{st } m_{\text{RLT}}(t) &\geq 0, \forall t \in [t_0, t_N] \\ m_{\text{RLT}}(t) &\leq M_{\text{RLT_max}}, \forall t \in [t_0, t_N] \end{aligned} \quad (4)$$

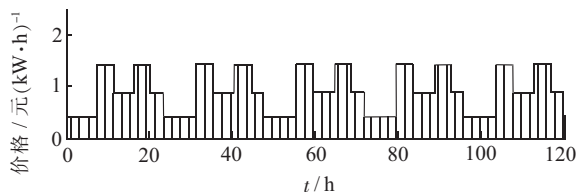
公式(4)离散化后,得到:

$$\begin{aligned} \min T_s \cdot \sum_{i=1}^N P(t_i) u(t_i) p(t_i) + M \cdot \{\max P(t_i) u(t_i)\} \\ \text{st} \\ -\sum_{t_i=t_0}^{T_{N-1}} u_{Q_1}(t_i) \leq -\left(\frac{0 - m_{\text{RLT}}(t_0) + (T_s \cdot r_{Q_2}) \sum_{t_i=t_0}^{T_{N-1}} u_{Q_2}(t_i)}{T_s \cdot r_{Q_1}} \right) \\ \sum_{t_i=t_0}^{T_{N-1}} u_{Q_1}(t_i) \leq \left(\frac{6400 - m_{\text{RLT}}(t_0) + (T_s \cdot r_{Q_2}) \sum_{t_i=t_0}^{T_{N-1}} u_{Q_2}(t_i)}{T_s \cdot r_{Q_1}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

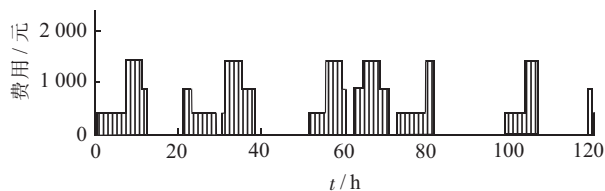
其中, $T_s = (t_n - t_0)/N$, 由于负荷优化前后最大功率未发生变化,取 $P(t_i)$ 为 1。

4.3 优化结果

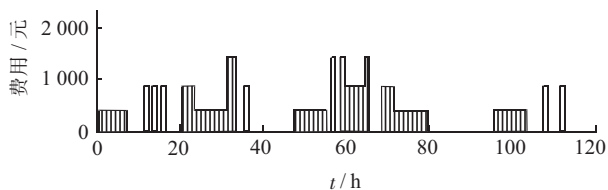
文中的算例是一个参数多达 124 个的 0-1 规划问题,借助 Matlab 中的 *Bintprog* 函数可以完全枚举所有组合^[12],得出 u_{Q_1} 的最优解,如图 4 所示。



(a) 分时电价



(b) 负荷 Q1 优化前的电度费用



(c) 负荷 Q1 优化后的电度费用

图 4 负荷优化前后 Q1 的电度费用

针对启发式算法已经编制了程序,并在计算机上实现,也得出同样结果。这 2 种算法对比如下。

(1) 用完全枚举法。目标函数计算 2.12×10^{37} 次,

约束条件计算 4.24×10^{37} 次,总共计算 6.36×10^{37} 次,耗时 2 h。

(2) 用启发式算法。目标函数计算 4.23×10^{35} 次,约束条件需要计算 8.26×10^{35} 次, 1.23×10^{36} 总共需要计算 128 次,耗时 10 min。

负荷优化前后 Q_1 的电度费用如图 4 所示。图 4(b) 给出了未实施负荷优化前 Q_1 的运行时间分布,此时, Q_1 的运行不受 TOU 的影响。图 4(c) 给出了实施负荷优化后 Q_1 的运行时间分布, Q_1 的运行受到 TOU 的影响,尽量避开在 TOU 高峰时段运行。

Q_1 的能耗成本积累曲线如图 5 所示,实施负荷优化后,使得 Q_1 的费用从 5.2 万元降低到 3.7 万元,节约电费 29%。

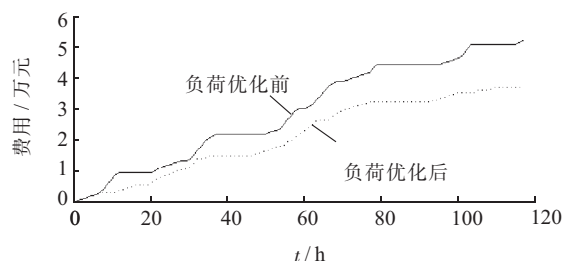


图 5 负荷优化前后 Q1 的费用对比

5 结束语

通过案例可以看出,负荷优化后在 5 个工作日内消减电费 29%。可见,通过对设备运行状态进行最优控制,可以节约用电成本。另外,当模型中变量较多时,选用启发式算法求解,较传统的枚举法具有计算时间快的优点。上述模型和算法同样也适用于自来水厂、钢铁厂等生产流程的优化改造。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. 电力需求侧管理工作指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 程 瑜, 翟娜娜. 面向智能电网的峰谷分时电价评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 196-214.
- [3] CHAABENE M, AMMAR M B, ELHAJJAJI A. Fuzzy Approach for Optimal Energy Management of a Domestic Photovoltaic Panel [J]. Applied Energy, 2007, 84(10): 992-1001.
- [4] ASHOK S. Peak-load Management in Steel Plants [J]. Applied Energy. 2006, 83(5): 413-424.
- [5] NOLDE K, MORARI M. Electrical Load Tracking Scheduling of a Steel Plant [J]. Computers & Chemical Engineering, 2010(34): 1899-1903.
- [6] ZHANG J, XIA X. Best Switching Time of Hot Water Cylinder Switched Optimal Control Approach [C]. Proc. of the 8th IEEE AFRICON Conference, Namibia, 2007.
- [7] 赵晓军, 杨敬一, 徐心茹. 卡宾达原油常减压蒸馏装置负荷转移技术的模拟与分析[J]. 当代石油石化, 2006(10): 29-33.
- [8] 郭 宇, 茹海鹏. 钢铁企业能源分配动态优化数学模型[J]. 硅谷,

(下转第 46 页)

单亲遗传算法在电力计量器具配送问题中的研究

尹 飞,李新家,祝永晋
(江苏方天电力技术有限公司,江苏 南京 211102)

摘 要:介绍了计量中心实际运作中计量器具配送运输中碰到的问题,针对计量中心二级库房较多、分布于全省、需要进行二级库房统一配送的情况,构建了适用于计量中心器具配送的单亲遗传算法的数学模型,并实现算法。算法的实际运行结果表明,在计量中心电力计量器具的配送问题上,单亲遗传算法可以取得优秀的结果。

关键词:计量器具配送;车辆调度问题;单亲遗传算法

中图分类号:TM734

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0043-04

物流配送车辆调度问题作为一个完全多项式非确定性(NP)难题,随着客户数量和车辆数量的增加,可选的车辆路径方案数量将以指数速度急剧增长,穷举法在生产环境中已经不可能再使用。因此,用启发式算法求解该问题成为研究的一个重要方向。求解物流配送车辆调度问题的方法很多,常用的有旅行商法、动态规划法、节约法、扫描法、分区配送算法、方案评价法等。遗传算法的出现为求解物流配送车辆调度问题提供了新的工具,传统遗传算法能够方便地求得问题的近似最优解,但对复杂问题搜索效率低,易陷入“早熟收敛”的困境^[1,2]。单亲遗传算法是对传统遗传算法的一种改进,不使用传统遗传算法中常用的交叉算子,对某个个体的遗传操作只在该条染色体上进行,即只通过单个个体繁殖后代^[3]。由于单亲遗传算法不使用交叉算子,即使群体中的个体完全相同,也不影响遗传迭代的进行,从而摆脱了对群体多样性的要求,能克服“早熟收敛”问题。通过选择、染色体重组等遗传操作,使群体一代一代地进化到搜索空间中越来越好的区域,从而获得较优解。文中采用单亲遗传算法来对配送路径进行近似最优解的计算。

1 计量中心电力器具配送问题的数学模型

通用物流配送车辆调度问题可以描述为:从某物流中心用多台配送车辆向多个客户送货,每个客户的位置和货物需求量一定,每台配送车辆的载重量一定,其一次配送的最大行驶距离一定,要求合理安排车辆配送路线,使目标函数得到优化,并满足以下条件:(1) 每条配送路径上各客户的需求量之和不超过配送车辆的载重量;(2) 每条配送路径的长度不超过配送车辆一次配送的最大行驶距离;(3) 每个客户的需求必须满足,且只能由 1 台配送车辆送货。

在计量中心的环境,设计量中心有 K 台配送车辆,每台车辆的载重量为 $Q_k(k=1,2,\dots,K)$,其一次配

送的最大行驶距离为 D_k ,需要向 L 个二级库送货,每个二级库的货物需求量为 $q_i(i=1,2,\dots,L)$,二级库 i 到 j 的运距为 d_{ij} ,物流中心到各二级库的距离为 $d_{0j}(i,j=1,2,\dots,L)$,再设 n_k 为第 k 台车辆配送的二级库数量($n_k=0$ 表示未使用第 k 台车辆),用集合 R_k 表示第 k 条路径,其中的元素 r_{ki} 表示二级库 r_{ki} 在路径 k 中的顺序为 i (不包括计量中心),令 $r_{k0}=0$ 表示计量中心,若以配送总里程最短为目标函数,则可建立如下配送车辆调度问题的数学模型:

$$\min Z = \sum_{k=1}^K \left[\sum_{i=1}^{n_k} d_{r_{k(i-1)}r_{ki}} + d_{r_{kn}r_{k0}} \cdot used(n_k) \right] \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} q_{r_{ki}} \leq Q_k \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} d_{r_{k(i-1)}r_{ki}} + d_{r_{kn}r_{k0}} \cdot used(n_k) \leq D_k \quad (3)$$

$$0 \leq n_k \leq L \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K n_k = L \quad (5)$$

$$R_k = \{r_{ki} | r_{ki} \in \{1,2,\dots,L\}, i=1,2,\dots,n_k\} \quad (6)$$

$$R_{k1} \cap R_{k2} = \emptyset \\ \forall k_1 \neq k_2 \quad (7)$$

$$used(n_k) = \begin{cases} 1 & n_k \geq 1 \\ 0 & \text{Other} \end{cases} \quad (8)$$

式(1)为目标函数,在文中目标函数为配送里程最短,实际使用可以根据情况变更为油耗最低或速度最快,多个因素综合考虑也是可行的;式(2)保证每条路径上各二级库房的货物需求量之和不超过配送车辆的载重量;式(3)保证每条配送路径的总里程长度不超过配送车辆一次允许的最大行驶距离,行驶距离既可以作为目标函数的约束条件,也可以作为目标函数的运算项。实际使用中这一约束条件也可以变更为每辆车单次行驶时间,或移除此约束;式(4)表明每条路径上的二级库房数不超过总二级库房数;式(5)表明每个二

级库房都得到配送服务,实际使用中可以将本次不进行配送的库房移出计算表格,这样不必修改此约束条件;式(6)表示构造各条路径的二级库房的组成;式(7)限制每个二级库房仅能由1台配送车辆送货,如果二级库房需求量较大,需要多辆车进行配送,此条件也可以放宽。但是从省中心的物流管理的目标来看,小批量多批次的配送方式将可能成为主流,故此约束具有现实意义;式(8)表示当第 k 辆车服务的二级库房数不小于1时,说明该台车参加了配送,则 $used(n_k)$ 取1,当第 k 辆车服务的客户数小于1时,表示未使用该台车辆, $used(n_k)$ 取0。

2 算法的构造

2.1 编码方法的确定

根据计量中心配送车辆调度问题的特点,文中采用简单直观的自然数编码方法^[3],用0表示配送中心,用1,2,..., L 表示各提出需求的二级库房。由于在计量中心有 K 台车辆,则最多存在 K 条配送路径,为了在编码中反映车辆配送的路径,通过增加 $K-1$ 个虚拟计量中心的方法,分别用 $L+1, L+2, \dots, L+K-1$ 表示,将这些虚拟计量中心的整数加入原配送点集合, $L+K-1$ 个互不重复的自然数的随机排列就构成一个个体,并对应一种配送路径方案。例如,在一次配送中需要用3台车辆对9个二级库房进行配送,则可用1,2,...,11(1-9表示各二级库房,10,11表示计量中心,在实际计算中与0等同)这11个自然数的随机排列,表示物流配送路径方案,如个体“1,8,6,11,3,2,4,5,10,7,9”表示的配送方案为:路径1,0-1-8-6-11(0);路径2,11(0)-3-2-4-5-10(0);路径3,10(0)-7-9-0,需3台车辆配送。前后分别加入的0表示,车辆最终需要返回计量中心。

2.2 初始群体的确定

随机产生1至 $L+K-1$ 这 $L+K-1$ 个互不重复的自然数的排列,即形成一个个体。设群体规模为 N ,则通过随机产生 N 个这样的个体,即形成初始群体。规模在很大程度上决定了遗传算法寻找到最优解的可能性,但规模达到一定程度之后,再增加初始群体的规模则对结果影响很小,呈现侧抛物线的形状。选择范围一般会随配送路径点的总数量变化而进行调整,总的来说不会小于500。

2.3 适应度评估

对于某个个体所对应的配送路径方案,要判定其优劣,一是要看其是否满足配送的约束条件;二是要计算其目标函数值(即各条配送路径的长度之和)。

由于文中根据配送路径选择问题的特点所确定的编码方法(整数序列),隐含能够满足每个二级库房都

得到配送服务,且每个库房仅由1台车辆配送的约束条件,但不能保证满足每条路径上各库房的总需求量不超过汽车载重量及每条路径的长度不超过汽车单次配送的最大行驶距离的约束条件。为此,对算法中产生的每个配送方案,要对各条路径逐一进行判断,看其是否满足上述2个约束条件,若不满足,则将该条路径定为不可行路径(可以惩罚权重的方式来进行设定),最后计算其目标函数值。对于某个个体 j ,设其对应的配送路径方案的不可行路径数为 M_j ($M_j=0$ 表示该个体是一个可行解),其目标函数值为 Z_j ,则该个体的适应度 F_j ,可用下式表示:

$$F_j = 1 / (Z_j + M_j \times P_w) \quad (9)$$

式中, P_w 为对每条不可行路径的惩罚权重(该权重可根据目标函数的取值范围取一个相对较大的正数)。之所以使用惩罚权重,而不是直接将该不可行路径移除是考虑到在基因突变的过程中,不够优秀甚至不可行的父代也有可能产生优秀的子代。

在省中心的实际使用中,以插件的方式加入更多的约束条件,使适应度评估更具实用性。如某2地之间的高速公路正在做短期维护导致路堵严重,则可以临时添加1个约束条件,不允许走这条路径。

2.4 选择操作

将每代群体中的 N 个个体按适应度由大到小排列,排在前几位(参数 G)的个体性能最优,将它们直接复制进入下一代,并排在前位。下一代群体的其余个体的产生,则需要根据前代群体的 N 个个体的适应度,采用赌轮选择法产生。具体地说,就是按上代群体中各个个体的排名以轮盘法计算其被选择的概率。这样既可保证最优个体生存至下一代,又能保证适应度较大的个体以较大的机会进入下一代,同时允许部分劣质个体在突变后产生优质个体后进入下一代,避免过早收敛的问题。

2.5 染色体重组

对通过选择操作产生的新群体,除排在前 G 位的最优个体外,另 $N-G$ 个个体要运用单亲遗传算子进行染色体重组。文中选用多点基因换位算子实现染色体重组,现举例说明其操作过程:

(1) 设定基因换位次数(N_i),本例中设 N_i 为1。

(2) 在染色体上随机选取 N_i 对基因,并交换其位置。本例中设原染色体 A 为478563921,随机产生的第一对交换基因位为3和7,则基因换位后染色体 A' 变为438567921。

(3) 判断在基因换位后个体的适应值是否增加,若增加,则用新的个体取代原个体,进入下一代,否则原个体直接进入下一代。

(4) 本例中设 A' 的适应值大于 A 的适应值,则

A' 进入下一代。

2.6 终止准则

基因进化一般使用的终止准则包括以下几种:(1) 进化次数限制;(2) 计算耗费的资源限制(例如计算时间、计算占用的内存等);(3) 一个个体已经满足最优值的条件,即最优值已经找到;(4) 适应度已经达到饱和,继续进化不会产生适应度更好的个体;(5) 人为干预;(6) 以上 2 种或更多种的组合。文中使用进化次数限制来进行终止。

3 运行效果和参数设置分析

为了测试算法的效果,构建一个虚拟的环境,共有 9 个二级库房,分配了 3 辆车(最大容量均为 1)进行配送,分别采用穷举法、节约法以及单亲遗传算法进行最优路径求解。库房间里程以及需求数量如表 1 所示。

表 1 库房间里程及要求

名称	省中心	溧水	丹阳	句容	常州	金坛	溧阳	无锡	宜兴	常熟
里程	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	46.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	90.0	107.2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	27.0	52.4	50.8	-	-	-	-	-	-	-
4	136.0	107.1	66.0	108.9	-	-	-	-	-	-
5	100.0	70.2	76.1	83.2	50.4	-	-	-	-	-
6	100.0	59.7	106.2	98.7	71.9	62.6	-	-	-	-
7	183.0	153.7	99.9	142.9	59.7	97.6	114.6	-	-	-
8	136.0	95.1	141.6	135.1	50.7	61.3	44.4	81.8	-	-
9	223.0	194.0	139.8	182.8	99.4	137.4	158.2	86.9	144.6	-
需求	0	0.14	0.08	0.08	0.7	0.07	0.17	0.91	0.15	0.05

3.1 穷举法

在测试用机(普通双核)上,通过全排列的方式进行穷举,全部路径数量为 39 916 800 条,最佳路径长度为 1 072.6 km,用时为 15 s。如果是范围增加到 13 个二级库房,用时将会增加到 466 830 s。即使运行在小型机上,计算用时也是无法承受的。

3.2 节约算法

采用节约算法,可以得到如表 2 所示的配送方案。配送总里程为 1 295.6 km,配送车辆数为 3 台。

表 2 节约算法配送方案

配送线路	里程 / km	配载率 / %
计量中心 - 无锡 - 常熟 - 计量中心	492.9	96
计量中心 - 常州 - 宜兴 - 计量中心	322.7	85
计量中心 - 溧阳 - 金坛 - 丹阳 - 溧水 - 句容 - 计量中心	480.0	54

3.3 单亲遗传算法

定制化的单亲遗传算法参数设定:初始群体数量 1 000,进化次数 40,基因换位次数 1。运行 10 次之后,结果如表 3 所示。

表 3 单亲遗传算法结果

运行结果	次数	备注
1072.6	1	最优
1073.2	2	次优
1092.3	3	-
1095.0	2	-
1106.5	1	-
1118.7	1	-

平均每次计算用时为 0.03 s,其中有 1 次为最优解,2 次为次优解,其他解也比节约法的结果要好。其次优解配送路线如图 1 所示,配送方案如表 4 所示。

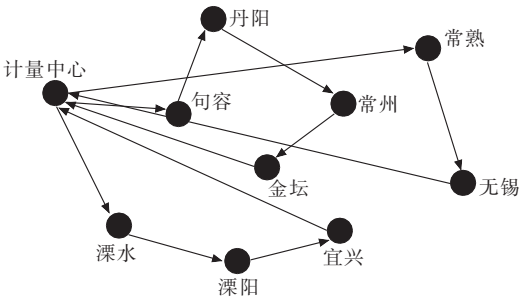


图 1 单亲遗传算法次优解配送路线

表 4 单亲遗传算法次优解配送方案

配送线路	里程 / km	配载率 / %
计量中心 - 常熟 - 无锡 - 计量中心	492.9	96
计量中心 - 溧水 - 溧阳 - 宜兴 - 计量中心	286.1	46
计量中心 - 句容 - 丹阳 - 常州 - 金坛 - 计量中心	294.2	93

3.4 结果比较

穷举法虽然必然能得到最优解,但由于效率原因不适用于生产环境。节约算法效率较高,但随着运输节点的增加,其寻优能力下降明显。单亲遗传算法不仅性能好,而且在寻优方面的表现明显超过了节约法。

3.5 参数设置分析

进化次数和初始群体的大小均会对遗传结果产生影响:初始群体数量如果太大,则会大大增加运算时间;如果较小,则需要更多的进化次数来弥补。

需要注意的是,初始群体的合适范围实际上与总的可能路径数量有关。当总路径数量在 4 000 万条时,初始群体数量在 1 000 左右即可满足要求,而总路径数量达到 4 亿时,初始群体要达到 4 000 左右才能满足要求。应避免因样本太少,相对于全局来说收敛过于

快速,从而忽略了最优解。以计量中心全部 72 个二级库房,使用 20 辆车来进行配送,预计初始群体需要达到 10 万,进化次数达到 4 000,计算结果就可以达到令人满意的效果。

若对最优解有较为强烈的要求,则应该设置一个中等的初始群体大小和进化次,再进行多次运算。

3.6 扩展应用

在实际使用中,可以采用插件的方式对算法进行定制,如将平均等时间加入到适应函数中,也可以动态地加入路况信息以得到更合理的配送路径^[4]。同时由于单亲遗传算法的效率非常高,故而可以在情况不明确(如配送车辆的数量,配送频率不确定)的情况下,进行多次计算,从而为不同的配送方案的评估提供参考信息。

4 结束语

在充分分析计量中心配送车辆调度需求的基础上建立了数学模型,不仅解决了传统遗传算法容易“早熟收敛”的问题,而且创新地采用了插件方式,更容易在求解过程中进行动态的约束添加,从而进一步提高算法可用性的寻优能力。算法的计算结果也表明了该算

法不仅性能卓越,而且其寻优性能非常突出。文中构造单亲遗传算法的思路是以整数编码方式为基础,添加了虚拟中心仓库来构造完整的路径表达式,该方法不仅可以在路径计算中使用,也可以作为求解其他组合优化问题的参考。

参考文献:

- [1] SZCZEBICKA H, BECKER M, SYRJAKOW M. Genetic Algorithms: A Tool for Modelling, Simulation and Optimization of Complex Systems[J]. Cybernetics and Systems, 1998, 29(7): 639-659.
- [2] SCHMITT LOTHAR M. 遗传算法理论, Theoretical Computer Science (259), 2001: 1-61.
- [3] SCHMITT LOTHAR M. 遗传算法理论(二), Theoretical Computer Science (310), 2004: 181-231.
- [4] 曹一家. 并行遗传算法在电力系统经济调度中的应用—迁移策略对算法性能的影响[J]. 电力系统自动化. 2002, 26(13): 23-27.

作者简介:

尹 飞(1978),男,安徽和县人,工程师,从事计量与自动控制相关系统研发工作;

李新家(1969),男,江苏泰州人,高级工程师,从事计量与自动控制相关系统研发工作;

祝永晋(1981),男,江苏六合人,工程师,从事计量与自动控制相关系统研发工作。

Research of Single-parent GA Algorithm on Power Measuring Tools Delivery

YIN Fei, LI Xin-jia, ZHU Yong-jin

(Jiangsu Electric Power Research Institute Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The problems existing in measuring tools delivery under the actual operation of the measuring center are discussed. In the view of the situation that measuring center has a lot of secondary level warehouses, all of which are distributed in whole province, and need to be delivered uniformly, how to apply the mathematical model of the single-parent GA algorithm for measuring center is discussed. The comparison shows that the single-parent GA algorithm could achieve good results on measuring tools delivery of measuring center.

Key words: measuring tools delivery; vehicle routing problem; single-parent GA algorithm

(上接第 42 页)

2008(13): 106-107.

[9] 何衍庆,黎 冰,黄海燕. 工业生产过程控制[M]. 2 版. 北京:化学工业出版社,2010.

[10] 赖炎连. 最优化方法[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

[11] 严 凌. 大型 0-1 目标规划的启发式算法[J]. 上海理工大学学报,1998(20): 254-256.

[12] 潘 君. 整数规划的分支定界法及其 MATLAB 实现[J]. 科技

信息,2008(7): 21-23.

作者简介:

张志福(1977),男,江苏新浦人,工程师,从事电力调度管理工作;

苏宜强(1985),男,江苏赣榆人,工程师,从事电力市场和需求侧管理研究工作;

曹海猛(1977),男,江苏盐城人,工程师,从事电力调度工作。

The Research on Model and Algorithm of Load Optimization

ZHANG Zhi-fu, SU Yi-qiang, CAO Hai-meng

(Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222004, China)

Abstract: The enterprise can avoid peak electricity and save electricity costs through optimizing load operation mode with tou price. Important factors that affect optimal load running in production process are introduced. The load optimization model based on tou price is built. Heuristic method for solving is proposed in this paper. The example shows that load optimal operation model and its algorithm based on tou price are realistic and have the practicality.

Key words: demand side management; load optimal operation; tou price

远动程序化操作若干问题的分析

汤震宇¹, 梁 雯², 代小翔¹, 尤小明¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京, 211102;

2. 江苏海能电力设计咨询有限责任公司, 江苏 南京 210028)

摘 要:介绍了调度程序化操作涉及的各个关键技术环节,给出了远动装置作为站控层集中式程序化操作服务器在设备态定义和传输、操作票号的命名和使用、操作票的执行、过程信息的交互、操作防误闭锁的实现以及操作预演等环节的设计方案,并设计了远动通信的过程细节,结合工程实例和运行经验展望了未来调度程序化操作的应用前景。

关键词:程序化操作;远动;变电站自动化;操作票

中图分类号:TM764

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0047-03

程序化操作(也叫顺控、顺序控制)已经是智能变电站的基本需求,是智能电网大运行体系的重要技术支撑,可以实现变电站无人值班操作,起到提高操作正确性、简化管理流程的作用^[1]。程序化操作的关键技术包括设备态的定义和传输、操作票号的命名和上下贯通、操作票的定义和传输、操作票的执行和过程信息交互、操作的防误闭锁、组合票和二次票、操作预演。文中以远动装置作为程序化操作服务器就上述各技术点的设计实现展开论述。

1 程序化操作的过程设计

1.1 设备态的定义和传输

间隔设备态用双字节整型数来表示,采用其 bit0~15 共 16 位来表示该间隔的 16 个基本设备态,间隔运行的真实态值就用这 16 个基本设备态来组合。该定义模式可以表达间隔同时处于 2 个设备态的情况,例如线路在两段母线间进行热倒操作过程中同时处于正母运行态和副母运行态。设计中可以考虑采用 0 表示间隔的不确定态(通过运算无法得出符合规范的设备态值),并有单独的品质描述。

间隔设备态应该在电网监控系统范围内统一编排定义,统一命名,不需要工程现场去编排设计,主子站均只需要将规范中指定的设备态值拿过来用即可。

设备态值的远动通信采用遥测传输,传输过程完全遵循 IEC101 和 IEC104 标准规则,可以支持变化遥测主动上送、站召唤应答上送、循环主动上送等方式,遥测类型可以支持整型、短浮点,遥测的品质定义和普通遥测一致。设备态遥测的变化门槛值应该小于等于 1。

1.2 操作票的定义和传输

操作票存放在变电站远动机上,操作票号的命名应该包括操作对象编号、源态、目标态信息,操作对象

编号包含厂站编号和间隔编号。操作票号格式为厂站编号_间隔编号_源态_目标态。操作票号的命名规则应该在电网监控系统范围内统一。

操作票号是程序化操作整个过程的唯一依据。操作票号在程序化操作过程中上下贯通传递,不另外做映射关系或者配置文件来维护操作票号和操作本身的关系。

操作票号的上下贯通原则举例如下,例如采用“厂站 A_间隔 1_源态_目标态”作为厂站 A 间隔 1 的某张操作票的票号,则:(1)主站在 HMI 上操作的时候就形成“厂站 A_间隔 1_源态_目标态”字段作为操作票号;(2)主子站通信报文采用该票号字符串作为报文的识别字段;(3)厂站端程序化操作服务器使用该票号作为操作识别依据;(4)操作票文件的编辑存储使用该票号作为命名依据。操作票文件的命名在主站、子站是完全一样的。操作票号上下贯通于程序化操作的整个过程,不需要另外人工配置和维护映射关系。

厂站内的操作票格式和具体的站内通信协议和操作对象有关,不同的厂站不同厂家的监控系统可以有不同的实现办法,从调度的角度也没必要对站内封闭的监控网络的操作命令进行强制性规定。

主子站之间传输的操作票应该明确其格式,目前可以考虑的操作票格式有 XML 和 TXT 文本两种,XML 是国际通用的标记语言,但是当前的工程实例中均使用 TXT 格式,显示直观简单。操作票的格式举例如下。

XX 线路从副母热备用到副母冷备用的操作票实例:

上传时间:2012 年 03 月 12 日 09 时 54 分 43 秒

操作票任务名称:从副母热备用到冷备用

操作步骤数:2

步骤 001:拉开虎陆 25263 线路刀闸

步骤 002:拉开虎陆 25262 副母刀闸

操作票传输采用 IEC104 扩展报文 ASDU116 的文件传输附加数据包实现^[2],IEC104 扩展 ASDU116 的结构如图 1 所示。扩展报文不仅仅为操作票文件传输设计,而是作为程序化操作、文件传输、IEC103 通用分类服务的统一入口。

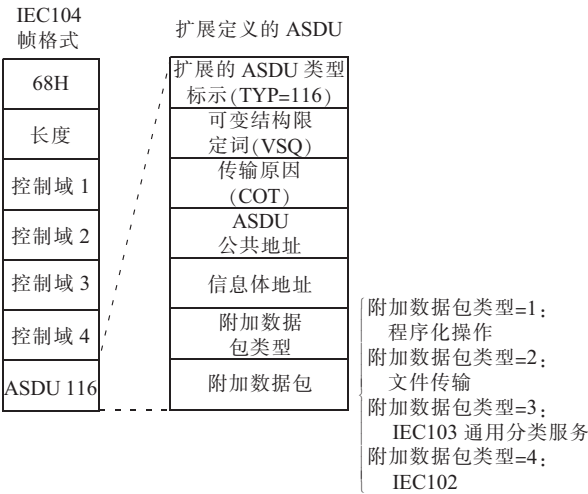


图 1 IEC104 扩展 ASDU116 的结构

操作票文件传输过程如图 2 所示。

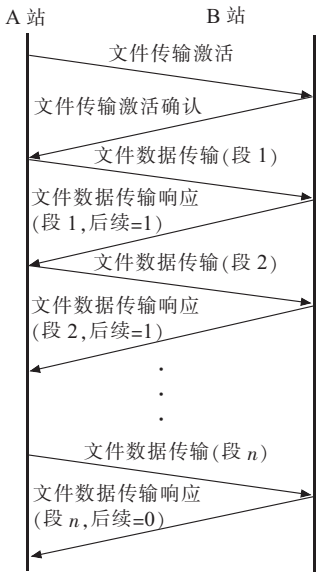


图 2 文件传输过程

1.3 操作票的执行和过程交互

操作票的执行和过程信息交互采用 IEC104 扩展 ASDU116 中的程序化操作附加数据包来实现。该报文可以完整实现程序化操作的启动、急停、继续、撤销、确认等交互操作,可以传输操作肯定确认、操作否定确认、单步操作成功、单步操作失败、信息提示、失败原因、操作结束等过程信息。随着高级应用的发展和无人值班模式的推广,过程信息的交互会变得越来越重要,调度端运行监视和操作管理需要知道操作过程的完整信息,扩展的 ASDU116 提供了过程交互的丰富空间,对将来可能需要的过程信息也可以灵活补充而不需要

对 IEC104 标准做很多特殊定义。

操作终端如测控装置等判断出来的操作失败的原因如联闭锁判断未通过、操作回路失电等信息可以传输到程序化操作服务器,这些信息上送到调度端将对运行监控有极大帮助。

控制方向的程序化操作命令如表 2 所示。其中,操作限定词可以表达操作启动、预演启动、操作急停、操作继续、操作撤销、肯定确认、否定确认等信息。

表 2 控制方向的程序化操作命令

字节	报文内容	说明
1	操作标识	1: 程序化操作命令
2	操作对象编号长度	x 个字节
$3-(2+x)$	操作对象编号	不带结束符
$(2+x+1)-(2+x+2)$	源态	低字节在前
$(2+x+3)-(2+x+4)$	目标态	低字节在前
$(2+x+5)-(2+x+6)$	步骤号	从 1 开始,0 无意义,低字节在前
$2+x+7$	操作命令限定词	操作命令描述

监视方向的过程信息报文如表 3 所示。其中,过程信息限定词可以表达操作结束、肯定确认、否定确认、操作成功、操作失败等信息。操作过程主子站交互如图 3 所示。

表 3 监视方向的过程信息报文

字节	报文内容	说明
1	操作标识	2: 程序化操作命令
2	操作对象编号长度	x 个字节
$3-(2+x)$	操作对象编号	不带结束符
$(2+x+1)-(2+x+2)$	源态	低字节在前
$(2+x+3)-(2+x+4)$	目标态	低字节在前
$(2+x+5)-(2+x+6)$	步骤号	从 1 开始,低字节在前
$2+x+7$	过程信息限定词	过程信息描述

1.4 操作的防误闭锁

建议采用的程序化操作防误闭锁策略为站控层五防结合间隔层的联闭锁。远动机的程序化操作服务器可以增加“五防校验投退”的控制字,用于设置是否需要经过站控层五防。站控层五防可以在远动中实现,也可以在站内其他中心实现,通过站控层通信总线进行五防校验。操作防误闭锁如图 4 所示。

1.5 组合票和二次票

组合票的组合工作建议由主站实现。主子站之间的交互过程是基于典型票,这样交互过程形式简单、意义明确,可以实现过程的标准化。组合票的操作在通信过程上表现为典型票的简单组合。

二次票是单独的一种特殊操作票,仅包含保护等的二次操作内容,如定值区切换、定值修改、软压板投

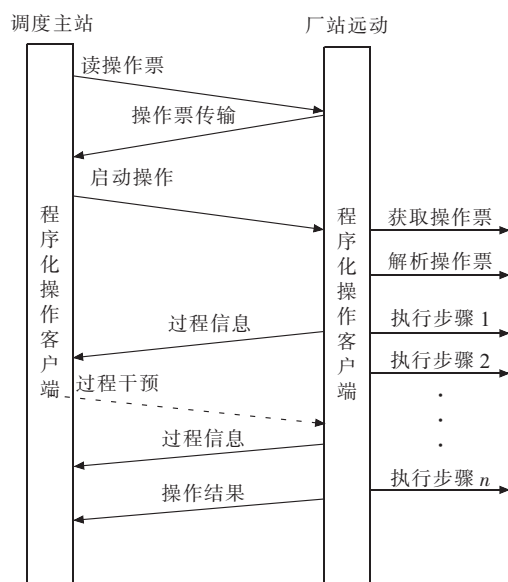


图3 程序化操作过程

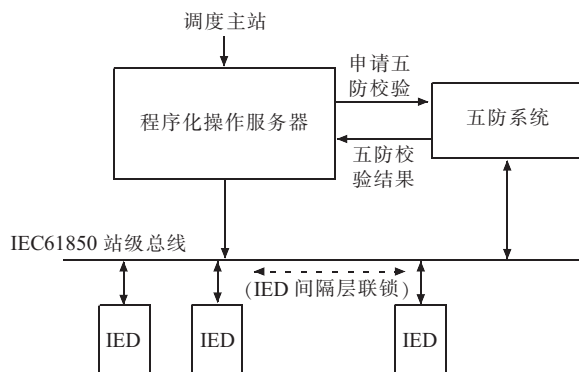


图4 程序化操作防误闭锁示意图

退等。二次票主要是在运行方式改变时可能用到。一次票中也有可能包含有二次操作内容,但是一次票是和设备态的变化关联的,而二次票的操作前后不会导致设备态的变化。因此二次票的票号无法用正常的源态目标态来表示,必须在系统内指定另外的编号来识别,并且在源态目标态中有相应的标志可以识别出是一次票还是二次票。

二次票的操作内容目前主要涉及定值和定值区号的修改,该操作应该在主站采用人工核对人工确认的办法实现。在目前的阶段,不管是从通信的角度还是从管理的角度,完全自动实现定值和定值区号的校验是不现实的。定值、定值区等保护数据的传输和修改可以通过扩展定义的 ASDU116 的 IEC103 通用分类附加数据包实现^[3,4]。

1.6 操作票的预演

操作票的预演主要实现 2 个目标:验证操作票的正确性和验证操作票执行的条件是否具备。典型票的正确性已经在调试验收时得到验证,在运行时典型票的预演意义不大。组合票的预演也只能在站控层程序化操作服务器上模拟实现,不能预演到间隔层测控装

置,在一定程度上预演意义不是很大,所以一般调度程序化操作不做预演要求。

操作票的预演是通过模拟数据库实现的,就是在程序化操作服务器建立模拟库,根据操作票的逐步操作模拟产生的数据效果,并同时计算相应的设备态,将设备态值上送主站,模拟操作的整个过程。

2 工程应用

程序化操作已经在国网和南网的若干个站开展了试点,但一般是作为技改试点,目前还没有统一的标准和规范。在试点工程中有以下几个主要的问题值得注意:(1) 操作票号的命名和使用往往需要借助于多重映射,如采用纯粹数字编号的组合来表示操作对象和源态目标态,主子站均需要创建和维护该编号和实际对象之间的映射,这造成一定的工作量和运行风险。(2) 操作过程信息不能完整上送,或者主站不能正确接受和显示。操作过程信息交互其实是非常重要的。(3) 防误闭锁考虑得不够。对调度程序化操作没有从系统的角度去对调度的操作进行防误闭锁的整体设计。(4) 程序化操作的技改项目多但是实际运行中使用的较少,往往仅仅止于项目的验收。

3 结束语

程序化操作将是智能电网运行体系的重要特征,文中阐述的方案能够有助于解决目前存在的问题,如果能在电网运行单位形成规范,并在工程中切实关注并投入实用,不断积累经验和改进过程,对提高运行水平,建设高效的监控系统有着举足轻重的作用。

参考文献:

- [1] 王文龙,胡邵谦,汤震宇,等.程序化操作在变电站中实现的几个关键问题[J].电力系统自动化,2008,32(22):66-68.
- [2] DL/T634.5104-2002,远动设备及系统第 5-104 部分传输约采用标准传输协议子集的 IEC60870-5-101 网络访问[S].
- [3] 丁泉,朱来强,胡道徐,等.变电站程序化操作及远动装置执行[J].电力自动化设备,2007,27(8):119-121.
- [4] DL/T667-1999,远动设备及系统第 5 部分传输规约第 103 篇继电保护设备信息接口配套标准[S].

作者简介:

汤震宇(1975),男,江苏常州人,工程师,从事变电站自动化系统、智能远动通信、通信协议方面的研究和开发工作;
梁雯(1983),女,安徽宿州人,工程师,从事电力系统变电站一次设计以及变电站自动化工作;
代小翔(1979),男,四川宁南人,工程师,从事电力系统自动化技术及通信工作;
尤小明(1983),男,湖北襄樊人,工程师,从事电力系统自动化通信工作。

直流站换流变压器带负荷测试方法

张 剑¹, 肖宇华², 袁宇波¹, 黄浩声¹, 张佳敏¹, 李 鹏¹

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘 要:在换流变启动调试中, 需要通过测量 CT 二次侧电流的大小与相位校验 CT 的极性与变比。推导了换流站传输不同有功时无功的计算方法, 并通过政平换流站实测数据验证了推导过程的正确性; 提出了换流变 CT 二次侧电流的计算方法; 当传输有功为 10% 的额定有功时, 对比换流变 CT 二次侧电流实测值与理论计算值的大小和相位, 验证了换流变 CT 变比与极性的正确性。

关键词:高压直流输电; 继电保护; 电流互感器

中图分类号: TM714

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)01-0050-03

江苏地区某 500 kV 直流站极 I、极 II 换流变和 5012CT、5013CT、5031CT、5032CT 变比为 4 000/1, 换流变网侧套管 CT 变比为 2 000/1, 阀侧套管 CT 变比 3 000/1。换流变电量保护当前集成在极控制保护 PCP 中, 保护不经切换逻辑直接动作出口, 存在误动风险。根据国家电网公司调度中心起草的《换流站直流系统保护装置标准化规范》的要求, 每极改造为独立的 2 套南瑞继保 PCS977D 装置, 按照完全双重化配置方式, 每套保护均采用“启动+保护”的方式实现。在政平换流站启动调试过程中, 需要对换流变压器带负荷测试以校验换流变压器各 CT 的极性与变比。由于直流换流变交流侧的谐波给带负荷测试的精度增加了困难, 因此研究直流换流变带负荷测试具有工程实用价值。在该次启动调试过程中先通过直流控制系统传输 10% 的额定有功, 然后测量各 CT 二次侧电流的大小与相位, 最后通过比较电流大小与相位的测量值与理论计算值来校验 CT 的变比与极性的正确性。

1 无功计算方法

在传输 10% 的额定有功时, 计算各 CT 二次侧电流之前首先需要计算换流站吸收的无功。无功计算方法如下。六脉动整流器理想空载直流电压^[1]为:

$$U_{d01} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_1 \quad (1)$$

式中: U_1 为换流变压器阀侧绕组空载线电压有效值。由式(1)可得:

$$U_1 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{d01} \quad (2)$$

当整流站交流母线上装设性能完好的滤波器时, 可以认为谐波电流均被滤波器所吸收, 流入交流系统的为基波电流, 此时换流器的功率因数可近似认为是基波电压和基波电流的相位差 φ_1 角所决定的 $\cos \varphi_1$, 在忽

略整流器损耗的情况下, 整流器交流侧的基波有功功率等于其直流功率, 可用下式表示^[2]:

$$P_1 = P_{d1} = U_{d1} I_d = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (3)$$

式中: P_1 为交流侧基波功率; P_{d1} 整流侧的直流功率; U_{d1} 为整流侧的直流电压; I_d 为整流侧的直流电流。由式(3)可得:

$$\cos \varphi_1 = \frac{U_{d1} I_d}{\sqrt{3} U_1 I_1} \quad (4)$$

当忽略换相过程时, 六脉动整流器阀的导通顺序为 (6, 1), (1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 5), (5, 6), (6, 1) 等, 每组阀的导通角为 60° ^[3,4], 当阀 1 导通时, 换流变阀侧 A 相绕组向换流器注入的电流近似为 I_d ; 当阀 4 导通时, 换流变阀侧 A 相绕组向换流器注入的电流近似为 $-I_d$; 其余时刻换流变阀侧 A 相绕组向换流器注入的电流近似为 0。一个开关周期内换流变阀侧 A 相电流波形如图 1 所示。

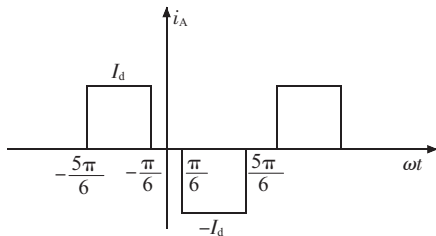


图 1 换流变阀侧 A 相绕组波形

采用傅立叶级数展开可得换流变阀侧 A 相电流基频峰值为:

$$I_p = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_A \sin \omega t d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} I_d \sin \omega t d\omega t = -\frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad (5)$$

换流变阀侧 A 相电流基波电流的有效值为:

$$I_1 = \frac{|I_p|}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (6)$$

由式(6)可得:

$$I_d = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_1 \quad (7)$$

将式(2)、(7)代入式(4)可得:

$$\cos \varphi_1 = \frac{U_{d1}}{U_{d01}} \quad (8)$$

由式(8)可得:

$$\tan \varphi_1 = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} = \sqrt{\left(\frac{U_{d01}}{U_{d1}}\right)^2 - 1} \quad (9)$$

整流器吸收的无功为:

$$Q_{C1} = P_{d1} \tan \varphi_1 = P_{d1} \tan \varphi_1 = \sqrt{\left(\frac{U_{d01}}{U_{d1}}\right)^2 - 1} \quad (10)$$

同理,对于逆变侧有:

$$Q_{C2} = P_{d2} \tan \varphi_2 = P_{d2} \tan \varphi_2 = \sqrt{\left(\frac{U_{d02}}{U_{d2}}\right)^2 - 1} \quad (11)$$

式中: P_{d2} 为逆变侧传输的有功; φ_2 为逆变器交流侧的基波电压、电流的相角差; U_{d2} 为逆变侧的直流电压; U_{d02} 为逆变器直流侧空载直流电压。

政平换流站为十二脉波换流器,直流线路电压为 515 kV 与 500 kV,计算即得 U_{d01} 为 541.62 kV, U_{d1} 为 515 kV, U_{d2} 为 500 kV。根据式(10)、(11),可以得到当传输有功为 300 MW 时,整流站吸收的无功为 96.7 MV·A,逆变站吸收的无功为 124.7 MV·A,换流站吸收的总的无功为 221.4 MV·A。政平换流站在传输不同有功时无功的测量值与理论计算值如表 1 所示,计算误差如图 2 所示,由图 2 可以看出,最大误差为 13%,最小误差为 0.5%,在工程上满足精度要求。

表 1 逆变站有功和无功实测与理论计算数据

实测有功 / MW	实测无功 / (MV·A)	计算无功 / (MV·A)
334	133	138.9
414	163	172.1
701	274	305.1
1 012	428	481.4
1 280	571	622.3
1 380	627	658.2
1 750	838	891.5
2 448	1 287	1 290.7
2 452	1 299	1 305.2
2 830	1 587	1 591.3
3 000	1 600	1 642.1

2 CT 二次侧电流计算方法

政平换流站极 I CT 配置如图 3 所示,各 CT 二次侧电流的计算方法如式(15)所示。

$$I = \frac{P - jQ}{\sqrt{3} \dot{U} \times 4K} \quad (15)$$

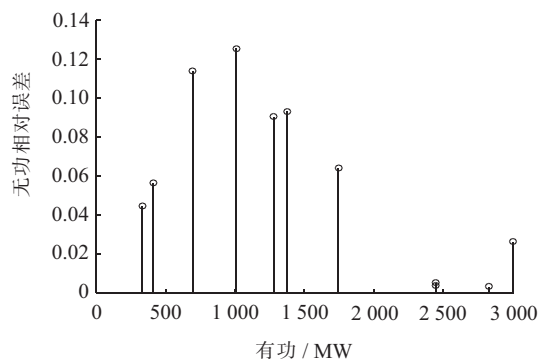


图 2 政平换流站无功计算值与实测值误差

式中: P, Q 分别为换流站注入交流系统的有功、无功; U 为交流母线电压; K 为 CT 变比;政平换流变极 I 各 CT 二次侧电流的测量值与理论计算值如表 2 所示。政平换流站 CT 的配置情况如图 3 所示。

表 2 政平换流站极 I CT 的测量值与理论值

模拟量 / 变比	模拟量名称	测量值		计算值	
		幅值 / mA	相角 / (°)	幅值 / mA	相角 / (°)
11A/4000	交流侧 1 支路电流 (I_{A1})	42.7	164.6	46.9	157.4
		43.9	283.9	46.9	277.4
		43	43.4	46.9	37.4
12A/4000	交流侧 2 支路电流 (I_{A2})	42.7	165.4	46.9	157.4
		44.1	283.3	46.9	277.4
		43.3	43.6	46.9	37.4
IACY1A/2000	交流星接绕组差动套管电流 (I_{A3})	45.2	160	46.9	157.4
		45.7	260	46.9	277.4
		45.2	43.3	46.9	37.4
IACD1A/2000	交流角接绕组差动套管电流 (I_{A4})	45.6	160	46.9	157.4
		47.2	282	46.9	277.4
		45	42	46.9	37.4
IACY2A/2000	交流星接绕组差动电流 (I_{A7})	45.9	344	46.9	337.4
		45	103	46.9	97.4
		45	221	46.9	217.4
IACD2A/2000	交流角接绕组差动电流 (I_{A8})	45.6	344	46.9	337.4
		47	103	46.9	97.4
		44.5	221	46.9	217.4
IVY1A/3000	阀星侧电流 (I_{A5})	79.3	325	77.9	337.4
		80.8	132	77.9	112.4
		80	195	77.9	217.4
IVY2A/3000	阀星侧绕组差动电流 (I_{A9})	68	343	67.5	337.4
		70	102	67.5	112.4
		66	222	67.5	217.4
IVD1A/2000	阀角侧电流 (I_{A6})	79	161	67.5	172.6
		77	275	67.5	292.6
		80	42	67.5	52.6
IVD2A/2000	阀角侧绕组差动电流 (I_{A10})	67	163	67.5	172.6
		71	282	67.5	292.6
		66	41	67.5	52.6

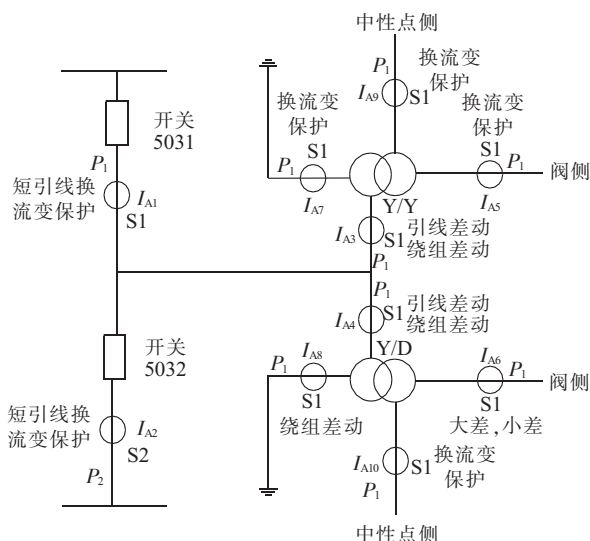


图 3 政平换流站极 I CT 的配置

可见, 各 CT 二次侧电流的测量值与理论计算值符合较好, 从而验证了 CT 的极性与变比的正确性。

3 结束语

推导了换流站传输不同有功时无功的计算方法,

通过实测数据验证了该方法的正确性。提出了 CT 二次侧电流的计算方法, 通过与实测数据的对比验证了政平换流站 CT 极性与变比的正确性。

参考文献:

- [1] 陈 坚. 电力电子学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [2] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] 冯玉生, 李 宏. 电力电子变装置典型应用实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 王兆安, 黄 俊. 电力电子技术 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.

作者简介:

- 张 剑(1982), 男, 湖北咸宁人, 工程师, 从事继电保护研究工作;
肖宇华(1987), 男, 江苏江阴人, 高级工程师, 从事继电保护研究工作;
袁宇波(1975), 男, 江苏丹阳人, 高级工程师, 从事继电保护研究工作;
黄浩声(1979), 男, 浙江温岭人, 工程师, 从事继电保护研究工作;
张佳敏(1986), 男, 江苏靖江人, 工程师, 从事继电保护研究工作;
李 鹏(1982), 男, 陕西周至人, 工程师, 从事继电保护研究工作。

Testing Method with Loads of Direct Current Commutation Transformer

ZHANG Jian¹, XIAO Yu-hua², YUAN Yu-bo¹, HUANG Hao-sheng¹, ZHANG Jia-min¹, LI Peng¹

(1. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Nanjing Power Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: In the testing of commutation station, the polarity and transformation ratio of CT need to be obtained by measuring the current magnitude and phase of the second side of CT. In this paper, calculation method of reactive power when transmitting different active power is inferred, of which the rightness is verified by testing data in the case of Zhengping commutation station. Calculation method of the second side of CT of converter transformer is proposed. Rightness of CT polarity and transformation ratio is confirmed by comparison with current value and calculated value of the second side of CT of testing data when transmitting 10% of nominal active power.

Key words: high voltage direct current transmission; relaying; current transformer

(上接第 49 页)

Analysis of some cases in design of RTU Sequence Operation

TANG Zhen-yu¹, LIANG Wen², DAI Xiao-xiang¹, YOU Xiao-ming¹

(1. Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Jiangsu Haineng Power Design Consulting Co. Ltd., Nanjing 210028, China)

Abstract: Some key problems in the realization of RTU sequence operation are introduced, this paper gives the design scheme of RTU devices as station level centralized sequence operation server definition and its transmission, naming and using of operation order number, execution of operation, process information interchange, implementation of anti-operation lockout, and operation rehearsal, remote communication process details are also designed. Combined with engineering examples and operating experience, the future scheduling programming operation implementation prospect is looked into the distance.

Key words: sequence operation; RTU; substation automation; operation order

智能继电保护装置的自动测试方法

胡再超,姚 亮,张 尧

(国电南京自动化股份有限公司,江苏 南京 211100)

摘 要:通过比较传统继电保护装置测试的方法,介绍了一种基于 IEC 61850 通信标准,应用在智能变电站继电保护的自动测试方法。该方法根据装置中标准化的逻辑节点和数据对象面向对象设计模块化测试单元,具有互操作性和信息共享,能适用于不同厂家的继电保护装置。同时针对智能化继电保护装置的特点,功能测试中结合采样值(SV)和面向通用对象的变电站事件(GOOSE)报文分析,保证产品开发和工程投运的质量和进度。其中测试过程中自动设置定值参数及功能投退、自动切换测试项目、自动保存试验数据、自动分析测试结果和生成评估报告,从深度和广度上提高测试工作的效率。

关键词:IEC 61850;智能变电站;继电保护;自动测试

中图分类号:TM744

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0053-03

随着电力系统发展及通信技术进步,数字化变电站越来越受到专业人员的重视。经过前期智能变电站试点工程的探索,在电力系统内部,相关智能变电站的设计、生产、建设标准已经初步完善。2012 年以来智能变电站的建设速度大大加快,其建设规模越来越大。在继电保护设备从生产到运行的各个环节,自动化程度越来越高,测试作为研发生产、变电站投运前的重要环节,由于自动化程度还不高,导致继电保护进行全面测试需要占用很多的资源,工作效率较低,即便如此也不能保证对保护设备测试的充分性。尤其是智能变电站区别于传统变电站的交流接入、开关量输入和输出,取消了传统电缆连接,采用光纤通信技术,模拟量和开关量都不再是电信号,而以报文方式传输,因此亟需对目前测试方法进行改进。通过自动化测试,分析动作报文和监视智能终端动作接点,测试每一个环节,提高研发效率和工程质量。

1 传统继电保护测试的现状

目前继电保护测试通常是基于保护原理的单一功能测试,在装置层面的系统测试需要测试人员全程参与,而且测试项目有限^[1,2]。以距离保护为例,其测试流程通常如下:(1)将测试仪相应的电压、电流输出端子接到保护的电压、电流输入端子上;保护装置跳、合闸输出接点连接到测试仪的开关量输入端。(2)根据不同测试项目在保护装置上修改定值参数及压板。(3)选择测试应用软件中距离保护功能测试组件,设置试验参数:故障类型、故障阻抗、故障电流及故障时间和方向等,确认上述测试项目,联机测试。(4)评估当前项目结果是否正确,测试人员记录测试数据。然后进入下一个测试项目,再重复第(2)~(4)

步的过程。

由此可见整个测试过程每个测试环节都需要人工参与,工作效率不高,而且对测试人员的水平有较高要求,在整理报告中的大量试验数据时也往往容易出现人为错误^[3]。

2 智能继电保护的特点

智能变电站是由智能化一次设备和网络化二次设备分层(过程层、间隔层、站控层)构建,建立在 IEC 61850 通信标准基础上,能够实现变电站内智能电气设备间信息共享和互操作的现代化变电站。智能变电站是应用 IEC 61850 进行建模和通信的变电站,体现在过程层设备数字化、整个站内信息网络化和开关设备智能化。智能继电保护相对传统继电保护装置,其模拟量输入采用采样值(SV)报文传输和开关量信号通过面向通用对象的变电站事件(GOOSE)报文传输,不再采用电缆接线的方式将跳闸信号、电压电流跟测试仪连接,因此传统的继电保护测试仪不能满足智能继电保护测试的需求。对于采用 SV 和 GOOSE 的继电保护装置来说,需要开发全新的测试系统,解读不是很直观的报文,将抽象的信息实例化。由于智能继电保护基于 IEC 61850 标准开发,采用统一的面向对象模型和自我描述,满足应用互操作和信息共享的要求,因此自动测试软件只要解析装置中智能电子设备的能力描述(ICD)文件就能适应于不同设备制造厂家生产的不同保护装置。

3 基于 IEC 61850 智能变电站继电保护自动测试

传统继电保护自动测试由通信控制程序和测试平台程序组成。通信控制程序与保护装置通信实现修改

保护定值、投退功能压板、上传保护动作信息功能。测试平台程序除了实现自动测试项目,在完成测试后自动生成文本格式的报告,还提供与通信控制程序的通信接口和规约。通过通信控制程序和测试平台程序相配合,实现继电保护的自动测试。该自动测试系统的工作流程如图 1 所示,可分为以下 5 部分。

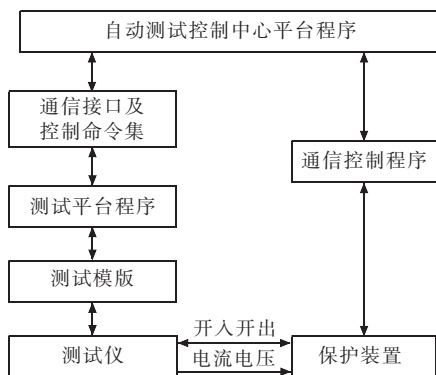


图 1 传统自动测试系统结构

(1) 自动测试控制中心平台连接保护装置和测试仪;(2) 测试平台程序作为测试项目执行单元输出模拟量和开出量,按照测试方案配置测试项目;(3) 由控制中心平台发起自动测试功能,通信控制程序实现保护装置的控制和接受信息反馈;(4) 控制中心平台根据测试项目和装置反馈信息智能评估保护动作行为是否正确,并自动进入下一步的测试项目,直至完成保护装置全部测试项目;(5) 控制中心平台完成保护装置测试后,自动生成测试报告。

传统测试方法的关键是测试模板的设计,测试模板主要包括 2 个部分:一是与保护装置相关的定值、压板等功能设置;二是与测试仪相关的输入输出配置。对于每一个继电保护功能都需要设计对应测试模板,再以距离保护为例,其需要测试其阻抗继电器测量精度及边界范围、时间继电器精度及阻抗定值、时间定值整定范围边界。因此需要在保护测试前建立测试模板库,并验证模板文件的正确性和完整性。模板库形成后,作为该装置的测试用例,但在后续软件版本的测试中,仍需要根据软件的变动情况做相应调整^[4]。

4 智能变电站继电保护自动测试方法

智能变电站的继电保护装置应用 SV 和 GOOSE 报文传输,因此通信控制程序要实现解析 ICD 文件对 SV、GOOSE 信息实现自动配置,测试仪需既可以支持 IEC 61850-9-1 和 IEC 61850-9-2 帧格式发送 SV、收发 GOOSE 信息,也能输出符合 IEC 60044-7/8 规范的 FT3 格式的 SV,订阅/发布多个不同制造报文规范(MMS)和 GOOSE 控制块信息,实现对保护装置及智

能操作箱的测试^[5-8],如图 2 所示。

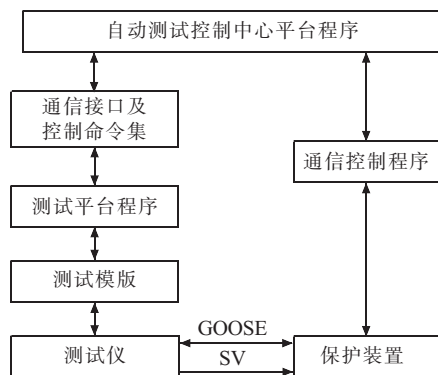


图 2 智能化自动测试系统结构

在对指定装置测试过程中,传统测试方法已基本实现了自动化测试,但仍需人工维护测试模板。该模板对指定的装置可以重复利用,但是不同软件版本或保护装置,由于保护功能和定值差异,测试模板需要重新编写或修改,当测试模板库较多时,测试模板维护工作量就很大。基于 IEC 61850 通信标准,各个厂家的保护装置具有信息共享,可实现互操。因此可以通过读取保护的 ICD 文件,根据文件中保护逻辑节点(LN)及 LN 对应的数据对象(DO)实现自动生成测试模板,能适用于不同功能的保护装置。该方法提高了自动测试的适应性,简化了模板文件的设计工作,提高了工作效率。

4.1 通信控制程序

通信控制程序与保护装置连接,根据自动测试控制中心命令对保护装置进行以下操作:(1) 整定定值、投退压板;(2) 上召保护装置动作事件、录波并保存;(3) 读取保护装置的 ICD 文件。

其通过自动测试控制中心平台接受测试平台的反馈信息:(1) 接收控制中心平台的信息是否成功,成功则继续进行自动测试,失败则提示通信失败,自动测试结束;(2) 装置运行状态异常或告警,若返回装置告警,则立即停止测试,记录装置告警事件和日志等;(3) 根据自动测试项目,记录保护装置的动作信息和录波数据。自动测试控制中心平台界面如图 3 所示。

4.2 保护测试模板的自动生成

利用通信控制程序解析 ICD 文件,根据 ICD 文件中不同的 LN 种类调用基础测试模块,再通过 LN 中 DO,对定值、压板做详细的功能测试,例如解析 LN 距离(Distance, PDIS)就可以调用阻抗测试的模块,再根据“Phstr”相间距离 I 段定值,结合“Rislod”负荷限制电阻定值、“LinAng”线路正序灵敏角等参数,“Phstr”中数据属性(DA)“setMag”表示阻抗定值,“units”表示单位,“minVal”表示定值下限,“maxVal”表示定值上限,“stepSize”表示定值变化步长等^[9],其他不再赘述,依此就可以生成详细的测试用例,自动实现相间距离

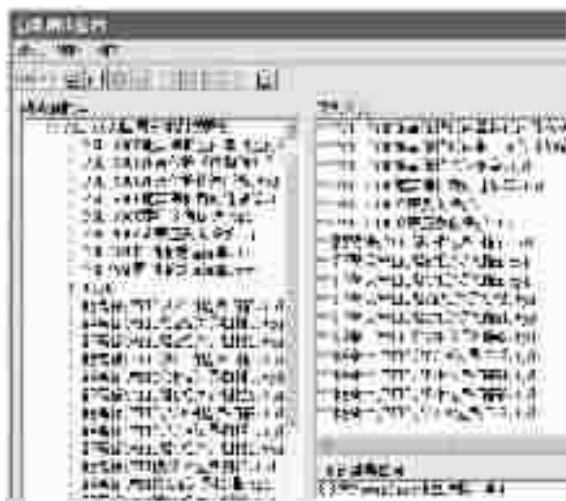


图3 自动测试控制中心界面

I 段阻抗边界的测量精度和段动作时间的测试。

4.3 测试平台程序

自动测试控制中心通过通信接口及控制命令集与测试平台程序交互。测试平台程序解析测试模板,根据测试项目实现自动测试启停和切换,并记录测试数据。

测试平台程序接受测试仪的反馈信息,每次测试判断接收控制程序的信息成功与否,若测试项目结果出现非预期状况,测试仪立即上送异常信息告知测试平台该项测试失败,测试模板中全部项目完成后,告知测试平台。测试平台根据这些反馈信号实现测试,通过与自动测试控制中心通信,实现测试记录。

4.4 MMS 和 GOOSE 报文解析

MMS 报文解析包括命令过程分析、MMS 到 ACSI(抽象通信服务接口)映射分析、各种信息与应用数据的关联分析,报文异常告警,监测报文是否符合每种服务定义的报文格式,并按顺序记录报文。正在测试的保护装置中遥信数据集如图 4 所示。

图4 MMS 中遥信量数据集

GOOSE 报文解析包括检查报文 APDU(应用协议数据单元)和 ASDU(应用服务数据单元)格式是否符合标准,通信过程分析(T_0 , T_1 , T_2 的时间间隔和对应的 StNum 与 SqNum 变化关系),判断报文是否存在发布超时、帧不连续、丢帧或者错序等。正在测试的保护装置中 GOOSE 数据集如图 5 所示。

4.5 测试报告的生成

图5 GOOSE 数据集

根据测试结果自动测试控制中心平台程序应用文本格式自动输出测试报告。同时文本格式报告有很好的可读性和兼容性,便于进一步整理分析和归纳总结。

5 结束语

基于 IEC 61850 标准的继电保护设备可以实现信息共享和具有互操作性,测试平台可以读取不同设备制造厂家的保护装置的 ICD 文件,验证 ICD 文件的标准化和合法性,解析文件中 LN 的 DO 实例中定值、控制字、压板等自动生成测试模板,根据研发和工程实际需要选取测试项目,实现继电保护装置自动测试。比较传统测试方法,能自适应不同保护装置,既保证完整测试,又更大程度减少手动测试工作。其不仅适用设计开发阶段,也能应用在装置生产和工程投运中,可提高开发制造产品的质量,缩短变电站调试工期。

参考文献:

- [1] 赖 擎,华建卫,吕 云,等.通用继电保护自动测试系统软件的研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(3):90-94.
- [2] 陈 皓.新一代微机继电保护测试仪及其基本性能[J].电力自动化设备,2002,22(5):61-63.
- [3] 刘金宁,孟 晨,崔少辉,等.基于配置文件的虚拟仪器测试软件设计与实现[J].电力自动化设备,2005,25(1):50-53.
- [4] 郑新才,丁卫华,韩 潇,等.基于测试模板的继电保护装置自动测试技术研究与应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(12):69-72.
- [5] 邵凤瑞,王命延.继电保护测试系统组态软件的应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(6):72-75.
- [6] 梁国坚,段新辉,高新华.数字化变电站过程层组网方案[J].电力自动化设备,2011,31(2):94-98.
- [7] 湛争鸣,陈 辉,陈 卫,等.全数字化继电保护测试系统设计[J].电力自动化设备,2009,29(5):109-113.
- [8] 徐天奇,尹项根,游大海,等.兼容 IEC 61850 标准的智能电子设备测试[J].电力自动化设备,2009,29(3):132-137.
- [9] IEC 61850, Communication Networks and Systems in Substations[S].

作者简介:

胡再超(1977),男,湖北枣阳人,工程师,从事继电保护研究工作;
姚 亮(1979),男,江苏南京人,工程师,从事继电保护研究工作;
张 尧(1984),男,陕西柞水人,助理工程师,从事继电保护研究工作。

(下转第 58 页)

一种集中监控模式下电网故障诊断算法

蒋宇¹, 李明², 张勇¹, 胡鹤轩³

(1.江苏电力调度控制中心, 江苏南京 210024; 2.江苏省电力公司检修分公司, 江苏南京 210019;

3.河海大学能源电气学院, 江苏南京 210098)

摘要: 针对全国范围内正在快速推进的“大运行”改革下电网管理、控制模式的变革, 从工程实际出发指出了集中监控模式下故障异常分析时出现的新问题, 进而提出了基于离散事件系统的电网故障诊断分析新方法。采用基于离散事件系统理论的故障诊断原理, 进行了算例推演以及实际故障的仿真, 初步验证了该电网故障诊断新方法的可行性。

关键词: 集中监控; 离散事件系统; 故障; 分析

中图分类号: TM711

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)01-0056-03

随着江苏电网“大运行”体系改革试点工作的完成, 其事故处理模式发生了根本性变革。对电网事故异常的监视和分析, 从传统的以变电站为独立单元的分散模式转变为各级调度机构大规模、远方集中的故障监视和分析模式。新模式带来故障信息量巨大以及故障遥信量不正确、丢失等问题。基于离散事件系统的故障诊断方法模型能自动生成可以辨识所有类型故障的故障诊断器, 对所有故障假设逐一扫描。与传统的基于专家系统(ES)^[1]、人工神经网络^[2]、优化算法^[3]、以及同属于离散事件系统范畴的 Petri 网络的故障诊断方法相比, 该方法具有建模简单、完全覆盖所有故障假设的优点。文中针对电网集中监控模式, 提出了一种基于离散事件系统的电网故障诊断方法。

1 集中监控模式

1.1 集中监控的特点

国内电网事故异常的传统诊断模式是以单个变电站为基础的孤立诊断模式, 即故障发生后由各变电站值班人员单独对本站事故进行分析, 再将诊断结果汇报给值班调度员。传统故障诊断流程如图1所示。

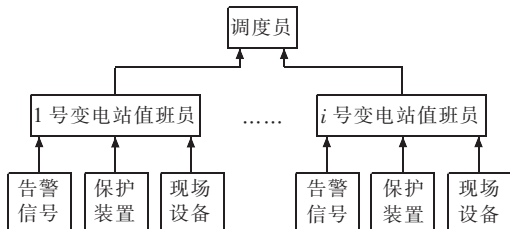


图1 传统故障异常诊断模式

在新的集中监控模式下, 故障诊断是以各级调度机构为中心的远程方式进行故障的监视和诊断。江苏省调的集中监控范围包括全省 500 kV 输电网及 33 个 500 kV 变电站 (包括站内 220 kV, 110 kV, 35 kV 系统) 的全部一、二次设备, 其诊断流程如图2所示。

收稿日期: 2012-08-10; 修回日期: 2012-09-25

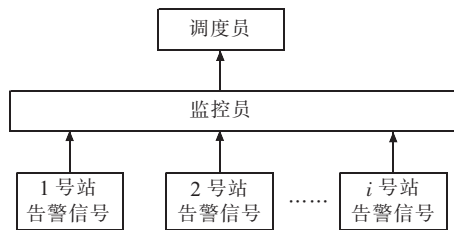


图2 “大运行”后故障异常诊断模式

集中监控模式是在广域测量技术上的一次行业制度革新, 具有全面、高效的技术特点, 因此在国际上被广泛采用, 例如美国 PJM 公司和英国 NG 公司。集中监控模式改变了以往只能根据单个变电站的信号进行电网故障诊断的孤立模式, 取而代之的是全网统筹、协调的综合诊断模式。

1.2 新模式下电网故障诊断的问题

在传统的以站为单位的监控模式下, 故障异常的影响范围只局限于单个变电站内的设备, 设备数量少, 因此值班人员进行故障诊断时需要分析的警告信息量是适当的。而在集中监控模式下, 由于接入监控系统的设备数量庞大、电网中各部分之间电气上的强联系特性, 在电网发生故障、异常时往往伴随海量的警告信号上传, 造成监控人员很难及时准确地发现并判断出电网的真实故障情况。

此外, 新模式下监控人员不在设备现场, 因此远方监控值班人员掌握不到保护和装置设备的准确、详细情况, 存在警告信号丢失和误发的可能。

2 离散事件系统

离散事件系统(DES)的故障诊断方法, 首先需要针对目标系统进行建模, 构建故障分析器, 随后根据观测到的系统状态的跳转情况, 通过诊断器自动推导出已发生的电网故障。

2.1 故障诊断流程

故障诊断流程如图3所示。

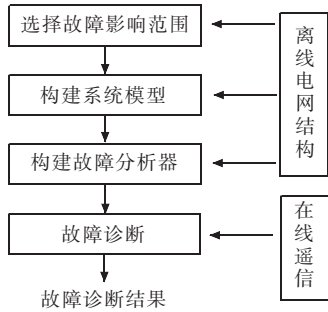


图3 离散事件系统故障诊断流程

2.2 离散事件模型的建模方法

首先根据观测到的故障信息及继电保护选择性配置原则,选定故障影响范围。根据选定的范围,将局部故障电网系统定义为如下的有限自动机:

$$G(X, \Sigma, \delta, x^0, x^m, Y, \lambda) \quad (1)$$

式中: X 为系统 G 的状态集合 (x^0 为在线观测到的系统初始状态, x^m 为最终状态); Σ 为引起系统状态发生转变的事件; $\delta: X \times \Sigma \rightarrow X$ 为系统 G 自身的状态跳转映射; Y 为保护、开关状态变化的观测集合, 包括 H_i 为开关 i 的动作序列, S_j 为保护 j 的动作序列, 有:

$$Y \subseteq \prod_{j=1}^m H_j \times \prod_{i=1}^n S_i \quad (2)$$

$$\lambda: X \rightarrow Y \quad (3)$$

2.3 构建故障分析器

根据电网系统 G , 以穷举的方法对局部电网系统可能发生的所有类型的故障进行穷举, 获得表征故障类型状态的集合 K , 则构建的系统故障诊断器如式 (4)、(5)、(6)、(7) 所示:

$$K = \{F_N, F_1, \dots, F_k\} \quad (4)$$

$$F_i = X_{F_i} = \{x_i^0, x_i^1, \dots, x_i^m\}, i \in \{N, 1, \dots, k\} \quad (5)$$

$$X = X_N \cup X_{F_1} \dots \cup X_{F_k} \quad (6)$$

$$\kappa: X \rightarrow K \quad (7)$$

其中 F_k 表示发生第 k 类故障时系统 G 所包含的状态集合。

2.4 故障诊断过程

通过数据采集与监视控制 (SCADA) 系统和能量管理系统 (EMS), 故障诊断系统接收到故障遥信量集合为:

$$Y = \{y(1), y(2), \dots, y(n)\} \quad (8)$$

其中 $y(i)$ 表示第 i 次观测到的保护和设备动作行为。

根据已经建立的故障诊断器模板, 按图 4 所示诊断过程, 逐个对故障假设 F_i 进行扫描。根据 $\forall x \in X$, if $x \in F_i$ then $K(x) = F_i$ 的推理规则, 有:

$$y(1) \rightarrow x \xrightarrow{\kappa} K(1) \quad (9)$$

$$y(2) \rightarrow x \xrightarrow{\kappa} K(2) \quad (10)$$

$$y(n) \xrightarrow{\kappa} x \rightarrow K(n) \quad (11)$$

$$\kappa: X \rightarrow K \quad (12)$$

诊断系统输出故障诊断结果为 $K(n) = F_k$ 。

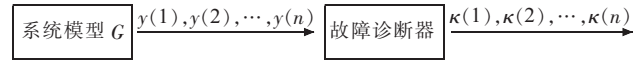
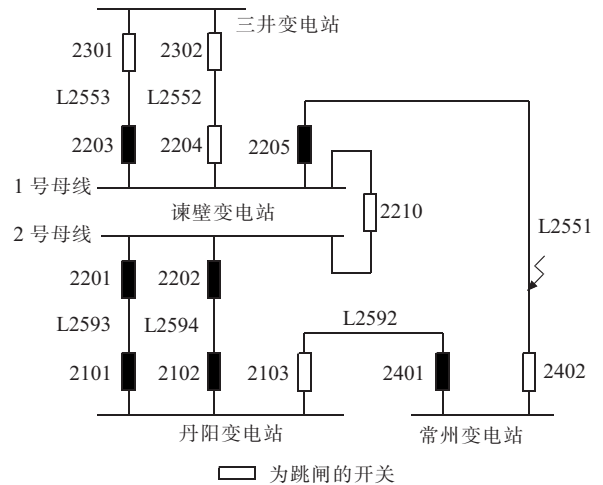


图4 故障诊断过程

3 故障诊断实例

3.1 算例验证

以文献[4]所述的江苏电网一次实际故障为例, 验证该算法。如图 5 所示, 220 kV 谏壁 L2551 线发生单相接地故障, 两侧断路器的高频保护动作, 常州变侧 2402 号断路器跳闸, 但谏壁变侧 2205 号断路器拒动, 引起谏壁变 1 号母线失灵保护动作, 跳开母联 2210 号断路器和 2204 号断路器, 但谏壁变 2203 号断路器拒动作, 引起 L2553 三井变侧零序 II 段保护动作, 跳开三井变 2301 号断路器。同时电网中发生了丹阳变 2103 号断路器零序 II 段误动作造成小环网解列的复杂故障。故障诊断的结果如表 1 所示。



□ 为跳闸的开关

图5 电网接线

表1 故障诊断结果

序号	变电站名	故障
1	常州变电站	L2551 线路故障
2	丹阳变电站	2103 号断路器零序 II 段误动作
3	谏壁变电站	L2551 线路故障
4	谏壁变电站	2205 号断路器拒动
5	谏壁变电站	2203 号断路器拒动

3.2 实例验证

以江苏省调开展集中监控业务以来的实际电网事故作为案例, 用文中所述算法进行仿真计算。2011 年江苏省调集中监控业务内总计发生 36 次电网事故, 由于篇幅所限仅列出部分仿真计算结果, 如表 2 所示。

表 2 故障仿真计算结果

序号	变电站名	实际故障过程	仿真诊断结果
1	吴江变电站	220 kV 误慈 2k57 线 短路故障	220 kV 误慈 2k57 线故障
2	车坊变电站	220 kV 车宝 2992 线 C 相单相短路	220 kV 车宝 2992 线 C 相故障
3	盐都变电站	500 kV 田盐 5215 线 A 相瞬时故障	500 kV 田盐 5215 线 A 相故障
4	张家港变电站	220 kV 家新 2K41 线 B 相瞬时故障	220 kV 家新 2K41 线 B 相故障
5	晋陵变电站	500 kV 江陵 5292 线 A 相瞬时故障	500 kV 江陵 5292 线 A 相故障
...	...	...	...
35	张家港变电站	220 kV 家沙 2K43 线 C 相单相短路	220 kV 家沙 2K43 线 C 相故障
36	吴江变电站	35 kV3 号主变 2 号 电容器熔丝熔断,导 致不平衡保护 A 相 动作 332 开关跳闸	35 kV3 号主变 2 号电容器故障

4 结束语

江苏电网作为国家电网公司“大运行”改革试点单位,在全国率先完成了以高效化、专业化为方向的转变过程。电网管理方式的变革必然带来电网故障异常处理模式及分析技术方法的变化,文中针对国内电网管

理结构发生变化的情况,提出基于离散事件系统的集中监控模式下的故障异常分析与辅助决策系统。该方法的工程化应用,不但可以为陆续在全国电网企业推进的调度集中监控业务,提供运行经验和技术支持;还可以为离散事件系统方法,在电网故障异常诊断中的先期研究。

参考文献:

- [1] 李雄刚.故障诊断专家系统在电力系统中的运用[J].广东电力, 1999,2(2):39-41.
- [2] 顾雪平,盛四清,张文勤,等.电力系统故障诊断神经网络专家系统的一种实现方式[J].电力系统自动化,1995,19(9):26-30.
- [3] HERTZ A, KOBLER D.A Framework for the Description of Evolutionary Algorithms[J].European Journal of Operational Research, 2000,126(1):1-12.
- [4] 周 昕,殷芸辉.新型电网故障诊断专家系统的设计[J].江苏电机工程,2007,26(3):15-17.

作者简介:

蒋 宇(1980),男,四川自贡人,工程师,从事电网运行管理工作;
李 明(1981),男,安徽淮南人,助理工程师,从事变电运行工作;
张 勇(1968),男,江苏南京人,高级工程师,从事电网运行管理工作;
胡鹤轩(1975),男,江苏南京人,副教授,研究方向为电力系统及其自动化。

A New Grid Fault Analysis Method under the Centralized Monitoring

JIANG Yu¹, LI Ming², ZHANG Yong¹, HU He-xuan³

(1. Jiangsu Electric Power Dispatching and Control Center, Nanjing 210024, China; 2. Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 210019, China; 3. College of Electrical and Energy, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In the view that the change of network management and control mode is carried forward on a national scale under the reform, the new problems existing in abnormal failure analysis under centralized monitoring mode from the point of engineering reality are proposed. The new solution to fault diagnosis analysis of Power system based on the discrete event system theory. Some simulation works have been done on some real failure examples in Jiangsu Grid and have gained satisfied results.

Key words: centralized monitoring; fault and abnormal analysis; discrete event system

(上接第 55 页)

Automatic Testing Method of Intelligent Relay Protection Device

HU Zai-chao, YAO Liang, ZHANG Yao

(Guodian Nanjing Automation Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Through the comparison of the testing methods of traditional relay protection devices, an automatic testing method is introduced. It is based on IEC 61850 communication standard and applied to the relay protection in intelligent substations. In this method, modular testing unit is designed targetedly with the standard logical node and data objects in relay devices. The method is interoperable and information-sharing, satisfying relay protection devices produced by different factories. Further more, taking the characteristics of intelligent relay protection device into account, function testing unit can make use of sampled values (SV) and general object-oriented substation event (GOOSE) packets, so it is able to ensure the quality and speed of product development and engineering operation. The testing progress includes set of value parameters and function's investment or retirement, test project switching, saving test datas, test result analysis and assessment report formation. All these is automatic, so the automatic testing method can improve the efficiency of test work on depth and breadth.

Key words: IEC 61850; intelligent substation; relay protection; automatic test

扩大外桥式接线改建工程相关问题分析

王亚洲,官金兴
(南京供电公司,江苏 南京 210019)

摘 要:110 kV 变电站多为桥式或线变组接线,扩大桥式接线方式由于结构及保护二次较为复杂,实际应用较少,而扩大外桥式接线变电站拆除第 3 台主变的改建工程也较少。以南京地区 110 kV 集庆变改建工程为例,分析了改建工程中一、二次调整应考虑问题、验收及设备运行注意事项,对工程验收及设备运行提供一定的帮助。

关键词:扩大外桥;备自投;分析

中图分类号:TM63

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0059-02

近年来,随着地方经济的不断发展,用电负荷不断攀升,为满足负荷增长的需要,改善电网网架结构,提高供电质量和供电可靠率,变电站的改、扩建工程越来越多。改、扩建工程时间紧、任务重并涉及到运行设备,生产运行人员需详细了解施工计划、细节,清楚工程的特点,特别要清楚相关的二次回路变动及其原因,这样才能保证工程验收到位。110 kV 变电站作为联接输电网与配电网的重要桥梁,其一次接线方式主要有单母线、单母分段、双母线、桥接线以及线变组接线等,扩大外桥式接线应用较少,正因为其接线复杂、二次配合回路较多,对此类的改建工程应尤为重视。

1 扩大外桥式接线改建工程设备变动情况

以集庆变为例,110 kV 扩大外桥式接线变电站如图 1 所示,110 kV 为 3 段母线,110 kV 进线接在 I、II 段母线上,3 段母线之间分别有 710、730 2 台分段开关。10 kV 为 4 段母线,3 台主变低压侧分别接在对应母线上,710、730、110、120 开关配置备自投装置。

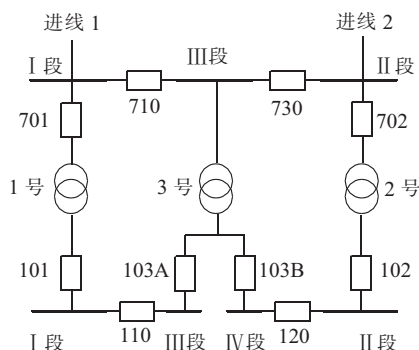


图 1 扩大外桥式接线方式变电站

由于工程需要,将 3 号主变拆除,相应的一次、二次设备进行调整。一次方面,有 2 种拆除方案,方案一:仅将 3 号主变及高、低压侧设备拆除,一次接线方式变成外桥式接线。方案二:拆除 3 号主变及高、低侧设备及 110 kV 分段,一次接线方式变成线变组接线。

收稿日期:2012-08-15;修回日期:2012-09-26

根据一次调整,二次方面主要工作为:将 3 号主变保护测控装置及 710、730、110、120 开关备自投装置退出运行,新配置 103B 开关(103A、103B 开关任一开关配置备自投均可,文中假定 103B 开关配置备自投装置,后同)备自投及保护测控装置,完善 1 号、2 号主变低后备跳 103A(或 103B)开关回路,根据接地变接地方式完善 10 kV 消弧线圈控制装置二次回路。

该集庆变工程中一次拆除采取方案二,二次方面在 103B 开关上配置备自投装置。

2 一次和二次相关问题分析

2.1 110 kV 分段开关拆除问题

3 号主变拆除,110 kV 接线方式是改为桥式接线还是线变组接线,主要从以下几个方面进行比较。

(1) 运行可靠性方面,在 110 kV 进线或主变故障时,2 种接线方式均能依靠 10 kV 备自投动作,由另一台主变供电,两者没有区别。(2) 运行灵活性方面,正常方式下,两者无区别。当 110 kV 进线 1、2 号主变或 110 kV 进线 2、1 号主变同时故障或检修时,桥式接线可通过 110 kV 进线 2、1 号主变或 110 kV 进线 1、2 号主变对 10 kV 供电,线变组接线则无法达到此要求,灵活性方面桥式接线优于线变组接线。(3) 经济性方面,由于是改建工程,没有新增设备,两者相差不大。(4) 工程量方面,如果拆除分段开关,还涉及到分段开关与 110 kV 进线刀闸、主变高压侧刀闸的相关五防闭锁问题,相对而言线变组接线工作量稍大。

综上所述,在 110 kV 分段没有另作他用的前提下,可保留分段开关,形成桥式接线。而集庆变工程在该区域内网络结构比较完善的基础上着重考虑了施工进度及工作量的因素,拆除了 110 kV 分段开关,形成了线变组接线。

2.2 110 kV 分段开关备自投配置问题

如果改为桥式接线,在 10 kV 侧备自投完备的情况下,考虑到配置 110 kV 分段开关备自投需要重新购

置设备以及工作量和施工安全性等因素,可以考虑 110 kV 分段开关不配置备自投装置。

2.3 10 kV 分段开关 103B 备自投装置电压问题

3 号主变拆除后 2 台主变带 10 kV 四段母线,取消了 110、120 开关的备自投,103B 开关配置备自投装置,其交流电压应结合主变低后备跳闸整定统一考虑。正常运行方式时,2 台主变分列运行,每台主变各带两段母线运行,如图 2 中所示,110、120、103A 开关运行,103B 开关热备用,10 kV I、III 段母线在 1 号主变低后备保护范围内。

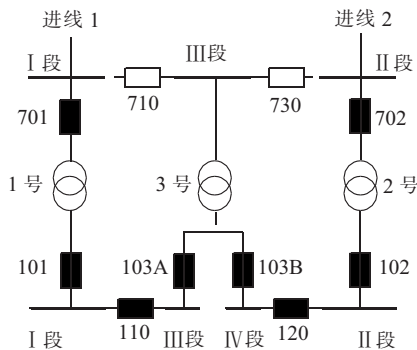


图 2 正常运行方式

根据主变低后备保护整定原则^[1],低后备保护动作应先跳分段开关,再跳本侧开关。由于主变低压则同时带两段母线,以 1 号主变为例,考虑到在 10 kV III 段母线故障时仅跳开 110 开关则可切除故障而不会扩大到 10 kV I 段母线失电,因此主变低后备保护跳闸出口整定时,可整定第一时限跳 103B(110)开关,第二时限跳 101 开关及闭锁 103B 开关备自投,其逻辑如图 3 所示。

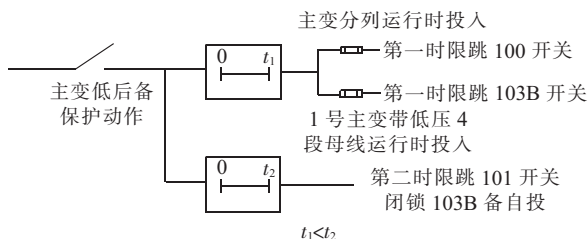


图 3 1 号主变低后备跳闸(两时限)逻辑

根据此整定,则 103B 开关备自投装置在 1 号主变侧的交流电压应选 10 kV I 段母线电压,而不能选 10 kV III 段母线电压。如果选 10 kV III 段母线电压,在 10 kV III 段母线故障时,1 号主变低后备保护动作第一时限跳 110 开关,跳开 110 开关后故障切除,低后备保护将返回不会再跳 101 开关及闭锁 103B 开关备自投,此时若 1 号主变处于轻载状态,则满足 103B 备自投动作条件,将会跳开 101 开关、合 103B 开关,从而导致 103B 投合于故障的 10 kV III 段母线、无故障的 10 kV I 段母线失电。如果 103B 开关备自投装置交流电压在 1 号主变侧的交流电压选 10 kV I 段母线电压,

则在同样的情况下,103B 备自投不会动作。同样,103B 开关备自投装置交流电压在 2 号主变侧的交流电压也应选 10 kV II 段母线电压。

3 验收及运行中应注意的事项

由于一、二次的调整,改动的回路较多,除了常规的回路验收外,还应考虑因接线方式变化后引起的一些特别的问题。

(1) 二次回路退出需在回路二侧均断开并做好绝缘措施,以防回路未断干净而引起二次回路接地或短路,验收时应注意检查。

(2) 二次装置退出运行,其相关的交、直流等二次回路应彻底退出,若屏柜上的装置已退出运行但屏柜未拆除,则有可能在屏柜上仍保留屏顶电压小母线、屏后端子排的交流工作电源以及一些电流、电压在端子排的转接等,在验收时应明确屏柜中保留的相关回路,如有保留的二次回路则在运行中应将该屏柜仍视为运行的屏柜,不能因为屏内装置退出运行而误认为屏柜已退出运行,屏柜的标牌应保持,不能加设“已退役”标志,并在屏柜内增加仍运行回路说明。

(3) 如果主变的低后备保护只具备 2 个时限跳闸,则第一时限跳 103B 开关、110(120)开关,第二时限跳变二侧开关及闭锁 103B 开关备自投,主变低后备跳 103B、110(120)开关的压板需要根据一次方式要求调整,在主变分列运行时投入跳 110(120)开关的压板、退出跳 103B 开关的压板,在 1 台主变带 4 段母线运行时退出跳 110(120)开关的压板、投入跳 103B 开关的压板(如图 3 所示)。如果主变的低后备具备多个时限跳闸,建议在整定时整定第一时限跳 103B 开关,第二时限跳 110(120)开关,第三时限跳变二侧开关及闭锁 103B 开关备自投(如图 4 所示),这样可以将跳 103B、110(120)开关的压板保持长投,主变方式调整时不需调整二次,具备远方监控主站端拉、合开关的单一操作的条件,从而提高工作效率。

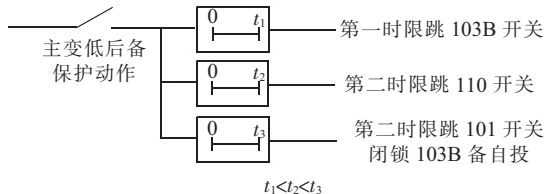


图 4 1 号主变低后备跳闸(三时限)逻辑

(4) 对于扩大外桥接线方式的变电站,一般情况下安装 3 台接地变,1 号接地变接于 10 kV I 段母线,2 号接地变接于 10 kV II 段母线,3 号接地变接于 10 kV III 段或 IV 段母线。若接地变为中阻接地方式,则 103B 开关的备自投应完善备自投动作跳中阻小开关的回

综合停电检修计划系统中平衡模型设计与应用

袁红梅¹, 杨军², 刘志仁¹

(1.无锡供电公司, 江苏 无锡 214061; 2.江苏电力信息有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要:针对当前综合停电检修计划管理存在的问题,建立了停电检修管理决策分析系统。该系统以综合停电检修计划平衡模型为核心,可根据设备项目周期与检修策略智能生成停电计划,运用拓扑分析智能合并、关联停电检修计划,该系统在无锡供电公司应用良好,已达到综合停电检修计划多层优化及建立供电可靠率和其他可靠性指标测算模型的目的。

关键词:停电检修计划;平衡模型;拓扑;合并;关联

中图分类号: TM715

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)01-0061-04

电网设备停电检修是电力系统运行中非常重要的一项工作,设备停电检修计划如何安排直接影响到供电企业和社会用户的经济利益,对电力系统的安全性和经济性具有重大影响。建立停电检修管理决策分析系统,对停电检修计划进行智能化管理,可以大幅度提高停电检修计划编制的效率及精益化水平。

1 停电检修计划管理决策分析系统

目前的综合停电检修计划管理主要存在以下问题^[1,2]: (1) 工作量大,效率低。电力设备随着电力系统规模的增大而逐年增多,电力网络也日趋复杂,造成了编制停电检修计划工作量较大,工作效率较低。(2) 可靠性低。停电检修计划目前属于人工方法编制,对设备停电时间及停电的频率控制不精确,导致重复停电;同时在编制计划中存在静态安全分析不准确、电压越限、存在潮流等问题。(3) 人员因素影响较大。计划编制人员的工作经验、专业技术能力及对工作的责任心直接关系到计划编制的优劣。

针对上述问题,可建立停电检修管理决策分析系统,并通过以下几个方面对停电检修计划进行科学化的管理及优化。(1) 对于停电检修计划进行智能化管理。根据规则生成年度、月度停电计划,对大规模、复杂繁琐的停电计划采用分层优化模型,通过部门内部优化、部门间协调优化、公司层面全局优化,解决停电计划汇总、分类、排序、归并等问题。(2) 建立停电检修计划优化平衡分析模型。根据规则分析停电范围,通过设备关联关系,归并停电设备;根据设置规则给出停电分析预警。引入基于专家规则库的优化算法,建立完善停电综合检修计划智能平衡判断,确保优化算法实用、高效。(3) 建立供电可靠率及其他可靠性指标测算模型,提高停电检修计划编制的效率及精益化水平。建立可靠性指标测算模型,并结合月度停电计划,根据每条线路停电所影响的用户数和计划停电

时间,进而计算出停电时户数,再预测可靠性各类指标值,以此提高工作效率,并切实做到指标的先算后用。

2 停电检修计划平衡模型

停电检修计划平衡模型(以下简称平衡模型)以综合停电为原则,优化生产工作方案,建立部门优化、协调优化、全局优化三层优化框架,同时考虑可靠性预控要求,根据停电计划分层优化模型,在全局优化层借助停电分析模型统筹考虑、合并关联相关检修计划,做到一次停电检修最大化,最大程度避免重复停电,努力提高电网可靠性指标。同时为完成可靠性预控指标,建立停电计划平衡优化模型,借助可靠性指标测算模型,求取在满足可靠性预控指标下最优停电计划,完成综合停电检修计划的智能平衡优化,平衡模型的具体结构如图1所示。

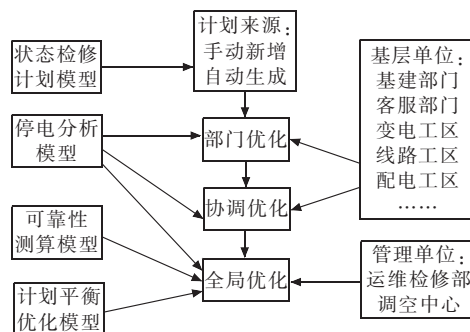


图1 停电检修计划平衡模型

3 平衡模型关系分析

平衡模型是平衡设备停电计划的核心,定义了平衡各个设备停电的规则。以停电计划为载体,通过合并、关联计划来实现停电计划安排的合理化和精确化。依据平衡模型建立的综合停电决策分析系统功能关联如图2所示。

3.1 停电计划与设备

停电计划可以包含多个主设备,由设备的项目周期和检修策略生成,根据文献[3],具体规则如下:

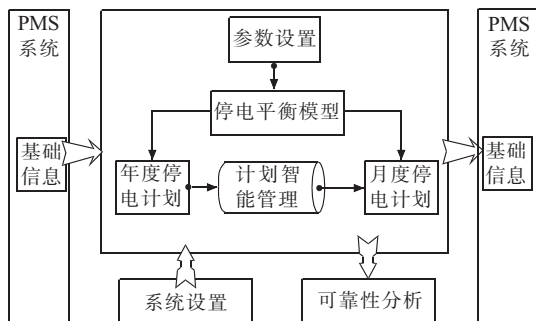


图2 综合停电分析决策系统功能关联示意图

(1) 生成 110 kV, 35 kV 非省检设备, 和省检 220 kV, 110 kV, 35 kV 设备的年度停电计划;

(2) 变电一次设备需检查其状态检修的检修策略 (A, B, C, D, E 等) 及检修策略组合 (如 ABDE, AE 等), 若其检修策略和策略组合中存在策略 A, B, C 中任意一种则需生成年度停电计划, 否则不生成;

(3) 若设备周期信息的“年度停电计划生成时间”为空, 表示没有生成年度停电计划, 可以生成, 否则不能生成; 一旦生成了该设备的年度停电计划, 需要更新周期信息的“年度停电计划生成时间”。

(4) 变电一次设备的周期大于 3 年, 如果其下次检修日期在本年度的下下一年 6 月 30 号之前 (包含 6 月 30 日), 则生成年度停电计划。

(5) 变电一次设备的周期小于等于 3 年, 如果其下次检修日期在下一年 12 月 31 日前 (包含 12 月 31 日), 则生成年度停电计划;

(6) 变电二次设备, 如果其下次检修日期在本年度的下下一年 6 月 30 日之前 (包含 6 月 30 日), 需生成年度停电计划;

(7) 输电线路生成规则等同于变电一次设备。

3.2 主设备与陪停设备

平衡模型中停电计划的设备信息由主设备和陪停设备组成。陪停设备的产生根据其主设备的关系来确定。陪停规则具体如下: (1) 间隔停役。若计划中主设备为间隔内的某个设备, 则此计划的陪停设备取该间隔下的其他所有设备。(2) 线路停役。若计划中主设备为输电线路, 则此计划的陪停设备包括该线路的各侧间隔、支线及二级支线、各级支线的间隔、各间隔下的所有设备。(3) 全部停役。若计划中主设备为隔离开关, 其所属间隔为断路器且该主设备调度编号末尾为 3, 则该计划的陪停设备包括此开关间隔及其出线。

3.3 合并与关联停电计划

3.3.1 自动合并

同工区内的计划才能相互合并; 合并时, 需根据用户权限, 取市级或县域或工区范围中所选年度的全部有效年度停电计划进行合并。计划方式为“周期”, 计划

来源为“市公司”的计划之间合并, 计划方式为“手工”, 计划来源为“市公司”的计划之间合并, 计划来源为“省检”, 计划方式为“手工”的计划之间合并, 计划来源为“省检”, 计划方式为“周期”的计划之间合并, 不允许混合合并。

合并时判断计划的主设备, 若相关计划的主设备是同一间隔下的变电设备, 或同一主线下的输电线路, 则相关计划合并为一条新计划, 原年度计划状态置为“被合并”。

算法分析与实现规则。获取所有符合合并规则的计划清单数据。变电: 遍历计划清单, 判断是否为同工区、同一间隔、同计划来源、计划方式的计划数据, 如果为同一间隔数据, 则进行合并。输电: 遍历计划清单, 判断是否为同工区、同一主线、同计划来源、计划方式的计划数据, 如果为同一间隔数据, 则进行合并。

在日常使用过程中发现与实际业务场景存在偏差, 原参与合并的计划只有一个主设备数据, 调整为一个计划可以对应多个主设备数据, 此变更带来算法的调整, 具体调整后算法分析与实现规则: (1) 满足规则计划先获取, 通过计划取所有主设备数据; (2) 遍历主设备数据 (涵盖计划信息, 间隔 / 主线信息); (3) 判定是否存在 2 条或者 2 条以上的主设备数据属于同一个间隔或者主线, 并且非同一计划, 如果存在, 则将对应的计划存放到 MAP 中, key 为计划的编号, value 为相同值; (4) 将已经判定过的设备数据从清单中剔除; (5) 再遍历主设备数据, 判定是否存在 2 条或者 2 条以上的主设备数据属于同一个间隔或者主线, 并且非同一计划, 如果存在, 判定满足条件的所有设备对应的计划在 MAP 中是否已经存在, 如果存在, 则将所有的计划添加到 MAP 中, 并且 value 值设置为已经存在的计划对应的 value 值。

3.3.2 自动关联

间隔关联: 若计划中主设备在同一个间隔内, 则这些计划之间可以关联。线路关联: 若计划中主设备为输电线路, 且都在同一个主线上, 则这些计划之间可以关联。自动关联的计划默认执行年度为当年的未导入月度计划有效的年度计划; 已关联的不能重复关联; 同工区的计划进行关联。

算法分析与实现规则。获取所有符合关联规则的计划清单数据。变电: 遍历计划清单, 判断是否为同工区、同一间隔、同计划来源、计划方式的计划数据, 如果为同一间隔数据, 则进行关联。输电: 遍历计划清单, 判断是否为同工区、同一主线、同计划来源、计划方式的计划数据, 如果为同一间隔数据, 则进行关联。

3.4 层次关系

3.4.1 合并后的层次关系

合并后的计划主设备及陪停设备取原计划主设备及陪停设备的合计,去除重复设备。原计划置为“被合并”状态,在系统中查询不出来。但是通过查看计划来源为“合并”的计划,可以看到该合并计划是由哪些原始计划合并而成的,停电计划合并界面如图3所示。

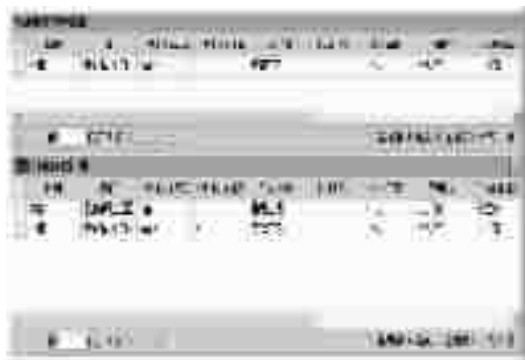


图3 停电计划合并界面

3.4.2 关联后的层次关系

关联年度停电计划是将若干条年度停电计划建立一种关联关系,并不改变这些计划中的数据,在系统中仍然是有效数据。建立关联关系可以让用户在进行其他操作时看到相关联的其他年度停电计划,这样给用户提供数据支持。停电计划关联界面如图4所示。



图4 停电计划关联界面

3.5 拓扑关系

平衡模型以一条主线为中心,它本身、开关设备、支线以及支线上的开关设备对应的计划在实际的平衡过程中都将关联在一起。运用平衡模型将停电计划自动拓扑关联如图5所示。

4 平衡模型对象与属性分析

设备模型对象以停电计划为载体,包含设备信息。设备模型对象如图6所示。

在进行对象属性分析时,设备的相关信息,例如间隔单元或者主线,将存放于设备对象上。业务实体的重点在于信息结构的设计,它是整个数据库系统设计的关键,独立于逻辑结构设计和数据库管理系统(DBMS)。现实中一组具有某些共同特性的行为对象

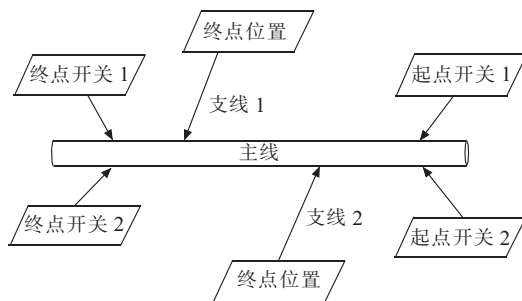


图5 停电计划拓扑关联示意图



图6 设备模型对象示意图

就可以抽象为一个业务实体。对象类型的组成可以抽象为实体的属性^[4]。

5 实践成效

该项目依托国家、企业、行业标准,充分考虑综合停电检修计划编制过程中各类业务需求,构建停电计划分层优化模型,以综合停电为原则,逐级辅助决策优化,在各层面统筹安排各类停电检修计划,满足电网可靠性管控要求。根据相关标准规定以及业务规则自动产生、合并、关联、优化停电计划的功能;同时依据可靠性指标测算模型,定义各类设备可靠性的计算公式,实现自动预警检查和报表分析功能;将综合停电检修计划决策分析系统全面纳入综合停电检修计划编制的全过程,编制统一的综合停电检修计划业务流程规范,有利于指导全省开展综合停电检修工作。

该项目运用 ETL 数据库同步技术,可以直接通过 ETL 服务器实现库与库之间、表之间的同步,解决生产系统与综合停电系统基础数据的同步问题。利用 webservice 技术,解决综合停电系统与生产系统的综合停电计划的同步以及批复功能,实现与生产系统的无缝对接。

6 结束语

综合停电检修计划决策分析系统在无锡供电公司

应用良好,已达到综合停电检修计划多层优化及建立供电可靠率及其他可靠性指标测算模型的目的,在保证供电可靠率指标可控、能控和在控的同时与停电优化模型完成合理对接。后续还需补充完善业务规则,提高综合停电检修计划决策分析系统的平衡优化能力,使之更加完善、更智能化。另外待加强与生产管理系统(PMS)、调度管理系统(OMS)的紧密结合,减少人工干预的步骤,提高工作效率。

参考文献:

[1] 牟善科.电网检修计划安排与优化系统的研究与实现[D].浙江:浙江大学硕士论文,2007.

[2] 杜明.基于J2EE平台的停电计划管理系统的研究与实现[D].武汉:武汉理工大学硕士论文,2005.

[3] DL/T 393—2010,输变电设备状态检修试验规程[S].

[4] 翁芳芳,林俐,杨以涵.CIM模型与关系模型的一种映射方法的探讨[J].现代电力,2005(4):25-29.

作者简介:

袁红梅(1974),女,江苏启东人,工程师,从事电力系统管理工作;
杨军(1978),男,江苏南京人,工程师,从事电力信息系统管理工作;
刘志仁(1984),男,江苏无锡人,助理工程师,从事电力系统二次检修工作。

Design and Application of the Balance Model in Integrated Power Outage Maintenance Plan

YUAN Hong-mei¹, YANG Jun², LIU Zhi-ren¹

(1. Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China;

2. Jiangsu Electric Power Information Co. Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: A power outage maintenance management decision analysis system is established in view of a series of problems for the current comprehensive power maintenance plan management. The power outage plan can be generated according to the project cycle and maintenance strategy, and then be merged and related with using topological analysis intelligently by the system which is based on the integrated power outage maintenance plan balance model. The purpose of integrated power outage maintenance plan multi-layer optimization and the establishment for power supply reliability rate and other reliability index calculation model is achieved by the system running well in Wuxi Power Supply Company.

Key words: power outage plan; balance model; topological; merged and related

(上接第60页)

路,以避免1台主变带4段母线运行时两点同时接地而造成10kV出线保护动作不正确的情况。在运行中若主变低压侧连接有2台接地变,则应退出1台接地变的中阻接地。

(5) 正常运行时,110(210)开关的保护应停用,仅在10kVⅢ段(Ⅳ段母线)充电时启用。而103A开关也建议转为非自动方式运行。

4 结束语

变电站改扩建工程一般情况下均是工期紧、任务重,涉及运行设备较多,尤其是在二次回路方面。作为电力运行生产部门人员,如果前期没有做好充分准备,

特别是没把因接线变化而引起的相关问题研究、梳理透彻,则有可能在验收时存在遗漏、验证不到位等情况,从而为以后的设备运行埋下隐患,影响设备的安全运行。只有熟悉掌握设备情况,才能保证高质量的验收,确保设备安全运行。

参考文献:

[1] DL/T 584—2007,3~110kV电网继电保护装置运行整定规程[S].2007.

作者简介:

王亚洲(1969),男,江苏南京人,工程师,从事变电运行管理工作;
官金兴(1976),男,江苏南京人,工程师,从事变电运行方面工作。

Analysis of related problems for enlarged external bridge reconstruction project

WANG Ya-zhou, GUAN Jin-xing

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: Bridge wiring and line-transformer unit wiring are widely used in 110 kV substation. Enlarged bridge wiring is less used because of its complex structure and secondary circuit of relay protection. Reconstruction projects of removing the third transformer are also rare in substations with enlarged external bridge wiring. Take the reconstruction project of 110kV Jiqing substation in Nanjing for example, this paper analyses the problems that should be taken into account when regulating the primary and secondary system. Announcements in acceptance tests and equipment operation are also discussed. The issues studied in this paper could help with acceptance tests and equipment operation, and offer solutions for similar problems.

Key words: enlarged external bridge; back-up switching; analysis

基于 IEC 61850 变电站辅助设备信息综合监管系统

潘海萍, 谢狄辉, 储乾旭
(宁海供电局, 浙江 宁海 315600)

摘 要:以 IEC 61850 标准为基础, 建设变电站辅助设备信息综合监管系统是实现变电站辅助运行信息集中采集、智能化异常运行分析、集中告警发布、智能化控制联动的核心手段。从模型建立和系统总体架构的角度, 探讨了如何利用 IEC 61850 标准建立变电站辅助设备信息综合监管系统的设计思路, 并基于实际应用的需要, 规划了该系统各项应用功能。

关键词:IEC 61850; 变电站; 综合监管

中图分类号:TM76

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0065-03

近年来, 随着我国智能电网的快速发展, 电网自动化水平得到了大幅提升。目前, 国内大部分新、老变电站均已配备了综合自动化系统, 110 kV 及以上变电站也基本实现了无人值班。从生产运维管理的实际出发, 需要将变电站内的红外防盗、视频监控、环境监测、一次设备和二次系统的工作状态进行一体化监视, 实时把握变电站运行状态和健康水平, 确保系统安全运行, 因此, 建立电网综合监管运维体系十分重要^[1]。基于 IEC 61850 变电站辅助设备信息综合监管系统是未来智能化变电站重点建设内容, 与电力调度支撑体系相互依托, 可实现设备信息和运行维护策略与电力调度全面互动, 形成基于状态的全生命周期综合优化管理, 提高设备运行可靠性、灵活性, 提升生产管理效率和效益, 支撑各级电网的安全稳定运行和各类高级应用。

1 系统建模

IEC 61850 标准是基于通用网络通信平台的变电站自动化系统的新一代国际标准, 作为下一代变电站的无缝通信协议标准, 采用面向对象思想对变电站涉及的设备与通信服务进行功能建模、数据建模, 解决了变电站自动化系统产品的互操作性和协议转换问题, 并规范了一套抽象的通信接口, 使协议拥有足够的开放性以适应未来变电站通信发展的要求。

变电站辅助设备信息综合监管系统的提出是针对变电站内包括环境、防盗、消防、安全、视频等监控信息、一次设备状态监测信息、二次系统运行信息等在内的一体化综合数据的采集与集成。在数据集成的基础上一方面对运行中出现的异常进行全面相关性分析, 实现变电站多系统的在线闭环联动; 另一方面对于运行过程中出现的故障实现跨变电、通信、自动化系统多专业的故障分析和诊断, 根据运行异常情况自动分析受影响的设备、自动化系统和停电范围, 辅

助制定相应的检修方案, 满足智能变电站的高复杂度运维管理要求。因此该系统的管控范围包括如下内容:

(1) 变电站运行相关的辅助信息, 包括环境数据、安防信号、站用电源系统、视频监控、照明控制等; (2) 变电一次设备状态信息, 包括变压器状态监测信息、断路器及高压组合电器(GIs)状态信息、电抗设备状态监测信息; (3) 二次系统综合监控信息, 包括变电站内网络、服务器等 IT 设备以及自动化系统的运行状态, 以及通信站段监管系统的信息。

IEC 61850 标准中, 仅定义了 4 个专门用于高压设备状态监测的逻辑节点: 液体介质绝缘 SIML、气体介质绝缘 SIMG、电弧 SARC 和局部放电 SPDC。考虑综合监管系统的需要, 上述节点及其包含的数据已经不能满足要求, 必须按照 IEC 61850 的原则进行合理扩充, 并根据变电站状态监测装置的现状, 对一次、二次设备同时建模^[2]。变电站模型扩展如下逻辑节点。

逻辑节点 SCBR: 实现变电站内断路器电气、机械特征的状态监测, 用以反映断路器状态监测常用的电气、机械性能、气体绝缘等状态特征量。

逻辑节点 SENV: 实现对变电站内温湿度、气压等环境监测功能。

逻辑节点 SDGA: 用以监测油浸式变压器内各种气体浓度及速率变化。

逻辑节点 INTP、ICTP、ISTP: 分别为网络、CANBUS、RS232/485 串行通信 3 种方式的透明通信转发代理而扩展的逻辑节点。

逻辑节点 CCGR: 实现对变压器冷却系统中各参数的监测。

逻辑节点 ATCC: 实现对变压器分接头的监测。

在系统建模过程中, 采用面向对象技术建立的数学模型为层次结构, 将变电站内设备按功能抽象为一个逻辑节点。逻辑节点为基本数据模型, 包含一定的数据(对象), 数据(对象)又由相应的属性构成。根据系统实际监测的需要, 以 IEC 61850 为标准, 可以方便地扩

展或改变逻辑节点。

2 系统架构

该系统在整体架构上分为站控层、调控层和全局层(如图1所示)。其中站控层主要负责变电站内各设备运行数据采集、子系统通信接口、告警分析和发布等功能。站控层通信体系根据 IEC61850 标准,分为3层:变电站层、间隔层、过程层,并定义了层和层之间的通信接口。变电站层和间隔层之间的网络采用抽象通信服务接口映射到制造报文规范(MMS)、传输控制协议/网际协议(TCP/IP)以太网或光纤环网。在间隔层和过程层之间的网络采用单点向多点的单向传输以太网。变电站内的智能电子设备(IED,测控单元和继电保护)均采用统一的协议,通过网络进行信息交换^[3,4]。

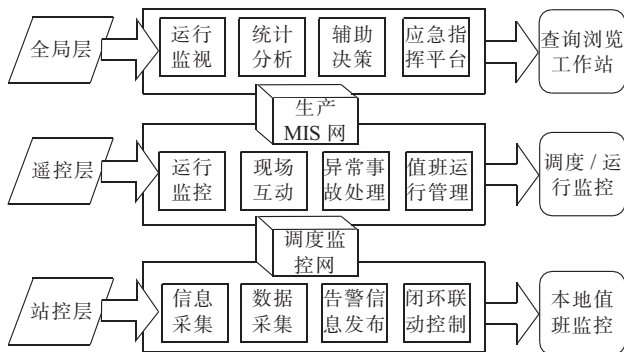


图1 系统整体架构

站控层在整个结构中相对独立,在与上级监控系统失去网络通信后,能独立通过短信发布告警。在无人值班变电站,站控层可认为是一个黑匣子,提供的本地人机界面用于系统维护调试;在有人值班变电站,提供值班人员本地的监控工作站。

调控层主体是提供给集控站或调控中心人员对变电站运行的集中监控,异常告警处理,实时与现场抢修人员的互动,同时与生产管理PMS接口,提供设备缺陷或故障报告,由PMS启用相应的业务处理流程。调控层的数据来源于其管辖变电站数据的汇总和调用相应站控层提供的服务。

全局层发布变电站运行一体化监管系统的综合信息,供各级管理人员实时了解变电站运行状况、故障或异常分析统计,制定相应的检修维修策略,并与生产应急指挥中心集成,提供应急事件处理辅助决策支持。

3 网络架构

系统网络架构如图2所示,整个系统由以下部分构成。

中心大屏幕系统:3×8共24块52吋屏幕拼接而成的中心大屏幕系统,将为整个平台提供直观、全面的展示和上佳的人机互动,包括附属的中控系统、电话会

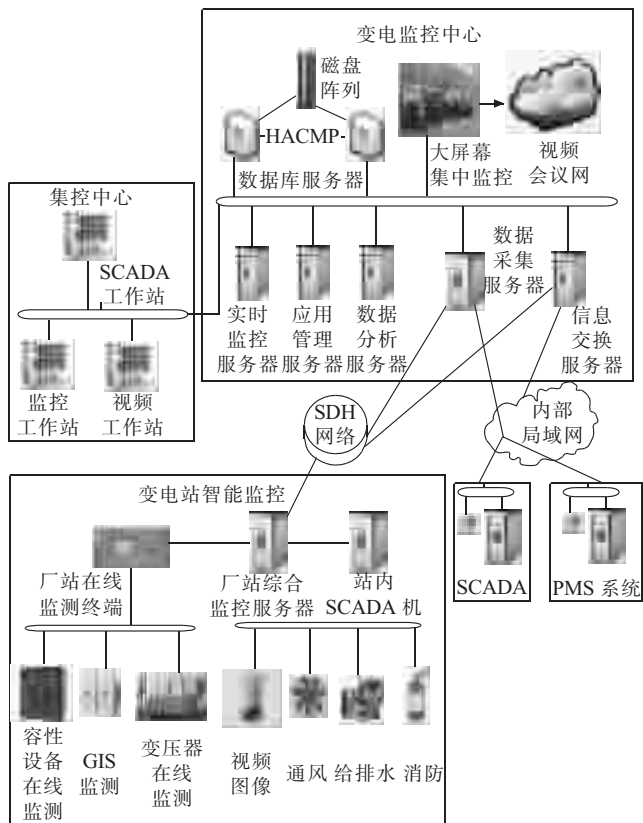


图2 系统网络架构

议系统、扩音广播系统等。

信息交换服务器:主要部署综合信息交换层,实现与工业电视、地理信息、在线监测、实时监控、保护信息、环境监测、手持终端等各级系统模块信息交互、集成的功能;同时与电网控制中心、数据中心系统进行通讯、数据功能共享。

实时监控服务器:主要部署对实时性要求高的平台软件的模块,包括主、辅设备实时监控模块,也包括实时报警、故障实时处理等模块。

管理应用服务器:主要部署生产计划管理、工作调度、工作过程管控等管理性的、对系统实时性要求不苛刻的功能模块。

数据分析服务器:主要针对科学辅助决策需要进行大量的数据清洗、筛选、统计、分析、挖掘工作设计出的专门从事数据分析的服务器集群。

数据库小型机集群(含磁盘阵列):存放平台各种类型的数据并为各其他系统提供数据服务,考虑到数据处理对容量、精确、可靠性的高要求,设计采用数据库小型机+磁盘阵列+Oracle RAC数据库软件的架构。

厂站在线监测:包括厂站在线监测智能终端、各主设备上需要加装的各传感器、信号采集装置。由于主设备的二次监测位于安全二区,监测数据库位于安全三区,厂站在线监测智能终端需支持安全隔离功能。

厂站综合监测:包括厂站端的若干数据采集器、手持终端连接器以及厂站环境监测主机以及各辅助设备

上需要加装的各种传感器、信号采集装置。

站内数据采集与监视控制(SCADA)机:变电站内 SCADA 系统的主机,负责对各类测控终端进行数据和信息采样,并进行分析和报警,站内管理人员可通过 SCADA 主机实现指定的控制动作。

4 系统功能规划

4.1 站端系统

站端系统由厂站在线监测子系统和厂站环境监测子系统构成,其信息在变电站内汇总后可根据系统模型进行分析计算,并展现在本地监控工作站中,实现变电站的区域自治。同时,其信息也可通过上级 SDH 网络传送至主站系统中。其中厂站在线监测子系统负责对变电站设备状态信息的采集。而厂站环境监测子系统负责对变电站环境信息的采集,包括含对辅助设施的监视与控制,实现设备的远程实时监测、故障报警、远程控制等功能。

系统对站端设备拥有完整的数据采集和命令下达通道,具备了与运营相关的、可实现站端设备间协调工作的全部资源,因而对于异常告警,系统可以实现多样化、高性能、复杂的在线闭环联动,包括设备的闭环控制联动和系统响应联动二方面。

4.2 主站系统

在调控中心建立相对独立的变电站辅助设备信息综合监管系统,通过路由器/防火墙与调度通信网相对隔离,由通信服务器负责与各变电站当地监控系统实现数据通信,汇总各变电站采集的实时数据和状态,汇总同步各变电站形成的历史运行数据、告警数据、基本配置数据和视频数据,构建基于 Web 的综合信息发布服务。主站系统的主要功能主要包括:(1) 厂站运行监测。一方面系统将在基于 IEC 61850 标准的电网模型基础上实现对变电站电气主设备运行状况的全面监测;另一方面系统将实现对变电站各类生产辅助设备(如空调、采暖、通风、给排水、门禁、技防等)的实时监控。通过对监测数据模型的分析,实现设备故障预警和变电站整体健康状况评估。(2) 故障实时处理。系统以

快速反应、先期处置、统一指挥、协同作战为原则,提供以预案流程为依据、以保障体系为支撑、以音视频互动技术为载体、融合多方信息的故障指挥支持。系统集成变电站专业在线检测、环境监测、工业电视、保护信息、实时监控和 GIS 地理信息系统,基于实时数据、历史数据、应急预案、GIS/GPS 调度资源,通过故障处理组织的快速建立、故障预案的快速引导、抢修队伍和抢修物资的快速调配、现场情况的互动反馈,实现对故障事件统一、实时、精准指挥和快速处置。(3) 智能辅助决策。以变电站安全生产指标为导向、以专家分析模型为方法形成变电站的决策评估支持,对变电站设备健康状况、可靠供电能力、生产管理状况进行科学评估,并且可以根据评估结果生成预警和计划任务,实现生产的预控、可控、在控。

5 结束语

建设以 IEC 61850 标准电网模型为基础的变电站辅助设备信息综合监管系统,实现变电站各类设备运行状态和运行环境的有效监控,使各级监控人员能及时、全面掌握变电站的运行信息,对变电站安全防范、运行异常预警和应对自然灾害等有着十分重要的意义,不仅可以切实提高无人、少人值守变电站的安全运行水平,而且能够推动变电站管理逐步向智能化、自动化、综合化、集中化方向发展。

参考文献:

- [1] Q/GDW 383—2009,智能变电站技术导则[S].
- [2] 李光辉.基于 IEC 61850 的变电站装置建模[J].电力系统通信,2009(4):27-29.
- [3] 刘凌,韩林涛,王众全.电子值班系统的设计和实现[J].华中电力,2007,20(6):26-29.
- [4] DL/T 721—2000,配电网自动化系统远方终端[S].

作者简介:

潘海萍(1975),女,浙江宁海人,工程师,从事电力自动化工作;
谢狄辉(1971),男,浙江宁波人,工程师,从事配网生产管理工作;
储乾旭(1985),男,浙江宁海人,助理工程师,从事电力系统自动化工作。

Integrated Monitoring System of Auxiliary Equipment in Transformer Substation Based on IEC 61850

PAN Hai-ping, XIE Di-hui, CHU Qian-xu

(Ninghai Power Supply Bureau, Ninghai 315600, China)

Abstract: Building integrated monitoring system of auxiliary equipment in substation is the core for substation auxiliary equipment information centralized collection, intelligent abnormal operation analysis, centralized alarm released, and intelligent control linkage. In this paper, the design ideas that using the IEC 61850 standard to establish an integrated monitoring system of auxiliary equipment in substation are discussed, and the functions of the system based on the actual application needs are designed.

Key words: IEC-61850; substation; integrated monitoring

多功能电能表的无功计量

高怀平

(南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要:介绍了国产和进口多功能电能表无功计量原理,提出了多功能电能表缺相故障情况下无功退补的方法,指出了根据电能表内部电源结构计算能正确退补电量。并给出了多功能电能表运行在各种功率因数下缺相故障时无功计量运行的象限,可供现场处理电能计量故障人员参考。

关键词:有功;无功计量;缺相计量

中图分类号:TM933.4

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0068-03

目前现场运行的多功能电能表、智能电能表和进口多功能表的故障采用传统方法计算退补电量,会出现错误结果。利用无功计量象限可以判断故障性质,依据电能表内部供电结构计算能正确退补电量。文中介绍了国产和进口多功能电能表无功计量原理,提出了多功能电能表缺相故障情况下无功退补的方法,对实验室模拟多功能电能表运行在各种功率因数下缺相故障无功计量进行了测试,积累了大量测试数据。

1 多功能电能表无功计量

1.1 四象限无功定义

不同国家对四象限无功的定义不一样。根据电力行业标准 DL/T645—1997^[1],电能测量四象限的定义如图 1 所示。

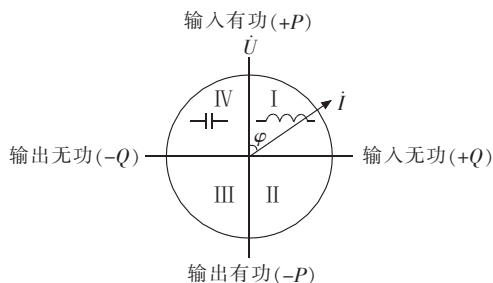


图 1 四象限无功应用示意图

I 象限:输入有功功率 P (阻感性负荷),输入无功功率 Q ; II 象限:输出有功功率 P (负荷相当于 1 台欠励磁发电机),输入无功功率 Q ; III 象限:输出有功功率 P (负荷相当于 1 台过励磁发电机); IV 象限:输入有功功率 (阻容性负荷),输出无功功率。

2 多功能电能表无功计量原理

2.1 电压移相无功原理

一般多功能电能表无功计量是将计量芯片采用移相器电压移相 90° 后与电流相乘得到无功瞬时值,将无功瞬时值进行累加并除以累加点数即得到无

收稿日期:2012-08-10;修回日期:2012-09-24

功平均值^[2](如图 2 所示)。

$$Q_v = u'_{uv} i_u \cos(60 - \varphi_a) \quad (1)$$

$$Q_w = u'_{wv} i_w \cos(120 - \varphi_c) \quad (2)$$

令 $u'_{uv} = u'_{wv}$, $i_u = i_w$, $\varphi_u = \varphi_w = \varphi$, 则:

$$Q_{\text{总}} = Q_u + Q_w = \sqrt{3} u i \sin \varphi \quad (3)$$

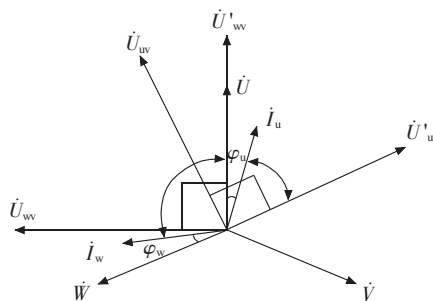


图 2 电压移相 90° 度向量

2.2 进口多功能电能表无功计量原理

目前国内进口主要是兰吉尔 LG 和 ALPhaA1600 2 种型号多功能电能表,兰吉尔 LG 和国产多功能电能表无功计量原理相同。ALPhaA1600 型号的多功能电能表采用电流逆时针移相 90° , 所对应电压余弦计算无功如图 3 所示。

$$Q_v = u_{uv} i'_u \cos(60 - \varphi_a) \quad (4)$$

$$Q_w = u_{wv} i'_w \cos(120 - \varphi_c) \quad (5)$$

令 $i'_u = i'_w$, $u_{uv} = u_{wv}$, $\varphi_u = \varphi_w = \varphi$, 则:

$$Q_{\text{总}} = Q_u + Q_w = \sqrt{3} u i \sin \varphi \quad (6)$$

可见,实际上无功计量不论是移相电压滞后 90° , 还是电流超前 90° , 无功计量原理都一样。

3 电能表运行在可能的功率因数区域故障分析

3.1 国产电能表故障

φ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 区间为 25° 时,断 U 相电压时校验台试验数据:国产多功能电能表和智能电能表误差为 -88.4% 运行在四象限;国外进口(兰吉尔 LG)多功能电能表误差 -50% 运行在第一象限;断 W 相电压时校

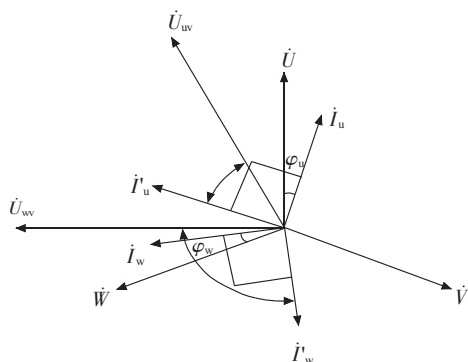


图3 电流移相90度向量

验台试验数据:国产多功能电能表和智能电能表误差12%运行在第一相限;国外进口(兰吉尔 LG)多功能电能表误差-50%运行在第一相限。

分析如下。国产电能表供电方式全部采用2个互感器给主板供电(如图4所示),当电能表断U相电压时,无功向量如图5所示,有:

$$Q = u_{wv} i_w \cos(240 + \varphi) = u_{wv} i_w \cos 265$$

$$G = \frac{\cos(240 + \varphi)}{\sqrt{3} \sin \varphi} = \frac{\cos 265}{\sqrt{3} \sin 25} = -0.12$$

误差为-88%,无功电量记录在第四象限。

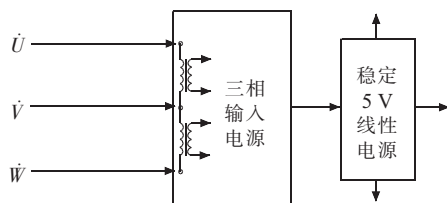


图4 国产多功能电能表电源供电原理

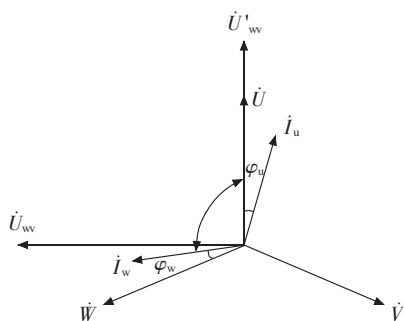


图5 缺U相电压时无功计量向量

电能表断W相电压时,无功向量如图6所示,有:

$$Q = u_{uv} i_u \cos(60 - \varphi) = u_{uv} i_u \cos 35$$

$$G = \frac{u_{uv} i_u \cos 35}{\sqrt{3} u_{uv} i_u \sin 25} = 1.12$$

误差12%,无功电量记录在第一象限,断电压和断电流误差记录象限一致。

3.2 进口(兰吉尔 LG)多功能电能表故障分析

进口电能表供电方式采用3个互感器给主板供电(如图7所示),当电能表断U相电压时(如图8所

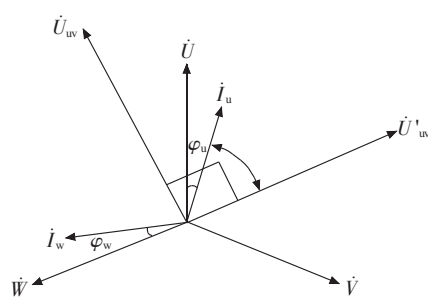


图6 缺W相电压时无功计量向量

示),U相端子对V相有50V。有:

$$Q = 0.5 u_{wv} i_v \cos \varphi + u_{wv} i_w \cos(120 - \varphi)$$

$$G = \frac{0.5 \cos \varphi + \cos(120 - \varphi)}{\sqrt{3} \sin \varphi} = \frac{0.5 \cos 25 + \cos 95}{\sqrt{3} \sin 25} = 0.5$$

误差-50%,无功电量记录在第一象限,国产电能表计量无功在第四象限。

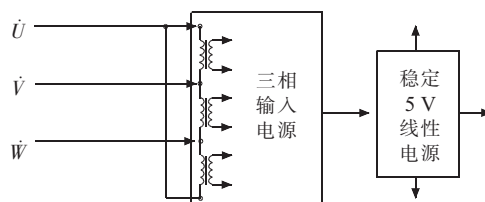


图7 进口多功能电能表电源供电原理

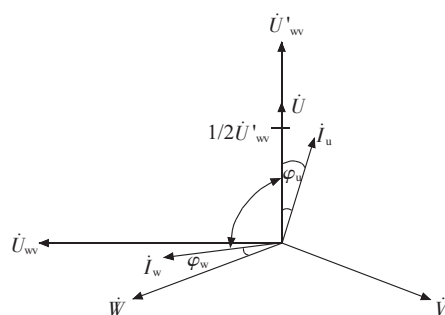


图8 缺U相电压时无功计量向量

当电能表断U相电流时(如图9所示),有:

$$Q = u_{wv} i_w \cos(240 + \varphi) = u_{wv} i_w \cos 265$$

$$G = \frac{\cos(240 + \varphi)}{\sqrt{3} \sin \varphi} = \frac{\cos 265}{\sqrt{3} \sin 25} = -0.12$$

误差-88%,无功电量记录在第四象限。

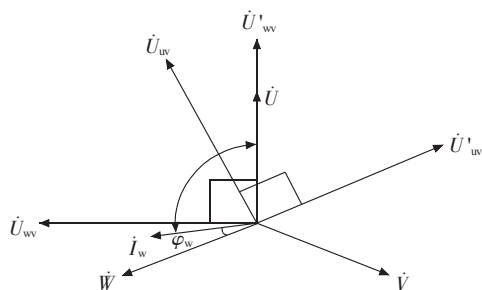


图9 缺U相电流时无功计量向量图

当电能表断W相电压时(无功向量如图10所

示),W 相端子对 V 相有 50 V。有:

$$Q = u_{uv} i_u \cos(60-\varphi) + 0.5 u_{uv} i_w \cos(180-\varphi) =$$

$$u_{uv} i_u \cos 35 + 0.5 u_{uv} i_w \cos 155 = 0.366 ui$$

$$G = \frac{0.366 ui}{\sqrt{3} u i \sin 25} = 0.5$$

误差-50%,无功电量记录在第一象限。

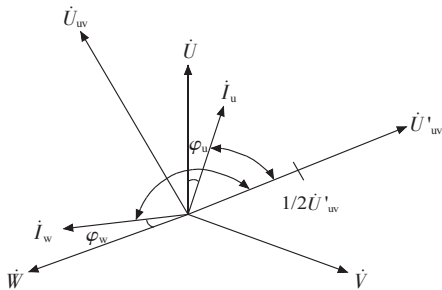


图 10 缺 W 相电压时无功计量向量

当电能表断 W 相电流时(如图 11 所示),有:

$$Q = u_{uv} i_u \cos(60-\varphi) = u_{uv} i_u \cos 35$$

$$G = \frac{u_{uv} i_u \cos 35}{\sqrt{3} u_{uv} i_u \sin 25} = 1.12$$

误差 12%,无功电量记录在第一象限。

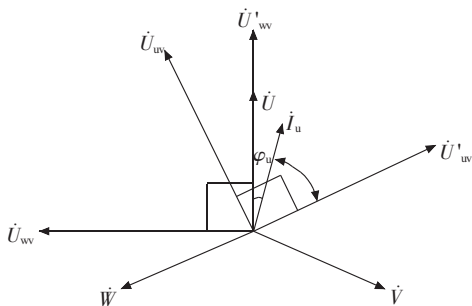


图 11 W 相电流时无功计量向量

综上所述,国产三相三线多功能表和智能电能表,断电流和断电压故障误差一致,无功电量记录象限一

致。进口电能表(兰吉尔 LG)断电流和断电压故障误差不同,无功电量记录象限也不同,断电流完全与国产多功能电能表断电压故障是一致的。

电能表在现场运行可能遇到的功率因数区域,实验室校验台试验数据如表 1 所示。

表 1 各种多功能电能表故障实验室试验数据

电流滞后 电压角 / (°)	缺相 故障	国产多 功能表		国产智能 多功能表		进口兰吉尔 LG	
		误差 /%	运行 相限	误差 /%	运行 相限	误差 /%	运行 相限
25	U 相	-88.43	IV	-88.46	IV	-49.95	I
	W 相	11.55	I	11.75	I	-49.98	I
350	U 相	115.33	IV	115.16	IV	-49.44	IV
	W 相	15.13	I	15.18	I	-50.55	IV
50	U 相	-74.12	I	-74.12	I	-49.87	I
	W 相	-25.93	I	-25.97	I	-50.10	I
300	U 相	-33.28	IV	-33.31	IV	-49.76	IV
	W 相	-66.74	IV	-66.77	IV	-50.21	IV
80	U 相	-55.04	I	-55.06	I	-49.85	I
	W 相	-44.98	I	-45.01	I	-50.01	I

4 结束语

目前江苏电网全部采用了智能电能表和进口多功能电能表进行计量,在发生缺相故障情况下,不能采用以往的退补方法进行退补电量,要根据电能表的供电电源内部接线进行分析,合理进行退补。文中介绍无功缺相故障的退补方法,同样适合有功缺相故障的退补。

参考文献:

- [1] DL/T 645—1997,多功能电能表通信规约[S].
- [2] 江苏省电力公司主编.电能计量装置二次接线判读[M].北京:中国电力出版社,2008.

作者简介:

高怀平(1961),女,江苏南京人,工程师,从事电能计量工作。

Reactive Power Measurement of Multi-Function Watt-Hour Meter

GAO Huai-ping

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: Reactive power measurement principles of domestic and imported multi-function watt-hour meter are introduced. This paper proposes a method to refund reactive power in case of multi-function watt-hour meter fault with lacking phase which turns out that it works according to the internal structure of power meter. The quadrants of the multi-function watt-hour meter running in all kinds of power factor under phase-lacking failure reactive power measurement are given, which can be a reference for the field staff to deal with the energy metering fault.

Key words: active power; reactive power measurement; phase-lacking measurement

欢迎投稿 欢迎订阅

1 025 t/h CFB 锅炉屏式过热器管失效分析

杨庆旭, 杨超, 孙雄, 姚永灵
(江苏方天电力技术有限公司, 江苏南京 211102)

摘要:某1 025 t/h CFB 锅炉屏式过热器管多次发生靠近水冷壁前墙位置的爆漏,采用宏观检查、化学元素分析、显微组织分析及显微硬度分析等方法对屏式过热器管爆漏原因进行了试验与分析。结果表明:屏式过热器结构应力在靠近水冷壁前墙部位的叠加、屏式过热器管固定块焊缝的焊接质量不良以及启停炉过程中的应力循环等原因综合作用,导致固定块角焊缝低周高应力疲劳断裂,裂纹扩展至管子致使屏式过热器管爆漏。

关键词:CFB 锅炉;屏式过热器管;爆漏;失效分析

中图分类号:TK223.3⁺2

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0071-03

某资源综合利用电厂安装2台东方锅炉厂生产的DG1025/17.5-II 19型循环硫化床(CFB)锅炉,其1号炉于2009年10月投产。2011年8月期间,1号炉屏式过热器管发生多次爆漏,均位于屏式过热器管屏靠近前墙水冷壁部位的浇筑料保护部位,泄漏管位于管屏中从上向下1~5根之间。其中一次爆漏情况为,炉右向炉左数第7排靠近前水处从上向下第1根管(编号为7-1)撕裂,喷出的蒸汽吹损第2根(编号为7-2),并将前墙水冷壁吹损产生爆管。屏式过热器管设计规格为 $D51\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,材质为12Cr1MoVG,每屏共58根管子。为查明屏式过热器管爆漏原因,笔者对其进行了检验和分析。

1 检查与试验

1.1 裂纹及宏观检查

7-1管子泄漏处如图1所示,泄漏点位于固定块端部角焊缝焊趾处,附近多处吹损泄漏形貌,7-2管上的固定块管段已被切除。该开裂垂直向下已穿透管壁,利用线切割的方式切开开裂附近的管壁、分离开裂面,断口形貌如图2、图3所示,可见明显的疲劳纹路,且端部角焊缝疑似被吹损出一深坑。



图1 7-1管子开裂形貌

1.2 化学成分分析

对7-1管样进行合金元素含量分析,结果见表1,其成分均满足GB5310—2008对管子材质的要求。



图2 管子带焊缝一侧裂纹断面

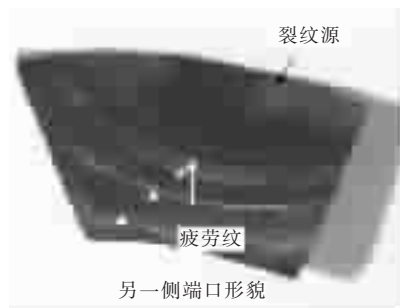


图3 管子另一侧裂纹断面

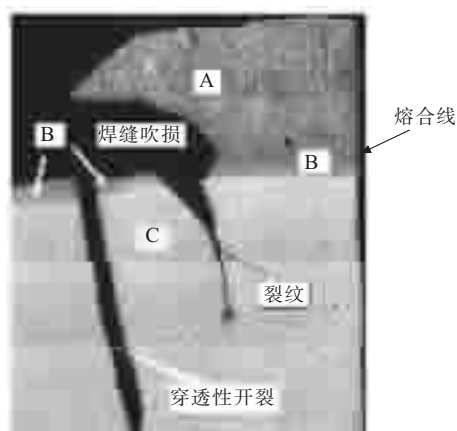
表1 屏式过热器管合金成分分析结果 %

成分	7-1 屏式过热器管	GB5310—2008
Cr	1.05	0.9~1.2
Mn	0.54	0.4~0.7
Mo	0.35	0.25~0.35
V	0.22	0.15~0.30

1.3 显微组织检查

在开裂处垂直于开裂面取样,整体形貌见图4。在穿透性开裂旁还有一处裂纹深入基体,但未穿透。焊缝吹损处及未穿透裂纹开口处的50倍形貌如图5所示,右上角为A区焊缝组织,为柱状晶,未穿透裂纹开口处两侧均为热影响区,进一步证实该处焊缝被吹损,因为热影响区只会出现在紧邻焊缝的区域。A区焊缝下方的热影响区紧邻熔合线处为马氏体和贝氏体的淬硬组织,该区下方为贝氏体的细晶区,并与母材相邻。

焊缝吹损处热影响区及穿透性开裂开口处形貌如



A 为焊缝;B 为热影响区;C 为母材

图 4 开裂处整体组织形貌(10 倍)

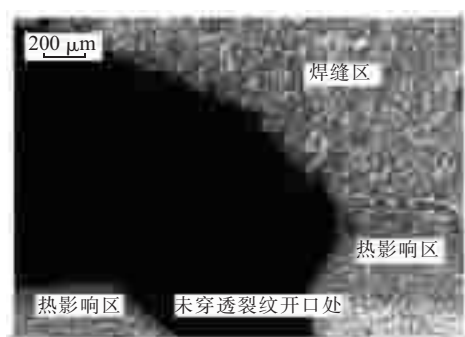


图 5 焊缝吹损处及未穿透裂纹开口处组织

图 6 所示(黑色棱形为显微硬度压痕),在靠近表面处也有马氏体和贝氏体的淬硬组织,开裂呈直线型,内壁处一小段开裂与直线开裂呈一定拐角(如图 7 所示)。外壁开裂处有约 0.046 mm 的氧化皮,内壁处开裂未见氧化皮,可见开裂是从外壁向内壁缓慢扩展(或阶段性扩展),外壁处开裂在运行过程中生成氧化皮,扩展至内壁处时,由于强度不足而呈一定角度撕裂。

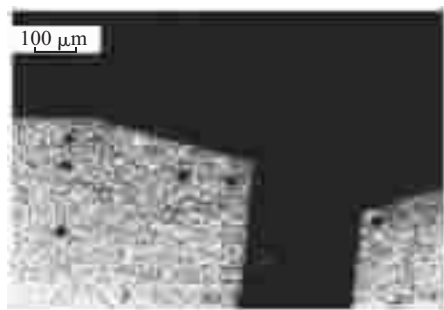


图 6 焊缝吹损处热影响区及开裂形貌

母材金相组织为铁素体+珠光体,珠光体开始分散,晶界有碳化物聚集,球化 2.5 级,在开裂不远处母材取样显微组织同开裂处母材组织相同。

1.4 显微硬度检测

对 A 区焊缝处、B 区淬硬区、B 区细晶区及母材处进行显微硬度检测,显微硬度平均值依次为 248 HV0.2、260 HV0.2、194 HV0.2、180HV0.2,可见淬硬区硬



图 7 与直线开裂呈一定拐角的内壁处撕裂

度最高。

2 综合分析

2.1 结构及受力分析

结构及受力如图 8 所示,屏过垂直段管子之间以鳍片相连,下方水平段管子以固定块相连,使得屏过受热面成为一个整体,相互之间自由膨胀受阻。从锅炉总图上看,尽管上方屏过集箱由恒力吊架悬吊,在启停炉过程中整个管屏可以整体向上膨胀,但浇筑料保护部位管子之间的膨胀因上部管子间的鳍片连接,无法向上自由释放;同时水平段管子穿墙处于水冷壁前墙浇注固死,因此水平段管子相对水冷壁前墙会向炉后膨胀,垂直段向下膨胀。

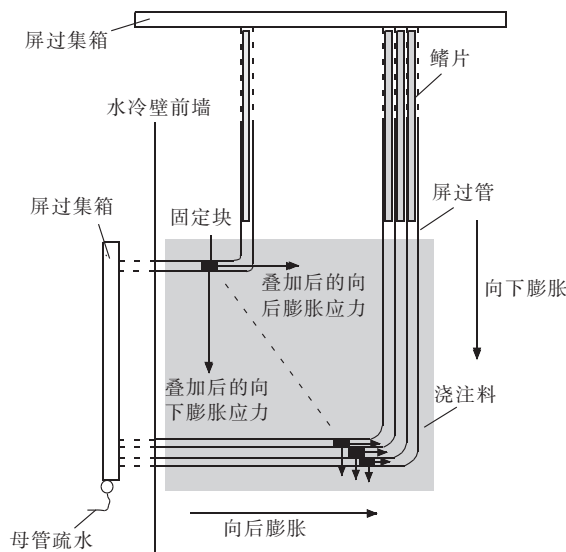


图 8 结构及受力示意图

由于外圈管相对于内圈管长度大,因管子全部由鳍片或定位块固定,不能相对位移,必然会对定位块产生向下和向后的拉伸应力并传递到内圈管上。如图 8 所示,外圈第 1 根的相对膨胀应力传递到外圈第 2 根管上,并与第 2 根相对于第 3 根的膨胀应力叠加再传到第 3 根管上,依次类推,最内圈区域的固定块角焊缝部位将承受较大的附加弯曲和拉伸应力,因此屏式过热器最内圈区域成为整个管屏中最受力状况最恶劣区域,爆漏数次在此区域发生也证明了上述分析。

2.2 断口分析

开裂处经分离后观察到断口上有较多的疲劳纹(又称海滩纹或贝纹线),为典型的疲劳断口,无明显变形的脆性断口也符合疲劳断裂的特征^[1]。由图2、图3看出,贝纹线间距较大,宏观上整个断口上只有间距不一的约7~10条贝纹线,说明该断口为低周高应力疲劳断裂,每一条疲劳纹可能对应一次启停炉,即一次交变应力的循环。启炉过程中,屏过管由常温上升到管子设计壁温536℃甚至更高,热膨胀量较大,由于外圈与内圈的膨胀量不一导致的相对膨胀应力,特别是垂直方向的膨胀应力会从零升到最高;停炉过程中,管子温度降低至室温,管子膨胀应力又会由最高降为零。因每次启停炉的过程中,升温 and 降温的速度不尽相同,每次在裂纹处产生的热膨胀应力峰值不同,所以造成每次裂纹扩展距离的差别。

疲劳断口一般分为:裂纹源区、疲劳扩展区(宏观上的贝纹线或微观上的疲劳条带)和瞬断区,疲劳扩展区贝纹线所指的圆心方向即为裂纹源区域^[1]。图2、图3中贝纹线所指的圆心方向为外壁证实开裂是从外壁向内壁扩展,内壁瞬断区所占面积较小,说明公称应力(即蒸汽内压引起的主应力)并不大,而由于热膨胀引起的附加应力较大,导致裂纹经过几次交变应力后迅速扩展断裂,即低周高应力疲劳断裂。

2.3 裂纹源分析

管子开裂泄漏处位于长条形固定块端部角焊缝热影响区,在开裂附近还有一条未穿透的裂纹,这2条开裂及裂纹均从热影响区向母材扩展并深入母材。在热影响区区域靠近熔合线处均发现马氏体+贝氏体的淬硬组织,硬度较高(260HV0.2),淬硬组织及角焊缝焊接时拘束应力的存在,可能使焊后接头中萌生垂直于熔合线的横向冷裂纹或起源于应力集中缺口部位的焊趾裂纹,这些裂纹在运行前均只会在热影响区中的淬硬组织中扩展,不会扩展至抗裂性良好的母材,但在运行中交变应力或较大外载下向母材扩展甚至断裂^[2]。

由于开裂处的焊缝已被吹损,找不到开裂处焊缝咬边、未熔合的证据,因此也不排除焊缝咬边或未熔合

形成裂纹源的可能。

3 结束语

屏过管与固定块角焊缝处断裂为低周高应力疲劳断裂,锅炉启停炉时热膨胀交变应力构成了疲劳载荷,由于结构原因,最内圈区域屏过管固定块角焊缝处因热膨胀应力叠加导致的附加弯曲及拉伸应力最大,疲劳源很可能是角焊缝热影响区的冷裂纹,也可能是焊接咬边、未熔合等其他缺陷,冷裂纹的产生主要是因为角焊缝端部热影响区出现淬硬组织。焊接质量不佳是屏过泄漏的次要原因,内圈区域管排大的附加应力导致其在焊接缺陷等薄弱环节形成裂纹源并疲劳扩展。

建议尽可能改变管排固定装置的结构避免或减弱内圈管排固定块焊缝部位的应力叠加,如将固定块换成限位装置使其在某个方向能自由膨胀,或在每屏管排上隔几根取消固定块以减弱膨胀应力叠加的效果。应避免频繁地启停炉,在启停炉过程中应降低升、降温速度,防止过大的热冲击造成裂纹迅速扩展。严格控制焊接质量,避免咬边等造成应力集中的缺陷,通过严格控制焊接热输入、合理选择预热温度、紧急后热等方法避免焊缝冷裂纹的产生。同时在停炉检修过程中加强角焊缝处的检查,在裂纹穿透管壁前及时更换,避免造成更大的损失。

参考文献:

- [1] 田燕.焊接区断口金相分析[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [2] 张文钺.焊接冶金学(基本原理)[M].北京:机械工业出版社,1999.

作者简介:

杨庆旭(1978),男,河南平顶山人,高级工程师,从事电站焊接和金属材料理化分析等相关工作;

杨超(1979),男,湖北监利人,工程师,从事电站金属材料理化分析等相关工作;

孙雄(1983),男,湖北荆州人,工程师,从事金属材料理化分析等工作;

姚永灵(1974),男,江苏苏州人,高级工程师,从事汽轮机技术监督及性能测试工作。

Failure Analysis on Platen Superheater Tubes in 1 025 t/h CFB Boiler

YANG Qing-xu, YANG Chao, SUN Xiong, YAO Yong-ling

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: For the platen superheater of one 1 025 t/h CFB boiler, explosive leakage issues have occurred in the region near the front water wall for several times. In this paper, by using macro-examination, chemical element analysis, microstructure and microhardness analysis, the main reasons for these issues are identified. It can be concluded from the analysis results that, the overlay effects of the mechanical stresses in the region near the front water wall, the weak welded joints of the fixed blocks as well as the boiler's start up-shut down cycles will cause high-stress low-cycle fatigue fracture in the fillet weld of fixed blocks. The subsequent crack propagation finally leads to the explosive leakage issues.

Key words: CFB boiler; platen superheater tube; explosive leakage; failure analysis

1 000 MW 发电机组烟气余热换热器设计方案探讨

吴 江

(江苏新海发电有限公司,江苏 连云港 222023)

摘 要:针对某 1 000 MW 燃煤发电机组锅炉排烟余热利用问题,介绍了采用低压省煤器的初步设计方案,定性分析了设计的基本要求,比较了不同方案的性能特点,并确定了一种方案作为推荐方案,利用锅炉设计数据计算分析了该方案的经济性,为大型电站锅炉综合利用排烟余热提供了一定参考。

关键词:燃煤机组;烟气余热;换热器;设计

中图分类号:TK172.4

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0074-04

目前火电厂烟气脱硫已成为环保强制要求,其中以湿式石灰石-石膏烟气脱硫工艺最为常用,湿式石灰石-石膏脱硫烟气进入脱硫塔的温度约 80℃,锅炉空气预热器出口的烟气经过喷淋减温或烟气换热器(GGH)后进入脱硫塔。其中回转式 GGH 由于存在漏烟、堵塞,影响脱硫效率等缺陷已较少采用。工程脱硫岛不设置 GGH,电除尘器出口烟气温度约 125℃,如果采用喷水对烟气减温至 80℃进入脱硫塔,机组热耗率验收(THA)工况喷水量约 74 t/h,不仅耗水量较大,烟气量增加约 3%,而且还损失烟气减温的热量。文中参考日本 1 000 MW 机组烟气余热二级换热器,以及外高桥三期工程低温省煤器的设计思路,探讨工程烟气进脱硫塔之前与部分凝结水进行换热,从而降低脱硫烟气温度,并利用余热提高机组效率的可行性与经济性。

1 烟气余热换热器的应用现状

国外烟气余热换热器的应用较早。如德国黑泵(Schwaree Pumpe)电厂加热给水的烟气冷却器布置在电除尘器和脱硫装置之间,其设置类似于炉外布置的省煤器,烟气通过烟气冷却器从 170℃降到 130℃后进入脱硫装置^[1]。德国科隆 Nideraussem 电厂 1 000 MW 机组采用分隔烟道系统充分降低排烟温度,将低温省煤器加装在空气预热器的旁路烟道中,在烟气热量足够的前提下引入部分烟气到旁路烟道加热锅炉给水。日本常陆那柯电厂采用水煤方式的管式 GGH,烟气放热段的 GGH 布置在电除尘器上游,烟气被循环水冷却后进入低低温除尘器(烟气温度在 90~100℃左右),烟气加热段的 GGH 布置在烟窗入口,由循环水加热烟气。

国内第 1 台设置烟气余热换热器的电厂为西北院设计的龙口电厂(2×100 MW)。目前外高桥三期、营口热电厂也设置了烟气余热换热器,系统已经投入使

用,均为上海成套设计研究所设计,运行良好。由于国内烟气余热换热器投运机组不多,所以烟气余热换热器的系统方案设计、制造、运行和维护需要结合具体工程进行进一步研究。

2 烟气余热换热器的设计

2.1 材料选择

回收烟气热量,首先应考虑烟气余热换热器的低温腐蚀问题。其腐蚀有 2 种情况,一是由于烟气结露造成的低温腐蚀,另一是高温环境下的氧化腐蚀。对于换热器来说,第一种腐蚀是最主要的,其中对于烟气酸露点的确定是判断换热器低温腐蚀的重要依据。烟气露点温度与 SO₃ 浓度密切相关,SO₃ 的生成直接影响烟气露点的温度。对于烟气露点的计算,前人总结了很多方法,较常用的有下列 3 个公式,分别是前苏联 73 标准、98 标准推荐公式以及我国冯俊凯院士的计算公式^[2]。

$$t_{Dp} = t_{Dp.o} + \frac{125(S_{ar})^{1/3}}{1.05^{\alpha_{th}/A_{ar}}} \quad (1)$$

$$t_{Dp} = t_{Dp.o} + \frac{200(S_{ar})^{1/3}}{1.05^{\alpha_{th}/A_{ar}}} \quad (2)$$

$$t_{Dp} = t_{Dp.o} + \frac{\beta(0.42S_{ar})^{1/3}}{1.05^{0.42\alpha_{th}/A_{ar}}} \quad (3)$$

式中: $t_{Dp.o}$ 为烟气中纯水露点温度; S_{ar} 为收到基折算硫份; α_{th} 为表征与飞灰含量对酸露点影响程度的系数,对于煤粉炉 α_{th} 取 0.8~0.9; A_{ar} 为收到基折算灰份; B 为与炉膛出口过剩空气系数有关参数,文中 β 取 121。根据工程燃用设计煤种空气预热器出口烟气的水蒸气和煤质资料,这 3 种公式计算结果分别为 92.4℃,88.4℃,82.1℃。为保证机组及烟气余热换热器长期运行的安全可靠,建议换热器烟气侧出口温度不低于 3 种计算公式中露点温度最高的,因此工程烟气余热换热器烟气侧出口温度暂定为 95℃。

采用有限腐蚀的烟气余热换热器系统,换热器壁

面温度最低点基本等同于换热器凝结水进口温度,因此该温度需要高于烟气中水蒸气饱和温度才能保证酸露腐蚀的影响尽量小。经研究金属壁温高于水蒸气露点温度 20℃以上时,钢材腐蚀速度为 0.1~0.25 mm/a。根据工程煤种特点,水蒸气露点为 42.6℃,因此建议烟气换热器水侧温度不低于 70℃为宜。

参考已投入使用的烟气余热换热器运行状况,选用奥氏体不锈钢 TP316L、TP304L 或考登钢作为换热器材料,可保证烟气换热器长期安全使用。换热器采取何种材料还需根据工程煤质与制造厂商沟通后确定,烟气余热换热器暂按耐腐蚀的低合金碳钢考虑。

2.2 烟气余热换热器的选型

该换热器的介质是烟气和凝结水,工作特性类似于锅炉内的省煤器。可供选择的换热器型式有管式换热器和板式换热器 2 种。

管式换热器的优点是结构简单,易于检修,容易清理堵灰,制造技术成熟,可靠性高。管式换热器有光管和高频焊翅片管 2 种。翅片管的优点是换热效率较高,可减少换热器材料用量。光管的优点是制造工艺简单,抗磨损、堵灰性能较好。有关研究表明,在相同的换热条件下,翅片管的管壁温度较高,抗腐蚀能力强。引风机后的烟气含尘量已很低,选用翅片管基本没有磨损和堵灰的问题。管式换热器的缺点是占地面积大,检修维护不方便。

板式烟气—水换热器是近年来新开发的换热器。其优点是在相同的换热面积下,换热效率较高,节省占地面积,节省材料用量,可在线清洗或检修人员从检修口进入用高压水枪清洗。板片可抽出检修或更换。板式换热器的使用寿命优于管式换热器,检修周期长。

2 种换热器均可满足设计需要。营口热电厂、外高桥三期工程均采用管式换热器,板式换热器目前国内还无生产及投运经验,整套设备需进口,价格较高。因此,工程暂按管式换热器进行设计选型。

2.3 烟气系统布置和设置

2.3.1 烟气系统布置

工程如装设烟气余热换热器,有 2 种布置方案。方案一是将余热换热器布置在空气预热器出口之后,除尘器入口之前;方案二是将余热换热器布置在 2 台引风机出口烟道汇合之后,脱硫塔入口之前。

方案一。烟气在空气预热器出口之后就被减温至 80℃,其体积流量也相应减少约 11.3%,可以减少除尘面积,减少除尘器的占地面积和用材。电除尘器的除尘效率随温度的降低而增高,但是烟气温度的降低增加了电除尘器防腐的难度,同时增加了除尘器内堵灰的可能性。考虑到国内电除尘器低温防腐技术尚无投运的实例,而除尘器又是烟气处理中不可缺少的环

节,一旦除尘器因堵灰或腐蚀严重需要检修可能影响整个机组的运行。而且余热换热器内的烟气含有大量飞灰,换热器低温侧将会面临较严重的磨损和堵灰问题。因此不采用这种布置方案。

方案二。将烟气换热器放置在引风机出口之后,脱硫塔入口之前,此处烟气中的绝大部分飞灰已被除尘器除去,对换热器来说基本不存在磨损和堵灰的问题,因此换热器内可以使用翅片管式或板式以提高传热系数,而且可以免去蒸汽吹扫装置。置于引风机之后可避免由于换热器一旦腐蚀泄漏后,凝结水漏入引风机的问题,引风机叶片也不需要考虑低温防腐。该布置方案的运行可靠性和维护成本都优于第一种方案,而且占用空间少,可取代常规脱硫岛的 GGH 的位置。

2.3.2 烟气系统设置

根据工程烟气系统的设计特点,结合烟气余热换热器有 1×100%与 3×35%容量 2 种方案可供选择。

方案一。烟气余热换热器采用 1×100%容量换热器,烟气从 3 台引风机出口接出后汇成一路,进入烟气余热换热器与凝结水换热后,烟气进入吸收塔脱硫后排入烟囱。

方案二。烟气余热换热器采用 3×35%容量换热器,烟气从 3 台引风机出口接出后分别进入各自独立的烟气余热换热器与凝结水换热后,烟气再汇成一路进入吸收塔脱硫后排入烟囱。

根据工程的烟风系统特点、主厂房布置情况,推荐采用方案二,主要理由有以下几点:(1) 3×35%容量烟气余热换热器容量小,易于设计制造、安装检修,占地面积小。(2) 与 3×35%风机系统相匹配,系统可靠性高,当 1 台烟气换热器停运时,只需切断相应烟气支路,即可进行检修维护,不会对机组负荷产生较大的波动。(3) 从工程主厂房炉后布置情况看,1×100%方案换热器布置位置紧张,且换热器前后烟道直管段较短,烟气易产生旋流,降低换热效果,增加换热器磨损;而 3×35%方案换热器前烟道有较长直管段,烟气流动均匀性也较好。

2.4 凝结水系统设置及换热器的热平衡计算

工程选用陕西彬长大佛寺烟煤作为设计煤种,晋北烟煤作为校核煤种。以下均按照工程 1 台机组燃用设计煤种的 THA 工况计算。装设烟气余热换热器之前的各级低压加热器部分热平衡如图 1 所示。

根据工程燃料热平衡计算书和汽机热平衡,换热器将电除尘器出口烟气温度 127℃降至 95℃进入脱硫塔。从图 1 可以看出,烟气余热换热器水侧进水从 6 号、7 号、8 号低加进口接出,水侧出水接入 6 号、7 号低加出口均是可行的。如上所述,金属壁温在 70℃以上可有效减缓低温腐蚀现象,工程换热器进口水温暂

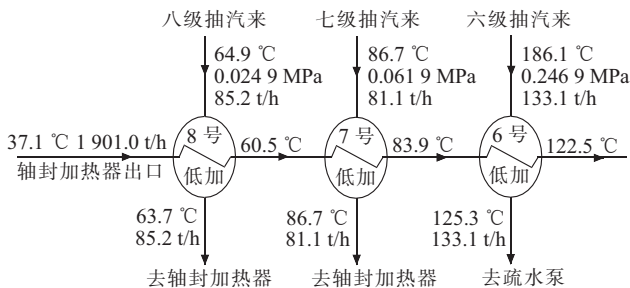


图 1 装设烟气余热换热器前热平衡

按不低于 70 °C 考虑。因此,换热器进水从 7 号低加出口凝结水接出。

在换热器设计中,为了尽量减小换热器面积,获得更大的传热温差,保证换热的正常进行,换热器只能采取逆流模式^[3]。为了尽量利用烟气余热的热量,凝结水从高级加热器抽出,节省的抽汽品质越高,做功能力也越强。从 7 号低加出口分流部分凝结水至换热器,凝结水在换热器内从 83.9 °C 加热至 110 °C 后,通过加压泵加压返回 6 号低压加热器入口,其凝结水流量由热平衡计算确定。凝结水在换热器内吸收的热量抵消了在 6 号低压加热器内的吸热,6 级抽汽量相应减少,减少的抽气量使低压缸做功增加,从而提高了热量利用效率,凝结水系统流程如图 2。受影响的 6 级抽汽流量也由热平衡计算重新确定。装设了烟气换热器之后的热平衡见图 3。

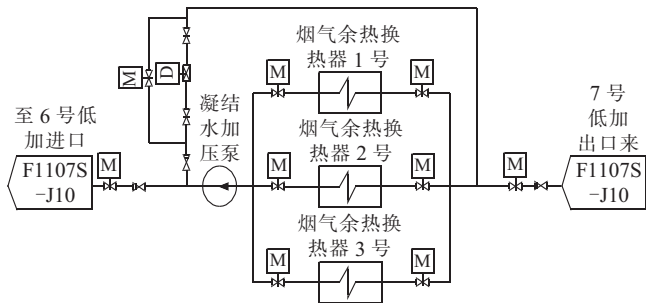


图 2 凝结水系统流程

增设烟气余热换热器后,低压缸各级抽汽通过自我平衡达到新的平衡点,参数会有细微调整。由于抽汽量改变不大,各级抽汽焓的抽汽焓变化也不大。因此,为方便经济性计算,低压缸各级抽汽温度、压强按不变考虑,凝结水流经各级加热器的进出口温度也没有变化。根据余热换热器烟气侧的放热量计算出换热器的水侧流量,再根据热量平衡计算出各段低压抽气量流量。计算结果如表 1 所示。

考虑风机功率增加、排汽能耗增加和加压泵能耗增加的影响后,供电标煤耗可节省 1.67 g/kW·h,具体计算结果如表 2 所示。

2.5 换热管面的积灰

烟气余热换热器的换热面管可以采用光管、螺旋

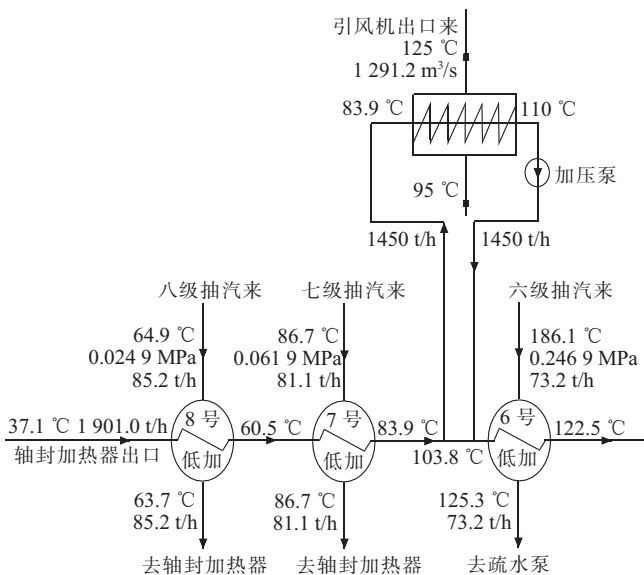


图 3 装设烟气余热换热器后热平衡

表 1 烟气余热换热器工况计算结果

序号	项目	数值	序号	项目	数值
1	发电标煤耗 / [g·(kW·h) ⁻¹]	270.2	12	低温省煤器进口烟气焓 / (kJ·kg ⁻¹)	1 847.2
2	烟气中 CO ₂ 质量分数	2.081	13	低温省煤器出口烟气焓 / (kJ·kg ⁻¹)	1 380.9
3	烟气中 SO ₂ 质量分数	0.010	14	凝结水进入省煤器流量 / (t·h ⁻¹)	1 450.0
4	烟气中 N ₂ 质量分数	7.453	15	凝结水进入低加流量 / (t·h ⁻¹)	541.0
5	烟气中 O ₂ 质量分数	0.567	16	6 号低加原抽汽量 / (t·h ⁻¹)	133.1
6	烟气中 H ₂ O 质量分数	0.519	17	6 号低加现抽汽量 / (t·h ⁻¹)	73.2
7	计算燃料消耗量 / (t·h ⁻¹)	363.2	18	6 号低加抽汽减少量 / (t·h ⁻¹)	59.9
8	烟气量 / (m ³ ·s ⁻¹)	1 291.2	19	6 号低加抽汽减少量增加的做功 / kW	7 594.5
9	凝结水流量 / (t·h ⁻¹)	1 901.0	20	汽机热效率降低值 / %	0.362
10	低温省煤器进口烟气温度 / °C	127	21	增加低温省煤器后发电标煤耗 / [g·(kW·h) ⁻¹]	268.27
11	低温省煤器出口烟气温度 / °C	95	22	发电标煤耗降低值 / [g·(kW·h) ⁻¹]	1.67

肋片管和高频焊翅片管。与普通光管相比,螺旋肋片管和高频焊翅片管传热性能好,在满足同样换热性能时,其换热面积比同种规格的光管要小。因此,采用螺旋肋片管或高频焊翅片管可有效降低烟气余热换热器的外形尺寸和管排数,减少烟气流动阻力。但是螺旋肋片管或高频焊翅片管易于积灰,在设计时可适当提高烟速,对于除尘器前布置烟气余热换热器,烟气流速推荐 10

表 2 烟气余热换热器节煤计算结果

序号	项目	数值
1	换热器烟气侧阻力+增加管道阻力 /Pa	1 200
2	风机增加电功率 /kW	900
3	排汽增加循环水泵电功率 /kW	75.2
4	加压机增加电功率 */kW	165.0
5	厂用电增加率 /%	0.198
6	原供电标煤耗 /[g·(kW·h) ⁻¹]	284.95
7	供电标煤耗降低值 /[g·(kW·h) ⁻¹]	1.67
8	现供电标煤耗 /[g·(kW·h) ⁻¹]	283.28

* 加压机增加轴功率按扬程 50 m,泵效率 86%计算。

m/s 左右;对于除尘器后布置烟气余热换热器,烟气流速推荐 15 m/s 左右。螺旋肋片管或翅片管可选择合适的间距以减少换热器管壁积灰。

此外,在烟气余热换热器管排间需增设声波吹灰器或者蒸汽吹灰器,且采用可拆卸的型式,设置水清洗系统,利用机组停用检修阶段进行水清洗。

3 烟气余热换热器经济性分析

设置烟气余热换热器后,脱硫岛可减少喷水量 50 t/h,全年节约用水 25 万 t。考虑脱硫岛工业水制备、喷淋设备投用等综合成本,水价按 1 元 /t 计,每台机组每年可节省水费 25 万元。

设置烟气余热换热器所增加的静态投资费用包括:(1) 每台机组换热器本体造价在 1 300 万元左右(含吹灰装置);(2) 烟气余热换热器增加的进出口烟道长度以及支撑换热器和烟道所增加的土建基础费用总共约 100 万;(3) 引风机按 0.05 万 /kW 的造价估算,需要增加 45 万元引风机造价;(4) 增加 300 m 左右的凝结水管道和相关阀门,同时需要对其进行放水保温处理,增加费用约 75 万元;(5) 增设凝结水加压水泵及其基础费用约 20 万元;(6) 考虑烟气余热换热器后烟温降低,换热器后烟道采取防腐措施,根据布置情况炉后增加防腐面积约 1 700 m²,脱硫部分增加防腐面积约 2 000 m²,按防腐采用耐高温玻璃鳞片 500 元 /m² 计算,需增加防腐费用 185 万元;(7) 烟气换

热器冷段腐蚀,约每 8 年需要更换冷段受热面,每次更换需要费用约 400 万元;(8) 每年的安装运行维护费用按设备投资的 1.5%计算,每年需要约 20 万元。

综上所述,设置烟气余热换热器需要增加静态投资 1 725 万元。每 8 年需要 400 万元更换冷段受热面,加上每年安装运行维护费用,折合至每年约需 70 万元运行维护费用。

烟气余热换热器经济性分析见表 3 所示。

表 3 烟气余热换热器经济性分析

序号	项目	数值	序号	项目	数值
1	供电标煤耗降低值 / [g·(kW·h) ⁻¹]	1.67	6	年维护检修费用 / (万元·a ⁻¹)	70
2	发电标煤价 / (元·t ⁻¹)	686.1	7	年节约资金 / (万元·a ⁻¹)	446.35
3	发电时间 /h	4 200	8	初始投资 / 万元	1 725
4	按耗煤量节约资金 / (万元·a ⁻¹)	496.35	9	折现率 /%	0.07
5	年节水费用 / (万元·a ⁻¹)	25	10	投资回收年份 /a	4.66

4 结束语

综上所述,设置烟气余热换热器的方案有效降低了烟气进入脱硫塔的温度,并且回收了烟气的余热。设计方案充分考虑了尾部烟气腐蚀、磨损、堵灰的问题,可以安全稳定运行。烟气换热器投入运行每台机组每年每年可节省燃料费用 446.35 万元,节省脱硫岛用水 25 万 t,按初始投资 1 725 万元计算,4.66 年可收回动态投资。

参考文献:

- [1] VON MANDE L H, EURICH K, TIELSCH P. 德国黑泵电厂两台 800 MW 供热机组的设计及试运行验收情况简介[J]. 上海电力, 2001(9): 56-59.
- [2] 冯俊凯, 沈幼庭. 锅炉原理及计算[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [3] 杨世命, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.

作者简介:

吴 江(1970),男,江苏江阴人,高级工程师,从事电厂生产和基建管理方面工作。

On the Design of Waste Heat Recovery Exchanger in 1 000 MW Thermal Power Plant

WU Jiang

(Jiangsu Xinhai Power Generation Co. Ltd., Lianyungang 222023, China)

Abstract: In order to solve the waste heat recovery issues of the high temperature exhaust flue gas in one 1 000 MW coal-fired thermal power plant, this work firstly introduces the design scheme for the low pressure economizer, and then qualitatively analyzes the basic design requirements. After that, through comparing the features of different design schemes, an optimal scheme is finally recommended. By employing the boiler design data, the economy of the recommended scheme is also analyzed. This work can provide valuable reference for other plants facing similar issues.

Key words: coal-fired power plant; waste heat of flue gas; heat exchanger; design

某 660 MW 汽轮发电机组漏氢量超标原因分析及处理

顾一明

(江苏射阳港发电有限公司, 江苏 射阳 224346)

摘 要:针对射阳港发电有限责任公司 1 台超超临界 660 MW 燃煤发电机组发电机漏氢超标问题, 利用现场检查结果分析了漏氢超标的主要原因, 并介绍了主要漏氢点的处理方法和效果; 给出了漏氢超标后的现场处理办法, 以及检修后的防范措施。

关键词:氢冷; 汽轮发电机; 漏氢; 治理

中图分类号: TM311

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)01-0078-03

射阳港发电有限责任公司 5 号机组为超超临界 660 MW 燃煤发电机组, 发电机选用东方电机股份有限公司生产的 QFSN-660-2-22 三相同步汽轮发电机。发电机采用水-氢-氢冷却方式, 即定子线圈直接水冷, 转子线圈直接氢冷, 转子本体及定子铁心氢冷, 定子出线氢内冷。发电机氢气系统采用闭式氢气循环系统, 设计漏氢量为 $13 \sim 19 \text{ m}^3/\text{d}$ 。密封油系统采用单流环密封油系统, 密封油路分别进入汽轮机侧和励磁机侧的密封瓦, 经中间油孔沿轴向间隙流向空气侧和氢气侧, 形成了油膜起到了密封润滑作用, 然后分两路(氢侧、空气侧)回油, 保证发电机内氢气不外漏。机组于 2011 年 8 月 5 日结束 168 试运行投入商业运行。在机组分段调试、168 试运行及投入商业运行初期, 发电机漏氢超标现象严重, 日漏氢量在 $40 \sim 50 \text{ m}^3/\text{d}$ 期间, 最大日漏氢量达到 $80 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上。为稳定机组安全运行及防范设备事故, 机组运行中被迫临时降氢压运行, 最高氢压由 0.45 MPa 降至 0.38 MPa, 严重影响发电机运行的经济性和安全性。在发电机负荷不变的情况下, 随着发电机氢压下降, 定子铁心温度有上升的趋势。文中分析了机组漏氢量超标原因, 并给出了处理办法。

1 漏氢原因分析

1.1 发电机内部氢气循环机理及漏氢

发电机采用径向多流式密闭循环通风(如图 1 所示), 定子铁心沿轴向分为 13 个风区, 6 个进风区和 7 个出风区相间布置。安装在转轴上的 2 个轴流式风扇(汽、励端各 1 个)将氢气分别鼓入气隙和铁心背部; 进入铁心背部的氢气, 沿铁心径向风道冷却进风区铁心后, 进入气隙; 少部分氢气进入转子槽内风道, 冷却转子绕组; 其他大部分氢气再折回铁心, 冷却出风区铁心, 最后从机座风道进入冷却器; 被冷却器冷却后的氢气进入风扇前, 进行再循环。

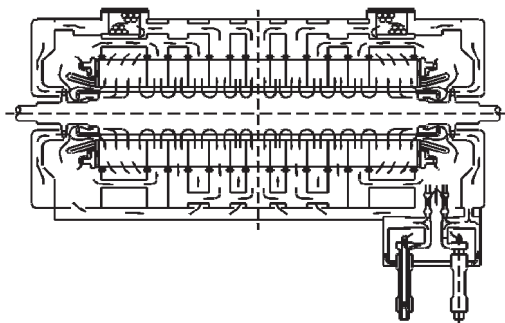


图 1 汽轮发电机内部通风示意图

整个定子出线装配采用氢气冷却, 冷却风路如图 2 所示。氢气从铜导电杆上端的进风口进入导电杆内管, 在底部转入双层铜管的环形空间, 通过上部一特殊接头排入过渡引线, 再由固定过渡引线的空心瓷套管排入出线罩的夹层风道后进入内外端盖间的低压风区。

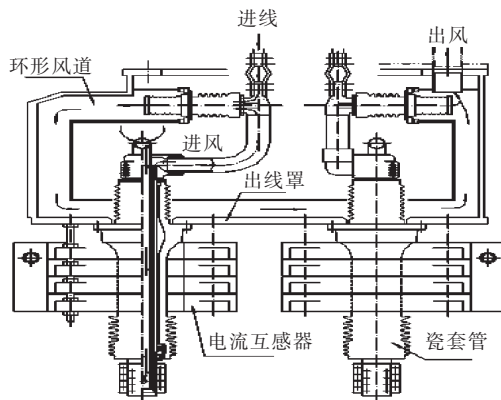


图 2 定子出线结构及通风示意图

发电机内氢气泄漏的途径较多且复杂, 基本可分为 2 种: 一是间接漏氢, 主要指由于设备故障引起发电机内氢气系统窜入其他系统中造成的漏氢, 如氢系统进入密封油系统、定冷水系统、封闭母线外壳等处; 另一是直接漏氢, 主要指因安装、制造不良产生法兰结合面、阀门内漏等造成氢气直接漏入到大气中。间接漏氢复杂且非常隐蔽, 一般情况下不易查找, 要靠辅助仪器、仪表检测, 再通过分析判断、排查, 最终确定漏点;

直接漏氢可通过漏氢检测仪、卤素检测仪、肥皂水等简单的检漏方法找到漏点。

1.2 现场漏氢主要原因的确定

(1) 发电机密封瓦故障。2010 年 8 月 15 日运行人员通过漏氢检漏仪检测到发电机空气抽出槽排油烟风机出口含氢量较大,氢压 0.38 Mpa 时达到 17%,将密封油氢气差压值由 0.056 Mpa 升至 0.075 Mpa,风机含氢量下降为 5%左右,初步判断密封瓦的密封性能不能满足要求。随后在跟踪检测过程中发现,随着发电机内氢压升高,风机出口含氢量也明显升高,在发电机内氢压 0.41 Mpa 时,风机出口含氢量上升至 67%左右,按照阶段时间内的漏氢量测算,每天泄漏量达 85 m³/d 左右,可见密封瓦故障是造成发电机漏氢的主要原因之一。

(2) 氢系统阀门、法兰检查。氢气干燥器排放门、气体置换排放总门、浮子油箱排空门、供氢安全门、供氢减压阀接头、发电机绝缘过热监测装置进口管道排污门、C 氢冷器底部排污门、氢气干燥进口管道外接临时阀门(空气置换用)均存在不同程度的漏氢现象。

(3) 发电机定子冷却水系统故障。人工检测和在线仪表检测测定冷水箱上部空间含氢量为 0,基本排除发电机定子线圈故障的可能性。

(4) 定子引出线套管泄漏。根据在线漏氢仪表检测装置显示数据为 0 及其他表计综合分析,基本排除此处漏氢的可能性。

(5) 氢冷器铜管泄漏。通过分析在线漏氢仪表显示数值,排除其漏氢可能性。

(6) 发电机本体结合面法兰检查。在发电机氢冷器法兰周围,检测到 A、B 角附近的含氢量分别为 12%,15%,进一步检查发现密封胶条有不同程度老化。

(7) 转子滑环下导电螺钉或中心孔堵板密封不严,经检查未发现泄漏现象。

经过对可能造成发电机漏氢量超标原因进行逐一排查,最终确定发电机密封瓦间隙过大、氢冷器法兰漏氢是造成该发电机漏氢量超标的主要原因。

2 漏氢超标处理方法及效果

2.1 机组运行中漏氢超标处理

(1) 加强发电机内氢气压力的监视,保证机组运行中氢压规定范围,达低限值时应及时补氢。

(2) 加强发电机线圈温度的监视,若温度超限,应限负荷运行。

(3) 保持厂房屋顶通风机运行,以便及时排出集聚在屋顶的氢气,防止局部达爆炸浓度极限。

(4) 保持汽机油系统排烟风机和发电机密封油系统防爆风机工作正常,及时抽出漏入油系统中的氢气,

发现其工作不正常应及时切换至备用风机。

(5) 如果氢气泄漏集聚在某个区域,检测出氢气浓度在爆炸范围,应杜绝附近的一切火种,包括打手机、使用对讲机、启停设备等,打开门窗,加强通风,尽快让集聚的氢气散发。

(6) 在发电机和氢管道附近区域需要动火,必须办理动火工作票,工作前必须检测区域范围内氢气浓度,必要时采取通风措施。

(7) 氢气压力降低时,注意发电机密封油压、油氢差压、回油扩大槽油位等参数的变化趋势,防止发电机进油。

(8) 补氢时操作氢气系统阀门应均匀缓慢,防止补氢速度过快,导致高速氢气流摩擦发生爆炸。

(9) 氢气系统操作或检查时应使用铜制工具,以防发生火花;使用钢制工具时应涂上黄油;禁止穿化纤衣服,鞋底禁止钉钉子;

(10) 定期试验备用交、直流密封油泵,保证其在异常情况下能及时、正常投入运行;必要时适当提高油氢差压值,以减少泄漏量;

(11) 氢气泄漏引发火灾或爆炸应按《运行规程》破坏真空紧急停机处理,现场要备足 CO₂,以便事故排氢用。

2.2 发电机主要漏氢点处理方法及效果

(1) 密封瓦解体检查及处理。2011 年 9 月 18 日至 27 日停机停运期间,对发电机密封瓦进行解体检查,发现汽测、励侧密封上、下瓦均有深度为 0.2 mm 的划痕,如图 3 所示,同时密封瓦和轴颈间隙均超出设计标准。

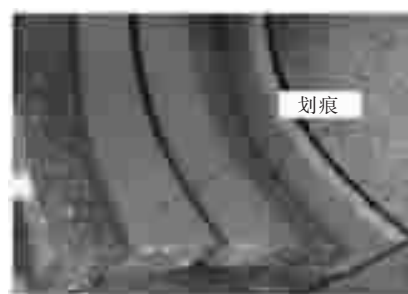


图 3 密封瓦解体表面

处理办法。考虑到密封瓦打磨工艺较复杂,时间较长,将汽端、励端密封瓦全部更换,更换后的新密封瓦间隙均符合有关标准(如表 1 所示)。

(2) 内漏阀门。分别进行更换阀门,或者加装二次门,其中发电机绝缘监测装置进口排污门解体检查发现阀芯上沾有一小块焊渣,清理打磨后正常。

(3) 利用机组停运期间更换 A、B、C、D 氢冷器法兰垫片,并刷涂耐油硅酮密封胶。

(4) 为防止发电机底部油水长期聚集造成相关法

表 1 密封瓦间隙尺寸 mm

间隙	旧瓦	新瓦
汽氢侧	0.24	0.19
汽空侧	0.29	0.18
励氢侧	0.25	0.18
励空侧	0.24	0.17

注:标准为 0.17~0.20 mm。

兰密封片产生油水腐蚀,一方面,加强对发电机氢冷器底部的定期排污,另一方面针对耐油硅酮密封胶老化造成新的漏点,利用停机期间,对发电机外连接管道法兰密封垫片全部进行更换,彻底消除了漏点。

(5) 处理后的效果。发电机主要漏氢点经过处理后,在机组投运前后进行了发电机气密封性试验。2011 年 9 月 28 日至 30 日期间,汽轮发电机组盘车状态下(1.5 r/min),发电机氢系统严密性试验结果平均值为 8 m³/d。2011 年 10 月 15 日至 19 日,汽轮发电机组运行后(3 000 r/min),发电机氢系统严密性试验结果平均值为 15 m³/d(如图 4 所示)。

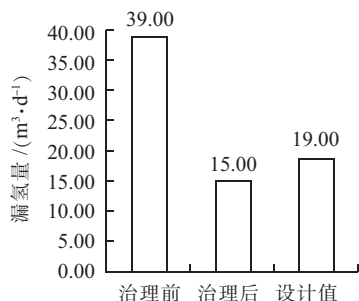


图 4 发电机漏氢治理前后比较

采取相关措施后,发电机的漏氢量得到明显改善,达到了制造厂家的设计要求,满足了机组安全运行。需要说明的是机组启停前后的数值差反映了发电机密封瓦由静态到动态转换过程中泄漏量的变化,虽然机组启动后发电机氢系统泄漏量有所增加,但仍在厂家合

同规定允许范围内。

2.3 后期运行防范措施

(1) 从密封瓦的磨损量来看,主要原因是在机组调试及试运行期间,润滑油及密封油系统杂质较多造成的,所以运行中必须加强汽轮发电机组的油质监视,定期取样化验分析,同时要保证在线油处理装置无故障情况下不得退出运行。

(2) 严格执行发电机大修后气密性实验、氢气冷却器气密(或水压)试验和回装后的整体气密试验等气密试验,不合格严禁机组启动。

(3) 对密封瓦和瓦座装配的间隙严格把关,控制在标准范围内。

(4) 建立监测漏氢、排查漏氢点的定期工作制度,发现漏氢量大时及时查找原因,对发现的漏点要采取有效措施进行封堵,防止漏点进一步扩大而导致机组被迫停运。

(5) 运行人员应熟悉氢气防火防爆知识和灭火技能,提高事故异常情况的应急处理能力。

3 结束语

为保证氢冷发电机的安全运行,避免由于氢气外泄引起爆炸等重大事故,正常运行中应加强发电机氢系统检查、维护、氢气泄漏量定期测算及排查工作,由于系统较为复杂,在发现发电机漏氢量增大等异常情况时,应进行系统检查和分析,从可能的情况逐一排查,找到漏氢的真正原因并加以预防和处理。解决氢气泄漏的关键是提高安装检修工艺水平,保证密封瓦、阀门及附属配件的产品质量,同时应加强油质监督。

参考文献:

[1] 陶苏东.电气设备及系统[M].北京:中国电力出版社,2006.

作者简介:

顾一明(1972),男,江苏大丰人,工程师,从事电厂运行管理工作。

Analysis and Solution of Overlarge Hydrogen Leakage in 660 MW Turbo-generator Unit

GU Yi-ming

(Jiangsu Sheyanggang Power Generation Co. Ltd., Sheyang 224346, China)

Abstract: Focusing on the serious hydrogen leakage issues occurred in one 660 MW coal-fired thermal power plant of Sheyanggang Power Generation Co. Ltd., field tests have been performed, and the obtained results have been analyzed so as to figure out the mean reasons. The detailed treatment measures for the detected leakage points as well as their effects are introduced. This paper also presents several feasible solution measures that can be adopted when facing serious hydrogen leakage issues.

Key words: hydrogen cooling; turbo-generator; hydrogen leakage; treatment

电动汽车无线充电技术

李斌¹,刘畅¹,陈企楚¹,林晶怡¹,邓小元²

(1.中国电力科学研究院,北京 100192;2.国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 210003)

摘要:电动汽车无线充电技术是一种新型的电动汽车能源供给方式。介绍了无线充电技术的分类、电动汽车无线充电技术的工作原理以及电动汽车无线充电技术的应用情况,对比分析电动汽车传统能源供给方式及无线充电方式的优缺点,并对电动汽车无线充电技术的实际应用提出了一些建议。

关键词:电动汽车;无线充电;无线电力输送;电磁感应;电磁耦合共振

中图分类号:U469.72

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0081-04

低碳经济核心是新能源技术与节能减排技术的应用,电动汽车能够较好地解决机动车排放污染与能源短缺问题,是我国战略性新兴产业。作为电动汽车大规模推广应用的重要前提和基础,电动汽车充换电设施建设引起了各方广泛关注。新能源产业的发展,尤其纯电动汽车的快速增长,必然会对电动汽车的充电方式多样化和方便性提出更高的要求^[1]。无线充电技术作为一项新兴技术,目前商业化运作主要应用于手机、电脑、随身听等小功率设备的充电上,在电动汽车领域目前还是一个全新的概念^[2]。随着无线充电技术的成熟,电动汽车将是无线充电设备最具潜力的市场。从无线充电技术的分类入手,分析了无线充电技术在电动汽车上的应用工作原理,并介绍了国内外电动汽车无线充电技术的应用研究情况,同时对电动汽车无线充电技术的应用进行了深入思考,提出了一些建议,以利于该项技术的实用化和产业化应用。

1 无线充电技术

无线充电技术引源于无线电力输送技术。无线电力传输也称无线能量传输或无线功率传输,主要通过电磁感应、电磁共振、射频、微波、激光等方式实现非接触式的电力传输。根据在空间实现无线电力传输供电距离的不同,可以把无线电力传输形式分为短程、中程和远程传输三大类^[3]。

(1) 短程传输。通过电磁感应电力传输(ICPT)技术来实现,一般适用于小型便携式电子设备供电。ICPT 主要以磁场为媒介,利用变压器耦合,通过初级和次级线圈感应产生电流,电磁场可以穿透一切非金属的物体,电能可以隔着很多非金属材料进行传输,从而将能量从传输端转移到接收端,实现无电气连接的电能传输。电磁感应传输功率大,能达几百千瓦,但电磁感应原理的应用受制于过短的供电端和受电端

距离,传输距离上限是 10 cm 左右。

(2) 中程传输。通过电磁耦合共振电力传输(ERPT)技术或射频电力传输(RFPT)技术实现,中程传输可为手机、MP3 等仪器提供无线电力传输。ERPT 技术主要是利用接收天线固有频率与发射场电磁频率相一致时引起电磁共振,发生强电磁耦合的工作原理,通过非辐射磁场实现电能的高效传输。电磁共振型与电磁感应型相比,采用的磁场要弱得多,传输功率可达几千瓦,能实现更长距离的传输,传输距离可达 3~4 m。RFPT 主要通过功率放大器发射射频信号,通过检波、高频整流后得到直流电,供负载使用。RFPT 距离较远,能达 10 m,但传输功率很小,为几毫瓦至百毫瓦。

(3) 远程传输。通过微波电力传输(MPT)技术或激光电力传输(LPT)技术来实现。远程传输对于太空科技领域如人造卫星、航天器之间的能量传输以及新能源开发利用等有重要的战略意义。MPT 是将电能转化为微波,让微波经自由空间传送到目标位置,再经整流,转化成直流电能,提供给负载。微波电能传输适合应用于大范围、长距离且不易受环境影响的电能传输,如空间太阳能电站等。LPT 是利用激光可以携带大量的能量,用较小的发射功率实现较远距离的电能传输。激光方向性强、能量集中,不存在干扰通信卫星的风险,但障碍物会影响激光与接收装置之间的能量交换,射束能量在传输途中会部分丧失。

2 无线充电技术在电动汽车上的应用

无线充电技术在电动汽车上的应用,是通过埋设于地表的一次线圈与固定于车辆底盘的二次线圈的电磁耦合来传输电能,对动力电池进行充电,具有安全环保、全自动、免维护等一系列优点。目前常用的 3 种无线充电技术中,因为 ICPT 和 ERPT 在中等距离的传输效率较高,更适合于电动汽车充电^[4]。特别是东南大学采用的电磁耦合共振式 ERPT 技术,已能将无线传输的距离增加到 50 cm 左右,也是国内唯一实现 0.5 m 以上

千瓦级无线电能传输的研究成果^[5]。

2.1 无线充电技术工作原理

2.1.1 ICPT 工作原理

ICPT 是以耦合的电磁场为媒介实现电能传递,对于电动汽车用 ICPT,是将变压器原、副边绕组分置于车外地面上和车内底盘上,通过高频磁场的耦合传输电能。该系统主要由电源侧发射端、无接触变压器和电动汽车侧接收端组成。其原理如图 1 所示。

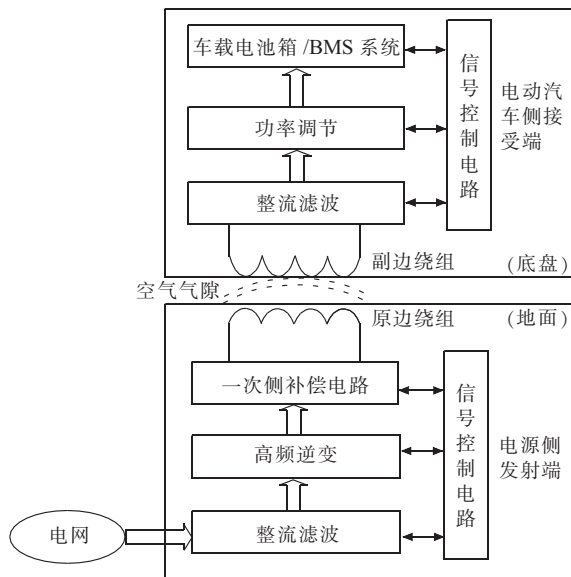


图 1 电动汽车 ICPT 系统原理

电源侧发射端电源从电网获取电能后经过整流滤波获得直流电,进入逆变器中进行高频逆变,产生的高频交变电流在信号控制电路的控制下经过一次侧补偿电路后注入原边绕组,在临近空间产生高频交变磁通;位于汽车底盘的副边绕组在靠近原边绕组空间通过感应耦合高频交变磁通获取感应电动势,同时在信号控制电路的控制下经过整流滤波以及功率调节,从而实现为车载电池提供电能。此系统本质上相当于变压器的疏松耦合系统,其一次侧、二次侧之间通过电磁感应实现电能传输,因气隙导致的耦合系数的降低可以由提高一次侧输入电源的频率加以补偿。

2.1.2 ERPT 工作原理

ERPT 是采用 2 个相同频率的谐振物体产生很强的相互耦合,利用线圈及两端的平板电容器,共同组成谐振电路,实现能量的无线传输。该系统也主要由电源侧发射端、发射/接收线圈和电动汽车侧接收端组成。其原理如图 2 所示。

电源侧发射端电源从电网获取电能后利用振荡器产生高频振荡电流,经过功率放大电路和阻抗匹配电路后,在发射线圈周围形成非辐射磁场,从而将电能转换为磁场;当位于电动汽车侧的接收线圈的固有频率与收到的电磁波频率相同时,接收电路中产生的振荡

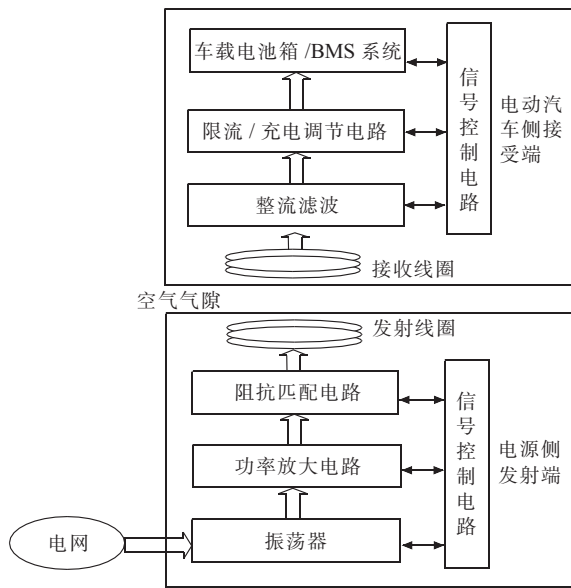


图 2 电动汽车 ERPT 系统原理

电流最强,完成磁场到电能的转换;同时电流经过整流滤波进入限流/充电调节电路后就可为车载电池提供电能。

ERPT 系统中发射线圈和接收线圈都是自振系统,根据共振特性由发射端激发接收端的共振,以很小的消耗代价来传输能量。能量传输在共振系统内部进行,对共振系统外的物体不会产生影响,其磁场强度和地球磁场强度相似,有效传输距离为几十厘米到几米。在能量传输过程中,电磁波的频率越高其向空间辐射的能量越大,传输的效率就越高。

2.2 电动汽车无线充电技术应用情况

当今,许多国家都在研制电动汽车无线充电技术,其中美国、英国、日本等是最早开始电动汽车无线充电技术研究的国家。

日本长野无线公司于 2009 年 8 月宣布开发出了基于磁共振的充电系统,可以在 600 mm 的传输距离内确保 90% 的传送效率;但目前的传送功率还比较小(约 1 kW),拟定从叉车等使用范围进入市场,伴随着技术成熟程度和传送功率的提高,有望很快进入电动汽车充电领域。

英国 HaloIPT 公司于 2010 年 11 月开发出一种新型无线充电系统,该感应式电能传输技术利用感应电荷的原理,将电源板埋藏于道路的沥青之下,进行无线充电;同时由于电源板不暴露在外,既可以得到有效保护,减少磨损,又不会受到恶劣天气的影响。

日本 IHI 株式会社于 2011 年 11 月采用美国 WiTricity 公司磁共振无线供电技术,研发出电动汽车无线充电系统,并已实施现场使用。该系统包含了安装在电动汽车上的无线电能接收装置及安装在地面的无线供电装置,适用于各种电动汽车及充电电池。电动汽

车在充电点停车时,将自动予以充电,而汽车与充电设备之间并无接触。WiTricity 公司表示,与电磁感应和微波等无线电能传输系统相比,该系统具有更高传输效率和更远输电距离,系统在 20 cm 传输距离可实现无线充电输出功率 3.3 kW,充电效率达 90% 以上。

最近,美国斯坦福大学一个研究小组正在设计开发一种高效充电系统,可使电动汽车在公路上一边行驶一边自动充电。该充电系统的工作原理是将一系列接通电流的线圈埋入高速路面下,在汽车底部装上感应线圈,当汽车通过该高速路时就会引起共振,产生的磁场将电力持续不断地传输给电池,这种无线传输方案的充电效率可达 97%。

3 电动汽车能源供给方式及充电技术优缺点分析

3.1 传统电动汽车能源供给方式分类

目前,电动汽车传统能源供给方式主要有电池更换、交流慢充和直流快充 3 种方式^[6],均属于有线接触式充电。

(1) 电池更换方式是用充满电的电池组更换车辆上能量接近耗尽的电池组,一般在 10 min 以内即可完成。该方式可有效解决续驶里程不足问题,同时通过对电池组的集中充电和专业维护以及梯次利用,延长电池寿命,提高电动汽车经济性。对于用户而言,可以买车不买电池,降低了一次性购买成本。此外更换电池方式可充分利用低谷电价优势,降低充电成本。但由于电池组较重,更换电池的专业化要求较强,需配备专业人员借助专业机械来快速完成电池的更换、充电和维护,如何实现电池箱的标准化及电池快速更换的实用化是此模式普及的关键所在。

(2) 交流慢充方式由交流充电桩提供电能,车载充电机完成交直流变换,充电功率一般不大,充电时间通常为 5~8 h。该方式充电电流较小,可降低电池在充电过程中的发热量,提高充电效率和延长电池的使用寿命,但其问题是充电时间过长。

(3) 直流快充方式由非车载充电机完成交直流变换,充电功率较大,通常情况下常规充电时间在 3~4 h 左右;也可提供 20 min~2 h 之内。以较大电流提供快速充电,一般充电电流为 150~400 A。经常性大电流快速充电会大大缩短电池使用寿命,对充电接头的规格、充电设施的容量也提出了更高的要求。另外,快速充电引起的大电流变化将对电网造成冲击,引起公共电网电压波动,大功率充电机产生的大量谐波,也会影响公共电网的电能质量。

3.2 有线和无线充电技术优缺点分析

有线充电技术具有如下优点:能源转换一次性获

得,电能损失小,节能环保;交直流转换一次性,不存在中高频电磁辐射;充电桩及充电机等充电设备技术门槛不太高,经济投入不大,维修方便;充电功率调节范围较宽,适合多种不同电压和电流等级的动力电池储能补给。其缺点是:充电设备的移动搬运和电源的引线过长,人工操作繁琐;充电站及充电设备公共占地面积过大;人工操作过程中,极易出现设备的过度磨损等不安全隐患。

无线充电技术具备如下优点:使用方便、安全,无火花及触电危险,无积尘和接触损耗,无机械磨损和相应的维护问题,可适应多种恶劣环境和天气。其缺点是:设备的经济成本投入较高,维修费用大;实现远距离大功率无线电磁转换,能量损耗相对较高;无线充电设备的电磁辐射会对环境造成污染。

4 电动汽车无线充电技术应用思考

在电动汽车无线充电技术的实际应用中,有一些问题值得思考和注意。

(1) 电动汽车无线充电技术中最常用的 2 种技术相比较而言,ERPT 比 ICPT 更具有优势和发展潜力。ICPT 要求电动汽车侧接收端非常靠近发射端感应线圈,由于磁场能量会随距离的增加而迅速衰减,因而在传统的电磁感应中,距离只能通过增强磁场强度来增加。而 ERPT 使用匹配的谐振天线,可使磁耦合在几英尺的距离内发生,而且不需要增强磁场强度;同时由于是形成非辐射磁场,从而大大降低了能源损耗。

(2) 对电动汽车无线充电技术的应用安全性一定要进行试验验证,尤其是人身安全、电池充电、电磁辐射对人类及环境的影响等问题。

(3) 在实际应用中,要重点考虑电动汽车无线充电设施的安全保护及应用设计问题。例如发射端装置安装在地下,要注意保护措施;同时无论是地面安装的发射端装置还是车辆接收端装置都应该考虑防水问题,以应用于雨天及潮湿环境。

(4) 无线充电技术虽然具有灵活方便的使用特点,但从电能转换效率相对较低及能源损耗较大的角度看,还需要对电磁转换能效提升等关键技术进行进一步研究,以推进该技术的实用化和产业化应用。

(5) 在电动汽车无线充电系统的安全性和可靠性问题上,可以考虑射频识别(RFID)技术的嵌入式应用。无线充电系统可通过内置的 RFID 芯片,实现电能发送端对电动汽车充电电池箱的 ID 身份验证,以保证不会对未经认证的电动汽车电池箱进行充电,从而保证充电的安全性^[7]。但也要认识到 RFID 技术和无线充电系统的电磁场耦合技术,可能存在着干扰问题。

(6) 对于电动汽车无线充电系统应统一制定和实

施无线充电通信标准,逐步制定行标、国标,以保证电动汽车无线充电设施与电动汽车无线充电接口的通用互联和一致性。

5 结束语

电动汽车无线充电技术具有方便、快捷的优点,但目前还处于研发和探索阶段,在实用化方面还有大量的工作要做。此外根据当前能源匮乏的实际情况,电动汽车实现大功率无线充电技术的产业化运作还为时过早,但作为未来灵活的充电方式,进行前期探索很有必要。随着该技术的不断完善,同时结合中国智能电网的建设,其在电动汽车智能充换电服务网络方面的应用必将大大推动电动汽车的大规模应用。

参考文献:

- [1] 郭言平.无线充电的关键技术和研究[J].合肥学院学报:自然科学版,2012,22(1):73-75.
- [2] 朱 俊.电动汽车的无线充电技术[J].汽车工程师,2011(12):50-52.
- [3] 古丽萍.令人期待的无线电力传输及其发展[J].中国无线电,

2012(1):27-30.

- [4] 王 任,曲卫迎.无线充电技术及其在电动汽车上的应用初探[J].科技创新导报,2010,29(1):59-59.
- [5] 朱 俊.探密电动汽车的无线充电技术[J].交通与运输,2012(1):26-27.
- [6] 陈丽娟,许晓慧.智能用电技术[M].北京:中国电力出版社,2011.
- [7] 王晓静.基于RFID技术的无线充电系统研究[D].北京:北京邮电大学,2008.

作者简介:

- 李 斌(1973),男,湖北武汉人,高级工程师,从事智能用电及电动汽车充换电设施技术研究工作;
- 刘 畅(1978),男,河北承德人,工程师,从事智能用电及电动汽车充换电设施技术研究工作;
- 陈企楚(1979),男,福建厦门人,工程师,从事智能用电及电动汽车充换电设施技术研究工作;
- 林晶怡(1978),女,天津大港人,工程师,从事智能用电及电动汽车充换电设施技术研究工作;
- 邓小元(1984),男,湖北随州人,工程师,从事电力系统自动化及调度自动化技术研究工作。

Electric Vehicle Wireless Charging Technology

LI Bin¹, LIU Chang¹, CHEN Qi-chu¹, LIN Jing-yi¹, DENG Xiao-yuan²

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

2. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: Electric vehicle wireless charging technology is a new energy supply mode for electric vehicle. The categories, operating principles and applications of wireless charging technology are introduced in this paper. The advantages and disadvantages are analyzed by comparing traditional energy supply mode and wireless charging mode, some suggestion for practical application of electric vehicle wireless charging technology is also proposed.

Key words: electric vehicle; wireless charging technology; wireless power transmission; electromagnetic induction; electromagnetic resonance

页岩气是怎么产生的?

天然气是现今世界上极为重要的能源和化工产品的原料之一,它是古生物的遗骸长期沉积地下,经过各种地质作用慢慢转化而成的一种气态碳氢化合物,生成的气体不断地运移到一个封闭的储藏空间中,越积越多,等达到一定规模时就成了可供开采的天然气藏。然而,并不是所有的天然气都储藏固定的封闭空间里。有一些比较特殊的天然气,当它生成之后便吸附在产生这种气体的岩石周围,或呈游离状态藏在岩石的裂隙中间。页岩气就属于这样一类。

当我们在山区行走的时候,在山体裸露的地方就经常会看到一层层像棉被一样叠加起来的岩石,这就是沉积岩,因为成层性就是沉积岩最典型的特征。沉积岩一般形成于地表和地表以下不太深的地方,仅占地壳岩石总体积的5%,但由于它在陆地表面和海洋盆地中广泛分布,所以它占据了地表面积的75%,在我国大陆沉积岩的覆盖面积则达到了77.3%沉积岩的形成是在有丰富的水、氧、二氧化碳和生物参加的条件完成的,因此它的矿物组合成分比较简单,粘土矿物、盐类矿物以及煤、石油等有机物质都是沉积岩所特有的。而且,沉积岩中颗粒之间总是有孔隙的存在,这就给油、气等资源以储藏空间。

如果仔细观察,就可能会进一步地发现,有些山体裸露岩石的层理极薄,厚度仅为几毫米甚至1mm左右,叠加起来就像书页一样,用锤子敲打的话很容易分裂成薄片,这就是沉积岩中最丰富的一类岩石:页岩。

页岩气形成于页岩当中,按照我国学者张金川的观点,页岩气的形成是天然气生成之后没有远距离运移,而在该页岩层内就近聚集、滞留的结果。当聚集达到现有技术水平能够开采的规模时,就形成了页岩气资源。

摘自《国家电力信息网》