

● 本刊为双月刊
● 本刊编辑部地址：成都人民南路
● 本刊编辑部电话：(028) 85421111
● 本刊编辑部电子邮箱：scdps@163.com

● 本刊为双月刊，逢单月出版
● 本刊为双月刊，逢单月出版
● 本刊为双月刊，逢单月出版
● 本刊为双月刊，逢单月出版

● 本刊为双月刊，逢单月出版
● 本刊为双月刊，逢单月出版
● 本刊为双月刊，逢单月出版

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1007-1066



众志成城 抗震救灾

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.31
2008
No.3

频率扫描法分析南方电网串补工程引起的次同步谐振可能性

李伟¹, 李兴源¹, 洪潮², 杨煜², 徐大鹏¹, 艾飞¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 中国南方电网技术研究中心, 广东 广州 510620)

摘要: 针对南方电网串补工程引发的次同步谐振的可能性进行了分析研究。研究表明除百色串补工程外, 平果和河池串补工程可以不考虑其对次同步谐振的影响, 且百色串补中的马百线对待研机组的影响可以不予考虑。并用频率扫描法分别分析了百色串补线路在不同串补度下的谐振问题, 说明了长距离输电系统在高串补度下容易引起次同步谐振。

关键词: 南方电网; 次同步谐振; 频率扫描; 串联补偿

Abstract: The SSR (subsynchronous resonance) possibility caused by series-capacitor compensation project in China Southern Power Grid is analyzed. The result shows that the series-capacitor compensation projects in Pingguo and Hechi do not cause the SSR except the series-capacitor compensation project in Baise, and it has no effect on the series-capacitor compensation of Mabai. The frequency scanning method is used to analyze the series-capacitor compensation of Baise in different compensation degrees, and the result shows that the long-distance transmission system with high series-capacitor compensation will cause SSR easily.

Key words: China Southern Power Grid; subsynchronous resonance; frequency scanning; series-capacitor compensation

中图分类号: TM712 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0001-03

串联补偿工程相对传统的输变电工程具有耕地占用少、工程量小、运行简便等优点。目前, 串联补偿作为提高线路输电能力的手段在中国的电网规划中越来越受到各方的关注。南方电网所处的贵州、云南、广西省(区)多为山区, 输电走廊的建设需花费大量的人力物力, 并且新的输电走廊的增加将变得越来越困难。因此, 在南方电网采用串联补偿技术以提高电网的输送容量是非常切合本地区实际的。到2010年, 南方电网的网架上将会出现百色、平果和河池三处串补装置, 电压等级均为500 kV, 如图1所示。同时采用串联补偿等新技术, 用来缩短输电线路的电气距离, 提高电力网络的功率传输能力, 经济效益十分可观^[1~2], 但串补可能会引起次同步谐振现象^[3]。因此, 分析由串联补偿引起的SSR的可能性也是非常必要的。

电力系统次同步振荡问题的研究方法主要有特征值分析法, 频域分析法以及时域仿真法等, 它们都可以用于分析由串联电容补偿引起的次同步谐振问题^[4~11]。

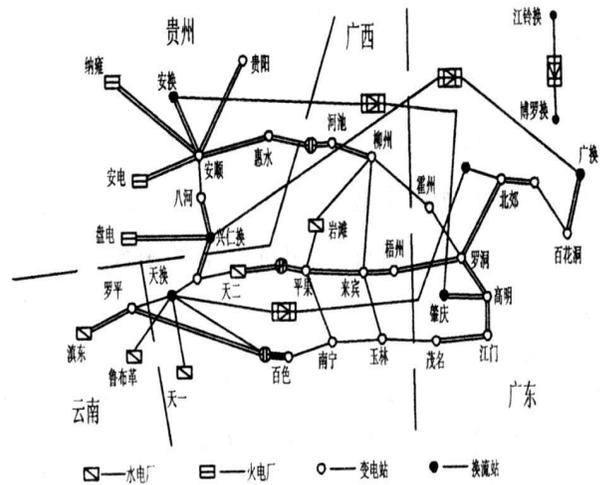


图1 2010年南方电网网架图

1) 严格的SSR分析方法(特征值分析法^[5]), 需要列出全系统的状态方程 $\dot{X} = AX$, 然后对系数矩阵 A 计算特征值、特征向量、特征值和状态变量的相关因子等。该方法可以计算SSO的准确振频、衰减因子、模态分布、特征根灵敏度等, 理论严格, 可以得到大量的有用信息, 分析准确度高。但是有如下缺点: 系统的状态方程形成较为困难, 且有“维数灾”问题, 故只

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(505954128-50577044); 国家科技支撑计划项目(2008BAA13B01); 中国南方电网公司博士后研究项目。

能计算小系统,同时还要求有准确的轴系参数,否则无法计算。此外该方法只能得到若干孤立频率点的电气阻尼特性,而不能得到电气阻尼随扰动频率变化的曲线,因而不利于抑制对策的确定。

2)频域分析法有两种:频率扫描法和复转矩系数法。复转矩系数法^[6~7]主要用于机电扭振相互作用及装置引起的SSO问题的分析。通过计算待研发发电机磁力矩增量 ΔT_e 与发电机质块的转子角增量 $\Delta \delta$ 在各扰动频率 ω ($\omega \in (0, 2\pi f_0)$, $f_0 = 50$ Hz)下的复数相量之比,即

$$\frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} = K(\omega) + j\omega D(\omega)$$

获得机组视在阻尼力矩系数曲线 $D-\omega$,若在待研发发电机的某轴系扭振自然频率 ω_n 处

$$S(\omega_n) + D^{(m)} < 0$$

则该发电机在此扭振自然频率下将发生扭振不稳定。上式中 $D^{(m)}$ 为该发电机轴系解耦模型中与此自然扭振频率相对应的机械阻尼系数,且 $D^{(m)} > 0$ 。该方法相对于特征根分析法有一定的优越性;可以获得阻尼系数随扰动频率变化的曲线,有利于采取对策等。但是对每台待研的发电机都要做 $D-\omega$ 曲线,且每个频率处都要做大量计算,故多机系统时工作量相当大。

3)频率扫描法^[8~9]是一种近似的线性方法。在待研发发电机端口处,注入三相对称单位电流 $I(j\omega)$,电流频率在次同步频率范围内连续变化。于是可以得到系统的正序阻抗,该阻抗是 ω 的函数:

$$Z(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{I(j\omega)} = R_{sys}(\omega) + jX_{sys}(\omega)$$

从 $X_{sys}(\omega)$ 中找出 X 为0的频率点,即为系统的谐振点,若这些谐振点处对应的 $R_{sys}(\omega) < 0$,则发电机轴系就有可能发生自激振荡。该方法只需计算以被研究机组为端口的全电气系统阻抗的频率响应特性,从中确定电气系统的谐振频率,并判断其是否与轴系的扭振固有频率互补(二者之和等于同步频率),若发生互补,则说明当系统阻尼不足时会产生SSR。这种方法计算量小,可以利用现有的电磁暂态程序如EMTP、PSCAD/EMTDC等进行计算,适用于大系统,计算速度快,物理透明度高。在工程中判断具有串联补偿的电力系统是否发生次同步同步谐振,该方法最为常用^[10, 11, 12]。

1 待研串补、机组的选择及机组模型

含有串联补偿的线路具有发生次同步谐振的可能性,特别是大型汽轮发电机组经较高串联电容补偿的线路接入系统时,在某种运行方式与补偿度的情况下,有可能在机械与电气系统之间发生谐振,并产生极为严重的后果^[13]。

平果串补通过输电线路与天生桥水电厂相连,而本文次同步谐振主要考核与串补相邻(或接近)的火电机组,而不去研究水电机组的次同步频率响应,这主要是因为:(1)相对于涡轮推进器和励磁机转子惯性大得多的水轮发电机转子惯性有效地保护了转子的机械系统,很难通过对发电机进行干扰来激发扭振;(2)水轮机粘性水轮阻尼作用使得水轮机对扭振的阻尼作用远高于汽轮机。河池串补要经过多个变电站才能与大型火电机组相连,且距离较远。百色串补仅经过罗平变电站就可与大型火电机组相连且距离较近。因此,本文选择百色串补为研究对象。

已知的和潜在的次同步谐振问题皆与通过串联补偿输电线路与负荷中心相联并远离负荷中心的汽轮发电机组相关,需要进行次同步谐振研究的汽轮发电机组应满足以下条件:与串联补偿装置距离较近,且该汽轮发电机组与交流大电网联系薄弱,该汽轮发电机组的额定功率与输送的额定功率在同一个数量级上。理论分析和实际经验表明,次同步谐振基本上只涉及大容量汽轮发电机组,对30万kW以上汽轮发电机组应特别加以注意,这是由大容量汽轮发电机组的轴系结构特点造成的。在南方电网中,与百色串联补偿装置距离较近的且容量较大的机组是滇东电厂。因此选用滇东电厂机组为待研机组。

滇东电厂安装有四台600MW机组,发电机轴系数据如表1所示。

2 系统频率扫描

使用PSCAD/EMTDC仿真程序,系统的等值电路如图2所示,滇东电厂通过两回线路与罗平变电站相连,罗平变电站通过两回线路连接到百色串补,天生桥换流站通过一回线路连接到百色串补,百色变电站直接连接到广西、广东电网。

表1 滇东电厂发电机组轴系数据

| 分类 | 单位 | 数量 |
|----------------------|-------------------|------------------|
| 转子轴系质块个数 | 个 | 4 |
| 各质块的转动惯量 | kg·m ² | 2 872, 21 570, |
| | | 21 917, 9 874 |
| 相邻质块间的扭动刚度 | N·m/rad | 8.473 3E+07, |
| | | 1.114 6E+08, |
| 稳态时汽轮机各段 承担总功率百分比 | | 1.497 0E+08 |
| | | 53%, 23.5%, |
| | | 23.5% |
| 自然扭振频率 | Hz | 13.6, 25.6, 30.7 |

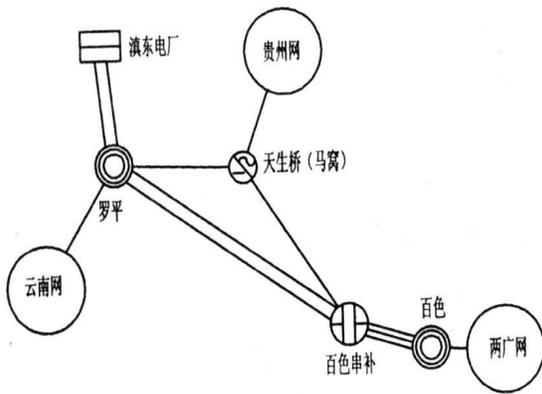


图2 简化系统图

在滇东电厂某典型运行方式下,使罗百线串补度为零,只保留马百线串补,得到的系统阻抗频率响应如图3所示。

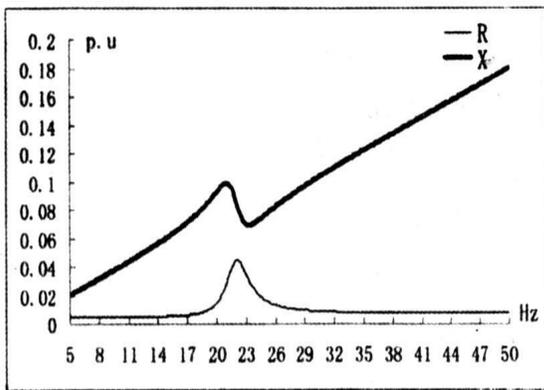


图3 不考虑马百线串补时滇东电厂的扫频图

由图3中可以看出,在次同步频率范围内,由滇东电厂机组看过去的SSR等值电抗一直为正,不会

发生次同步谐振现象,因此说明马百线串补对滇东电厂异步发电机效应的影响可以不予考虑。

保留马百线串补,罗百线串补度为50%时,系统阻抗频率响应如图4所示。

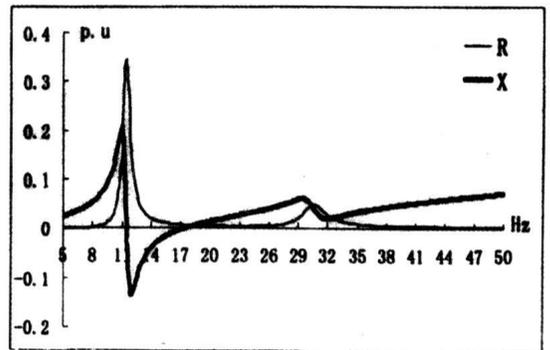


图4 罗百线串补度为50%时滇东电厂的扫频图

由图4中可以看出电抗过零的第一个频率点实际上是并联谐振点,不会产生SSR问题。需要分析的是第二个电抗过零频率点,该频率在17~18Hz的范围内,此频率下电气系统发生谐振,但此时的电阻值为正且与轴系频率并不互补,所以当罗百线串补度为50%时系统不会发生SSR现象。

保留马百线串补,罗百线串补度为60%时,系统阻抗频率响应如图5所示。

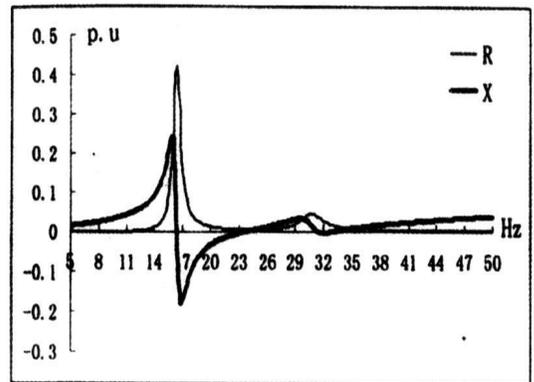


图5 罗百线串补度为60%时滇东电厂的扫频图

如图5所示,第二个谐振点为24.4 Hz左右,与机组轴系中的25.6 Hz互补,该点处的电阻为微小正值,因此该串补度下在该频率点系统有发生次同步谐振的可能。

实际系统的运行方式是多种多样的,上述分析只针对某种运行方式进行,但实际上通过(下转第56页)

阻作为温度传感器,并通过分压电阻实现,如图1所示。分压电阻的阻值可根据参数计算。BQ2057将该电压与内部的 $V(TS1)$ 和 $V(TS2)$ 门限电压比较以决定是否允许充电。

3 实验结果

实验时 $R=60\ \Omega$ 选取稳压二极管的稳压值为20V。实验结果表明。原方电流在 $0\sim 900\text{ A}$ 范围内变化时,电源能够提供所需的电压,在原方电流小于20A时,起用充电电池供电,补偿线圈能够使整流侧输出电压维持在25V以下,保证各稳压模块可靠工作。当原方电流大于900A时,整流侧输出电压缓慢上升,超过DC/DC模块的最大输入电压,采取一定的散热措施(如增大散热片的尺寸等)可以使电源在更大范围内工作。

表1 线路电流与输出电压的关系

| 名称 | 数值 | | | | | |
|------------|----|-----|-----|-----|------|------|
| 线路电流(A) | 0 | 4 | 30 | 150 | 750 | 900 |
| 整流输出(V) | 0 | 1.8 | 3.5 | 9.1 | 17.8 | 23.1 |
| DC/DC输出(V) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5.2 |

4 总结

采用充电电池和补偿线圈相结合的方法解决了小电流的死区问题,同时在大电流时可以降低原方电流的激磁作用,可有效地降低了原方电流对电子式互

感器工作电源工作特性的影响。实验结果证明该方法是切实可行的,它解决了在线路电流过低或断路器跳闸时无法供电的问题,同时它能使电源在宽动态范围内满足电子电流互感器对工作电源的长期工作要求。是目前解决有源电子电流互感器高压侧电源问题的有效方案。

参考文献

- [1] 徐雁,朱明均,郭晓华,张庆,叶妙元.空心线圈作为保护作用电流互感器的理论分析和实验[J].电子系统自动化,2002,26(16):52-55.
- [2] 钱政.有源电子式电流互感器中高压侧电路的供能方法[J].高压电器,2004,40(2):135-138.
- [3] 聂一雄,尹项根,李伟,等.有源光电式互感器工作电源设计[J].电力自动化设备,2003,23(12):49-51.
- [4] 付烈,郑绳植.光电混合式电流互感器电源的研究[J].现代电子技术,2004,4(18):10-11.
- [5] 刘忠战.电子式电流互感器高压侧自励源供能方法研究[J].高压电器,2006,42(1):55-57.
- [6] 胡彬,周有庆,钟选书,吴贵清,彭红海.电子式电流互感器高压侧电源的研究与实现[J].电气应用,2006,25(5):99-102.

作者简介

郭吉伟:男,1981年,硕士,主要研究方向为电力电子技术
在电力系统中的应用。

梁魁:男,1982年,硕士,主要研究方向为电力系统故障诊断。

懂凌凯:男,1983年,硕士,主要研究方向为电力系统信息及其自动化技术。

(收稿日期:2008-02-26)

(上接第3页)对多种运行方式的分析计算表明,频率扫描分析结果对运行方式的改变是不敏感的^[14]。

3 结论

由以上分析可知:

(1)马百线串补单独作用时不会引起系统的次同步谐振现象。

(2)罗百线串补度为50%时,滇东电厂机组不会发生异步发电机效应。

(3)罗百线串补度为60%时,线路有一电气谐振点,滇东电厂机组有可能发生异步发电机效应,导致

系统发生次同步谐振。

参考文献

- [1] 南方电网电力工业“十一五”发展规划及2020年远景目标研究[R].北京:中国电力工程顾问集团公司,2004.
- [2] 李炜,佟名东,张琳等.“十一五”南方电网“西电东送”输电能力研究[J].中国电力,2007,40(2):26-30.
- [3] IEEE Committee Report. Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations”, IEEE Trans. On PAS, 1985, PAS-104(6):1326-1334.
- [4] 陈陈,杨煜.几种次同步振荡分析方法和工具的阐述[J].电网技术,1998,22(8):10-13.
- [5] M.R.Iravani, Abdel-Aty Edris. (下转第62页)

3 数字式光电互感器的优点

2006年11月在西昌局500 kV 普提变电站投运的西门子公司生产的500 kV 串补装置中的TA亦采用了光电互感器,解决了在超高压系统中互感器体积庞大、绝缘困难等难题,同时西门子公司还利用光电互感器对MOV的触发回路提供能量。这些新设备、新技术的应用开创了四川电网二次系统的一个崭新的应用领域。经过光电互感器的安装及运行,体会到光电互感器相对与传统电磁式互感器具有以下优点:

1)光电互感器具有无磁饱和、频率响应范围宽、精度高、暂态特性好等优点,由于信号传送实现了数字化,有利于新型保护原理的实现及提高保护性能,也有利于对电网智能监控。2)采集器处于和被测量电压等电位的密闭屏蔽的传感头部件中,采集器和合并器通过光纤相连,数字信号在光缆中传输,增强了抗EMI性能,数据可靠性大大提高。并彻底解决了电流互感器的过负荷和TV二次回路的压降问题。

3)光电互感器通过光纤连接互感器的高低电压部分,绝缘结构大为简单。以绝缘脂替代了传统互感器的油或SF₆,互感器性能更加稳定,同时避免了传统充油互感器渗漏油现象,也避免了SF₆互感器的SF₆

气体对环境的影响。无需检压检漏,运行过程中免维护。

4)无油设计彻底避免了充油互感器可能出现的燃烧爆炸等事故;高低压部分的光电隔离,使得电流互感器二次开路、电压互感器二次短路可能导致危及设备或人身安全等问题不复存在。

5)光电互感器完备的自检功能,若出现通讯故障或光电互感器故障,保护装置将会因收不到校样码正确的数据而可以直接判断出互感器异常。

6)价格低廉的光纤光缆的应用,大大降低了光电互感器的综合使用成本。由于绝缘结构简单,在高压和超高压中,光电互感器这一优点尤其显著。

4 结束语

由于光电互感器具有上述优点,现场运行情况良好,极具推广价值。同时光电互感器的应用使变电站二次系统由传统的模拟信号方式转变为数字信号方式,这一转变势必对已有的变电站自动化技术将产生深刻的影响,将大大提高电网建设的现代化水平,降低变电站建设的总造价,变电站及其自动化技术将进入数字化新阶段,全数字化的变电站自动化系统将出现。

(收稿日期:2008-03-10)

(上接第56页) Eigen analysis of series compensation schemes reducing the potential of subsynchronous resonance. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (2).

[6] Canay I M. Anovel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine. part I:theory. T-PAS-101, 1982, 101(10).

[7] Canay I M. Anovel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine, part II: application to an arbitrary network. T-PAS-101, 1982, 101(10).

[8] Agrawal B L, Farmer R G. Use of frequency scanning techniques for subsynchronous resonance analysis. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(2).

[9] X·Lei, D·W·Retzmann. Analyzing Subsynchronous Resonance Using a Simulation Program. Proceeding of PowerCon 2000, Dec. 2000, Vol. 2, pp. 775-781.

[10] Mahmoud Elfayoumy, Carlos Grande Moran. A comprehensive approach for Subsynchronous resonance screening analysis using frequency scanning technique. IEEE Bologna

PowerTech Conference, 2003.

[11] 杨煜,陈陈,伊敏. 一大庆500kV输电系统次同步谐振分析——兼论发电机轴系共振频率[J]. 电网技术, 2000, 24(5):10-13.

[12] 李光琦,张世学,张直平. 频率扫描法分析西北330 kV主网高串补水平下的次同步谐振可能性[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(1):57-61.

[13] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.

[14] 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, 2002.

作者简介:

李伟(1981-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制。

李兴源(1945-),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分散式发电等方面的研究。

(收稿日期:2008-02-10)

特高压直流换流站电气设计的主要特点

胡劲松, 余波, 黄晓明

(西南电力设计院, 四川 成都 610021)

摘要: 由于输送容量和电压等级的提高, 特高压直流换流站的电气设计在电气主接线、过电压保护与绝缘配合、外绝缘特性、设备选型以及平面布置等方面, 同常规超高压换流站相比均有显著变化。针对这些方面, 并基于中国(也是世界上)的第一批特高压直流输电工程的阶段性设计研究成果, 归纳分析特高压直流换流站电气设计应注意把握的主要技术特点, 对后续工程设计工作的开展有重要的指导和借鉴意义。

关键词: 特高压; 直流换流站; 电气设计; 技术特点

Abstract: Compared to the common EHV converter station, the electrical engineering design of UHVDC converter station has great changes in main electrical connection, overvoltage protection, insulation coordination, equipment selection and general layout because of the greater transmission capacity and the higher voltage class. According to the above-mentioned features, the main technical principle for the electrical engineering design of UHVDC converter station is analyzed, which is based on the interim design study of the first UHVDC transmission project in China (also in the world).

Key words: UHV; DC converter station; electrical engineering design; technical principle

中图分类号: TM721.1 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0004-05

±800 kV 特高压直流不仅输送容量大、损耗小、送电距离远, 而且可以节约宝贵的输电走廊资源, 提高输电通道走廊的利用率, 是中国电力跨区域大规模输电的必然选择。“十一五”云南至广东特高压直流输电工程已于 2006 年 12 月开工建设, 向家坝至上海±800 kV 特高压直流输电工程也即将开工, “十一五”至“十三五”期间规划建设特高压直流输电工程还有 7~9 个, “十三五”以后还将规划建设“藏电外送”特高压直流输电工程^[1]。目前, 特高压直流输电技术在全世界都还没有成熟的应用经验, 针对第一批特高压直流输电工程的阶段性设计研究成果, 归纳分析特高压直流换流站设计应注意把握的主要技术原则, 对后续工程设计工作的开展有重要的指导和借鉴意义。

1 电气主接线

1.1 交流开关场电气主接线

±800 kV 特高压直流换流站输送容量一般为 5 000~6 400 MW, 交流侧一般采用 500 kV 电压等级, 进出线规模约为 12~20 回, 其中换流变组进线 4 回, 交流滤波器/电容器 3~5 大组, 站用电 1~2 回, 其它交流进出线 4~9 回, 根据工程具体情况有时需要装设母线高压电抗器^{[2][3]}。按此规模, 交流开关场电

气主接线采用可靠性高、有丰富调度运行经验、在中国 500 kV 电网广泛应用的一个半断路器接线毫无争议, 工程设计中主要应对元件配串加以重点研究, 以减少各种故障工况下直流输送功率的损失, 提高换流站的可靠性和可用率。

1.2 换流阀组接线

除巴西伊泰普直流输电工程为两回±600 kV、单回输送容量 3 150 MW, 每极采用 2 个 12 脉动阀组串联接线外, 其余大多高压直流输电工程, 特别是中国 500 kV 直流输电工程均采用每极 1 个 12 脉动阀组接线。中国规划的特高压直流输电工程额定输送容量为 5 000~6 400 MW, 额定直流电流为 3 125~4 000 A。对每极 1 个 12 脉动换流单元接线具有接线简单、设备投资最低等优点, 但即便是每个 12 脉动换流单元换流变采用单相双绕组型式, 单台变压器容量也达 500~644 MVA, 设备制造和大件运输都异常困难; 而对每极 2 个 12 脉动阀组并联方案, 最大的优点是减少流过单个换流单元的电流, 但由于每极 2 个 12 脉动阀组并联接线复杂、控制保护系统复杂、运行不方便、单阀数量和高电压绝缘变压器数量增加, 投资较大, 一般在单阀通态电流不能满足要求时才考虑采用, 从目前的电力电子技术发展水平来看, 具备生产换流阀 4000 A 的换流能力。因此, 特高压换流站换流阀组接线采用每极 2 个 12 脉动阀组串联接线;²

个12脉动阀组电压按 $\pm(400+400)$ kV分配,换流变压器采用单相双绕组型式,双极共4个换流器单元^{[2][3]}。

1.3 直流开关场接线

换流站直流侧装设有平波电抗器、直流滤波器、直流电流及电压测量装置、过电压保护设备以及切除故障、检修和转换运行方式所需的开关设备等。特高压换流站直流侧采用的直流双极典型接线方式与现有 ± 500 kV直流工程基本相同,着重研究了以下问题:(1)为提高阀组可用率,每个阀组设置旁路回路;(2)为了降低上12脉动换流阀组和直流极母线的过电压水平,将每极平波电抗器分成两组,一组安装在上12脉动换流阀组高压端与直流滤波器高压端之间的直流极母线上,另一组安装在下12脉动换流阀组低压端与直流滤波器低压端之间的直流中性母线上;(3)为提高直流系统的可靠性和可用率,避免因直流开关场中性线故障而导致直流双极闭锁,对直流金属一大地方式转换回路采用双MRTB(金属回路转换开关)配置或直流中性点区域采用一个半开关接线方式进行了研究,研究表明,上述接线方案对减少故障影响范围极为有限,而投资增加较大,因此直流中性线接线推荐仍采用 ± 500 kV直流工程典型接线^[4]。

2 过电压保护与绝缘配合

在超高压换流站过电压保护与绝缘配合的工程经验基础上,特高压重点研究了换流阀的绝缘配合裕度选择和单极双十二脉动阀组串联的避雷器配置方案。

2.1 换流阀绝缘配合裕度

在超高压直流换流站工程实践中,换流阀绝缘配合裕度如表1所示有两种取值,中国均采用文献^[5]的推荐值,该标准是根据国际大电网会议(CIGRE)33.05工作组1984年9月提出的《高压直流换流站绝缘配合和避雷器保护使用导则》编写的,在技术内容上与该导则等效。

对特高压换流阀绝缘配合裕度选取有两种观点。一种观点认为,进入特高压范畴后,设备绝缘水平的些微提高,都有可能引起设备造价和研发、制造难度的大幅度增加,绝缘配合裕度取值应从实际需要出发,不宜保守。换流阀由跨在阀上的避雷器直接保护,而且晶闸管阀与常规电力设备(如变压器)的老化

过程不同,故障晶闸管可在定期检修时予以更换,可以认为,阀的耐受电压在每次检修后都恢复到它的初始值。因此建议参考部分国外工程实践,特高压换流阀操作冲击、雷电冲击、陡波冲击绝缘配合裕度分别取10%、10%、15%。

另一种观点认为,特高压直流输电工程在电网占有及其重要的地位,可靠性要求高,设备标准不应低于超高压工程,绝缘配合裕度应执行现行电力行业标准。

目前,在不同的工程中两种绝缘配合裕度都有采用。

表1 换流阀最小绝缘配合裕度表

| | 最小绝缘配合裕度 | | |
|----------|----------|------|------|
| | 操作冲击 | 雷电冲击 | 陡波冲击 |
| 中国电力行业标准 | 15% | 15% | 20% |
| 部分国外工程实践 | 10% | 10% | 15% |

2.2 换流阀组避雷器配置方案

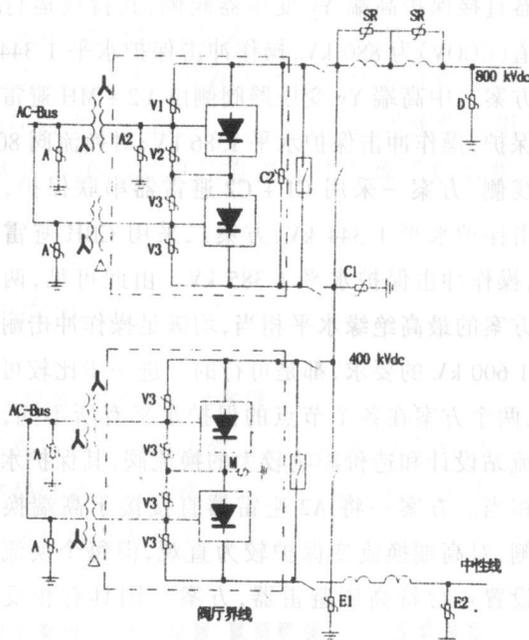


图1 避雷器配置方案一

经过前期广泛深入研究,特高压单极双十二脉动阀组串联的避雷器配置形成了两种典型方案,如图1、图2所示^[6]。从保护效果看,方案一配置的A2避

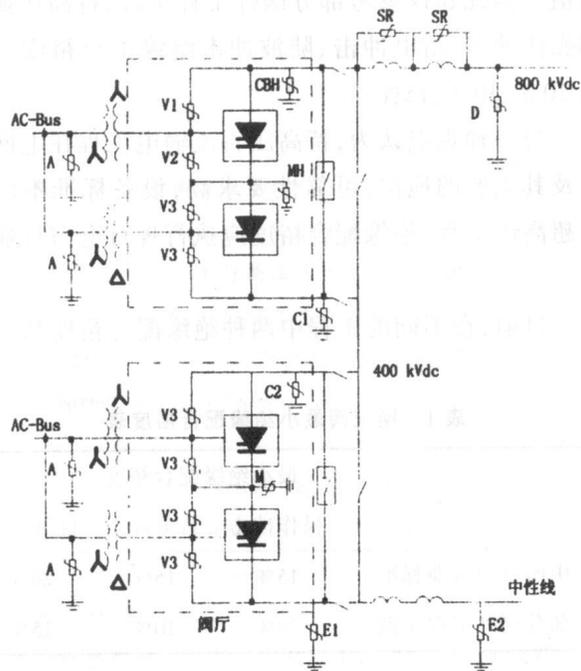


图2 避雷器配置方案二

雷器直接保护高端 Yy 变压器阀侧,其持续运行电压峰值(CCOV)为 880 kV,操作冲击保护水平 1 344 kV,而方案二中高端 Yy 变压器阀侧由 V2+MH 避雷器串联保护,操作冲击保护水平 1386 kV;对换流阀 800 kV 极线侧,方案一采用 C1+C2 避雷器串联保护,操作冲击保护水平 1 344 kV,方案二采用 CBH 避雷器保护,操作冲击保护水平 1 385 kV。由此可见,两种配置方案的最高绝缘水平相当,均满足操作冲击耐受水平 1 600 kV 的要求,都是可行的。进一步比较可以看出,两个方案在各个节点的保护水平有所不同,但对换流站设计和造价影响较大的换流阀,其保护水平基本相当。方案一将 A2 避雷器直接接于高端换流变阀侧,对高端换流变保护较为直观,但每个换流站需多设置 4 台特高压避雷器,方案二则具有相反的特点。

3 外绝缘

3.1 空气间隙

由于换流站的设备带电导体多为固定电极,因此空气间隙主要由雷电和操作冲击所决定。设计空气间隙时需要各种换流站真型雷电波、操作波放电电压

特性曲线,以确定恰当的最小空气间隙取值,优化阀厅和直流开关场的布置。随着±800 kV 直流工程的开展,中国一些科研单位也在积极地进行这方面的研究,但阀厅和直流开关场间隙形状类别较多,要完成各种间隙的真型试验尚需时日,现阶段主要按照国际大电网会议推荐公式进行初步计算。以直流开关场极母线对地最小空气间隙为例,其值根据计算值考虑适当裕度后可取 7650 mm。表 2 为文献[6]提供的管母线对遮栏空气间隙的操作冲击 50% 击穿电压试验结果。

表 2 管母线对遮栏空气间隙的操作冲击
50% 击穿电压

| 间隙距离(m) | 3 | 5 | 7 | 9 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| U _{50%} (kV) | 1 387 | 1 626 | 1 916 | 2 214 |

3.2 设备外绝缘

设备的外绝缘必须要考虑干弧距离和爬电距离两方面的要求。

干弧距离取决于设备轴向长度。对超高压和特高压而言,操作冲击水平(SIL)是确定干弧距离的关键因素,二者呈幂函数关系。试验研究表明,干弧距离为 8 000 mm 的支柱绝缘子,操作冲击耐受电压可达 2 100 kV 以上,满足特高压换流站 1 600 kV 的操作冲击绝缘水平要求。

爬电距离则主要取决于工作电压下绝缘子的污秽特性。从已开展的特高压直流输电工程前期工作情况来看,如金沙江一期溪洛渡、向家坝水电站送电华中、华东特高压直流输电工程,以及云(云南小湾、金安桥水电站)广(东)特高压直流输电工程,特高压换流站大多有条件选址于污秽中等或较轻的地区,预测的直流自然积污附盐密度一般在 0.05~0.07 mg/cm²[2][3]。具体工程应根据站址的环境情况对直流自然积污附盐密度进行专题试验研究。超高压直流换流站运行经验表明,一般而言,直流自然积污附盐密度为 0.07 mg/cm²,灰密取其 5 倍,采用深棱形瓷支柱绝缘子(伞间距/伞伸出为 95/95 mm)取爬电比距 54 mm/kV 可以满足防污要求,当外绝缘采用合成材料时,爬电比距可取 54×0.75~0.80=40.50~43.20mm/kV,爬电距离约 33 050~35 250 mm。以此为基础,根据设备套管或支柱绝缘子选择的外绝缘材料和直径,可以推算出特高压直流侧设备所需爬电距离,

同时对绝缘子伞形、伞间距等参数提出要求。

4 主要设备选择

4.1 换流阀

对于输送容量为 5 000 MW 的特高压直流输电工程,换流阀可采用成熟的直径为 5 英寸、光触发或光电触发、空气绝缘、水冷却晶闸管;当输送容量为 6 400 MW 时,由于额定输送电流达到 4 000 A,需要研发直径为 6 英寸的晶闸管,从目前研发情况看,供应商对 6 英寸晶闸管均采用光电触发技术。从换流阀本身的结构来看,采用二重阀或者四重阀均是可行的,没有明显的技术经济差异,采用四重阀可在一定程度上节约阀厅的投资和运行费用,但换流站总体占地面积较大,考虑到土地为不可再生的宝贵资源,目前各工程均推荐采用二重阀结构的换流阀^{[2][3]}。

4.2 换流变压器

换流变压器的总体结构可以是三相三绕组式、三相双绕组式、单相三绕组式和单相双绕组式,类型的选择需根据运输条件和制造能力综合确定。特高压换流变由于电压等级高,容量大,一般只能采用单相双绕组变压器。

4.3 平波电抗器

平波电抗器按绝缘和磁路结构的不同,可分为干式空心油浸铁心式两种。这两种型式的平波电抗器在高压直流输电工程中均有成功的运行经验。在国外高压直流输电工程中,干式空心平波电抗器的应用较为广泛,在中国早期的高压直流输电工程中,如葛一南、天一广直流输电工程中,采用干式空心平波电抗器;而在 2000 年后建设的几条±500 kV, 3 000 MW 的高压直流输电工程,如三一常、三一广、贵一广 I 回以及贵一广 II 回直流输电工程中,均选用了油浸铁心式平波电抗器。应该指出,采用油浸铁心式平波电抗器的背景,是早期水平穿墙套管的非均匀淋雨闪络较难解决;利用油浸铁心式平波电抗器的干式套管直接穿入阀厅,取代水平穿墙套管,可回避这一问题。经前期广泛深入论证,特高压直流平波电抗器采用了干式空心型,主要基于以下理由:(1)油浸铁心式平波电抗器的综合造价约为干式空心平波电抗器的 2~3 倍;(2)采用合成穿墙套管,可有效解决非均匀淋雨闪络问题;(3)干式空心平波电抗器主绝缘只简单地由

支柱绝缘子提供,提高了主绝缘的可靠性,降低了设备研发难度;(4)干式空心平波电抗器一般不需配置在线监测电抗器内部故障的装置,简化了二次控制和保护设备;(5)干式空心平波电抗器无油,没有辅助运行系统,运行、维护费用低,基本属于免(少)维护,油浸铁心式平波电抗器需要装设风扇、水喷雾消防及油处理等,维护工作量大,运行费用高^[7]。但需要说明的是,干式空心平波电抗器也有早期故障难于检测、可听噪声大以及抗震性能差等缺点。

4.4 特高压直流支柱绝缘子

平波电抗器、隔离开关和母线支撑均需要采用大量支柱绝缘子,因此支柱绝缘子的设计方案是影响特高压换流站直流开关场设备型式选择的关键因素之一。采用电瓷作为外绝缘,爬电比距取 54 mm/kV,同时考虑绝缘子伞间距的要求,±800 kV 户外绝缘子高度将达到约 15 000 mm 以上。研究表明,应用 15 000 mm 高的电瓷支柱绝缘子需要采用多支并联的复杂结构。作为平波电抗器支柱时,绝缘子数量多且安装倾角大,占地面积大;作为母线支撑时绝缘子需组装成三角架结构;用于隔离开关时每柱需 3~4 支绝缘子并联,设备结构复杂、庞大。因而无论从产品设计还是工程设计角度看采用电瓷作为外绝缘的支柱绝缘子技术方案均极不合理。因此,外绝缘采用合成材料是±800 kV 户外直流支柱绝缘子的必然选择。

5 平面布置

5.1 换流变压器及阀厅布置

特高压换流站换流变及阀厅布置方案对总平面布置格局起到决定性作用,目前工程实践中采用如图 3、图 4 两种组合方案^[4]。

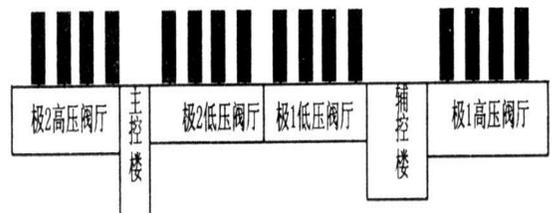


图 3 “一字型”二重阀厅布置示意图

两个方案在阀厅、控制楼的造价上没有明显的区

别,“背靠背”方案可听噪声控制效果略佳,“背靠背”方案运行维护条件略好。方案的最终取舍应当根据总平面布置格局的总体合理性,考虑地形地貌、地质条件、噪音敏感点方位等因素,经综合技术经济比较确定。

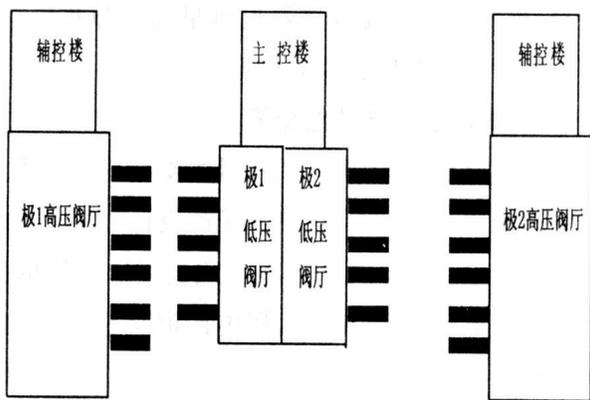


图4 “背靠背”二重阀厅布置示意图

5.2 直流场布置

户外布置和户内布置均是直流场可供选择的布置方案,采用户内开关场,设备研发难度相对较小,技术风险也相对较小,但土建投资大(每个换流站增加约6000万元)、运行能耗及费用高,而户外开关场则具有相反的特点,具体工程方案应根据站址污秽情况综合土建投资、设备投资以及运行费用等因素经技术经济比较确定。对严重污秽地区,户内开关场是较为可靠的解决方案,而污秽中等或较轻的地区,应尽可能采用户外开关场方案。从目前特高压直流工程直流场招标情况看,直流场设备外绝缘采用合成材料或瓷涂憎水涂料,均可满足户外安装要求,且各承包商并没有针对户内场进行设备研发,因此,直流场布置多采用户外布置方案。

与常规±500 kV 换流站直流场布置相比较,特高压直流场布置不同之处如下:(1)换流阀组的旁路回路布置在直流场;(2)平波电抗器(极母线和中性母线均安装)采用干式空芯型,支持式安装方式。

6 结语

1) 特高压换流站交流开关场电气主接线采用一个半断路器接线,换流阀组接线采用每极2个12脉

动阀组串联接线,每个阀组设置旁路回路。

2) 换流阀绝缘配合裕度按现行国家标准推荐值选取;在换流阀直流极母线侧或高端换流变阀侧出线套管处装设避雷器均是可行的。

3) 设备的外绝缘必须要考虑干弧距离和爬电距离两方面的要求,具体工程应根据站址的环境情况对直流自然积污附盐密度进行专题试验研究,作为特高压直流侧设备爬电距离选取的基础。

4) 换流阀宜采用二重阀结构,换流变一般应采用单相双绕组型式,平波电抗器采用干式空芯型。

5) 阀厅及换流变布置格局应当根据总平面布置方案的合理性,考虑地形地貌、地质条件、噪音敏感点方位等因素,经综合技术经济比较确定。对严重污秽地区,户内布置是特高压直流场较为可靠的解决方案,而污秽中等或较轻的地区,应尽可能采用户外开关场。

参考文献

- [1] 胡劲松等. 特高压直流输电工程可行性研究主要技术原则[J]. 中国电力, 2007, 40(8): 36—39.
- [2] 中国电力工程顾问集团公司, 西南电力设计院, 广东省电力设计研究院. 云广±800 kV 特高压直流输电工程可行性研究报告[R]. 北京: 中国电力工程顾问集团公司, 2005.
- [3] 中国电力工程顾问集团公司, 金沙江一期溪洛渡、向家坝水电站送电华东、华中±800 kV 特高压直流输电工程可行性研究报告[R]. 北京: 中国电力工程顾问集团公司, 2005.
- [4] 西南电力设计院, ±800 kV 向家坝换流站预初步设计报告[R]. 成都: 西南电力设计院, 2006.
- [5] DL/T605—1996. 《高压直流换流站绝缘配合导则》[S].
- [6] 中国南方电网公司. ±800 kV 直流输电技术研究 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] 张劲松. 特高压直流平波电抗器的选择[J]. 广东电力, 2006, 19(5).
- [8] 胡劲松. 涂敷 RTV 的电瓷支柱绝缘子在±800 kV 特高压换流站户外直流开关场的应用探讨 [C]. 中国电机工程学会变电专委会变电站学组 2007 年度学术年会论文集.

作者简介:

胡劲松(1968—), 男, 工程硕士, 高级工程师(教授级), 从事发、变电设计工作。

(收稿日期: 2008—02—10)

向家坝±800 kV 特高压换流站容性无功配置研究

王海林, 黎 岚, 吴安平

(西南电力设计院, 四川 成都 610021)

摘 要:通过向家坝±800 kV 特高压直流换流站额定功率运行方式下最大容性无功消耗的计算,换流站附近交流系统提供容性无功能力的分析,换流站容性无功大组和小组分组容量的选择,确定了向家坝特高压换流站容性无功配置方案。

关键词:特高压直流;换流站;无功消耗

Abstract: After calculating the maximum capacitive reactive power consumption of ±800 kV Xiangjiaba UHVDC Converter Station during the steady state condition, analyzing the capability of the AC system supplying the capacitive reactive power and proposing the banks and sub-banks of the converter station, the capacitive reactive power division scheme of Xiangjiaba UHVDC Converter Station is designed.

Key words: UHVDC; converter station; reactive power consumption

中图分类号:TM721.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6954(2008)03-0009-03

直流换流站的换流阀组在换相过程中会消耗大量的容性无功,其消耗容性无功大小与直流系统的输送容量、触发角等因素有关。一般情况下,应在换流站安装容性无功补偿装置来补偿换流站运行时消耗的容性无功。

通过对向家坝—上海±800 kV 特高压直流工程送端向家坝换流站额定功率方式下最大容性无功消耗的计算,向家坝换流站附近 500 kV 交流系统提供容性无功能力的分析,以及向家坝换流站容性无功大组和小组分组容量的选择,最后确定了向家坝换流站共需配置的容性无功总规模及容性无功大组和小组的分组容量。

1 金沙江一期工程送端接入方案简介

金沙江一期工程向家坝、溪洛渡水电站装机容量分别为 6000(8×750)MW 和 12 600(18×700)MW,考虑通过 3 回±800 kV 特高压直流工程送电华东电网和华中东部四省电网,其中送华东电网 2 回,送华中东部四省电网 1 回,每回特高压直流送电规模均为 6 400 MW。

2 向家坝换流站无功消耗计算

直流换流站在换相过程会消耗大量的容性无功功率。换流站容性无功功率消耗的大小与直流送电

功率、直流电压、直流电流及换相角等设备额定值、运行参数等因素有关。对于一个 6 脉动整流侧换流器所消耗的容性无功功率可根据下面的公式计算(对于逆变器侧换流器,应把 α 换为 γ):

$$Q_{dc} = I_d \cdot U_{dio} \cdot \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \mu)}{4(\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu))}$$

$$U_{dio} = \sqrt{2} \frac{3}{\pi} U_{vo}$$

$$\mu = \arccos(\cos \alpha - 2d_x \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{dioN}}{U_{dio}}) - \alpha$$

式中: Q_{dc} ——换流器消耗的无功功率;

I_d ——额定直流电流;

U_{dio} ——每个 6 脉动阀组理想空载直流电压;

d_x ——相对电感压降;

μ ——换相角;

α ——触发角;

γ ——熄弧角。

为了给实际运行留有一定裕度,换流站容性无功配置须按直流工程额定功率运行,同时考虑各种设备公差和测量误差等因素后的最大容性无功消耗进行计算。

由于向家坝—上海±800 kV 特高压直流工程每极采用两个 12 脉动阀组串联,上下 12 脉动阀组电压均为±400 kV,考虑各种设备公差和测量误差后(对应各参数的取值分别为: $U_{dio} = 232.6$ kV, $I_d = 4 046$ A, $d_x = 0.096 6$, $\mu = 22.7^\circ$, $\alpha = 18^\circ$),在额定功率运行时,向家坝换流站最大容性无功消耗约 3 820 Mvar。

3 向家坝换流站容性无功分组研究

3.1 交流系统提供容性无功能力分析

由于向家坝水电站距离3个换流站均较近,相对具有更好的容性无功支持能力,因此金沙江一期送端交流系统提供容性无功的能力主要取决于向家坝水电站的开机台数。

同时,由于金沙江一期溪洛渡、向家坝水电站联合运行时具有季调节能力,在丰水期(6月~10月)可充分利用金沙江一期工程的这一能力参与四川系统调峰,按向家坝换流站~泸州3回联络线N-1的热稳极限控制,四川电网丰期可补充3 000~4 000 MW电力、35~45亿kW·h电量。经计算分析,这种调峰运行方式下金沙江一期3回特高压直流工程的输电利用小时均可增加约180~230h,经济效益相当可观。因此,应以调峰运行方式作为金沙江一期送端交流系统提供容性无功能力的主要控制方式。

基于以上分析,计算出金沙江一期送端交流系统在丰水期不同运行方式下提供容性无功能力约为2 347 Mvar~2 780 Mvar。其中金沙江一期送端交流系统提供容性无功能力为2 300 Mvar对应的运行方式为:溪洛渡左右岸电站和向家坝左右岸电站均停运1台机组,同时四川主网补充3 500 MW电力至金沙江一期送端系统,以保证3回特高压直流按额定功率送电的调峰方式。该运行方式下交流系统提供容性无功能力的详细计算结果如表1所示。

考虑到向家坝特高压换流站距离金沙江一期水电站那相对最近,最有条件接受交流系统提供的容性无功,在不影响溪洛渡左、右岸2个换流站可研阶段确定的总容性无功配置3 200 Mvar的前提下,交流系统提供给溪洛渡左、右岸换流站的容性无功可按650 Mvar考虑,提供给向家坝换流站的最大容性无功可按1 000 Mvar考虑。

3.2 向家坝换流站容性无功分组研究

换流站最大无功分组容量取决于交流系统的强弱,其分组容量大小需满足投切无功分组时系统稳态电压变化和暂态电压变化率的要求。根据以往直流工程设计经验值,投切无功小组引起的换流站交流母线暂态电压变化率 $\leq 1.5\%$ 、稳态电压变化率 $\leq 1.25\%$;切无功大组作为一种非正常运行方式,不应作为无功配置的控制方式,只能作为一种保护功能,切

无功大组引起的换流站交流母线暂态电压变化率可适当放宽至5%~6%。

表1 金沙江一期交流系统提供容性无功能力

| 序号 | 项 目 | Mvar |
|-----|---------------|-------|
| 1 | 电网可发无功 | 7 143 |
| (1) | 电站可发无功 | 6 245 |
| | 向家坝电站 | 2 179 |
| | 溪洛渡左岸电站 | 2 033 |
| | 溪洛渡右岸电站 | 2 033 |
| (2) | 线路充电功率 | 899 |
| | 向家坝电站~换流站线路 | 64 |
| | 向家坝换流站~泸州变线路 | 167 |
| | 溪洛渡左~换流站线路 | 293 |
| | 溪洛渡右~换流站线路 | 375 |
| 2 | 系统损耗无功 | 4 796 |
| (1) | 电站升压变无功损耗 | 2 556 |
| | 向家坝升压变无功损耗 | 812 |
| | 溪洛渡左岸升压变无功损耗 | 872 |
| | 溪洛渡右岸升压变无功损耗 | 872 |
| (2) | 线路无功损耗 | 2 117 |
| | 向家坝电站~换流站线路 | 67 |
| | 向家坝换流站~泸州变线路 | 231 |
| | 溪洛渡左~换流站线路 | 798 |
| | 溪洛渡右~换流站线路 | 1 021 |
| (3) | 向家坝换流站~泸州线路高抗 | 123 |
| 3 | 系统可提供无功 | 2 347 |

(注:向家坝、溪洛渡电站功率因素分别为0.9和0.94,向家坝换流站~泸州线路充电功率和高压并联电抗器(3×90 Mvar)均按一半考虑,4×720 mm²和4×400 mm²的500 kV线路每100 km充电功率分别按119 Mvar和114 Mvar考虑)

电压波动计算结果表明:

(1)枯水期小方式是决定向家坝换流站最大容性无功分组的控制方式。

(2)投切无功小组:向家坝—上海±800 kV特高压直流工程投产初期(2012年左右)的正常接线方式下,投切向家坝换流站220 Mvar无功小组引起的换流站500 kV交流母线的最大暂态电压和最大稳态电压变化率分别小于1.5%和1.15%;随着溪洛渡左、右岸电站的投运,2015年及以后,无论是正常接线或是N-1接线方式,投切向家坝换流站220 Mvar无功小组引起的换流站500 kV交流母线的最大暂态电压和最大稳态电压变化率均分别小于1.3%和1.0%。

(3)切无功大组:向家坝—上海±800 kV特高压直流工程投产初期的正常接线方式下,切向家坝换流

站 880 Mvar 无功大组引起的换流站 500 kV 交流母线的最大暂态电压变化率均小于 5.8%;随着溪洛渡左、右岸电站的投运,2015 年及以后,无论是正常接线或是 N-1 接线方式,切向家坝换流站 880 Mvar 无功大组引起的换流站 500 kV 交流母线的最大暂态电压变化率均小于 4.8%。

因此,向家坝换流站容性无功小组最大容量可按 220 Mvar 考虑,容性无功大组容量可按 880 Mvar 考虑。

4 向家坝换流站容性无功配置方案

根据直流工程容性无功补偿总容量配置原则,换流站站内容性无功补偿总容量应满足如下要求:

$$Q_{total} \geq (Q_{dc} - Q_{ac}) / (U_{ac}^2) + Q_{sb}$$

式中: Q_{total} —— 换流站需要的无功补偿容量;

Q_{dc} —— 换流站无功消耗容量;

Q_{ac} —— 交流系统提供的容性无功容量;

Q_{sb} —— 换流站备用容性无功容量(按 1~2 小组无功考虑);

U_{ac} —— 换流站交流母线电压标么值(按 1.0 p.u. 考虑)。

对于向家坝±800 kV 换流站:

$$Q_{total} \geq (Q_{dc} - Q_{ac}) / 1.0^2 + Q_{sb}$$

$$= (3\ 820 - 1\ 000) / 1.0^2 + 220$$

$$= 3\ 040\ \text{MVar}$$

(说明:由于金沙江一期送端 3 个换流站之间电气距离近(各换流站之间仅相距约 20 km),从节约投资和占地角度出发,送端 3 个换流站可看作一个大换流站来考虑无功备用,因此向家坝换流站仅需考虑 1 小组容性无功备用即可满足工程要求。)

根据向家坝换流站站内容性无功配置总规模的分析,为了保证向家坝—上海±800 kV 特高压直流工程运行的灵活性和可靠性,同时尽可能减小换流站无功分组规模,建议向家坝换流站的容性无功总规模按 3 080 Mvar 考虑,分 4 大组,14 小组,每组容量不超过 880 Mvar,每小组容量为 220 Mvar。

5 结束语

通过对向家坝—上海±800 kV 特高压直流工程送端换流站额定功率运行方式下最大容性无功消耗的计算,金沙江一期送端 500 kV 交流系统提供容性无功能力的分析,以及向家坝换流站容性无功大组和小组分组容量的选择,最后确定了向家坝特高压直流换流站共需配置 3 080 Mvar 容性无功,分 4 大组,14 小组,每组容量不超过 880 Mvar,每小组容量为 220 Mvar。

(收稿日期:2008-03-20)

简 讯

四川省电机工程学会第六届七次常务理事会的召开

四川省电机工程学会第六届七次常务理事会于 2008 年 4 月 25 日在成都市名雅山庄召开。常务理事均参加了会议。

会议总结了 2007 年学会工作以及对 2008 年学会工作重点进行了安排;会议向各位常务理事传达了四川省科协第七次代表大会的精神以及 2008 年中国电机工程学会秘书长工作会议精神;对学会评选先进集体和先进个人的情况以及学会 2007 年相关工作情况进行了说明。与会代表充分肯定了电机工程学会 2007 年以来在电力工业生产中所发挥的作用。会议还对有关建议进行了审议,对学会 2007 年的工作总结和 2008 年的工作安排发表了建设性的意见。

新增补的副理事长兼秘书长张晓明在会上作了发言,希望新的一年中学会工作能增大影响,积极开展学术活动。

王平理事长作了会议总结,他希望大家的支持下,共同把四川省电机工程学会的工作做好,加强学会的学术活动,科技兴川,为推动国民经济的发展,为建设西部经济,做出贡献。

会议经过讨论通过了秘书处起草的 2007 年工作总结和 2008 年的工作计划。通过了关于调整学会理事长、秘书长和增选部分常务理事、副秘书长的建议名单。

覆冰纵向张力计算

詹宗东¹, 熊俊², 吴昊²

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610064)

摘要:重冰区输电线路在覆冰断线工况和不均匀覆冰工况下的纵向张力计算,是重冰区输电线路设计的基础。介绍了求解上述问题的数值计算方法,通过对比计算结果,表明计算方法是可靠的。

关键词:覆冰;输电线路;张力计算

Abstract: The calculation of unbalanced tension of transmission line which is caused by uneven ice accumulation or broken wire condition is the basis of transmission line design in heavy ice area. A numerical method is presented to solve the above-mentioned problems, and the comparison of the existing data and the calculation results prove its accuracy and reliability.

Key words: ice accretion; transmission line; tension calculation

中图分类号: TM751 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)03-0012-04

重冰区输电线路在覆冰断线工况和不均匀覆冰工况下的纵向张力计算,是重冰区输电线路杆塔强度设计以及不均匀脱冰时的导地线间距计算的基础。目前重冰区输电线路的设计,是按《重冰区架空送电线路设计技术规定》^[3](1998 试行),它适用于 220 kV 及以下 20~40 mm 覆冰情况,其中对覆冰断线工况和不均匀覆冰工况下的纵向张力取值作了具体规定。目前正在修编的架空输电线路重冰区设计技术导则,对适用范围进行了扩充,对各电压等级不同冰区线路计算覆冰断线工况和不均匀覆冰工况的覆冰率提出了要求,但未给出具体的纵向张力取值,需要具体线路设计时作相应计算。

针对以往计算方法的不足,对上述两种典型工况下的纵向张力数值计算方法进行了介绍,并据此编制了计算程序。该计算方法同样适用于轻冰区的计算。

耐张塔的断线和不均匀覆冰工况下的纵向张力计算方法较为简单,下面介绍直线塔的有关计算。

1 断线工况的纵向张力数值计算方法

传统的断线工况的纵向张力计算主要是试凑图解法^{[1],[4]},根据其原理也可编制计算机程序进行试凑求解。但根据实践,发现试凑法在编制程序时存在很多不足,主要是对初始张力取值非常敏感,取值不当将造成无法计算;且计算过程中的张力变化步长取值也很难把握,取值不当也将造成求解失败。

分析其计算原理,可列出等效方程组,用求解非线性方程组的办法进行求解,看似复杂,但用数值计算方法求解则简单有效,可以避免上述计算中的问题。

根据规程规定^[3],重冰线路断线工况按断线、有冰、无风计算断线张力。

直线塔断线工况的纵向张力计算有关参数见图 1 所示,计算中的有关物理量含义如下:

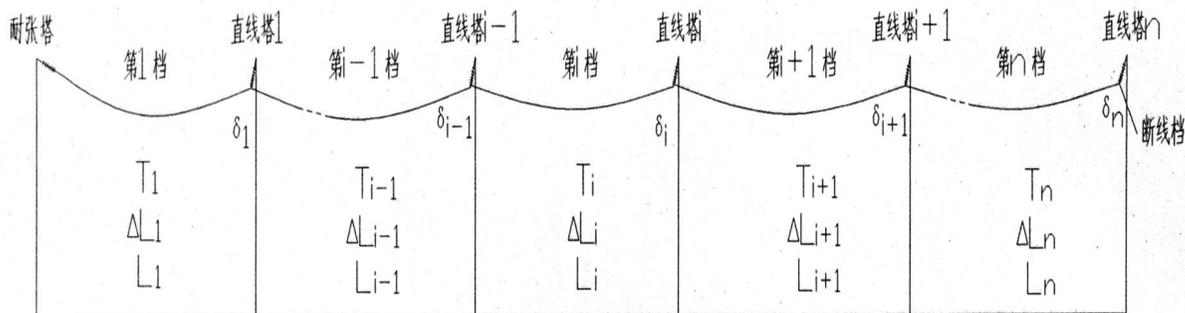


图 1 断线示意图

n ——断线后耐张段内剩余总档数;
 T_i ——断线后第 i 档每根电线的水平张力, N;
 T_0 ——断线前每根电线的水平张力, N;
 L_{0i} ——断线前第 i 档的档距, m;
 P_i ——断线条件下第 i 档的电线单位荷载, N/m;
 E ——电线弹性系数, N/mm²;
 ΔL_i ——断线后第 i 档的档距变化量, 档距缩小取正值, m;
 M ——电线分裂根数;
 A_0 ——一根电线的截面, mm²;
 $A = MA_0$ ——电线总截面, mm²;
 δ_i ——断线后第 i 基直线杆塔的电线悬挂点偏移距离, m;
 λ_i ——第 i 基直线杆塔悬垂串长度, m;
 G_{Si} ——断线时第 i 基直线杆塔悬垂串重量, N;
 L_{Vi} ——断线时第 i 基直线杆塔电线垂直档距, m;
 G_{Ci} ——断线时第 i 基直线杆塔电线总垂直荷载, $G_{Ci} = MP_i L_{Vi}$, N。

需要求解的未知数有 $3n$ 个, 即: $T_1 \sim T_n$ 共 n 个
 $\Delta L_1 \sim \Delta L_n$ 共 n 个

$\delta_1 \sim \delta_n$ 共 n 个

可以列出的方程有:

(1) 各档档距变化量 ΔL_i 与张力 T_i 之间的关系:

$f(T_i, \Delta L_i) = 0 \quad i=1 \sim n$ 共 n 个方程

具体的表达式(1)为:

$$T_i^2 \left[T_i + \left(\frac{EP_i^2 L_{0i}^2 A_0}{24 T_0^2} - T_0 + \frac{E \Delta L_i A_0}{L_{0i}} \right) \right] - \frac{A_0 EP_i^2 (L_{0i} - \Delta L_i)^3}{24 L_{0i}} = 0$$

(2) 各直线塔绝缘子串偏移量 δ_i 与其前后两档张力 T_{i+1} 、 T_i 之间的关系:

$f(T_{i+1}, T_i, \delta_i) = 0 \quad i=1 \sim n$ 共 n 个方程

根据受力分析, 得出的表达式为:

$$\delta_i - \frac{\lambda_i (T_i - T_{i+1}) M}{\sqrt{(G_{Ci} + \frac{G_{Si}}{2})^2 + (MT_i - MT_{i+1})^2}} = 0$$

断线档 $T_{n+1} = 0$

(3) 各直线塔绝缘子串偏移量 δ_i 与其后侧档距变化 ΔL_i 、后侧直线临塔绝缘子串偏移量 δ_{i-1} 之间的关系共 n 个方程:

$$\delta_1 - \Delta L_1 = 0$$

$$\delta_i - \delta_{i-1} - \Delta L_i = 0 \quad i=2 \sim n$$

以上共 $3n$ 个方程, $3n$ 个未知数, 可以用求解非线性方程组的数值解法进行求解。这里采用“牛顿迭代结合列主元高斯消元法(2)”进行求解, 各变量初值取为: $\Delta L_i = 0.3$ 、 $\delta_i = \Delta L_i$ 、 $T_i = 0.7 T_0$, 迭代结束目标: 连续两步之间各变量绝对值差异 $\leq 10^{-7}$, 实例证明该计算方法是有效的, 一般迭代不超过 10 次即满足要求。

根据覆冰率计算对应覆冰厚度的公式为:

$$b_f = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \frac{1000 P_2}{9.80665 \times 0.9 \pi} - \frac{d}{2}}$$

b_f ——覆冰率 f 对应的覆冰厚度, mm;

$$P_2 = f \times P_{02};$$

P_{02} ——标准覆冰厚度对应的冰荷载, N/m;

f ——覆冰率, 指对应所在冰区标准覆冰重量的比例;

P_2 ——覆冰率 f 对应的冰荷载, N/m;

d ——无冰时电线直径, mm。

2 不均匀覆冰工况下的纵向张力数值计算方法

不均匀覆冰工况下的纵向张力计算原理与上述断线张力计算基本相同, 用求解非线性方程组的数值计算方法进行求解, 也是很有效的。

根据规程规定^[3], 重冰线路不均匀覆冰工况按未断线、有不均匀冰、无风计算。

直线塔不均匀覆冰工况下的纵向张力计算有关参数见图 1 所示, 计算中的有关物理量含义如下:

n ——耐张段内总档数;

L_i ——悬垂串处于中垂位置时第 i 档的档距, m;

α ——电线线膨胀系数, 1/°C;

E ——电线弹性系数, N/mm²;

t_m ——架线时温度, °C;

T_m ——架线时每根电线张力, N;

Δt_e ——架线时考虑初伸长降温的等值温度(取正值), °C;

P_m ——架线时电线自重荷载, N/m;

t ——计算不均匀覆冰工况时温度, °C;

T_i ——计算不均匀覆冰工况时第 i 档每根电线水平张力, N;

P_i ——计算不均匀覆冰工况时第 i 档每根电线单位荷载, N/m;

ΔL_i ——不均匀覆冰工况时第 i 档的档距变化量, 档距增加取正值, m;

M ——电线分裂根数;

A^0 ——一根电线的截面, mm^2 ;

$A = MA^0$ 电线总截面, mm^2 ;

δ_i ——不均匀覆冰工况时第 i 基直线杆塔的电线悬挂点偏移距离, m;

λ_i ——第 i 基直线杆塔悬垂串长度, m;

G_{Si} ——不均匀覆冰工况时第 i 基直线杆塔悬垂串重量, N;

h_i ——悬垂串处于中垂位置时第 i 基塔与后侧塔电线悬挂点高差(比后侧高时为正值), m;

β_i ——第 i 档的高差角, $\text{tg}(\beta_i) = h_i/L_i$, 度。

需要求解的未知数有 $3n-1$ 个, 即:

$T_1 \sim T_n$ 共 n 个

$\Delta L_1 \sim \Delta L_n$ 共 n 个

$\delta_1 \sim \delta_{n-1}$ 共 $n-1$ 个

可以列出的方程有:

(1) 各档档距变化量 ΔL_i 与张力 T_i 之间的关系:

$f(T_i, \Delta L_i) = 0 \quad i=1 \sim n$ 共 n 个方程

具体表达式(1)为:

$$\Delta L_i - \frac{L_i}{(\cos^2 \beta_i)(1 + \frac{P_i^2 L_i^2}{8T_i^2})} \left\{ \frac{(L_i \cos \beta_i)^2}{24} \times \left[\left(\frac{P_m}{T_m} \right)^2 - \left(\frac{P_i}{T_i} \right)^2 \right] + \left[\frac{T_i - T_m}{A_0 E \cos \beta_i} \right] + \alpha(t + \Delta t_e - t_m) \right\} = 0$$

(2) 各直线塔绝缘子串偏移量 δ_i 与其前后两档张力 T_{i+1}, T_i 之间的关系:

$f(T_{i+1}, T_i, \delta_i) = 0 \quad i=1 \sim n-1$ 共 $n-1$ 个方程

程

具体表达式(1)为:

$$\frac{T_{i+1} - \left[\frac{G_{Si}}{2A} + \frac{P_i L_i}{2A_0 \cos \beta_i} + \frac{P_{i+1} L_{i+1}}{2A_0 \cos \beta_{i+1}} + \frac{T_i h_i}{A_0 \delta_i} \right] + \frac{T_i}{A_0 \delta_i} \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\left[\frac{\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\delta_i} + \frac{h_{i+1}}{L_{i+1}} \right]} = 0$$

(3) 各直线塔绝缘子串偏移量 δ_i 与其后侧档距变化 ΔL_i 、后侧直线临塔绝缘子串偏移量 δ_{i-1} 之间的关系共 n 个方程:

$$\delta_1 - \Delta L_1 = 0$$

$$\delta_{n-1} + \Delta L_n = 0$$

$$\delta_i - \delta_{i-1} - \Delta L_i = 0 \quad i=2 \sim n-1$$

以上共 $3n-1$ 个方程, $3n-1$ 个未知数, 同样可以用求解非线性方程组的“牛顿迭代结合列主元高斯消元法(2)”进行求解。各变量初值取为: $\Delta L_i = 0.1$ (导线)及 0.02 (地线)、 $\delta_i = \Delta L_i, T_i = T_0$, 迭代结束目标: 连续两步之间各变量绝对值差异 $\leq 10^{-7}$, 一般迭代不超过 10 次即满足要求。

以不均匀覆冰工况下的纵向张力及档距变化计算结果为基础, 可以计算出不均匀脱冰时的导地线弧垂, 进而计算出导地线之间静态及动态接近距离, 为杆塔地线支架高度设计取值提供依据。

上述结算方法同样适用于轻冰区的计算。

3 计算实例

3.1 直线塔断线张力计算

为了检验上述方法的计算结果, 与《重冰区架空送电线路设计技术规定》⁽³⁾ 条文说明中的算例结果进行了对照(见表 1)。

表 1 220 kV LGJJ-300 直线塔断线张力百分数

| 覆冰率 | 冰区(mm) | 计算档距(m) | 规程算例结果 ⁽³⁾ | 本文计算值 |
|-----|--------|---------|-----------------------|-------|
| 70% | 20 | 350 | 58.9 | 57.6 |
| | | 400 | 62.2 | 61.1 |
| | 30 | 300 | 59.0 | 57.8 |
| | | 350 | 62.8 | 61.4 |
| | | 250 | 59.0 | 57.2 |
| | | 400 | 63.3 | 61.6 |
| 60% | 20 | 350 | 54.7 | 53.4 |
| | | 400 | 57.5 | 56.6 |
| | 30 | 300 | 53.6 | 52.4 |
| | | 350 | 56.9 | 55.6 |
| | | 250 | 52.5 | 51.0 |
| | | 400 | 56.2 | 54.8 |
| 50% | 20 | 350 | 50.3 | 49.1 |
| | | 400 | 53.0 | 52.0 |
| | 30 | 300 | 47.8 | 46.7 |
| | | 350 | 50.8 | 49.7 |
| | | 250 | 46.1 | 44.8 |
| | | 400 | 49.3 | 48.1 |

断线张力百分数: 以最大使用张力(=破坏张力/安全系数)为基准

计算条件:LGJJ-300, N=2.5, 串长 2.3 m;

断后剩 5 档, 等档距、无高差。

从表 1 对比可知, 其计算结果与规程(3)说明所附算例结果基本一致, 说明计算结果是可信的。二者稍有差异可能与计算参数取值不同有关(如断后剩的档数、绝缘子串覆冰后重量等)。

表 2 是 500 kV 重冰区线路几种典型导线的计算结果。

表 2 500 kV 线路直线塔断线张力算例

| 冰区(mm) | 覆冰率 | 计算档距(m) | 导线断线张力百分数 |
|--------|------|---------|-----------|
| 50 | 100% | 250 | 56.3 |
| | | 300 | 64.3 |
| | | 350 | 70.6 |
| 40 | 90% | 250 | 48.5 |
| | | 300 | 55.9 |
| | | 350 | 61.9 |
| 30 | 80% | 300 | 44.2 |
| | | 350 | 50.0 |
| | | 400 | 54.8 |
| 20 | 70% | 350 | 46.4 |
| | | 400 | 50.9 |
| | | 450 | 54.8 |

计算条件:

20 mm 冰区: $4 \times \text{LGJ}-400/50$, $N=2.5$, 串长 5.842 m, 串重 3 254 N。

30、40 mm 冰区: $4 \times \text{A}3/\text{S}1\text{A}-465/60$, $N=2.895$, 串长 6.217 m, 串重 6 111 N。

50 mm 冰区: $4 \times \text{A}3/\text{S}3\text{A}-465/60$, $N=2.65$, 串长 6.342 m, 串重 8 114 N。

断后剩 5 档, 等档距、无高差。

影响直线塔覆冰断线张力计算结果的因素很多, 主要有断线时的覆冰厚度、档距、高差、绝缘子串长度、断线前的张力、断后剩余的档数等, 工程设计时需根据规程要求结合工程具体条件进行计算。

3.2 直线塔不均匀覆冰工况下的纵向张力计算

同样, 为了检验上述方法的计算结果, 与《重冰区架空送电线路设计技术规定》⁽³⁾条文说明中的算例结果进行了对照(见表 3)。

计算条件:

连续 7 档, 等档距、无高差, 第一档覆冰率 20%, 其余档覆冰率 100%;

不平衡张力百分数: 以最大使用张力(=破坏张力/安全系数)为基准;

LGJJ-300; $N=2.5$, 串长 2.3 m;

GJ-100(1 270 MPa); $N=2.73$, 串长 0.4 m。

从上表对比可知, 其计算结果与规程算例结果^[3]基本一致, 说明计算结果是可信的。二者稍有差异可能与计算参数取值不同有关(如架线张力、初伸长降温取值、绝缘子串覆冰后重量等)。

表 4 是 500 kV 重冰区线路几种典型导地线的计算结果。

计算条件:

连续 7 档, 等档距、无高差, 第一档覆冰率 20%, 其余档覆冰率 100%;

不平衡张力百分数: 以最大使用张力(=破坏张力/安全系数)为基准。

导线:

20 mm 冰区: $4 \times \text{LGJ}-400/50$, $N=2.5$, 串长 5.842 m, 串重 3 254 N;

表 3 220 kV 线路直线塔不均匀覆冰不平衡张力百分数

| 冰区(mm) | 覆冰率 | 计算档距(m) | 规程算例结果 ⁽³⁾ | 本文计算值 | 规程算例结果 ⁽³⁾ | 本文计算值 |
|--------|--------|---------|-----------------------|------------|-----------------------|----------|
| | | | (LGJJ-300) | (LGJJ-300) | (GJ-100) | (GJ-100) |
| 20 | 20/100 | 350 | 7.0 | 7.3 | 15.5 | 16.2 |
| | | 450 | 17.0 | 17.2 | 32.0 | 32.1 |
| 30 | 20/100 | 300 | 16.0 | 14.9 | 38.0 | 40.0 |
| | | 350 | 27.0 | 25.3 | 47.0 | 48.3 |
| 40 | 20/100 | 250 | 23.0 | 22.3 | 52.0 | 53.1 |
| | | 300 | 38.5 | 37.9 | 58.0 | 59.4 |

(下转第 37 页)

其一是抬高它前面的阀式避雷器冲击电压,使避雷器容易放电,从而保护变压器。其二是降低波前陡度,减小作用于变压器匝间和层间的冲击电压梯度,保护配电变压器的纵绝缘。

实践中,往往采取综合防雷保护措施,为配电变压器的保护设置多道防线,即是上述的有关保护措施加以组合,从多方面来限制侵入配电变压器的雷电波,使配电变压器免遭雷害,达到安全运行的目的。

4.6 加强配电变压器运行管理

在实施以上有关技术措施的同时,必须重视和加强配电变压器运行管理,定期测试变压器的绝缘状况,进行变压器油试验分析,测量接地电阻,检测高、低压避雷器,以保证变压器绝缘水平和保护装置的良好可靠,这些是做好配电变压器防雷的基础。

5 结语

(1)配电系统中的正逆变换过电压是导致配电变

压器雷击损坏的根本原因,而防雷保护装置安装设计不当是配电变压器雷击损坏的主要原因;

(2)配电系统中的配电变压器防雷保护应在其高低压侧均应装设金属氧化物避雷器保护,且要求“三位一体”的防雷接地方式,接地电阻符合有关要求。接地引下线,以及避雷器至被保护变压器的连接导线长度应尽可能短,并按规定校核。

参考文献

- [1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:中国水利电力出版社,1985.
- [2] 陈化钢等. 电力设备异常运行及事故处理[M]. 北京:中国水利电力出版社,2005.

作者简介

方晴(1963—),男,四川重庆人,高级工程师,四川广元电业局生产副局长,从事电力生产管理工作。

罗军川(1966—),男,四川剑阁人,现就职于四川广元电业局生产技术部高级工程师,主要从事电力生产技术管理工作。
(收稿日期:2008-02-14)

(上接第15页)

表4 500 kV 线路直线塔不均匀覆冰不平衡张力百分数算例

| 冰区 (mm) | 覆冰率 | 计算档距 (m) | 导线 | 地线(1) (双联串) | 地线(2) (单联串) |
|------------|--------|-------------|------|----------------|----------------|
| 50 | 20/100 | 250 | 5.4 | 34.1 | 42.0 |
| | | 300 | 10.8 | 49.1 | 53.4 |
| | | 350 | 19.4 | 56.4 | 59.0 |
| 40 | 20/100 | 250 | 3.3 | 17.7 | 25.1 |
| | | 300 | 6.6 | 34.9 | 41.6 |
| | | 350 | 11.6 | 46.6 | 50.7 |
| 30 | 20/100 | 300 | 2.7 | 9.6 | 13.4 |
| | | 350 | 4.9 | 18.1 | 24.2 |
| | | 400 | 7.9 | 28.7 | 34.4 |
| 20 | 20/100 | 350 | 4.1 | 23.4 | 25.9 |
| | | 400 | 6.6 | 31.7 | 33.7 |
| | | 450 | 9.9 | 37.4 | 38.9 |

30、40 mm 冰区: $4 \times A3/S1A-465/60$, $N=2.895$, 串长 6.217 m, 串重 6 111N;

50 mm 冰区: $4 \times A3/S3A-465/60$, $N=2.65$, 串长 6.342 m, 串重 8 114N。

地线:

(1)20 mm 冰区: $GJ-100$ (1 270 MPa), $N=3.2$, 双联串长 0.47 m, 串重 180 N;

30、40 mm 冰区: $GJ-120$ (1570 MPa), $N=2.65$,

双联串长 0.57 m, 串重 234 N;

50 mm 冰区: $GJ-150$ (1570 MPa), $N=2.7$, 双联串长 0.57 m, 串重 234 N。

(2)单联串长 0.4 m, 串重 100 N, 其余同(1)。

影响直线塔不均匀覆冰不平衡张力计算结果的因素主要有:各挡覆冰厚度取值、耐张段的档数、档距、高差、绝缘子金具串长度、架线张力等,工程设计时需根据规程要求结合工程具体条件进行计算。

4 结论

(1)所述的重冰区输电线路在覆冰断线工况和不均匀覆冰工况下的纵向张力计算方法,适合于用计算机进行数值求解。经编制程序进行计算,并与有关资料对照,表明计算方法是可靠的。

(2)影响直线塔覆冰断线张力及不均匀覆冰不平衡张力计算结果的因素很多,工程设计时应根据规程要求结合工程具体条件进行计算。

(3)以不均匀覆冰工况下的纵向张力及档距变化计算结果为基础,可以计算不均匀脱冰时导地线之间静态及动态接近距离,为杆塔地线支架高度设计取值提供依据。所述算法同样适用于轻冰区线路的相关计算。
(收稿日期:2008-03-05)

高压输电线路绕击跳闸率的计算

吴玉麟¹, 高建勇²

(1. 成都电业局城网管理所, 四川 成都 610041; 2. 成都电业局自动化通信管理所, 四川 成都 610021)

摘要:基于电气几何模型提出了利用暴露距离计算线路绕击跳闸率, 并与规程法进行了对比结果表明采用该方法计算绕击跳闸率更准确。并且研究了输电线路避雷线和导线的布置, 以及地面倾角等对绕击率的影响。通过实例表明了绕击率的变化趋势, 这为线路的设计提供了重要的依据。

关键词:输电线路, 绕击跳闸率, 电气几何模型, 暴露距离

Abstract: Uncovered distance is adopted to calculate the shielding failure flashover rate of the transmission line based on EMG. Compared with the regulation method, it is more accurate. The parameters consist of phase wire, shield wire and the ground angle. The results show that the shielding failure flashover rate is a function of shielding angle, stroke lightning amplitude and ground angle. It will help the designers in making the correct judgment.

Key words: transmission line; shielding failure flashover rate; EGM; uncovered distance

中图分类号: TM726 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)03-0016-03

中国目前 110~220 kV 输电线路跳闸故障仍以雷击闪络为主, 绕击跳闸是主要原因^[1,2]。输电线路运行经验表明雷击跳闸主要发生在山区线路上, 最大可达平原的 10 倍以上, 远大于规程计算^[3]。因此, 合理评价输电线路的绕击跳闸率非常重要。目前, 对于绕击跳闸率的计算依据的是规程法和电气几何模型。前者因为传统的线路绕击率计算未考虑雷电流大小和地面倾角对屏蔽效果的影响, 而是按经验和小电流试验模型而提出综合平均法, 常不能反映线路的具体特性, 无法解释屏蔽失效的问题和绕击率过大的原因。而后者较细致的考虑了雷击线路的过程, 引入绕击率与雷电流幅值相关的观点^[4,5], 可以充分考虑线路结构和雷电流参数对绕击率的影响从而得到和实际运行情况相吻合的结果并通过对杆塔参数的合理调整将输电线路绕击率降至可接受的水平。

目前国内外对电气几何模型作了许多的改进, 利用暴露距离对绕击跳闸率进行计算, 分析了保护角、杆塔高度以及地形因素对绕击的影响。

1 高压输电线路雷电绕击性能分析

1.1 电气几何模型

电气几何模型(EGM)是将雷电流与线路结构联系起来, 其原理为^[6]:

1) 雷电先导到达被击物体临界击距前是不确定的, 到达哪一物体的击距内即向其放电。

2) 击距是雷电流的函数, 大小与雷电流幅值相关。

3) 不考虑雷击物体的形状效应和其它因数的影响, 假定对地面和导线击距相等。

1.2 雷电绕击性能计算

利用电气几何模型计算雷电绕击跳闸率, 首先应确定以下参数:

1.2.1 击距概率密度 $f(r)$

当对地闪络的雷电流幅值分布已知时, 即可由雷电流幅值的分布导出击距的分布; 当击距函数采用式(1), 雷电流幅值对数概率分布为式(2)时^[7], 导出的击距的概率密度为:

$$r_s = 8I^{0.65} \tag{1}$$

$$\lg P = -\frac{I}{88} \tag{2}$$

$$F(r_s) = 1 - 10^{-((\frac{r_s}{8})^{1/0.65})/88} \tag{3}$$

由 $f(r) = F'(r)$ 得:

$$f(r) = 0.001 \times 10^{-\frac{1.54}{2 \times 157} \times r^{0.54}} \tag{4}$$

1.2.2 最小击距 r_{\min}

由击距公式可知雷电流幅值与击距成正比, 只有当雷电流大于线路绕击耐雷水平时, 才会发生闪络, 此时与 I 对应称为 r_{\min} 。

当击距小于最小击距 r_{\min} 时, 线路不会引起绝缘闪络。计算方法如下:

$$I_A = 2U_{50\%}/Z \tag{5}$$

通过式(1)得:

$$r_{\min} = 8(1U_{50\%}/Z)^{0.65} \quad (6)$$

1.2.3 最大击距 r_{\max}

这主要由杆塔几何尺寸及地形决定的一个击距。当击距大于 r_{\max} 的雷击时,将被避雷线完全屏蔽掉。经几何关系的推导可得^[8]:

$$r_{\max} = \frac{h_g + h_c + 2\sqrt{h_g h_c} \sin \alpha}{2 \cos^2 \alpha} \quad (7)$$

在地面倾角 $\theta_g \neq 0$ 的情况下,最大击距为:

$$r_{\max} = \frac{(h_g + h_c) \cos \theta_g + \sqrt{(h_g + h_c)^2 \cos^2 \theta_g - \frac{2 \cos(\alpha + \theta_g)}{\cos \alpha} (h_g - h_c)^2 \sin(\alpha + \theta_g)}}{2 \cos^2(\alpha + \theta_g)} \quad (8)$$

本文取 α 以基准轴反时针方向通过导线为“+”,反之“-”; θ_g 以杆塔处水平地面为基准,向下倾斜 θ_g 为“+”,反之“-”。

1.2.4 绕击闪络概率 P_α

依据此物理模型,绕击闪络概率的计算公式为:

$$P_\alpha = 2 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Z_s \cdot f(r) dr \quad (9)$$

此时在地面倾角 θ_g 的情况下,

$$Z_s = x_B - x_A = \frac{d}{2} \cdot \sin(\theta + \theta_g) - \cos(\theta + \theta_g) \sqrt{\frac{2-d}{r_s} - \frac{d}{4}} + \sqrt{\frac{2}{r_s} - ((\sqrt{\frac{2}{r_s} - h_c})^2) \cdot \sin(\theta_g) + (r_s - h_g) \cdot \cos(\theta_g) + d \cos(\theta) \cos(\theta_g)} \quad (10)$$

1.2.5 雷电绕击跳闸率 n

计算年落雷次数,采用国际大电网会议推荐的公式计算,国际大电网会议推荐的地面落雷密度的计算公式如下:

$$N_g = 0.023 T_d^{1.3} \quad (11)$$

则线路长度为 100 km 的年落雷次数为:

$$N = N_g / 10 \quad (12)$$

根据暴露距离的物理概念,可以得到整段线路绕击跳闸率为:

$$n = N \cdot P_\alpha \cdot \eta \quad (13)$$

2 计算实例

2.1 220 kV 输电线路参数对绕击率的影响

线路运行经验表明,雷电绕过避雷线直击导线的概率与避雷线对导线的保护角、杆塔高度及线路所经过地区的地形因素相关。本文分别采用规程法和暴露距离对线路绕击跳闸率进行了计算。所选线路为

四川某供电局管辖的 220 kV 输电线路,线路参数如下:杆塔类型 SZ2,杆塔高度 44.5 m,导线高度 25.2 m,平均档距 358 m,导线型号为 LGJ-400,避雷线型号 GJ-50,导线弧垂为 3.6 m,避雷线弧垂为 0.3 m,导线挂线点对塔中心水平距离 10.8 m,避雷线挂线点对塔中心水平距离 3.8,避雷线保护角为 18° ,所处地形为山地,地面倾角为 30° 。绝缘子串长度为 1.78 m。

由表 1 可见,由于采用暴露距离来计算绕击跳闸率充分考虑了地形,杆塔参数对绕击率的影响,这点规程法不能定量描述,因此,采用两种方法算出的跳闸率不同,基于电气几何模型计算结果大于规程法所的结果更加准确。

表 1 计算结果比较

| 方法 | 绕击闪络跳闸率(1/100km/a) |
|-----------|--------------------|
| 规程法 | 0.599 1 |
| 暴露距离(EGM) | 1.06 |

2.1.1 保护角对绕击率的影响

为了计算绕击率随保护角的变化趋势,保持导线的位置,避雷线距杆塔中心的距离 x 每次变化 1 m 来改变保护角。通过上述仿真计算得出以下曲线,如图 1。

避雷线保护角与绕击跳闸率的关系

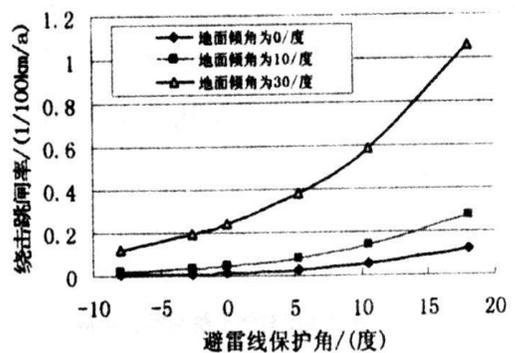


图 1 在不同地面倾角下保护角与绕击跳闸率的关系

从图 1 中可以看出,当地面倾角为 0° ,保护角为 -5° 时绕击跳闸率在 0.0102(1/100km/a),随着保护角增大到 10° 以后,绕击跳闸率明显增加。在保护角 -5° 的情况下,地面倾角增大到 30° ,绕击跳闸率变为 0.12(1/100 km/a),当保护角为 18° 时,绕击跳闸率达到了 1.06(1/100 km/a),明显可以看出山区的绕击

跳闸率大于平原地区。

2.1.2 地面倾角的影响

由于规程法中,不能有效定量地评估出地形对绕击跳闸率的影响。因此,本文采用电气几何法,通过地面倾角来描述地形与地貌,从而定量的研究地形对绕击跳闸率的影响。如图2所示。

地面倾角与绕击跳闸率的关系

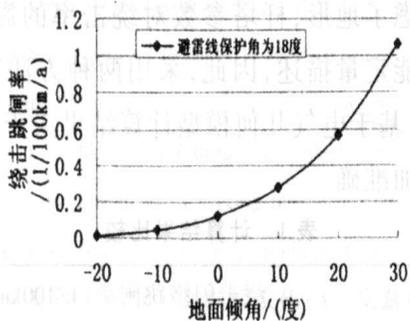


图2 绕击跳闸率随着地面倾角的变化

从曲线可以看出当地面倾角较小时(5°)时,山坡地形对输电线路的绕击跳闸率影响不大;当地面倾角超过 10° 时,山坡地形对绕击跳闸率将有较大的影响,而且随着地面倾角的增加到 20° ,线路的绕击跳闸率很高,因此,线路经过山坡地段时,应加强雷电绕击保护,降低其绕击跳闸率。

2.1.3 导线高度对绕击跳闸率的影响

SZ2型搭避雷线对地平均高度为44.3 m,边相导线对地平均高度为22.75 m,保持避雷线对地高度不变,改变导线对地高度,每次变化5 m,计算线路的绕击跳闸率,计算结果如图3所示。

导线高度与绕击跳闸率的关系

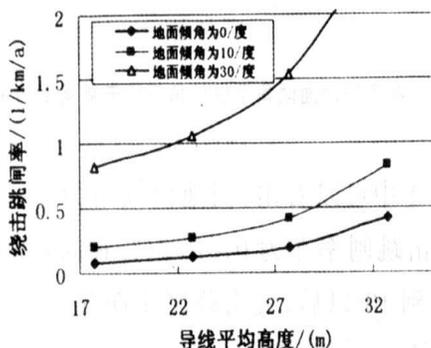


图3 不同地形下绕击跳闸率与导线高度的关系

从图3可以看出,在地面倾角一定的情况下,随着导线高度的增加,绕击跳闸率也呈正比的增大。当地面倾角为 0° 时,导线高度为17 m,绕击跳闸率为0.085(1/100 km/a),随着地面倾角增大为 30° 时,导线高度为22.75 m,绕击跳闸率达到了1.06(1/100 km/a)。

3 结论

利用暴露距离对绕击跳闸率进行计算并与规程法进行了对比,发现由于前者充分考虑了地形,杆塔参数对绕击跳闸率的影响,因此,计算结果比后者大,更加准确。同时,结合实例,计算仿真分析了避雷线保护角、杆塔所在地面倾角及导线高度的变化将引起绕击跳闸率的变化。当避雷线保护角、地面倾角增大,导线高度升高,绕击跳闸率将增大;反之则减小。为了保证较低的绕击跳闸率,通过本文的仿真计算,避雷线保护角采用 -5° ,绕击跳闸率从1.06(1/100km/a)降为0.12(1/100km/a)。

参考文献

- [1] 维列夏金,吴维韩.俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验[J].高电压技术,1998,24(2):76-79.
- [2] Anderson J. G.. 345 kV及以上超高压输电线路[M].北京:电力工业出版社,1981.
- [3] 张纬发等.电力系统过电压与绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [4] Brown G. W., Whitehead E. R.. Field and analytical studies of transmission line shielding, Part II [J]. IEEE Trans. PAS, 1969,88(5):617-625.
- [5] Eriksson A. J.. An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis [J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 1987,2(3): 859-870.
- [6] 王晓彤,施围等.改进电气几何模型计算输电线路绕击率[J].高电压技术,1998,24(1):85-87.
- [7] DL/T 620/1997A.交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [8] 李如虎.西南线23号塔雷害事故的分析[J].高电压技术,1985(3):67.
- [9] 司马文霞,陈宁等.高杆塔大跨越输电线路防雷保护[J].重庆大学学报,2002,25(9):25-28.
- [10] 赵智大.高电压技术[M].浙江大学:中国电力出版社,1998.

(收稿日期:2008-02-10)

基于改进双端行波定位法的线路雷击点定位

郭涌涛, 代颖, 邓武军

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644002)

摘要: 现有雷电定位系统探测到的电磁波存在的波形传播延时和地形传播延时, 将使定位精度受到影响。考虑到输电线遭受雷击时将产生向两端变电站母线运动的行波, 结合现有的行波测距理论, 提出一种改进的双端行波定位法对雷击点进行定位。通过在线路两端母线处采集雷击入射行波、母线反射行波或者雷击点的反射行波信号, 利用小波变换提取行波波头特征点, 精确确定行波到达时刻, 进而确定一个只包含距离和时间的函数求解出雷击点的位置, 实现不受波速影响的雷击点定位。该方法不需要事先确定行波波速, 和传统行波定位法相比, 消除了波速的不确定性带来的定位误差。大量 PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 该方法能够有效地对雷击点进行定位, 定位精度高。

关键词: 输电线路; 雷击点定位; 双端法行波; 波速

Abstract: The accuracy of lightning strike location system is affected by the delay of the detected electromagnetic wave due to the waveform and the terrain. Considering that lightning strike will generate traveling wave toward both sides of the transmission line, an improved double terminal traveling wave location method is presented for the location of lightning strike. Using wavelet transform to extract the characteristics of the wave front at both sides of transmission line, the arrival time of the traveling wave from the point of strike, echo from the point of strike or echo from the opposite busbar can be measured. Then a function involving time and distance can be made and the point of strike is obtained. Compared with the traditional traveling wave method, this new method doesn't need to determine the traveling wave velocity, so the measurement error caused by the uncertainty of the wave velocity can be avoid. A large amount of PSCAD/EMTDC simulation results show that this new method is efficient and accurate in locating the lightning strike.

Key words: transmission line; lightning strike location; double terminal method of traveling wave; wave velocity

中图分类号: TM773 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0019-05

电力系统中, 为了能快速有效地对雷击保护设备进行修复, 及时恢复供电, 对雷击点进行精确定位显得十分重要。由于雷击难以预测, 应用传统的方法搜集与掌握雷电分布、雷电流概率等基本参数具有明显的局限性不能实现雷击点的精确定位; 目前普遍采用雷电定位系统进行雷击点的定位取得了比较好的效果^[1-3]。但该系统以探测站测定放电辐射的电磁波为基础, 受波形传播延时误差和地形传播延时误差影响, 据相关文献介绍, 测距误差在 1~3 km, 定位误差存在明显的地区差异。同时往往在雷电时, 1 min 内可接收到多个雷击, 较难判断真正引起线路故障是哪一个雷^[4]。

行波理论应用于输电线路故障测距国内外已做了大量研究, 准确捕获行波波头到达时刻是关键。小波变换具备频域和时域局部性, 适合于检测行波波头等突变信号。大量文献表明, 基于小波变换的行波测距法测距精度高, 可靠性好^[6-12]。但现有行波测距法在获取波头时间后, 必须结合波速才能实现故障测

距, 在以往的研究中, 波速被认为接近光速或是根据已知线路参数按照公式 $v = 1/\sqrt{LC}$ (L, C 分别为单位长度导线电感和电容值) 事先计算线路波速进行定位计算。而行波波速受到地理气象条件、温度和线路参数变化等因素影响, 是不确定的值, 选取固定波速的方法增大了定位误差。

这里提出利用行波测距理论结合小波变换来对输电线路雷击点进行定位, 同时考虑到波速的不确定性, 不宜将波速取为一个定值进行定位计算, 提出不受波速影响的改进双端行波定位法。

1 小波变换与奇异性检测原理

设 $\Psi(t) \in L^2 R$ (平方可积函数空间), 若其傅立叶变换 $\bar{\Psi}(\omega)$ 满足容许性条件:

$$C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\bar{\Psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 $\Psi(t)$ 为母小波函数。

将任意 $L^2(R)$ 空间中的平方可积函数 $f(t)$ 在母

小波下进行展开,称这种展开为函数 $f(t)$ 的连续小波变换,其表达式为:

$$WT_f(\alpha, \tau) = \langle f(t), \Psi_{\alpha, \tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{\frac{t-\tau}{\alpha}} f(t) \Psi^* dt \quad (2)$$

式中: α 是尺度因子, $\alpha > 0$; τ 是平移因子;

若 a, b 只取离散值 $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m, a > 1, b_0 > 1, m, n$ 取任意整数,就得到 $f(t)$ 的离散小波变换。

在运用小波变换进行时频分析时,多分辨率分析理论是常用的方法。所谓多分辨率分析是指在满足采样定理的前提下利用一对镜像滤波器 $\{h_n\}, \{g_n\}$ 对采样信号进行二进频带划分,将信号分解为细节部分 W_1 和大尺度逼近部分 V_1 ,然后将大尺度逼近部分 V_1 进一步分解,如此重复就可以得到任意尺度上的逼近部分和细节部分,具体算法如下:

$$c_{j+1, k} = \sum_n g_n(n-2k) c_{j, n} \quad (3)$$

$$d_{j+1, k} = \sum_n h_n(n-2k) c_{j, n} \quad (4)$$

式中 j 的不断变化,可得到不同尺度上的逼近系数 c 和小波系数 d ,尺度越高频带越低。可通过观察该信号在不同频带上的表现,实现特征提取。

若函数在某处间断或某阶导数不连续,则称函数在此处有奇异性。小波变换所具有的“变焦”性,可以对函数的奇异性进行更为有效的分析。当选用平滑函数的一阶导数作为小波函数时,信号的尖锐变化点在小波变换下将出现极值,称为模极大值。信号的小波变换的模极大值与信号的突变点一一对应。电力系统输电线在遭受雷击后产生的暂态行波到达检测点时,表现出明显的奇异性,其中包含了雷击点的信息。利用小波变换的模极大值能精确检测出这些信息,实现雷击点定位。

2 雷击点定位方法

2.1 小波基函数的选取

小波种类繁多,主要包括正交小波、半正交小波、双正交小波等^[13]。不同的小波基有不同的用途,在分析同一个问题的结果上也有差别。在突变点的检测上,小波函数的选取至关重要。一般认为时频振荡少,支撑集短的小波更为适合作奇异信号的检测。同时要想小波变换不改变突变点的位置需要用具有线

性相位的对称小波,否则点位会发生平移,造成定位误差。大多数样条小波和双正交小波都是对称的,国内文献多用三次 B 样条小波进行故障测距。文献^[13]提出,在滤波器阶数相同的情况下,双正交小波检测突变的能力要优于样条小波。综合分析以上几点,本文采用 Biorthogonal 双正交小波进行分析。

2.2 小波变换尺度的选取

小波变换尺度的选取对突变信号的准确检测也十分重要。小波变换实际上是把信号按不同的频带进行逐层分解,在不同尺度下分解出不同频带的信号。理论上讲,尺度越小,所包含的频率成分越高,小波系数的模极大值与突变点的对应就越准确,大量利用小波变换进行信号突变检测的文献也是利用最小尺度下的小波变换进行分析。但是,雷击时产生的行波信号包含了从低频到数百 kHz 的频率成分,不同频率分量具有不同的传播速度和衰减。行波到达时间由行波中被分析频带信号强度最大的位置确定,而行波的传播速度由被分析频带的中心频率所确定,行波中的各频率分量的衰减与雷击点位置有关,主频分量范围反比于雷击点位置。距离越近,行波高频分量衰减减少,相应主频分量较高;距离越远,行波高频分量衰减大,主频分量降低^[9,10]。所以在高频分量衰减大的情况下,较大尺度的小波模极大值能更准确对应突变时刻。

2.3 新方法实现

前文已述,输电线路气象条件、温度和线路参数的变化将导致行波波速的不确定性,按事先确定的行波波速进行计算会给定位带来误差。本文提出不受波速影响的改进双端行波测距法,结合小波尺度的选取,提出两种实现方法。

设遭受雷击的线路全长为 L, M 和 N 分别表示线路两端母线的位置,雷击点 f 距离近端母线为 l, β_1, β_2 分别表示线路两端的反射系数, β_0, α_0 为雷击点的反射和折射系数,如图 1 所示。

图 1 显示了遭受雷击的线路上行波的传播和折反射情况。本方法在定位计算中需要测定的是雷击入射行波波头和第一个反射行波波头分别到达两端母线的时刻,即只取两端小波变换的前两个模极大值点。显然,小波变换的第一个模极大值点对应的是入射波到达时刻,通过比较两端入射波到达的先后可判定它们离雷击点的远近,进而确定第二个模极大值对应的反射行波的性质,即是雷击点反射回的行波还是

对端母线反射回的行波。离雷击点近的母线检测到的第一个反射波是雷击点反射行波；离雷击点远的母线检测到的是对端母线反射行波。为方便描述，这里统一规定 t_1, t_1' 分别为离雷击点近的一端测得的入射波达时刻和雷击点反射波到达时刻， t_2, t_2' 分别为离雷击点远的一端入射波达时刻和对端母线反射波达时刻。

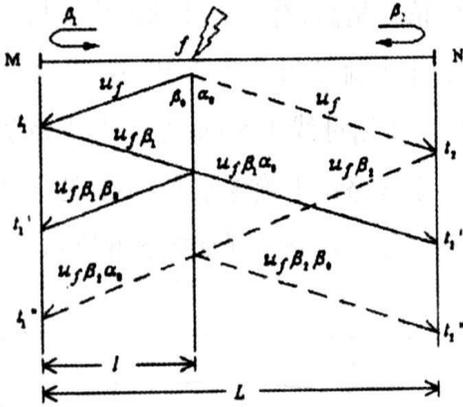


图1 行波网格图

方案一：选择最小尺度的小波变换作分析，其特点是不需要测定雷击点反射波到达近端母线的时刻。首先比较两端的波达时刻，确定 t_1, t_2 ，进而确定 t_2' 。设行波波速为 v ，可列写方程如下：

$$(t_2' - t_2)v = 2l \quad (5)$$

$$(t_2 - t_1)v = L - 2l \quad (6)$$

联立求解方程组，可得：

$$l = \frac{(t_2' - t_2)L}{2(t_2' - t_1)} \quad (7)$$

方案二：考虑到行波主频分量的衰减问题，若雷击行波到达线路两端母线的距离相差较大时，采用的方法是：距离雷击点近端母线采用小尺度下的小波变换作为判别波达时刻依据，选择小尺度下对应的波速 v_1 ；距离远端母线采用较大尺度小波变换作为判别波达时刻依据，选择该尺度下对应的波速 v_2 。还是首先比较两端波达时刻，确定 t_1, t_2 ，进而确定 t_1', t_2' ，列写方程如下：

$$(t_1' - t_1)v_1 = 2l \quad (8)$$

$$(t_2' - t_2)v_2 = 2l \quad (9)$$

$$\frac{L-l}{v_2} - \frac{L}{v_1} = t_2 - t_1 \quad (10)$$

联立求解方程组，得：

$$l = \frac{(t_2' - t_2)L}{t_2' + t_2 + t_1' - 3t_1} \quad (11)$$

式(7)、(11)中都不含波速，从而实现不受波速影响的雷击点定位。

特别需要指出的是，雷击造成绝缘子闪络引起线路故障的情况下，利用方案一和方案二均能较好的进行定位，理论上方案二的定位精度相对要高一些。但在许多情况下，雷击过电压低于线路绝缘水平不会引起线路故障，在雷击点不会出现反射波，利用方案二无法对这些雷击进行测量。方案一由于没有利用雷击点的反射波到达时刻参与计算，所以无论雷击引起线路故障与否都可用该方案进行定位。

3 仿真实验及结果分析

3.1 仿真模型建立

仿真实验在电力系统暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中进行，仿真输电线路如图2所示。

仿真线路为全长 300 km，电压等级为 500 kV 的三相有损传输线，输电线采用频率相关模型(Frequency Dependent Model)，EMTDC 的采样频率为 1 MHz。

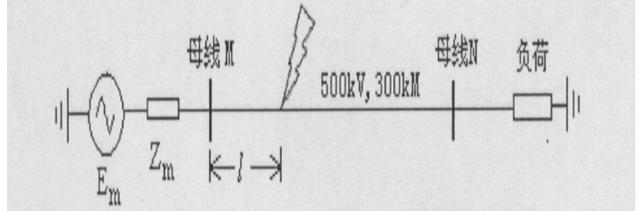


图2 500 kV 仿真系统线路模型

线路参数如下：

$$H = 34 \text{ m}, h_g = 27.25 \text{ m}, h_c = 17.62 \text{ m}$$

$$r_c = 20.35 \text{ mm}, r_g = 5.5 \text{ mm}$$

$$R_c = 0.0409 \text{ } \Omega/\text{km}, R_g = 2.86 \text{ } \Omega/\text{km}$$

其中： H 为杆塔高度； h_c, h_g 分别为导线和避雷线的平均高度； r_c, r_g 分别为导线和避雷线半径； R_c, R_g 为导线和避雷线的直流电阻。

线路两端母线处均装设测量元件测量仿真波形，测得的波形数据利用 Matlab 编程实现多尺度的小波分析。

3.2 仿真结果分析

算例1：雷电流波形为 $1.2/50 \mu\text{s}$ ，幅值为 175 kA，负极性，在距 M 端母线 85 km 处发生雷击杆塔塔顶事故。由于雷电流幅值大于线路反击绝缘水平，故造成

绝缘子闪络。检测情况如图3、4所示。

根据图中的小波变换结果即可进行雷击点的定位。这里分别采用前面提到的两种方案进行计算。

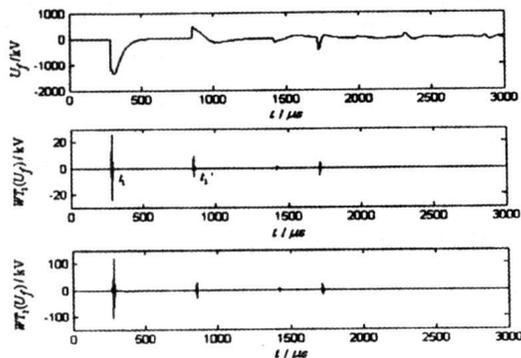


图3 M端母线小波分析结果

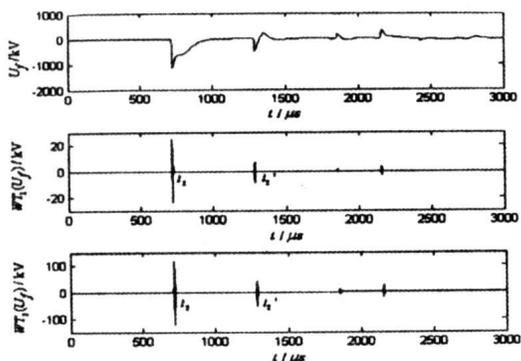


图4 N端母线小波分析结果

第一种方案:只考虑小波变换的第一层分解。从两端小波变换的第一个模极大值出现的时刻的大小可以判断出M端母线比N端母线距离雷击点近,结合两端小波变换的第二个模极大值可以确定参数如下:

$$t_1=285 \mu\text{s}, t_2=718 \mu\text{s}, t_2'=1285 \mu\text{s}$$

将时间和距离参数代入式(7)可得:

$$l=85.05 \text{ km}, \text{即雷击点离M端距离为} 85.05 \text{ km}.$$

绝对误差 $\Delta_x=85.05-85=0.05 \text{ km}$, 定位误差 $\epsilon=0.05/300 \times 100\%=0.017\%$ 。

第二种方案:雷击点与两端母线的距离相差较大,考虑高频分量衰减的影响。M端母线距离雷击点更近,所以M端选用第一层小波变换确定时间参数,N端选用第二层小波变换确定时间参数。参数确定

如下:

$$t_1=285 \mu\text{s}, t_1'=851 \mu\text{s}$$

$$t_2=719 \mu\text{s}, t_2'=1286 \mu\text{s}$$

将参数代入式(11)得:

$$l=85.007 \text{ km}. \text{绝对误差} \Delta_x=85.007-85=0.007 \text{ km}, \text{定位误差} \epsilon=0.007/300 \times 100\%=0.002\%.$$

从以上分析结果可以看出,对于本例,所采用的两种方法均有较好的定位精度,考虑频率衰减的第二种方案定位精度稍高,符合前文的理论分析。

算例2:雷电流波形为1.2/50 μs ,幅值为15 kA,负极性,在距M端母线195 km处发生线路绕击。雷电流幅值小于线路绕击绝缘水平,不会造成绝缘子闪络引起线路故障。检测情况如图5、6所示。

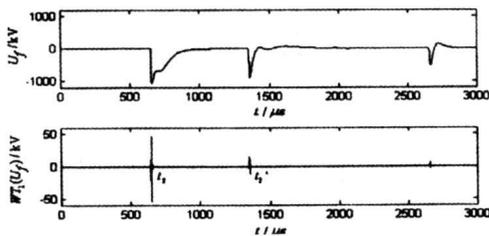


图5 M端母线小波分析结果

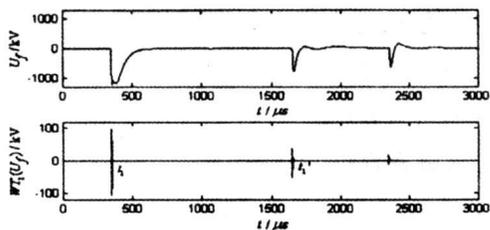


图6 N端母线小波分析结果

由于没有引起线路故障,雷击点不会有反射波出现,第二种方案不适用,采用第一种方案进行定位。此时有:

$$t_1=351 \mu\text{s}, t_2=652 \mu\text{s}, t_2'=1352 \mu\text{s}$$

利用公式(7)求得:

$$l=104.895 \text{ km}, \text{即雷击点离M端的距离为} 195.105 \text{ km}. \text{绝对误差} \Delta_x=195.105-195=0.105 \text{ km}, \text{定位误差} \epsilon=0.105/300 \times 100\%=0.035\%.$$

可见,对于没有引起线路故障的雷击,利用本文提出的第一种定位方案也能实现准确定位。

类似地,对不同长度输电线在不同位置遭受雷击

进行了多次仿真实验,采用本文提出的改进双端行波定位法的第一种方案与传统的不考虑波速变化影响双端定位法(取 $v = 296 \text{ m}/\mu\text{s}$)进行定位精度比较,结果见表1。

表1 雷击定位结果

| 线路长度(km) | 雷击点与M端母线距离(km) | 改进双端法定位结果 | | 传统双端法定位结果 | |
|----------|----------------|-----------|---------|-----------|---------|
| | | 计算距离(km) | 定位误差(%) | 计算距离(km) | 定位误差(%) |
| 200 | 25 | 24.850 | 0.075 | 25.704 | 0.352 |
| | 93 | 92.954 | 0.023 | 93.044 | 0.022 |
| | 141 | 141.018 | 0.009 | 140.552 | 0.276 |
| 400 | 76 | 76.048 | 0.012 | 77.456 | 0.364 |
| | 138 | 137.931 | 0.017 | 138.728 | 0.182 |
| | 243 | 242.879 | 0.030 | 242.328 | 0.168 |
| 500 | 52 | 52.096 | 0.019 | 54.344 | 0.469 |
| | 203 | 202.938 | 0.012 | 203.528 | 0.106 |
| | 399 | 398.981 | 0.004 | 397.112 | 0.378 |

可见,选取固定波速的传统双端定位法定位误差较大,采用本文提出的改进方法对定位精度有明显的提高。

4 结论

1)考虑到现有雷电定位系统的不足,利用输电线路行波理论结合小波变换,对输电线路雷击点进行定位。分析了传统行波定位法在波速的确定上存在不足,提出不受波速影响的改进双端行波定位方法。仿真试验结果表明,利用行波法能够准确地对输电线路上的雷击点进行定位,改进方法不受线路参数、气象、温度等因素的变化造成的波速不确定性的影响,定位精度明显优于传统定位法。

2)提出的两种新方法的实现方案都能精确计算出雷击点的位置,方案二考虑了行波高频分量在传输过程中的衰减,小波变换尺度的选取不同于方案一,定位精度相对较高,但由于该方案需要利用雷击点的反射行波到达时刻参与计算,不适用于未引起线路故障的雷击定位。方案一则无论雷击引起线路故障与否均适用。

3)行波理论用于输电线路雷击点的定位是新

的探讨和尝试,它可代替现有雷电定位系统的部分功能,也可用于监视线路雷电活动,为相关部门提供分析数据。

参考文献

- [1] 周延龄,黎利佳,苏贻泰.雷电定位系统的开发与应用[J].中国电力,1999,32(7):31-35.
- [2] 吴璞三.雷电定向定位和时差定位系统[J].高电压技术,1995,21(3):3-7.
- [3] 赵文光,陈家宏,张勤,王光财.新的雷电综合定位系统的定位计算[J].高电压技术,1999,25(4):66-68.
- [4] 樊灵孟,李志峰,何宏明,杨楚明.雷电定位系统定位误差分析[J].高电压技术,2004,30(7):61-63.
- [5] 全玉生,邱庆春,邵宇,等.基于双端不同步数据故障定位中的中位修正法[J].高电压技术,2005,31(9):1-4.
- [6] Dipankar C, N K Kishore, Avinash K S, et al. A wavelet multiresolution-based analysis for location of the point of strike of a lightning overvoltage on a transmission line [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1727-1733.
- [7] Harry L, Abdul M M. GPS traveling wave fault locator systems: Investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1214-1223.
- [8] Robertson D C, Camps O I, Mayer J S, et al. Wavelets and electromagnetic power system transients [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 1050-1058.
- [9] 覃剑.小波变换应用于输电线路行波故障测距的研究[D].北京:中国电力科学研究院,1998.
- [10] 覃剑,陈祥训,郑健超,等.利用小波变换的双端行波测距新方法[J].中国电机工程学报,2000,20(8):6-10.
- [11] 范春菊,张兆宁,郁惟镛.小波方法在超高压输电线路故障测距中的应用[J].电网技术,2003,27(8):50-53.
- [12] 林湘宁,刘沛,刘世明,等.基于故障电流暂态分量的测距研究[J].电力系统自动化,2002,26(2):45-51.
- [13] 程正兴.小波分析算法与应用[M].西安:西安交通大学出版社,1998.
- [14] DL/T 620-1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S],1997.

作者简介:

郭涌涛(1974-),男,本科毕业,工程师,长期从事线路运行与管理工作。

代颖(1969-),男,本科毕业,工程师,长期从事电力系统生产运行管理工作。

邓武军(1967-),男,硕士学位,高级工程师,长期从事电力系统研究和运行、管理。(收稿日期:2008-03-10)

输电线路在线增容系统在四川电网的应用

罗锦¹, 杨娟²

(1. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072; 2. 成都电业局, 四川 成都 610017)

摘要: 讲述了输电线路在线监测增容系统在四川电网的应用, 通过测温球得到线路的实时数据, 后台服务器分析计算出最大限额容量和对应的限额时间, 指导调度部门动态调整输电线路热稳定负载, 深度挖掘输电线路的输送潜能, 从而达到减少输电设备的投资的目的。

关键词: 在线监测增容系统; 测温球; 动态调整; 热稳定负载

Abstract: The application of on-line capacity-increasing system of transmission line to Sichuan power system is introduced. According to the real-time line parameters acquired by temperature-measuring ball, the maximum capacity and its corresponding time limitations are obtained. It is helpful for the dispatcher to adjust the thermostable load dynamically, thus the maximum transportation capacity can be approached and the facility investment can be reduced.

Key words: on-line monitoring of capacity-increasing system; temperature-measuring ball; dynamic adjustment; thermostable load

中图分类号: TM726 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0024-02

随着社会经济持续快速增长, 用电负荷增长迅速, 一些线路受到输送容量热稳定限额的制约, 远远不能满足电网实际的需要。受热稳定的限制, 提高输送容量会使导线过热, 引起导线弧垂过大, 对地间隙距离无法满足安全要求。近年来, 电网建设规模巨大, 输电线路的长度发展迅速。仅 2007 年就新建 110 kV 以上架空线路 78 条, 共计 2 357 km。截至 2007 年底, 四川省电力公司 110 kV 以上的架空输电线路共计 1 131 条, 全长 25 382 km, 却依然无法满足用电负荷的迅猛增长。所以, 如何监控管理好这些线路, 如何经济有效地利用好这些线路, 是摆在四川电网面前的一大难题。

在电力系统的实际运行中, 输电线路的运行环境温度直接影响了输电线路的负载能力。四川省内山川、河流众多, 地形复杂, 地区温度差异很大。1 月份为全年最冷月, 成都的温度为 0 °C 左右, 而西昌和攀枝花地区由于海拔高, 光照强, 温度可达到 20 °C。温度的差异, 决定了同型号的导线对应着不同的热稳定限额。目前, 线路热稳定是根据线路型号和基准单一的温度规定的, 基本上与线路实际运行温度没有挂钩, 造成线路输送能力的浪费, 特别是在用电紧张的状况下更为突出。不考虑区域温差和气温的变化, 制约了系统最大限度地发挥输电线路的负载能力。因此, 引入输电线路在线检测与计算分析工具, 计算输电线路的安全限额和安全时间, 能为调度运行提供方

便有效的分析手段。

1 在线增容系统介绍

输电线路在线监测增容系统由支持输电线路在线监测增容系统的计算机、数据网络、数据采集设备、通信设备和软件系统有机组合而成, 包括温度监测终端设备, 以及相关的数据网络、软件系统平台、通信链路等基础设施。

如何解决输电线路的实时数据测量和传输问题, 是该系统的核心技术。该系统通过数据在线采集, 有了输电线路的精确的实时数据, 如电流、导线温度、环境温度等, 就可以把这些数据输入线路模型软件, 得出系统的增容容量。

2 在线增容系统在省公司的应用

2007 年, 四川省电力公司生技部与科技部合作, 以四川电力试验院为主要实施单位, 开展了输电线路在线增容系统的科技项目研究。

2.1 设备安装工作

2007 年 8 月和 9 月, 四川电力试验研究院和乐山电业局一起配合, 在乐山电业局的两条 220 kV 线路棉朱一线和朱东一线上各安装了四个测温球, 进行输电线路在线增容系统试点建设, 其中, 棉朱一线长

162.332 km, 朱东一线长 37.972 km。之所以选择这两条线路,是因为这两条线路均属于老旧线路,且有大跨距档位,导线温度对弧垂的影响更加明显,便于试验研究,因此选择这两条线路作为试点研究,在线路上安装了测温球。

2007年11月,数据接收和处理服务器也在省公司安装完毕。服务器主要负责接收测温球数据,同时从省调度中心读取线路电流和功率,并将这些数据保存在数据库中。局域网内的用户客户端可以登陆访问服务器,查看并分析数据。

2.2 系统功能介绍

2.2.1 导线运行及环境参数监测

测温球安装在线路上,利用感应原理从导线上获取电源进行工作,可同时监测导线温度、日照强度和环境温度。可测量的温度范围为 $-60^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$,温度精确到 1°C ,读数保留到小数点后1位。测温球上安装有数据通讯卡,可以通过GPRS网络传送数据。

2.2.2 基本参数管理

对一些基本信息参数进行添加、设置、更改和查询,如:线路信息、监测装置信息、增容运行相关信息、用户权限等。

2.2.3 线路实时监测

用于线路实时监测的查询和管理。包括:导线实时状态,如:导线温度、电流、有功等信息;气象条件,如:环境温度、日照、风速等信息。

2.2.4 实时输送限额管理

1)正常运行:线路当前电流小于现行规定的电流限额。

2)增容正常运行:线路当前电流大于现行规定的电流限额,处于增容运行状态,计算出的安全时间大于60 min。

3)增容监控运行:线路当前电流大于现行规定的电流限额,处于增容运行状态,计算出的安全时间大于30 min,小于60 min。

4)增容危险运行:线路当前电流大于现行规定的电流限额,处于增容运行状态,计算出的安全时间小于30 min。

5)N-1状态:相关线路跳开,线路处于N-1运行状态时,计算出安全运行时间。

2.2.5 历史数据统计分析

1)对线路状态、通信状态等信息进行历史查询和

统计。

2)统计分析线路温度与电流限额之间关系。

2.3 系统运行状况

在整个系统安装结束并调试成功后,系统工作正常。安装在线路上的测温球每隔五分钟发送一次数据,主要包括导线温度、环境温度、日照强度。线路的其它数据,如线路传送的电流和功率等参数是由省调度中心提供的。表1是服务器接收到的一小段数据。

表1是2007年11月8日晚上8h前后的一段数据。从该表中可以看出棉朱一线当时负荷较轻,导线温度为 17°C ,略高于环境温度,系统计算出的“实时限额功率值”为780 MW,远远高于当时的实际功率值。调度员能够直观地看到线路尚有多少潜在的输送容量。

在系统加大输送负荷时,调度员通过该软件可以计算出整个加大负荷期间能够加大多少容量;在超额容量下,持续多久时间线路是安全的。可见,该系统在线路的设计规程和线路的运行规程不变的前提下,对于已经投入运行的线路,无需进行任何的改造工作,就可以达到提高线路输送容量(潮流)的目的。调度部门利用该软件来指导线路调度工作,最大限度地利用现有线路的通流能力,可以节省线路投资,收到良好的经济效益。

3 结束语

输电线路在线监测增容系统可支持220 kV和500 kV电压等级的输电线路,电网规模可以达到3000多条线路,完全可以满足四川省架空输电线路的要求。该系统在四川电网的投入运行将对四川电力系统生产运行的各个环节将产生比较深刻的影响,其应用的意义主要包括:

1)输电线路在线监测增容系统建立过程中,电网线路的生产运行模式从以计划为主导的模式逐步过渡到全网范围内以线路负荷为主导的模式。

2)输电线路在线监测增容系统作为这一生产运行模式的载体,采用先进的信息技术在线路、调度、生计等部门之间构建一个安全、可靠、畅通的信息交互平台;采用先进的监测技术可准确无误地实现电力输送、调配;采用先进的电网安全分析及控制技术确保电网在线路限额条件下的安全可靠运行。

3)各线路调度的生产运营通过输(下转第66页)

稳定运行提供了科学的依据,同时产生了极大的社会经济效益。

4.2 间接效益

过去主变压器一致实行周期检修,这种计划检修的盲目性必然存在检修过度或检修不及时弊病,检修过度带来财力、人力巨大浪费,降低了设备的使用率,同时,由于过度的检修,有可能对设备造成一定程度的损坏;而检修不及时又可能导致设备事故。采用在线监测措施可及时了解变压器的运行状态,根据设备的真实状态决定设备的检修,从而有效降低维修管理成本,延长变压器的寿命。

由于科学地指导了试验、检修工作,减少试验检修停电次数,增加了售电量及销售收入;并从一定程度上减少了工人作业的次数,从而降低了事故发生的机率,为安全生产作出了贡献。

参考文献

[1] GB/T 7252—2001. 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].

[2] 郭碧红,杨晓洪.我国电力设备在线监测技术的开发应用状况分析[J].电网技术,1999,23(8):65—68.
 [3] 杨光玉,吴佩琦.大型油浸式变压器油中溶解气体在线监测技术的应用和研究[J].广西电力,2002,(3):52—54.
 [4] 贾瑞君.高分子薄膜在变压器油中溶解气体在线监测中的应用[J].变压器,2001,38(10):37—40.
 [5] 李红雷.油浸电力设备在线色谱监测及诊断系统的研究[D].上海交通大学,2000.
 [6] 李红雷,李旭光,肖登明,陈亚珠.一种新型的变压器油色谱分离柱[J].变压器,2002,39(8):35—37.
 [7] 杨光玉,吴佩琦.大型油浸式变压器油中溶解气体在线监测技术的应用和研究[J].广西电力,2002,(3):52—54.
 [8] 中华人民共和国电力行业标准SD/187—1986.变压器油中溶解气体分析和判断导则,第五章 试验结果的判断[S].北京电力工业部,1987.
 [9] 尚丽平,曹铁泽,刘先勇,周方洁.变压器油中溶解气体在线色谱监测综述[J].变压器,2004(8).

(收稿日期:2008—03—17)

(上接第25页)

表1 服务器接收到的数据。

| 地区 | 线路名称 | 实时电流 | 实时功率(MW) | 导线温度(°C) | 环境温度(°C) | 日照强度(W/m ²) | 散热系数 | 实时限额(MW) | 运行状态 | 时 间 |
|----|------|-----------|----------|----------|----------|-------------------------|------|----------|------|-----------------|
| 四川 | 棉朱一线 | 250.292 6 | 94.47 | 18 | 17 | 7 | 593 | 787.54 | 安全运行 | 2007—11—8 20:31 |
| 四川 | 棉朱一线 | 274.693 9 | 103.68 | 17.7 | 17 | 7 | 952 | 787.54 | 安全运行 | 2007—11—8 20:26 |
| 四川 | 棉朱一线 | 293.391 6 | 110.52 | 17.4 | 16.7 | 7 | 1000 | 788.05 | 安全运行 | 2007—11—8 20:21 |
| 四川 | 棉朱一线 | 274.118 9 | 103.26 | 17.4 | 16.8 | 7 | 943 | 787.36 | 安全运行 | 2007—11—8 20:16 |
| 四川 | 棉朱一线 | 250.784 5 | 94.47 | 17.4 | 16.8 | 7 | 601 | 787.36 | 安全运行 | 2007—11—8 20:11 |
| 四川 | 棉朱一线 | 237.261 3 | 89.45 | 17.4 | 16.8 | 0 | 298 | 788.72 | 安全运行 | 2007—11—8 20:06 |
| 四川 | 棉朱一线 | 243.749 7 | 91.82 | 17.3 | 16.6 | 0 | 355 | 789.43 | 安全运行 | 2007—11—8 20:01 |
| 四川 | 棉朱一线 | 246.324 7 | 92.79 | 17.3 | 16.7 | 7 | 547 | 788.05 | 安全运行 | 2007—11—8 19:56 |
| 四川 | 棉朱一线 | 229.197 1 | 86.24 | 17.3 | 16.6 | 7 | 373 | 787.83 | 安全运行 | 2007—11—8 19:51 |
| 四川 | 棉朱一线 | 237.458 2 | 89.45 | 17.3 | 16.6 | 7 | 451 | 788.73 | 安全运行 | 2007—11—8 19:46 |
| 四川 | 棉朱一线 | 226.607 | 85.12 | 17.3 | 16.5 | 7 | 351 | 787.17 | 安全运行 | 2007—11—8 19:41 |
| 四川 | 棉朱一线 | 239.562 | 90.14 | 17.3 | 16.5 | 7 | 474 | 788.51 | 安全运行 | 2007—11—8 19:36 |
| 四川 | 棉朱一线 | 245.189 2 | 92.1 | 17.3 | 16.6 | 7 | 535 | 786.49 | 安全运行 | 2007—11—8 19:31 |
| 四川 | 棉朱一线 | 254.629 9 | 95.73 | 17.1 | 16.5 | 7 | 651 | 787.86 | 安全运行 | 2007—11—8 19:26 |
| 四川 | 棉朱一线 | 231.052 8 | 86.79 | 17 | 16.4 | 7 | 390 | 787.85 | 安全运行 | 2007—11—8 19:21 |
| 四川 | 棉朱一线 | 251.774 3 | 94.47 | 17 | 16.5 | 7 | 614 | 786.31 | 安全运行 | 2007—11—8 19:16 |
| 四川 | 棉朱一线 | 255.348 | 96 | 16.4 | 16 | 7 | 663 | 791.25 | 安全运行 | 2007—11—8 19:11 |
| 四川 | 棉朱一线 | 232.895 3 | 87.21 | 16.4 | 16.1 | 7 | 409 | 787.42 | 安全运行 | 2007—11—8 19:06 |
| 四川 | 棉朱一线 | 216.872 2 | 81.21 | 16.6 | 16.4 | 7 | 275 | 785.4 | 安全运行 | 2007—11—8 19:01 |
| 四川 | 棉朱一线 | 217.801 8 | 81.49 | 16.6 | 16.5 | 7 | 281 | 784.07 | 安全运行 | 2007—11—8 18:56 |
| 四川 | 棉朱一线 | 217.234 9 | 81.21 | 16.6 | 16.4 | 7 | 278 | 784.09 | 安全运行 | 2007—11—8 18:51 |

电线路在线监测增容系统紧密联系在一起,密切配合,协调有序运作,从而切实实现线路调度高效协调、

优化资源配置的功能。

(收稿日期:2008—02—10)

变压器绕组变形事故分析事例

付东丰¹, 李建明², 戴玉松¹

(1. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039; 2. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:近年来由有载分接开关引起的变压器故障呈现上升趋势, 就一起有载分接开关引发的变压器绕组变形事故加以分析, 希望能够减少类似故障的发生。

关键词: 变压器; 绕组变形; 有载分接开关

Abstract: The transformer accidents caused by the on-load tap-changer are arising in recent years. Therefore, a transformer winding deformation accident caused by the on-load tap-changer is analyzed in order to reduce the accident of the kind.

Key words: transformer; winding deformation; on-load tap-changer

中图分类号: TM403.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2008)03-0026-02

有载分接开关是变压器完成有载调压的核心部件, 并且也是变压器动作最频繁的部件之一。特别是在工矿变压器中, 有载分接开关动作更是频繁。在有载调压变压器中, 有载分接开关难免会出现故障, 其中有些是制造质量问题, 有些是运行维护不到位引起的故障。有关资料显示, 中国从 80 年代初期开始使用有载变压器, 由于其在电网中发挥的作用逐年增大, 有载调压开关的事故占变压器事故的比例逐年升高, 由分接开关故障引起的占相当大的比例, 据统计: 1990 年全国 110kV~500kV 变压器事故或故障中, 有载分接开关的事故或故障分别占 18% 和 12%; 在 500kV 变压器发生的 57 次故障中, 有载分接开关故障占 25%, 并且现在还有上升趋势。所以分接开关质量好坏与变压器正常运行有密切关系。如果不重视有载分接开关的维护检修, 会导致故障扩大, 直到威胁变压器和电网的安全运行, 因此对于运行检修部门, 有载分接开关的维护检修非常重要。2007 年四川某变压器就因为分接开关问题发生了一起变压器绕组变形事故。停运后运用变压器绕组变形测试仪检测频响曲线, 检测结果如图 1, 从图中可看出曲线的拟和很差, 相关系数达到严重变形指标, 经吊罩检查发现 C 相绕组已经发生严重变形, A、B 两相绕组也有不同程度的变形, 该变压器现已返厂维修。

分之二的时间运行在 1.1 倍额定容量超负载运行。这种情况下进行有载开关调压会加剧有载开关动作, 因为开关在调压过程中电弧太大, 因此, 开关室绝缘油劣化很快, 达不到正常运行的次数, 油绝缘就破坏了。造成了绕组的一定变形, 并且事故发生后只是更换了同类型的开关, 并没有对变压器绕组进行测试就进行了投运, 这为以后的事故埋下了伏笔。又是同样的开关问题导致过电压产生, 造成击穿短路故障, 变压器严重变形, 并且没作任何绝缘试验, 最后以致投运变压器由于绕组绝缘破坏, 造成 C 相对铁芯击穿造成 C 相绕组烧毁的事故。

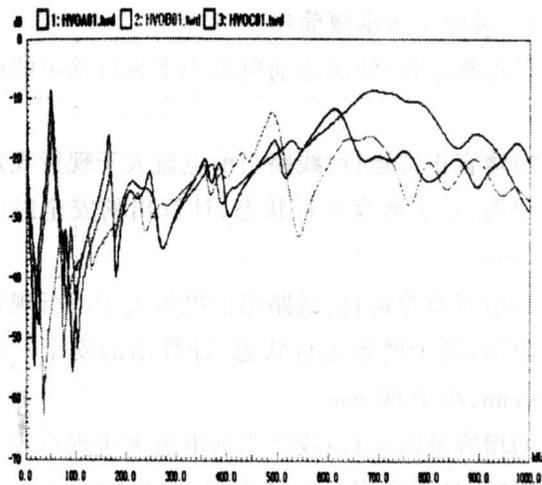


图 1 故障变压器高压绕组频率响应特征曲线

1 事故经过

电力系统内部规定在 0.8 倍额定负载时不能调节有载开关, 有载开关运行规程规定在 1.2 倍额定负载时不允许有载开关动作。该变压器负荷较重, 有三

2 事故分析

1) 由于此变压器开关无真空熄弧技术, 并且动作

比较频繁,开关油劣化比较快,现场也发现触头已经碳化。而真空开关的触头是在密封的真空腔内分、合电路的,触头切断电流时,仅有金属蒸汽离子形成的电弧,而无气体的碰撞游离,因金属蒸汽离子的扩散及再复合过程非常迅速,从而能快速灭弧和恢复原来的真空度,可经受多次分、合闸而不降低开断能力。其主要优点如下:(1)结构紧凑,体积小,重量轻,动作快,分、合闸所需功率小;(2)电气、机械寿命长,维修工作量少;(3)开断容量大,允许开断次数多,适合于频繁操作的场合;(4)不产生高压气体及有毒气体,无火灾及爆炸危险,不污染环境。

2)变压器绕组变形后,有的会立即发生损坏,有的可以继续运行一段时间,运行长短因为变形程度和位置不同而不同。绕组变形后由于绝缘距离发生变化,在过电压作用下,绕组便有可能发生绝缘击穿,导致突发性绝缘事故;也有遭受多次短路电流冲击,机械变形的积累效应而最终导致变压器的损坏。这是一种积累效应,而且具有越来越恶劣的发展趋势。由图2可见,当两个绕组高度不同时,高度较高的绕组受到的轴向力有使绕组高度增加的趋势;高度较低的绕组所受轴向力试图使其高度减小,即使两绕组的高度差继续增大。这就意味着下一次短路再次发生时,会以一个更大不对称性作为基础,必然会引起更大的电动力。

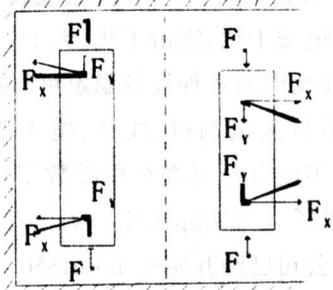


图2 两绕组电动力

3 结论

上面事例应给出足够的经验教训,变压器开关问题应该得到重视,加强一次系统的运行管理,减少变

压器出口和近区短路故障,为了提高变压器的安全运行水平,还要做好以下日常维护和检修工作:

1)做好变压器油试验。《有载分接开关运行维修导则》规定运行中有载分接开关油室内绝缘油的击穿电压应不低于30 kV。当击穿电压低于30 kV时,应停止自动电压控制器的使用。当击穿电压低于25 kV时,应停止分接变换操作,及时处理。定期对有载油进行油务试验,一旦有不合格现象,及时上报,并采取滤油或换油等措施。

2)检查油枕内和充油套管内是否缺油,封闭处有无渗油、漏油现象。检查变压器上层油温,变压器上层油温一般应在85℃以下,强迫油循环水冷变压器应为75℃。如果发现这些现象应设法立即消除。

3)做好触头压力试验,触头压力是保证触头电阻符合要求的重要条件,触头压力不够时接触电阻变大,触头温生增高,会加快开关损坏。

4)变压器的运行电压不应超过额定电压的±5%,如果电源电压长期过高或过低,应调整变压器分接头使电压趋于正常。

5)变压器投运前进行绕组变形测量,建立原始频响曲线,对试验结果进行横向和纵向的比较,防止各种累积变形引发绝缘事故;对于早期变压器缺少原始频响特性曲线,虽然可以用三相相关系数判断,但是难以保证判断准确,在未受短路冲击前进行绕组变形试验,保存频响特性曲线,作为今后变形试验的对比依据,以利提高判断准确性;对大型变压器进行绕组变形测试具有非常重要的意义,对已经遭受出口或近区短路冲击的变压器尤其要进行此项试验,以减少设备投运的风险。

参考文献

[1] Bengtsson C. Status and trends in transformer monitoring[J]. IEEE Trans. Power deliv. 1996.
 [2] 曹桂荣. 变压器绕组的短路电动力分析[J]. 煤炭技术, 2006.
 [3] 王世山, 李彦明. 电力变压器绕组电动力的分析计算[J]. 高压电器, 2002.
 [4] 徐思通. 电力变压器的运行与检修. 电力工业出版社 [M]. 1980.

(收稿日期:2008-02-10)

数字化变电站在四川省电网的应用

李 杲

(绵阳电业局, 四川 绵阳 621000)

摘 要:数字化变电站是指变电站信息采集、传输、处理、输出过程全部数字化,其基本特征为设备智能化、通信网络化、模型和通信协议统一化、运行管理自动化。在变电站自动化领域中,随着智能化电气的发展,特别是智能化开关、光电式互感器等机电一体化设备的出现,变电站自动化技术即将进入数字化新阶段。论述了数字化变电站自动化系统的特征、结构、国内现状。全面介绍作为全川首座 110 kV 数字化变电站—南塔站数字化改造的具体实施方案,为全川开展数字化变电站改造提供必要的基础资料和建设方案。

关键词:数字化变电站;电子互感器;综合自动化;61850 规约 南塔变电站

Abstract: A digital substation comprises the digitalization of the complete process level from data collection and transfer to data processing and output. Intelligence device, network communication, communication protocol and mode unification characterize a digital substation. With the development of electric intelligence, especially the optical, mechanical and electronic integration equipment such as the development of intelligent switch and optical instrument transformer, substation integrated automation system will enter into a new stage of digitalization. The features, the structure and the current domestic situation of the automation system in digital substation are described. The detailed implementation scheme of digital reconstruction in Nanta Substation is introduced, which is the first digital substation in Sichuan province and can provide the useful experiences and the reference to the renovation of digital substation.

Key words: digital substation; electronic instrument transformer; integrated automation system; 61850 regulation; Nanta Substation

中图分类号:TM631 文献标识码:B 文章编号:1003-6954(2008)03-0028-04

变电站自动化技术经过十多年的发展已经达到一定的水平,在中国城乡电网改造与建设中不仅中低压变电站采用了自动化技术实现无人值班,而且在 220 kV 及以上的超高压变电站建设中也大量采用自动化新技术,从而大大提高了电网建设的现代化水平,增强了输配电和电网调度的可能性,降低了变电站建设的总造价,这已经成为不争的事实。然而,技术的发展是没有止境的,随着智能化开关、光电式电流电压互感器、一次运行设备在线状态检测、变电站运行操作培训仿真等技术日趋成熟,以及计算机高速网络在实时系统中的开发应用,势必对已有的变电站自动化技术产生深刻的影响,全数字化的变电站自动化系统已基本成熟。

1 数字化变电站自动化系统的特点

数字化变电站是指变电站信息采集、传输、处理、输出过程全部数字化,其基本特征为设备智能化、通信网络化、模型和通信协议统一化、运行管理自动化。数字化变电站的一次设备和二次设备均采用智能设

备,设备间交互的信息均按统一的模型数字化,光纤数字化变电站由于采用光电式 TV、TA,光电转换接口、光纤通信、光电转换新一代算法等先进技术,使变电站综合自动化实现了无二次电缆传输、无浪涌电压、电流、强电磁干扰、雷击干扰、无 TV 开路、TA 短路故障干扰,使变电站各种设备稳定可靠运行提高了几个数量级,节省大量铜材、线材、施工费用和维护费用。国内许多电力公司都在跟踪数字化变电站的最新发展,并做了大量实际工作。河南省、浙江省和天津市等电力公司已经开始按 IEC61850 标准进行试点变电站的规划,现已投运的数字化变电站包括:云南曲靖供电局 110 kV 翠峰、江苏无锡 110 kV 园石、山东 110 kV 阳谷、内蒙古 220 kV 杜尔伯特等变电站。四川绵阳 110 kV 南塔站数字化改造已启动,预计 2008 年 6 月投运。数字化变电站已经受到电力企业运营单位的广泛关注。

2 数字化变电站供货厂商状况

目前,数字化变电站受到国内很多厂家关注,特

表1 主流厂家数字化变电站状况

| | 南瑞继保 | 南瑞科技 | 新宁光电 | 北京四方 | 许继 | 深圳南瑞 |
|--------|----------------------------|-----------------------------|--|--------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 光电互感器 | 自行生产 | 不生产 | 自行生产 | 不生产 | 自行生产 | 不生产 |
| 监控系统 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 |
| 保护装置 | 自行生产, 保护出口厂家推荐保留常规电缆硬接线方式。 | 自行生产, 保护出口实现网络化, 可实现保护测控合一。 | 自行生产, 保护出口实现网络化 | 自行生产, 保护出口实现网络化 | 自行生产, 保护出口实现网络化 | 自行生产, 保护出口实现网络化, 保护测控合一, 本体保护下放 |
| 合并器 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 |
| 就地智能单元 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 | 自行生产 |
| 通信协议 | IEC61850 | IEC61850 | IEC61850 | IEC61850 | IEC61850 | IEC61850 |
| 运行业绩 | 有整站运行业绩 | 有整站运行业绩 | 有整站运行业绩, 110 kV 线路保护在川内无运行业绩, 在四川广元有 110 kV 电子 TV 挂网运行, 运行业绩较好 | 无整站运行业绩, 有间隔改造运行业绩 | 有整站运行业绩, 110 kV 线路保护在川内无运行业绩 | 无整站运行业绩, 有间隔改造运行业绩 |

别是各大变电二次厂家均不同程度研发生产, 如南瑞继报、南京新宁光电公司、许继电气等能够生产数字化变电站系列成套设备, 包括电子互感器、合并器、测控装置、保护装置等。此外国内主流变电二次厂家如南瑞科技、深圳南瑞、北京四方等厂家均已成功生产除电子互感器外其他数字化配套设备各继电保护主流厂家数字化变电站技术状况见表 1。

3 南塔 110 kV 变电站数字化改造方案

随着国内继电保护及监控系统主流厂家基于 61850 规约的数字化设备成熟和定型, 标志这中国电力系统数字化时代已经起步, 同时数字化变电站不断发展, 在设计、建设、运行、维护和管理等各方面已积累很多丰富经验, 在川内建设数字化变电站条件已基本成熟。经过反复调研和论证, 四川省电力公司确定绵阳电业局 110 kV 南塔站作为全川首个数字化变电站试点。南塔变电站为绵阳城区重要负荷供电, 对供电可靠性和供电质量要求严格。通过利用先进的数

字化技术, 将大大提高变电站综合自动化水平以及设备运行可靠性。

3.1 南塔 110 kV 变电站现状

110 kV 南塔变电站位于绵阳市南部, 平均负荷在 40 MVA 以上, 该站始建于 1980 年, 110 kV 为单母线分段接线方式, 现有 110 kV 变压器 2 台, 容量 2×31.5 MVA、110 kV 进线两回; 10 kV 单母线分段接线方式、出线 23 回、电容器 2 组; 35kV 单母线分段接线方式, 出线 4 回, 其中包括 2 回绵阳热电厂南热 I、II 回上网线路, 热电厂装机为 2×15 MW(由于需要提供城市供热, 一般出力在 12 MW 左右)。

3.2 南塔 110 kV 变电站数字化改造基本内容

数字化改造的主要内容包括: 更换全站电流、电压互感器为电子式互感器; 更换部分一次开关设备, 以适应数字化变电站要求; 更换全站二次设备为数字化二次设备, 包括保护、监控、微机五防、计度表计等。

新建主控继电器室和蓄电池室 1 个, 数字化二次设备全部布置在新建主控继电器室内。

3.2.1 监控系统

原变电站监控系统采用山大ES60 RTU, 不能满足数字化变电站的要求, 需拆除。新增适用于数字化变电站的微机监控系统一套。新增监控系统是基于IEC-61850协议的分层分散式监控系统。

IEC 61850协议是国际电工委员会TC57工作组制定的《变电站通信网络和系统》系列标准, 是基于网络通信平台的变电站自动化系统的国际标准, 其主要特点为: 信息分层; 面向对象的数据对象统一建模; 数据的自描述; 抽象通信服务接口ACSI。

IEC 61850协议将整站分为三层: 站控层、间隔层和过程层。

站控层设备包括监控主机、远动工作站等。其主要功能是为变电站提供运行、管理、工程配置的界面, 并记录变电站内的相关信息, 同时可将站内信息转换为远动和集控设备所能接受的协议规范, 实现监控中心远方控制。站控层设备建立在IEC 61850协议规范基础上, 具有面向对象的统一数据建模。与站外接口的设备如远动装置等能将站内IEC 61850协议转换成相对应规约格式。所有站控层设备均采用百兆工业以太网, 按照IEC61850通信规范进行系统建模并进行信息传输。

间隔层设备主要包括保护装置、测控装置等二次设备。要求所有信息上传均能够按照IEC61850协议建模并具有支持智能一次设备的通信接口功能。

过程层设备包括光电电流电压互感器、智能一次设备或一次设备的智能单元、合并器。

监控系统还包括如下辅助功能: 规约转换(对不符合IEC 61850协议的设备进行规约转换)、对时功能。

对于过程层61850通讯规约主要分为61850-9-1和61850-9-2两种, 61850-9-1标准采用串行点对点模式, 每个间隔可以传输最多12路采集量数字信号; 61850-9-2标准则规定采用交换机组网方式, 可以传输多于12路采集量数字信号。对于点对点模式, 间隔层设备采用点对点与相应合并器连接, 光缆附设量大, 但投资较少, 适用于中小规模变电站; 对于网络模式, 网络结构清晰, 光缆附设量较小, 网络自环可靠性较高, 但由于现全球仅一家能够生产满足61850规约交换机, 交换机费用昂贵, 总体投资较高。通过投资效益综合分析, 南塔站采用基于61850-9-

1串行点对点模式。

3.2.2 继电保护保护配置

110 kV系统配置主变保护、线路保护及备自投装置, 以上保护装置除具备常规保护功能外, 还具有满足数字化要求的功能, 包括: 接收合并器数字信号(数字化的电流、电压信号)的光纤数字接口, 与智能一次设备或一次设备智能单元的光纤数字接口, 与监控后台通信的采用IEC 61850协议的以太网口。

35、10 kV保护测控装置采用微机型保护测控合一装置, 安装于就地开关柜, 同时具有满足数字化要求的功能, 包括: 接收35、10 kV电子式电流、电压互感器(模拟量输出, 不经光电转换)小模拟量输出的接口, 一次设备智能单元集成在保护测控合一装置内, 通过光纤数字接口与监控后台连接。

3.2.3 计度

由于数字化改造后, 原接收电流、电压模拟量的电度表不能满足要求, 需全部更换为能够接收数字信号的电流、电压的数字化电度表。数字化电能表的有功精度可以达到0.2S级, 现国内主流威盛及新宁光电公司均能够生产数字化电度表并通过国家CMC认证, 完全满足计量要求。

3.2.4 互感器及合并器配置

110 kV部分光电式电流互感器按单线圈单采集器配置, 数字信号通过光缆接入合并器, 再由合并器出口供保护、测量、计度用。35、10 kV电子式电流互感器按单线圈配置, 不经光电转换, 直接小模拟量输出至就地保护测控合一装置。

110 kV部分合并器按间隔配置, 35、10 kV合并器集成在就地保护测控合一装置内。

合并器具有以下基本功能:

- 1) 可接收来自多路电子式互感器采集器的采样光信号, 汇总之后按照IEC61850规约以光信号形式对外提供采集数据;
- 2) 以光能量形式, 为电子式互感器采集器提供工作电源;
- 3) 接收来自站级或继电保护装置的同步光信号, 实现采集器间的采样同步功能;
- 4) 可以接收传统互感器的模拟信号, 进行A/D转换。

3.2.5 一次设备智能单元

由于目前一次设备厂家提供智能一次设备的技术还不够成熟,此工程采用传统一次设备+就地智能单元的方式实现一次设备的智能化、数字化。110 kV及主变就地智能单元安装于就地端子箱内,35、10 kV智能单元集成在就地保护测控合一装置内。

智能终端具有以下基本功能:

1)通过过程总线接口给间隔层设备提供电气信息,接收间隔层设备的跳合闸等控制命令;

2)各断路器的智能终端输入开关位置、低气压、刀闸位置等状态量,输出跳合闸命令,含操作回路;

3)本体智能终端输入非电量、中性点刀闸位置、档位等信号,输出档位控制、中性点刀闸控制和风扇控制等接点。

3.3 南塔站数字化改造特点

3.3.1 监控系统结构

变电站监控系统采用数字化变电站特有的过程层、间隔层、站控层三层网络体系结构。过程层和间隔层设备之间采用变电站国际通用的 IEC61850-9-1 标准通信规约,间隔层和站控层间采用 IEC61850-8 标准通信规约,系统层间采用双光纤以太网通信,各设备间采用光纤进行连接。间隔层通过过程层总线获取过程层设备 GOOSE 信息实现数字化变电站所独有的过程层的设备控制互锁及互操作功能。

3.3.2 信息全程数字化

监控系统实现变电站信息采集、数据传输、操作控制、异常告警、远程维护以及各智能设备之间的功能交互等均全程数字化处理、信息共享,提高信息使用效率。

3.3.3 智能化运行管理

由于监控系统采用 IEC61850 作为站内唯一通信协议,协议体系本身是面向对象,自描述的,原来传统基于测点的通信方式所不能或不便传送的保护细节及设备状态信息现在都可以直接完整的传送到站控层,便于进行更准确、更智能的继电保护分析,由于站控层可以实时得到详细的设备状态信息,使得原来的一次设备“定期检修”可以转换到“状态检修”,提高供电可靠性。

3.3.4 网络化间隔层智能操作及闭锁

操作闭锁:基于间隔层的测控装置,利用本间隔

操作的逻辑闭锁功能以及间隔之间的数字化状态信息交互,并根据变电站现场运行的要求,在间隔层通过运行实时状态分析及逻辑判断,开放或闭锁间隔层设备的操作,实现变电站完整的五防操作逻辑闭锁功能。

智能操作:以测控装置为主体,利用间隔之间的状态信息交互,使间隔内的运行状态切换操作做到一键完成,不需要多级信息交互,实施间隔程序化操作,操作快速,可靠性突出,为今后程序化操作奠定基础。

4 结语

综上所述,数字化变电站技术在国内已基本成熟,目前已有部分变电站进行了试点,效果明显,特点突出。随着数字化变电站不断发展,在设计、建设、运行、维护和管理等各方面已积累很多丰富经验为此可以断言,数字化变电站将成为今后电力系统发展必然趋势,随着南塔站数字化改造工作完成将有力推进全川数字化变电站进程,为 2008 年启动 220 kV 数字化变电站改造打下良好基础。

参考文献

- [1] 黄益庄 编著. 变电站综合自动化技术[J]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [2] IEC870-5-103. Telecontrol Equipment and Systems Companion Standard for the Informative Interface of Protection Equipment. 1997.
- [3] IEC61850 (Committee Draft). Communication Networks and Systems in Substations. 1999.
- [4] 杨奇逊. 变电站综合自动化发展趋势[J]. 中国电机工程学报,1996,16(3):145-146.2.
- [5] 孙莹. 集中式无人值班变电站微机监控系统[J]. 电力系统自动化,1997,21(3):64-66.3.
- [6] 谈苏伟. 变电站操作控制中心的一种模式[J]. 电力系统自动化,1997,21(4):55-57.
- [7] 任雁铭,秦立军,杨奇逊. 变电站自动化系统中内部通信网的研究[J]. 电网技术 2000,24(5)2.
- [8] 任雁铭,秦立军,杨奇逊. IEC61850 通信协议体系介绍和分析. 电力系统自动化,2000,24(8)3.

(收稿日期:2008-03-10)

配电变压器雷击损坏的原因及防雷措施

方 晴

(四川省广元电业局, 四川 广元 628000)

摘 要: 阐述了配电变压器防雷接线的特点, 分析了配电系统中过电压产生的机理, 指出了配电系统防雷保护存在的主要问题, 提出了几种主要的防雷保护措施。

关键词: 配电变压器; 过电压与防雷保护; 分析

Abstract: The characteristics of lightning protection connection of the distribution transformer are introduced, and the mechanism of overvoltage occurring in distribution system is analyzed. The main problems existing in lightning protection of distribution system are pointed out, and several protection measures against lightning are proposed.

Key words: distribution transformer; overvoltage and lightning protection; analysis

中图分类号: TM86 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0032-06

1 配电变压器防雷接线的特点

根据 DL/T620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规程规定, 配电系统中的配电变压器, 其高低压侧均应装设阀式避雷器保护。阀式避雷器应尽量靠近变压器装设, 其接地线和变压器低压侧中性点(中性点不接地时则为中性点的击穿保险器的接地端)以及变压器的金属外壳三点应连在一起接地, 其接地电阻一般不应大于 4Ω 。其具体接线如图 1 所示。其特点可归结为:

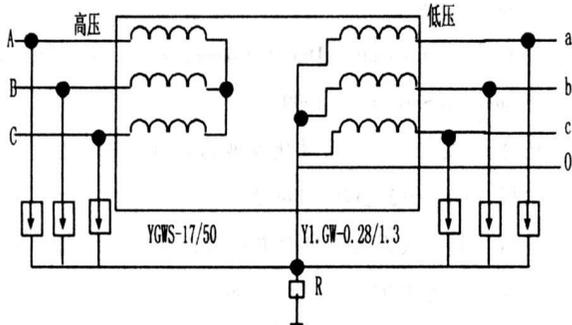


图 1 配电变压器防雷保护接线图

1.1 高低压侧均装设避雷器保护

高压侧避雷器应装设在跌落保险下方。理由是:

- ①可以减少避雷器引下线长度, 使避雷器离变压器更近, 保护效果更好;
- ②当避雷器质量不良, 放电后不能熄弧时, 工频续流使保险丝熔断, 保险管自行跌落与系统分离, 从而缩小了事故停电范围;
- ③便于避雷器

的更换试验, 只要将变压器高压侧跌落保险拉开即可自行换装。

1.2 “三位一体”的接地方式

即避雷器的接地线和低压绕组的中性点及变压器金属外壳连结在一起。其目的是避免雷电流流过接地装置时产生的压降与避雷器残压叠加起来作用在变压器绕组绝缘上导致绝缘损坏。若避雷器独立接地, 如图 2 所示, 则绕组上的对地电压为 $(U_c + IR)$, 其中 I 为冲击电流。由于变压器冲击绝缘水平是和避雷器的残压 U_c 配合的, 也即只允许 U_c 作用于绕组上。所以这种接线方式可能使变压器绝缘损坏。

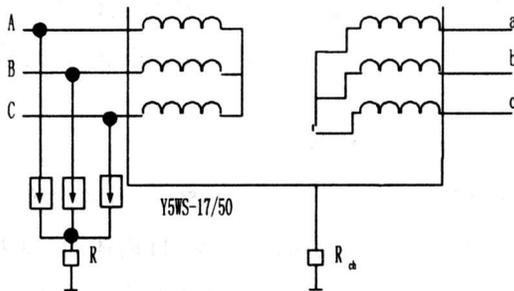


图 2 “三点”不共同接地的接线

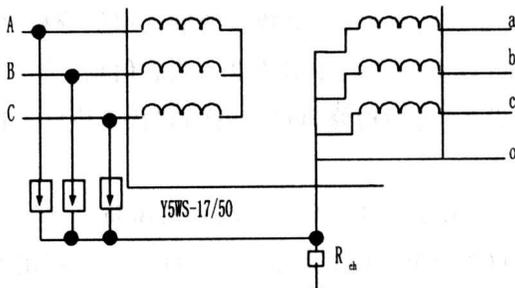


图 3 避雷器与变压器外壳共接地

若变压器低压绕组的中性点不与避雷器接地端和变压器外壳相连接,如图3所示。这时绕组上的对地电压即主绝缘的电压就是避雷器残压,但是,接地电阻上压降将使外壳(对地)电位抬高到 IR_{ch} ,可能造成对低压绕组绝缘的损坏。

2 配电变压器中的过电压

2.1 逆变换过电压

所谓逆变换过电压,即当 $3\sim 10\text{ kV}$ 侧侵入雷电波,引起避雷器动作时,在接地电阻上流过大量的冲击电流,产生压降 IR_{ch} ,这个压降作用在低压绕组的中性点上,使中性点的电位抬高,当低压线路比较长时,低压线路相当于波阻抗接地。因此,在中性点电位作用下,低压绕组将流过较大的冲击电流,如图4所示。三相绕组中流过的冲击电流方向相同、大小相等,它们产生的磁通在高压绕组中按变压器匝数比感应出数值极高的脉冲电势。三相脉冲电势方向相同、大小也相等(假定三相磁路对称)。由于高压绕组接成星形,且中性点不接地,因此在高压绕组中,虽有脉冲电势,但无冲击电流。冲击电流只在低压绕组中流通,高压绕组中没有对应的冲击电流来平衡,因此,低压绕组中的冲击电流全部成为激磁电流,产生很大的零序磁通,使高压侧感应很高的电势。由于高压绕组出线端电位受避雷器残压固定,这个感应电势就沿着绕组分布,在中性点幅值最大。因此,中性点绝缘容易击穿。同时,层间和匝间的电位梯度也相应增大,可能其他部位发生层间和匝间的绝缘击穿。这种过电压首先是由高压进波引起的,再由低压电磁感应至高压绕组,通常称之为逆变换。

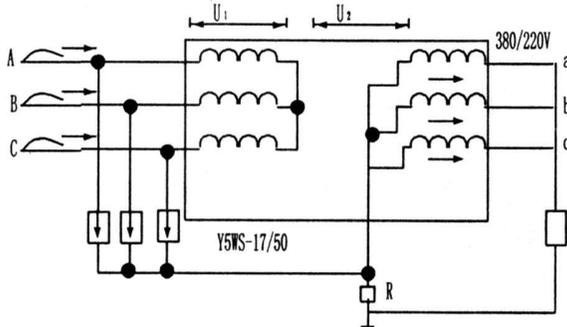


图4 产生逆变换过电压情况

来简要分析高压侧雷击时所引起的电流分布和逆变换过电压,如图5所示。

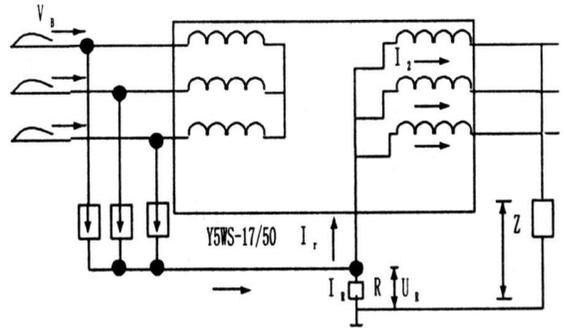


图5 配电变压器高压侧雷击的电流分布

假如变压器的冲击接地电阻 $R=7\ \Omega$, 避雷器动作后,流过的雷电流 $I_b=5\text{ kA}$, 由于接地电阻 R 一般比变压器低压绕组的阻抗小很多, I_r 可以忽略不计,则在 R 上所产生的电压 $I_r \cdot R \approx 35\text{ kV}$ 。这一电压降将作用在低压侧中性点上,而低压侧出线此时相当于导线波阻抗 Z 接地, Z 比变压器低压绕组的阻抗小得多,因此 $I_r \cdot R$ 绝大部分都加在低压绕组上。由于电磁感应,在高压绕组上将按变比出现高电压,例如 $10/0.38\text{ kV}$ 变压器的变比为 26, 10 kV 绕组两端的冲击电压几乎达到 $26 \times 35 = 910\text{ kV}$ 。由于高压绕组出线端的电位受到避雷器冲击放电电压所固定,因此,这 910 kV 的高电位将沿高压绕组分布,最大值出现在中性点上,再叠加上避雷器残压,可能将中性点附近的绝缘击穿(中性点及主绝缘冲击绝缘水平仅 75 kV),此 910 kV 的高电位沿高压绕组产生的纵向电压很高,且可能产生振荡,因而也可能将高压绕组中性点附近或其他部分的层间或匝间绝缘击穿。表1给出了某单位近年来配电变压器(含农网设备)的雷击损坏情况^[2]。由此可见,配电变压器的雷击损坏大多数发生在高压绕组的层、匝间,这与理论分析是一致的。

表1 雷击配电变压器的损坏情况

| 损坏部位 | 损坏数占总损台数的百分数(%) |
|-----------|-----------------|
| 高压绕组层间损坏 | 73.8 |
| 高压绕组主绝缘损坏 | 6.9 |
| 套管闪络 | 10.8 |
| 低压绕组损坏 | 5.4 |
| 其他 | 3.1 |

下面以 Y, y_n^0 接线的 10 kV 配电变压器为例,

逆变换过电压幅值的大小与下列因素有关:

(1)与进波方式有关。高压三相进波比单相或两相进波所引起的逆变换过电压高。

(2)与雷电流大小有关。逆变换过电压与通过变压器高压侧避雷器的雷电流有关,也就是说与进波电压幅值或线路绝缘水平有关,高压进线绝缘水平越高,逆变换电压也越高。

(3)与进波波长有关。逆变换过电压亦与进波波长成比例,波长越长,振荡过程可以得到充分发展,过电压也越高。

(4)与接地电阻大小有关。接地电阻越大,流过低压绕组的雷电流也越大,逆变换过电压幅值就越高。例如,当接地电阻为 $5\ \Omega$ 时,中性点电位为进波幅值的 85%;当接地电阻为 $47\ \Omega$ 时,中性点电位为进波幅值的 160%,如表 2 所示。因此,在山区、高土壤电阻率地区,逆变换过电压幅值很高,配电变压器损坏的可能性更大。

表 2 接地电阻对中性点电位的影响(进波百分比)

| 名称 | 数值 | | | | |
|------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| 接地电阻(Ω) | 5 | 10 | 47 | 100 | 300 |
| 中性点电位 U(%) | 85 | 110 | 160 | 175 | 175 |

(5)与低压侧线路的波阻抗 Z 有关。如果低压线路绝缘没有闪络,即相当于经 Z 接地,流经低压绕组的电流较小,因而这变换过电压较低;若低压线路绝缘破坏(可能性大),则相当于经线路的电阻(远小于 Z)直接接地,流经低压绕组的电流较大,因而过电压就较高,低压零线的存在减小了低压绕组的电流,也有助于降低逆变换过电压。

(6)与变压器变比有关。逆变换过电压与变比成正比,故 35/0.38 kV 的变压器比 10/0.38 kV 者严重。

2.2 正变换过电压

所谓正变换过电压,即当雷电波由低压线路侵入时,配电变压器低压绕组就有冲击电流流过,如图 6 所示。这个冲击电流也同样按匝数比在高压绕组上产生感应电动势,使高压侧中性点电位大大提高,绕组层间和匝间的电位梯度也相应地增加。这种由于低压进波在高压侧产生感应过电压的过程,称为正变换。试验表明,当低压过电压波为 10 kV,接地电阻 $5\ \Omega$ 时,高压绕组上的层间电位梯度可能超过配电变压器的层间绝缘全波冲击强度一倍以上,必然威胁变

器绝缘,如图 7 所示。

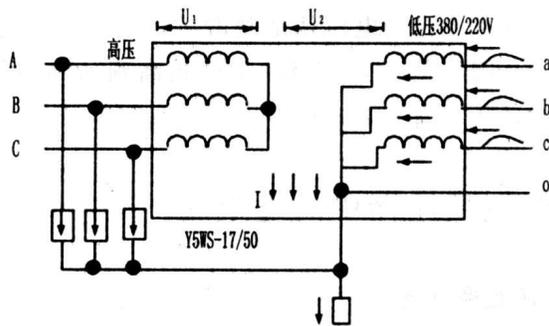


图 6 配电变压器产生正变换

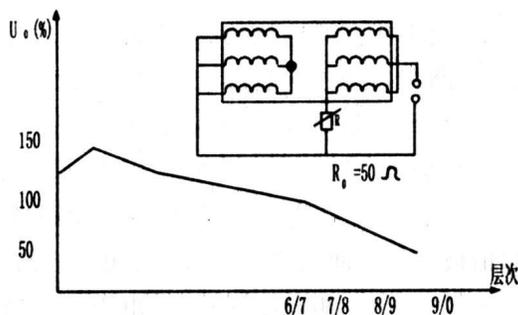


图 7 低压三相进波层间梯度电压

根据理论分析和试验结果表明^[2],影响正变换过电压的因素有:

(1)与进波方式有关。低压三相进波比单相进波所引起的正变换电压要高,但低压线路绝缘水平低,一般仅为 60 kV 左右,故雷击时基本上为三相进波。

(2)与进波波长有关。过电压与冲击波波长成正比,波长越长,振荡过程可以得到充分发展,过电压也越高。

(3)与变压器的变比有关。过电压与变压器变比成正比,因此 35/0.4kV 配电变压器的正变换过电压比 10/0.4 kV 更为严重。

(4)与低压过电压波的幅值有关。即与低压线路的冲击绝缘水平有关,绝缘水平高,低压侧过电压的幅值大,高压侧感应电势也大。

(5)与接地电阻大小有关。接地电阻大小的影响和逆变换的情况正好相反。如图 8 所示。因为接地电阻小,低压过电压波引起的冲击电流大,在高压侧就感应出较高的电势,反之亦然。

综上所述,即使配电变压器按规定的冲击绝缘水平设计,避雷器的性能符合要求。雷击时,由正、逆变

换引起的过电压,对配电变压器的绝缘仍构成威胁。避雷器对这种过电压失去保护作用。这个结论与运行情况相符。在雷电活动强烈地区,配电变压器损坏率较高,除个别变压器是由于制造工艺所造成的缺陷或极个别避雷器的性能较差失去保护作用外,有相当多的配电变压器的损坏是由于上述正、逆变换过电压造成的。运行经验表明,配电变压器遭受雷击损坏时,往往伴有低压设备(如电度表、电动机、电灯等)同时被击坏的现象,这说明配电变压器雷击损坏和在低压线路上出现的雷电过电压有联系。

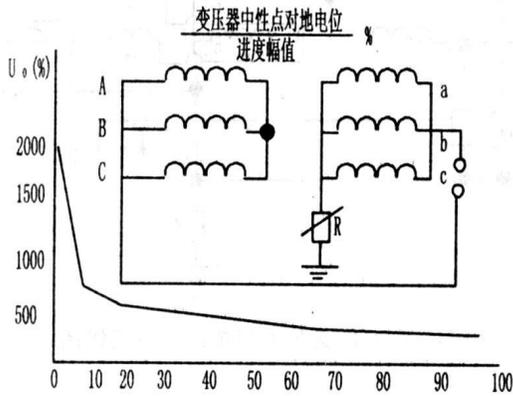


图8 低压三相进波正变换中性点对地电位

3 配电变压器雷击损坏的主要原因

3.1 忽视在配电变压器低压侧装设避雷器

农村配变的防雷保护工作一般只重视在配变的高压侧装设避雷器,而忽视低压侧也需装设避雷器的问题(尤其是多雷地区)。如前所述,因为高压侧避雷器向大地泄放很大的雷电流时,在接地装置上产生电压降,此电压经配变外壳同时作用在低压侧绕组的中性点,而低压侧绕组通过低压线路的波阻抗接地。因此,低压侧绕组中流过雷电流,它使高压侧绕组按变比感应出很高的电势(可达1 000 kV),即“反变换”电势,该电势与高压侧绕组的雷电侵入波电压叠加,会使高压侧绕组中性点电位变得很高,击穿中性点附近的绝缘。

3.2 避雷器损坏后未及时检出

有关部门的调查表明,有些避雷器运行12年未做过检查试验,有的作了试验,其中有12%不合格。由于避雷器损坏后未能及时检出,造成配电变压器实际上没有保护,因而当雷电波侵入时易导致配电变压器损坏。

3.3 避雷器接地引下线过长

配电变压器高压侧避雷器装于高压熔丝的下方,其接线端与配电变压器外壳和中性点的接地处的连接线有电感,当雷电流通过连接线时要产生电压降,它和避雷器的残压叠加在一起作用到变压器绝缘上,将威胁变压器的安全。譬如长度仅0.6 m的连接线约有1 μH的电感,如果在不大的雷电流陡度 $di/dt = 5 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 时,其电压降也可达到 $(di/dt)L = 5 \text{ kV}$ 。按接地线不超过5 m考虑,也可达40 kV,该电压和避雷器上的残压(一般为20~50 kV)叠加,这已经接近10 kV配电变压器全波冲击耐压值75 kV,再考虑绝缘老化的因素,势必导致变压器高压绕组的绝缘损坏。因此避雷器的接地点到变压器外壳的连接线应尽量缩短。

3.4 高压侧避雷器距配电变压器过远

因配电变压器高压侧要装设高压开关和高压熔断器,如果设计安装位置不当,就会使得高压侧避雷器的连接点 a 距配变的高压接线端 b 的距离 L 过长,当雷电侵入波经 a 点达到 b 点后发生反射,其反射波与侵入波叠加,使 a 、 b 两处的电压都升高。而高压侧避雷器 F_1 放电需要经过一定的时间,这就使得 b 处的电压比 F_1 的放电电压要高出一定的值,该值的大小与距离 L 成正比。如果变压器绝缘承受雷电冲击的能力达不到该值,就会损坏变压器。因此,尽可能缩短 L 的长度,就有利于变压器的安全,由过电压理论可推出 L 应满足如下关系式^[1]:

$$L \leq (U_T - U_5) V / 2\alpha$$

式中: U_T ——变压器绝缘耐受全波雷电冲击电压的能力,一般可取75 kV;

U_5 ——避雷器在5 kA下的残压冲,可查避雷器铭牌参数;

V ——雷电冲击波波速,可取300 m/μs;

α ——雷电波陡度,视当地雷暴情况可取150~300 kA/μs。

3.5 接地电阻过大

配电变压器的防雷装置能否起到良好的保护作用,其接地装置的质量至关重要。有相当多的农村配变的接地装置不符合要求,有的是接地体钢材埋深不够,有的是接地线不符合要求,使得接地装置的接地电阻大于10 Ω。从而使配变外壳的电位升高,这不利于变压器的安全。

3.6 接地线安装不当

有许多农村电工,甚至供电部门的技术人员在安装避雷器的接地线时,常常将避雷器的接地线直接接地,然后再从接地桩子上另引一根接地线至变压器的

外壳,这种接法表面上看来没有什么问题,但实际上是不正确的。因为当雷电流侵入,避雷器放电时,进入地下的雷电流在接地电阻上将产生较大的压降,它和避雷器上的残压叠加后加到变压器上,可使变压器损坏。

3.7 配电变压器本身绝缘薄弱或存在缺陷

配电变压器本身缺陷也是造成线圈损坏的原因之一。根据原北京电力建设科学技术研究所调查分析^[2],14 800 台年配电变压器的运行经验表明:在雷击损坏事故中,大约有 37% 是因绝缘存在缺陷而引起的。

4 配电变压器的防雷保护措施

目前,配电变压器防雷保护工作除了应确保避雷器的连接线应尽可能短,接地装置符合要求等基本措施外,主要有以下几方面的研究与应用:

4.1 配电变压器低压侧加装避雷器

如果低压侧装有避雷器,当高压侧避雷器放电,接地装置上电位升高到一定值时,则低压侧避雷器就会放电,使低压侧绕组出线端电位与其中性点及外壳的电位差减小,就能消除或减小“反变换”电势。对于 Y,yn⁰ 接线的配电变压器,特别是低压出线较长,易受雷击或线路绝缘水平较高(例如采用木杆、石杆、木担、瓷担或高压瓷瓶的低压线路)的配电变压器,低压侧更有必要采取保护措施,且将低压绝缘子铁脚接地以提高保护的可靠性。

4.2 选择防雷保护性能优异的金属氧化物避雷器

由于金属氧化物避雷器具有优异的防雷保护性能,目前已大量采用,将逐步取代传统的阀式避雷器。

配电变压器低压侧避雷器额定电压是由最高运行电压乘 1.1 的接地余度系数确定的,主要型号一般有 Y_{1.5}W-0.28/1.3(220 kV 系统)或 Y_{1.5}W-0.5/2.6(380 kV 系统)。在安装时应与变压器的电气距离不超过 5 m 为宜,一般装于变压器低压侧出线总开关或总保险丝的外侧,也可直接吊装于低压出口处的变压器旁边,与变压器共用接地装置。

配电变压器高压侧无间隙金属氧化物避雷器型号一般选择 Y5WS-17/50,而对于雷击活动频繁地区,为减轻阀片负担,避免热崩溃,宜采用内部带串联间隙的氧化物避雷器 Y5CS-12.7/45。

4.3 采用 Z 型接线的防雷配电变压器

不管是正变换过电压,还是逆变换过电压,均是

由于低压绕组中有冲击电流,并在高压绕组中感应出高电压而损坏变压器。所以若能减小或消除低压绕组中的冲击电流,就能降低或消除正、逆变换过电压。低压绕组采用曲折星形连接或 Z 型连接的变压器可以实现这个目的,而且其零序阻抗也较小,有利于过流保护。通常采用的连接方式是 Y,Zn11 组别。如图 9 所示。

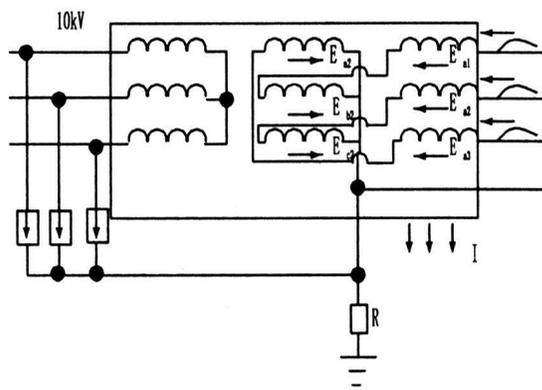


图 9 Y,Zn11 连接的配电变压器接线图

当其低压三相进波或高压侧进波,每个铁芯柱上有两个半绕组,这两个半绕组中流过的冲击电流大小相等,但方向相反。无论流过低压绕组的冲击电流有多大,每个铁芯柱上的总磁势都等于零,磁通也就等于零,从而在高压绕组中几乎没有正、逆变换过电压。由于实际的变压器磁路和结构不完全相同,有很小的过电压产生。因此,在雷害严重地区采用这种接线的配电变压器防雷效果十分明显,而且低压侧也不必装设低压避雷器。

4.4 加强生产工艺,提高配电变压器的制造质量

(1)层间绝缘使用的电缆纸必须注意质量,尽量采用较薄的电缆纸,因为在达到同样厚度时,用较薄的电缆纸层数较多,而针孔容易错开,同时厚的电缆纸往往均匀度较差。

(2)高压绕组分接头板尽量避免使用布质层压板,以免由于沿板层间击穿强度较低而分接头在振荡过程中击穿。

(3)低压绕组出线必须保证先弯曲成形后再包扎绝缘,因为低压绕组一般是两层,绕组首末端靠在一起,此处绝缘承受了全部绕组的层间过电压,同时低压绕组导线较粗,弯曲时外包绝缘容易折断,容易造成低压绕组首末端击穿。

4.5 在配电变压器高压侧加装电抗线圈

在配电变压器高压侧加装电抗线圈有两个作用:

其一是抬高它前面的阀式避雷器冲击电压,使避雷器容易放电,从而保护变压器。其二是降低波前陡度,减小作用于变压器匝间和层间的冲击电压梯度,保护配电变压器的纵绝缘。

实践中,往往采取综合防雷保护措施,为配电变压器的保护设置多道防线,即是上述的有关保护措施加以组合,从多方面来限制侵入配电变压器的雷电波,使配电变压器免遭雷害,达到安全运行的目的。

4.6 加强配电变压器运行管理

在实施以上有关技术措施的同时,必须重视和加强配电变压器运行管理,定期测试变压器的绝缘状况,进行变压器油试验分析,测量接地电阻,检测高、低压避雷器,以保证变压器绝缘水平和保护装置的良好可靠,这些是做好配电变压器防雷的基础。

5 结语

(1)配电系统中的正逆变换过电压是导致配电变

压器雷击损坏的根本原因,而防雷保护装置安装设计不当是配电变压器雷击损坏的主要原因;

(2)配电系统中的配电变压器防雷保护应在其高低压侧均应装设金属氧化物避雷器保护,且要求“三位一体”的防雷接地方式,接地电阻符合有关要求。接地引下线,以及避雷器至被保护变压器的连接导线长度应尽可能短,并按规定校核。

参考文献

[1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:中国水利电力出版社,1985.
[2] 陈化钢等. 电力设备异常运行及事故处理[M]. 北京:中国水利电力出版社,2005.

作者简介

方晴(1963—),男,四川重庆人,高级工程师,四川广元电业局生产副局长,从事电力生产管理工作。

罗军川(1966—),男,四川剑阁人,现就职于四川广元电业局生产技术部高级工程师,主要从事电力生产技术管理工作。
(收稿日期:2008-02-14)

(上接第15页)

表4 500 kV 线路直线塔不均匀覆冰
不平衡张力百分数算例

| 冰区 (mm) | 覆冰率 | 计算档距 (m) | 导线 | 地线(1) (双联串) | 地线(2) (单联串) |
|------------|--------|-------------|------|----------------|----------------|
| 50 | 20/100 | 250 | 5.4 | 34.1 | 42.0 |
| | | 300 | 10.8 | 49.1 | 53.4 |
| | | 350 | 19.4 | 56.4 | 59.0 |
| 40 | 20/100 | 250 | 3.3 | 17.7 | 25.1 |
| | | 300 | 6.6 | 34.9 | 41.6 |
| | | 350 | 11.6 | 46.6 | 50.7 |
| 30 | 20/100 | 300 | 2.7 | 9.6 | 13.4 |
| | | 350 | 4.9 | 18.1 | 24.2 |
| | | 400 | 7.9 | 28.7 | 34.4 |
| 20 | 20/100 | 350 | 4.1 | 23.4 | 25.9 |
| | | 400 | 6.6 | 31.7 | 33.7 |
| | | 450 | 9.9 | 37.4 | 38.9 |

30、40 mm 冰区: $4 \times A3/S1A-465/60$, $N=2.895$, 串长 6.217 m, 串重 6 111N;

50 mm 冰区: $4 \times A3/S3A-465/60$, $N=2.65$, 串长 6.342 m, 串重 8 114N。

地线:

(1)20 mm 冰区: $GJ-100$ (1 270 MPa), $N=3.2$, 双联串长 0.47 m, 串重 180 N;

30、40 mm 冰区: $GJ-120$ (1570 MPa), $N=2.65$,

双联串长 0.57 m, 串重 234 N;

50 mm 冰区: $GJ-150$ (1570 MPa), $N=2.7$, 双联串长 0.57 m, 串重 234 N。

(2)单联串长 0.4 m, 串重 100 N, 其余同(1)。

影响直线塔不均匀覆冰不平衡张力计算结果的因素主要有:各挡覆冰厚度取值、耐张段的档数、档距、高差、绝缘子金具串长度、架线张力等,工程设计时需根据规程要求结合工程具体条件进行计算。

4 结论

(1)所述的重冰区输电线路在覆冰断线工况和不均匀覆冰工况下的纵向张力计算方法,适合于用计算机进行数值求解。经编制程序进行计算,并与有关资料对照,表明计算方法是可靠的。

(2)影响直线塔覆冰断线张力及不均匀覆冰不平衡张力计算结果的因素很多,工程设计时应根据规程要求结合工程具体条件进行计算。

(3)以不均匀覆冰工况下的纵向张力及档距变化计算结果为基础,可以计算不均匀脱冰时导地线之间静态及动态接近距离,为杆塔地线支架高度设计取值提供依据。所述算法同样适用于轻冰区线路的相关计算。
(收稿日期:2008-03-05)

基于多元约束条件的园区配网 规划方法的优化研究

陈利¹, 唐文左²

(1. 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072; 2. 重庆电力科学试验研究院, 重庆 400015)

摘要: 由于园区配电网规划受招商引资的力度、变电站站址、线路廊道或排管、环保等多种约束条件限制, 规划决策者通常要面临一个由相互关联的各个部分构成的复杂系统, 这种复杂系统的决策问题大都属于多因素决策问题, 其解决的关键在于如何在一系列非劣解中确定最优解。通过在多元约束条件下数学优化计算, 同时采用人工干预的方法, 确定其配网规划最优方案, 从而体现出其配网规划先进性、科学性、经济性, 同时具备一定的超前性。

关键词: 多元约束条件; 园区配电网规划; 优化方法

Abstract: As distribution network planning of zone is limited by the intensity of investment, the substation site, the lines and pipes direction, the environmental and other sanctions, the plan makers often have to face an interrelated composition of the various parts of the complex system. The decision-making problems for this complex system belong to the multiple factor decision-making problems. The key to solve these problems is how to find the optimal solution in a series of non-inferior solution. After introducing the optimization method based on multiple constraints and artificial intervention, the optimal method for distribution network planning is determined. This method can make the distribution network planning advanced, scientific and economic.

Key words: multiple constraints; distribution network planning of zone; optimization method

中图分类号: TM715 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0038-04

目前国内外对城市电网规划技术的研究非常重视, 在保证电网安全稳定运行的前提下, 采用了诸如人工智能技术、灰色理论及各种优化算法对电网进行优化规划, 以利提高电网供电的可靠性和经济性, 取得了不少成绩。但该类规划主要侧重在输电网规划和电源规划, 对配电网规划研究不够; 而配电网规划是电网建设的基础工作, 是城市总体发展规划的重要组成部分。传统的采用经验法确定配网的电源点个数、位置、容量大小、供电模式、接线方式、设备配置等已很难满足用户的供电要求。由于配电网的复杂性及在远期规划中存在的许多不确定因素, 本研究考虑在现场各种约束条件下进行数学优化计算, 同时采用人工干预, 灵活运用各种技术和优化算法并结合现场具体技术原则和设计施工原则, 对配电网进行规划, 从而具有较强的适应性和科学性^{[1]~[5]}。

1 园区配电网规划

园区是指在城镇发展过程中为发展经济、给予经济和投资方面的政策支持和倾斜的集中开发区域。

园区一般远离城市中心, 它的开发进度与强度往往与开发区的招商引资力度以及该区域的基础设施是否完善有关。

园区的负荷预测数值与其开发面积、主要功能(如工业等)定位有关, 且往往会有部分用户的负荷数值较大需要各级变电站的中低压侧直接供电的情况, 因此园区不同性质的用户往往在负荷数值大小以及供电方式上有很大区别, 且该类区域往往还存在着在开发初期需提供临时电源等问题, 这些因素在规划时必须予以考虑。

2 负荷预测

在配电网负荷预测工作中, 为了找到使用方便、精度高、计算快的预测方法, 电力系统学者在理论上展开了更实用的研究。目前应用于配电网工程的预测方法主要是电量预测法和负荷密度指标法两类。电量预测法一般可按工业、农业、交通运输、市政生活等负荷分类进行, 首先预测规划区的电量, 进而预测负荷。负荷密度法是将配电网供电范围分成若干功

能区,由各分区现有负荷值计算现有负荷密度值,然后根据地区规划中有关的分区规划,如经济发展水平、估计规划期内分区可能达到的负荷密度预测值。在配网规划中,负荷密度指标法具有更广泛的应用^[6]。

负荷密度指标法(空间负荷预测),不仅能够进行负荷预测,而且能对未来负荷的地理位置分布进行预测。与一般方法相比,该方法考虑的因素更多,和计量经济模型得到相应的关系式相比,空间负荷预测可以说是一种专家系统的方法,它所选择的相关因素以及电力负荷与它们之间的关系都要通过专家的意见和对负荷预测区域过去负荷发展规律作大量调研来确定,具有较大的可信度。

2.1 空间负荷预测的主要优点

1)对于新开发地区,没有历史数据,不能用趋势法来预测,而就可用法。

2)由于电网中经常出现的负荷转移的问题也会对常规负荷预测方法的结果产生很大影响,该法可以不受它的影响。

3)该法得到的结果不但有将来的负荷值,还有这些负荷在地理上的分布值,对电网规划有具体的指导作用。

2.2 空间负荷预测的一般过程

1)将需要进行负荷预测的区域划分为一个个小区,一般划分为整齐的一个个小区,这样可以对大多数情况的处理采取一致的方法,当然也可以按功能块划分。由于负荷预测工作是为了进一步变电站选址定容,因此分块的大小要和负荷预测的电压等级一致,才可得到较为实用的结果。

2)通过向政府规划部门收集各预测小区未来的土地规划方案,可以得到各预测小区负荷的分布情况和相应面积。

3)在用地类型的预测基础上,进一步进行负荷的预测,分析用地类型的典型负荷特性,从而得到负荷预测。这里也要考虑相邻小区之间相互作用的影响,比如相邻小区之间的功率转移的影响等。

4)将各种负荷类型相加求得最终预测结果,可以是乘以同时率,也可以通过负荷的典型日负荷曲线相加获得。

3 变电站的选址定容

变电站是电网中变换电压、汇集、分配电能的设施,在负荷预测的基础上,进行变电站的选址定容是配电网规划的重要内容。变电站选址定容时须考虑:变电站电压等级、单台主变容量、变电站最终规模台数、负载率、各侧电压等级出线回数、站址要求、进出线条件等方面,均应遵循相关技术规定。

3.1 变电站容量及台数选择

变电站容量和变压器台数是影响配电网结构、可靠性和经济性的一个重要因素。变电站容量和台数不同,网内变电站总数、变电站主接线形式和系统的接线方式也就不同,也必然对电网的经济性和可靠性产生不同影响。因此变电站容量及变电站台数是配电网规划设计中必须决策的问题。

主变台数一般选用2~3台。主变容量选择应根据“N-1”原则,最高负载率应不超过规定数值,主变的负载率有两种方法可以确定,第一种方法为按主变不过载情况来确定主变的平均最高负载率(指全年负荷最高的25天的日最高负荷平均值),第二种方法是考虑主变过载1.3倍情况来确定主变的负载率。

变电容量的选择最终是为保证配电网具有一定的供电能力。在变电容量选择时还需考虑同一电压等级的总变电容量满足一定的容载比要求。容载比是城网内同一电压等级的主变压器总容量(kVA)与对应的供电总负荷(kW)之比(计算时应将用户专用变电站的变电容量及其所供负荷分别扣除)。《城市电力网规划设计导则》中各电压等级变电容量的容载比为^{[1]~[2]}:220 kV 电网是1.6~1.9;110 kV 和35 kV 电网是1.8~2.1。

容载比过大将使电网建设投资增大,容载比过小将使电网适应性差,甚至发生“卡脖子”现象。因此容载比是电网规划的重要技术经济指标。

3.2 变电站优化选址

变电站站址的优选可以从等负荷原则、负荷矩最小原则、初投资最小原则、以及网络运行费最小原则等几个方面予以考虑,并建立相关模型的算法应用智能电网规划软件,以求得配网中一定负荷水平下的最佳变电站站址。

多源连续选址方式:在一个规划区中同时确定几

个变电站的站址。设所研究的问题有 m 个变电站, 向 h 个负荷点供电, 则基于等负荷原则、初投资最小原则、负荷矩最小原则以及网络运行费最小原则的多源连续选址目标函数分别为:

$$\min C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^h [u_j - x_i]^2 + (v_j - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\min C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^h \delta_{ji} S_i [u_j - x_i]^2 + (v_j - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\min C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^h \delta_{ji} P_i [u_j - x_i]^2 + (v_j - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\min C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^h \delta_{ji} \beta_i P_i [u_j - x_i]^2 + (v_j - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m \delta_{ji} = 1 \quad (i=1, 2, 3, \dots, h) \quad (5)$$

式中: δ_{ji} —标志参量;

$\delta_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{电源 } j \text{ 向负荷点 } i \text{ 供电} \\ 0 & \text{电源 } j \text{ 不向负荷点 } i \text{ 供电} \end{cases}$

(u_j, v_j) : 第 j 个变电站的新站址;

(x_i, y_i) : 第 i 个负荷点的坐标;

n : 该变电站所供负荷点的个数;

S_i : 的配电线路的截面;

P_i : 各负荷点功率(kW);

h : 负荷点的总个数;

m : 变电站个数;

β_i : 单位距离、单位负荷的费用系数。

约束条件(1~5)是保证任何一个负荷点的负荷, 一般都不由一个以上的电源供电。这是因为城市配电网一般是闭式设计开式运行网络, 各负荷点同时只能由一个电源来供电^[7]。

4 园区配电网供电模式与接线方式的确定

10 kV 配电网是由 10 kV 架空线路、电缆、街坊配电站、箱式配电站、开关站、杆架变压器、环网柜、电缆分支箱等组成分布面广的公用电网, 其网络结构是配电网规划设计的主体。根据负荷预测结果和规划区 110(35)kV 变电站规划情况, 结合园区发展定位和总体规划实际情况, 进行 10kV 配电网的规划, 将电能安全、可靠、经济、优质的分配到用户, 是负荷预测后的一项重要工作^{[8]~[10]}。

4.1 10 kV 配电网接线模式

通过对不同接线模式进行分析, 提出典型接线模式。

4.1.1 不同母线出线的环式接线模式

不同母线的出线的环式接线模式如图 1 所示。该接线模式中的两路进线取自同一个变电站的不同母线。在正常运行情况下, 采用开环方式运行(联络开关打开), 当一路电源线路有故障时, 联络开关合上, 由另一条线电源线路供电, 所以要求每回电源线路正常时负载率不超过 50%。

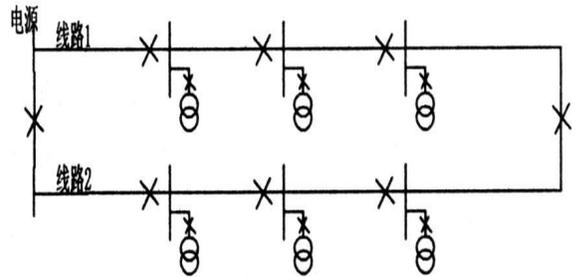


图 1 不同母线出线的环式接线模式

4.1.2 不同变电站出线的手拉手环式接线模式

对两个变电站之间的区域可采用地块与地块之间手拉手环式接线模式, 如图 2 所示。这种模式中两路进线取自不同的变电站, 正常运行时联络开关是打开的, 地块一由线路 1 供电, 地块二由线路 2 供电, 供电范围明确, 便于调度管理。当变电站有故障时, 联络开关合上, 从而实现负荷的转移, 提高了供电的可靠性。此模式的线路负载情况与前述相同。

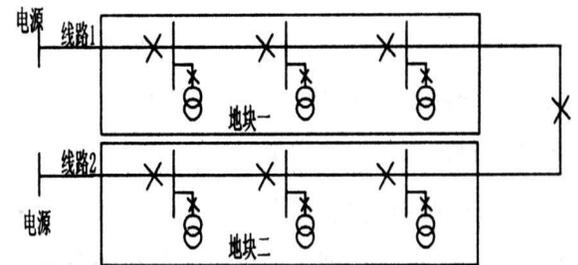


图 2 不同变电站出线的手拉手环式接线模式

4.1.3 不同母线出线连接的开关站接线

如图 3 所示, 这种接线模式实际上就是从同一变电站的不同母线或不同变电站引出主干线至开关站, 再从开关站引出电缆线路带负荷。在这里每个开关站具有两回进线, 对于居住区, 开关站出线采用辐射状接线方式供电, 对于工业区, 开关站出线间也可以形成小环网, 为了满足 $N-1$ 准则, 当开关站两回进线中的一回出线出现故障时, 另一回进线应能带起全

部负荷,这样正常运行时,每回进线应有50%的备用容量。开关站的容量可按一回进线的安全允许容量来选择。

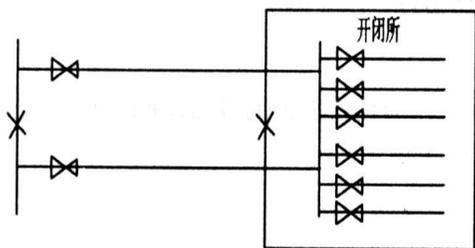


图3 不同母线出线连接的开关站接线模式

4.2 架空线与电缆的选择

园区电网规划中,导线的选取非常重要,它的选择决定着整个配电系统能否安全、经济、可靠的运行。目前园区电网规划中10 kV 架空绝缘导线干线主要选用240 mm²,也可选用120 mm²,分支线路主要选用95 mm²,具体选型要根据具体城镇负荷情况而定。一般沿道路的西侧、北侧或绿化带架设,以便为远期改用电缆预留通道。

有些园区为达到较高的可靠性,尽量减少外界环境对电网的影响,在经济条件许可的园区电网也可采用电缆。园区电网规划中10 kV 电缆的选择主要考虑它的最大负荷能力以及满足N~1 校验的要求。具体规划实践中,可按照电缆实际允许负荷和园区规划中的负荷情况,进行电缆的选择,选型力求设备规格统一化。

4.3 电缆排管规划

根据园区电网的具体规划方案,提出了相应的电力排管建议性规划方案。地下电缆线路敷设方式主要有:直埋敷设、沟槽敷设、排管敷设、隧道敷设等。其中直埋敷设是较经济、简便的敷设方式,适用于易于开挖的人行道下和建筑物的边沿地带。排管的敷设方式,适用于敷设电缆条数较多,且有机动车等重载的地段。

园区配电网规划中10 kV 电缆一般主要采用排管敷设方式和直埋敷设方式。由于排管建设的一次性和配电网建设的分步实施性,因此对电缆排管的规划要求具有很强的适应性,在电缆排管建成后的若干年内,能够满足配电网建设方案不断调整的要求。根据配电网远、近期规划方案,同时兼顾规划区周边地区电网发展需要,并根据当地电力行业有关技术规定

进行电缆排管规划。

5 其他规划内容

以上内容为园区配电网规划的主要部分。此外,还应对多个配网方案从潮流分布、供电可靠性、短路电流、经济性等约束条件进行综合对比分析,从而推荐最优方案,最后对推荐方案进行自动化、无功、环保等其他专项规划。

6 结束语

园区配电网规划应与园区近、远景规划相适应,与配电网现状相适应,与规划区负荷发展变化相适应,与效益管理、节约环保相适应。力争体现出设计的先进性、科学性、经济性,同时具备一定的超前性,为园区的电网规划管理提供技术依据,使园区开发建设更加科学、合理,从而更好的指导园区配电网的开发建设,为园区的健康、快速、经济发展提供电力保障。

参考文献

- [1] 《城市电力规划规范》[S]. 国家建设部颁发的建表(1999)149号.
- [2] 《城市电力网规划设计导则》[S]. 能源部、建设部联合颁发的能源电(1993)228号文.
- [3] 《城市配电网优化的指导意见》[S]. 中电联供电分会技术管理专委会,2003年3月.
- [4] 《城市中低压配电网改造技术导则》[S]. 中华人民共和国电力工业部发布电力行业标准,DL/T599-1996.
- [5] 陈章潮,唐德光.《城市电网规划与改造》[M]. 北京:中国电力出版社.
- [6] 牛东晓.《电力负荷预测技术及其应用》[M]. 北京:中国电力出版社,1998年10月等编著.
- [7] 张玉珩.《变电所所址选择与总布置》[M]. 北京:水利电力出版社,1986年.
- [8] 方向晖.中低压配电网规划与设计基础[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [9] E. Lakervi E. J. Holmes 著,范明天,张祖平,岳宋斌译.配电网规划与设计[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [10] G J Salis, A S Safigianni. Optimum long-term planning of a radial primary distribution network. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 20, No. 1, 1998, p. 35-41, 0142-0615.

(收稿日期:2008-02-10)

地区电网调度指挥操作中的安全风险

周林, 吕厚军

(德阳电力局, 四川 德阳 618000)

摘要:重点针对电力系统地区调度操作中的安全风险进行了分析,提出了影响操作安全的危险点,并给出了防范措施。

关键词:电力系统;调度;风险分析;对策

Abstract: The security risk of the district dispatching operation in power system is analyzed, the dangerous points affecting the security of the operation are proposed, and the precautionary measures are given at last.

Key words: power system; dispatching; risk analysis; countermeasure

中图分类号: TM732 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2008)03-0042-02

电网调度运行人员是电力系统运行的指挥者,肩负保证电网安全运行的重要使命,调度工作中要求每一个调度员必须有高度的责任心和较高的业务水平。调度的主要任务就是指挥电网运行的倒闸操作,电网故障和事故的处理,尽可能地保证电网的正常连续供电。在电网运行中,任何不规范的行为,都可能影响电网安全、稳定运行,甚至造成重大事故。如果电力调度员发生误判断误调度引起误操作,将会给家庭、企业和社会带来不可估量的经济损失和政治影响。

“防患险于明火,防范胜于救灾”,怎样防止误调度的发生,防范于未然,是调度人员长期思考的问题,而进行系统有效的危险点分析,不失为防止误调度事故的好方法。笔者在长期从事调度运行工作中发现,误调度事故的发生主要有以下几个方面的原因。

1 调度指令票编写错误

在编制调度指令票的过程中,应严把“三关”,即:拟票关、审核关、发票关。

在进行复杂操作前,应组织相关人员召开“操作预控会”,对操作过程中的危险点进行分析,制定对策和最佳操作方案。同时,操作预控会还可以在本值内进行,正、副值在拟定调度票前也应讨论后确定方案,再进行拟票。同时,加强调度典型指令票的编制、学习工作,当调度员发生疑问时能做到有章可循,有据可查。审核过程中要逐字、逐句、逐项审核操作指令票,根据系统实际情况,审核指令票中每一项操作的必要性,操作顺序的正确性。

发出指令票过程中应严格执行复颂制,有条件应

采取传真形式发出调度指令票。并告知操作人员本次操作的目的及注意事项。

2 停电检修申请书错误

检修申请审批不仔细,内容填写错误,导致执行错误。检修申请的审批,应该按调度规程严格执行。调度值班员应把好申请的接受关,应仔细审阅申请,着重检查申请停电范围是否与检修内容相符,方式人员与继保人员的批示意见有无抵触。当发生疑问时,应立即和批准人联系,不能放过任何疑点。

3 操作过程麻痹大意和操作失去监护

操作过程中,正、副值不能各负其责,使操作失去监护,导致漏项、跨项操作。应严格执行操作监护制度,正、副值之间应加强沟通,明确职责、分工。执行指令票过程中严格按指令票的顺序执行,不准漏项,擅自加项或跳项操作。如确需改变操作顺序,应与现场核对无误并在不造成现场误解的情况下方可进行,并作好记录。执行指令票的过程中,如发生事故和设备障碍时,应立即停止操作,弄清情况,事故或障碍处理结束后,方可继续操作。同时,有效的利用技术手段(如调度指令票系统),也能一定程度上避免漏项、跳项操作。

4 不核对现场设备实际状态

过分的依赖调度自动化系统提供的信息,不核对

现场设备状态,也是造成误调度事故的原因。要加强对自动化设备的维护工作,发现自动化设备缺陷应立即处理,同时,应养成良好的操作习惯,操作前后均应核对现场设备状态,并在调度自动化系统上做相应调整。

5 错看申请盲目停送电

不按申请范围停电,擅自扩大、缩小停电范围,这种错误危害性是非常大,轻者造成设备损坏,损失负荷,重者造成群死群伤,必须引起高度重视。一是在在许可开工前,与工作负责人核对停电范围、安全措施,得到肯定答复后,方可许可开工。二是要加强停电申请的管理。检修申请应归类存放,对操作日期一致的且相互配合的申请,应放在一起,从而避免错看申请和漏看申请。笔者所在调度部门就采用了《停电申请汇总表》这种形式,将配合停电的相关申请汇总在一起,以规范的形式保障了人员避免失误。

6 对新设备不熟悉容易造成误调度

在新设备投运之前,一定要深入现场熟悉设备和图纸,核实设备的编号,明确设备管辖范围,确定运行方式,让每位调度员作到心中有数。设备发生异动后要对异动前后的情况做到心中有数并熟悉设备编号的变动情况。

7 设备运行情况不熟悉,导致方式安排不合理

收集和整理相关的运行、检修资料,掌握电网有功、无功电能情况,掌握电网接线方式及潮流分布,掌握电网保护及自动装置配置情况。在这之中应特别强调对线路输送负荷限额,同塔双回线路、T 接线分布情况的熟悉和了解。

8 不按规程处理事故和导致事故扩大

事故处理,必须按规程规定执行,要熟悉本电网的事故处理预案。事故处理时应有全局观,避免事故扩大。要防止越权处理,不要擅自作出超越调度权限

范围的决定。在处理重大事故时,必须向有关领导汇报,并得到批准。事故处理时,应防止联系不周导致的现场情况不明或现场汇报不准造成误判断。防止保护误投、误退,严格依照系统特殊运行方式中各项执行事故倒闸操作。

9 交接人员漏交、错交的相关事项

实施标准化交接班,按交接程序逐项进行交接。交接班时尽量避免倒闸操作,交接班时要严肃认真,在保证书面交接正确的同时,口头交接也要十分详细,交班人员应主动告之接班人员,当前运行方式下的危险点和操作注意事项,接班人员应详细审查。

(收稿日期:2008-03-06)

简 讯

电缆出线变电站 应用自动重合闸探讨

中压电缆网络中单相瞬时事故占较大比例,但一般规定不建议装设重合闸装置。为此,用 ATP-EMTP 程序分别建立了电缆出线变电站和架空出线变电站中发生单相短路事故的模型,仿真分析了它们进行重合闸操作时产生的过电压和过电流以为保证电缆出线变电站的安全运行提供较准确的参考。仿真表明电缆出线特别是线路较长时,变电站装设自动重合闸装置可能出现的最大重合闸过电压水平比常规架空出线变电站高,但该过电压水平在出线较多时将大大降低,在线路带负载运行时还会进一步减小,故电缆出线较多时采用重合闸装置不会带来危险的过电压。同时,短路时间愈短,电缆能承受的冲击电流愈大,要求装设的重合闸装置要兼顾暂时故障自行消失的时间和快速动作两个要素。另外,电缆系统中变压器需承受的冲击电流比架空线系统中大很多,若要采用重合闸装置则应严格校核变压器的动稳定特性。

凉山州小水电站并网调度问题的解决方案

陈平

(华北电力大学,北京 102206)

摘要:凉山州丰富的水资源使得未来几年内将加速发展中小水电站。着重分析了中小水电站发展中存在的一些技术管理问题,并提出了解决方案和措施。

关键词:小水电站;问题;解决方案

Abstract: Langshan area will accelerate the development of small-size hydropower stations in the future years because of its abundant water resources. Some technical management problems during the development of small-size hydropower stations are especially analyzed, and the solutions and measures are put forward.

Key words: small-size hydropower station; problems; solutions

中图分类号:TM622 文献标识码:B 文章编号:1003-6954(2008)03-0044-02

1 凉山州小水电发展概况

四川省是中国水资源最丰富的内陆省份,境内河流纵横,水能资源丰富。凉山州是四川省所辖地区中水能资源最丰富的地区之一,其理论蕴藏量为7 100万kW,技术可开发量为6 380万kW,占全省的57%。除去金沙江、大渡河、雅砻江外,凉山州境内中、小河流众多,其理论蕴藏量为1 478.6万kW,技术可开发量为1 000万kW。迄今为止,全州已开发河流100多条,已建成中小型水电站装机80万kW。仅2005年开工的中小水电站就达17座,总装机容量58万kW,目前在建的40万kW,待建的330万kW,拟建的260万kW。未来15年内,凉山将建成总装机容量800万kW的中小型水电集群。目前并入凉山州西昌电业局电网(以下简称国家电网)的小水电站,单机在6 000kW以下、总装机在10 000kW以下的近八十余座,总装机近14万kW。

2 凉山州小水电发展存在问题

凉山州并网小水电站大部分地处山区、远离城镇,装机规模较小,且均为径流式电站。基本上都是通过35kV、10kV线路与国家电网并网,且其并网线路上挂有多个小水电站和多台用户变压器。

1)绝大部分并网小水电站通讯设施不健全,也没有安装远动装置。不仅电网调度人员无法准确掌握小水电站运行状况,甚至连电网调度命令也无法正常

下达执行。

2)由于在小水电站的并网线路上挂有多台用户变压器,在每年的雷雨季节,遇其并网线路故障,往往是电网侧开关先跳闸,致使小水电站的发电机飞车产生过电压烧毁挂在线路上的用户设备(电视机、电冰箱、洗衣机、电灯泡等)。

3)小水电站检修维护工作流于形式,大多是头痛医头、脚痛医脚,即运行中什么设备有问题,就修一修,又继续运行。缺乏统筹安排、统一管理,结果运行日久后造成了主设备的损坏。

3 解决方案和措施

3.1 并网小水电站调度自动化系统解决方案

并网小水电站装机小、资金少,建设专用通信通道、建设站端RTU设备或监控系统的费用较高,是目前实现并网小水电站调度自动化管理的主要难点,电站投资者难以承受按常规模式建设并网小水电站调度自动化系统的费用。

根据实地调查,这些并网小水电所在地,中国移动公司的GPRS全球移动通信网络能覆盖半数以上小水电站,只有极少数小水电站中国移动公司的GPRS全球移动通信网络没有覆盖到。

3.1.1 基于GPRS通讯网络的解决方案

中国移动公司的GPRS(General Packet Radio Service,通用无线分组业务)移动数据网络具有设备费用低、覆盖率广、永远在线、按流量计费、高速传输、组网简单、迅速、灵活、防雷击等优点,近年来,在电力系统

已逐渐被用作远程抄表、电力负荷控制等的通信通道。

基于 GPRS 通讯网络的解决方案的主要特点是采用 GPRS 作为实时数据传输通道。

基于 GPRS 通讯网络的解决方案如图 1 所示。

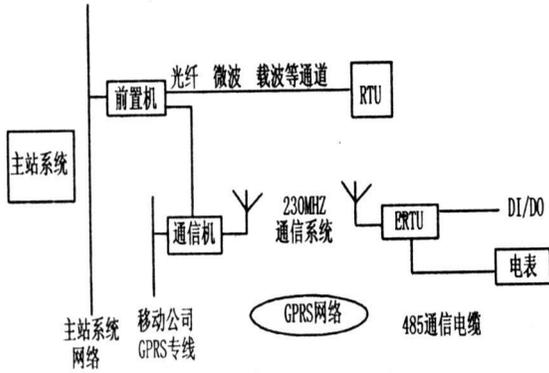


图 1 基于 GPRS 通讯网络的解决方案

3.1.2 基于 230 MHz 通讯系统的解决方案

在 GPRS 不能覆盖的地区,采用 230 MHz 通道。230 MHz 通讯频段是中国无线电管理委员会分配给电力系统无线电负荷控制的专用频段,在电力系统已被广泛用作远程抄表、电力负荷控制等的通信通道。

基于 230 MHz 通讯系统的解决方案的主要特点是采用 230 MHz 通讯系统,作为实时数据传输通道。

基于 230 MHz 通讯系统的解决方案如图 2 所示。

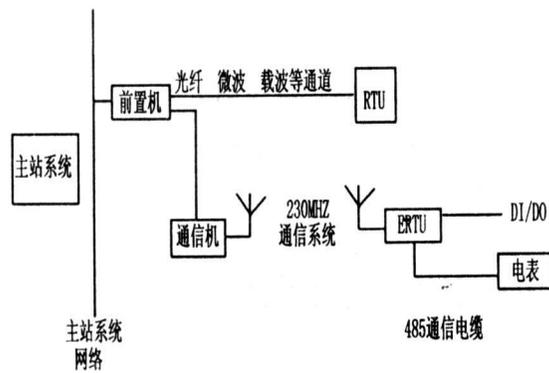


图 2 基于 230 MHz 通讯系统的解决方案

综上所述,提出了二种并网小水电站调度自动化系统实施方案。这二种方案的主要特点是建设费用低、实施简便迅速,基本上能满足调度自动化管理要求。

3.2 并网小水电站线路故障跳闸烧毁电力客户设备解决方案

1) 在小水电站发电机出口的母线上(其母线电压

一般为 400 V)安装高周过压保护装置,其电压取自靠电网侧,实现水能发电机飞车时在极短的时间内(一般其整定值取 0.3 s)切除发电机出口开关,并保证高周过压保护切除开关后,不至于因水能发电机飞车过电压而烧毁。

2) 加强小水电站侧继电保护装置整定值的整定计算工作,并在其动作时限的整定上保证比其并网线路大电网侧的保护动作时限短至少一个时限级差,以保证其并网线路故障时小水电站侧的开关首先跳开;同时,要求小水电站改造或加装保证保护装置可靠动作的直流操作电源。只有这样才能避免小水电站发电机飞车产生过电压烧毁挂在线路上用户设备的情况发生。3) 为了维护整个电网的安全稳定,必须加强对并网小水电站一、二次设备的检修管理。组建专门的小水电站维护检修队伍,做到每个小水电站每年搞一次年检预试,保证其一次设备的完好率和可靠性,尤其是二次设备(发电机、变压器、线路的继电保护装置,保护操作电源等)的完好率和正确动作率。

4 结束语

加强并网小水电站管理,对于规避电网安全风险、经营风险有着深远的现实意义。也是电力企业服务电力客户、服务发电企业、服务社会经济发展的具体体现。

参考文献

- [1] 黄定疆,等. 湖南电网中小水电情况及其对大电网的影响[J]. 电力技术经济, 2002, (5).
- [2] 王义军,等. 小水电调度自动化系统设计[J]. 电工技术, 2002, (11): 13-14.
- [3] 袁小布. 浙江省地方小水电现状分析及管理[J]. 浙江电力, 2000, (2): 22-24.
- [4] 戴卫国. 农村小水电开发亟待规范管理[J]. 湖北水力发电, 2005, (2).
- [5] 卢明兰. 农村水电开发利用中的问题与思考[J]. 小水电, 2007, (3).
- [6] 钮顺发. 农村水电站的技术改造和技术发展趋势[J]. 小水电, 2007, (3).

作者简介

陈平(1963—)。男,浙江诸暨人,华北电力大学在读工程硕士,高级工程师,长期从事电力系统继电保护、电网调度运行管理、变电检修管理等工作。(收稿日期:2008-02-10)

线路雷击事故与短路故障的识别方法

代颖, 郭涌涛, 邓武军

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644002)

摘要:准确识别雷电冲击发生在输电线路上的位置和频次,对线路防雷保护具有重要的意义。在现有行波测距装置的基础上,提出线路受雷击和出现短路故障的识别新方法。对非故障性雷击、故障性雷击以及短路故障进行了仿真,发现了不同故障类型下暂态电流在各频段能量分布的差异和行波的折反射规律,在此基础上提出了线路雷击与短路故障识别算法。用通用的电磁暂态仿真程序 EMTDC 进行的仿真证明了该放法的正确性。

关键词:线路雷击;短路故障;行波定位;小波包能量谱

Abstract: To identify the locations and times of lightning strike on transmission line is very important for the protection against lightning. Based on the existing traveling-wave fault locating device, a new identification method to detect the lightning strike on transmission line is put forward. The current signals caused by lightning strike without any fault or with fault and by common short-circuit fault are analyzed, and the characteristics are obtained; firstly, energy distributions of all frequency bands are different in the three transient processes; secondly, there is no reflection and refraction on the point of lightning strike that doesn't cause any fault. An algorithm to identify the lightning strike and the short-circuit faults is presented based on wavelet packet energy-spectrum and the transient traveling wave characteristics. EMTDC simulation results show that this method is right and feasible.

Key words: lightning strike; short-circuit fault; traveling wave location; wavelet packet energy-spectrum

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)03-0046-05

输配电系统中,线路距离长、跨度大、地域分布广,地理和气象条件都十分复杂,易受雷击。实际运行资料表明,雷击是造成线路停电事故的主要原因之一^[1],因此对进行线路工程人员和运行人员来说,判定电线路发生雷电冲击的次数和位置、识别故障性雷击、非故障性雷击与普通短路故障具有重要的理论价值和工程意义。

由于雷击的随机性,用传统的方法搜集与掌握雷电分布、雷电流概率等具有明显的局限性。雷电定位系统是检测线路雷击频次和位置的可行方法,但需沿线路建立大量探测点,投资较大,实际测距误差在 1~3 km,且测距误差存在明显的地区差异^[2,3]。行波测距装置通过检测故障暂态行波到达母线的时刻进行测距,定位速度快、准确度高,国内外已做了大量研究。由于雷击和短路均在输电线路产生暂态行波,因此行波测距装置不仅能对短路故障进行测距,还能检测线路上的雷击^[4~7]。

输电线路受雷击后,按后果的不同可分为:故障性雷击和非故障性雷击。由雷电冲击和短路产生的行波都能被行波测距装置所捕获,而现有行波测距装置并没有区分雷击和普通短路故障的算法,不能区分雷电和短路。文献[1]提出比较雷击前后电流变化来判断雷击是否导致故障,但受雷电流幅值和波头变化

的影响大,且未能进一步区分雷击与普通短路故障;文献[8]提出利用暂态行波波特征来区分不同性质的雷击与短路故障,但该法受雷电波形和短路相角的影响较大,不易整定区分判据。

利用现有行波测距装置检测与记录线路的扰动特征,通过对非故障性、故障性雷击以及普通短路故障的电流行波信号特征的提取,提出了可应用于测距装置的雷击有普通短路故障识别方法。对某实际线路用 EMTDC 进行仿真,结果证明该方法可行,可用于实际线路中。

1 雷击过电压与雷电模型

1.1 线路雷击过电压

雷击过电压可分为:直击雷过电压和感应雷过电压。按照雷击线路部位的不同,直击雷过电压又可分为两种情况。一种是雷击线路杆塔或避雷线时,引起绝缘闪络,使导线出现过电压,通常称为反击。另一种是雷电绕过避雷线击于导线,直接在导线上引起过电压,称为绕击。无论哪种形式的雷击,在线路上的传播方式及产生的波形都是相同的^[9]。感应雷过电压,是雷击线路附近大地,由于电磁感应在导线上产生的过电压,其幅值一般不会超过 500 kV。

运行经验表明,直击雷过电压对电力系统的危害最大,感应雷过电压只对 35 kV 及以下的线路有威胁^[9]。因此下面只考虑直击雷过冲击的影响。

1.2 雷电模型

实测表明,雷电流的波头时间在 1~5 μs 范围内,平均约为 2~2.5 μs;雷电流波长时间一般在 20~100 μs 范围内,平均约为 50 μs。中国防雷计算一般采用波头为 2.6 μs,波长为 50 μs 的标准雷电冲击波形,记为 2.6/50 μs。采用标准双指数雷电模型,如式(1)。

$$i = AI_L(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

2 雷电冲击与故障时的行波特征分析

线路雷击或发生故障时,在故障点将产生向两侧运动的行波。当线路上的行波传播且到达两个不同波阻抗线路的连接点或到达接有集中参数的节点时,行波就会发生折射与反射。如图 1 所示。

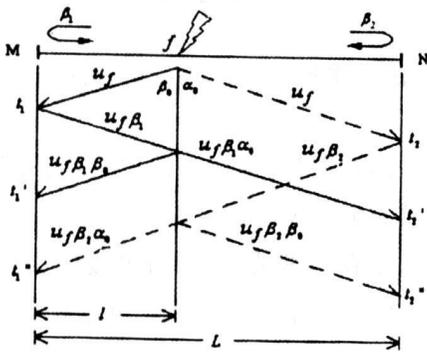


图 1 行波网格图

当发生故障性雷击或短路故障时,在故障点波阻抗不连续,在故障点会出现行波的折射与反射。在一定的时间内,母线处检测到的行波信号中含有雷击点的初始行波、故障点反射行波和母线的反射行波。故障发生在线路前半段时(相对于近端母线),故障点的反射波先到达;故障发生在线路后半段时,对端母线的反射波先到达。当发生非故障性雷击时,由于没有引起故障,雷击点的波阻抗连续,行波在雷击点没有折反射,故信号中无反射行波。

对某 500 kV 线路,如图 2,进行 EMTDC 仿真。线路长 180 km,用频率相关模型,采样频率 100 kHz;雷电流采用标准 2.6/50 μs 波形,对应非故障雷击和故障性雷击,雷电流幅值分别取 5 kA 和 25 kA;雷击和故障点距 M 端 60 km,取 2 ms 的数据进行分析。

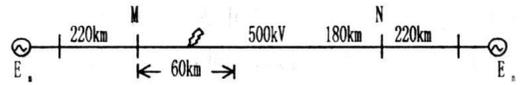


图 2 500 kV 仿真系统线路模型

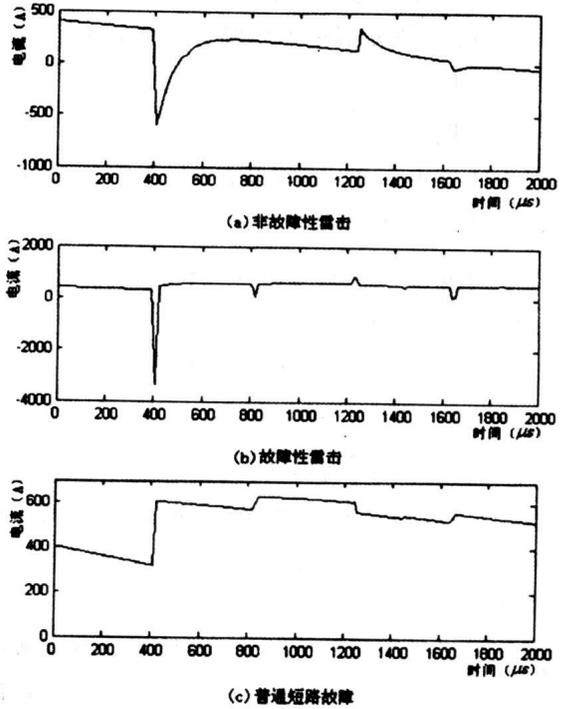


图 3 三种暂态过程的电流行波信号

图 3 给出了雷击和短路故障发生在线路前半段时,相应母线处的行波测距装置检测到的三种暂态过程的电流行波信号。

从图 3 可见,当发生故障性雷击或普通短路故障时,线路近端母线处捕获的前两个电流行波波头分别为:雷击或故障的初始行波和故障点的反射行波;当发生非故障性雷击时,由于在雷击点没有行波的折反射,则前两个行波波头分别为:雷击初始行波和对端母线的反射行波。据此可通过比较线路近端母线处第二个行波波头的性质,区分非故障性雷击与故障性雷击或普通短路故障。

3 暂态过程的小波包能量谱分析

3.1 信号的小波包分解及小波包能量谱

小波变换的多分辨率分析实际上是对采样信号进行二进频带划分,将信号分解为细节部分 W_1 (高

频)和大尺度逼近部分 V_1 (低频),然后将大尺度逼近部分 V_1 进一步分解,如此重复就可以得到任意尺度上的逼近部分和细节部分,即: $V_0 = V_1 + W_1 = V_2 + W_2 + W_1 = V_3 + W_3 + W_2 + W_1 = \dots$ (2)

(2)上式可见,小波分解没有对信号高频部分进行再分解,因此不能提高高频部分的频率分辨率,而小波包正好弥补了这一不足,它比小波分解具有更好的局部化性能,使分解更加精细。引入符号:

$$\begin{cases} U_j^0 = V_j \\ U_j^1 = W_j \end{cases} \quad j \in Z \quad (3)$$

因为 $V_j = V_{j+1} + W_{j+1}$, 所以有:

$$U_j^n = U_{j+1}^{2^n} + U_{j+1}^{2^n+1}, \quad n \in Z^+ \quad (4)$$

小波包分解的一般表达式为:

$$\begin{cases} W_j = U_{j+1}^2 + U_{j+1}^3 \\ W_j = U_{j+2}^4 + U_{j+2}^5 + U_{j+2}^6 + U_{j+2}^7 \\ \dots \\ W_j = U_{j+k}^{2^k} + U_{j+k}^{2^k+1} + U_{j+k}^{2^k+2} + \dots + U_{j+k}^{2^k+2^k-1} \end{cases} \quad M \quad (5)$$

可见,小波包变换将细节空间 W_j 进一步分解,将频带 j 又按二进方式细分为 2^k 个频带,提高了频率分辨率。

对信号进行小波包变换后,各尺度小波系数的平方和可以表示信号在这个频带内的能量^[11]。对任一频带内的信号,其小波包变换结果为 $\{w(k) | k=1, 2, \dots, L, n\}$, n 为该频带信号序列长度,其能量为:

$$E = \sum_{k=1}^n |w(k)|^2 \quad (6)$$

小波包能量谱分析是将信号的能量分解在频率范围相同的不同的频率空间。根据信号在不同频段上的能量分布特点,对信号的特性进行分析,从而实现不同暂态信号的有效识别。

3.2 线路各种暂态信号的小波包能量谱分析

电力输电线路在分别遭受非故障雷击、故障性雷击和短路故障后,由于其暂态电流信号之间存在较大的差异,信号在不同频率段的能量分布也有较大的不同。利用小波包分解的方法来分析研究上述三种暂态电流信号在不同频率段的能量分布特点。考虑到需满足小波的光滑性好和支撑集短的要求,选用 DB8 小波进行 4 层小波包分解。对应 100 kHz 的采样频率,则分析的频率范围为 0~50 kHz,按照小波包频率二分原理,4 层小波包分解将整个分析频带划分为 16 个频段,每个频段的宽度为 3 125 Hz。小波包分解后各个频带的宽度相同,按照各个频带能量的比例关系

作出一系列直方图,使各直方图的高度和为 1,那么,该直方图就表示出了各频带能量在总能量中的比例关系。图 4 给出了图 3 所示的三种暂态电流信号的小波包能量谱分析结果。

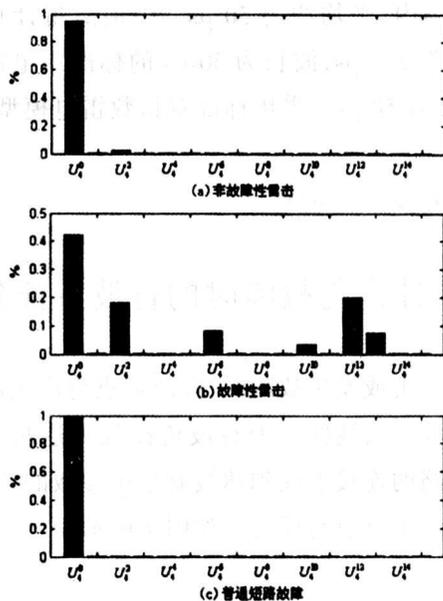


图 4 暂态电流信号的小波包能量谱

输电线路发生非故障性雷击时,行波测距装置所检测到的暂态电流包含了工频分量和雷击注入的高频分量。由于在这种情况下,雷电流幅值通常比较小,那么在 2 ms 的时间窗内,暂态电流高频分量的能量在信号总能量中所占的比重很小;而低频分量(主要是 0~3 125 Hz)则占有相当大的比重,如图 4(a)所示。

发生普通短路故障时,暂态电流主要由短路点的附加工频电源和系统的工频分量组成。此时,电流信号的低频分量的能量远远大于高频分量,从图 4(c)可看出,0~3 125 Hz 频段的能量占有总能量的 90% 以上。

发生故障性雷击后,暂态电流同时具有短路故障和非故障性雷击的特征。然而由于此时的雷电流幅值特别大,同时又伴随有雷击故障时的截波作用,这使 3 kHz 以上的高频能量占有相当大的比重,而低频段的能量所占比重有了明显减小,对于本例在 40% 左右。

大量仿真分析还发现,对于雷击线路而言,各频段能量所占的比重与雷电流幅值的大小也有一定的关系。雷电流幅值越大,高频段能量所占的比重也越

大,相应低频段能量的比重则减小。而普通短路故障的能量分布特点则基本不受接地电阻大小、故障相角和故障类型等因素的影响,低频能量所占比重都在95%以上。

通过以上分析可以看出,分析比较不同暂态信号能量在各个频段的分布情况,可以对输电线路的故障性雷击和普通短路故障进行有效识别。

4 雷电冲击与故障的识别算法

上述分析表明,在非故障性雷击、故障性雷击和普通短路故障情况下,行波测距装置检测的电流行波信号呈现不同特征,同时电流信号各频段的能量分布存在差异,据此可以识别出雷电冲击与普通线路故障,识别步骤如下:

步骤1,判别线路是否发生故障。利用双端行波测距装置,在同步采样的条件下,通过比较初始行波的到达先后时刻,判断出离扰动点近的一端母线。例如,若行波初始波头到达两端母线的时刻 $t_N > t_M$,则M端母线离扰动点近。分析近端母线处测得的电流行波信号,利用文献[12,13]介绍的比较行波波头极性的方法,判定测距装置检测到的第二个行波波头为对端母线反射的行波还是故障点的反射行波。若是对端母线的反射行波波头,则线路发生了非故障性雷击,将此雷击记录下来;若是故障点的反射行波,则线路某处发生故障,识别算法自动进入下面的步骤。

步骤2,判别线路发生故障性雷击还是普通短路故障。对所测得的电流信号进行4层小波包分解,分析信号的小波包能量谱,如果信号低频段(0~3 125 Hz)的能量在总能量中的比重 k 满足 $k < k_0$,则判定该线路发生故障性雷击,将此雷击记录下来;如果 $k > k_0$,则判定线路发生的是普通短路故障。 k_0 为设定的阈值,考虑到雷击的不确定性,不同雷击时低频能量的比重变化相对较大,而对于系统的短路故障,其低频能量所占的比重较为稳定,所以 k_0 的值应取偏大些,这里取 $k_0 = 0.9$,大量仿真表明,这个阈值是合适的。此外,分析表明选取2 ms的信号数据进行分析是合适的。若信号时间窗选得太长,则由于高频分量衰减较快,低频信号能量比重增加,将会导致识别出错。

5 仿真分析及结果

对图2系统进行EMTDC仿真,仿真数据处理通

过MATLAB完成。雷击选取不同的雷电流幅值和波形进行仿真,普通短路故障的仿真也分别在故障类型不同的条件下进行(故障过渡电阻为10,故障初始相角为30°)。

6 结论

1)现有行波测距装置能有效地检测到输电线路上的各种雷击,若其能区分雷击与普通短路故障,则可用于线路雷击数据的检测与记录。

2)与故障性雷击和短路故障不同,非故障性雷击的电流暂态行波中不存在故障点的反射行波波头;进行小波包能量谱分析后发现,普通短路故障时低频信号能量所占比发生故障性雷击时大得多。利用这两点特征,可对线路各种雷电冲击与短路故障进行识别。

3)EMTDC仿真分析表明,该方法能有效区分线路的各种雷击和短路故障,可用于行波测距装置。

参考文献

- [1] 董杏丽,葛耀中,董新洲.行波保护中雷电干扰问题的对侧[J].中国电机工程学报,2002,22(9):74-78.
- [2] 赵文光,陈家宏,张勤,王光财.新的雷电综合定位系统的定位计算[J].高电压技术,1999,25(4):66-68.
- [3] 樊灵孟,李志峰,何宏明,等.雷电定位系统定位误差分析[J].高电压技术,2004,30(7):61-63.
- [4] Dipankar C, N K Kishore, Avinash K S, et al. A wavelet multiresolution-based analysis for location of the point of strike of a lightning overvoltage on a transmission line [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4):1727-1733.
- [5] Harry L, Abdul M M. GPS traveling wave fault locator systems: Investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3):1214-1223.
- [6] Robertson D C, Camps O I, Mayer J S, et al. Wavelets and electromagnetic power system transients [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2):1050-1058.
- [7] 范春菊,张兆宁,郁惟镛.小波方法在超高压输电线路故障测距中的应用[J].电网技术,2003,27(8):50-53.
- [8] 段建东,张保会,郝治国,等.超高压线路暂态保护中雷电干扰与短故障的识别[J].电力系统自动化,2004,28(18):30-35.
- [9] 张纬钺,何金良,高玉明,过电压防护及绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [10] 程正兴.小波分析算法与应用[M].西安:西安交通大

- 学出版社, 1998.
- [11] 段建东, 张保会, 周艺. 超高速暂态方向继电器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 7-12.
- [12] 覃剑. 输电线路单端行波故障测距的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 65-70.
- [13] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76-80.
- [14] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.
- [15] 李海锋, 王刚, 赵建仓. 输电线路感应雷暂态特征分析及其识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 114-119.
- [16] 严居斌, 刘晓川, 杨洪耕, 等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 16-18.
- 作者简介**
- 代颖(1969-), 男, 本科毕业, 工程师, 长期从事电力系统生产运行管理工作。
- 郭涌涛(1974-), 男, 本科毕业, 工程师, 长期从事线路运行与管理工作。
- 邓武军(1967-), 男, 硕士学位, 高级工程师, 长期从事电力系统研究和运行、管理。 (收稿日期: 2008-02-10)

云南变压器电气股份有限公司简介

云南变压器电气股份有限公司于1999年1月4日在云南变压器厂(建于1936年)的基础上成立, 属国有大二型企业、国家二级企业, 是国家定点生产220 kV及以下电压等级的变压器专业制造厂家之一。

云南变压器电气股份有限公司占地面积116 126 m², 现有职工750人, 其中工程技术人员113人。公司技术力量雄厚, 拥有一批从事变压器研制工作三十年以上, 经验丰富的工程师、技术人员及管理人员。

公司拥有各类设备400台(套), 其中引进的生产线和专业加工关键设备68台(套)。先进设备有: 从德国乔格公司引进的硅钢片自动纵、横剪切线和德国海德里希公司的300 m³煤油气相干燥设备、美国数控高速冲床、美国数控高速绕线机、意大利数控箔式绕线机、先进的表面处理车间、数控等离子切割机、500 t折弯机、立式绕线机、片式散热器生产线、160 t吊车、2 800 kV冲击电压发生器、2 000 kVA中频试验机组、7 500 kVA工频试验机组及其全套试验设备。

公司目前年生产能力600万kVA, 主要生产和经营10~240 000 kVA/10~220 kV电力变压器、铁道电气化用牵引变压器、特种变压器、H级绝缘干式变压器及组合式变压器, 计有十几大系列, 650多个规格容量, 全部采用国家标准和等效采用国际IEC标准。由法国TRANSFIX公司引进的专利技术, 经消化吸收, 二次开发出高原型H级绝缘“赛格迈(SECURAMID)”干式变压器, 达到国际20世纪90年代末先进水平, 投放市场后, 即获得用户的好评和欢迎, 且已通过两部鉴定。

为满足海拔4 500 m及以下高原地区的环境要求, 公司特别设计了高原型系列变压器, 该类变压器普遍运行于云、贵、川以及青海、西藏等地区, 并赢得了良好的信誉; 此外, 公司还专门研制了耐雷变压器、矿用变压器、农用变压器和最新型的S9、S10、S11系列全密封配电变压器系列产品。

云南变压器电气股份有限公司多年来十分注重计算机应用与管理, 在全国同行业中处于领先地位。目前拥有计算机100多台, CAD及CAPP已广泛应用于产品设计及工艺、企业管理信息系统, MIS已成熟应用多年, 实现了管理信息联网、自动控制、绘制图表和数据处理。目前, 公司四分之一的员工普及了计算机技术。

公司在巩固国内市场的同时, 还积极开拓国际市场, 且在多次国际招标中中标, 产品出口巴基斯坦、缅甸、越南、也门、苏丹、喀麦隆等国家和地区(其中1988年一次就出口巴基斯坦1850台小型全密封配电变压器)。

公司已取得ISO9001质量体系认证, 但此认证仅是一个起点。公司将本着“用户至上”的原则及“品质为本、不断创新、持续改进、增进顾客满意”的企业质量方针, 积极向广大用户提供技术先进、性能优良、质量可靠、价格合理的产品及周到、及时的售前、售后服务; 同时, 公司坚持以“满足客户的需求”为中心, 致力于与客户共同开发、研制新产品, 使公司的产品具有广泛的适用性, 且能更好地满足广大客户的需求; 另外, 公司也期望与广大海内外客商就产品销售、技术合作和资金引进等方面建立长期友好的合作关系。

基于小波神经网络的无刷同步发电机旋转整流器故障诊断研究

梁杉¹, 刘念², 岳良顺³

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学测试与控制工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 无刷励磁系统中旋转整流器因工作环境恶劣, 发生故障时故障信息难以提取, 因而故障诊断一直是一个难点, 成为制约该励磁方式发展的障碍之一。针对大型无刷汽轮发电机故障诊断需要, 提出应用小波神经网络对旋转整流器故障进行诊断, 通过对旋转整流器的故障信号的频谱分析, 提取故障信息频域特征量作为学习样本, 通过训练使构建的小波神经网络能够准确反映频谱特征量和故障之间的映射关系, 从而准确对故障进行诊断。提出了比较精确的数学模型, 提高了旋转整流器故障的诊断能力和诊断的准确性。

关键词: 小波神经网络; 旋转整流器; 故障诊断

Abstract: The fault diagnosis of rotary rectifier is always difficult because of its hard working conditions and inconvenience of fault information extraction, thus it is becoming one of the obstacle of the development of brushless excitation system. According to fault diagnosis of large brushless generator, a new method using wavelet neural network is proposed to be applied in fault diagnosis. By analyzing the spectrum of fault information, the fault information spectrum eigenvalue is extracted to be the study sample. After the wavelet neural network is trained with the sample, it can express the relationship of spectrum eigenvalue and fault precisely, therefore the diagnosis is done accurately. Precise mathematics model is proposed, and the ability and accuracy of fault diagnosis of rotary rectifier are improved.

Key words: wavelet neural network; rotary rectifier; fault diagnosis

中图分类号: TM311 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)03-0051-03

20 世纪 60 年代就已经发展起来采用无刷励磁的同步发电机, 无刷励磁系统取消了滑环和碳刷, 消除了火花和噪声, 使用和维护比较简单, 提高了运行的可靠性。但是旋转整流器要承受离心力和电力作用, 故障发生率比较高, 而且与外界没有直接的电联系, 因而故障难以检测和诊断^{[1]-[5]}。采用小波网络的分析法对无刷励磁系统进行故障分析, 可以有效提高故障的诊断能力。

小波分析法因其基函数能够自动伸缩和平移, 在时域和频域都有良好的分辨能力, 可以有效地应用于随机信号的分析, 成为了故障诊断领域信号处理的有力工具, 小波神经网络是近年来发展起来的一种数学方法, 它将小波变换良好的时频域局部化特性和神经网络的自学习能力相结合, 具有很强的逼近能力、容错能力和模式识别能力^[6]。以 Morlet 小波基做为激励函数的小波神经网络对旋转整流器故障信号进行分析, 并建立了故障在线实时检测所需的总体系统结构。

1 小波神经网络基本算法

小波网络实际上是用非线形的 Morlet 函数取代了传统的非线形 Sigmoid 函数, 因为 Morlet 函数为余弦调制的高斯小波, 有时域频域同时分辨率高的特点^[7]。其信号表述是将选取的小波基进行线性叠加实现。

设输入层单元数为 L , 第 n 个样本的输入为 $X^n = \{x_i^n\}, i=1, 2, \dots, L$; 输出层单元数为 S , 网络的输出为 $Y^n = \{y_k^n\}, k=1, 2, \dots, S$; 对应的目标输出为 $D^n = \{d_k^n\}, n=1, 2, \dots, N$ (N 为样本总数), 隐含层单元数为 M , 第 j 个小波单元输出到第 i 个输出节点的权值函数为 W_{ij} ; 输入层第 i 个节点到隐含层第 j 个节点的权值函数为 $h\left(\frac{i-b_j}{a_j}\right)$, $h\left(\frac{i-b_j}{a_j}\right)$ 实际上是一个含有尺度因子 a_j 和平移因子 b_j 的小波函数, 其母小波表达式为 $h(t) = \cos(1.75t)\exp(-t^2/2)$; 从而小波神经网络的模型可以表示为:

$$Y_i^p = \sigma \left[\sum_{i=1}^m W_{ij} \sum_{k=1}^l x_k^p h \left(\frac{i-b_j}{a_j} \right) \right], i=1, 2, \dots, S \quad (1)$$

式中 $\sigma(u)$ 为 Sigmoid 激活函数。

$$\text{定义误差函数为 } E = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^S (d_k^n - y_k^n)^2 \quad (2)$$

给小波网络提供多组输入数据,通过共轭梯度法不断调整权值函数,以实现误差最小化。并求得 W_{ij} , a_j , b_j 的修正。

E 对各参量的梯度:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^S \sum_i (d_k^n - y_k^n) \sigma' (u_k^n) x_i^n \cdot \cos$$

$$(1.75 t_i') \exp(t_i'^2/2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_j} = - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^S \sum_i (d_k^n - y_k^n) \sigma' (u_k^n) x_i^n W_{ij}$$

$$[1.75 \sin(1.75 t_i') \exp(-t_i'^2/2) / a_j + \cos(1.75 t_i')$$

$$\exp(-t_i'^2/2) t_i' / a_j]$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_j} = - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^S \sum_i (d_k^n - y_k^n) \sigma' (u_k^n) x_i^n W_{ij}$$

$$[1.75 \sin(1.75 t_i') \exp(-t_i'^2/2) / a_j + \cos(1.75 t_i')$$

$$\exp(-t_i'^2/2) t_i' / a_j]$$

在最小化过程中为加速收敛,引入步长因子 η 和动量因子 α , 最终求得迭代过程中的修正公式为:

$$W_{ij}(n+1) = W_{ij}(n) - \eta_w(n) \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} + \alpha \Delta W_{ij}(n)$$

$$a_j(n+1) = a_j(n) - \eta_a(n) \frac{\partial E}{\partial a_j} + \alpha \Delta a_j(n)$$

$$b_j(n+1) = b_j(n) - \eta_b(n) \frac{\partial E}{\partial b_j} + \alpha \Delta b_j(n)$$

式中 $n-1$, ΔW_{ij} , $\Delta a_j(n)$, $\Delta b_j(n)$ 为 n 次与 $n-1$ 次迭代变化量。

当 E 小于设定值时,误差满足系统要求。迭代停止,训练结束。

2 旋转整流器故障诊断的模型构建

2.1 旋转整流器的故障诊断

无刷励磁同步发电机转子旋转整流器工作状态的在线实时监测需要转子侧旋转整流器的相关信息。由于同步发电机转子取消了滑环和电刷,转子侧旋转整流器的常见故障波形特征(故障特征)的提取无法直接完成。一种获取转子旋转整流元件故障特征的方法是直接采用与同步发电机同轴旋转的交流励磁机的定子励磁线圈作为探测线圈,其优点是省去了设计、安装和维护专用探测线圈的工作,而且便于现场

采集信号数据,同时转子信号较强,且含转子故障信息量大^[8]。

在交流励磁机定子励磁线圈上并联电容 C1 和 C2,交流励磁机转子电枢电流产生的电枢磁场必然切割其定子励磁线圈,并感应电势,然后通过电容 C1 和 C2 分压,只需采集带有转子故障信息的电容两端的电压波形,进行频域分析,分解出不同幅值的各次谐波分量,作为故障诊断信号。经过处理送交小波网络进行诊断^{[9][10]}。

2.2 网络系统结构

根据旋转整流器的结构和经常发生的故障确定网络的输出端对 3 相旋臂是否出现了故障进行识别,若出现故障则输出为 0.9,正常工作则输出 0.1,故输出结点为 3 个。网络输入层有 6 个神经元分别对应感应到的基波到 6 次谐波故障信息。隐含层有 15 个单元。

2.3 网络训练

训练样本的选择对于故障识别的准确性来说是一个很关键的问题,训练数据既要使网络易于识别,又要涵盖尽可能多的故障类型以增强网络对不同故障的适应能力^[11]。在大型电机厂的试验中,用惠普数字分析仪从交流励磁机的定子上收集了一组故障数据,共 24 个故障样本,作为网络训练的样本集。训练之前必须对原始数据进行预处理,在每组样本中选取幅值最大的作为本组数据的基值 1,其他谐波与基值的比值作为本次谐波的训练分量值。这样可以有效的表达各次谐波所占的比例^[12]。训练样本如表 1 所示。

设定目标误差的平方和为 0.01,训练到 365 步收敛。训练结束后对其中 5 组故障数据进行识别,最终网络的输出结果如表 2 所示。

从输出结果可以看出,本文构建的小波网络训练后的输出数据与目标结果差别很小,故障识别准确,抗干扰能力和联想能力强,不受故障类型变化的限制。可以满足旋转整流器故障诊断的需要。

3 结论

同步发电机旋转整流器发生故障时,交流励磁机电枢电流的大小和波形都会发生变化,引起电枢磁场的变化,并在定子绕组中感应一系列的谐波电势,感应出的谐波电势能准确反映旋转整流器的工作状

表1 训练样本和对应故障

| 样本集 | 定子信号的各次谐波分量 | | | | | | 故障类型 | | |
|-----|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 基波 | 2次谐波 | 3次谐波 | 4次谐波 | 5次谐波 | 6次谐波 | A臂故障 | B臂故障 | C臂故障 |
| 1 | 0.29 | 0.09 | 0.22 | 0.12 | 0.25 | 1.00 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 2 | 0.58 | 1.00 | 0.35 | 0.15 | 0.26 | 0.11 | 0.1 | 0.9 | 0.1 |
| 3 | 1.00 | 0.56 | 0.53 | 0.32 | 0.24 | 0.14 | 0.9 | 0.9 | 0.1 |
| 4 | 1.00 | 0.87 | 0.61 | 0.21 | 0.14 | 0.09 | 0.1 | 0.9 | 0.1 |
| 5 | 1.00 | 0.22 | 0.28 | 0.35 | 0.27 | 0.15 | 0.9 | 0.9 | 0.1 |
| 6 | 0.14 | 1.00 | 0.07 | 0.26 | 0.27 | 0.45 | 0.9 | 0.1 | 0.1 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 24 | 1.00 | 0.87 | 0.44 | 0.21 | 0.28 | 0.15 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |

表2 检测数据和实际输出结果

| | 检测数据 | | | | | | 目标结果 | | | 实际输出结果 | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|--------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.19 | 0.06 | 0.07 | 0.04 | 0.26 | 1.00 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.096 | 0.098 | 0.092 |
| 2 | 1.00 | 0.31 | 0.62 | 0.39 | 0.24 | 0.12 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.942 | 0.952 | 0.938 |
| 3 | 0.58 | 1.00 | 0.35 | 0.15 | 0.26 | 0.11 | 0.1 | 0.9 | 0.1 | 0.089 | 0.909 | 0.096 |
| 4 | 1.00 | 0.22 | 0.28 | 0.35 | 0.27 | 0.15 | 0.9 | 0.9 | 0.1 | 0.904 | 0.913 | 0.089 |
| 5 | 0.14 | 1.00 | 0.07 | 0.26 | 0.27 | 0.45 | 0.9 | 0.1 | 0.1 | 0.988 | 0.120 | 0.101 |

况^[13]。构建小波网络对谐波电势进行分析,能准确辨别旋转整流器各桥臂是否处于故障状态,方便旋转整流器的维护和修理,有效提高了旋转整流器故障的检测和诊断水平^[14]。

参考文献

[1] 渭河发电有限公司. 1999年生产技术组织措施计划 1999.3.

[2] 程道来,等. 国内电站故障诊断系统的现状及发展方向[J]. 动力工程, 1999, 19(1): 53-57.

[3] 周克毅,邵爱菊等. 国外电站性能监测与诊断概况[J]. 动力工程, 1999, 19(1): 58-63.

[4] 龚春英,严仰光. 旋转整流器式无刷交流发电机转子故障可诊断性研究[D]. 南京:南京航空航天大学.

[5] 侯新国,夏立,吴正国,赵永玲. 基于小波和神经网络的异步电机转子故障诊断方法研究[J]. 数据采集与处理, 2004, 19(1): 32-36.

[6] 付家才,姜喆. 小波变换技术在电机故障诊断中的应用[J]. 黑龙江科技学院学报, 2006, 16(6): 350-355.

[7] 彭文季,罗兴铸. 基于小波神经网络的水电机组震动故障诊断[J]. 水力水电学报, 2007, 26(1): 124-129.

[8] 刘念. 旋转整流器故障的神经网络识别[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(10): 31-35.

[9] 王海田,刘念,冉立,党晓强,刘靖. 无刷同步发电机故障实时诊断[J]. 中国测试技术, 2003, 1(1): 14-18.

[10] 刘念,谢驰. 无刷同步发电机旋转整流器故障检测新方法研究[J]. 电工技术杂志, 2000, 6(8): 16-19.

[11] 姚云波,夏立. 基于神经网络的感应电机故障诊断分类决策方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(1): 24-29.

[12] 刘念,谢驰. 无刷励磁同步发电机旋转整流器故障的模糊神经网络诊断[J]. 继电器, 2003, 31(8): 8-12.

[13] 沈艳霞,纪志成,袁世鹰. 电机故障诊断的人工智能方法综述[J]. 微特电机, 2004(2).

[14] 陈宇锋. 无刷励磁机旋转二极管非导通检测系统故障分析[J]. 江西电力, 2004, 29(4): 34-38.

作者简介

梁杉(1979-),男,研究生,研究方向:电机与电器故障诊断。

刘念(1956-),男,博士,教授,研究方向:电力设备状态监测、故障诊断新技术。

岳良顺(1983-),男,研究生,研究方向:电机与电器故障诊断。

(收稿日期:2008-04-10)

有源电子式电流互感器高压侧电源的研究

郭吉伟, 梁 魁, 董凌凯

(三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 电子式电流互感器已经成了国内外研究的热点, 其中有源电子式互感器高压侧电路的供能问题则是研究工作中的关键技术。提出了一种用补偿线圈和充电电池相结合的方法对母线电流取能方式进行改进。实验结果表明, 该电源能够满足高压侧电子电路的供能要求。

关键词: 电子式电流互感器; 有源式; 储能电池; 高压侧电源

Abstract: Electronic current transformer has been the hot spot of the research at home and abroad, and the current measurement of active electronic current transformer at high potential side is the key problem in the research. A new method combining compensation coil with rechargeable batteries is proposed to improve the method of taking power from busbar current. The results show that it can satisfy the requirements of the high potential circuit power supply.

Key words: electronic current transformer; active; energy storage battery; high potential circuit power supply

中图分类号: TM45 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)03-0054-03

电流互感器是电力系统中的重要设备, 随着电力工业的不断发展及电网电压等级的不断提高, 对电流的测量要求也在不断提高, 传统互感器的问题日益突出^[1]。新式的电子式互感器应运而生, 电子互感器可分为有源式和无源式两种。有源式指传感头部分采用传统的传感原理, 并利用光纤传输数据的电子式互感器, 由于光纤只能够传输数字信号, 所以必须在高压侧对传感头的输出信号进行模拟量与数字量的转换, 这就势必要设计相应的电子电路, 因而也就带来了电路的供能问题, 这是有源式互感器研究中的难点和关键技术^[2]。下面介绍了一种用补偿线圈和充电电池相结合的方法对母线电流取能方式进行改进的方案。

1 设计原理

由法拉第电磁感应定律可知, 电源二次侧的感应电动势为

$$E = \sqrt{2} \pi f N_2 \Phi_m \times 10^{-8}$$

式中: f 为正弦波频率; N_2 为二次侧线圈绕组匝数; $\Phi_m = B_m S$ 为输电线传输电流在变压器铁心激磁产生的磁通量。

设计时主要应考虑以下两个问题:

- (1) 在系统电流很小的时候能够提供足够大的功率, 以驱动处于高压端的电子线路。
- (2) 在系统出现短路大电流时, 能吸收多余的能

量, 给电子线路提供一个稳定的电源, 其本身也要保证不因电动力而损坏。

为解决上面两个难题, 设计了图 1 为实际的电路设计原理性线路图^[3,4]。

图 1 中 L_1 为主线圈, L_2 为补偿线圈。主线圈提供直流稳压工作电源, 补偿线圈主要用于控制主线圈的电压应该在一定的范围。充电电池主要作用是短期断电或小电流情况下充电电池投入供电。在电力系统正常运行的情况下, 是主线圈提供直流电源。当输入电压超过 8 V 时检测电池温度和电压, 如果温度正常电压过低则进入充电状态, 如果两个条件有一个不满足不能进行充电。当发生故障或其它原因使主线圈输入电压会超过后续电路所能调节的某一个值时二极管 VS 会导通, 电流会使磁控开关闭和, 补偿线圈回路导通反向激磁, 从而降低铁心中的磁通量, 达到降低主线圈电压的目的。当发生断路器跳闸或小电流情况时, 主线圈输入电压不能提供高压侧电路所需的能量时就切换到充电电池供电, 这样就很好的解决了小电流是不能正常供电的问题。实际应用中如果大电流过大, 可设计多个补偿电路, 进一步降低激磁电流值。

2 设计的实现

2.1 铁心材料的选取

铁心材料的选取一直是取电的一个重要问题, 现

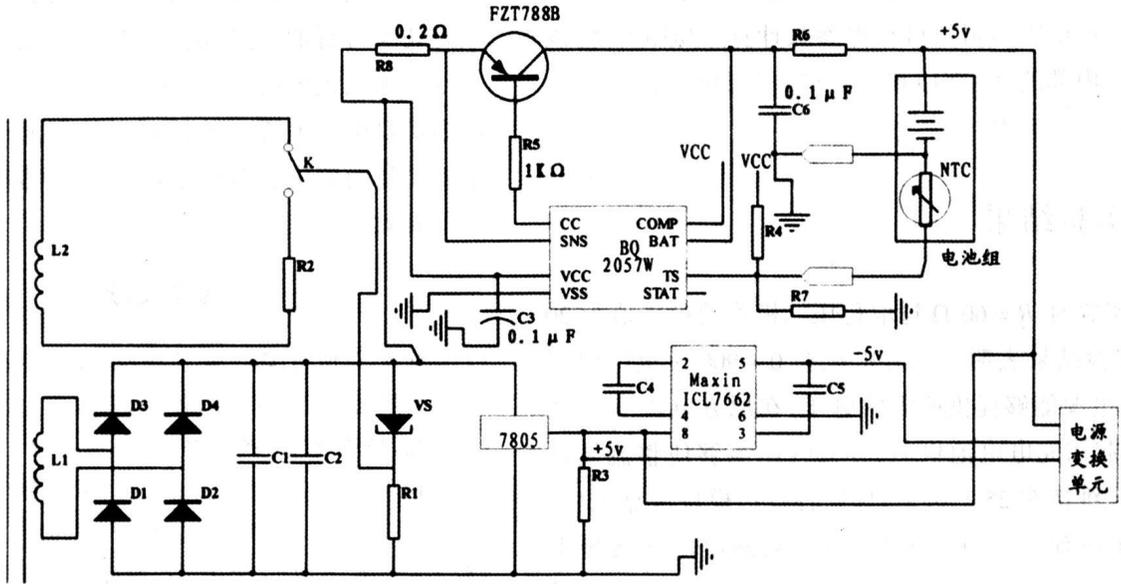


图1 电源设计原理性线路图

在主要用硅钢材料,非晶材料和莫坡合金做铁心。根据高压侧电流的特点选取铁心,数据证明,非晶材料和其他两种相比有更多优点^[5,6]。同时注意选取合适的B-H曲线工作点,使电源能够在大的原方电流波动范围内正常供电。

2.2 主线圈和补偿线圈匝数的选取:

为了在小电流的情况下感应出所需电压,根据公式 $P = EI = \sqrt{2} \pi f B S N_2 I$

(S为铁心截面积, I一次侧电流幅值)

这需要加大铁心截面积或增加线圈匝数,匝数太少时感应电压下降,太多时负载能力又会下降,所以实际制作时主绕组为62匝。由电磁感应定律可知,补偿线圈的匝数越多越好,但制作时一定要根据自己需要。因为匝数越多感应电压越高对绝缘的要求就越高,所以制作时补偿线圈的匝数为300匝。

2.3 充电控制过程

充电状态流程BQ2057的充电曲线如图2所示, BQ2057的充电分为三个阶段:预充状态、恒流充电和恒压充电阶段。

预充阶段:在安装好电池并加上电源后, BQ2057首先检查工作电压VCC,当工作电压过低时充电器进入休眠模式,若工作电压正常,则检查电池温度是否在设定范围,若不正常则进入温度故障模式,否则检测电池电压VBAT。当电池电压VBAT低于低压门限Vmin时, BQ2057以恒流IREG 10%的电流IPRE对电池预

充电。

恒流充电:在完成对电池预充或电池电压VBAT低于恒压VREG时, BQ2057进入恒流充电状态,此时由外部的感测电阻RSNS上的压降监控充电电流,通过SNS引脚获得充电电流的反馈,感测电阻由下式计算:

$$R_{SNS} = \frac{V_{SNS}}{I_{REG}}$$

其中 IREG为预期的充电电流。

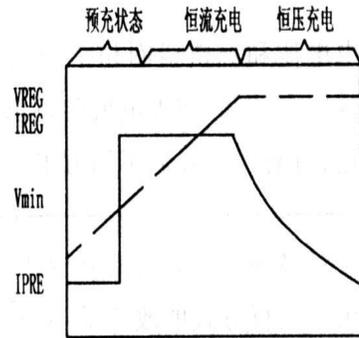


图2 BQ2057对电池充电的曲线

恒压充电:当充电电压达到恒压VREG时进入恒压充电状态。在整个工作温度和工作电压范围内, BQ2057通过BAT和VSS引脚监测电池组电压,当充电电流达到终止门限I(TERM)时停止充电,当电池电压低于重新充电门限电压V(RCH)时自动开始重新充电。

电池温度监测: BQ2057通过测量TS与VSS引脚间的电压实现对电池组温度的连续监测,常用热敏电

阻作为温度传感器,并通过分压电阻实现,如图1所示。分压电阻的阻值可根据参数计算。BQ2057将该电压与内部的 $V(TS1)$ 和 $V(TS2)$ 门限电压比较以决定是否允许充电。

3 实验结果

实验时 $R=60\ \Omega$ 选取稳压二极管的稳压值为20V。实验结果表明。原方电流在 $0\sim 900\text{ A}$ 范围内变化时,电源能够提供所需的电压,在原方电流小于20A时,起用充电电池供电,补偿线圈能够使整流侧输出电压维持在25V以下,保证各稳压模块可靠工作。当原方电流大于900A时,整流侧输出电压缓慢上升,超过DC/DC模块的最大输入电压,采取一定的散热措施(如增大散热片的尺寸等)可以使电源在更大范围内工作。

表1 线路电流与输出电压的关系

| 名称 | 数值 | | | | | |
|------------|----|-----|-----|-----|------|------|
| 线路电流(A) | 0 | 4 | 30 | 150 | 750 | 900 |
| 整流输出(V) | 0 | 1.8 | 3.5 | 9.1 | 17.8 | 23.1 |
| DC/DC输出(V) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5.2 |

4 总结

采用充电电池和补偿线圈相结合的方法解决了小电流的死区问题,同时在大电流时可以降低原方电流的激磁作用,可有效地降低了原方电流对电子式互

感器工作电源工作特性的影响。实验结果证明该方法是切实可行的,它解决了在线路电流过低或断路器跳闸时无法供电的问题,同时它能使电源在宽动态范围内满足电子电流互感器对工作电源的长期工作要求。是目前解决有源电子电流互感器高压侧电源问题的有效方案。

参考文献

- [1] 徐雁,朱明均,郭晓华,张庆,叶妙元.空心线圈作为保护作用电流互感器的理论分析和实验[J].电子系统自动化,2002,26(16):52-55.
- [2] 钱政.有源电子式电流互感器中高压侧电路的供能方法[J].高压电器,2004,40(2):135-138.
- [3] 聂一雄,尹项根,李伟,等.有源光电式互感器工作电源设计[J].电力自动化设备,2003,23(12):49-51.
- [4] 付烈,郑绳植.光电混合式电流互感器电源的研究[J].现代电子技术,2004,4(18):10-11.
- [5] 刘忠战.电子式电流互感器高压侧自励源供能方法研究[J].高压电器,2006,42(1):55-57.
- [6] 胡彬,周有庆,钟选书,吴贵清,彭红海.电子式电流互感器高压侧电源的研究与实现[J].电气应用,2006,25(5):99-102.

作者简介

郭吉伟:男,1981年,硕士,主要研究方向为电力电子技术
在电力系统中的应用。

梁魁:男,1982年,硕士,主要研究方向为电力系统故障诊断。

懂凌凯:男,1983年,硕士,主要研究方向为电力系统信息及其自动化技术。

(收稿日期:2008-02-26)

(上接第3页)对多种运行方式的分析计算表明,频率扫描分析结果对运行方式的改变是不敏感的^[14]。

3 结论

由以上分析可知:

(1)马百线串补单独作用时不会引起系统的次同步谐振现象。

(2)罗百线串补度为50%时,滇东电厂机组不会发生异步发电机效应。

(3)罗百线串补度为60%时,线路有一电气谐振点,滇东电厂机组有可能发生异步发电机效应,导致

系统发生次同步谐振。

参考文献

- [1] 南方电网电力工业“十一五”发展规划及2020年远景目标研究[R].北京:中国电力工程顾问集团公司,2004.
- [2] 李炜,佟名东,张琳等.“十一五”南方电网“西电东送”输电能力研究[J].中国电力,2007,40(2):26-30.
- [3] IEEE Committee Report. Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations”, IEEE Trans. On PAS, 1985, PAS-104(6):1326-1334.
- [4] 陈陈,杨煜.几种次同步振荡分析方法和工具的阐述[J].电网技术,1998,22(8):10-13.
- [5] M.R.Iravani, Abdel-Aty Edris. (下转第62页)

电力系统故障诊断中的小波及多分辨分析理论的应用

冯雪¹, 张玉文², 周慧莹²

(1. 四川电力物流集团公司, 四川 成都 610061; 2. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:介绍了小波分析的基本原理、自适应的时频窗和它的快速算法。用仿真试验说明了小波变换在信号奇异性检测和信号消噪过程中的应用, 将 Fourier 变换结果和小波变换结果作比较, 得出小波变换有着 Fourier 变换无可比拟的优越性。并结合这两个应用, 对电力系统中的故障检测进行了模拟仿真, 仿真结果表明小波变换能够很好地消除电力系统故障信号噪声, 并检测出故障点。

关键词:电力系统; 多分辨分析理论; 信号消噪; 故障诊断

Abstract: The basic principle of wavelet analysis and its fast algorithm are introduced. The simulation results show its application to signal singularity test and noise reduction. The comparisons between wavelet transform and Fourier transform have also been done to prove that the wavelet algorithm can successfully reduce the noise of fault signal and locate the fault point.

Key words: power system; multi-resolution analysis theory; signal noise reduction; fault diagnosis

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)03-0057-03

电力系统故障暂态信号中奇异点的出现往往代表着故障的产生, 奇异点检测的目的就是对故障进行定位, 抓住故障特征, 进而采取适当的故障保护或控制措施, 在供配电系统和用电设备运行失效之前, 及时捕获到早期的故障信息, 以避免毁灭性打击。因此, 准确提取故障暂态信号的时间特征成为提高电力系统暂态稳定预测实时性和准确性的首要问题, 包括暂态信号检测在内的电能质量检测已成为当今国际上的一个研究热点。

在实际的处理过程中, 由于采样误差、外界随机干扰、系统内部不稳定等因素, 使得采样的暂态信号中经常夹杂着噪声, 而随机噪声在信号中也体现为奇异点, 当噪声背景较强时, 将会给信号奇异点的检测带来误差。如何从随机噪声中提取暂态信息或者说如何区分信号奇异点和随机噪声奇异点成为电能质量暂态分析的一项重要任务。

传统处理电力系统故障暂态信号的方法是基于离散傅立叶变换的方法。这种方法的主要缺点是: 不能同时进行时间、频率分析和不能应用于非平稳信号的分析。为了克服以上缺陷, 人们从很多方面对傅里叶变换做了改进。其中最著名的就是窗口傅里叶变换。窗口傅里叶变换虽然在很多方面改变了傅里叶变换的缺陷, 但是它对于信号来说相当于一个带宽固定的带通滤波器, 不能根据不同的需要对信号做多尺度的分析, 因此这种固定的刚性窗会造成在分析频变信号时仍具有局限性。而小波变换正是克服了这种

不足, 运用可调的柔性窗对高频、低频信号分别采取不同的尺度进行分析, 因此它对奇异信号敏感, 特别适用于分析奇异性强的故障信号。

1 小波变换的概念

定义 1 设 $f(t) \in L^2(R)$ (具有有限能量的函数)

$$W_{\Psi} f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

$$\text{记 } W_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

为 $f(t)$ 的小波变换, 而函数 $\Psi(t)$ 称为母小波。

它的基本特征为 $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$ 。另外, 还通常假设母小波满足如下标准化条件:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt = 1 \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} t |\Psi(t)|^2 dt = 0 \quad (4)$$

第一个条件说明 $\Psi(t)$ 是一个能量为 1 的函数, 这样可使 $f(t)$ 经小波变换后, 总体上保持能量不变; 第二个条件说明 $\Psi(t)$ 的能量集中在以原点为中心的一个区间内。从而 $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的能量集中在以 b 为中心的一个区间内。当函数 $\Psi(t)$ 满足容许性条件 $C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|} dw < \infty$ 时, 与小波变换式 (1) 相对应的还有如下逆小波变换公式

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a^{-2} W_f(a, b) \Psi_{a,b}(x) da db \quad (5)$$

当 a, b 在 R 上连续取值时, 式(1)称为连续小波变换。

窗口傅立叶变换(WFT)仅具有不变时频窗, 无论频率中心处于何处, 其时频窗形状不变, 其时频局部分析显得单一。与之相比, 小波变换的时频窗是灵活可调的, 是自适应的。多分辨率分析就是由不同的分辨率对信号进行逐级逼近, 用小波函数和尺度函数对信号进行不同尺度的分析, 可以了解不同尺度下的局部信号特征, 在信号分析中具有明显的优越性。Mallat 塔式算法在小波分析中的地位相当于快速傅立叶变换算法在经典傅立叶中的地位。它的分解目的是力求构造一个在频率上高度逼近 $L^2(R)$ 空间的正交小波基, 这些频率分辨率不同的正交小波基相当于带宽各异的带通滤波器。对于它的理解是以一个三层的分析进行说明, 其小波分析树如图1所示。

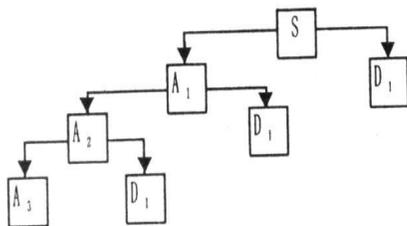


图1 三层多分辨率分析树型结构图

2 小波分析用于信号奇异点检测

称无限次可导的函数是光滑的或没有奇异性; 若函数在某处有间断或某阶导数不连续, 则称该函数在此处有奇异性。信号中的奇异点及不规则的突变部分经常带有比较重要的信息, 它是信号重要的特征之一。比如, 在电力系统故障中, 故障通常表现为电流电压信号发生突变, 因而对突变点的检测在电力系统故障分析中有重要意义。

长期以来, 傅立叶变换是研究函数奇异性的主要工具, 其方法是研究函数在傅立叶变换域的衰减以推断此函数是否具有奇异性及奇异性的大小。但傅立叶变换缺乏空间局部性, 它只能确定一个函数奇异性的整体性质, 而难以确定奇异点在空间的位置及分布情况。大家知道, 小波变换具有空间局部化性质, 因此, 利用小波变换来分析信号的奇异性及奇异性位置和奇异度的大小是比较有效的。

利用小波分析检测信号的突变点的一般方法是:

对信号进行多尺度分析, 在信号出现突变时, 其小波变换后的系数具有模极大值, 因而可以通过对模量极大值点的检测来确定故障发生的时间点。

下面用一个例子来说明小波在信号奇异点检测中的应用。这个例子中, 信号的不连续是由于低频特征的正弦信号 ($\sin t$) 在后半部分突然有中高频特征的正弦信号 ($\sin 10t$) 加入。用小波分析可以将中高频正弦信号加入的时间检测出来。

Matlab 仿真输出结果如图2所示。

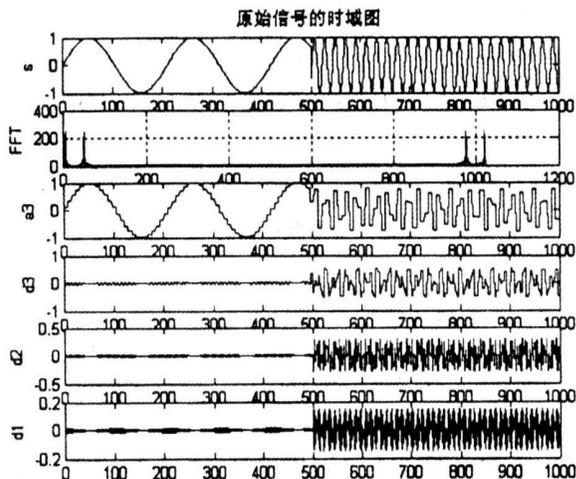


图2 小波与傅立叶变换对信号奇异点检测的
matlab 仿真结果

由图2中可以看出, 由于傅立叶变换将信号转换成频域中的信号, 使它不具有时间分辨率, 故信号的频率变换点根本无法检测出来。而经 db1 小波分解后的信号, 可以很明显地辨别出间断点 ($time \approx 500$)。

3 检测中的信号消噪

在实际的工程运用中, 所分析的信号可能包含许多尖峰或突变部分, 并且噪声也不是平稳的白噪声, 对这种信号进行分析, 首先需要作信号的预处理, 将信号的噪声部分去除, 提取有用信号。对这种信号的消噪, 传统的傅立叶变换分析显得无能为力, 因为傅立叶分析是将信号完全在频率域中进行分析的, 它不能给出信号在某个时间点上的信号变化情况, 使得信号在时间轴上的任何一个突变, 都会影响信号的整个谱图。而小波分析由于能同时在时、频域中对信号进行分析(并且在频域分辨率高时, 时间域内分辨率低; 在频率域内分辨率低时, 时间域内分辨率高, 有自动

变焦的功能),所以它能有效的区分信号中的突变部分和噪声,从而实现信号的消噪。

一个含噪声的一维信号的模型可以表示成如下形式:

$$s(i) = f(i) + \varphi_e(i), i = 0, \dots, n-1 \quad (10)$$

其中, $f(i)$ 为真实信号, $e(i)$ 为噪声, $s(i)$ 为含噪声的信号。

在实际的工程中,有用信号通常表现为低频部分或是一些比较平稳的信号,而噪声信号通常表现为高频的信号,所以噪声可按如下方法处理:首先对信号进行小波分解(如进行图1的三层分解),则噪声部分通常包含在 D_1, D_2, D_3 中,因而,可以以门限阈值等形式对小波系数进行处理,然后对信号进行重构即可达到消噪的目的。

下面对上一个例子中的信号加入一个白噪声,含噪信号如图3所示,分别用小波分析和傅立叶变换进行信号噪声消除。

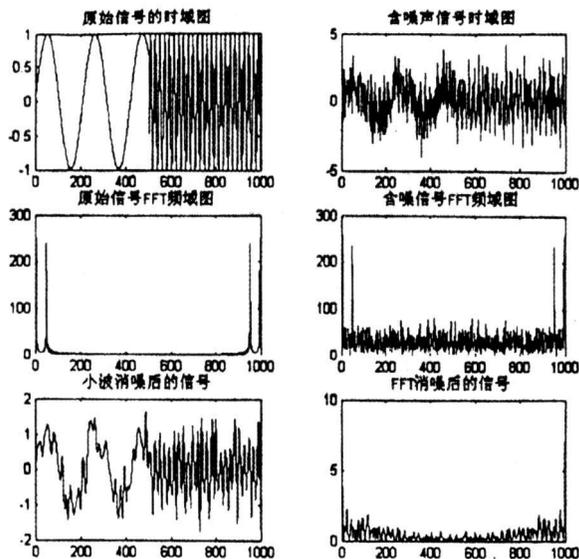


图3 小波变换和FFT变换对信号消噪的matlab仿真结果

从图3可以看出,用小波进行信号消噪可以很好地保存有用信号中的尖峰和突变部分。而用傅立叶分析进行滤波时,由于信号集中在低频部分,噪声分布在高频部分,所以可用低通滤波器进行滤波。但是,它不能将有用信号的高频部分和噪声引起的高频干扰加以区分。若低通滤波器太窄,则在滤波后,信号中仍存在大量的噪声;若低通滤波器太宽,则将一部分有用信号当作噪声而滤掉了。

4 电力系统故障信号的仿真检测

电力设备发生故障时,其电流、电压等电气量将发生剧烈的变化,其奇异性是很明显的。在信号突然变化的情况下,小波分析可以迅速有效地捕捉到瞬时、突变的故障信号;通过对电流、电压采样信号的小波变换进行多尺度分析,可以快速、准确地获取故障信息。因此,采用小波分析方法能有效地监视电力设备运行状态。在电力系统中影响的主要有以下4种情况。

(1) 电压突降:电压突降指的是系统电压下降了10%~90%,并且持续时间为0.15个周期到1min。这一现象有可能是由故障电流,重负载或是大电动机的接通所引起的,当电压下降了30%或更多时就认为情况很严重。

(2) 电压突升:电压突升指的是系统的电压短暂的上升,它有可能给连接其上的设备造成永久性的损伤。这一现象经常出现在三相电路中单相短路时的正常相上。

(3) 瞬间间断:瞬间间断是指供电系统上电压的瞬间丢失,当系统电压下降率为90%~100%,并且持续时间为0.15个周期到1min时,就认为系统处于瞬间间断状态。

(4) 瞬间振荡:这些现象都表现为电压信号的突变,所以可通过小波分析对信号的奇异性检测来找出故障或扰动信号发生的起始点和终止点。又由于实际检测到的电压信号是原始电压信号和噪声的线性组合,而小波变换是线性变换,因此信号的小波变换也是由原始信号的小波变换和噪声的小波变换叠加组成。当背景噪声较强时,利用连续小波变换检测到的奇异点有可能是噪声引起的。因此,奇异点的检测往往是和信号消噪联系在一起的,一般是先对电压信号进行消噪预处理,排除噪声干扰后,再进行奇异点检测,最终得到电力系统中的故障扰动信息。

5 仿真结果

下面将3和4的仿真结合起来模拟电力系统中的故障或扰动检测,即在信号 $f(t) = \sin(t) + \sin(10t)$ (可用来模拟电力系统中的瞬间振荡或电力系统故障后的暂态信号)的基础上加入一个 (下转第81页)

- 1)在 ASP.NET 应用程序中引用 AjaxPro.dll;
- 2)在 Web.config 文件的 <system.web>配置节中加入相关的设置语句;
- 3)进行使用 Ajax 模式的类的注册;
- 4)编写服务器端的代码;
- 5)客户端使用 javascript 进行与服务器之间的数据通信。

6 结论

通过使用 SVG 对单位 10 kV 配网线路开关模拟的设计以及实现,发现 SVG 的强大特性完全可以满足要求,解决现有配网开关模拟的已有问题。与此同时,这种基于 SVG 的方式对于电信、自来水等行业的连接状态图的设计都有极大的参考价值。SVG 作为

一种开放的国际化标准,正逐步的被使用到各个应用领域,发挥着越来越重要的作用。作为一种图形的使用工具,这个设计还不够完整,诸如图形放大,缩小,定位等功能还需要进一步去完善。

参考文献

- [1] Scalable Vector Graphics (SVG) 1.1 Specification [R]. W3C Working Draft, 2003.
- [2] Christophe Jolif, Software Architect, Comparison between XML to SVG Transformation Mechanisms— The GraphML use case, SVG Open 2003 Conference, 2003—7.
- [3] 张瑞江, 齐华, 韩卫杰, 王行祥. 基于 J2ME/Mobile SVG 移动 GIS 设计与实现[J]. 微计算机信息, 2006, 3: 164—166.
- [4] 吴斌. SVG: 未来的 Web 图形标准[S]. PC World China, 2000 No. 49.

(收稿日期:2008—03—10)

(上接第 59 页) 噪声信号,如图 3 所示。用小波变换对故障信号的分析方法是:先对它进行 4 中的消噪处理,再用 3 中方法检测奇异点。对消噪后的信号奇异点检测结果如图 4。

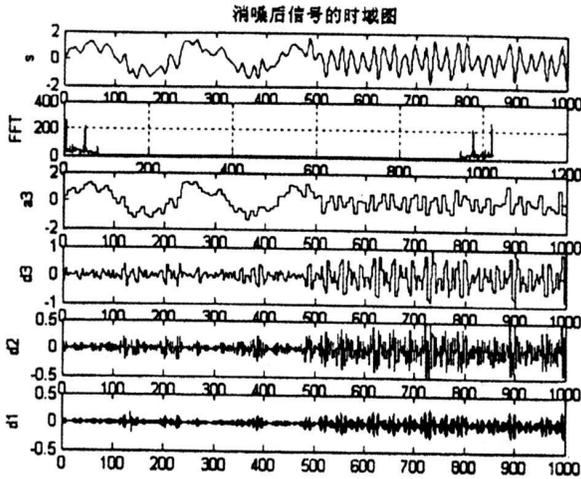


图 4 对消噪后信号的奇异点检测仿真结果

从图 4 中可以看出,信号的奇异点在 500 点附近处,所以通过仿真,可以看到信号扰动发生的时刻。前面做的仅是一个仿真说明小波变换在电力系统故障信号的检测中有着非常重要的应用,实际检测中,信号的消噪预处理非常重要,所以对消噪小波基和阈值的量化处理都要有非常慎重的选择。

6 结论

结合小波变换的一些基础知识,对小波变换在电

力系统扰动检测中的应用进行了一个初步的仿真试验和分析。得出了如下的结论:

通过应用小波变换和多分辨分析的 Mallat 塔式算法进行的仿真试验的结果可以看到在利用小波变换时高频部分能够清晰地反映信号的故障点。并且小波变换能够很好地克服采用传统的傅立叶分析不能进行局部化分析和快速傅立叶分析方法只能进行单一分辨分析的缺点,小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部化性质,能对不同的频率成分采用逐步精细的采样步长,聚焦到信号的任意细节。这对于检测高频和低频信号以及信号的任意细节均有效,特别适应于分析奇异信号,并能分辨出信号奇异性的 大小,因此,作为一种信号分析的新型工具,小波分析在电力设备状态检测、故障诊断、谐波分析等诸多方面均有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 胡晓光, 戴景明. 基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断 [J]. 中国机电工程学报, 2001. 5.
- [2] 林京, 屈梁生. 基于连续小波变换的奇异性检测与故障诊断[J]. 振动工程学报, 2000. 4.
- [3] 王楠, 律方面. 基于小波奇异性检测的在线监测数据处理[J]. 电工技术学报, 2003. 14.
- [4] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 科学出版社, 2000.
- [5] 任伟建, 康朝海, 于镛, 张正辉. 小波变换在信号奇异性检测中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2005. 1.

(收稿日期:2008—02—27)

数字式光电互感器的应用

范寿宁, 黄琼辉

(四川省西昌电业局, 四川 西昌 615000)

摘要:数字式光电互感器被国家电网公司列入2005年度电网先进适用技术分类表, 评估分类为“示范应用”。为了推广应用新技术、新设备, 安装了一组由南京自动化设备有限公司生产的OET700 35 kV光电互感器并与传统电磁式互感器进行数据对比, 通过一年的运行实践, 将该设备的运行情况进行了分析和总结。

关键词:数字式光电互感器; 现场应用; 分析

Abstract: Digital Optical Voltage and Current Transformer(OVCT) was listed in the classified table of advanced and practical technology issued by the State Grid Corporation of China in the year of 2005, and it was evaluated and classified as demonstration and application. In order to promote the popularization and application of new technology and equipment, a series of OET700 35 kV OVCT produced by NanJing Automatic Equipment Co., Ltd. are installed, and the data are compared with the data of traditional electromagnetic voltage and current transformer. After one year's operation, the operating condition of this equipment is analyzed and summarized.

Key words: digital optical instrument transformer; application on site; analysis

中图分类号: TM452 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0060-03

互感器是电力系统中用于电测量和继电保护的重要设备, 其精确度和可靠性对电力系统的安全、稳定和经济运行有着重要的影响。随着微电子技术及设备的集成化、智能化和变电站综合自动化的广泛应用, 都要求互感器体积小、质量轻, 输出实现数字化, 甚至直接接入总线实现网络化。数字技术和光通信技术的快速发展, 则使互感器输出数字信号成为现实, 并通过光纤输出, 彻底解决了高压设备的绝缘问题和电磁干扰问题。

数字式光电互感器是利用电磁感应原理的 Rogowski 线圈以及串行感应分压器实现的混合式交流电流电压互感器。其传感头部件包括串行感应分压器、Rogowski 线圈、采集器等。传感头部件与电力设备的高压部分等电位, 传变后的电压和电流模拟量由采集器就地转换成数字信号。采集器与合并器间的数字信号传输及激光电源的能量传输全部通过光纤来进行。

1 安装的目的和意义

西昌地区多高耗能用户, 该类用户的电炉设备功率大, 负荷波动大, 产生大量大功率低次谐波污染, 同时冲击电流造成电磁式互感器铁心饱和, 有可能造成继保误动作, 并使二次电流、电压产生畸变, 影响计量

的准确性。本项目使用的数字式光电互感器及其配套的继电保护和计量装置具有从根本上解决以上问题的先进性能。通过 35 kV 数字式光电互感器及其保护和计量装置及其二次系统的设计、安装、运行和运行效果的对比分析, 希望找出一条适合西昌地区的可靠先进的电网技术革新之路。将该组光电互感器安装于一个对电铁及高耗能工业园区供电的 110 kV 变电站内一条 35 kV 出线间隔, 该线路对冶炼企业供电, 日均负荷为 1.2 万 kW。该线路原装有电磁式电流互感器, 准确级 0.2 级。35 kV 母线电压互感器亦采用 JDJJ₂-35 型电磁式电压互感器。本次在该出线间隔安装了一组组合式光电电流电压互感器, 并装配一套线路保护和一块具有光纤以太网接口的电能表, 以便将光电互感器的采集数据与电磁式互感器采集的模拟量在数据采集、电量及所接保护功能等方面进行对比。同时, 南自厂在合并器报文读取中加进了谐波分析部分, 采集了当地的谐波污染情况。

2 运行情况分析

光电互感器从 2006 年 4 月安装以来对其采集的电量与电磁式互感器采集的电量按月进行了对比见表 1。

在表 1 中两种计量系统的月电量相差不多, 最大

表1 电量按月进行了对比

MW·h

| 日期 | 电磁式互感器计度电量 | | 光电互感器计度电量 | | | |
|-----|------------|---------|-----------|--------|---------|-------|
| | 正向有功 | 反向有功 | 正向有功 | 误差 | 反向有功 | 误差 |
| 4月 | 6 436.360 | 60.480 | 6 463.014 | -0.4% | 68.260 | -1.2% |
| 5月 | 2 629.200 | 167.240 | 2 635.542 | -0.2% | 167.815 | -0.3% |
| 6月 | 7 941.360 | 16.240 | 7 930.079 | 0.1% | 16.306 | -0.4% |
| 7月 | 9 631.160 | 17.640 | 9 621.855 | 0.1% | 17.489 | 0.8% |
| 8月 | 6 371.120 | 353.640 | 6 361.110 | 0.15% | 353.630 | 0 |
| 9月 | 4 906.2 | 100.8 | 4 908.410 | -0.04% | 100.801 | 0 |
| 10月 | 4 930.2 | 659.7 | 4 955.01 | -0.5% | 662.91 | -0.5% |

表2 各次测量结果的平均值

| 电量名称 | THD(%) | 2次谐波 | 3次谐波 | 4次谐波 | 5次谐波 | 6次谐波 | 7次谐波 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A相电流 | 11.378 06 | 3.365 | 4.663615 | 2.392769 | 3.325923 | 1.956538 | 4.166 462 |
| B相电流 | 9.387 436 | 4.849 909 | 3.594 273 | 3.19 | 3.560 273 | 2.036 | 6.369 818 |
| C相电流 | 10.277 41 | 3.979 615 | 4.524 385 | 2.428 769 | 3.725 077 | 2.041 | 4.685 385 |
| 零序电流 | 9.196 918 | 0.288 6 | 0.311 6 | 0.237 7 | 0.246 3 | 0.096 7 | 0.346 2 |
| A相电压 | 2.180 356 | 0.201 833 | 0.145 333 | 0.055 75 | 0.335 167 | 0.115 5 | 0.675 917 |
| B相电压 | 2.270 818 | 0.058 143 | 0.080 429 | 0.023 286 | 0.213 214 | 0.055 143 | 0.333 571 |
| C相电压 | 1.988 451 | 0.056 455 | 0.093 | 0.029 455 | 0.151 455 | 0.045 364 | 0.285 455 |

续表2

| 电量名称 | THD(%) | 2次谐波 | 3次谐波 | 4次谐波 | 5次谐波 | 6次谐波 | 7次谐波 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A相电流 | 4.025 923 | 4.030 462 | 0.925 615 | 17.54 038 | 1.615 538 | 5.577 692 | 1.137 462 |
| B相电流 | 3.367 182 | 2.372 818 | 0.970 182 | 12.331 36 | 2.372 818 | 8.450 364 | 0.867 273 |
| C相电流 | 3.455 231 | 2.744 077 | 1.257 923 | 15.652 31 | 1.772 385 | 9.492 | 0.770 385 |
| 零序电流 | 0.263 2 | 0.159 3 | 0.080 2 | 0.921 3 | 0.113 9 | 0.861 4 | 0.089 7 |
| A相电压 | 0.633 333 | 0.216 917 | 0.024 417 | 0.280 667 | 0.016 667 | 0.111 833 | 0.027 833 |
| B相电压 | 0.204 5 | 0.057 214 | 0.026 929 | 0.148 | 0.012 786 | 0.051 286 | 0.011 714 |
| C相电压 | 0.165 364 | 0.069 | 0.020 364 | 0.127 818 | 0.010 455 | 0.044 364 | 0.009 545 |

误差仅为0.5%。两种计量系统采用不同的互感器,不同的数据转送方式,不同的计量表计,没有统一的标准,不好做出一个准确的定量的误差分析,但可以看出其计量精度不低于常规互感器。另外,安装光电互感器以来该线路故障跳闸2次,该光电互感器所接保护装置动作行为正确,并完整记录了故障量。

此外,对该条线路的谐波进行了采集,表2为各次测量结果的平均值。

可从统计的角度看出电源为正弦波时,用户负荷电流波形畸变的层度和各次谐波的含量。电源电压基本为正弦波,用户的电炉负荷电流波形畸变严重,

各次谐波的含量,尤其是7、11、13次谐波含量很大。理论上,只有相同频率的电压和电流才能构成功率,工频电压(电流)和谐波电流(电压)并不产生功率,当输入的电压和电流只一方含有谐波时,电路中该次谐波的功率为零。传统的电磁式互感器采用模拟电量信号,频率特性具有非线性;光电互感器采用数字电量信号,有很好的线性特性。但同频率谐波分量相互作用引起的谐波功率,使电度计量出现随机的或正或负的误差,这种误差有可能部分相互抵消,从表1中也未出现较大的差别。目前,该组光电互感器已运行一年多,运行状况良好。

3 数字式光电互感器的优点

2006年11月在西昌局500kV普提变电站投运的西门子公司生产的500kV串补装置中的TA亦采用了光电互感器,解决了在超高压系统中互感器体积庞大、绝缘困难等难题,同时西门子公司还利用光电互感器对MOV的触发回路提供能量。这些新设备、新技术的应用开创了四川电网二次系统的一个崭新的应用领域。经过光电互感器的安装及运行,体会到光电互感器相对与传统电磁式互感器具有以下优点:

1)光电互感器具有无磁饱和、频率响应范围宽、精度高、暂态特性好等优点,由于信号传送实现了数字化,有利于新型保护原理的实现及提高保护性能,也有利于对电网智能监控。2)采集器处于和被测量电压等电位的密闭屏蔽的传感头部件中,采集器和合并器通过光纤相连,数字信号在光缆中传输,增强了抗EMI性能,数据可靠性大大提高。并彻底解决了电流互感器的过负荷和TV二次回路的压降问题。

3)光电互感器通过光纤连接互感器的高低电压部分,绝缘结构大为简单。以绝缘脂替代了传统互感器的油或SF₆,互感器性能更加稳定,同时避免了传统充油互感器渗漏油现象,也避免了SF₆互感器的SF₆

气体对环境的影响。无需检压检漏,运行过程中免维护。

4)无油设计彻底避免了充油互感器可能出现的燃烧爆炸等事故;高低压部分的光电隔离,使得电流互感器二次开路、电压互感器二次短路可能导致危及设备或人身安全等问题不复存在。

5)光电互感器完备的自检功能,若出现通讯故障或光电互感器故障,保护装置将会因收不到校样码正确的数据而可以直接判断出互感器异常。

6)价格低廉的光纤光缆的应用,大大降低了光电互感器的综合使用成本。由于绝缘结构简单,在高压和超高压中,光电互感器这一优点尤其显著。

4 结束语

由于光电互感器具有上述优点,现场运行情况良好,极具推广价值。同时光电互感器的应用使变电站二次系统由传统的模拟信号方式转变为数字信号方式,这一转变势必对已有的变电站自动化技术将产生深刻的影响,将大大提高电网建设的现代化水平,降低变电站建设的总造价,变电站及其自动化技术将进入数字化新阶段,全数字化的变电站自动化系统将出现。

(收稿日期:2008-03-10)

(上接第56页) Eigen analysis of series compensation schemes reducing the potential of subsynchronous resonance. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (2).

[6] Canay I M. Anovel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine. part I:theory. T-PAS-101, 1982, 101(10).

[7] Canay I M. Anovel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine, part II: application to an arbitrary network. T-PAS-101, 1982, 101(10).

[8] Agrawal B L, Farmer R G. Use of frequency scanning techniques for subsynchronous resonance analysis. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(2).

[9] X·Lei, D·W·Retzmann. Analyzing Subsynchronous Resonance Using a Simulation Program. Proceeding of PowerCon 2000, Dec. 2000, Vol. 2, pp. 775-781.

[10] Mahmoud Elfayoumy, Carlos Grande Moran. A comprehensive approach for Subsynchronous resonance screening analysis using frequency scanning technique. IEEE Bologna

PowerTech Conference, 2003.

[11] 杨煜,陈陈,伊敏. 一大庆500kV输电系统次同步谐振分析——兼论发电机轴系共振频率[J]. 电网技术, 2000, 24(5):10-13.

[12] 李光琦,张世学,张直平. 频率扫描法分析西北330kV主网高串补水平下的次同步谐振可能性[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(1):57-61.

[13] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.

[14] 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, 2002.

作者简介:

李伟(1981-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制。

李兴源(1945-),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分散式发电等方面的研究。

(收稿日期:2008-02-10)

气相色谱在线监测技术应用及推广

吴志勇

(广元电业局, 四川 广元 628000)

摘要:介绍气相色谱在线监测技术研究现状,分析在线色谱监测的关键技术,介绍在线色谱监测技术的应用,分析在线监测系统研究经济效益。

关键词:气相色谱;在线监测;变压器;油中溶解气体

Abstract: The investigation status of on-line gas chromatograph monitoring techniques is introduced as well as its applications. The key points of on-line chromatograph monitoring techniques and its economic benefits are analyzed.

Key words: gas chromatograph; on-line monitoring; transformer; dissolved gas in oil

中图分类号: TM855 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2008)03-0063-04

随着对电能需求量的增大,电力系统电压等级不断提高,设备容量不断增大,对供电可靠性提出越来越高的要求。从近年来变压器事故情况看,许多事故是在无任何先兆的情况下发生,说明目前常规试验项目和实验周期存在一定的局限性,不能在带电时及时、有效地发现变压器内部的潜伏性故障,一些事故先兆信息不能及时捕捉到。因此对大型变压器开展有效、及时的在线监测是必要的。

利用变压器油中溶解气体在线监测仪,检测油中溶解的 H_2 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 CO 、 CH_4 等故障气体的含量和增长率,可以连续观察变压器油中溶解气体动态变化过程,利用变压器在线监测系统实现在线监测及预警。由于减少了取样、运输到测试操作等烦琐环节和分析周期长等因素的影响,有助于及时地发现变压器的潜伏性故障。实时在线的了解主变油中溶解气体的变化,保证变压器的安全运行,为电网的安全运行提供有力的保障^[1]。

1 变压器油中溶解气体在线监测技术现状

变压器油中溶解气体在线监测技术,就其测试原理主要有:气相色谱法、傅立叶红外光谱法、光声光谱法等。其中气相色谱技术的发展相对较成熟,实用化程度较高。国外最早在 20 世纪 80 年代初由日本关西电力和三菱电机公司采用色谱分离技术研制出“变压器油中气体自动分析装置”,并投入现场使用。中国从 20 世纪 90 年代初开始研制在线色谱监测装置,经过多年的探索与实践,已逐步走向应用化阶段,近

年来一直处于发展完善之中^[2]。

美国 Serveron 公司的 Truegas 变压器气体分析仪,以 99.9999% 的超高纯氦气为载气,以热导池为检测器,可测量 8 种气体,包括 H_2 、 CO 、 CO_2 、 O_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 和 C_2H_2 。对 C_2H_2 、 C_2H_4 、 CO 和 CO_2 的测量,灵敏度可达 1×10^{-6} 或 10% (取大者),其它 4 种气体的测量灵敏度可达 10%。其工作环境温度范围从 -40% 到 +55%,采样周期一般为 24 h。

宁波理工监测设备有限公司的 MGA2000-6 型变压器色谱监测系统,其油气分离单元采用了透气性突出的新型油气分离材料,油气接触面积比一般平板膜大 1 000 倍以上。在分离过程中采用油路、气路双循环,油气分离速度得到大幅度提高,可在 1 小时内实现所有故障特征气体的平衡。其组分分离单元采用色谱柱技术和分离单元整体恒温技术,色谱柱使分离度最小的 H_2 与 CO 保留时间差达到 25 s 以上,解决了因为传感器恢复时间不足而导致的拖尾迭加问题^[3]。

上海交大研制的监测系统的油气分离单元采用带微孔的聚四氟乙烯薄膜。采用双色谱柱,柱 1 直接连入检测器,柱 2 经毛细管柱连入检测器。气体检测器采用热线型传感器能长期保持高灵敏度和稳定性。

2 在线色谱监测的关键技术

现有典型的在线色谱监测系统一般由油气分离、组分分离、气体检测、数据处理与故障诊断五部分组成,下面分别对其进行阐述^[4]。

2.1 油气分离技术

采用油气分离方式有:动态顶空、真空脱气、中空式膜分离和平板结构的高分子膜等。平板结构的高分子膜其优点是结构简单,缺点是平衡时间长,一般要十几小时甚至几十小时,而且由于不同故障气体的平衡时间差别大,难以按照亨利系数求取油中气体体积分数的实时值。因此,当油中气体体积分数变化时其测量值不能准确跟踪实际的变化^[5]。

2.2 组分分离技术

由于传感器的交叉敏感性,分离出来的故障特征气体必须先分离再检测,才能实现可与离线色谱相媲美的宽范围高精度的检测。实现组分分离也是在线色谱的核心。如果将组分分离单元定义为从气室至检测室的全部气路,那么至少有组分分离度和进样量两项指标直接影响了系统的性能。良好的组分分离度要求各组分都可以得到很好的分离,而进样量的一致性则对测量结果影响较大。由于色谱柱的柱温对进样量有直接的影响,所以,保持色谱柱分离系统温度的一致性有利于保证测量结果的准确性^[6]。

2.3 气体检测技术

气相色谱仪的检测单元主要由气敏传感器和检测室组成。目前用于变压器故障特征气体全组分检测的传感器包括热导池(TCD)和半导体气敏传感器。热导池的缺点是检出限不足,即使用高纯氦作载气, Truegas 的最低检出限只有 5 $\mu\text{L/L}$ 。半导体气敏传感器能够测量低体积分数的多种气体,在油蒸汽中、高湿度和温度变化中能保持稳定性(一般为 1 至 2 年),相对于热导池检测器要轻便,造价也低,因此被广泛采用。其缺点是必须在氧化氛围中工作,否则其恢复时间可以达到 30 s 以上,使各峰出现严重拖尾现象,使用空气做载气可以解决这个问题,但这样对组分分离有一定影响。

热导池检测器是基于不同的物质有不同的热导系数的分析原理来测量气体体积分数的,而热导系数又与分子量相关,使用 N_2 做载气时,由于 N_2 的分子量(28)和 C_2H_2 的分子量(26)相当,很难准确测量 C_2H_2 的体积分数值,这也是 Truegas 选用 He 做载气的原因。He 的分子量与 C_2H_2 的分子量相差比较大,因此 Truegas 可以准确地测量 C_2H_2 的体积分数值,这个值对实时监测变压器的状态很重要。而无论选用热导池检测器还是使用半导体气敏传感器,用五个 9 的高纯载气即 99.999% 本身就含有 19 $\mu\text{L/L}$ 的不确定成分,所以气体检出下限会比较高。Truegas 采用六个 9 即 99.999 9% 的超高纯 He 做载气,其本身只

含有 1 $\mu\text{L/L}$ 的不确定成分,克服了 99.999% N_2 做载气的缺陷^[7]。

2.4 数据处理与诊断

数据处理包括实时 A/D 转换、传输、存储和测量。气体检测器按气体出峰顺序分别将各组分特征气体的体积分数变换成电信号;A/D 转换器则将该信号转换为数字信号,通过适当的通信协议传给上位机;上位机首先存储所得到的信号,然后由数据处理软件完成调用、显示、测量等。故障诊断是根据所测得的变压器故障特征气体的数据,直接给出变压器的实际状态。

3 在线色谱监测技术在 220 kV 袁家坝站主变压器的应用

220 kV 袁家坝变电站 1、2 号主变上采用的是宁波理工监测设备有限公司生产的;MGA2000-6 变压器色谱在线监测系统,于 2006 年 1 月 19 日开始加入电网试运行。该系统的投入使用,实现了连续、实时、在线监测变压器油中溶解气体的含量和各自增长率的目的。

3.1 主变色谱在线监测系统基本构成原理

主变色谱在线监测系统在微处理器控制下,进行热油冷却、油中溶解气体萃取、流路切换与清洗、柱箱与检测器温度控制、样气的定量与进样、基线的自动调节、数据采集与处理、定量分析与故障诊断等分析流程。其工作原理如下:

变压器色谱在线监测系统采用气相色谱检测原理。变压器油在内置一体式油泵作用下进入油气分离装置,分离出变压器油中的溶解气体,经过油气分离后的变压器油流回变压器油箱,萃取出来的气体在内置微型气泵的作用下进入电磁六通阀的定量管中。定量管中的气体在载气作用下进入色谱柱,然后检测器按气体流出色谱柱的顺序分别将六组分气体(H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 C_2H_6)变换成电压信号。色谱数据采集器将采集到的气体浓度电压量通过 RS485 上传给安装在主控室的数据处理服务器,数据处理服务器根据仪器的标定数据进行定量分析,计算出各组分和总烃的含量以及各自的增长率,由故障诊断专家系统对变压器进行故障分析,从而实现变压器故障的在线监测。

3.2 主变压器色谱在线监测系统性能特点

主变色谱在线监测系统性能特点:监测前端实现

小型化、模块化,安装、维护方便,操作界面简单。

另外还具备以下特点:

(1)测试周期可调:24 h/次的试验周期(测试周期可调,但不能小于2.5 h/次),能及时进行分析并预报设备早期故障。

(2)数据详尽,分析灵活:在线数据提供趋势信息,贮存了长期的气体分析结果,可以在线分析其历史记录趋势。

3.3 主变色谱在线监测系统运行情况

220 kV 袁家坝变电站1、2号主变的色谱在线监测系统是由广元电业局承担的工程项目。于2006年1月19日开始加入电网试运行。运行期间色谱线监测系统运行稳定、可靠,未发生过停机及网络中断等影响运行的现象。

3.3.1 数据对比

(1)通过袁家坝变电站1、2号主变色谱在线监测系统在线测试数据和油化班实验室离线数据的比较(见表1、表2),H₂、CO、CH₄、C₂H₂、C₂H₄、C₂H₆总烃相对误差均小于20%(注:相对误差算式=(组分在线浓度-组分离线浓度)×100/组分离线浓度)。

(2)通过在线实测,袁家坝变电站1、2号主变色

谱在线监测系统测试数据实时性、再现性好,能正确反映变压器油中气体浓度的变化趋势,满足要求^[8]。

4 主变色谱在线监测系统研究经济效益分析

4.1 直接效益

气相色谱法是发现变压器早期潜伏性故障的主要方法,但离线的试验周期存在一定的局限性,可能造成对一些事故先兆信息不能及时捕捉到,无法应对突发故障的发生,从而导致事故的扩大,引起重大设备损坏事故及电网事故。必须对变压器实时情况有及时的了解、掌握^[9]。

针对上述问题,采用气相色谱在线监测技术,实现变压器油色谱在线监测,有效降低了维修管理成本,延长变压器的使用寿命,且便于对有故障可疑的变压器实现连续跟踪监测,减少甚至消除变压器事故,可克服传统离线工作量大和盲目性大的缺点,及时捕捉事故先兆信息,从而有效降低变压器的事故率,大大减少了停电概率。采用气相色谱在线监测系统为广元电业局220 kV袁家坝站主变压器的长周期

表1 1号主变在线、离线比较

| 分析日期 | 试样来源 | 测试方式 | 组分浓度(μL/L) | | | | | | |
|------------|------|---------|----------------|--------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|
| | | | H ₂ | CO | CH ₄ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ | C ₂ H ₆ | 总烃 |
| 2007.12.21 | 1号主变 | 在线 | 4.80 | 220.50 | 8.33 | 1.00 | 0 | 0.70 | 10.03 |
| | | 离线 | 4.40 | 200.40 | 7.50 | 1.10 | 0 | 0.80 | 9.40 |
| | | 相对误差(%) | 9.1 | 10.0 | 11.1 | -9.1 | 0 | -12.5 | 6.7 |
| 2008.01.25 | 1号主变 | 在线 | 4.85 | 17.00 | 0.78 | 0.35 | 0 | 0.25 | 1.38 |
| | | 离线 | 4.70 | 18.50 | 0.90 | 0.40 | 0 | 0.30 | 1.60 |
| | | 相对误差(%) | 3.2 | -8.1 | -13.3 | -12.5 | 0 | -16.7 | -13.8 |
| 2008.02.23 | 1号主变 | 在线 | 5.89 | 24.90 | 0.81 | 0.25 | 0 | 0.30 | 1.36 |
| | | 离线 | 5.87 | 25.80 | 0.80 | 0.30 | 0 | 0.30 | 1.40 |
| | | 相对误差(%) | 0.3 | -3.5 | 1.2 | 16.7 | 0 | 0 | -2.9 |

表2 2号主变在线、离线比较

| 分析日期 | 试样来源 | 测试方式 | 组分浓度(μL/L) | | | | | | |
|------------|------|---------|----------------|--------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|
| | | | H ₂ | CO | CH ₄ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ | C ₂ H ₆ | 总烃 |
| 2007.12.21 | 2号主变 | 在线 | 6.60 | 300.10 | 9.81 | 0.75 | 0 | 1.35 | 11.91 |
| | | 离线 | 6.50 | 292.30 | 10.50 | 0.80 | 0 | 1.40 | 12.70 |
| | | 相对误差(%) | 1.5 | 2.7 | -6.6 | -6.2 | 0 | -3.6 | -6.2 |
| 2008.01.25 | 2号主变 | 在线 | 5.24 | 9.73 | 2.31 | 0.90 | 0.48 | 1.10 | 4.79 |
| | | 离线 | 5.20 | 8.90 | 2.40 | 0.80 | 0.50 | 1.20 | 4.90 |
| | | 相对误差(%) | 0.8 | 9.3 | -3.8 | 12.5 | -4.0 | -8.3 | -2.2 |
| 2008.02.23 | 2号主变 | 在线 | 1.80 | 76.80 | 2.20 | 0.80 | 0 | 0.87 | 3.87 |
| | | 离线 | 1.90 | 76.60 | 2.30 | 0.90 | 0 | 0.90 | 4.10 |
| | | 相对误差(%) | -5.3 | 0.3 | -4.3 | -11.1 | 0 | -3.3 | -5.6 |

稳定运行提供了科学的依据,同时产生了极大的社会效益。

4.2 间接效益

过去主变压器一致实行周期检修,这种计划检修的盲目性必然存在检修过度或检修不及时的弊病,检修过度带来财力、人力巨大浪费,降低了设备的使用率,同时,由于过度的检修,有可能对设备造成一定程度的损坏;而检修不及时又可能导致设备事故。采用在线监测措施可及时了解变压器的运行状态,根据设备的真实状态决定设备的检修,从而有效降低维修管理成本,延长变压器的寿命。

由于科学地指导了试验、检修工作,减少试验检修停电次数,增加了售电量及销售收入;并从一定程度上减少了工人作业的次数,从而降低了事故发生的机率,为安全生产作出了贡献。

参考文献

[1] GB/T 7252—2001. 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].

[2] 郭碧红,杨晓洪.我国电力设备在线监测技术的开发应用状况分析[J].电网技术,1999,23(8):65—68.
 [3] 杨光玉,吴佩琦.大型油浸式变压器油中溶解气体在线监测技术的应用和研究[J].广西电力,2002,(3):52—54.
 [4] 贾瑞君.高分子薄膜在变压器油中溶解气体在线监测中的应用[J].变压器,2001,38(10):37—40.
 [5] 李红雷.油浸电力设备在线色谱监测及诊断系统的研究[D].上海交通大学,2000.
 [6] 李红雷,李旭光,肖登明,陈亚珠.一种新型的变压器油色谱分离柱[J].变压器,2002,39(8):35—37.
 [7] 杨光玉,吴佩琦.大型油浸式变压器油中溶解气体在线监测技术的应用和研究[J].广西电力,2002,(3):52—54.
 [8] 中华人民共和国电力行业标准SD/187—1986.变压器油中溶解气体分析和判断导则,第五章 试验结果的判断[S].北京电力工业部,1987.
 [9] 尚丽平,曹铁泽,刘先勇,周方洁.变压器油中溶解气体在线色谱监测综述[J].变压器,2004(8).

(收稿日期:2008—03—17)

(上接第25页)

表1 服务器接收到的数据。

| 地区 | 线路名称 | 实时电流 | 实时功率(MW) | 导线温度(°C) | 环境温度(°C) | 日照强度(W/m ²) | 散热系数 | 实时限额(MW) | 运行状态 | 时 间 |
|----|------|-----------|----------|----------|----------|-------------------------|------|----------|------|-----------------|
| 四川 | 棉朱一线 | 250.292 6 | 94.47 | 18 | 17 | 7 | 593 | 787.54 | 安全运行 | 2007—11—8 20:31 |
| 四川 | 棉朱一线 | 274.693 9 | 103.68 | 17.7 | 17 | 7 | 952 | 787.54 | 安全运行 | 2007—11—8 20:26 |
| 四川 | 棉朱一线 | 293.391 6 | 110.52 | 17.4 | 16.7 | 7 | 1000 | 788.05 | 安全运行 | 2007—11—8 20:21 |
| 四川 | 棉朱一线 | 274.118 9 | 103.26 | 17.4 | 16.8 | 7 | 943 | 787.36 | 安全运行 | 2007—11—8 20:16 |
| 四川 | 棉朱一线 | 250.784 5 | 94.47 | 17.4 | 16.8 | 7 | 601 | 787.36 | 安全运行 | 2007—11—8 20:11 |
| 四川 | 棉朱一线 | 237.261 3 | 89.45 | 17.4 | 16.8 | 0 | 298 | 788.72 | 安全运行 | 2007—11—8 20:06 |
| 四川 | 棉朱一线 | 243.749 7 | 91.82 | 17.3 | 16.6 | 0 | 355 | 789.43 | 安全运行 | 2007—11—8 20:01 |
| 四川 | 棉朱一线 | 246.324 7 | 92.79 | 17.3 | 16.7 | 7 | 547 | 788.05 | 安全运行 | 2007—11—8 19:56 |
| 四川 | 棉朱一线 | 229.197 1 | 86.24 | 17.3 | 16.6 | 7 | 373 | 787.83 | 安全运行 | 2007—11—8 19:51 |
| 四川 | 棉朱一线 | 237.458 2 | 89.45 | 17.3 | 16.6 | 7 | 451 | 788.73 | 安全运行 | 2007—11—8 19:46 |
| 四川 | 棉朱一线 | 226.607 | 85.12 | 17.3 | 16.5 | 7 | 351 | 787.17 | 安全运行 | 2007—11—8 19:41 |
| 四川 | 棉朱一线 | 239.562 | 90.14 | 17.3 | 16.5 | 7 | 474 | 788.51 | 安全运行 | 2007—11—8 19:36 |
| 四川 | 棉朱一线 | 245.189 2 | 92.1 | 17.3 | 16.6 | 7 | 535 | 786.49 | 安全运行 | 2007—11—8 19:31 |
| 四川 | 棉朱一线 | 254.629 9 | 95.73 | 17.1 | 16.5 | 7 | 651 | 787.86 | 安全运行 | 2007—11—8 19:26 |
| 四川 | 棉朱一线 | 231.052 8 | 86.79 | 17 | 16.4 | 7 | 390 | 787.85 | 安全运行 | 2007—11—8 19:21 |
| 四川 | 棉朱一线 | 251.774 3 | 94.47 | 17 | 16.5 | 7 | 614 | 786.31 | 安全运行 | 2007—11—8 19:16 |
| 四川 | 棉朱一线 | 255.348 | 96 | 16.4 | 16 | 7 | 663 | 791.25 | 安全运行 | 2007—11—8 19:11 |
| 四川 | 棉朱一线 | 232.895 3 | 87.21 | 16.4 | 16.1 | 7 | 409 | 787.42 | 安全运行 | 2007—11—8 19:06 |
| 四川 | 棉朱一线 | 216.872 2 | 81.21 | 16.6 | 16.4 | 7 | 275 | 785.4 | 安全运行 | 2007—11—8 19:01 |
| 四川 | 棉朱一线 | 217.801 8 | 81.49 | 16.6 | 16.5 | 7 | 281 | 784.07 | 安全运行 | 2007—11—8 18:56 |
| 四川 | 棉朱一线 | 217.234 9 | 81.21 | 16.6 | 16.4 | 7 | 278 | 784.09 | 安全运行 | 2007—11—8 18:51 |

电线路在线监测增容系统紧密联系在一起,密切配合,协调有序运作,从而切实实现线路调度高效协调、

优化资源配置的功能。

(收稿日期:2008—02—10)

基于RFID电子标签技术的电力监测系统

韩磊

(天津市电力公司技术中心, 天津 300022)

摘要:利用RFID技术和计算机数据管理技术,开发了一种采用射频标签识读技术的电力物资管理的新途径,结合GPS卫星定位,建立更智能化的电力监测系统,实现电力设备的智能管理模式。提升电网对重大灾情的应对能力。介绍了RFID电子标签的工作原理,以及在电力系统实际应用中现存的问题和解决方法。

关键词:RFID;GPS;电力监测;雪灾;智能化管理

Abstract: The principles of different lightning location methods in the existing lightning location systems are analyzed and compared as well as the excellence and shortcoming of its application. The applications of the existing lightning location systems are analyzed as well in various ways. Looking ahead, the research of the lightning stroke location method based on traveling wave theory will become the research focus of increasing accuracy for lightning location.

Key words: transmission line; lightning stroke; lightning location system; traveling wave

中图分类号:TM75 **文献标识码:**B **文章编号:**1003-6954(2008)03-0067-03

2008年初,百年罕见的雪灾袭击中国南方大部分地区,电网设施遭到严重破坏,罕见的雪灾压断了高压电线,压塌了电塔,致使电力供给中断。以受灾严重的湖南电网为例,全省500kV 33条线路(含联络线)停运11条,占500kV线路总数的33%。全省220kV 277条线路停运34条,占220kV线路总数的12%;全省220kV变电站(含电厂升压站)115座,全停9座,占220kV变电站总数的8%。雪灾暴发后各地极力抢修,但恢复缓慢,暴露了中国电网建设的薄弱与明显不足。问题的关键在于相关部门对各级电网的监测工作不到位,不能及时准确的掌握电力设施的具体相关信息。

当前,建立一套完整的电力监测体系是十分必要的。首先需要一种信息载体,以记录想要监测的电力设施相关信息。目前条形码的技术已是非常成熟,其应用已是无处不在,基于条形码的传统的商品包装和物流管理对人类的贡献是非常巨大的,但随着互联网在全球的普及,管理的自动化程度越来越高,条形码的某些特性已经不能满足现代网络时代的高自动化智能管理,而需要一种智能的电子标签取而代之,RFID射频无线电子标签的特点正好可以取代传统的条形码技术,电子标签的出现将给未来的电力电网监测系统提供一条新思路。

1 RFID电子标签概念及应用前景

1.1 概念

事实上RFID射频电子标签并不是现在才有的一种技术,这种技术实际在20世纪80年代已经出现,一直应用在某些特定的领域,如工厂自动化生产线,仓库中的物品管理或车站检票。只不过这种技术的日益成熟,以及形态越来越小,成本越来越低,越来越适用于作为信息载体了。

RFID是Radio Frequency Identification的缩写,即射频识别,射频识别是一种非接触式的自动识别技术,它通过射频信号自动识别目标对象,并获取目标中的相关数据。

1.2 前景

雪灾后的电网恢复工作十分艰难,尤其是江西和浙江,之所以艰难因为在进行电网建设初期,为了节约能耗,江西和浙江主网一些塔架都选择在山区,而山区气温低、风大,倒塔最严重。而且受当地地理自然条件限制,对损坏的电力杆塔的相关信息不能准确的掌握。因此也不能及时拿出灾后的修复方案,延误抢修时间。而应用RFID电子标签识别技术的电力监测系统可以帮助解决这一实质性难题。

RFID标签被吸附在电力杆塔上,从杆塔建起的第一天到它报废,RFID标签就像身份证一样,记录其

一切信息,包括编号、建成时间、日常维护、修理过程及次数,此外还可以记录杆塔相关地理位置和经纬坐标,以便构建基于GPS的电力网分布图。带有RFID终端询问式读写装置的直升飞机可以从空中读取到杆塔的状况信息,以判断杆塔是否损坏、是否生锈,以及其详细地址。终端天线安装在直升飞机的腹部,并向下引出。

2 可行性分析

2.1 RFID工作原理

RFID电子标签分为被动标签(Passive tags)和主动标签(Active tags)两种。主动标签自身带有电池供电,读/写距离较远同时体积较大,与被动标签相比成本更高,也称为有源标签。被动标签由阅读器产生的磁场中获得工作所需的能量,成本很低并具有很长的使用寿命,比主动标签更小也更轻,读写距离则较近,也称为无源标签。有源标签因为其长距离识别的优势,主要应用于大型的高速运动物体的标识的识别之上,这里所说的电力杆塔上使用的就是主动式UHF超高频RFID标签,其频段在860 MHz~960 MHz之间,以保证直升飞机能在空中50 m之外与RFID标签保持正常通讯。

2.2 RFID电子标签识别系统的构成

一个真正的RFID电子标签识别系统至少应包含电子标签、阅读器、数据处理和存储的设备以及系统软件。

(1)RFID电子标签(Tag):,每个标签具有唯一的电子物品编码,附着在物体上标识目标对象;

(2)阅读器(Reader):读取(有时还可以写入)标签信息的设备;

(3)天线(Antenna):在标签和阅读器间传递射频信号。它一方面给无源的电子标签提供电能,另一方面也通过它接收电子标签上发出的信息,它也可向电子标签发射写入的信息。另外在每个电子标签上也有其自己的微形天线。

RFID电子标签由天线和专用芯片组成,天线是镀在塑料片基上的铜膜线圈,在塑料片基上还嵌有体积非常小的集成电路芯片(现在已经只有芝麻粒大,还可更小),在这个集成电路芯片中有高速的射频接口,控制单元,EEPROM三个模块组成。

RFID电子标签技术与条形码(Barcode)技术相比

其优势在于:

- 1)不需要光源,甚至可以透过外部材料读取数据;
- 2)使用寿命长,能在恶劣环境下工作;
- 3)读取距离更远;
- 4)可以写入及存取数据,写入时间快;
- 5)标签的内容可以动态改变;
- 6)能够同时处理多个标签;
- 7)标签的数据存取有密码保护,安全性更高;
- 8)可以对RFID标签所附着的物体进行追踪定位。

阅读器主要包含无线电收发天线、数据通讯及相应的控制电路。电子标签主要包括无线电波接收与发射的电路、电源、及存储数据的电路。数据处理与存储的设备往往是PC机,PC机上一般安装相应的系统软件与数据库管理软件。

3 电力设施监测系统的构建

3.1 RFID电子标签的在系统中的实际应用

在杆塔刚建成时,一些杆塔固定属性就事先写入标签中,例如:建成时间,杆塔编号等,同时可以利用GPS定位装置记录下杆塔的经纬度信息,这些信息也作为固定属性写入标签。每次对杆塔进行维护后,工作人员随身携带手持式读写器(通常是嵌入读写模块的掌上电脑,构成原理基本与阅读器相同)把相关维护信息写入标签,包括杆塔的经纬度位置、目前现状、存在的问题等信息。

根据基于GPS的电力网分布图来查看杆塔分布情况,以便快速确定问题杆塔的地理位置。为抢修人员提供有效修复方案。

3.2 相关流程

按期指派直升飞机对杆塔进行巡检,尤其是在发生雪灾等重大灾情后陆地状况十分恶劣时,空中监测是必然措施,飞机上的阅读器对杆塔进行身份识别,在取得电线杆塔具体信息后,返回通常阅读器与电脑相连,所读取的标签信息被传送到计算机管理中心上进行下一步处理。为了使信息更加直观化,可以在管理平台上建立基于GPS的电力网分布图,把地图的视觉效果、电力设施地理信息和数据库操作集成在一起。在电子标签内的经纬度信息录入电脑后,通过数据库查找,直接在分布图上显示杆塔的具体地理位

置,配合实景相片达成一套完整的监测体系。

4 需要应对的问题

4.1 RFID 电子标签的标准不统一

目前国际上现在有两家权威的 RFID 电子标签标准研究机构,代表着 RFID 电子标签标准的发展方向。一个是 1999 年成立总部设在美国麻省理工学院(MIT)的 Auto ID Center(自动 ID 中心),另一个是日本 2003 年 3 月成立的泛在的 ID 中心(Ubiquitous ID Center 无处不在的 ID 中心)。上述两个中心所推出的标准化规格有一些差别。例如在“自动 ID 中心”的规格中,以 96 位代码描述在 IC 标签中所容纳的数据,而“无处不在 ID 中心”则采用 128 位代码。“自动 ID 中心”以利用互联网为前提探讨 IC 标签机制,而“无处不在 ID 中心”则考虑在不连接因特网的情况下使用 IC 标签。目前两中心均已开发完成各自的基础架构。Auto ID Center 提出的是由被称为 ePC 的 96 位 ID、管理 ID 信息的 PML 服务器以及检索 PML 服务器位置的 ONS(对象名称服务器)服务器组成的架构。Ubiquitous ID Center 将应用面向 T-engine 的技术。包括 128 位 ID 和名为 ETP(实体传输协议)的专用协议等。还包括用于搜索 IC 标签和服务器位置的地址解析服务器(ARS)。标准的不统一是制约 RFID 得以推广的一个重要因素。

4.2 通讯

实际中,直升机的金属部分、电力杆塔及电缆会对标签及阅读器的天线产生一定的干扰,甚至信号屏

蔽,这会直接影响阅读器与标签之间的正常通讯。此外较高的差错率也是 RFID 技术需要改进的方面。这些都需要方案的进一步完善,但随着 RFID 电子标签的日益普及,RFID 技术将会逐步解决这些问题,这是任何一个新技术的必由之路。

5 结论

在未来的电力监控系统中,RFID 电子标签的优良特性及智能管理会帮助人们更及时更准备的掌握各类相关信息。电力设施一旦出现损坏,它将指导做出正确的维修方案,节省宝贵的修复时间。从而提升整个电网应对各类自然灾害的能力,使电网更加坚强。

参考文献

- [1] C.; Declercq, M.; Joehl, N.; Curty, J.-P.; Dehollain, "A global survey on short range low power wireless data transmission architectures for ISM applications." [C]. Semiconductor Conference, 2001. CAS 2001 Proceedings. International, Volume: 1, 2001 Page(s): 117 - 126 vol. 1.
- [2] 德生科技. 电子智能标签 [EB/OL]. <http://www.tecsun-card.com.cn/p-tag4.htm>, 2004-3-20.
- [3] 游战清. 无线射频识别技术(RFID)理论与应用[M]. 电子工业出版社 2004-10-1.
- [4] EPCglobal (r), EPCTM Tag Data Standards Version 1.1 Rev. 1.24 Standard Specification, 01 April 2004.
- [5] RFID 中国论坛. RFID 系统组成和工作原理 [EB/OL]. <http://tech.rfidchina.org/rfid-info-1476-150.html>.

(收稿日期:2008-02-10)

简 讯

提高自然灾害应对能力的能源综合运输体系研究

近日,国家电网公司发展策划部在北京主持召开了“提高自然灾害应对能力的能源综合运输体系研究”可行性研究报告专家评审会议。以原国家电力公司总工程师冉莹为组长,王信茂、姜绍俊、曾德文、孙树良、毛晋、刘毓全共 7 位专家组成的专家组,对课题可行性研究报告进行了评审。经研院党委书记、副院长葛正翔参加评审会议。

专家评审组在认真听取课题组的汇报后认为,今年我国南方地区发生严重冰灾后,从宏观整体上研究如何构筑新型电力能源综合运输体系,降低系统风险,提高冰灾等灾害的应对能力,十分必要。项目以提高能源输送安全为核心,研究建立电力能源综合运输体系安全方面的评价指标及相关的理论与方法,具有较强的实用性和先进性。与会专家一致同意项目立项,同时建议课题研究突出“输电在能源综合运输体系中的作用和地位”这一重点。

编制配电网检修计划的辅助方法及仿真

钟俊毅, 吕飞鹏, 陈厚思

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:在制定检修计划时检修设备对电网所造成的影响分析目前停留在定性分析上,很大程度上依赖于检修专工的工作经验。因此需要一种辅助工具,以量化检修对电网造成的影响,并制定出更加合理的检修计划。提出的辅助工具的初步模型,先根据各种影响因素和约束条件,形成初始检修计划。考虑因设备检修造成的负荷转移的影响,对检修计划进一步优化,同时引入了一种新的分割网络的方法——注入电流分割法。通过该方法确定了满足电压约束条件的运行方式,同时为以后计算开关操作费用、系统网损值提供网络拓扑。

关键词:配电网;检修计划;配电网潮流;负荷转移;注入电流

Abstract: At present, the analysis on the impact of device maintenance on power grid largely rest on qualitative ones and, in most degree, depend upon the experiences of maintenance technicians while making maintenance schedule. Therefore, a supplementary tool is needed to carry out the quantitative analysis and make out the more practicable maintenance schedules. An initial model of the supplementary tool is presented. Firstly, based on all kinds of influencing factors and constraint conditions, an initial maintenance schedule is made. Then considering the affection of load transfer due to device maintenance, the maintenance schedule is further optimized. Meanwhile, a new method of partitioning the network, namely, a splitting method of injection current, is proposed. The operation modes are determined that can satisfy the voltage constraint conditions and be guaranteed to make assessment and optimization of the maintenance schedule for the further calculation of the switch operation expense and power network loss.

Key words: distribution network; maintenance schedule; distribution power flow; load transfer; injection current

中图分类号: TM755 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)03-0070-05

配电网检修是配电网运行中的重要工作,安排得当的检修计划可以提高供电可靠性、降低网损。目前,检修计划优化问题的研究,主要集中在发电机组和输电线路检修上。

在发电机组检修研究方面以设备状态为基础的智能发电检修计划研究^{[1]~[2]}和电力市场下发电机组检修^{[3]~[4]},主要是根据传统调度和电力市场下的不同,建立最小收益损失目标函数来权衡机组检修带来的损失。考虑到发电机组和输电网络之间密切的联系,建立了发输电联合检修^{[5]~[7]}。输电线路的检修优化有不少借用了发电机组检修优化的方法^[8],而对于配电网结构复杂、检修任务多和不能忽略电阻R的特点。因此在处理优化问题上很难借鉴机组检修优化的方法。在考虑检修计划优化问题时不仅要考虑不同检修任务之间的互斥性与协调性,还要考虑安全约束和检修公司的检修能力,还涉及优化负荷转移路径、减少开关动作次数等配电网重构问题^[9]。

1 配电网检修计划制定

配电网检修计划优化问题是以设备检修和负荷转移路径为控制变量的多目标多约束的优化问题。

在制定检修计划时,先考虑网络结构和检修规程本身确定的各种初始约束条件^[10]。

1) 检修规程约束

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (1)$$

式中: x_{\min} 和 x_{\max} 分别为规程规定的设备最早和迟检修时间。

2) 同时检修约束

对于会导致同一负荷区停电的两个设备,应将其安排在同时检修,以避免重复停电或负荷转移。数学描述为:

$$x_i \leq x_j \quad (2)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为第 i 个和第 j 个设备的开始检修时间。

3) 互斥检修约束

对于会造成电气永久孤岛的设备,应错开其同时检修的时间。数学描述为:

$$x_j \geq x_i + D_i \quad (3)$$

式中: D_i 为第 i 个设备检修持续时间。

4) 检修资源约束

$$\sum_{i=1}^N u_i \leq M_k$$

式中: u_i 取值为 0 和 1, 其中 0 表示 i 设备在第 k 时段正常运行, 1 表示 i 设备在第 k 时段检修; N 为待检修设备总数; M_k 为在第 k 时段能同时检修的设备总数。

5) 检修窗口约束

由于网络和负荷情况影响,有些设备只能在固定时间内安排检修。数学描述为:

$$x_i + D_i \in X_i \quad (5)$$

式中: X_i 为 i 设备不能检修的时间集合。

根据上面的各种约束制定出初始的检修计划,该计划不一定是最优的,同时也不是唯一的。

2 负荷转移路径优化问题

在确定初始检修计划以后,需要对该计划的运行可靠性和经济性进行分析优化。主要是由于停电区域负荷转移造成的网损和负荷均衡化以及电流电压约束和潮流约束。

2.1 优化目标函数的建立

用数学描述为:

$$F = \frac{w_s f_s + w_w f_w + w_j f_k}{w_c \times 100} \quad (6)$$

式中: F 为优化目标综合值; f_s 为售电损失; f_w 为网损; f_k 为开关操作费用; c 为负荷均衡化程度; w_s , w_w , w_k , w_j 为权重系数。

2.2 约束条件的判断

在优化负荷转移路径计算中,各节点满足电流电压约束和线路上潮流越限约束^[11]。

电压越限约束:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (7)$$

式中: V_i^{\min} , V_i^{\max} , V_i 分别为转移负荷后各节点的电压上下限和电压。

电流越限约束:

$$I_i^{\min} \leq I_i \leq I_i^{\max}$$

式中: I_i^{\min} , I_i^{\max} , I_i 分别为转移负荷后各节点的

电流上下限和电流。

潮流越限约束:

$$|S_l| \leq S_l^{\max} \quad (9)$$

式中: S_l 为线路 l 的潮流; S_l^{\max} 为线路 l 允许通过的潮流限值。

3 算法的介绍

3.1 配电网潮流计算

文献[12]的方法,此方法根据牛顿法的基本原理,从复功率方程出发,对功率迭代方程中与电压相关控制项进行初值替代,得到只与节点功率和线路阻抗相关的常 Jacobian 矩阵。

具体计算公式如下:

修正方程:

$$\begin{bmatrix} Im[1] \\ Re[1] \\ \vdots \\ Im[n] \\ Re[n] \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} B_{11} - Q_{1s} & G_{11} - P_{1s} & \cdots & B_{1n} & G_{1n} \\ G_{11} + P_{1s} & -B_{11} - Q_{1s} & \cdots & G_{1n} & -B_{1n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ B_{n1} & G_{n1} & \cdots & B_{nn} - Q_{ns} & G_{nn} - P_{ns} \\ G_{n1} & -B_{n1} & \cdots & G_{nn} + P_{ns} & -B_{nn} - Q_{ns} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta e_n \\ \Delta f_n \end{bmatrix}$$

$$\text{其中 } I_m[i] = \frac{\Delta Q_i e_i - \Delta P_i f_i}{V_i^2}$$

$$R_e[i] = -\frac{\Delta P_i e_i + \Delta Q_i f_i}{V_i^2}$$

收敛条件 $\max|\Delta P, \Delta Q| < \epsilon$ 取 $\epsilon = 10^{-5}$

3.2 注入电流分割法

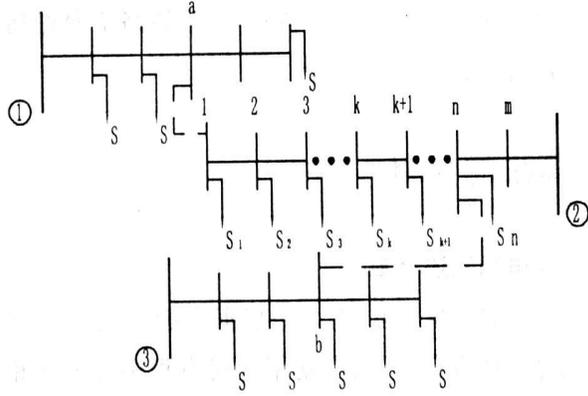
由于设备检修造成部分线路不得通过联络开关连接到其他供电区域。有些电气孤岛有两个或两个以上的联络开关可以动作,而合上任何一个开关其形成的网络都有电压越限的情况,因此可以考虑两个联络开关都合上,然后将此电气孤岛进行分割。不考虑合上两个以上的联络开关,如果合上三个联络开关,就要跳两个分段开关,因此增加了开关损耗费用。

公式推导:

由电压幅值降落公式^[13]

$$\Delta V = \frac{PR + QX}{V} \quad (11)$$

可知,电压幅值降与节点负荷、线路阻抗成正比与端电压成反比。



图中①②③表示电源点, Bus 编号用数字和字母表示。

图1 简单配电网接线图

在图1中当断开 $n-m$ 之间的分段开关后形成节点号为 $1, 2, 3, \dots, k, \dots, n$ 的孤岛。

设分割点编号为 f , 如分割点在 $Bus-1$ 和 $Bus-2$ 之间(以1到2为正方向), 则割点编号 $f=1$ 。因为既然要分割网络, 则孤岛不是由一个电源供电, 故 $1 \leq f < n$ 。

将各个节点的负荷等效为注入电流流入各节点 Bus 。则 $Bus-a$ 和 $Bus-1$ 之间的电压降为:

$$\Delta V_{a-1} = Z_{a-1} \cdot \sum_{j=1}^n I_j \quad (12)$$

同理可得到 $V_{1-2} \dots \Delta V_{(f-1)-f}$ 的电压降。累加得从 a 点到断开点 f 的电压降:

$$\Delta V_a = \sum_{i=1}^f Z_i \cdot (\sum_{j=1}^n I_j) \quad (13)$$

同样可以得到从 b 点到断开点 f 的电压降:

$$\Delta V_b = \sum_{i=f+1}^n Z_{i+1} \cdot [(I_t - \sum_{j=1}^f I_j) - \sum_{j=i+1}^n I_j] \quad (14)$$

其中: $I_t = \sum_{i=1}^n I_i, \dot{I}_t = \frac{S_i}{V_i}$

由于各点电压未知, 这里只是对于分割的估计值。考虑到电压降与端点电压成反比, V_i 两个端点电压分别带入公式(13)和(14)可得:

$$\Delta V_a = \sum_{i=1}^f Z_i \cdot [\sum_{j=1}^n (\frac{\dot{S}_j}{\dot{V}_a})] \quad (15)$$

$$\Delta V_b = \sum_{i=f+1}^n I_{i+1} \cdot [[L - \sum_{j=1}^f (\frac{\dot{S}_j}{\dot{V}_b}) - \sum_{j=i+1}^n (\frac{\dot{S}_j}{\dot{V}_b})]] \quad (16)$$

其中: $I_t = \sum_{i=1}^n I_i (\frac{\dot{S}_i}{\dot{V}_b})$

因为公式中用端电压代替各 Bus 电压, 所以得到

的 ΔV_a 和 ΔV_b 并不准确。但在分割网络时可以用来确定 f 的大概值。

$$I_f = \frac{|V_a| - |\Delta V_a|}{|V_b| - |\Delta V_b|} \quad (17)$$

由公式(17)得出的不同分割点对应的 L 值, 取更接近于1的 L 值对应的 f 值, 即为可能的分割点。

3.3 优化具体流程

算法搜索采用禁忌搜索^[14]的方法。即先确定一个孤岛所有联络开关对侧的节点电压, 选取电压幅值最高的联络节点合上联络开关, 再计算各点的电压看是否满足电压约束条件。如果满足即退出, 不满足约束则合上下一个联络开关。当所有联络开关都不满足约束时, 采用上面3.2介绍的方法分割孤岛。当完成一个孤岛以后, 再进行第二个孤岛的计算, 同时每当合上一个联络开关都要验证上一个已完成的孤岛电压是否受超限, 如上一个已完成的孤岛电压超限, 即退回本一步合上的开关, 重新选择一个联络开关合上或重新分割孤岛。如果所有开关都不满足要求, 即退回到上一个孤岛的计算, 重新确定网络的运行方式。

具体流程如图2:

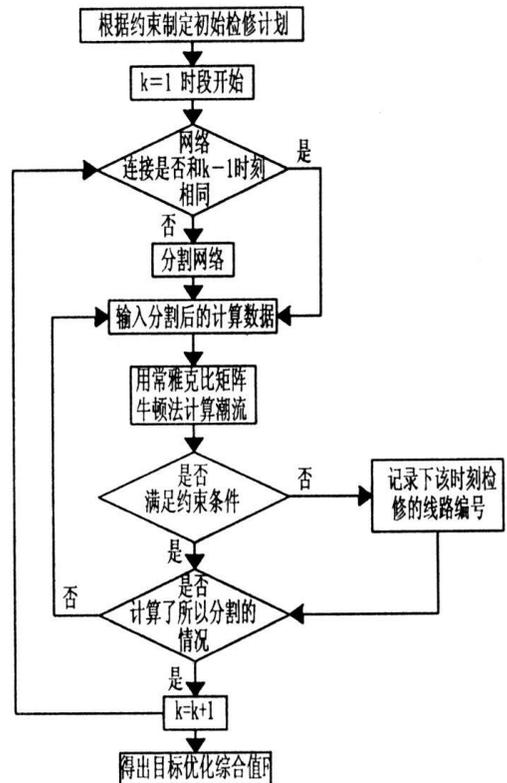


图2 检修计划优化流程图

4 算例仿真

对下面 IEEE94 节点^[15]的配电网进行仿真分析。

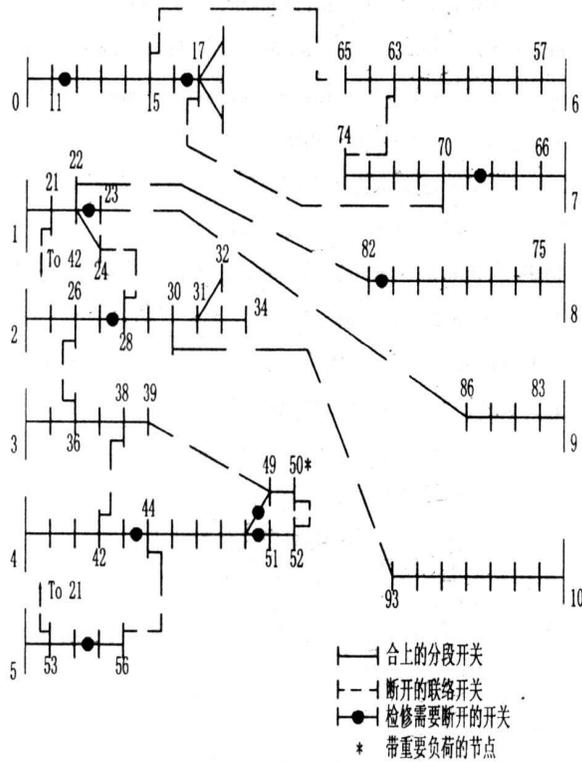


图3 IEEE 94 节点配电网接线图

由于在 IEEE94 节点文献本身是一个网络重构问题,因此 20, 81, 82, 93 节点电压已经越限, 所以修改部分节点的负荷数据。修改如下:

16 节点 $100+800j$ 改为 $100+50j$

17 节点 $400+320j$ 改为 $300+220j$

81 节点 $2000+1500j$ 改为 $1000+750j$

89 节点 $2000+1300j$ 改为 $1000+650j$

因检修需要断开的分段开关有 11-12、16-17、22-23、27-28、43-44、48-49、48-51、54-55、68-69、81-82。

4.1 编制检修计划

检修计划编制约束条件:

1) 检修规程约束

22-23、27-28、68-69 按定期检修的要求必须首先安排检修。

2) 同时检修约束

11-12、16-17 会同时 Bus-18、Bus-19、Bus-20 停电。

43-44、48-49 会同时 Bus-49、Bus-50 停电。

43-44、48-51 会同时 Bus-51、Bus-52 停电。

3) 互斥检修约束

对于 Bus-50 的重要负荷。53-54 和 43-44 互斥、48-49 和 48-51 互斥。

4) 检修资源约束 $M=2$

5) 检修窗口约束

81-82 由于检修设备的约束不能在 IV、III 时段安排检修。

11-12 由于检修设备的约束不能在 V、VI 安排时段。

按上述约束条件, 制定出检修计划如表 1。

表 1 编制的检修计划

| 时段 | I | II | III | IV | V |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 所断开 | 22-23 | 68-69 | 11-12 | 43-44 | 48-51 |
| 的开关 | 27-28 | 81-82 | 16-17 | 48-49 | 54-55 |

4.2 对检修计划进行优化

表 2 I 时段检修情况

| 时段 | $ V_x $ | 是否越限 | L | 分割点 | 是否越限 |
|----|-------------------|------|-------------|-------|------|
| I | $ V_{24} =0.9828$ | Y | $L1=1.0332$ | 29-30 | Y |
| | $ V_{93} =0.9566$ | Y | $L2=1.0159$ | | |

注: $|V_x|$ 一与孤岛相连的节点电压幅值, 下标为节点号

由表 2 知, I 时段 27-28 断开时, 检修应改到负荷低时进行检修或停掉部分负荷。

表 3 调整后的检修计划

| 时段 | I | II | III | IV | V |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 所断开 | 22-23 | 68-69 | 11-12 | 43-44 | 48-51 |
| 的开关 | 81-82 | 16-17 | 48-49 | 54-55 | |

表 4 调整后 I、II、III 时段检修情况

| 时段 | $ V_x $ | 是否越限 | L | 分割点 | 是否越限 |
|-----|-------------------|------|-------------------------|-------|------|
| I | $ V_{86} =0.9809$ | N | - | - | - |
| | $ V_{22} =0.9839$ | N | - | - | - |
| II | $ V_{17} =0.9533$ | Y | $L1=0.9968$ $L3=1.0122$ | 70-71 | Y |
| | $ V_{63} =0.9651$ | Y | $L2=1.0090$ $L4=1.0099$ | 71-72 | N |
| III | $ V_{65} =0.9640$ | Y | - | - | - |
| | $ V_{70} =0.9705$ | Y | - | - | - |

由表4知,Ⅲ时段16—17断开时,检修应安排在负荷低时或停掉18,19,20负荷。11—12断开时,检修应安排在负荷低时进行或停掉部分负荷。

表5 IV、V时段检修情况

| 时段 | $ V_x $ | 是否越限 | L | 分割点 | 是否越限 |
|----|-------------------|------|---|-----|------|
| IV | $ V_{56} =0.9934$ | N | — | — | — |
| | $ V_{39} =0.9773$ | N | — | — | — |
| V | $ V_{50} =0.9575$ | N | — | — | — |
| | $ V_{44} =0.9675$ | Y | — | — | — |

由表5知,V时段54—55断开时,检修应安排在负荷低时段检修。

5 结论

通过上面的分析,可以逐步得到在满足可靠性前提下较优的检修计划及运行方式。再利用网络拓扑结构和2.1中的公式计算出优化目标综合值F。除了建立检修计划优化的模型外,还提出了具体优化方法,并针对网络检修时的具体网络情况进行综合分析,得出定量的分析结果,为人工制定检修计划提供了参考依据,降低了人工编制检修计划时的盲目性。通过用C++软件编程辅助得出了编制IEEE94节点检修计划仿真结果。存在的不足,是采取的搜索方法并不能保证全局最优。

参考文献

[1] Ling Wang, Jian Chu, Weijie Mao and Yongfeng Fu. Advanced Maintenance Strategy for Power Plants Introducing Intelligent Maintenance System [C]. Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21—23, 2006, Dalian, China, 7444~7448.

[2] 陈竟成, 李小彬, 等. 检修计划新模型与算法的研究[J]. 电网技术, 1997, 21(11): 66~69.

[3] 孟凡强, 许克明, 王亮, 等. 电力市场下的发电机组状态检修[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 41~44.

[4] 王健, 文福栓, 杨仁刚, 等. 电力市场环境下的发电机组

的最优检修策略初探[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 22~27.

[5] T. Sawa, T. Furukawa, M. Nomoto, et al. Automatic Scheduling Method Using Tabu Search for Maintenance Outage Tasks of Transmission and Substation System with Network Constraints [C]. Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE, Volume 2, 31 Jan—4 Feb 1999 Page(s): 895 ~ 900 vol. 2

[6] M. K. C. Marwali, S. M. Shahidehpour, et al. Integrated generation and transmission maintenance scheduling with network constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998: 1063~1068.

[7] 丁明, 冯永青. 发电设备联合检修安排模型及算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 18~23.

[8] 林海华, 李卫东. 输电线路检修计划的优化算法综述[J]. 继电器, 2005, 33(14): 87~91.

[9] 刘蔚, 韩祯祥. 基于最优流法和遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 29~33.

[10] 张粒子, 黄弦超, 等. 配电网检修计划优化模型设计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 50~53.

[11] 黄弦超, 张粒子, 等. 配电网检修计划优化模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 33~37.

[12] 索南加乐, 李怀强, 等. 一种新的配网潮流常 Jacobian 牛顿算法[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(12): 1222~1226.

[13] 何仰赞, 温增银, 等. 电力系统分析[M]. 华中理工大学出版社.

[14] Nara K, Hayashi Y, et al. A tabu search algorithm for determining distribution tie lines. Proceedings of 1996 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP '96). Orlando, USA, 1996: 226~270.

[15] Ching-Tzong Su, Chu-Sheng Lee. Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 18, No. 3, July 2003: 1022~1027.

作者简介

钟俊毅(1979—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护研究。

吕飞鹏(1968—), 男, 博士, 教授, 从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究。

(收稿日期: 2008—02—17)

深切哀悼“5.12”汶川大地震遇难同胞

变电站的计算机网络安全分析

陈文刚, 张婷婷

(山西晋城供电公司, 山西 晋城 048000)

摘要:随着电力系统数据网络建设步伐的加快, 变电站计算机网络安全问题日益突出。详细分析了变电站面临的网络安全威胁和网络安全需求, 并结合变电站计算机网络的 结构特点, 提出了相应的系统安全策略和信息安全策略, 重点介绍了应用于变电站的几种网络安全技术。

关键词: 变电站; 计算机网络安全; 防火墙; 移动代理; VPN

Abstract: Along with the fast construction progress of data network in power system, the problems of computer network security in the substation are becoming more and more prominent. The network security threats and demands faced by the substation are analyzed in detail. The corresponding system safety strategy and the information security strategy are proposed according to the structure characteristics of its computer network. Several kinds of network security technologies used in the substation are mainly introduced.

Key words: substation; computer network security; firewall; motion agent; VPN

中图分类号: TM645 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0075-04

作为电力自动化系统的数据和各种控制行为执行者的变电站自动化系统, 一旦因网络的安全原因引起误动、拒动、整定参数的错误更改、上传数据紊乱等, 将给电力系统的安全稳定运行带来严重威胁, 甚至引发灾难性事故。将重点讨论在网络环境下变电站的安全需求、安全威胁及相应对策。

1 变电站计算机网络结构

变电站局域网基本是以太网设计, 因电压等级及其在电力系统运行控制中的地位不同, 网络主机从 2~20 台不等, 通过路由器或交换机与远动网络或 SPDnet 连接。变电站网络结构有以下两种基本形式。

1.1 基于通信控制器的分层分布式网络

此为现代变电站计算机网络设计中比较流行的一种结构。所有的 IED 设备通过现场总线或其他总线网连接在一起, 由通信控制器对它们统一进行访问和控制, 通信控制器可以提供 TCP/IP 接口和站内以太网连接。该结构的缺点是由于协议和实时性的限制, IED 设备所能提供的很多维护和运行信息都不能被充分利用, 只能选一些比较重要的信息通过远动协议送向远方调度。

1.2 基于嵌入式 Internet 技术(EMIT)的对等网络

利用 EMIT, 在多个 IED 设备组网时放弃使用代码较长的 TCP/IP 协议, 而采用 RS-232、RS-485、CAN、红外、射频等轻量级总线网络协议, 然后通过嵌入式网关(可采用桌面计算机或者高性能的嵌入式处理器)与 Internet 连接, 每一个 IED 设备的应用程序中都有一个独立的通信任务 emMicro, 仅占约 1KB 空间, 与嵌入式网关一起提供基于 Internet 的远程数据采集、远程控制、自动报警、上传/下载数据文件等功能。在这种结构下, IED 设备与其他网络主机都是变电站局域网中的对等实体, 这是一种理想的变电站组网方式, 无须自己设计通信协议以及配套的软硬件, 也不必使用专用信道, 只要连上 Internet, 就可非常方便地实现变电站 IED 设备的远程通信。目前国际上很多 IED 的生产厂家已经开始提供具有网络接口的 IED 设备, 不久这种网络结构可以在变电站中得以实现。

2 变电站计算机网络安全需求

变电站的计算机网络安全需求包括网络系统安全和网络信息安全两方面。其中, 网络系统安全表现为: 系统对外来破坏具有健壮性, 对操作人员不规范操作具有预防性, 以及系统自身信息具有封闭性; 网络信息安全表现为: 数据的完整性、合法性、访问安全

性、可控性及不可否认性。

3 变电站计算机网络安全威胁

变电站网络安全威胁主要来自变电站所连接的外部网络。不管变电站内部的组网方式如何,通过网络化的远动通道对变电站构成的安全威胁始终存在。这些威胁主要包括:

3.1 截获

非法获取变电站与其他系统之间传输的信息,非法获取变电站网络中存储的信息。信息截获尽管不会影响信息的传输,但往往是变电站网络系统遭受安全侵害的第一步。特别是在电力市场运营环境下,避免信息截获十分重要。

3.2 中断

使变电站内部或与其他系统之间的通信中断,使调度主站无法了解变电站的运行工况,主站的控制命令也无法正确执行。对无人值班变电站危害较大。

3.3 篡改

更改变电站与其它系统之间传输的信息,使调度主站得到错误的运行工况,威胁电网的安全运行。如果篡改的是遥控命令、修改定值命令等,更有可能造成严重的后果。

3.4 伪造

伪造“合法”信息发往变电站或主站,可能造成与篡改信息类似的后果。

3.5 恶意程序

包括计算机里蠕虫、特洛伊木马、逻辑炸弹等计算机病毒,将严重影响变电站自动化系统运行的正确性、实时性和可靠性,并且可能使运行程序瘫痪。

3.6 权限管理不当

包括权限的级别设置不当、权限处理上的不合理等。这些看似“细小”的因素,可能使完备的网络安全机制形同虚设,整个系统将从内部遭受严重破坏。

3.7 Internet 的安全漏洞

Internet 在发展之初就以数据高度共享和网络互联为目的,缺乏必要的安全防范,所以导致很多安全漏洞,其中最为突出的三大问题是网络安全质量失控、不具备实时服务的性能以及系统管控“弱智”。

应该注意到,当变电站网络安全受到威胁时,往

往存在着上述多种情况的组合。网络的安全问题必须从多方面进行综合考虑,不能强调某一方面而忽视另一方面。

4 变电站计算机网络安全策略

不少电力工作者都有这样一种观点,认为只要不把 SPDnet 同 Internet 连接,保持独立,就可以保证系统的网络安全。实际上,由于 SPDnet 基本采用 Internet 技术构建,和 Internet 有着同样的安全漏洞,而黑客出现的时间和地点都具有不确定性,因此,不管是否与 Internet 连接,网络安全的威胁同样存在。从严格意义上讲,不存在绝对安全的网络,系统的安全和开放本身就是互相矛盾的,因为网络的安全问题而放弃系统的开放性是不明智的,只能采取一系列的网络安全防护措施,增强内部工作人员的安全意识,尽最大努力保证网络的安全运行。

安全性的保证和变电站的网络结构是密不可分的,不同的网络结构设计,可以考虑采用不同的安全对策。

原则上,其他应用网络所采用的安全策略都适用于变电站计算机网络。但是由于变电站计算机网络要考虑信息传输的实时性,因而必须对其安全策略进行具体分析。

4.1 系统安全策略

4.1.1 健壮的网络操作系统

操作系统是计算机和网络的工作平台,应选用软件工具齐全、丰富、缩放性强的操作系统。如果有很多版本可供选择,应选用户群最少的版本,这样可以减少入侵者用各种方法攻击计算机的可能性。另外,还要有较完善的访问控制和系统设计等安全功能。

在最近的黑客行动中,美国被攻陷的网站几乎有90%是 Windows NT 和 Windows 2000 操作系统。而且,有报道称,微软也承认 Windows 2000 远种服务中存在七大漏洞。因此,变电站的网络系统管理员应及时测试系统的安全漏洞;为使用的软件安装最新版本的安全补丁程序,包括操作系统和日常应用程序;为系统设备进入许可密码以及定期更换默认密码。

4.1.2 容错技术

容错技术包括软件容错和硬件容错两方面。软

件容错是指软件系统对操作人员误操作具有一定的预防性;硬件容错是指系统具有组件冗余、无单点硬件失效、动态重组、错误校正等功能。在重要的变电站,也可以采取双机备份同步校验方式,或者采用双网冗余备份或信息分流的组网方式,建立一套可靠、高效的运行机制,当一个系统由于意外而崩溃时,计算机自动切换,以确保整个网络系统正常运转,保证各项数据信息的完整性和一致性。

4.2 信息安全策略

4.2.1 加密技术

加密技术是最基本、最常用而又最有效的信息安全技术,可以有效地限制截获、中断、篡改。伪造的概率,从而达到保证信息安全的目的。针对变电站计算机网络,选用一些最常用的加密算法(international data encryption algorithm, 缩写为 IDEA),例如国际数据加密算法就可满足要求,密钥长度在 56~128 位比较合适。

由于加密算法比较简单,明文 X 通过加密算法 E 和加密密钥 K 即可得到密文 $Y = E_k(X)$ 。有时 E 或 K 可能是公开的,因此,安全性的保证主要依赖于密钥管理。加密和解密的过程耗时很小,可以认为基本不影响变电站信息(音、视频信息除外)传输的实时性。

4.2.2 防火墙技术

防火墙为不同网络或网络安全域之间构建了一道安全屏障,它通过有选择地拒绝非法端口,允许合法的 TCP/IP 数据流通过,以保证内部网络的数据和资源不会流向非法地点。

目前防火墙技术已经比较成熟,通常使用包过滤、应用级网关、电路级网关和规则检查防火墙等安全控制手段实现其安全防护功能。防火墙的工作一般都非常有效,可以说,好的防火墙系统,配以恰当的维护,将非常有助于预防有问题的 Internet 访问。但值得注意的是,防火墙不能有效控制来自网络内部的非法访问,而且防火墙的设置将导致信息传输的明显延时。考虑到电力运动信息的实时性要求,建议开发变电站网络专用的防火墙组件,以降低通用防火墙软件的延时带来的不利影响。

4.2.3 移动代理(mobile agent)技术

一旦外部的非法入侵者突破防火墙,进一步的网络安全防护工作变更要由本地入侵监测系统负责。

此时需要一个智能系统对非法入侵实时检测并迅速采取相应的对策,移动代理技术则为其实现提供了一条便捷途径。

移动代理技术是目前安全领域的研究热点,尤其适用于分布式系统,一般利用 Java 的安全机制实现。变电站自动化正在朝着分布式应用发展,因此,可将该技术应用于变电站局域网的安全管理中。

图 1 是一种基于移动代理技术的自适应网络安全模型,其特点是每一个被监视的设备都对应一个移动代理,这些移动代理作为系统的安全警察存在,当检测到被监视设备遭到攻击时,就立刻向代理管理机请求并执行相应对策,如果该移动代理不能解决问题,代理管理机可以中止其运行并创建一个新类型的移动代理负责完成安全对策的执行。这种安全机制的主要优点是:1)非法入侵者突破防火墙时,在线学习系统可以总结入侵者的特点并制定相应的对策,防止其他的设备遭到攻击;2)工作效率高,大部分的移动代理可以在当地解决安全问题,与传统的安全代理可以在当地解决安全问题,与传统的安全代理相比,有效减少了网络负载;3)安全管理更加便利,管理者可以在一个复杂的网络系统中统一调度安全策略。

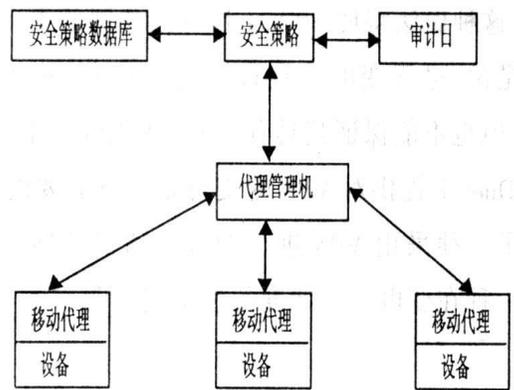


图 1 多代理网络安全模型

在一些重要的枢纽变电站中,可以考虑加装基于移动代理技术的网络安全管理系统,对透过防火墙的攻击进行实时检测并采用相应对策,进一步提高网络的安全性能。

4.2.4 虚拟专用(VPN)技术

VPN 技术是近几年比较热门的网络技术之一,它为网络的安全提供了一个比较好的解决方案,是一种以费用低廉的公用网络为基础的传输媒体,通过

L2TP、IPSec 等协议及密码技术的处理,向用户提供虚拟的专用网络服务技术。其采用的关键技术包括安全隧道技术、信息加密技术、用户认证技术和访问控制技术。

VPN 有三种典型的应用方式:1) Intranet VPN,用于企业内部各局域网的安全互联;2)个人远程接入VPN,用于经过授权的移动个人接入企业的局域网;3)Extranet VPN,用于若干个企业的 Intranet VPN 安全互联。VPN 技术也不一定都用于大网络通信,它还可用于公司企业网内部以允许雇员访问某些特定的数据,而限制访问其他数据。

VPN 的突出优点首先体现在它虽然建立于公共网络上,但同使用专用线路连接一样,享有很高的安全性、优先性、可靠性和可管理性,而其建设周期、投入资金和维护费用却大大降低;VPN 的另外一个重要优点是能够在不同平台之间传输数据,而无需对专门的平台的协议操心;同时,除了提供网络这间数据的安全传输,VPN 也可以提供主机到主机的安全隧道。在电力系统中,VPN 技术有着广泛的应用空间。RTU 上网以后,远动数据虽然基本是在 SPDnet 上传输,但是,未来的发展趋势是,在满足电力系统各种运行业务需要的前提下,SPDnet 有可能向社会提供电信增值服务,这种做法将使 SPDnet 具有公共网的很多性质。也就是说,尽管变电站是直接连接在 SPDnet 上相互通信,但也不能保证其具有专网通信的安全性,所以在 SPDnet 上提供对 VPN 的支持是十分必要的。图 2 勾画了一种采用 VPN 进行的远动通信的网络结构,这是一种在变电站与调度的远动连接上采用 VPN 技

术的应用方式,其实现可以简单描述为在调度局域网和变电站局域网的边界都安装一个安全网关服务器,分别提供数据加密、解密的功能,使得数据能够在公共网上安全传输。另外,VPN 技术对远程办公也提供了方便,随着远程办公的流行,预计将来可以在一定程度上让员工在家中实现对电力系统的远程监控和维护。

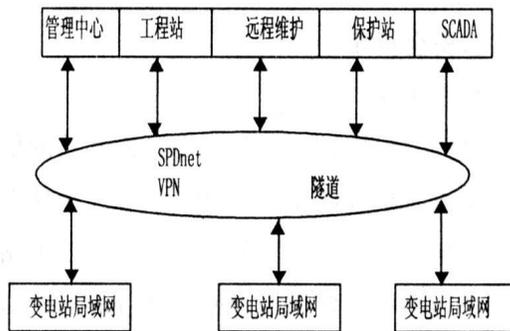


图 2 采用 VPN 技术的远动通信网络

5 结束语

以前在规划、设计变电站计算机网络时,着重考虑的大多是如何实现变电站自动化系统的功能及其运行的可靠性,而网络的安全问题没有得到足够的重视。如今随着国家电力数据专用网建设的深入,特别是远动系统网络化进程的加快,变电站计算机网络安全问题的重要性日益突出。

作者简介

陈文刚(1971—),男,工程师,山西晋城供电分公司调度所。
(收稿日期:2008-02-10)

简 讯

电力职工在余震中抢修电路

5月12日14点28分,四川省阿坝州汶川县发生8级地震,地震波及广安市邻水县,人们感觉地面一阵晃动,河面、电力线路、房屋发生一定程度的摆动,紧接着手机信号中断,余震不时传来,险情不断。

3点26分,广安邻水供电局职工在巡查线路中发现:“坛同镇白洋坝1号配变倾斜,中相跌落保险脱开。”险情就是命令,局所领导立即组织抢修人员,带好吊绳、线材,10分钟后赶到现场,发现配变一定程度的倾斜,使A相桩头引线受力,导致A相跌落保险受牵引脱开。于是迅速通知停电、验电、挂接地线……采取必要的安全措施后,电力职工们对配变及附属装置进行校正,恢复送电后,又用令克棒听配变运行声音,见无异常后才离开现场。

(万大成 邱雪松)

SVG 在电力 10 kV 配网运行中的运用

闫正

(成都电业局温江供电局, 四川 成都 611130)

摘要:通过讲述 10 kV 配网运行中线路开关模拟操作以及运行状态对于电网运行的重要性,分析了传统的线路开关模拟方式的局限性,提出了用 SVG 实现电力 10 kV 配网线路开关模拟操作的设计思路和研究成果。这种方式的模拟操作可以在 WEB 上进行浏览,可以结合 AJAX 和数据库技术在 WEB 上进行状态的修改,从而保证电力调度及运行人员可以及时有效的获取线路的开关运行状态。

关键词:SVG; AJAX; 电力; 配网; 开关; 模拟; 状态

Abstract: The limitations of traditional switchgear simulation mode are analyzed according to the description of switchgear simulation operation in 10kV distribution network and the importance of its operation condition to the operation of power grid. The design idea and research result based on SVG to implement the switchgear simulation operation in 10 kV distribution network are presented. Based on the AJAX and database technology, the simulation operation mode can be observed and modified on WEB browser. The result ensures the dispatcher and operator to obtain the operation condition of switchgear timely and effectively.

Key words: SVG; AJAX; electric power; distribution network; switchgear; simulation; state

中图分类号:TM743 **文献标识码:**B **文章编号:**1003-6954(2008)03-0079-03

在电力系统的 10 kV 配网运行管理中,配网线路开关的运行状态对于调度人员的安全调度有着至关重要的影响,把配网线路开关模拟应用于配网的运行管理上,给调度及运行人员提供直观、简便的可视化管理工具,使调度及运行人员对整个配网的线路开关状态有较为直观的掌握,从而提高配网安全运行水平。因此,配网开关状态模拟的重要性对于电力系统可谓不言而喻。

1 10 kV 配网运行中线路开关模拟的使用现状

温江局使用过的 10 kV 配网线路开关模拟有 3 种方式,模拟屏、模拟图表、AutoCAD 模拟图程序。

1)模拟屏,整个配网接线图在模拟屏上以塑料模块拼成,开关的运行状态可通过控制塑料开关的辅助触点,并以红绿两色 LED 灯反映通断状态,并可模拟操作,以声音警报提示现是否为安全操作或安全运行状态。这是温江局最早使用,且历史最长的方式。其优点是直观,且运行可靠,有较长的实际使用经验。缺点是体积过大,一般最小安装面积都要占用 15 m² 墙面;随着城市规划,电网迁改变动加大,模拟屏的信息改动很难在短时间内实现,甚至要几个月才能更新,但仍然赶不上电网网络的改动。

2)模拟图表,整个配网接线图用大幅面胶纸打印出来,开关状态用红绿两色粘纸粘贴来体现通断状

态,可模拟操作,但不能判断是否为安全操作或安全运行状态。其优点是,直观,更新方便,且可在任意墙面挂设。缺点是:印刷需要几天时间,网络更新不能实时体现在图表上;由于使用粘纸,容易脱落;不能模拟操作并判断运行状态是否安全,这也是最主要的缺点。

3)AutoCAD 模拟图程序,整个配网接线图用 AutoCAD 生成, VBA + 数据库的方式将开关的通断状态数据保存到数据库中,在打开模拟图的时候结合 VBA 查询最新的开关状态信息,然后在 AutoCAD 中将开关通断状态反映出来,并能模拟操作,判断是否为安全操作或安全运行状态。这是温江局正使用的方式。其优点是,信息更新快,通过电脑操作,可以数据共享。实际上, AutoCAD 模拟图程序已经是将配网信息更新慢的主要问题解决了,并吸取了模拟屏和模拟图表的优点,但在实际使用中仍有以下的不足。主要是:不管是查看还是制作状态图都必须安装 AutoCAD 软件,每次需要读取数据库最新的开关状态信息生成相应的开关图形,读取速度比较慢,生成图形性能比较差,图像也不尽人意。

2 SVG 简介及其特点

SVG,全称为 Scalable Vector Graphics(可伸缩矢量图形)。它是 W3C 制定的、用矢量描述图形的 XML 应用标准。它有着许多的优点,比如可扩充性(scal-

able), 动态性, 强交互性。SVG 支持无极放大, 对 SVG 图片进行任意比例的放大都不会损害图片的显示(没有太多的失真), 其他诸如 BMP, JPEG 格式的图片都不支持无级放大。SVG 有动画元素, 只要在 SVG 文件中嵌入 SVG 动画元素就可以实现动画效果了。同时 SVG 也定义了丰富的事件, 包括鼠标事件和键盘事件, 只要对 SVG 进行相关的脚本编程就可以实现 SVG 文件的交互操作。

3 使用 SVG 进行 10 kV 配网线路开关模拟设计的分析

可伸缩向量图形通过使用 XML 定义图像, 具有动画和交互性的特点。浏览器读取(或者更准确地说, 浏览器的插件读取)这些基于文本的指令, 然后执行这些指令。通过对其特性的分析, 发现它完全可以解决配网开关模拟设计现有的一些问题, 主要表现在以下几个方面:

1) SVG 基于 XML 格式, 易于 WEB 发布、传输, 跨平台。WEB 浏览图形的方式可以让使用者比较方便的查看图形, 通过 IE 查看 SVG, 只需安装一个 2M 左右的浏览器插件即可, 而无需安装其它的客户端软件。从而在保证开关信息状态共享的同时, 有效的简化了客户端的操作。

2) 交互性强, 支持各种先进的网页交互技术。象 HTML 页面一样, 可以设置 SVG 图像以捕获某些事件(如点击鼠标和滚动), 并用它们启动脚本。在构建简单 SVG 图像时, 可以通过属性捕获这些事件。最常用的是 onclick、onactivate、onmousedown、onmouseup、onmouseover、onmousemove、onmouseout、onload、onresize、onunload 和 onrepeat。当这些事件之一被触发, 就可以将事件对象本身提供给脚本, 脚本反过来再用它确定哪个对象触发了该事件(也就是点击了什么对象)。然后脚本可以操纵那个对象的特性, 如它的属性等。SVG 用 `<script>` 元素来在 SVG 文档中插入脚本, 它的功能几乎和 HTML 中的 `<script>` 标记一样, 当然也可以使用在 HTML 中定义的脚本。在配网开关模拟中, 可以定义开关图形被点击的事件, 询问调度人员对于开关状态的操作, 结合 AJAX 技术将修改后的状态保存到数据库中。

3) SVG 既是一种静态图像, 又是一种动态图像, 可以很方便地实现动态模拟。利用动画可以实现模拟定位开关的功能, 当查找到指定的开关时, 可以使用开关闪烁的动画来表示该开关所在的位置, 方便用

户的操作。

4 基于 SVG 的 10 kV 配网线路开关模拟的设计思路

1) 使用预定义以及元素编组来预先生成部分图形, 如开关, 刀闸, 变电站。通常在 SVG 图像的构建中, 各部分或者是可重用的, 或者不便于在图像主体内定义。在这些情况下, 通常方便的做法是在文档的定义部分内(作为 `<defs></defs>` 元素的一部分)给这些部分指定, 以后可在图像主体中通过调用标识来创建它们。与此同时, SVG 定义了六种基本形状, 这些基本形状和路径一起, 可以组合起来形成任何可能的图像。为兼顾可读性和方便性, 将元素安排在一组中通常是个好办法。针对这一目的, SVG 提供 `<g></g>` 元素, 它创建一个可以将元素置于其中的容器。这个容器可以用来标识元素, 或提供一个公共属性(本地定义的属性将会覆盖公共属性)。

2) 生成整个线路开关状态模拟图。由于 SVG 是基于 XML 通过使用简单的文本语句完成矢量图像, 所以通过文本编辑器就可以完成图形的“绘制”。同样也可以使用一些 XML 工具或专门的 SVG 图形编辑工具(如 SVGDeveloper 等)。在设计状态图的时候可以重复使用在上一步中预先定义的图形符号, 简化设计过程。

3) 增加交互性及动画效果。配网开关模拟图的交互性主要体现在: 当调度人员在状态图上点击某个开关时, 系统给予用户提示, 然后根据用户的操作来改变开关的模拟状态(即改变开关的模拟状态符号)。只要预先定义了 4 种开关状态符号, 即可以根据用户的选择进行快速的切换。这种交互性主要是通过 Javascript 来实现, 在开关图形的 onclick 事件中定义具体的函数。

5 AJAX 技术的结合

AJAX 是通过 javascript 来异步取得 xml 数据的应用程序, 其最大的特点就是无刷新数据更新。在这个配网开关状态模拟图的设计中, 使用 AJAX 技术主要是用来保存用户通过操作修改了开关后的状态值以及在打开状态图时开关状态信息的读取, 从而保证了开关状态信息的实时有效性。下面通过 AjaxPro 以及 ASP.NET 应用程序来说明如何在这个开关状态模拟图中实现不刷新保存开关的最新状态。

- 1)在 ASP.NET 应用程序中引用 AjaxPro.dll;
- 2)在 Web.config 文件的 <system.web>配置节中加入相关的设置语句;
- 3)进行使用 Ajax 模式的类的注册;
- 4)编写服务器端的代码;
- 5)客户端使用 javascript 进行与服务器之间的数据通信。

6 结论

通过使用 SVG 对单位 10 kV 配网线路开关模拟的设计以及实现,发现 SVG 的强大特性完全可以满足要求,解决现有配网开关模拟的已有问题。与此同时,这种基于 SVG 的方式对于电信、自来水等行业的连接状态图的设计都有极大的参考价值。SVG 作为

一种开放的国际化标准,正逐步的被使用到各个应用领域,发挥着越来越重要的作用。作为一种图形的使用工具,这个设计还不够完整,诸如图形放大,缩小,定位等功能还需要进一步去完善。

参考文献

- [1] Scalable Vector Graphics (SVG) 1.1 Specification [R]. W3C Working Draft, 2003.
- [2] Christophe Jolif, Software Architect, Comparison between XML to SVG Transformation Mechanisms— The GraphML use case, SVG Open 2003 Conference, 2003—7.
- [3] 张瑞江, 齐华, 韩卫杰, 王行祥. 基于 J2ME/Mobile SVG 移动 GIS 设计与实现[J]. 微计算机信息, 2006, 3: 164—166.
- [4] 吴斌. SVG: 未来的 Web 图形标准[S]. PC World China, 2000 No. 49.

(收稿日期:2008—03—10)

(上接第 59 页) 噪声信号,如图 3 所示。用小波变换对故障信号的分析方法是:先对它进行 4 中的消噪处理,再用 3 中方法检测奇异点。对消噪后的信号奇异点检测结果如图 4。

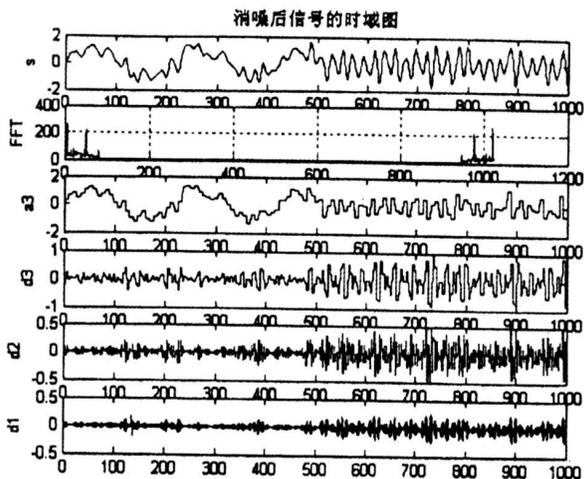


图 4 对消噪后信号的奇异点检测仿真结果

从图 4 中可以看出,信号的奇异点在 500 点附近处,所以通过仿真,可以看到信号扰动发生的时刻。前面做的仅是一个仿真说明小波变换在电力系统故障信号的检测中有着非常重要的应用,实际检测中,信号的消噪预处理非常重要,所以对消噪小波基和阈值的量化处理都要有非常慎重的选择。

6 结论

结合小波变换的一些基础知识,对小波变换在电

力系统扰动检测中的应用进行了一个初步的仿真试验和分析。得出了如下的结论:

通过应用小波变换和多分辨分析的 Mallat 塔式算法进行的仿真试验的结果可以看到在利用小波变换时高频部分能够清晰地反映信号的故障点。并且小波变换能够很好地克服采用传统的傅立叶分析不能进行局部化分析和快速傅立叶分析方法只能进行单一分辨分析的缺点,小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部化性质,能对不同的频率成分采用逐步精细的采样步长,聚焦到信号的任意细节。这对于检测高频和低频信号以及信号的任意细节均有效,特别适应于分析奇异信号,并能分辨出信号奇异性的 大小,因此,作为一种信号分析的新型工具,小波分析在电力设备状态检测、故障诊断、谐波分析等诸多方面均有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 胡晓光, 戴景明. 基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断 [J]. 中国机电工程学报, 2001. 5.
- [2] 林京, 屈梁生. 基于连续小波变换的奇异性检测与故障诊断[J]. 振动工程学报, 2000. 4.
- [3] 王楠, 律方面. 基于小波奇异性检测的在线监测数据处理[J]. 电工技术学报, 2003. 14.
- [4] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 科学出版社, 2000.
- [5] 任伟建, 康朝海, 于镛, 张正辉. 小波变换在信号奇异性检测中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2005. 1.

(收稿日期:2008—02—27)

GW11—550型高压隔离开关缺陷处理

李 昂, 王志川

(自贡电业局, 四川 自贡 643000)

摘 要: 自贡电业局 500 kV 洪沟变电站使用西安高压开关厂生产的 GW11 系列单臂伸缩式隔离开关, 通过对 GW11 型隔离开关的大修, 对其存在缺陷的发现及处理, 摸索出了一套合乎实际的检修工艺。

关键词: 隔离开关; 故障; 检修

Abstract: The GW11 series single-arm expansion disconnectors produced by Xi'an HV Switchgear Works are used in 500kV Honggou Substation of Zigong Electric Power Bureau. Through the overhaul of GW11 disconnectors, a practical maintenance process is obtained to discover and deal with the existing defaults.

Key words: disconnector; fault; overhaul

中图分类号: 564.1 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0082-02

500 kV 洪沟变电站于 1998 年 8 月投运, 该站 GW11—550 隔离开关的动触头系统为机械手式单臂折叠型, 传动部件密封在导电管内部, 导电管内装设平衡弹簧, 用来平衡动力元件的重力矩, 分、合闸动作较为轻便平稳。动触头为钳夹式结构, 夹紧静触头导电杆, 夹紧力由导电管内夹紧弹簧控制, 采用顶压脱扣装置保障隔离开关可靠合闸。导电管为铝合金材质, 动、静触头为铜材镀银, 转动部位采用复合轴套及导电滚动触指, 每相主刀配一个 CJ7A 型电动机构进行操作。

1 缺陷及故障

500 kV 洪沟变电站安装的 GW11—550 型隔离开关已投运近十年。随着使用时间变长和使用次数增多, 该型隔离开关的缺陷及故障逐渐暴露, 经常出现分闸过程中动触指打开困难、触指盘转动困难、分合闸异响、分合闸变位等问题。经统计, 洪沟变电站 GW11 系列刀闸在运行中主要存在以下问题:

- (1) 分闸过程动触指打开缓慢, 存在拽拉静触杆现象。
- (2) 夹点变位, 分合闸过程中存在动触指擦挂静触头座现象。
- (3) 分闸微动开关变形, 造成分闸过度, 对支柱绝缘子的冲击力较大。
- (4) 触指盘及触指盘防雨罩破裂, 造成分合闸卡涩甚至刀闸拒分拒合现象。

针对这些缺陷, 自贡电业局修试所对 500 kV 洪沟变电站的数十组 GW11—550 型隔离开关进行了解体检查和大修, 下面以 GW11—550 型 50421 号高压隔离开关为例, 阐述其检修工艺并提出处理方案。

2 拆卸程序

2.1 回路电阻测量

测量接线板至动触头间回路电阻, 检查隔离开关自身连接回路接触情况。

2.2 主闸刀拆卸

将隔离开关操作至分闸位置, 用专用 U 型抱箍固定上下导电管, 防止在吊卸过程中上导电管意外打开。再将支柱瓷瓶和转动瓷瓶用绳索及楠竹片绑扎加固, 解除刀闸引线并绑扎在安全可靠的杆架上, 解开刀闸底座与支柱瓷瓶法兰间连接螺栓, 将刀闸起吊至定置区域。拆除时应注意不使刀闸底座锥形齿轮移位, 拆卸时应记录各部件相对位置, 规格。

2.3 上下导电管及动触头拆卸

拆下连轴节拐臂与上导电管连接螺丝及顶丝, 将上导电管与连轴节分离。拆下连轴节拐臂与下导电管连接螺丝及顶丝, 将连轴节与下导电管分离。拆下基座与下导电管连接螺丝、顶丝及联板与基座连接弹性销, 将下导电管与基座分离。

拆卸动触头与上导电管连接螺丝及顶丝, 将上导电管与动触头及顶杆分离, 冲掉顶杆与动触指操作杆之间连接弹性销, 使动触头与顶杆分离, 拆下触指与

触头间软连接固定螺丝, 抽出动触指及操作杆, 装配复位弹簧。

2.4 导电触指盘拆卸

导电触指盘固定在导电轴承上, 其外有防雨罩。拆下触指盘防雨罩, 冲落导电轴承两端弹性销, 用剥销钳剥离导电轴承上的挡圈, 再用专用工具冲出导电轴承, 依次取下键、齿轮、导电盘、轴承套, 然后分离触指弹簧、压片、触指, 拆卸时应记录各部件相对位置及方向性。

3 检修调试过程及工艺

GW11型隔离开关主刀闸解体后, 根据运行中存在的问题及确定的检修项目, 重点对以下部件进行检修及更换。

3.1 动触指及动触头检修

更换了动触头内密封胶圈及动触指(新触指较原触指增加了接触面积及相对接触压力), 清除动触头及动触指操作杆上干涸的二硫化钼与尘土混合物, 用细砂纸刮光动触指操作杆, 对各部位涂中性凡士林后进行复装。

3.2 导电触指盘检修更换

对导电轴承进行清洗除尘, 打磨氧化部位, 更换触指盘(原触指盘因运行年限及材质原因, 多已破裂甚至断裂为小块; 新触指盘(由西安高压开关厂提供)经过改良, 采用PBT材料(聚对苯二甲酸丁二醇酯)制成, 坚固耐用。更换烧伤或镀银层脱落的触指(新触指较原触指增加了接触面积, 增大了相对接触压力), 更换已锈蚀的弹簧、压片。拆卸过程中注意附件摆放整齐, 防止遗失, 防止损伤设备。处理结束后涂中性凡士林, 按拆卸的逆序复装, 做到零部件无遗漏, 齿轮、防雨罩方向正确。

3.3 刀闸机构箱检修

更换变形的微动开关弹性压板, 适当调节分合闸行程, 检查F6辅助开关切换是否灵活正确, 更换已损坏及不可靠的辅助开关。

3.4 单相刀闸调试

按拆卸相反程序复装刀闸, 应着重检查分、合闸操作力是否均衡、动静触头夹点位置、夹紧力大小、合闸时上下导电杆水平度、分闸时导电杆对整台刀闸冲击力大小等项目。

当分、合闸操作力不均衡时, 应在分闸状态使用 $\varnothing 8$ mm钢棍插入下导电杆调节螺纹套孔中, 若分闸力大于合闸力, 则顺时针方向调节螺纹套, 即压紧弹簧, 反之亦然。调整后应手动分合几次, 若分、合闸力仍差别较大, 需继续调整, 直至基本平衡为止。

在分闸位置调整两侧连杆, 以保证分合闸位置正确, 动静触头夹点位置、夹紧力大小适中, 动触头与静触头的定触杆应接触良好, 四个触头均应与定触杆接触。一般情况下, 刀闸基座连杆两端轴销中心距为 525 ± 10 mm。

3.5 三相刀闸联调

三相刀闸分别单相调试完毕后可三相电动联调, 在电机额定电压下操作5~10次, 在85%和110%电机额定电压下分别操作2~3次, 均应动作平稳, 可靠分合闸, 并进行主刀闸回路电阻测试, 检查是否达到出厂标准。

4 检修调试过程中发现的问题

2007年4月对50421号刀闸的大修中, 发现并处理了以下缺陷:

- (1) A相刀闸上下触指盘、B相刀闸上触指盘、C相刀闸上触指盘破裂。部分触指烧伤, 导致分合闸卡涩, 滚动触指与触指盘接触电阻增大, 易使下导电管内齿轮、齿条参与导电;
- (2) B相刀闸机构箱辅助开关切换不可靠、微动开关接触不良;
- (3) C相刀闸合闸夹点过低;
- (4) 动触头座密封不严, 内部积有较多尘土, 动触头操作杆涂抹的二硫化钼干涸, 使操作杆与动触头座之间产生较大摩擦力, 操作杆运动阻力增大, 使复位弹簧弹力减小, 动触指张开不灵活;
- (5) 操作机构联调困难, 同期性差。

5 结束语

洪沟变电站GW11-550型高压隔离开关大修后, 每相回路电阻由原 $200 \sim 400 \mu\Omega$ 降至 $80 \mu\Omega$ 左右, 分合闸操作过程顺畅、平稳, 触指夹紧、张开动作规范可靠, 设备状况明显改善, 基本达到了新投运设备标准。

(下转第86页)

(1)当采样信号只有一个发生畸变,另一个信号仍为正弦波时,以电压发生畸变为例,有: $i(t) = I_{1m} \cos(\omega t + \psi_{1i})$, 式中: I_{1m} 为基波电流最大值; ψ_{1i} 为基波电流初相角。

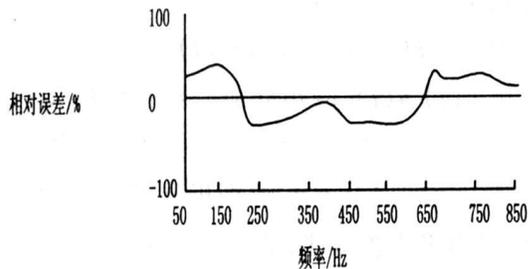


图2 电子式电能表的频率响应曲线

则平均功率:

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^n I_{km} \cos(\omega t + \psi_{ki}) u(t) dt$$

$$= \sum_{k=1}^n U_{km} \cos(\omega t + \psi_{km}) dt$$

根据电路理论,对不同频率的电压、电流的乘积,积分为零(不产生平均功率);同频的电压、电流的乘积积分不为零。可知上式的积分结果为基波平均功率,电子式电能表在这种情况下计量误差较小,基本反映了基波电能。

(2)当采样信号都发生畸变,不难得出平均功率:

$$p = U_1 I_1 \cos \psi_1 + U_2 I_2 \cos \psi_2 + \dots$$

$$+ U_n I_n \cos \psi_n = \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \psi_k$$

式中: $U_k = U_{km} / \sqrt{2}$ 、 $I_k = I_{km} / \sqrt{2}$ 、 $\psi_k = \psi_{ku} - \psi_{ki}$ 即平均功率等于基波功率和各次谐波功率的代数和。

可见同感应式电能表相比,电子式电能表由于频带较宽,对基波电能和谐波电能都能较准确计量,但值得注意的是它把谐波功率和基波功率同等对待,这样计量误差会增大。^[5]

4 两种电能表的电能计量特性比较

感应式电能表有迅速下降的误差频率特性,使得感应式电能表只能计量谐波的部分。若以 W_1 表示基波电能, W_n 表示谐波电能, W 表示电能表所计量的电能,则感应式电能表反映的电能值近似可表示为: $W = W_1 + \sum K_n W_n$ 其中: K_n 为谐波电能系数,表征谐波被计量的程度。根据前述理论分析,显然 $K_n < 1$,且随谐波频率次数增加而减少。

而对电子式电能表,和感应式电能表计量基波电能和部分谐波电能不同,电子式电能表误差频率特性曲线变化较为平缓,即电子式电能表计量基波电能和几乎全部谐波电能。因此电子式电能表计量可近似表示为: $W = W_1 + \sum W_n$

因此在以全能量为计量标准的计量中,电子式电能表的计量误差接近于零,但是以基波为计量标准电子式电能表的计量误差将比感应式电能表的计量误差大。^[1]

参考文献

- [1] 葛毅. 电力谐波对电能计量的影响研究[D]. 学位论文. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [2] 吴安岚, 李书跃, 郑小平等. 电能质量基础及新技术[M]. 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 陈明. 供电系统谐波及其对电能计量影响的研究[J]. 学位论文. 华北电力大学, 2003.
- [4] 吴彤, 艾敏. 感应式电能表受谐波影响的研究[J]. 华中理工大学学报. 2002, 6(28): 43-45.
- [5] 高笑, 王步云, 龙燕, 赵宏伟, 冯璞乔. 电力谐波及其对电能计量的影响[J]. 后勤工程学院学报. 2004, 2: 53-55.

(收稿日期: 2008-01-21)

(上接第83页) 通过解体检修,发现了导电触指盘破裂、触指烧伤、导电轴承氧化等在运行中不能及时发现的问题。该类型隔离开关机械回路的防尘、防雨能力一般,加之负荷过重,极易由此引发机械故障。为防止隔离开关故障发生,不但要做好检修维护工作,还要在日常巡视、操作中注意观察其状态有无异常,避免缺陷升级,并根据具体运行状况确定其解体大修

年限及小修维护检查项目,只有把握住隔离开关检修维护的关键问题,才能使隔离开关的安全运行得到保障。

参考文献

- [1] GB 50150-2006. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S]. (收稿日期: 2008-02-21)

谐波对电能计量的影响

马晓蕾, 尹忠东

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要:介绍了电能计量的原理,着重研究了感应式电能表和电子式电能表的工作原理和计量特性,并对二者进行了比较。

关键词:谐波;电能计量;频率特性

Abstract: The theory of electric energy metering is introduced. The working principles and metering features of induction watt-hour meter and electronic watt-hour meter are discussed and compared.

Key words: harmonic; electric energy metering; frequency characteristic

中图分类号: TM933.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2008)03-0084-03

随着电力电子技术的飞速发展,各种大功率整流/换流设备、电弧炉等非线性负荷日益增多,造成供电系统电压、电流波形不同程度畸变,产生大量高次谐波。而大多数仪器、仪表是针对工频正弦波设计的,因而造成数据不正确,即谐波对电能计量的影响。

1 电能计量原理

在单项交流电路中,功率 p 的瞬时值表示为:

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin(\omega t - \phi)$$

式中: u 、 i 表示电压、电流;

U_m 、 I_m 分别表示电压电流的幅值;

ω 、 ϕ 为角频率和相位角。

三相电能表有两种:三相三线和三相四线电能表两种。

三相四线制电路中,瞬时功率为:

$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c$$

式中: u_a 、 u_b 、 u_c 、 i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 A、B、C 三相的电压电流。

三相三线制中,由于:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

得:

$$p = u_a i_a - u_b (i_a + i_c) = (u_a - u_b) i_a + (u_c - u_b) i_c = u_{ab} i_a + u_{cb} i_c$$

所以可以用二元件电能表来测量三相三线的电能损耗,或者用三只单相合为三相电能表。

电能:

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^t u i dt$$

电能表测量的电能按上式计算得有功电能^[1]。

2 感应式电能表

感应式电能表的工作原理是:感应式电能表是用铝盘来对电功率进行采样的,它的电压、电流铁芯线圈分别位于铝盘的上下两侧,将铝盘夹在中间,线圈上产生的电压电流交变磁通穿过铝盘时会在铝盘上产生感应电流,磁通和感应电流互相作用,使铝盘转动起来。铝盘的转速与电功率 p 成正比,实现了对电功率的采样,电功率大转一圈用的时间少,电功率小转一圈用的时间就多,每转一圈代表的电能质量是一样大的,用计度器的机械传动机构将铝盘所转圈数记录下来,等效于实现了功率与时间相成,所以计度器所记录的铝盘转的圈数正比于电能量 W ^[2]。

铝盘旋转时,切割永久磁铁的磁通而在其内感应涡流;此涡流与永久磁铁的磁场相互作用产生制动力矩。铝盘旋转越快(转速 n 越大),感应的涡流越大,与永久磁铁相互作用产生的制动力矩 M 制也越大。

$$M_{\text{转}} = K_2 n。$$

当转动力矩与制动力矩大小相等时,

$$K_2 n = K_1 P$$

$$n = K_1 P / K_2 = KP$$

在给定的时间 t 内对上式积分,得该段时间内消耗的电能 A 和对应的总转数 N ,^[3]

$$N = nt = KPt = KA。$$

感应式电能表的计量模型:

与基波相似,谐波既有有功功率又有无功功率。

而有功功率与电网的安全经济运行有着直接、密切的关系,因此本文主要研究谐波有功功率对感应式电能表计量的影响总的有功功率为直流功率、基波功率及各次谐波功率之和在稳态工作状态下,通常认为电网中无直流功率,故有 $P = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n$, 式中, 谐波功率 $\sum_{n=2}^{\infty} P_n$ 不仅不产生有用的功效, 而且会在各类设备中引起附加损耗和发热, 并干扰某些用户正常工作。

感应式电能表的计量模型为 $P = K_1 P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n$, 式中, K_1 的理想值为 1, 故感应式电能表的近似模型为 $P = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} K_n P_n$, 式中 K_n 为电能表对高次谐波电能的响应系数, 因感应式电能表具有单调下降的频率特性如图 1, 故有 $K_n < 1$, 且随 n 的增加而减小; 谐波功率 P_n 的符号可正可负: 当用户为线性用户时, 谐波由系统注入用户, 谐波功率与基波功率同向, P 为正; 当用户为非线性用户时, 用户向系统注入谐波, 谐波功率方向与基波功率相反, P 为负。

从前述不难看出, 感应式电能表不只计量基波电量, 也非正确计量消耗的总电量。对线性用户而言, 感应式电能表少计量了用户消耗的总电能, 但计量的电能大于基波电能; 对非线性用户, 电能表计量的值大于用户消耗的总电能而小于基波电能。按照只计量基波电量的正确观念, 可以认定电能表对线性用户多计了电量, 它们因谐波功率影响要相应地多支付电费。而对非线性用户少计了电量, 它们在向系统注入有害的谐波功率之后反而少支付相应于谐波功率的电费, 从电能损失角度来说, 供电部门损失最大, 因为谐波功率在传播过程中很大一部分损耗在线路和变压器上, 线损明显增大, 对发电部门而言则是煤耗增大了 [4]

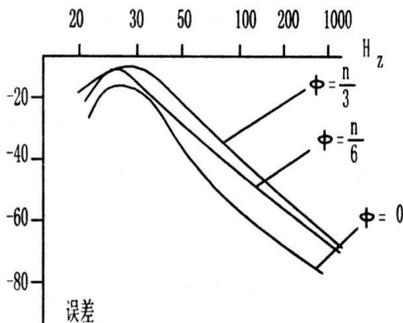


图1 感应式电能表频率误差曲线

3 电子式电能表

3.1 电子式电能表的工作原理

电能的基本表达式为:

$$W(t) = \int p(t) dt = \int u(t) i(t) dt$$

式中, $u(t)$ 、 $i(t)$ 、 $p(t)$ 分别是瞬时电压、瞬时电流、瞬时功率, 所以测量电能的基本方法是将电压、电流相乘, 然后在时间上再累加(即积分)起来。电子式电能表中实现积分的方法, 是将功率转换为脉冲频率输出, 该脉冲成为电能计量标准脉冲 f_H (或 f_L), 其频率正比于符合的功率。

3.2 电子式电能表的组成

电子式电能表一般由输入级、乘法器、变换器、计数显示控制电路、直流电源等几部分组成。

电子式电能表的输入级是将电网中的电压和电流经电压互感器和电流互感器转换成合适的小电压信号, 供给乘法器。乘法器是电子式电能表测量机构的核心部分, 它把两个电压模拟量转换成它们的乘积, 目前使用最普遍的是时间分割乘法器。时间分割乘法器具有精度高、响应快、功率因素变化范围宽等特点。从乘法器输出的电压模拟量送入 V/f 转换电路, 转换成与其成正比的脉冲数字量, 最后输入到计数电路和驱动电路, 完成功率测量。

3.3 电子式电能表的误差分析

图 2 是电子式电能表的频率特性曲线, 相对于感应式电能表的频率曲线而言, 电子式电能表的曲线平坦, 基本没有衰减, 说明它具有宽频带响应。它对基波的响应和高次谐波功率的响应是相同的。

电子式电能表通过对电压、电流的采样计算来计量有功电能, 当采样电压 $u(t)$ 和采样电流 $i(t)$ 含有高次谐波时, $u(t)$ 、 $i(t)$ 可分别表示为各次谐波的叠加:

$$u(t) = \sum_{k=1}^n U_{km} \cos(\omega t + \psi_{km})$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^n I_{km} \cos(\omega t + \psi_{ki})$$

式中: U_{km} 为 k 次谐波电压最大值; I_{km} 为 k 次谐波电流最大值; ψ_{km} 为 k 次谐波电压初相角; ψ_{ki} 为 k 次谐波电流初相角; ω 为基波角频率; n 为谐波次数。则瞬时功率为 $p(t) = u(t) i(t)$, 那么一个采样周期 T 的

$$平均功率为 p = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt$$

(1)当采样信号只有一个发生畸变,另一个信号仍为正弦波时,以电压发生畸变为例,有: $i(t) = I_{1m} \cos(\omega t + \psi_{1i})$, 式中: I_{1m} 为基波电流最大值; ψ_{1i} 为基波电流初相角。

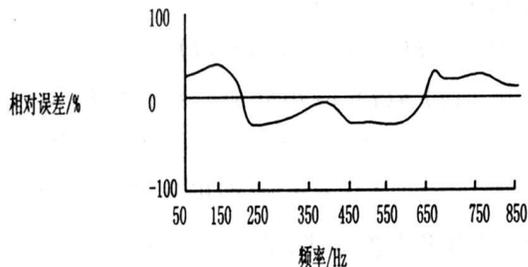


图2 电子式电能表的频率响应曲线

则平均功率:

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^n I_{km} \cos(\omega t + \psi_{ki}) u(t) dt$$

$$= \sum_{k=1}^n U_{km} \cos(\omega t + \psi_{km}) dt$$

根据电路理论,对不同频率的电压、电流的乘积,积分为零(不产生平均功率);同频的电压、电流的乘积积分不为零。可知上式的积分结果为基波平均功率,电子式电能表在这种情况下计量误差较小,基本反映了基波电能。

(2)当采样信号都发生畸变,不难得出平均功率:

$$p = U_1 I_1 \cos \psi_1 + U_2 I_2 \cos \psi_2 + \dots$$

$$+ U_n I_n \cos \psi_n = \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \psi_k$$

式中: $U_k = U_{km} / \sqrt{2}$ 、 $I_k = I_{km} / \sqrt{2}$ 、 $\psi_k = \psi_{ku} - \psi_{ki}$ 即平均功率等于基波功率和各次谐波功率的代数和。

可见同感应式电能表相比,电子式电能表由于频带较宽,对基波电能和谐波电能都能较准确计量,但值得注意的是它把谐波功率和基波功率同等对待,这样计量误差会增大。^[5]

4 两种电能表的电能计量特性比较

感应式电能表有迅速下降的误差频率特性,使得感应式电能表只能计量谐波的部分。若以 W_1 表示基波电能, W_n 表示谐波电能, W 表示电能表所计量的电能,则感应式电能表反映的电能值近似可表示为: $W = W_1 + \sum K_n W_n$ 其中: K_n 为谐波电能系数,表征谐波被计量的程度。根据前述理论分析,显然 $K_n < 1$, 且随谐波频率次数增加而减少。

而对电子式电能表,和感应式电能表计量基波电能和部分谐波电能不同,电子式电能表误差频率特性曲线变化较为平缓,即电子式电能表计量基波电能和几乎全部谐波电能。因此电子式电能表计量可近似表示为: $W = W_1 + \sum W_n$

因此在以全能量为计量标准的计量中,电子式电能表的计量误差接近于零,但是以基波为计量标准电子式电能表的计量误差将比感应式电能表的计量误差大。^[1]

参考文献

- [1] 葛毅. 电力谐波对电能计量的影响研究[D]. 学位论文. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [2] 吴安岚, 李书跃, 郑小平等. 电能质量基础及新技术[M]. 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 陈明. 供电系统谐波及其对电能计量影响的研究[J]. 学位论文. 华北电力大学, 2003.
- [4] 吴彤, 艾敏. 感应式电能表受谐波影响的研究[J]. 华中理工大学学报. 2002, 6(28): 43-45.
- [5] 高笑, 王步云, 龙燕, 赵宏伟, 冯璞乔. 电力谐波及其对电能计量的影响[J]. 后勤工程学院学报. 2004, 2: 53-55.

(收稿日期: 2008-01-21)

(上接第83页) 通过解体检修, 发现了导电触指盘破裂、触指烧伤、导电轴承氧化等在运行中不能及时发现的问题。该类型隔离开关机械回路的防尘、防雨能力一般, 加之负荷过重, 极易由此引发机械故障。为防止隔离开关故障发生, 不但要做好检修维护工作, 还要在日常巡视、操作中注意观察其状态有无异常, 避免缺陷升级, 并根据具体运行状况确定其解体大修

年限及小修维护检查项目, 只有把握住隔离开关检修维护的关键问题, 才能使隔离开关的安全运行得到保障。

参考文献

- [1] GB 50150-2006. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S]. (收稿日期: 2008-02-21)

一种典型电能计量装置错误接线的分析

周一飞, 白 泰

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:针对电能计量装置在三相三线的接线方式下,二次回路出现的一种错误接线的分析。再通过参数的测量、相量图的分析,确定错误所在,最后写出在错误接线方式下的功率表达式。

关键词:三相三线;错误接线;相量图;功率

Abstract: the analysis of a false connection accrued in secondary loop, aiming at the electrical energy metering device under the connection way of three phase three wire. Then, through the measuring of parameter, the analysis of phasor diagram, to confirm the mistake, and finally get the power expression under the false connection way.

Key words: three phase three wire; false connection; phasor diagram; power

中图分类号: TM933 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0087-02

对电能计量系统装置来说,接入中性点非绝缘系统的电能计量装置应采用三相四线电能表,接入中性点绝缘系统的电能计量装置应采用三相三线。而往往在三相三线接线方式下容易出现错接的情况,所以,针对一种比较典型的错接进行分析。

1 错误接线分析

1.1 错误现象是表尾电压相序为 ACB, 电流为 I_a 和 I_c

图1表示的是某三相三线电能表的实际接线方式。电压 U_{ab} 和 U_{cb} 分别接在电能表的第一元件和第二元件上。电压互感器的二次侧 B、C 相反接,使电能表的第一元件承受的实际电压为 U_{ac} ; 第二元件承受的实际电压为 U_{bc} 。第一元件通过的电流为 I_a , 第二元件通过的电流为 I_c 。

1.2 测量参数

1.2.1 电流测量

用电流钳表测量 A、C 相电流进线(保持正确极性),测试结果为 $I_a = 1.95 \text{ A}$, $I_c = 1.94 \text{ A}$, 将测试数据对应填入表1。

1.2.2 电压测量

将相位表的正负极分别接触到表尾的 A、B 相电压端子,测试结果为 $U_{ab} = 101 \text{ V}$ 。将相位表的正负极分别接触到表尾的 C、B 相电压端子,测试结果为 $U_{cb} = 101 \text{ V}$ 。将相位表的正负极分别接触到表尾的 C、A 相电压端子,测试结果为 $U_{ca} = 100 \text{ V}$ 。将测试数据填入表1。

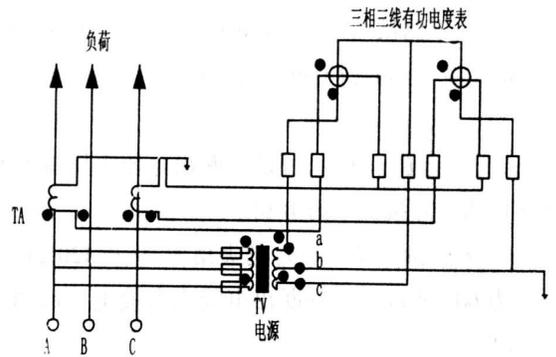


图1 三相三线电能表的实际接线方式

1.2.3 确定 B 相

将相位表的负极接触到电能表的接地螺丝,正极依次分别接触 A、B、C 三相电压端子,测得 $U_{ao} = 101 \text{ V}$, $U_{bo} = 101 \text{ V}$, $U_{co} = 0 \text{ V}$, 由此,可以判断,电能表尾的 C 相为实际接线中的 B 相。

1.2.4 测量相位角

将相位表的电流钳表卡住电能表 A 相的电流进线(保持正确极性),再将正极和负极的表笔接触到表尾的 A、B 相电压端子,测试得到 U_{ab} 和 I_a 夹角为 359° 。负极不动,将正极移至 C 相电压端子,测得 U_{cb} 和 I_a 夹角为 299° 。再用同样的方法可以测得 U_{ab} 和 I_c 的夹角为 239° , U_{cb} 和 I_c 的夹角为 180° 。将测试数据填入表1。

由于确认了电能表尾的 C 相为实际接线中的 B 相。现在测试 U_{ab}' 和 I_a , U_{cb}' 和 I_a 的夹角为 59° 和 120° (按实际接线测试)。

表1 实测记录

| | | | | |
|-------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 电流(A) | I_a | I_c | | |
| | 1.95 | 1.94 | | |
| 电压(V) | U_{ab} | U_{cb} | U_{ca} | |
| | 101 | 101 | 100 | |
| | U_{ao} | U_{bo} | U_{co} | |
| | 101 | 101 | 0 | |
| 角度(°) | U_{ab} 和 I_a | U_{cb} 和 I_a | U_{ab} 和 I_c | U_{cb} 和 I_c |
| | 359 | 299 | 239 | 180 |
| | U_{ab}' 和 I_a | U_{cb}' 和 I_a | | |
| | 59 | 120 | | |

1.3 确定电压相序

① 由于测试结果 $U_{ab}=101\text{V}$, $U_{cb}=101\text{V}$, $U_{ca}=100\text{V}$, 可以判断没有断相的情况发生, 电压幅值正常。

② 由于 $U_{co}=0\text{V}$, 可以判断出电能表尾端 C 相所接的为实际接线上的 B 相。

③ U_{ab}' 和 I_a , U_{cb}' 和 I_a 的夹角为 59° 和 120° , 角度差约为 60° , 所以可以判断出电能表所接电压的相序为 ACB。

1.4 错误接线的相量图和功率表达式

① 由于已经确定了电压相序为 ACB, 所以, 电能表第一元件的实际电压为 U_{ac} , 第二元件的实际电压为 U_{bc} 。

② 之前测得 U_{ab} 和 I_a , U_{cb} 和 I_a , U_{ab} 和 I_c , U_{cb} 和 I_c 的夹角分别为 359° , 299° , 239° , 180° ; 现在用 U_{ac} 替代 U_{ab} , U_{bc} 替代 U_{cb} 。

③ 根据表1里面测试的数据, 可以画出相量图, 如图2。

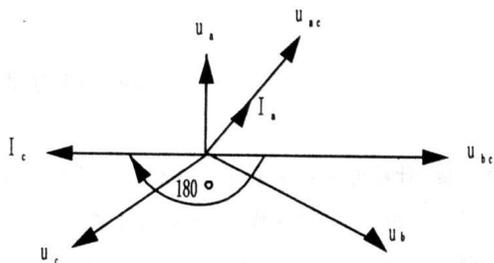


图2 正确接线相量图

④ 画出错误接线时的相量图, 如图3。

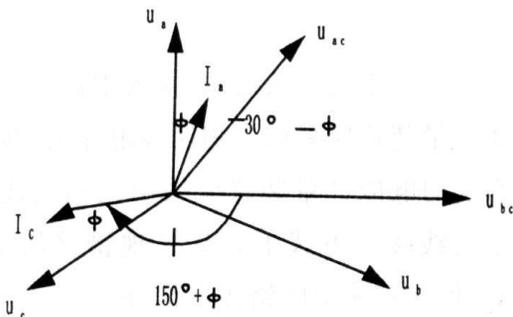


图3 正确接线相量图

1.5 写出错误接线的表达式:

第一元件测量的功率为

$$P_1 = U_{ac} I_a \cos(30^\circ - \varphi)$$

第二元件测量的功率为

$$P_2 = U_{bc} I_c \cos(150^\circ + \varphi)$$

当三相对称时, 测量总功率为

$$P = U_{ac} I_a \cos(30^\circ - \varphi) + U_{bc} I_c \cos(150^\circ + \varphi)$$

(收稿日期: 2008-03-25)

简讯

雷电参数统计方法

我国雷电参数十分匮乏, 传统的雷电参数不能全面地反映全国各个区域的雷电活动特征, 但电网雷电监测网(CGLDN)长期积累的海量雷电监测数据已成为雷电参数统计的基础资料。为了正确统计基于雷电定位系统测量数据的雷电参数, 在介绍和分析了雷电监测资料的基础上, 提出了雷电监测资料统计样本库的概念和处理方法; 提出了适用于基于现代雷电自动监测资料的雷电日、地闪密度、地面落雷密度、地闪频数的网格统计法; 提出了与传统气象资料的比对研究的方法和条件, 推荐了适用于雷电流幅值分布的数学表达式。建立一个科学、规范的分析 and 统计方法, 对我国已经展开的大规模雷电参数及其分布的统计研究具有重要意义。

新建燃煤机组如何适应偏离设计值的煤种要求

陈建

(国电达州发电有限公司,四川达州 635066)

摘要:新建燃煤机组性能直接关系到电站锅炉运行的安全可靠和经济高效,由于煤炭市场的千变万化,实际入炉煤偏离设计值较大。如何维持低负荷稳定燃烧、如何提高锅炉对煤种变化的适应性。利用分层燃烧来进行分析研究,并给出其实际应用的情况。

关键词:燃煤机组;分层燃烧;适应;煤种

Abstract: The performance of the newly built coal-fired unit is directly related to the safe, reliable, economic and high-efficient operation of utility boiler. Due to the ever-changing coal market, the actual burning coal is deviated from the designed coal greatly. How to maintain the stable low-load combustion and how to improve the coal boilers for change are the key points of the research. Analyses are carried out using stratified combustion and its practical application situation is given.

Key words: coal-fired unit; stratified combustion; adaptation; kind of coal

中图分类号:TK227 文献标识码:B 文章编号:1003-6954(2008)03-0089-03

1 设备概况

国电深能四川华蓥山发电有限公司Ⅲ期工程装机为2×300 MW机组,锅炉型号DG1025/18.2-Ⅱ4,亚临界中间一次再热,采用摆动式燃烧器调温,四角布置、切向燃烧、乏气送粉、自然循环汽包炉,单炉膛π型露天布置,燃用烟煤,平衡通风,固态排渣,全钢架结构,炉顶带金属防雨罩。炉膛宽13 335 mm,深12 829 mm,炉顶标高为72 400 mm。炉膛上部布置了全大屏、后屏过热器,水平烟道布置了中再、高再及高过。后竖井内设有低温过热器和省煤器。炉后布置两台二分仓容克式空气预热器。

锅炉采用中间储仓式制粉系统,配四台DTM350-600型筒式钢球磨煤机,设计出力为30 t/h, MCR工况三台运行,一台备用。

燃烧器共设置六层煤粉喷嘴,按A~F的顺序等间布置。煤粉管道从磨煤机出口供至燃烧器进口,每台磨煤机出口由6根煤粉管道接至同一层四角布置的煤粉燃烧器和相邻上层二角布置的煤粉燃烧器。每角燃烧器风箱分成15层,其中A、B、C、D、E、F 6层为一次风喷嘴,其余9层为二次风喷嘴。一、二次风呈间隔排列,在AB、CD、EF 3层二次风室内设有启动及助燃油枪,共12支。为了降低四角切圆燃烧引起的炉膛出口及水平烟道中由于烟气的残余旋转造成的烟气侧的屏间热偏差,采用同心反切加燃尽风

(OFA)。燃烧器一次风喷嘴采用等间距布置。喷燃器喷嘴摆动采用气动执行机构,在热态运行时,一次风上下摆动各30°。采用典型大风箱结构,保证四角配风均匀,在煤粉气流均匀的条件下,可有效防止切圆偏斜。

2 有关技术参数

技术参数见表1、表2。

表1 锅炉连续蒸发量工况参数

| | BMCR | BECR |
|-------------------|-----------|------------|
| 过热蒸汽 最大连续蒸发量(t/h) | 1 025 | 904.4 |
| 出口蒸汽压力(MPa·g) | 17.4 | 17.4 |
| 出口蒸汽温度(°C) | 540 | 540 |
| 再热蒸汽 蒸汽流量(t/h) | 848.3 | 753.9 |
| 进/出口蒸汽压力(MPa·g) | 3.82/3.64 | 3.39/3.25 |
| 进/出口蒸汽温度(°C) | 325.6/540 | 313.8 /540 |
| 给水温度(°C) | 275.5 | 267.8 |

3 锅炉存在的问题

国电深能四川华蓥山发电有限公司两台300 MW机组分别于2006年2月17日、3月24日相继通过168 h运行,进入试生产期。

表2 设计燃煤与实际入炉煤质对比

| 名称 | 设计煤种 | 校核煤种 | 实际燃煤 |
|---|--------|--------|--------|
| 收到基含碳量 Car(%) | 52.05 | 50.87 | 39.71 |
| 收到基含氢量 Har(%) | 3.16 | 2.40 | 2.19 |
| 收到基含氧量 Oar(%) | 5.99 | 3.67 | 3.94 |
| 收到基含氮量 Nar(%) | 0.95 | 0.69 | 0.48 |
| 收到基含硫量 Sar(%) | 1.24 | 1.18 | 2.59 |
| 收到基含灰份 Aar(%) | 32.91 | 33.99 | 43.99 |
| 收到基水份 Mar(%) | 3.7 | 7.2 | 0.88 |
| 干燥无灰基挥发份 Vdaf(%) | 27.5 | 24.65 | 18.37 |
| 收到基低位发热量 Q _{net,ar} (kJ/kg) | 21 050 | 19 310 | 15 160 |
| 可磨系数 HGI | 82 | 80 | 82 |
| 冲刷磨损指数 Ke | | | |

3.1 燃烧不稳

在168 h试运过程中,230 MW 负荷时停止油枪助燃,立即出现燃烧不稳定现象,通过运行调整无法控制住,不到半小时熄火。2006年2月9日锅炉负荷在245 MW 时出现一个燃烧器来粉状况不好,引起锅炉燃烧波动,锅炉炉膛负压达1 000 Pa,锅炉熄火。经过运行调整,锅炉在250 MW 时可停止油枪助燃。锅炉不投油助燃时其最低稳燃负荷只能维持在250 MW。

3.2 给粉机超负荷运行

在机组整体调试期间,锅炉出现:负荷在300 MW 时,给粉机总转速高达20 000 r/min,24台给粉机电机(设计为940 r/min)平均转速高达833 r/min,按给粉机厂家提供的转速/出力曲线,此时,每台给粉机的出力已经接近其设计的最大出力9 t,入炉总粉量高达210 t,大大超过设计煤133 t。给粉机长期在高转速下运行,对给粉的连续性、均匀性和电机的使用寿命影响大,引起锅炉燃烧波动;给粉机在高转速下运行,易经常出现跳闸,对机组的稳定运行和锅炉的出力造成很大影响。

3.3 锅炉排烟温度偏高

锅炉排烟温度高于设计值,在机组额定负荷下,锅炉排烟温度平均值到145℃,高于设计值135℃比较多,影响了机组运行的经济性。

4 分层燃烧优化方案

经统计,各煤矿对燃煤供给情况:精煤(其煤质优到设计煤,其 $Q_{\text{net,ar}}$ 为24 000 kJ/kg左右)年最大供应量在30万吨;大矿煤(煤质较稳定,其 $Q_{\text{net,ar}}$ 为17 000 kJ/kg左右)年最大供应量在60万吨;综合煤(煤质差 $Q_{\text{net,ar}}$ 为13 000 kJ/kg左右)年计划供应量在60万吨。

在对给粉机出力由9 t改造为12 t后,进行如下四种试验(见表3、表4)。

表3 试验方案比较表

| 步骤 | 方案一 | 方案二 | 方案三 | 方案四 |
|----|---|--|---|---|
| | D磨配精煤,其余大矿煤 | D磨配精煤与大矿煤1,其余大矿煤 | D磨配精煤与大矿煤1, C磨大矿煤,其余综合煤 | D磨配精煤与大矿煤1, B、C磨大矿煤, A磨综合煤 |
| 1 | 通知煤控D磨按要求上精煤,其余大矿煤 | 通知煤控D磨按要求上精煤,其余大矿煤 | 通知煤控D磨按要求上精煤,其余大矿煤 | 通知煤控D磨按要求上精煤,其余大矿煤 |
| 2 | D磨的部分运行参数按如下要求控制: 1)D磨的出口温度设定并控制在70℃; 2)控制D磨的入口温度<270℃; 3)控制D磨的给煤量在40 t/h。 | D磨的部分运行参数按如下要求控制: 1)D磨的出口温度设定并控制在90℃; 2)控制D磨的入口温度<270℃; 3)控制D磨的给煤量在40 t/h | D磨的部分运行参数按如下要求控制: 1)D磨的出口温度设定并控制在90℃; 2)控制D磨的入口温度<270℃;3)控制D磨的给煤量在40 t/h。 | D磨的部分运行参数按如下要求控制: 1)D磨的出口温度设定并控制在90℃; 2)控制D磨的入口温度<270℃;3)控制D磨的给煤量在40 t/h。 |
| 3 | 监视球磨机电流、振动、炉膛压差等参数 | 监视球磨机电流、振动、炉膛压差等参数 | 监视球磨机电流、振动、炉膛压差等参数 | 监视球磨机电流、振动、炉膛压差等参数 |

| | | | | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 4 | 注意检查该煤层对燃烧器着火情况 | 注意检查该煤层对燃烧器着火情况 | 注意检查该煤层对燃烧器着火情况 | 注意检查该煤层对燃烧器着火情况 |
| 5 | 加强有关参数的记录与分析 | 加强有关参数的记录与分析 | 加强有关参数的记录与分析 | 加强有关参数的记录与分析 |
| 6 | 加强锅炉燃烧的调整、测量炉膛温度、排烟温度等 | 加强锅炉燃烧的调整、测量炉膛温度、排烟温度等 | 加强锅炉燃烧的调整、测量炉膛温度、排烟温度等 | 加强锅炉燃烧的调整、测量炉膛温度、排烟温度等 |

表4 各试验工况主要运行参数表

| 名称 | 设计值 | 168 工况 | 试验第一工况 | | 试验第二工况 | 试验第三工况 | 试验第四工况 |
|----------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| | ECR 工况 | 300 MW 工况 | | | | | |
| 电负荷(MW) | 300 | 300 | 300 | 300 | 270 | 300 | |
| 蒸发量(t/h) | 947.4 | 990 | 960.4 | 965.3 | 860.4 | 955.3 | |
| 出口压力(MPa(g)) | 17.24 | 16.7 | 17.14 | 17.03 | 16.54 | 16.93 | |
| 出口温度(°C) | 540 | 538 | 538 | 538 | 537 | 539 | |
| 再热蒸汽 | | | | | | | |
| 进/出口压力(MPa(g)) | 3.50/3.33 | 3.4/3.22 | 3.48/3.29 | 3.46/3.28 | 3.28/3.19 | 3.44/3.26 | |
| 进/出口温度(°C) | 318/540 | 327/540 | 320/540 | 319/540 | 320/540 | 317/540 | |
| 给水温度(°C) | 274 | 278 | 276 | 276 | 270 | 277 | |
| 空气预热器 | | | | | | | |
| 进口空气温度(°C) | 20 | 18 | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| 出口空气温度(°C) | 334 | 330 | 332 | 330 | 325 | 332 | |
| 给粉机转速(r/min) | 440 | 833/458(改前/后) | 430 | 445 | 465 | 445 | |
| 排烟温度(°C) | 135 | 145 | 135 | 137 | 138 | 135 | |
| 最低稳燃负荷(MW) | 120 | 250 | 118 | 118 | 150 | 140 | |

5 结论与建议

通过国电深能四川华蓥山发电有限公司Ⅲ期工程四种锅炉分层燃烧运行工况与未采用分层燃烧运行方式比较表明:由于锅炉采用乏气送粉的方式,乏气温度低(为保证制粉系统运行的安全,排粉风机入口干燥剂温度设计为60°C),乏气送粉系统送粉的介质是乏气,乏气温度较低,导致煤粉着火推迟,因此锅炉燃烧对外界扰动的适应能力减弱,即乏气送粉系统本身对煤的适应能力较差,所以在燃用煤质变化较大,特别是高灰份、低挥发份、低发热量煤时,不利于燃烧。

采用对下层燃烧器相应的煤粉仓D磨制精煤与大矿煤,精煤与大矿煤按1:1进行配兑;在对中层燃烧器相应的煤粉仓B、C磨制大矿煤;在对上层燃烧器相应的煤粉仓A磨制综合煤;在低负荷时,采用对煤粉仓A、B磨制综合煤。在采用分层配煤燃烧后运行稳定,机组能够长时间维持在额定负荷工况下运行;锅炉最低稳燃负荷分别为118 MW/119 MW(设计为应不大于40%BMCR)。同时,也保证了锅炉等离子点

火系统对煤质的要求,使等离子点火系统能充分发挥其助燃、稳燃的作用,从而创造出更大的经济效益。

国内外也有许多电厂采用配煤的方式来解决由于燃煤市场的变化给锅炉燃烧带来的不利影响。与其比较,国电深能四川华蓥山发电有限公司Ⅲ期工程采用的分层燃烧优化方式有以下不同和独特之处:

(1) 在原有的设备基础上,没有增加任何设备。采用配煤的国内外其他电厂都用专用的配煤设施。

(2) 进入锅炉的燃烧器的煤分为4个层次,由下向上依次由优煤变劣煤。这符合锅炉燃烧理论,能保证锅炉燃烧稳定的同时,也能使各种煤在炉内充分燃尽,保证其经济性。而采用配煤的国内外其他电厂在进入锅炉各层燃烧器的煤是经过配备均匀的一样的煤。

(3) 由于国内燃煤市场的变化,各个电厂在设计与实际运行中,燃煤变化都较大。特别对采用乏气送粉的机组,由于乏气送粉系统本身对煤的适应能力较差,所以在燃用煤质变化较大,特别是高灰份、低挥发份、低发热量煤时,不利于燃烧。故,采用分层燃烧优化方式对同类电厂有很大的指导作用。

(收稿日期:2008-01-12)

燃煤电厂二氧化硫减排形势及治理措施分析

邢伟

(华电四川发电有限公司, 四川 成都 610016)

摘要:在分析中国燃煤电厂二氧化硫减排现状的基础上,从国家节能减排政策、环保法规、经济措施、环保执法和惩治力度等方面简述了燃煤电厂二氧化硫减排面临的严峻形势,分析了为实现减排目标应采取的治理措施,指出燃煤电厂应强化脱硫设施运行管理,确保脱硫设施长期可靠运行。

关键词:燃煤电厂;二氧化硫;减排;分析

Abstract: Based on the analysis of the reduction status of SO₂ emission in coal-fired power plants in China, several main aspects are proposed to observe the reduction situation of SO₂ emission faced by the coal-fired power plants covering the energy-saving and emission-reducing policies, pollution control regulations, economic measures, execution of pollution control law and so on. The treatment measures are analyzed which are used to achieve the target of emission reduction. And it is presented that the management of FGD operation should be strengthened to insure its long-term and reliable operation.

Key words: coal-fired power plant; sulfur dioxide; emission reduction; analysis

中图分类号: X77 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)03-0092-03

“十五”以来,中国能源消费超常规增长,煤炭消费量从2000年的13.2亿吨猛增到2005年的21.67亿吨,其中电煤消耗约占全国消费量的一半以上。根据能源规划预测,中国的煤炭消费总量将持续增长,到2010年,火电机组将增加到700 GW,发电用煤将超过16亿吨。进入“十一五”后,中国环境保护工作进入了以环境优化经济增长的历史性转变新阶段,在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》中明确将单位GDP能耗降低20%和主要污染物排放总量减少10%,作为“十一五”期间经济社会发展的两项约束性指标,到2010年,全社会二氧化硫排放量减少到2 295万吨。其中,燃煤电厂二氧化硫排放总量必须控制在951.7万吨以下,比2005年降低近30%,是二氧化硫总量削减的主战场。燃煤电厂二氧化硫治理和减排面临前所未有的严峻形势。

1 燃煤电厂二氧化硫减排的现状

二氧化硫排放是造成中国大气污染和酸雨不断加剧的主要原因,燃煤电厂二氧化硫排放量约占全国二氧化硫排放量的50%。“十五”期间,国家出台了一系列法规和政策,促进了燃煤电厂二氧化硫减排。

通过关停小火电机组、换烧低硫煤、节能降耗和推进烟气脱硫等综合措施,二氧化硫排放量控制取得重要进展。但是,国家“十五”期间环境保护计划指标并没有全部实现,二氧化硫排放量由2000年的1 995万吨增加到2005年2 549万吨,增加了27.8%,未能完成削减10%的控制目标。进入“十一五”以来,火电厂烟气脱硫设施建设及投运速度明显加快,电力二氧化硫排放量的增长势头得到有效遏制。2006年,全国新增7 000多万千瓦的脱硫装机容量,超过前十年投运的脱硫机组装机容量的总和,脱硫装机容量达到1.2亿多千瓦,占全国煤电总装机容量的比例由2000年的2%上升到2006年的30%以上,形成了500多万吨的削减能力,二氧化硫排放绩效值同比下降了0.7 g/kWh。在全国电煤用量增长10.6%的情况下,电力二氧化硫排放量仅比上年增加3.8%。

但是,2006年全国二氧化硫排放量和电力二氧化硫排放量减排2%的预定减排目标都没有实现,这加大了“十一五”后四年二氧化硫减排的难度,面临的形势相当严峻。

2 燃煤电厂二氧化硫减排面临的形势

由于燃煤电厂二氧化硫排放量占全国排放量的

一半,并且燃煤电厂二氧化硫排放具有集中性和可控性的特点,燃煤电厂二氧化硫排放量的削减须承担起“十一五”期间全国二氧化硫减排的主要任务。在“十一五”期间,只要燃煤电厂二氧化硫的排放量下降至951.7万吨以下,在电力以外的二氧化硫排放不增加或少量增加的情况下,其净消减量就可以满足全国二氧化硫减排10%的约束性指标的需要。近期,国家出台了一系列法规和政策,强化监督管理,推动燃煤电厂二氧化硫减排。

2.1 节能减排政策

经国务院批准的《节能减排综合性工作方案》要求:建立各级政府节能减排问责制和“一票否决”制。国务院国发(2007)2号“关于加快关停小火电机组若干意见的通知”提出:在大电网覆盖范围内逐步关停以下燃煤(油)机组:单机容量50 MW以下的常规火电机组;运行满20年、单机100 MW级以下的常规火电机组;按照设计寿命服役期满、单机200 MW以下的各类机组;供电标准煤耗高出2005年本省(区、市)平均水平10%或全国平均水平15%的各类燃煤机组;未达到环保排放标准的各类机组。

国家发展改革委等四部委联合下发的《节能发电调度办法(试行)》要求能耗低、污染物排放水平低的火电机组优先调度发电。火电机组按照能耗水平由低到高排序,节能优先;能耗水平相同时,按照污染物排放水平由低到高排序。

2.2 更严格的环保法规

《火电厂大气污染排放标准》(2003)是燃煤电厂污染治理的最基本要求。目前,国家正在组织进行火电厂排放标准的新一轮修订,对火电厂的污染控制将提出更严格的要求。

国家发改委和环保总局以发改环资(2007)592号文下发了《燃煤电厂二氧化硫治理“十一五”规划》,国家环保总局下发《二氧化硫总量分配意见》,要求各发电集团公司二氧化硫排放实行总量控制,新建、扩建火电机组所需的二氧化硫总量只能从现有总量余额中取得。国家发改委代表国务院与六大发电集团公司签订了《“十一五”二氧化硫总量削减目标责任书》。如:到2010年底,中国华电集团公司二氧化硫排放总量要在2005年的基础上削减44.9%,控制在92.6万吨以内。

2.3 更严厉的减排经济措施

国家发改委和环保总局以发改价格[2007]1176号文下发的《燃煤发电机组脱硫电价及脱硫设施运行管理办法(试行)》,明确了新(扩)建燃煤机组执行脱硫标杆电价,现有燃煤机组脱硫设施投运后执行1.5分/kWh的脱硫加价的政策;对电厂使用的煤炭平均含硫量大于2%或者低于0.5%的省份,脱硫加价标准可单独制定。同时,将脱硫电价与二氧化硫的治理效果而不是治理措施挂钩,加大了对脱硫设施投运率较低电厂的经济处罚,脱硫设施投运率在90%以上的,扣减停运时间所发电量的脱硫电价款;脱硫设施投运率在80%~90%的,扣减停运时间所发电量的脱硫电价款并处1倍罚款;脱硫设施投运率低于80%的,扣减停运时间所发电量的脱硫电价款并处5倍罚款。

按照补偿治理成本原则,国家近期还将提高排污单位排污费征收标准,三年内将二氧化硫排污费由目前的每公斤0.63元,提高到每公斤1.26元。

国务院国发(2007)36号文《关于批转节能减排统计监测及考核实施方案和办法的通知》新提出了企业二氧化硫排放量的核算和校正办法:企业非正常排放量=企业SO₂产生量×脱硫效率×(1-监察系数);发现被检查企业脱硫设施非正常运行一次,监察系数取0.8,非正常运行二次监察系数取0.5,超过两次非正常运行,监察系数取0;脱硫设施非正常运行定义为生产设施运行期间脱硫设施因故未运行而没有向当地政府环境保护主管部门及时报告的、没有按照工艺要求使用脱硫剂的、使用旁路偷排手段等其他违法行为。发现被检查企业脱硫设施非正常运行次数超过两次,该企业将被视为全年未脱硫运行。

2.4 更严厉的环保执法和惩治力度

国家环境保护总局连续三年实施“环保风暴”,加大了环境执法、公众监督、环保惩治力度。国家发布了《环境保护违法违纪行为处分暂行规定》、《关于转发〈最高人民法院审理环境污染刑事案件具体应用法律若干问题的解释〉和〈最高人民检察院关于渎职侵权犯罪案件立案标准的规定〉(节选)的通知》和《关于环境保护行政主管部门移送涉嫌环境犯罪案件的若干规定》等三个文件,是贯彻实施刑法中有关惩治环境污染和环境监管失职犯罪行为的规定。国家还将修改相关法律法规,扩大“区域限批”政策的范围。

3 实现二氧化硫减排目标的主要措施

燃煤电厂的二氧化硫减排是实现国家“十一五”减排目标的主战场,要实现国家下达的电力行业减排目标,应以烟气脱硫为主要手段,采取关停小火电和节能降耗等综合措施,强化监督管理,实现燃煤电厂二氧化硫减排目标。

(1)加快实施燃煤电厂脱硫工程,是削减二氧化硫排放量的根本保障。严格控制新建项目二氧化硫排放量,新、改、扩建煤电机组必须同步安装脱硫装置,其二氧化硫指标须通过现役机组脱硫削减和小机组关停腾出容量获取。没有明确二氧化硫总量来源的,该工程环境影响评价报告将不予受理。加快老机组脱硫技改步伐,列入“十一五”减排目标责任书的221个共137 GW的现役火电机组脱硫技改项目应按期建成并正常运行,使2010年投入运行的现役火电机组脱硫技改装机容量达到230 GW(不含循环流化床锅炉),实现削减现役火电机组二氧化硫503万吨的目标。

(2)逐步淘汰小火电机组,是减排二氧化硫的重要措施。按照《关于加快关停小火电机组若干意见的通知》,确定了“十一五”期间关闭5000多万千瓦小火电的任务,将减排160万吨二氧化硫。

(3)通过节能降耗,降低单位发电量二氧化硫的排放绩效。通过加强现有电厂节能技术改造,推进“上大压小”工作,提高大容量机组比重;降低火电供电煤耗。据预测,到2010年,全国燃煤电厂的供电煤耗将由2005年的370 g/kWh降低至355 g/kWh,降低4.05%,这将带来二氧化硫排放绩效相应降低4.05%的效果。

(4)加强脱硫设施运行的监督管理。尽快完成燃煤电厂烟气在线监测装置联网工作,加强实时监控,促使燃煤电厂加强脱硫设施运行管理,提高脱硫装置和主机同步投运率,充分发挥已投运脱硫设施的减排作用。

预计到2010年,全国现役火电机组脱硫技改和

新建火电同步安装脱硫装置的机组总容量将达到355 GW,占火电装机容量的1/2,形成1200万吨的脱硫能力,燃煤电厂二氧化硫排放绩效将由2005年的6.4 g/kWh下降到2010年的2.7 g/kWh,下降57.8%,实现“十一五”电力行业二氧化硫总量减排目标是可行的。

4 结束语

(1)燃煤电厂的二氧化硫减排是实现国家“十一五”减排目标的主战场,国家出台了一系列法规和政策,采取政治、经济和法律等多种手段,促进燃煤电厂二氧化硫减排。

(2)燃煤电厂二氧化硫减排应以烟气脱硫为主要手段,采取关停小火电和节能降耗等综合措施,强化脱硫设施监督管理,实现“十一五”燃煤电厂二氧化硫减排目标。(3)燃煤电厂应依法经营,按照国家二氧化硫减排有关政策和规定,强化脱硫设施运行管理,将脱硫设备纳入正常生产设备管理,脱硫设备的备品纳入正常设备备品管理,脱硫设备缺陷与主机的缺陷同等对待、同等考核。在机组大小修时同步安排脱硫设施检修工作,足额保证石灰石的购置费用,确保脱硫设施长期可靠运行,充分发挥其减排的效果,为完成国家“十一五”减排目标做出贡献。

参考文献

- [1] 国家环境保护总局. 关于印发电力企业现役燃煤机组“十一五”重点烟气脱硫工程项目名单及二氧化硫总量削减目标责任书的通知[Z]. 环函(2006)239号, 2006.
- [2] 国家发展和改革委员会、国家环境保护总局. 燃煤发电机组脱硫电价及脱硫设施运行管理办法(试行)[Z]. 发改价格[2007]1176号, 2007.
- [3] 国务院. 关于加快关停小火电机组若干意见的通知[Z]. 国发(2007)2号, 2007.
- [4] 国务院. 关于批转节能减排统计监测及考核实施方案和办法的通知[Z]. 国发(2007)36号, 2007.

(收稿日期:2008-01-30)

众志成城 抗震救灾