

· 网络版 · 双月刊

· 本刊刊登国内外电力行业重大科技项目

· 本刊设专家顾问“专家论坛”· 人物专访

· 本刊地址：成都双楠（四川电力）

· 投稿：(028)86667777 · 订阅：(028)86667777

· 印刷品：(028)86667777

· 编辑部：(028)86667777

· 中国农村电气化促进会

· 编辑部：(028)86667777

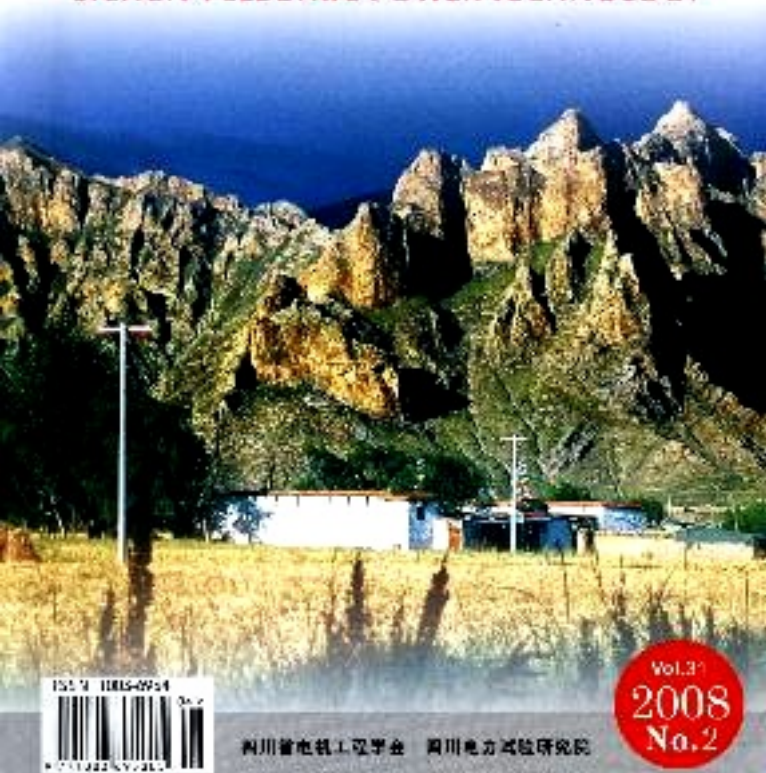
· 编辑部：(028)86667777

· 编辑部：(028)86667777

· 编辑部：(028)86667777

# 四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1005-0954



028-86667777

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.31

2008  
No.2

# 输变电设备状态维修策略

方 晴, 罗军川, 华永东

(四川省广元电业局, 四川 广元 628000)

**摘 要:**论述了电力变压器、SF<sub>6</sub>开关和输电线路的状态维修策略,指出了状态维修工作中应当注意的几项重要环节,对开展输变电设备状态维修有重要参考价值。

**关键词:**电气设备;状态分析;维修策略;控制盐密

**Abstract:** The state maintenance strategies of power transformer, SF<sub>6</sub> switch and transmission line are discussed, and several important links needing attention in state maintenance are pointed out, which have a significant reference value for implementing the state maintenance of transmission and transformation equipment.

**Key words:** electric apparatus; state analysis; maintenance strategy; salt density control.

**中图分类号:** TM63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003—6954(2008)02—0001—05

## 1 状态维修的基本策略<sup>[1]</sup>

### 1.1 状态信息的构成

状态维修的基础在于状态分析,而状态分析的基础是状态信息。因此设备状态信息是评估设备状态的主要依据和开展状态维修的必要条件。设备状态信息主要包括:①预防性试验数据(包括传统试验项目、特殊试验项目、带电诊断以及在线监测等);②与设备状态相关的运行信息(如反映变压器寿命损失的负荷—时间记录、反映开关触头老化的开断大电流—时间记录等);③缺陷、事故和维修记录(包括家族质量记录)。过去,在人们日常的设备管理中,这些状态信息彼此隔离或无记录,这不利于全面的设备状态分析,建议建立计算机管理档案系统。

预防性试验以《预防性试验规程》为主,但应考虑近年来发展的新的试验技术,如变压器绕组变形、红外和紫外检测等。不良运行工况因设备不同而异,如变压器,可以考虑过负荷(过负荷程度和持续时间)、侵入波(幅值和陡度)、出口(近区)短路等;对于断路器包括开断短路以及负荷电流的幅值、时间、操作次数等等。缺陷记录指从出厂试验、交接试验和运行过程中发现的各种异常和缺陷,包括非绝缘性缺陷,如漏油、漏气等。维修记录主要反映设备的维修历史,如何种原因维修、何种性质的维修、维修中发现的问题与维修前评估、维修的效果等。家族质量记录主要基于这样一个概念,同一型号、特别是同一制造商同

一型号的设备,往往有共同的质量弱点,家庭质量记录对其它设备有警示作用。

### 1.2 状态分析和维修策略

状态分析的目的是基于设备的状态信息,对设备状态做出一个初步的评价,作为安排维修的一个依据。设备状态分析方法有两个:横向对比和纵向对比。横向对比是将某个设备的状态信息与同类设备等相比较,以确定劣化的显著性,若被比较设备的状态信息与同类设备之间没有显著性差异,基本可以确定设备是正常的,比较时涉及的同类设备越多,结论越可靠。因为大量设备同时出现缺陷的几率很小。在进行横向比较时有两个因素可能影响结论,一是同类设备的含义,二是同类设备的数量。纵向对比分析是从设备劣化的趋势来确定设备的状态,即不局限以一个阈值作为设备“合格”与“不合格”的分水岭,而是根据劣化的趋势来识别设备的状态。其实许多情况下设备的状态并非如此界限分明,缺陷的最终显露通常是微小的劣化逐步发展的结果,所以说,相当部分的设备处在正常和有缺陷之间的第三种状态,即灰色状态,而这些设备才是状态监督管理的重点和难点。

#### 1.2.1 电力变压器

目前,国内有些地方依据设备实际的状态信息,包括各个试验项目(如在线监测、预防性试验、交接试验等)、家族缺陷事故记录、不良运行工况记录等,将变压器设备状态划分为四类,即正常状态、可靠性下降状态、可疑状态和危险状态,并兼顾设备在网的重要性,对维修周期及维修方案进行灵活的调整,

进而针对处于不同状态的设备采用不同的维修策略<sup>[2]</sup>。

1) 正常状态:指运行正常、试验数据正常或其中个别试验参数可疑,但数据稳定的变压器。处于正常状态下的变压器,应坚持正常在线监测、离线的周期性试验以及值班员和专业维修人员定期的巡视检查。

2) 可疑状态:指在试验周期内,发现某些参数反映变压器内部可能有异常现象,但仍有很多不确定因素的变压器。

可疑状态情况下,变压器可继续运行,但应缩短试验周期并跟踪监测,在监测期间没有进一步劣化趋势并稳定在某一合格值内,变压器可不进行维修。凡属此类变压器,应作出诊断报告,制订出缩短周期及跟踪监测、检查试验项目措施计划。

3) 可靠性下降状态:指历次周期性试验或跟踪测试结果分析存在故障,且基本确定故障部位及故障原因,分析判断这种故障在短期内不会发生事故的变压器,但变压器绝缘状态及安全可靠性在下降,变压器必须通过维修才能恢复到正常状态,但估计在短期内不会有危险。凡属此类变压器,应作出诊断报告,抓紧安排停电,进行有针对性的维修。

4) 危险状态:指试验数据或运行参数表明,变压器内部故障已不能运行或运行中随时有可能发生事

故的变压器。此时变压器已处于危险状态,应立即停止运行,进行恢复性维修,并考虑吊罩(吊芯)维修。

1.2.2 SF<sub>6</sub> 断路器

SF<sub>6</sub> 开关由于其具有开断容量大、寿命长、维护工作量少、运行可靠等诸多优点,已在电力系统中得到广泛的应用。SF<sub>6</sub> 开关本身具有的特点以及对维修(尤其是大修)的特殊要求,并结合安全、经济运行的要求,使得原主要针对少油开关而制定的有关开关设备维修规定已不能满足实际的生产需要,而国产设备制造厂则要求其产品投运 10~15 年需做解体大修,20 世纪 90 年代初期以来安装投运的 SF<sub>6</sub> 开关设备将不可避免面临这一问题,为此修订 SF<sub>6</sub> 开关维修的有关规定,根据开关运行状况和性能的好坏决定开关是否进行维修,进行何种程度的维修,针对不同状态的设备采用不同的维修策略,即开展 SF<sub>6</sub> 开关状态维修已显得十分必要。

根据广东省在 SF<sub>6</sub> 开关多年运行维护经验的基础上,通过对连续运行了近 10 年的多台平开 LW6—110 断路器进行返厂首次解体(解体前测试结果均在合格范围内)情况的研究分析(解体情况从略),得出了一些有益的结论<sup>[3]</sup>,为开展 SF<sub>6</sub> 开关状态维修奠定了基础。表 1 即是 SF<sub>6</sub> 开关状态分析与维修策略。

表 1 SF<sub>6</sub> 开关状态分析与维修策略

| 维修设备<br>状态判据           | 本 体                                                                                                                                            | 液压操作机构                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 满容量开断次数                | >19 次,应解体大修                                                                                                                                    | 一般不宜进行解体维修,从技术性和经济性两者着眼,较适宜的做法是局部更换或整体更换。<br>①运行时间 10 年及以上,如属高压油系统内的主阀体元件故障,则对整个液压系统进行更换。若是仅低压油系统元件出现故障,则仅更换该元件;<br>②运行年限在 10 年以内,原则上是更换故障元件。若液压系统内的主要阀体元件普遍存在问题,则应采取整体更换方式;<br>③对于管道接头,其维修较简单,一般采取紧固螺帽或重做接头处理。 |
| 累计开断电流值                | ≥4 000 kA,应解体大修                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                 |
| SF <sub>6</sub> 气体泄漏量  | >1%,应解体大修                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                 |
| SF <sub>6</sub> 气体微水含量 | >300×10 <sup>-6</sup> ,经两次以上处理(间隔时间 6 个月)仍不能解决,应解体大修                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                 |
| 回路电阻                   | 严重超标,视实际情况经分析后确定是否解体维修                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                 |
| 瓷套完好情况                 | 瓷套破损严重,有明显裂纹                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                 |
| 备 注                    | 开关的电寿命、SF <sub>6</sub> 气体泄漏及微水含量是确定 SF <sub>6</sub> 开关本体是否需要大修的主要状态指标。应结合各种停电机会,对开关外部进行必要的维护修理工作。检查各法兰处的密封情况,譬如密封面内有无锈水渗出,密封硅脂是否老化破损,如有问题及时修补。 |                                                                                                                                                                                                                 |

注释:累计开断电流值为开关历次开断的短路电流和负荷电流之总和(含满容量开断电流)。

### 1.2.3 输电线路

目前,输电线路的状态维修内容主要是以盐密测量值指导线路清扫周期,以及利用红外诊断结果对引流线夹和压接管发热缺陷进行针对性维修。

架空输电线路的运行状态取决于绝缘子的耐污水平。据有关资料反映的情况来看,停电维修期间清扫工作要占整个维修工作量的80%左右<sup>[4]</sup>,且由于停电时间短,清扫质量得不到保证,甚至出现刚清扫完就发生污闪的现象。因此,架空输电线路状态维修的主要内容就是解决状态清扫问题。

1) 盐密增长估算公式。根据多年来盐密测试数据的统计结果和经验,输电线路绝缘子串积污从每年的9月开始逐步增加,到第2年雨季来临前的3月左右达到最大,这段时间为绝缘子的积污期,之后由于春夏季雨水的冲刷盐密下降,直到干燥的秋季绝缘子串积污过程又重新开始。绝缘子的积污周期一般在每年9月份至次年雨季前的3月份。在积污周期内,绝缘子表面污物的累积按2个速率增加;在起始阶段绝缘子表面积污快速增长;在积污后期绝缘子表面积污缓慢增长。

110 kV 线路整串为普通型绝缘子盐密增长估算公式<sup>[4]</sup>:

$$S_d = S_0 + 2.16 \times 10^{-4} T_1 + 1.43 \times 10^{-4} T_2 \quad (1)$$

220 kV 线路整串为耐污型绝缘子盐密增长估算公式<sup>[4]</sup>:

$$S_d = S_0 + 1.71 \times 10^{-4} T_1 + 1.11 \times 10^{-4} T_2 \quad (1)$$

式中: $S_d$ 为盐密估算值; $S_0$ 为在积污周期内第1次盐密测试基准值(建议选择为每年10月底的盐密测试值); $T_1$ 为从第1次盐密测试到年底的12月31日之间的天数; $T_2$ 为1月1日至2月28日之间的天数。

2) 几种较为常用的线路绝缘子盐密控制值的计算(估算)方法:

(1) 表面电导率估算控制盐密值。由绝缘子污闪机理可知,只要控制污秽绝缘子表面局部放电的发展,就能避免污闪的发生。

因此,自然污秽绝缘子串最大泄漏电流从试验结果来看一般应控制在80 mA及以下,留有20%的安全裕度,选取自然污秽绝缘子最大泄漏电流控制值为65 mA是适宜的。

在一定绝缘结构和一定污秽程度下运行的绝缘子,必然有一个对应的最大泄漏电流。反之,如果已

知绝缘子最大污秽泄漏电流,则可知道该绝缘子的污秽度。绝缘子表面电导率就表征了这种关系。

110 kV 线路绝缘子盐密值估算公式为:

$$\sigma = I n^2 f L_0 [1 - b(\theta - 20)] / U_m \quad (3)$$

式中: $I$ 为经湿污层流过的最大泄漏电流值, mA;  $U_m$ 为110 kV最高运行对地电压, kV;  $L_0$ 为单片绝缘子爬电距离, m;  $f$ 为绝缘子形状系数;  $\theta$ 为绝缘子湿污层表面温度;  $b$ 为取决于温度 $\theta$ 的因数;  $n$ 为绝缘子片数。

将计算结果与文献[5]中盘型悬式绝缘子人工污秽耐受值对应的污层电导率下限值进行比较,得到的数值再乘上对应的盐密下限值即为该绝缘子盐密控制值。

四川广元电业局110 kV上旺线为II级污区,绝缘子采用7片XP-7,  $L_0 = 0.29$  m,  $f = 0.826$ ,  $U_m = 73$  kV,  $I = 65$  mA。试验时环境温度为5℃,即 $\theta = 5$ ℃,  $b = 0.03156$ 。

由此得到:

$$\sigma = 65 \times 7^2 \times 0.826 \times 0.30 \times [1 - 0.03156(5 - 20)] / 73 = 15.40 (\mu\text{S}/\text{cm})$$

将 $\sigma$ 值除以污秽电导率12~16  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的下限值,得到倍数为1.28,用这个倍数乘以对应的等值盐密0.06~0.1 mg/cm<sup>2</sup>的下限值就得出该绝缘子盐密控制值为0.0768 mg/cm<sup>2</sup>。

由于220 kV及以上线路绝缘子串较长,污秽分布不均匀,绝缘子表面的污秽泄漏电流分散性较大,火花放电不稳定,绝缘子污秽度与表面泄露电流两者对应关系较差。因此,对220 kV及以上长串绝缘子通过最大泄漏电流和放电形式判别盐密与污闪之间的关系是不可行的。

(2) 采用回归方程估算盐密控制值。国内对污秽绝缘子在各种盐密与污闪电压的关系进行了大量的试验研究,主要方法为在试验室内对各种典型的3~7片绝缘子,采用固体污层法进行人工污秽试验,得到单片绝缘子污闪电压,用回归方程表达绝缘子的污闪特性,回归方程与试验结果相关性很好。

污闪电压与盐密关系的回归方程<sup>[4]</sup>:

7片X-4.5型绝缘子串的回归方程:

$$U = 32.1 S^{-0.3223}$$

7片XP-7型绝缘子串的回归方程:

$$U = 39.3 S^{-0.2565}$$

7片XWP2-7型绝缘子串的回归方程:

$U=48.3\ S^{-0.245\ 0}$

线性推算出 220 kV 线路绝缘子污闪电压与盐密关系的回归方程为：

13 片 X—4.5       $U=59.6\ S^{-0.322\ 3}$

13 片 XP—7       $U=72.9\ S^{-0.256\ 5}$

13 片 XWP2—7       $U=89.6\ S^{-0.245\ 0}$

式中， $U$ ——绝缘子串的污闪电压，kV；

$S$ ——盐密控制值，mg/cm<sup>2</sup>。

表 2 即为通过污闪电压与盐密关系的回归方程估算控制盐密值实例。

(3)采用插入法计算

采用插入法计算公式如下：

允许盐密值： $X=(B-A)/(D-C)\cdot(E-C)+A$

控制盐密值： $Y=X\cdot K$

式中， $A$ ——盐密值上限，mg/cm<sup>2</sup>；

$B$ ——盐密值下限，mg/cm<sup>2</sup>；

$C$ ——泄漏比距上限（cm/kV，按系统额定电压计算）；

$D$ ——泄漏比距下限（cm/kV，按系统额定电压计算）；

$E$ ——已知线路的泄漏比距（cm/kV，按系统额定电压计算）；

$K$ ——安全系数，取 0.8。

表 3 为采用插入法控制盐密的计算过程。

从表 2、表 3 几种估算方法得知：

①基于污秽等级划分原则，回归方程估算与插入

法的计算结果较采用表面电导率估算控制盐密值的方法偏严。插入法偏保守，回归方程估算方法其经济性和安全性较适中。

②防污型绝缘子 XWP2—7 控制盐密值是普通型 XP—7 绝缘子时的近两倍，说明耐污型绝缘子比普通型绝缘子的防污效果要好。这是由于耐污型绝缘子爬距大，易形成多个干区，局部放电频率高。采用防污型绝缘子是在不改变原线路杆塔结构尺寸的有效绝缘配置方式，提高了线路防污水平，延长了线路清扫周期。

③线路盐密控制值的选取，应以运行经验为主，结合该线路污秽划分等级，并参考计算结果予以确定。如果盐密测试值超过盐密控制值，绝缘子发生污闪的概率将大增，应及时安排对该线路的清扫，否则可适当延长清扫周期。

④利用盐密值控制清扫的时间在技术上应做到三点：其一，必须确定一定耐受水平下的盐密控制值；其二，所测取的绝缘子盐密值应具有代表性；其三，掌握清扫绝缘子在运行地区盐密的累积速度。由绝缘子串积污随时间变化的规律可知，只要在绝缘子串积污的起始阶段（如每年 10 月底至 11 月初）测量出线路的盐密值，再依据绝缘子串积污速率，判断出该线路绝缘子串上可能出现的最大盐密是否超过盐密控制值，就可决定该线路是否需要清扫。

3) 用盐密指导线路实施状态清扫方法：①盐密控制值的确定。110 kV 线路可采用表面电导率估算

表 2 回归方程估算控制盐密

| 线路名称       | 绝缘配置                | 回归方程                    | 盐密控制值 $S$ |
|------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| 220 kV 宝白线 | 直线塔 13 片 XP—7 绝缘子   | $U=72.9\ S^{-0.256\ 5}$ | 0.047     |
|            | 直线塔 13 片 XWP2—7 绝缘子 | $U=89.6\ S^{-0.245\ 0}$ | 0.098     |
| 110 kV 上旺线 | 直线塔 7 片 XP—7 绝缘子    | $U=39.3\ S^{-0.256\ 5}$ | 0.063     |

说明：该表中控制盐密值考虑了 30% 的盐密分散性。

表 3 插入法计算控制盐密

| 线路名称       | 绝缘配置                                 | 计算参数                                     | 控制盐密值 $Y$ |
|------------|--------------------------------------|------------------------------------------|-----------|
| 110 kV 上旺线 | Ⅱ级污区，直线塔 7 片 XP—7 绝缘子（单片爬距为 290 mm）  | $A=0.1, B=0.06,$<br>$C=2.5, D=2, E=1.9$  | 0.041 6   |
| 110 kV 沙剑线 | Ⅱ级污区，直线塔 7 片 XWP—7 绝缘子（单片爬距为 400 mm） | $A=0.1, B=0.06,$<br>$C=2.5, D=2, E=2.55$ | 0.083 2   |

公式和污闪电压与盐密的回归方程进行盐密控制值的计算;220 kV 线路可采用污闪电压与盐密的回归方程进行盐密控制值的计算。线路盐密控制值的选取应以运行经验为主,结合该线路污秽划分等级,并参考计算结果进行确定。② 盐密测试和最大值估算。在积污周期内线路设点杆塔绝缘子盐密第1次测试的时间应安排在每年的10月底、11月初。测试的盐密值依据盐密增长速率公式进行最大值估算。如果第1次测试的盐密值超过控制值的50%,应在间隔1月后进行第2次盐密测量,以便重新估算最大盐密值。③ 线路清扫判据。如果估算出的最大盐密值有可能超过盐密控制值,应及时安排对该线路进行清扫。否则,可适当延长清扫周期。

2 开展状态维修的几项重要环节

2.1 把好设备初始状态关

初始状态包括:(1)注重设备设计选型工作,有意识地为运行中开展带电或在线检测创造先天条件;(2)加强对设备的监造和出厂验收,确保产品入网质量;(3)加强对安装调试质量的监督检查,严把验收关;(4)新设备在投运后力争在5年内进行一次大修,以便更深入地掌握设备在设计、制造和安装过程中所遗留缺陷和问题。

2.2 积极采用先进的在线或带电检测手段

对运行中的设备除了加强常规监督测试,严格执行预防性试验规程和设备定期检查试验制度中规定的试验和维修项目外,还要配合采用先进的检测手段(譬如,带电检测设备的泄漏电流、油色谱分析、红外诊断等),及时掌握设备的技术状态。

2.3 提高状态分析水平

设备状态分析水平是状态监测与状态维修相衔接的关键一环,主要包括三个方面:① 加快变电站设备在线监测数据向维修中心远传功能的开发,并提高传送水平;② 建立设备状态的微机信息管理系统;③ 加强测试数据分析。要重点把有助于广泛掌握设备状态和把握设备状态变化趋势,从而制定更科学的维修策略的数理统计的方法应用到状态维修中去,即通过对有关设备大量的历史资料,包括出厂试验、历次试验、维修与故障记录以及运行状况等的统计分

析,对某类设备的状态作出评估,对其状态的变化趋势或规律作出预测。

3 结语

1) 随着电网容量的增大和用户对供电可靠性要求的日益提高,定期维修管理体制的固有弊端在电力生产实践中越来越突出,状态维修势在必行,以获取最佳的综合经济效益。

2) 变压器状态维修根据设备状态信息将设备状态归为四类,即正常状态、可靠性下降状态、可疑状态和危险状态,针对不同状态采用不同的维修策略。

3) SF<sub>6</sub> 开关的寿命、气体泄漏及微水含量是确定SF<sub>6</sub> 开关本体是否需要大修的主要状态指标。液压操作机构一般不宜进行解体维修,着眼于技术性和经济性,较适宜的做法是局部更换或整体更换。

4) 输电线路的状态维修以采取盐密控制值指导清扫周期为主要内容,控制盐密的计算方法有回归方程估算、表面电导率估算和插入法,插入法计算结果偏严,回归方程估算方法较适中。线路盐密控制值的选取应以运行经验为主,结合该线路污秽划分等级,并参考计算结果予以确定。

5) 开展状态维修管理体制创新,把好设备的初始状态关,应用新的检测手段,建立设备信息管理专家系统,提高状态分析水平,是状态维修决策的关键。

参考文献

[1] 中国电科院高压所.关于制订《电气设备状态检修规程》的思路[A].  
[2] 四川省电力公司企业标准(QB).电力变压器状态诊断与检修导则[S].2006.  
[3] 陈宇强等.SF<sub>6</sub> 开关状态检修的研究[J].高压电器通讯.2000(2):14.  
[4] 汪涛等.用盐密指导高压输电线路清扫的试验研究[J].电网技术.2004(4):22.  
[5] GB/T 5582—93,高压电力设备外绝缘污秽等级[s].

作者简介:

方 晴(1963~),男,高级工程师,四川省广元电业局生产副局长,从事电力生产管理工作。

(收稿日期:2008—02—14)

# 现有雷电定位方法的应用分析

刘 敏

(成都电业局继电保护所,四川 成都 610021)

**摘 要:**分析比较了现有雷电定位系统中各种定位方法的原理及其在应用中的优点与不足,对现有雷电定位系统的应用情况做了多角度的分析。展望未来,基于行波法来展开对雷击定位方法的研究,将成为提高测距精度的一个重点。

**关键词:**输电线路;雷击;雷电定位系统;行波;

**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:**TM866 **文献标识码:**B **文章编号:**1003—6954(2008)02—0006—04

“经济发展,电力先行”,电能作为国民经济的支柱,在其发展过程中发挥着越来越重要的作用。随着国民经济的飞速发展,对电力系统供电质量及稳定性的要求也越来越高,输电线路的安全运行,直接影响到电网的稳定运行和向用户的可靠供电,在电力系统中占据着举足轻重的地位,关系到国计民生。

雷击是造成高压输电线路跳闸的主要原因。加强线路防雷保护问题一直是系统规划设计人员关注的重点之一,可以采取有效的防雷措施,提高线路的耐雷水平,目前一些常用的防雷措施有:架设避雷线、降低杆塔接地电阻、架设耦合地线、采用不平衡绝缘方式、装设自动重合闸、采用消弧线圈接地方式、加强绝缘、安装线路避雷器等,均可有效地减少雷击跳闸事故<sup>[1]</sup>。

然而,雷电是一种自然现象,具有不可预知性、不确定性的特点,加强输电线路防雷保护固然重要,但其终究不能完全避免雷击故障的发生,一旦雷击输电线路导致供电中断,如何快速、准确地查找、判定并清除故障,减小停电损失便成了急需解决的问题。由于输电线路绵延数千里,线路走廊的地形复杂、多变,传统地通过人工寻线方式查找雷击故障点是一件劳动强度大、耗费时间多的工作,由此可能造成长时间的供电中断,给国民经济造成极大损失。快速准确的雷击定位,不仅能够减轻线路检修人员的工作量,迅速查找线路的雷击故障点,尽快恢复供电,减少停电时间,减轻经济损失,而且能够监测各运行线路的落雷情况,收集雷击数据,为防雷保护研究人员提供参考,

有针对性地改进防雷保护和措施,使电网更坚强。对输电线路雷击点的定位问题研究具有很高的社会意义和经济效益。

## 1 雷电定位系统(LLS)

雷电定位系统 LLS (Lightning Location System, LLS)是 20 世纪 70 年代由美国人首先提出并研制的,以后在欧美各国逐步得到广泛的应用,现已成为当前电力系统研究雷电活动最主要的技术手段之一<sup>[2]</sup>。

目前雷电定位技术常见的主要有定向定位、时差定位及“定向+时差”综合定位 3 种技术。

### 1.1 定向雷电定位技术

雷电发生时要向周围空间辐射很强的电磁波,可通过分设各地的探测站接收雷电电磁信号,当有 2 个及以上的探测站根据接收到的雷电电磁信号测定雷电方位角后,就可根据三角定位原理计算出雷击点的位置。该技术原理清晰,方法简单,且在多站系统中几乎不存在探测死区,但它的探测精度受电磁波传播途径及探测站周围环境的影响较大,造成定位误差相对较大。

### 1.2 时差雷电定位技术

随着全球定位系统(GPS)的对外开放,依靠其提供的精确时间而产生的基于 GPS 的时差定位方法,使雷电定位系统的精度有了进一步提高<sup>[3]</sup>。

该方法运用 GPS 高精度同步时钟,测定雷电电磁信号到达各探测站的时刻,根据电磁信号到达各探

测站的时间差来计算雷击位置。该方法要求各探测站的时钟高精度同步。与定向定位技术相比,在采用现代高精度全球定位系统(GPS)时钟的情况下,其定位精度比定向定位高约 5 倍以上,甚至近一个数量级。另外,时差定位技术对探测站周围环境的要求相对较低,误差主要取决于 GPS 误差和雷电电磁信号的传播延时。

### 1.3 综合雷电定位技术

目前常用的综合雷电定位技术是利用“定向+时差”,综合定位探测站既探测雷击发生的方位角,又探测雷击辐射出的电磁波到达的精确时间,该方法可充分利用探测到的全部有效数据,剔除方向误差和无效时间数据,使雷电定位误判次数大大的减少<sup>[4~5]</sup>。

随着雷电定位系统的不断发展和完善,在输电线路雷击故障点的查找、雷害事故的分析、雷电参数的统计等方面得到了广泛的应用。自 20 世纪 90 年代中期以来,广东、浙江、海南、湖北、湖南、河南、重庆等省市相继建立了各自的雷电定位系统网络,其中,大多采用了“定向+时差”的综合定位方法<sup>[6~9]</sup>。多年来的运行经验及数据表明:中国使用的雷电定位系统已经达到了实用化的要求,定位能力与国外先进水平相当,雷击故障定位率多在 50%~80%之间;从定位误差分析可知,采用定向雷电定位技术的系统误差一般都大于 3 km,而采用“定向+时差”的综合雷电定位技术,其理论定位误差为 500 m,实测误差一般能保证在 1~3 km,当然,实际探测误差在不同地区 and 实际环境下,由于受探测站距离、地形地貌、气象条件等复杂因素的影响,存在明显的地区差异,这就要求科技工作者进一步研究寻求更好的检测方法,以进一步提高检测精度。

总的来说,综合国内外的多方面研究可以看出,雷电定位系统对输电线路雷击进行定位是可行和有效的,其定位精度基本满足雷击故障定位的要求,但其受定位模型、雷电判据、雷电波波传播延时误差、场地引起的波形传播延时误差、GPS 时钟误差、探测站距离、地形地貌、气象条件等复杂因素的影响,定位率和定位精度还有待提高。据实测,可发现雷电定位系统的定位误差与雷电探测站分布紧密相关,周围探测站较多和站间距离较小的区域,定位误差较小。并且定位误差存在地区差异,其主要原因是各地区雷电高精度探测区域覆盖范围不一致,地势相对平坦地区定位误差相对较小,而山区由于地势起伏较大,虽然探测站分布较多,但定位精度也稍差<sup>[10]</sup>。

国内外电网实际运行经验表明,现有部分故障测距装置不仅能够对输电线路短路故障点进行测距,而且还能够探测到线路上的雷击并对其实施定位,由此便引申出一种新的输电线路雷击定位方法:利用输电线路的故障测距算法进行雷击定位。

## 2 故障测距方法在雷击定位方面应用

故障测距主要任务是当线路的某处发生故障时,通过线路实测电流、电压等参数来计算出故障点的位置。经过国内外学者几十年的探讨和研究,在输电线路故障测距领域取得了很大的成果。

由于架空输电线路故障测距可以有多种分类方法,并且故障分析法的称谓比阻抗法更具一般性,为叙述方便,不严格区分二者并统称为故障分析法<sup>[11]</sup>。因此,高压输电线路故障测距方法,按原理主要分为两大类:一是故障分析法,二是行波法。

### 2.1 故障分析法

故障分析法是利用故障后的工频分量直接计算故障阻抗或其百分比的方法,其原理是在系统运行方式和线路参数已知的条件下,线路两端的电流和电压均为故障距离的函数,可利用线路故障时测量的工频电压、电流信号,通过计算分析求出故障点的距离<sup>[12]</sup>。

故障分析法可以分为单端测距法和双端测距法。单端测距法具有投资少的优点,但由于受过渡电阻、对端阻抗变化的影响,存在以下问题:① 故障过渡电阻或对端系统阻抗变化对测距精度的影响;② 输电线路及双端系统阻抗的不对称性对测距精度的影响;③ 测距方程的伪根问题。

要解决这些问题,就要引入对端系统的阻抗,测距结果必然要受到对端系统阻抗变化的影响,这才能解决单端测距法长期没有解决的问题。随着电力系统自动化水平的提高和通讯技术的发展,相继提出了双端故障测距方法。

双端测距方法不存在原理误差,而测距在实现时间方面的要求又比保护宽松得多,因此,采取精度较高的分布参数模型的双端测距算法不仅为准确测距奠定了基础,且对高阻类型故障测距也是必需的,但在数据同步和伪根判别等方面尚有待于进一步改进。相比单端测距算法,采用精确线路模型及不要求数据同步的双端测距算法在原理上具有更大优越性,值得进一步深入研究。

综上所述,虽然双端测距法在原理上比单端测距法更为可靠,不过仍存在数据同步和伪根判别等方面的问题。同时,由于线路在遭受雷击时会有幅值很高,频率分布极广的雷电流注入系统,仅利用工频分量来计算和分析的方法将很难对雷击点进行准确定位。因此,要解决这些问题,就要引入新的理论及算法,于是20世纪50年代开始就有科学家提出了利用暂态行波进行故障测距的理论,基于行波理论的输电线路故障测距算法简称为行波法。

## 2.2 行波法

行波法测距是利用高频故障暂态电流、电压行波信号来间接判定故障点位置的方法<sup>[12]</sup>。输电线路发生故障后,将产生由故障点向线路两端母线传递的暂态行波,包括电压和电流行波,这其中包含着丰富的故障信息。行波的传播速度接近于光速,当安装在两侧的行波测距装置捕获到行波信号后,通过包含速度与时间的表达式可以将故障位置求出。雷击也会产生行波,所以利用行波法对线路雷击实施定位是可行的。

根据暂态行波在传递过程中波速不变的原理,20世纪50年代开始就有科学家提出了利用暂态行波进行故障测距的理论。20世纪60、70年代以来,随着行波传输理论研究的深入,相模变换、参数频变、暂态数值计算等方面的新突破,输电线路暂态行波故障测距理论得到了新的发展。20世纪90年代初,中国提出利用故障暂态电流的输电线路行波故障测距技术,从而推动了现代行波故障测距(MTWFL)的发展,并迅速商业化。特别是近年来随着电子技术计算机技术的发展,高速采样芯片的应用,行波故障测距显示了巨大的优越性。现有行波测距算法主要分为两大类:单端法和双端法<sup>[13~14]</sup>。

单端法是通过检测行波波头到达母线端时刻与故障点反射行波或者对端母线的反射行波到达时刻的时间差,来实现测距。该方法的关键在于准确地识别来自故障点和对端母线的反射行波,文献[13]提出了直接波形分析法来判定,实验证明该算法是有效的。

双端法是利用故障点产生的行波到达线路两侧母线的时差,结合波速来判定故障位置,理论上更为可靠,在实际中的应用也最广。但为了准确确定故障行波到达两端母线的时差,需依靠全球定位系统(GPS)实现线路两端时钟的精确同步,较之单端法投资成本更大。由于行波法基本不受线路的故障位置、

故障类型、线路长度、过渡电阻等因素的影响,这些特点引起了人们的重视,基于这些特点提出的故障定位方法,极大地提高了测距精度。目前,该算法已在电力系统故障测距中得到广泛应用。

综上所述,故障分析法和行波法对输电线路的雷击定位,都是可行的方法,两者相比,各有优劣:

(1) 在资金投入方面,前者可以利用现有大量投运设备,硬件投资小,容易实现;后者则需要专用设备如GPS,硬件投资大,技术较复杂。

(2) 在时间方面,行波法明显优于故障分析法。这里所说的时间主要指实现测距所需要的信息处理时间,即抽取电压、电流(信号)的时间。随着自动化水平的提高,故障线路切除时间将大大缩短,对需要抽取幅值和相角的故障分析法来说,要在短时间内从复杂的暂态波形中得到所需信息,无疑增加了滤波算法的难度;再短的故障切除时间也足以采集到行波法测距所需要的信息。

(3) 在测距精度方面,行波法优于故障分析法。从算法原理上,与故障分析法受过渡电阻和线路不对称等因素的影响,行波法精度优于故障分析法;但行波法存在反射波的识别问题,而近端恰好是故障分析法测距较准确的区段。从这意义上看,行波法与故障分析法具有优势互补性。

(4) 在原理方面,行波法比故障分析法更可靠。对于输电线路的雷击而言,由于雷击输电线路相当于在线路上并联了一个注入电流源,线路两端检测到的电压和电流信号已不再是简单的工频信号,因而采用传统的工频量进行分析的故障分析法显然不适用于雷击点的定位,而行波法正是采用高频分量进行分析的,因此原理上更为可靠。

同时,也应注意到现有行波法应用于输电线路的雷击定位,仍存在一些问题。主要包括:

(1) 在装置的时延方面:行波的捕获和启动元件的动态时延将对行波测距精度有较大的影响。

(2) 在信号的识别方面:行波信号是一些传播模式的混合信号,包含了不同的频率分量,在传播过程中有不同的速度和衰减,这降低了对行波准确到达时间的判别及对行波反射波的识别能力。

(3) 在信号的分析方面:暂态行波是1个突变的、具有奇异性的信号,无论是单纯的频域分析法,还是单纯的时域分析法,都不能精确描述暂态行波这类非平稳变化信号,因此测距精度受到影响。

(4) 在波速的确定方面:行波的传播速度受线路

参数、气候条件、地理环境、频率变化等因素的影响,其值是不固定,事先确定波速的测距算法必然会带来误差。

以上几点不足,在一定程度上制约了行波测距算法的实际应用,因而成为目前急待解决的问题。

总之,由于行波法在原理上不受故障类型和故障点过渡电阻的影响,有着比较高的精度,因此基于行波法来展开研究,完善雷击定位方法在系统的应用,对于保证电网正常运行,降低故障损失有着不可估量的作用。

3 结论

由于输电线路在电网运行中的重要性,在线路遭受雷击后,快速而准确的对雷击点进行定位,对尽快查找和修复故障,尽快送电,减少停电时间,减少经济损失,有着重要的社会意义和经济效益。前面分析比较了现有雷电定位系统中各种定位方法的优点与不足,特别是“定向+时差”综合定位技术在各网省电力系统中的广泛应用及局限,对于利用输电线路的故障测距原理进行雷击定位的两种方法——故障分析法和行波法,分别阐述了其原理和分类,比较了其应用于雷击定位中的优点与不足,对现有雷电定位系统的应用情况做了多角度的分析。展望未来,基于行波法来展开对雷击定位方法的研究,完善雷击定位方法在系统的应用,对于提高测距精度,尽快恢复供电,减少停电损失,对保证电网坚强,树立企业良好服务形象,有着重要的社会意义和经济效益。

参考文献

[1] 林福昌. 高电压工程[M]. 北京:中国电力出版社,2006.

[2] Takatoshi Shindo, Shigeru Yokoyama. Lightning Occurrence Data Observed with Lightning Location Systems in Japan: 1992—1995[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1998, 13(4): 1468—1474.

[3] 张畅生, 方子帆. GPS 及其在雷电定位系统中的应用[J]. 现代电力, 2002, 19(2): 43—49.

[4] 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—6.

[5] 赵文光, 陈家宏, 张勤, 等. 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.

[6] 关丽洁, 刘明光. 基于 GPS 的雷击定位新方法[J]. 东北电力技术, 2005, 8: 48—49.

[7] 顾承昱. 雷电定位技术在华东电网中的应用[J]. 华东电力, 2004, 32(1): 1—3.

[8] 张新华. 湖北电力雷电定位系统运行分析[J]. 湖北电力, 2004, 28(2): 14—15.

[9] 张建春. 雷电定位系统在湖南永州的应用分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(8): 55—56.

[10] 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.

[11] 全玉生, 杨敏中, 王晓蓉等. 高压架空输电线路的故障测距方法[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 27—3.

[12] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社.

[13] 陈平, 葛耀中, 徐丙垠, 李京. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用——A 型原理[J]. 继电器, 2004, 32(2): 13—18, 43.

[14] 陈平, 葛耀中, 徐丙垠, 李京. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用——D 型原理[J]. 继电器, 2004, 32(3): 14—17, 28.

作者简介:

刘敏, 女, 1974 年生, 成都电业局继电保护所。

(收稿日期: 2008—01—13)

简 讯

基波磁通补偿串联混合型有源电力滤波器滤波特性分析

在基于基波磁通补偿的串联混合型有源电力滤波器(APF)中,由脉宽调制逆变器实现了一个受控基波电流源。串联变压器一次侧的系统电源与系统阻抗、无源滤波器和非线性负载共同作用,使串联变压器二次侧端口呈现一个谐波干扰电压,导致逆变器输出电流中含有一定谐波,影响了滤波器的滤波效果。文中以脉宽调制逆变器为核心,建立了滤波器的数学模型,并对其滤波特性进行了分析。提出了改善其滤波效果的 3 项有效措施,即适当增大逆变器输出滤波电感、合理选择串联变压器原副方变比、采用电压前馈控制技术。设计了一套基于数字控制的 10 kVA APF 样机,实验结果证明了原理分析的正确性。

# 220 kV 及以上变电站开关场一次干扰 对二次控制电缆的影响

黄 勇, 肖 平

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644002)

**摘 要:**对一起因 220 kV 一次设备在倒闸操作过程中, 电动机电源开关突然跳闸, 致使隔离开关动、静触头之间产生电弧, 危及电网和设备安全的这一危险情况进行了分析, 找出危险根源, 强调执行反事故措施的重要性。

**关键词:**隔离开关; 二次回路; 电磁干扰

**Abstract:** In the process of switching operation of 220kV primary equipment, the switch of motor power source tripped suddenly, and then electric arc occurred between the moving contact and stationary contact of disconnecting switch. Therefore, the safety of power grid and equipment were threatened. After analyzing the situation, the cause is found out that is electromagnetic interference, and the importance of carrying out the anti-accident measures is emphasized.

**Key words:** disconnecting switch; secondary circuit; electromagnetic interference.

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2008)02-0010-01

## 1 异常情况介绍

2006 年 12 月 9 日 15 时左右, 宜宾电业局 220 kV 白沙变电站发生了一起不安全事件。当时值班员执行调度命令, 将由 220 kV 旁路 290 代黄沙南线 262 开关运行恢复为 262 开关运行, 在电动合线路侧隔离开关 2626 时, 发生了 2626 合闸即将合到位时其电机电源在 262 端子箱的总空气开关突然跳闸, 2626 电机失去电源后不能继续运转将其合到位, 致使 2626 的动、静触头间长时间产生电弧, 最后值班员手动将 2626 合到位, 这一危险情况才得以消除。

## 2 异常原因

异常情况发生后, 经过仔细的检查 and 反复的验证, 找到了隔离开关 2626 在合闸即将到位时, 其电机电源在端子箱的总空气开关突然跳闸的原因是由于: 干扰电弧在 262 端子箱至 2625 刀闸操作机构箱之间的电机电源电缆芯上产生了较大的感应电势  $E_s$  (当时周围的环境状况比较差, 产生的电弧较大),  $E_s$  通过 2625 刀闸电机电源电缆芯和变电站整个 380 V 交流网络构成的回路, 在电缆芯中产生了较大的感应电流使其跳闸 (验证时用钳形电流表测试, 该感应电流可达 20 A 以上, 而端子箱的总空气开关跳闸电流为

16 A)。

## 3 异常情况分析

宜宾电业局 220 kV 白沙变电站建成投运于 1993 年, 当时的反措实施细则并不完善, 开关场的钢管和穿过钢管的二次控制电缆屏蔽层都只采用一点接地。当进行 220 kV 部分的一次设备倒闸操作时, 在隔离开关合闸即将到位的瞬间, 动、静触头间产生了电弧 (隔离开关一端带电)。按电磁感应原理, 这个电弧会在其周围的空间中产生干扰磁通 (一次设备流过大的短路电流时也会产生干扰磁通), 其中一部分包围着附近的二次控制电缆, 由此将在二次控制电缆的电缆芯中产生一感应电势  $E_s$ , 同时也会在二次控制电缆的屏蔽层上产生一感应电势  $E_r$  (干扰磁通的大小决定感应电势  $E_s$  和  $E_r$  的大小, 而电弧的大小和周围环境状况决定着干扰磁通的大小), 一般来说, 二次控制电缆的屏蔽层紧紧包围着电缆芯, 可以近似认为干扰磁通在二次控制电缆的电缆芯和屏蔽层上所产生的感应电势  $E_s$  和  $E_r$  是相等的,  $X_r$  和  $X_m$  是相等的 ( $X_r$  为二次控制电缆屏蔽层的自感抗,  $X_m$  为二次控制电缆的电缆芯和屏蔽层间的互感抗)。在感应电势  $E_r$  的作用下, 如果二次控制电缆屏蔽层的两端接地, 屏蔽层将通过地网形成通路而流过感应电流  $E_r$ ; 如果二次控制电缆屏蔽层的两端不接地, (下转第 13 页)

3 消缺措施

根据近几年对变压器测温系统的检修维护实践,可以采取以下消缺措施:

- (1)新购绕组温度表、油温表和温度变送器及远方数显仪均要求附设调零机构;
- (2)新购绕组温度表、油温表和温度变送器及远方数显仪统一选用  $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  测量范围;
- (3)远方数显仪及信号采集转换模块应能在不停电条件下更换;
- (4)结合变电站综合自动化改造,建议将 110 kV 及以上变压器带有 Pt100 电阻信号输出的温度表统一更换为带  $4\sim 20\text{ mA}$  电流信号输出的温度表;
- (5)所有 110 kV 及以上变压器的温度表必须加装防雨罩,防止雷雨天气时雨水进入表内;
- (6)加强新购温度表的首检,防止不合格的产品投入使用,在变压器开展预防性试验时对测温系统进行周检;
- (7)加强对新投运的变压器非电量保护的整组验

收试验,消除基建施工遗留缺陷;

(8)变压器的绕组温度只用于信号,本体油温度保护一段作用于信号,二段作用于跳闸,且一段输出闭锁二段输出(即一段温度的一副输出接点串接在二段温度输出回路中)。

4 实施效果

用于测量变压器顶层油温和绕组温度的温度表是变压器非电量保护装置中较直观且使用频率较高的仪表,主变温度准确可靠对分析、判断主变状态、性能提供依据,变压器测温系统的完好率对变电站安全运行有着直接的影响。通过对温度表实施上述消缺措施,可以提高主变温度测量的准确性、可靠性以及主变非电量保护的正确动作率,从而在根本上消除因为测温系统的故障造成大型电力变压器计划外停电检修。

作者简介:

罗骥,女,四川攀枝花人,工程师,从事电力仪表计量工作。  
(收稿日期:2007-11-10)

(上接第 10 页)  $E_r$  就将其上面产生一对地悬浮电位。对于二次控制电缆的电缆芯来说,  $E_r$  所产生的互感磁通与电弧所产生的干扰磁通是相反的,因而产生的互感电势  $E_r'$  和感应电势  $E_s$  也是反相的,  $E_r'$  正好可以削弱  $E_s$  对二次回路正常运行产生的影响。由此可以得出:  $E_r = E_s = ErR + jErXr$  ( $R$  为二次控制电缆屏蔽层的电阻);  $E_r' = -jIrXm$ 。当二次控制电缆屏蔽层中不能流过对电缆芯起屏蔽作用的电流  $I_r$  (二次控制电缆屏蔽层未接地或只一端接地)时,得不到削弱的感应电势  $E_r$  将通过电缆芯严重威胁二次回路的正常运行;在理想情况下,如果二次控制电缆屏蔽层的电阻为零,且二次控制电缆屏蔽层的两端都可可靠接地,则  $I_rR = 0$ ,  $E_s = E_r = -E_r' = jIrXm$ ,  $E_s + E_r' = 0$ ,即这种情况下干扰磁通在二次控制电缆的电缆芯所产生的感应电势  $E_s$  就会被  $E_r'$  完全抵消而为零,对二次回路的正常运行不会产生一点影响;但事实上二次控制电缆屏蔽层的电阻不可能为零,总存在一定的阻值,因此干扰磁通在二次控制电缆的电缆芯所产生的感应电势  $E_s$  就不会被  $E_r'$  完全抵消,不能被抵消的部分为  $E_s + E_r' = IrR$ ,与二次控制电缆屏蔽层的电阻成正比。所以,要有效地削弱干扰磁通对二次回路正常运行产生的影响,就必须采用电阻系数较

小的材料作为二次控制电缆的屏蔽层,且屏蔽层的两端须可靠接地。

4 防范措施

认真贯彻执行现行的四川省电力公司反措实施细则,采取削弱干扰磁通在二次控制电缆芯中产生的感应电势  $E_s$  的技术措施。具体实施方法是,在开关场将钢管的两端接地来代替二次控制电缆屏蔽层的作用,这样更易实施,且效果更佳。异常情况发生后,它们将穿过 2625 刀闸机构电源电缆的钢管两端接地,2626 刀闸电机电源在 262 端子箱的总空气开关就不会跳闸,电弧对二次回路的干扰已经很小了,不致于影响其正常运行。但这种情况下二次控制电缆的屏蔽层仍需接地,使其与地电位保持等电位,避免悬浮电位  $E_r$  危害二次控制电缆的绝缘(如果不接地,虽然悬浮电位  $E_r$  由于钢管的屏蔽作用得以减小,但其大小仍然是不确定的),这正是四川省电力公司反措实施细则所要求的。

作者简介:

黄勇,男,1971 年出生,工程师,宜宾电业局变电工区主任。  
(收稿日期:2008-02-18)

# 变压器测温系统的缺陷管理

罗 骥

(攀枝花电业局 四川 攀枝花 617067)

**摘 要:**分析了变压器测温系统存在的缺陷,结合现场实际情况提出了有效的消缺措施。

**关键词:**变压器;温度表;缺陷

**Abstract:** The existing defects of temperature measurement system in transformer are analyzed, and the effective measures to remove the defects are presented combined with the actual situation.

**Key words:** transformer; thermometer; defect

**中图分类号:**TM401 **文献标识码:**B **文章编号:**1003—6954(2008)02—0011—03

在供电系统中,变电站变压器测温系统用于变压器油温的监视,反映绕组的工作情况,并可高温报警、自动投切冷却器及高温跳闸,其温度测量的准确性及温度表开关接点的正确动作率直接影响到变压器的安全稳定运行,因此必须给予足够的重视。

目前,攀枝花电业局共有大型变压器 40 台,其中 110 kV 变压器 29 台,220 kV 变压器 9 台,500 kV 变压器 2 台。随着信息化网络技术的推广运用,110 kV 变电站基本实现无人值守,220 kV 和 500 kV 变电站已实现少人值守。220 kV 和 500 kV 变压器温度基本上实现了微机监控,一般 110 kV 变压器采用二台油温温度表,而 220 kV 和 500 kV 变压器则需采用二台油温温度表和一台绕组温度表,温度表需要输出 4~20 mA 电流信号或 Pt100 电阻信号,220 kV 和 500 kV 变压器有的还配有远方数字温显仪。

## 1 现有缺陷

变压器测温系统由本体温度表、温度变送器、通道电缆、远方温度显示仪和信号采集转换模块等组成。

1)运行中的变压器有 30% 发生现场温度表与远方数字温显仪(或指针式远方测温表)及计算机显示的温度信息三者不一致的情况,特别是在 70℃ 以上高温测量时,测温系统综合误差高达 8℃ 以上。

2)运行中的变压器有出现温度表指示失准和远方数字温显仪或计算机无法监测温度的现象。

3)曾经有主变非电量保护误动作现象。

## 2 缺陷分析

上述 1)所描述的现象是因为存在系统静态误差和传导误差;2)多为测温系统可靠性方面存在缺陷和各温度仪表的不匹配引起的;而 3)多为外部原因引起的。

### 2.1 静态误差

所谓静态误差是指在正常工作条件下,拥有多台多种温度表构成的测温系统中仪表与仪表之间所存在的测量结果不一致现象。静态误差由仪表的基本误差,各个仪表在不同环境温度下允许范围的附加误差,以及因信号传输电缆长度不等和接触电阻造成传输误差等组成。现场对变压器测温系统进行综合检定时,可将恒温槽恒定在某个温度点如(50±0.1℃),从油箱顶部取出温包放入恒温槽,在恒温槽稳定后读取温度表及数显仪和计算机温度显示值,然后通过“调零”可以减少各仪表间的静态误差。如果温度表、温度变送器和数显仪等没有调零机构,即使采用便携式恒温槽在变电站现场开展温度表检测工作,也没有手段去修正误差;在实验室检定时,也不便对温度表零位进行调整。

### 2.2 传导误差

220 kV 及以上大型电力变压器都有配有绕组温度表,根据变压器绕组温度表的工作原理可知,绕组温度表的温包应该安装在变压器油温较高的部位(如 B 相套管引出线附近)。实际情况是大型变压器两端油温存在温差,这就有可能造成变压器在没带负荷时出现油温表示值高于绕组温度示值的情况。

传导误差是指由于温包安装孔内空气绝热作用

造成温包与远传铂电阻测量值的不一致现象。大多数国产温度表用于远方测温的铂电阻都安装在温包内靠安装螺纹处,要保证测温准确,温包安装前应在安装孔内注满变压器油,然后慢慢插入温包并拧紧M27×2 安装接头,调整好温包的插入深度(尽可能选最大的插入深度)并拧紧螺丝,保证温包被油完全浸没。标准恒温槽的插入深度应 $\geq 150$  mm,确保现场检验温度表时温包有足够的插入深度,以减小温度表的传导误差和响应时间常数。

相比之下带4~20 mA 电流信号输出的温度表就不存在温包与远传铂电阻测量值不一致的情况,其传导误差较小。今年新投运的500 kV 石板箐变电站二号主变和220 kV 银江变电站一号主变由于使用瑞典AKM 型带4~20 mA 电流信号输出的油温表和绕组温度表,主控监控机显示的温度与本体温度表指示的温度基本一致,误差在2℃之内。

### 2.3 可靠性缺陷

任何原因造成的变压器非计划停电检修都属于运行事故,引发事故的具体构件和原因都是变压器的可靠性缺陷。

#### 2.3.1 温度表的可靠性缺陷

压力式温度表比较突出的问题是不可靠,具体表现为指示超差和指示失效,指示失效属于仪表可靠性存在重大缺陷。压力式温度表由弹性元件、毛细管和温包三部分通过焊接组成一个密封系统,利用这密封系统内部所充的感温介质受温度变化而产生的压力变化,使弹性波纹管端部产生角位移来带动指针指示被测温度值,并驱动微动开关,输出开、关控制信号以驱动冷却器系统和发油温高信号,达到控制变压器温升的目的。如果压力密封系统因为慢性渗漏而存有微小气囊,则温度表就会呈负误差或出现指针挂零现象,从而使其指示失效并可能产生拒动作隐患。

JB/T6302—1992《变压器用压力式温度计》规定温度计必须通过1 000 h 的稳定性试验。稳定性试验可将压力式温度表的潜在焊接缺陷有效暴露出来,通过这种稳定性试验的温度表具有较长的工作寿命。对不可靠的产品进行规范化周期检定所获得的结果也可能是不可靠的,温度表的可靠性指标不容忽视。因此在温度表选型时应选取稳定性好、质量信得过的产品,变压器温度表的质量保证期应不低于五年,并通过实验室首检,只有通过首检合格的温度表才能投入使用。

#### 2.3.2 温度变送器的可靠性缺陷

随着变电站无人值守方式的推广,大多数现场都要求温度表具备4~20 mA 或0~5 V 温度信号远传功能。用于远方测温的温度变送器有的安装在温度表内,有的安装在保护控制屏后,也有的厂家将4~20 mA 输出的温度变送器和24 VDC 电源模块复合一体安装在变压器端子箱内。温度表上传的电阻信号经温度变送器,输出一个0~5 V 的电压信号,经信号采集转换模块显示在后台机。实现R—U 转换或电流信号输出的温度变送器的可靠性对测温系统是否正常工作有着直接的影响。新购的温度表在首检时经常遇到温度变送器无输出或输出无变化的情况,运行中变压器远方测温异常往往是由于温度变送器或信号采集转换模块不能正常工作造成的。

### 2.4 温度表、温度变送器和远方数显仪的不匹配引起的缺陷

每台温度表都会配备4~20 mA(或0~5 V)的温度变送器或远方数显仪,如果绕组温度表和油温表量程统一为0~150℃,则所有温度变送器输出同一个线性常数 $K=0.1067$  mA/℃,更重要的是数显仪和温度变送器都是可以通用的,反之,如果BWR 绕组温度表的量程为0~150℃,温度变送器输出为16 mA/150℃ $=0.1067$  mA/℃;而BWY 油温表的量程为0~120℃,则温度变送器输出为16 mA/120℃ $=0.1333$  mA/℃,此时BWR 与BWY 所配套的数显仪及温度变送器是无法通用的,这给检验维护及安装调试人员的交接工作带来不必要的麻烦,因此引起测温系统的各个仪表之间的温度显值不一致,甚至远方数显仪和计算机根本无法监测变压器本体温度。

### 2.5 外部原因引起的缺陷

雷雨天气强降雨时,由于温度表密封圈没有密封好或已老化断裂,加上温度表上方的透气孔将会有轻微进水,造成内部零件锈蚀,将可能导致触点开关拒动;另外,温度表内进水有可能造成二次回路直流接地和短路,发生保护误动作及电网事故。2005年6月,500 kV 石板箐变电站一号主变A 相高压侧发油温高信号,经现场检查发现由于有少量雨水进入温度表内导致用于发油温高信号的触点开关动作。

2004年9月2日,银江二号主变跳闸,经检查发现基建单位在施工时误将绕组温度表的跳闸信号接到K1,而K1触点动作温度设置为55℃,当变压器运行温度达到55℃左右时绕组温度表K1触点闭合,导致主变非电量保护动作主变跳闸。

3 消缺措施

根据近几年对变压器测温系统的检修维护实践,可以采取以下消缺措施:

- (1)新购绕组温度表、油温表和温度变送器及远方数显仪均要求附设调零机构;
- (2)新购绕组温度表、油温表和温度变送器及远方数显仪统一选用 0℃~150℃测量范围;
- (3)远方数显仪及信号采集转换模块应能在不停电条件下更换;
- (4)结合变电站综合自动化改造,建议将 110 kV 及以上变压器带有 Pt100 电阻信号输出的温度表统一更换为带 4~20 mA 电流信号输出的温度表;
- (5)所有 110 kV 及以上变压器的温度表必须加装防雨罩,防止雷雨天气时雨水进入表内;
- (6)加强新购温度表的首检,防止不合格的产品投入使用,在变压器开展预防性试验时对测温系统进行周检;
- (7)加强对新投运的变压器非电量保护的整组验

收试验,消除基建施工遗留缺陷;

(8)变压器的绕组温度只用于信号,本体油温度保护一段作用于信号,二段作用于跳闸,且一段输出闭锁二段输出(即一段温度的一副输出接点串接在二段温度输出回路中)。

4 实施效果

用于测量变压器顶层油温和绕组温度的温度表是变压器非电量保护装置中较直观且使用频率较高的仪表,主变温度准确可靠对分析、判断主变状态、性能提供依据,变压器测温系统的完好率对变电站安全运行有着直接的影响。通过对温度表实施上述消缺措施,可以提高主变温度测量的准确性、可靠性以及主变非电量保护的正确动作率,从而在根本上消除因为测温系统的故障造成大型电力变压器计划外停电检修。

作者简介:

罗骥,女,四川攀枝花人,工程师,从事电力仪表计量工作。  
(收稿日期:2007-11-10)

(上接第 10 页)  $E_r$  就将其上面产生一对地悬浮电位。对于二次控制电缆的电缆芯来说,  $E_r$  所产生的互感磁通与电弧所产生的干扰磁通是相反的,因而产生的互感电势  $E_r'$  和感应电势  $E_s$  也是反相的,  $E_r'$  正好可以削弱  $E_s$  对二次回路正常运行产生的影响。由此可以得出:  $E_r = E_s = ErR + jErXr$  ( $R$  为二次控制电缆屏蔽层的电阻);  $E_r' = -jIrXm$ 。当二次控制电缆屏蔽层中不能流过对电缆芯起屏蔽作用的电流  $I_r$  (二次控制电缆屏蔽层未接地或只一端接地)时,得不到削弱的感应电势  $E_r$  将通过电缆芯严重威胁二次回路的正常运行;在理想情况下,如果二次控制电缆屏蔽层的电阻为零,且二次控制电缆屏蔽层的两端都可可靠接地,则  $I_rR = 0$ ,  $E_s = E_r = -E_r' = jIrXm$ ,  $E_s + E_r' = 0$ ,即这种情况下干扰磁通在二次控制电缆的电缆芯所产生的感应电势  $E_s$  就会被  $E_r'$  完全抵消而为零,对二次回路的正常运行不会产生一点影响;但事实上二次控制电缆屏蔽层的电阻不可能为零,总存在一定的阻值,因此干扰磁通在二次控制电缆的电缆芯所产生的感应电势  $E_s$  就不会被  $E_r'$  完全抵消,不能被抵消的部分为  $E_s + E_r' = IrR$ ,与二次控制电缆屏蔽层的电阻成正比。所以,要有效地削弱干扰磁通对二次回路正常运行产生的影响,就必须采用电阻系数较

小的材料作为二次控制电缆的屏蔽层,且屏蔽层的两端须可靠接地。

4 防范措施

认真贯彻执行现行的四川省电力公司反措实施细则,采取削弱干扰磁通在二次控制电缆芯中产生的感应电势  $E_s$  的技术措施。具体实施方法是,在开关场将钢管的两端接地来代替二次控制电缆屏蔽层的作用,这样更易实施,且效果更佳。异常情况发生后,它们将穿过 2625 刀闸机构电源电缆的钢管两端接地,2626 刀闸电机电源在 262 端子箱的总空气开关就不会跳闸,电弧对二次回路的干扰已经很小了,不致于影响其正常运行。但这种情况下二次控制电缆的屏蔽层仍需接地,使其与地电位保持等电位,避免悬浮电位  $E_r$  危害二次控制电缆的绝缘(如果不接地,虽然悬浮电位  $E_r$  由于钢管的屏蔽作用得以减小,但其大小仍然是不确定的),这正是四川省电力公司反措实施细则所要求的。

作者简介:

黄勇,男,1971 年出生,工程师,宜宾电业局变电工区主任。  
(收稿日期:2008-02-18)

# 新型直流输电系统的非线性附加控制器设计

黄北军, 邹 超, 王 奔

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:**基于电压源换流器(voltage source converter VSC)和脉宽调制(pulse width modulation PWM)技术的新型高压直流输电(VSC—HVDC)系统,不仅具有有功功率快速调节能力,而且具有无功功率快速调节能力。该文以非线性理论和最优控制理论为基础,通过建立单机经交直流并联于无穷大电力系统的机电振荡非线性数学模型,利用精确线性化理论将非线性系统化化为线性系统,在线性系统的基础上设计最优控制器,通过坐标变换,得出非线性附加控制规律,仿真结果表明 VSC—HVDC 系统在装设了该附加控制器后,可显著增加系统振荡阻尼,快速恢复系统稳定。

**关键词:**电压源换流器;新型高压直流输电;精确线性化;最优控制;附加阻尼控制器

**Abstract:** Based on voltage source converter (VSC) and pulse width modulation (PWM) technology, the VSC—based HVDC transmission system not only possess the capability of controlling active power fast, but also possess the capability of controlling reactive power quickly. Based on nonlinear theory and optimum control theory, the electromechanical oscillation nonlinear mathematical model of infinity power system is built with single machine by AC/DC connection, the nonlinear system is transferred to linear system based on precision linearized theory, the optimum controller for this linear system is designed, the nonlinear additional control law is obtained through coordinate transformation. Simulation results show that the system damping for frequency oscillation can be obviously increased and the system stability can be rapidly recovered after the additional damping controller is equipped.

**Key words:** voltage source converter; VSC—HVDC, precision linearized theory; optimum control; additional damping controller.

**中图分类号:**TM762 **文献标识码:**A **文章编号:**1003—6954(2008)02—0014—04

新型直流输电是采用电压源换流器的直流输电系统,与传统的直流输电相比,VSC—HVDC 具有更多的优势<sup>[1]</sup>;VSC 可以对有功功率和无功功率进行独立控制;可以在现场快速安装与调试换流站;输电容量可以提高约 50%。另外,VSC—HVDC 具有增加系统振荡阻尼、提高其稳定性的能力<sup>[2,3]</sup>;向无源网络供电、不会出现换相失败等众多优点<sup>[4,5]</sup>。鉴于上述的优点,随着 IGBT 容量的增大及成本的下降,VSC—HVDC 在电力系统中的应用将越来越广泛。文献[6]和[7]分别采用普罗尼辨识理论和 Bang—Bang 控制原理设计了 VSC—HVDC 系统的附加控制器,可显著地提高系统的振荡阻尼,在一定程度下满足系统稳定性要求,但是它们都是将原本非线性系统通过近似线性化的方法,设计线性的附加控制器,当实际运行状态远离线性化所取的状态点时,控制器将达不到符合要求的稳定性能和动态品质。文献[8]设计了 VSC—HVDC 的非线性附加控制器,但其控制参数不易确定。基于此背景,下面将采用非线性控制理论<sup>[9]</sup>以及最优控制理论<sup>[10]</sup>设计 VSC—HVDC 的非线性附加阻尼控制器。

## 1 VSC—HVDC 控制策略

图 1 是 VSC—HVDC 系统示意图<sup>[7]</sup>,VSC—HVDC 两侧换流站用框图表示,整流和逆变两侧换相交流电压分别用相量  $V_R$ 、 $V_I$  表示,直流线路用电感  $L_d$ 、电阻  $R_d$  表示, $C_1$ 、 $C_2$  分别表示两侧直流平波电容,电容电压分别为  $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$ ,直流电流  $i_d$ ,两侧交流电流  $I_1$ 、 $I_2$ ,参考方向如图 1 所示, $x_1$ 、 $x_2$  分别为两侧等效换相电抗。整流和逆变侧交流母线电压用相量  $V_1$ 、 $V_2$  表示。

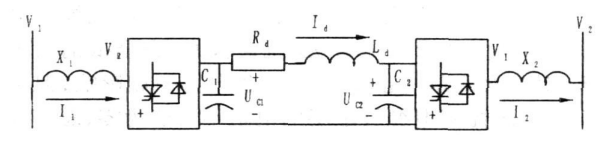


图 1 VSC—HVDC 系统示意图

通过图 1 可写出整流侧和逆变侧交流母线的微分方程,并进行 Park 变换转化为  $dq$  坐标系下的微分

方程：

$$\frac{dI_1^d}{dt} = \omega I_1^q - \frac{r_1}{L_1} I_1^d + \frac{V_1^d - V_R^d}{L_1} \tag{1}$$

$$\frac{dI_1^q}{dt} = \omega I_1^d - \frac{r_1}{L_1} I_1^q + \frac{V_1^q - V_R^q}{L_1}$$

$$\frac{dI_2^d}{dt} = \omega I_2^q - \frac{r_2}{L_2} I_2^d + \frac{V_2^d - V_I^d}{L_2} \tag{2}$$

$$\frac{dI_2^q}{dt} = \omega I_2^d - \frac{r_2}{L_2} I_2^q + \frac{V_2^q - V_I^q}{L_2}$$

其中  $L_1$ 、 $L_2$  分别为换相电抗  $x_1$ 、 $x_2$  对应的电感值。

若左端系统是对称三相， $V_1^q=0$ ，注入系统有功和无功为：

$$P_1 = V_1^q I_1^d, Q_1 = V_1^d I_1^q$$

从式(1)、(2)可以看出，交直轴上电流分量存在耦合关系，如式(1)中电流直轴分量  $I_1^d$  不仅和直轴上电压分量有关系，同时它与电流交轴分量  $I_1^q$  也有关系，所以需要设计一种解耦控制策略将电流交直轴分量分开进行控制，同时也可以看出，系统模型中存在内部电流环，这里内部电流环是指内部电流控制器，根据式(1)可以定义 PI 电流控制器如下：

$$V_R^{d*} = V_1^d + x_1 I_1^q - \Delta U_1^d$$

$$V_R^{q*} = V_1^q + x_1 I_1^d - \Delta U_1^q$$

$$\Delta U_1^d = k_d [T_d (I_{1REF}^d - I_1^d) + \int (I_{1REF}^d - I_1^d) dt]$$

$$\Delta U_1^q = k_q [T_q (I_{1REF}^q - I_1^q) + \int (I_{1REF}^q - I_1^q) dt]$$

其中： $I_{1REF}^d$  为整流器侧交轴电流参考命令， $I_{1REF}^q$  为整流器侧直轴电流参考命令， $\Delta U_1^d$ 、 $\Delta U_1^q$  为直交轴电流调整的电压命令， $V_R^{d*}$ 、 $V_R^{q*}$  为 SPWM 命令参考。

由于直流电压与整流、逆变两侧功率平衡有关，当两侧功率在暂态出现瞬间不平衡时，会引起电压的波动，所以直流电压的控制是一个重要因素，将直流电压控制作为外部控制环之一，考虑到交流电压在系统扰动时会波动，选择对交流电压幅值进行调节，控制框图如图 2(a)所示。

逆变侧外控制环以注入系统的潮流为控制目标，同样采用 PI 调节方式，控制框图如图 2(b)所示。

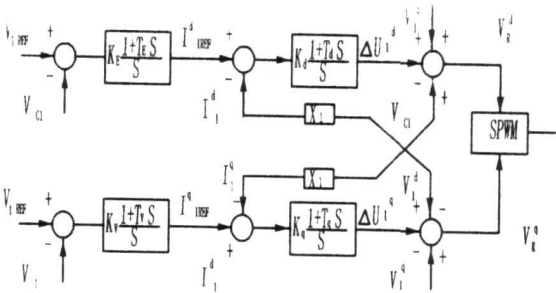
用于 PWM 控制的调制度和调制相角分别为：

$$m_1 = \sqrt{V_R^{d*2} + V_R^{q*2}} / (k_1 \mu_{c1})$$

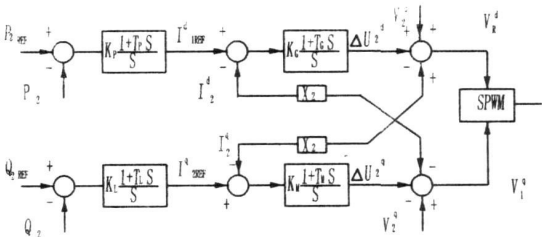
$$\theta_1 = \arctg(V_R^{q*} / V_R^{d*})$$

$$m_2 = \sqrt{V_I^{d*2} + V_I^{q*2}} / (k_2 \mu_{c2})$$

$$\theta_2 = \arctg(V_I^{q*} / V_I^{d*})$$



(a)整流侧控制框图



(b)逆变侧控制框图

图 2 VSC-HVDC 控制框图

## 2 非线性附加控制器设计的数学模型

系统结构如图 3 所示，为单机经交直流并联于无穷大母线的电力系统。图中  $P_L$  代表地方负荷。

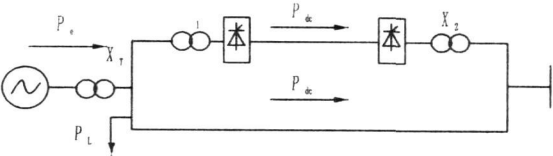


图 3 交直流电力系统结构图

发电机采用经典二阶模型，则可得发电机的转子运动方程式为：

$$\begin{aligned} \delta &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega_0}{H} (P_m - \frac{D}{\omega_0} \omega - P_e) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\text{其中, } P_e = P_{ac} + P_{dc} + P_{L1}$$

式中， $\delta$  为发电机转子角， $\omega$  为转子角速度， $H$  为转动惯量， $D$  为发电机阻尼系统， $P_m$  为发电机机械功率， $P_e$  为发电机电磁功率。 $P_{ac}$  为并联交流线路功率， $P_{dc}$  为直流系统功率。

在研究交直流系统稳定控制中，一般不考虑直流

线路的动态特性,而对直流功率的调节视为一惯性环节,即直流功率的状态方程写为<sup>[7]</sup>:

$$P_{dc} = \frac{1}{T_d}(-P_{dc} + P_{dcREF} + \mu_{dc}) \quad (4)$$

式中,  $P_{dcREF}$  为直流功率的给定值,  $T_d$  为直流系统的等效时间常数,  $\mu_{dc}$  为直流系统的控制。

以发电机的转子角的增量作为非线性控制器设计的输出方程,即:

$$y(t) = \delta(t) - \delta_0 \quad (5)$$

综合(3)、(4)、(5)式,可以得到交直流输电系统非线性控制系统的状态方程及输出方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega_0}{H} (P_m - \frac{D}{\omega_0} \omega - P_{ac} - P_{dc} - P_{L1}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$P_{dc} = \frac{1}{T_d}(-P_{dc} + P_{dcREF} + \mu_{dc})$$

输出方程为:

$$y(t) = h(x) = \delta(t) - \delta_0 \quad (7)$$

### 3 非线性附加控制器的设计

#### 3.1 精确线性化

这里采用状态反馈精确线性化的原理<sup>[7]</sup>,将(6)和(7)式的非线性系统数学模型精确线性化为一个完全可控的线性模型,首先将(6)和(7)式写成标准的仿射非线性系统形式:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x) \mu \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{其中, } x = [\delta \ \omega \ P_{dc}]^T \quad g(x) = [0 \ 0 \ \frac{1}{T_d}]^T$$

通过计算给定系统的各阶李导数,可知系统的关系度  $r = n = 3$ 。

因此,可求出以下坐标变化  $\phi$ :

$$\begin{aligned} z_1 &= h(x) = \delta \\ z_2 &= L_f h(x) = \omega \\ z_3 &= L_f^2 h(x) = \dot{\omega} \end{aligned} \quad (9)$$

$$= \frac{\omega_0}{H} (P_m - \frac{D}{\omega_0} \omega - P_{ac} - P_{dc} - P_{L1})$$

上面坐标变换的雅克比矩阵为:

$$J_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{\omega_0}{H} \frac{\partial P_{ac}}{\partial \delta} & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0}{H} (1 + \frac{\partial P_{ac}}{\partial P_{dc}}) \end{bmatrix}$$

此处,交流线路的传输功率是发电机转子角  $\delta$

和直流传输功率  $P_{dc}$  的函数。

则有,  $\det(J_\phi) = -\frac{\omega_0}{H} (1 + \frac{\partial P_{ac}}{\partial P_{dc}})$  显然,如果  $\frac{\partial P_{ac}}{\partial P_{dc}} \neq -1$ ,由(9)式表示的关系可以作为(8)式的一组坐标变换,在邻域  $\Omega = \{\delta, \omega, P_{dc} | \frac{\partial P_{ac}}{\partial P_{dc}} \neq -1\}$  上可以将交直流非线性控制系统(8)式变化为一个完全可控的线性系统:

$$\dot{z}_1 = z_2; \quad \dot{z}_2 = z_3; \quad \dot{z}_3 = v$$

输出方程为:  $y = z_1$

即可得:

$$Z = AZ + Bv \quad (10)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

#### 3.2 最优控制器

根据线性最优控制理论<sup>[10]</sup>,对线性系统(10)式采用二次型控制规律进行控制设计,选取性能指标  $J$ :

$$J = \int_0^\infty [z^T Q z + v^T R v] dt$$

其中,  $Q$ 、 $R$  为正定的权矩阵,  $R$  一般为单位矩阵,  $Q$  为对角矩阵。

最优控制规律为:

$$v = -Kz, K = R^{-1} B^T P$$

$P$  为黎卡提(Ricatti)方程的解:

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0$$

通过调整  $Q$  矩阵对角线的相应元素来调整对应状态量的阻尼,从而达到最佳的控制效果。选取适当权矩阵  $Q$ ,可求出线性系统(8)式的最优控制:

$$v = -3.16z_1 - 5.58z_2 - 3.34z_3 \quad (11)$$

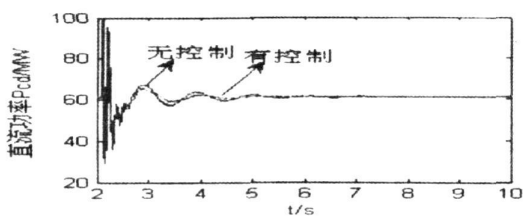
将(9)式中的  $z_3$  表达式求导后代入到(10)式,经整理并将(11)式代入其中后可得换流器的非线性附加最优控制规律为:

$$\begin{aligned} \mu_{dc} &= \frac{\omega_0}{T_d H} [3.16\delta + 5.58\omega + (3.34 - \frac{D}{H})\dot{\omega}] - \frac{1}{T_d} \\ &P_{ac}\dot{\omega} + (P_{dc} - P_{dcREF}) \end{aligned}$$

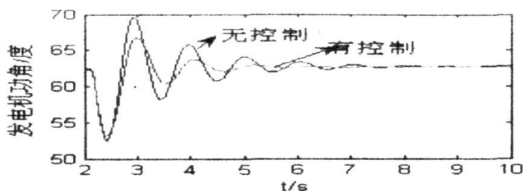
### 4 仿真验证

为了验证所设计的 VSC-HVDC 系统非线性附加最优控制器的有效性及快速稳定性,将所设计的控制器装设于整流侧常规控制 PI 调节处,利用 PSCAD/

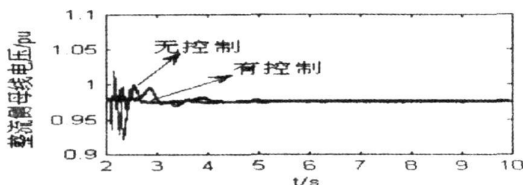
EMTDC 进行系统时域仿真。仿真的主要参数见文献[7], 仿真结果如图4所示。



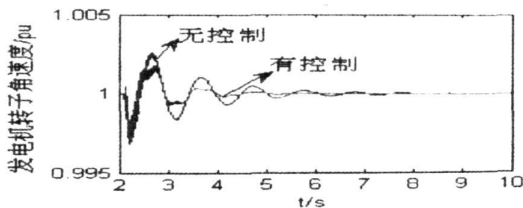
(a) 直流线路功率  $P_{dc}$



(b) 发电机功角  $\delta$



(c) 整流侧母线电压  $V_l$



(d) 发电机转子角速度  $\omega$

图4 系统的响应曲线

图中的扰动为逆变侧交流母线在2.2 s时发生三相短路故障, 持续时间为0.2 s。仿真结果表明: 所设计的VSC-HVDC系统的非线性最优控制器能显著的增加系统阻尼, 且系统恢复稳定的时间较短。

## 5 结论

在VSC-HVDC系统动态模型基础上, 采用基于变换的状态反馈解耦控制的双闭环控制方式作为

VSC-HVDC的常规控制。通过建立单机经交直流并联于无穷大电力系统的数学模型, 其中, 发电机采用经典的二阶模型, 调节方式为一阶惯性的直流功率调节。利用非线性理论和最优控制理论设计VSC-HVDC系统的附加阻尼控制。采用PSCAD/EMTDC仿真软件对该单机无穷大系统进行大干扰非线性仿真实验, 验证了VSC-HVDC系统在装设了该附加阻尼控制器后, 系统振荡阻尼明显增加, 并迅速进入稳定。

## 参考文献

- [1] Vijay K. Sood(著), 徐政(译). 高压直流输电与柔性交流输电控制装置—静止换流器在电力系统中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] Johansson S G, Asplund G, Jansson E, et al. Power system stability benefits with VSC DC-transmission systems[C]. CI-GRE, Paris, 2004.
- [3] Huang Z, Ooi B T, Dessaint L A, et al. Exploiting voltage support of voltage-source HVDC[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(2): 252-256.
- [4] 王凤川. 电压源换流器式轻型高压直流输电[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 74-76.
- [5] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的HVDC技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-52.
- [6] 郑超, 周孝信. 基于普罗尼辨识的VSC-HVDC附加阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 7-12.
- [7] 胡兆庆. 基于VSC的HVDC控制及其动态特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学电气与电子工程学院, 2005.
- [8] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于VSC的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.
- [9] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [10] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科技出版社, 1984.

## 作者简介:

黄北军(1983~), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统功角稳定与控制。

邹超(1983~), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 从事新型直流输电及电力系统稳定方面的研究。

王奔(1960~), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统非线性及变结构控制。

(收稿日期: 2007-12-03)

# 中压配电网的网架结构优化

王 可

(成都电业局,四川 成都 610016)

**摘 要:**配电网的规划可根据规划内容分为长期规划、网络规划和施工设计三部分。长期规划用于确定未来的主要投资项目和主网架的结构;网络规划用于处理近期的各种投资项目;而施工设计用来考虑各个网络元件的结构设计,以及考虑能否获得各种设备和材料。重点讨论长期规划中网架结构的优化。

**关键词:**配电网;网架结构;结构优化

**Abstract:** Medium-voltage distribution network is an important part of power system and one of the necessary infrastructures for modernization. Substantial practices show that a scientific and efficient optimization project for distribution network structure can save the investment, reduce the power failures and line losses, and improve the quality of power supply, which is currently one of the important tasks of electric power departments. The long-term programming is for deciding the main investments and major network structure in the future; network planning is for dealing with various investments recently; while construction designing is for taking all the structure design of network components and possibly available instruments and materials into consideration. It mainly focuses on the optimization of network structure in the long-term programming as follows.

**Key words:** distribution network; network structure; structure optimization.

**中图分类号:**TM715 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6954(2008)02-0018-04

电力是经济发展的前提,一个安全经济的供电系统是保障国民经济高速发展的先决条件,而供给用户满意的电能必然要求有一个容量充足的高度可靠的配电网。通常把电力系统中二次降压变电所低压侧直接或降压后向用户供电的网络,称为配电网(distribution network)。它由架空线或电缆配电线路、配电所或柱上降压变压器直接接入用户所构成。而10 kV中压配电网由高压变电所的10 kV配电装置,开闭所、配电所和架空或电缆线路等部分组成,其功能是将电力安全、可靠、经济、合理的分配到用户。

国外配电网发展起步较早,目前已形成了完善的配电网系统,日本与欧美等国家尤为显著。日本配电网的发展由于国情的不同,其供电半径小,供电可靠性要求高,较多采用环网供电方式;欧美国家则由于地域的关系配电线路以放射性为主,电压等级较高,多采用长配电线路。中国长期以来,电力部门重发电、轻用电的现象比较严重,将主要精力放在大电网、大机组上,对配电网用电质量及可靠性重视不够,忽视了配电网的重要性和特殊性,使配电网的技术发展受到严重的制约,造成了配电网供电可靠性差、设备落后、不安全的因素较多的状况。

而中国配电网建设却不能适应城市经济社会发展的需要,其原因是城市经济增长迅速,而城市电网

发展缓慢,表现在设备陈旧、供电容量不足、电网结构不合理、可靠性差、电能质量低等方面。因此,近期国家巨资实施城乡配电网的改造工程以提高配电系统的供电能力和安全经济运行,配电网建设已成为了当今电力建设的重头戏。

与输电网相比,配电网络的电压等级较低、供电范围小,但因直接和用户相连,具有用电量大、负荷密度高、安全可靠和供电质量要求高等特点。过去由于“重发、轻供、不管用”,致使配电网建设比较落后。更由于配电网建设规划的不尽合理或根本没有规划,导致大部分地区现有网体结构混乱,供电质量不高。这些年全国工业和第三产业的高速发展,使配电网受到严峻考验,因此必须通过制定规划来改变配电网落后的现状,用规划来经济有效地指导配电网建设与改造。

## 1 中压配电网的形成及特点

中国普遍采用10 kV作为中压向各用户供电,这是中国电网多年发展的结果。早期中国的配电网电压等级零乱而复杂,仅中压配电网就曾经同时出现了3.3、5.2、6及10 kV等若干个电压等级,造成电网管理的混乱。后来随着城市负荷密度的提高和大型电

力用户的出现,配电网的电压等级也在不断提高,而许多地区更是采用升压上靠的办法改造变电所和线路,规范简化电压系列。因此逐渐形成了目前的 110、35 kV 高压配电网,10 kV 中压配电网及 380/220 V 的低压配电网。虽然随着经济的发展,有些大中城市要求在配网中引入更高的电压等级 20 kV,并且通过了全国额定电压标委会的论证。但是,限于 20 kV 还只是停留在讨论阶段,且大部分城市仍用 10 kV 作为中压配网的电压等级,而且还未达到 10 kV 电压等级的饱和状态,因此,这里中压配网的电压等级只讨论 10 kV。

中压配电网主要是供给一个地区的用电,因此相对于区域电力网来说,电压等级和供电范围都要小一些。它在结构上最大的特点是作为电力网的末端直接与用户相连,敏锐地反映着用户在安全、优质、经济等方面的要求。因此它具有其他电力网所没有的特点,主要体现为以下三点:①深入城市中心和居民密集点;②传输功率和距离一般都不大;③供电容量、用户性质、供电质量和可靠性要求千差万别,各不相同。

2 网架结构优化问题的提出

在电力市场的影响下,配电网的建设、改造和运行管理,都要适应电力市场的变化,因此中国投入巨额资金来进行城乡电网改造。在这种形势下,选择一种符合中国电力行业的实际情况、既有较好经济性又有较高可靠性的配电方式是摆在大家面前的一项迫切任务。

中压配电网按高压变电所的布局划分成若干相对独立的分区配电网,各分区网有明确的供电范围,习惯做法是不交叉供电。因此,中压配电网应有一定的冗余度,当负荷转移时不致使配电网中的元件过负荷;同时,中压配电网还应有较强的适应性,对于开发区和发展较快的城市而言,这一点尤为重要。为避免浪费投资,新建的主干线、开闭所和配电所的兴建均应按发展规划的规模一次建成,在相当长时间内不需要更换,不再扩建。因此,在建设或改造中压配电网前,对其进行规划就显得极其重要和迫切。

在城市电网中,对于负荷密集区,大多建有配电所(开闭所或开关站),再从配电所直接向用户供电。对配电网进行规划时,通常都是把配电所的布局 and 网

络接线分开来进行。一般是根据预测的负荷分布进行优化计算,确定供电区内最佳的配电所数及其规模,然后在此基础上进行网络规划计算,确定在给定目标条件下的最佳网络结构,即配电所之间及其与变电所之间如何“连线”的问题。

一般城市的配电网由架空线和电缆线混合组成。过去中国城市中大多以架空电网为主,由于城市中架空线路的安装日益困难,且随着近年来负荷的急剧增长和城市规划、改革开放的需要,电缆也得到了广泛的应用。但是架空线路具有建设费用低、建设周期短、负荷支接方便、易于故障修理等优点,因此首先考虑架空线或绝缘架空线路供电还是最实用的供电方法。10 kV 网络作为中国城市中压配电网,其地位十分重要,而其电网接线模式的选择更是一个重要的问题,不仅牵涉到电网建设的经济性和可靠性,对整个电力工业发展和用户的发展均有重要意义。中压 10 kV 配电网的常用接线模式有:完全放射状、中介点放射状、树状、普通环式、手拉手环式。其结构模型如图 1 所示。

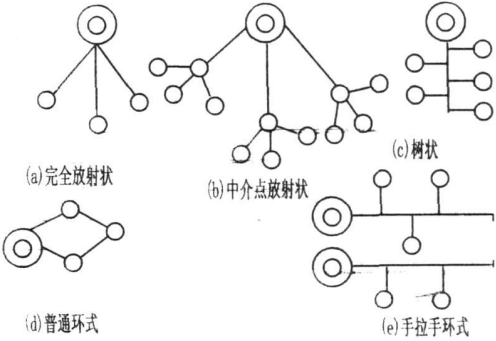


图 1 10 kV 配电网常用接线模式

考虑到配网实现自动化的简便,在正常运行方式下,普通环式接线和手拉手环式接线均以开环方式运行。在不同接线模式下构建的网架,从经济性、可靠性、网损率和网络节点的电压水平各方面比较都有所不同。而实行网架规划时采用何种接线方式主要依赖于本地的实际情况及规划的具体要求。

通过规划可以节约大量投资、降低网损、减少停电范围和时间及提高电能质量等,是配电网规划中至关重要的一个环节。但是由于配电网十分复杂且具有诸多不确定性,采用传统的优化方法不能获得满意的优化结果。而且随着电力市场的深入发展和电力行业的机制改革,竞争越演越烈,传统方法已经

远远不能满足现代电力系统的要求。以计算机为工具,采用新技术、新方法对中压配电网进行优化规划已在电力界达成共识,其中遗传算法就是其中应用较为广泛的一种。

### 3 配电网网架规划的主要特点

配电网络的规划可根据规划内容分为长期规划、网络规划和施工设计三部分。长期规划用于确定未来的主要投资项目和主网架的结构;网络规划用于处理近期的各种投资项目;而施工设计用来考虑各个网络元件的结构设计,以及考虑能否获得各种设备和材料。对中压配电网的网架结构进行规划设计时必须做到安全与经济的统一,因此是一个非常复杂的优化问题,主要特点如下:

(1)非线性。电力系统是一个非线性的系统。仅从电网规划方面来看,不仅线路的投资费用并非是非线性的,其他诸如可靠性等指标也不是线性的,而且规划过程中的潮流算法也是非线性的。

(2)整数性。电力线路的建设与投运是0—1性质的,要么没有,要么有,不存在一个过渡状态。正是由于这种不连续性,给分析和处理带来了很大的难度,规划时需采用整数规划。

(3)不确定性。配电网络的规划很大程度上依赖于负荷预测值,而负荷值采用的是当前的预测值,其准确性上有待将来的验证。投资费用也因为物价变化存在不确定性,而在社会和经济的发展过程中还存在其他各种不确定因素,常规的数学规划作电网规划时无法考虑这种不确定因素。

(4)多目标性。进行配网网架规划不仅要求投资费用少,还要求可靠性高、占地面极少、环境污染小等,这样就存在一个如何综合衡量多个目标的优劣的问题。可以引入模糊数学中的隶属函数来评价整体目标的满意与否。但是隶属函数的确定很灵活,需要引入专家的知识 and 经验。

(5)多阶段性。很多规划工作者在设计网络时,只满足了系统的当前需要,没有考虑当地经济的发展及负荷的增长,没过多久网络就需要改造,造成了许多盲目的损失。因此,进行配网改造时,应避免短期行为和盲目性,从长远的角度综合考虑电网布局,既要求在当前阶段的规划中计及各待架线路对以后各阶段的影响。

进行配网网架规划是改革形势发展的必然趋势,通过规划来指导配网建设,可以加强配网的改造,使配网结构合理、安全可靠、经济灵活,从而减少停电损失,降低线损,提高供电质量。

### 4 网架结构优化的基本准则

进行网架结构规划时,应满足电力系统经济性、可靠性与灵活性等各方面的基本要求:

(1)具有高经济性。高经济性是进行电网建设的最根本的要求,但在评估经济性时,不能仅把电网建设的初期投资作为唯一考核指标,要以电网发展建设的总体效益来衡量,这点目前已达成共识。同时还应该把用户停电损失也计算在内,即把可靠性作为优化计算的目标之一。

(2)提高配电网整体供电能力。配电网直接联系着广大用户,覆盖面很广,供电面积大,因此应具有充足的供电能力,以满足用户需求不断增长的要求,尤其是经济发展迅速的城市和地区,对电网供电能力要予以特别重视。

(3)提高电能质量及供电可靠性,保证电网安全运行。这是适应电力市场发展的要求,保证在灵活机制下的高竞争力。

(4)要有较大的灵活性和适应性。在电网规划设计中,配电网的灵活性和适应性观念尤为重要,因为经济发展既是一个系统工程又是一个动态工程,包含着许多相互制约的不确定因素。远期发展目标不可能全部预见且在蓝图上全部确定下来,因此要求配电网网架结构具有足够的弹性,包括有足够的设备容量,在各种可能出现的运行方式下的应变能力。在制定各阶段网架方案时要考虑前后阶段之间的相关性、即发展过程中的过渡方案。

### 5 网架优化方法

#### 5.1 启发式网架优化方法

根据所确定的衡量安全性指标的不同,启发式方法分为基于支路性能的启发式方法和基于系统性能指标的启发式方法。基于支路性能指标的启发式分析方法中,线路的选择是根据系统运行时线路功率传输情况来实现的,常选用的有线路是否能满足负荷要求或者线路过负荷程度等指标;而基于系统性能指标

的启发式方法中,线路的选择是根据线路对系统运行时整个系统的一个特定运行性能指标的影响程度来实现的,常选用的指标有系统缺负荷大小指标等对线路的逐步选择。

基于线路指标的启发式网架规划方法分为逐步倒退法和逐步扩展法两种。逐步倒退法是根据目标年数据构成一个虚拟网络,该网络除了已有线路以外,包括所有待选的线路,这样,构成的就是一个冗余度很高但不经济的网络,然后采用潮流模型对该网络进行分析,比较各待选线路在系统中的作用和有效性,逐步去掉有效性低的线路,直到网络没有冗余线路为止。而采用逐步扩展法是根据各待选线路对过负荷线路的过负荷量的消除的有效度,选择适当的线路到现状网络上,直至网络无过负荷为止。为计算各待选线路的有效度,需要进行变结构时的潮流计算。

基于支路性能指标的启发式方法有计算简单灵活等优点,但由于通常是独立地考虑各待选线路的作用,无法直接体现系统充裕的大小等性能指标,而基于系统性能指标的启发式方法则能体现系统性能指标,从而可以从整体上识别薄弱环节并充分考虑各待选线路对系统的整体影响来选择最佳扩建线路。

## 5.2 网架结构的数学优化方法

网络优化的数学化方法可以分为确定性和不确定性两种优化方法。传统上采用的常常是确定的网络优化方法,即将规划问题表达成确定性的优化问题来进行求解。但随着规划的环境以及相关要求日益复杂,且负荷、设备费用、线路路径等因素均具有不确定性,这些不确定性对电网规划有较为显著的影响,因而在规划中考虑不确定性因素是必要的。按照考虑不确定性因素特征的不同,不确定网络优化有分为随机优化法和模糊优化法。随机优化法常用于事件是否发生以及发生的时刻存在不确定性的情形,而模糊优化法则常常用来处理有关事情表达不清晰的这种不确定性的情况。在通常情况下,在满足对保障负荷电能供应的前提下,可能有多种架线方法和导线截面的选择,要对多个方案进行比较选择,则需要选择目标函数,在电网规划设计中常用到的目标函数有网架建设总投资、电能损失、维修运行费用为目标函数。由于电能的特殊性,需要考虑各种约束条件,如电压范围、线路的长期极限传输容量限制等。因此,网架优化过程实际上是目标函数与约束条件、状态参

数之间的协调处理过程。

网络规划法是针对网络的拓扑特性所提出来的,一种数学规划方法,也是在线形规划中专门处理网络问题的一种特殊算法。数学上把图看作节点和弧的集合,弧是连接在两个节点之间的有向线段。在电力系统中,节点就是接受电力或者发送功率的发电厂、变电所或者负荷点,弧就是线路。这种优化网架方法在电力系统网络优化中常用的数学模型有最少费用法、最短路径法、费用最小最大流法等方法。

随着成都经济的快速发展和城市规模的不断扩大,负荷增长越来越快,现有线路无法适应新增负荷需求,更不能满足供电质量要求。根据成都电网的实际情况,除了加强在负荷中心新电源点建设的同时,配电网的优化也是配电改造的前提和基础,应该避免“重设备改造,轻网络优化”的倾向,尽可能提高配网建设的资金使用效率。争取通过不断的配电网优化改造,在不远的将来逐步实现配电网中无过载,重载线路,公用线路环网率达到100%,全部实现:“N-1”,重要用户满足“N-2”;电缆化率达到50%;逐步对已有的单电源开关站进行改造,形成双电源;简化网络结构,形成以单环网络、馈线组为主的网络结构。

## 6 结束语

加快城市电力网建设改造是形势发展的需要,是电力工业发展的必然趋势。在配网的改造过程中,一方面要引进先进的设备和技术,另一方面,要充分利用专家人士的宝贵知识和经验,从而提高整个配网的电能质量和经济效益,促进社会经济的高速发展。

### 参考文献

- [1] 刘健等编著. 城乡电网建设与改造指南[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [2] 余贻鑫, 段刚. 城市电网规划的认知性质与方法[J]. 电力系统自动化, 2001.
- [3] 杨捷. 城区电网规划的研究和应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [4] 范文涛. 考虑网损和可靠性的电网改造经济分析方法[C]. 中国城市供电学术年会暨全国供电联络年论文集, 2003.

(收稿日期: 2008—02—11)

# 配电网重构的正交设计模型

廖学静

(四川德阳电业局, 四川 德阳 618000)

**摘要:**提出用正交设计的方法进行配电网重构。计及电压、容量以及负荷均衡等约束,给出了配电网重构的数学模型。正交设计是用于多因素试验的一种方法,它可以快速找到较好的方案或可能的最优方案。同时针对配电网树状运行的特点,对正交表中给出的包含环网的开关组合进行了修正。应用所提出的算法对IEEE33节点算例进行了网络重构,给出了重构前后系统节点电压、网损的比较,重构结果显示了所提算法的正确性、可行性以及工程实用性。

**关键词:**配电网;正交设计;网损;重构

**Abstract:** A new reconfiguration method of distribution network based on orthogonal design is proposed, which considers the constraint of voltage, capability and balance of load. Orthogonal design is a method using multi-factor experimentation. It can find out better scheme or probable optimal scheme quickly, and the switch combination including ring network can be corrected. The calculation example shows the application of orthogonal design to distribution networks reconfiguration brings better effect.

**Key words:** distribution networks; orthogonal design; network loss; reconfiguration.

**中图分类号:**TM744 **文献标识码:**A **文章编号:**1003—6954(2008)02—0023—04

随着电力体制改革的不断深入,经济性与可靠性必将成为电力公司关注的焦点。通过重构以获得最优网络结构,势必将为电力公司带来巨大的经济效益和社会效益。配电网具有闭环设计开环运行的特点,网络中常配置大量分段开关(常合,用于隔离故障)及少量联络开关(常开,用于提供可选的供电通路),因此在正常运行条件下可根据不同的负荷状况,改变开关的开/合状态以调整网络结构。一方面可降低网损;另一方面可使负荷在各线路和变压器之间尽量均衡<sup>[1]</sup>。重构是提高配电网运行经济性、供电质量和安全性的重要手段。配电网重构是一个多目标非线性混合优化问题。目前,配电网重构的求解算法<sup>[1~8]</sup>主要有:数学优化法、最优流模式(optimal flow pattern, OFP)、开关交换法(switch exchange method, SEM)和人工智能算法(artificial intelligence algorithm, AI)等几类<sup>[4]</sup>。支路交换法<sup>[1]</sup>首先形成一个辐射网,然后依次闭合开关,每闭合一联络开关形成一单环网,得出最优化条件断开一个开关,保持网络为辐射形。该方法固定节点注入电流,以优化理论为根据,把开关操作的组合问题变成开关的启发式单开问题,可指导实际的开关操作过程;计算中只需估算支路交换引起的网损变化,无需重新计算潮流,计算量较少。缺点是计算步数多,效率低,计算结果与初始网络结构有关,因此容易收敛于局部最优解。最优流模式法<sup>[3]</sup>首先闭

合网络中的所有开关,形成有多个环的网孔系统。以纯电阻网络求得环网支路的电流分布(即最优流模式 OFP);然后将电流最小的支路断开,从而解开一个环,并重新计算最优潮流;如此重复,直至配电网变成辐射网。该算法中计算一次开关由合至开需计算一次潮流,计算量较大。但配电网重构的结果与初始网络状态无关,比较容易收敛于最优解。人工智能算法<sup>[4]</sup>,如遗传算法(GA)、人工神经网络法(ANN),模拟退火法(SA)等。其中遗传算法(GA)可以将支路的开关状态(0/1)直接用染色体编码表示,通过模拟生物进化的繁殖/交叉/变异操作,尝试改变各开关状态,寻找最优网络结构,且能以一定概率收敛于最优解,但这类方法的参数如交叉率、变异率等难于控制,很难形成统一有效的通用算法。文献<sup>[7]</sup>将Tabu搜索运用于配电网重构。

对于组合优化的问题也可以用正交设计的方法来实现。如果列举各因素所有可能的组合状态,当然可以得到最优的组合,即所谓的全面试验。但这种方法的工作量将随因素个数按指数方式剧增。这种大工作量的试验既不经济,也无必要。正交设计是用于多因素试验的一种方法,它从全面试验中挑选出部分有代表的点进行试验,这些点具有“均匀”和“整齐”的特点。从而可以快速找到较好的方案或可能的最优方案。

1 配电网重构的数学模型

配电网重构就是在安全可靠供电的前提下,通过改变网络中的开关状态,即选择不同的供电路径,以使系统总的有功损耗最小。

定义 1: 负荷均衡指标<sup>[2]</sup>  $B_{Li}$ , 由支路负荷均衡指标  $B_{Li}$  和系统均衡指标  $B_{Lsys}$  组成,  $B_{Li}$  描述如下:

$$B_{Li} = \frac{S_i}{S_{imax}} \tag{1}$$

式中  $S_i$  为流过支路  $i$  的复功率,  $S_{imax}$  为支路  $i$  的最大容量。

系统的负荷均衡指标  $B_{Lsys}$  的数学公式描述如下:

$$B_{Lsys} = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} \frac{S_i}{S_{imax}} \tag{2}$$

式中  $n_b$  表示系统中支路的总数。

数学意义上的负荷均衡就是使支路负荷均衡指标  $B_{Li}$  等于或近似等于系统负荷均衡指标  $B_{Lsys}$ , 即满足

$$\frac{S_1}{S_{1max}} \approx \frac{S_2}{S_{2max}} \approx \dots \approx \frac{S_n}{S_{nmax}} \approx \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} \frac{S_i}{S_{imax}} \tag{3}$$

上式等价于

$$\max \left[ \frac{S_i}{S_{imax}} - \frac{S_j}{S_{jmax}} \right] < \epsilon \tag{4}$$

其中,  $\epsilon$  为根据网络结构和系统运行要求等人为设定的任意小的数。

考虑负荷均衡的完整配电网重构的数学模型如下:

$$\min \sum_{i=1}^{n_b} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \tag{5}$$

s.t.

$$\textcircled{1} \quad V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \tag{6}$$

$$\textcircled{2} \quad S_i \leq S_{imax} \tag{7}$$

$$\textcircled{3} \quad \max \left[ \frac{S_i}{S_{imax}} - \frac{S_j}{S_{jmax}} \right] < \epsilon \tag{8}$$

④ 潮流方程

⑤ 树状约束

式中:  $r_i$  为支路  $i$  的电阻;  $P_i$ 、 $Q_i$  为通过支路  $i$  的有功、无功功率;  $V_i$  为支路  $i$  末节点电压;  $V_{imin}$  以及  $V_{imax}$  分别为支路末节点的最低电压和最高电压限制。

2 基于正交设计的配网重构算法

2.1 正交设计基本原理

正交实验设计是用于多因素实验的一种方法,它是从全面实验中挑选出部分有代表的点进行实验。对于全体因素来说它是一种部分实验(即做了全面实验中的一部分),但对于其中任何两个因素来说却是带有等重复的全面实验,具有均衡分散性和整齐可比性。正交表是正交实验设计的基本工具,它是根据均衡分散的思想,运用组合数学理论在拉丁方和正交拉丁方的基础上构造的一种表格。

2.2 算法步骤

正交实验设计的方法和步骤:

1) 明确实验目的, 确定实验指标。

实验目的: 选择不同的供电路径, 以使系统总的有功损耗最小。

实验指标: 文中的实验指标为网络有功损耗。

2) 挑因素, 选水平。

如果直接将各可能动作开关作为正交试验的因素, 以开关的开合状态作为各因素的水平, 那么这种因素的全组合中绝大部分都是非连通图组合, 这将大大的削弱了正交试验的优势。为保证重构网络的连通性, 针对配电网的树状结构, 以带有分支线的节点为边界, 将网络分为不同的块, 以这些块作为因素。这些块中只有一个开关可以处于打开状态, 故其水平数为块中开关总数加 1。例如图 1(1) 中节点 7、13 都有分支线, 且在路径 7-11-16-13 上没有其他的带分支线的节点, 以它们为边界将开关 11、16、15 和节点 11、16 作为一个块, 即一个因素, 其水平数为 3。

3) 选择合适的正交表。

常用正交表的形式为  $L_A(p^q)$ 。“ $L$ ”代表正交表,  $L$  下标“ $A$ ”表示有  $A$  个横行, 即要做  $A$  次实验; 括号内的指数“ $q$ ”表示有  $q$  个纵列, 即最多允许安排的因素数是  $q$  个; 括号内的“ $p$ ”表示表的主要部分有  $p$  种数字, 即因素有  $p$  个水平。选择正交表时首先要求表中水平个数与被考察的水平个数完全一致; 其次, 要求正交表的列数等于或大于被考察因素的个数。此外, 当实验时间短、成本低、方法易时, 可选次数多的表; 当实验时间长、成本高、难度大时, 选择实验次数少的表; 当实验要求精度高、结果准确时, 选择实验次数多的表。

4) 用正交表安排实验。

按因素水平表中的代号, 采用对号入座的办法, 将数据填入所选出的正交表中, 便得到实验计划表。此表的每一横行即代表要实验的一组条件。在实验

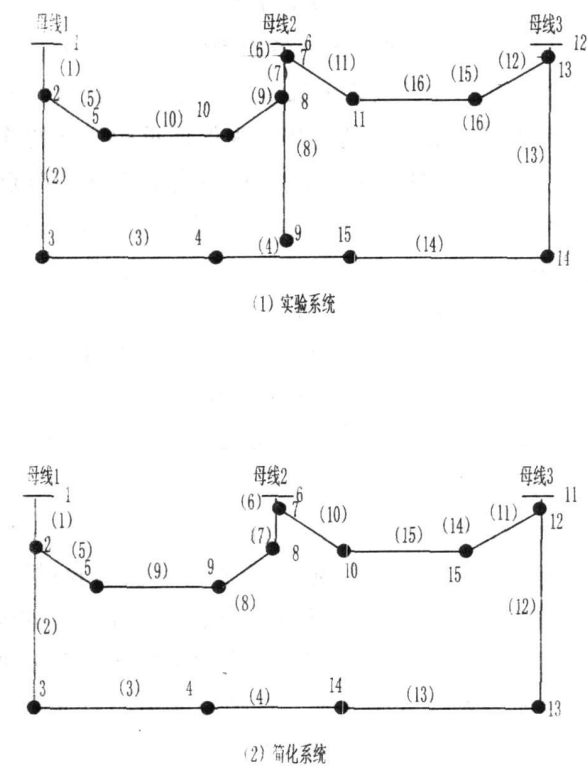
时,除考察因素外,其他条件应尽量保持不变,以便比较结果。

针对配电网闭环设计开环运行的特点,对正交表给出的包含环的开关组合作如下修正:在配电网中,一个联络开关对应一个环路。将因素以环路为单位分组,为保证配网开环运行,所以每一环路必需有一个开关处于打开状态,在此,选择离电源点逻辑连接关系最远的开关打开。

- 5)按实验方案进行实验。
- 6)实验结果直观分析。
- 7)实验验证。

3 算例分析

3.1 设计试验并实施



注:数字为节点号,带括号的数字为支路(或开关)号

图 1 IEEE 典型三馈线系统

用前述方法对 IEEE 典型三馈线系统<sup>[14]</sup>进行了网络重构。该配电系统有 3 个联络开关。由于开关 8 必须闭合才能保证对节点 9 的供电,故而可以不考虑开关 8,将网络简化为图 1(2)。而与电源相连的开关永远闭合,因此图 1(2)中开关 1、6、11 必须闭合,在网络重构过程中也可不予考虑。于是网络可以分为

3 块,{开关 5、7、8、9}、{开关 10、14、15}、{开关 2、3、4、12、13}。而每块必须有一个开关打开,故而选择正交表  $L_{25}(5^6)$  进行重构。

3.2 试验数据分析

| 表 1 计算结果 |        |        |          |
|----------|--------|--------|----------|
|          | 打开开关   | 网损(MW) | 最低电压(pu) |
| 重构前      | 4/9/15 | 521.36 | 0.970 2  |
| 重构后      | 4/8/10 | 471.62 | 0.975 1  |

由表 1 可知,重构后系统网络损耗有大幅降低,由重构前的 521.36 MW 降到重构后的 471.62 MW,系统最低电压也由 0.970 2 升高到 0.975 1。而求解过程只需要计算由正交表给出的 25 个重构方案即可,计算量小,充分体现了模型的高效性。

4 结论

目前求解配网重构的方法很多,但大多数都比较复杂。上面利用正交设计的均衡性和正交性,以一部分有代表性的重构方案代替全部重构方案,并根据正交试验的方法求取较优的重构方案或可能的最优方案。通过 IEEE33 节点配电系统的重构结果表明所提模型的正确性、可行性。模型简单易懂,具有很高的计算效率和工程实用价值。

参考文献

[1] Civanlar S, Grainger JJ, Yin II, et al. Lee. Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(3): 1127—1223.

[2] Baran ME, Wu FF. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401—1407.

[3] 雷健生,邓佑满,张伯明. 综合潮流模式及其在配电系统网络重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 57—62.

[4] Huang YC. Enhanced genetic algorithm—based fuzzy multi—objective approach to distribution network reconfiguration[J]. IEE Proc Gener Transm Distrib, Sept, 2002, 149(5): 615—620.

[5] 毕鹏翔,刘健,张文元. 配电网重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98—103.

[6] Bi Pengxiang, Liu Jian, Zhang Wenyuan. A refined branch—exchange algorithm for distribution on networks reconfiguration

[J].Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98—103.

[7] 刘莉,陈学允.基于模糊遗传算法的配电网络重构[J].中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66—69.

[8] 陈根军.基于 Tabu 搜索的配电网络重构算法[J].中国电机工程学报, 2002, 22(10): 28—33.

[9] Goswami SK, Basu SK. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1992, 17(3): 1484—1491.

[10] 刘光中.动态规划—理论及其应用[M].成都:成都科技大学出版社, 1991.

[11] 钱颂迪,吴运权.运筹学[M].北京:清华大学出版社, 1997.

[12] 谢开贵,周家启.树状网络潮流计算的新算法[J].中国电机工程学报, 2001, 21(9): 116—120.

[13] Xie Kaigui, Zhou Jiaqi. A new load flow algorithm for radial distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 116—120.

[14] CIVANLAR S, GRAINGER J J, YIN H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217—12231.

作者简介:

廖学静(1971~),男,四川什邡人,硕士,工程师,德阳电业局总工程师,从事技术管理工作。

(收稿日期:2008—01—21)

# 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 m<sup>2</sup>,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 m<sup>3</sup> 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。

# 论无人值班变电站消防问题

张 宏

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 无人值班变电站的消防安全是各级电力消防管理部门重点关注的课题。论述了水喷雾灭火系统的缺点, 介绍了排油注氮自动灭火系统的结构及特点, 最后对无人值班变电站的消防工作提出了建议。

**关键词:** 无人值班变电站; 消防; 自动灭火系统

**Abstract:** The fire protection security of the unattended substation is the key attention of all levels of electric power fire-prevention departments. The shortcomings of water spray extinguishing system are discussed, the structure and features of automatic oil-drain and nitrogen-filling fire-extinguishing system are introduced, and finally the suggestions about fire protection in unattended substation are put forward.

**Key words:** unattended operation substation; fire protection; self-extinguishing systems.

**中图分类号:** TM63 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2008)02-0026-02

无人值班变电站通常按照消防法律法规的要求安装了独立的火灾报警和水喷雾自动灭火系统。这些系统在电力生产的防火救灾中起到了关键的作用, 为保护电力生产的安全和避免国家财产的损失做出了积极贡献。水喷雾灭火作用不容置疑, 但经过几十年的运行实践, 也发现了水喷雾灭火系统的缺点和不足: 首先变电站的站址选择一般都选择设置在山坡及地势较高不易被水淹没的地区, 这些地区恰恰水源较匮乏。接入城市自来水管网对于设置在山区的变电站来讲, 无疑是不符合经济合理原则的; 其次, 水是导电物质, 对水喷雾灭火系统的试验和维护保养非常困难, 系统处于高压设备运行区内, 如果出现故障, 根本无法作业排除; 其三, 随着年代的推移, 地下管网腐蚀、锈蚀也难免给管网正常运行带来困难; 其四, 受地层水源下沉影响, 有的地区原能满足的深井取水, 现已无法满足补水需要; 目前, 随着无人值班变电站的推广, 对变电站采用先进的自动灭火系统, 成了电力消防安全管理部门重点关注的课题。

## 1 无人值班变电站自动灭火系统的必要性

电器设备火灾在火灾分类中是一个专列项目, 而主变的防火是电力行业电气设备火灾的重中之重。例如山东淄博变电所<sup>90</sup> MkV 安主变因绝缘故障发生喷油火灾, 持续燃烧 8 h, 虽投入 9 台泡沫灭火车最终将大火扑灭, 但由于主变储油多、报警晚、扑救迟, 致

使主变及附属设备报废, 因此, 采用常规灭火手段已远远不能适应现代电力设备运行要求。

目前, 变电站供区范围大, 覆盖用户广, 供电可靠性要求高, 变电站运行的安全与否, 直接影响到所辖供区工农业生产顺利进行和经济建设的健康发展。为确保无人值班变电站的安全运行, 采用先进的自动灭火系统势在必行。按照消防法规规定, 单台容量为 125 MVA 及以上的变压器, 应设置自动探测报警灭火装置。

## 2 无人值班变电站自动灭火的可能性

配置现代化自动灭火系统, 方能确保无人值班变电站安全运行。排油注氮自动灭火系统已先后通过了国家固定灭火系统和耐火结构质量监督检验中心的型式检验和摩迪国际认证有限公司的 IS09001、2000 质量体系认证及国家电网公司的新产品鉴定, 在全国各大电厂和变电站中已广泛采用。排油注氮灭火系统集火灾探测、报警与灭火系统为一体, 灭火速度快、灭火效果受外界干扰少, 彻底消除火灾甚至爆炸的危险, 可避免变压器内部二次复燃, 减轻变压器的损坏程度和其他损失。该系统装置简单可靠, 使用安全, 密封性好, 长期贮存不变质、自动性能高。解决了灭火系统的设计、安装、运行维护的实际困难, 同时也解决了干旱、寒冷地区变电站的消防问题, 尤其是为无人值班变电站提供了可靠的消防设施。其具有以下特点:

- (1)以防为主,防消结合。可以有效防止油浸变压器爆裂所产生的火灾,避免重大损失,利于变压器安全运行。
- (2)不用水或泡沫等灭火介质,免除了消防排水设计和相关设施。
- (3)属环保产品,该设施不对环境和变压器本身造成任何污染。
- (4)造价低,运行管理简单、维护方便。有效解决了中国华北、西北、东北等三北地区,因水资源缺乏而形成的被动局面。
- (5)动作后可以立即灭火,灭火时间短;排油注氮自动灭火系统主要由高压氮气贮瓶,配管,启动氮气贮瓶配管、阀件系统;灭火箱;自动感温,感烟、感光监控报警器;自动灭火系统等组成。其结构见排油—注氮式变压器灭火装置(见图 1)。

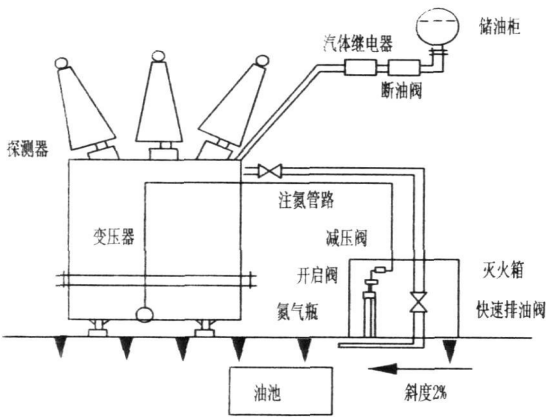


图 1 排油—注氮式变压器灭火装置  
在变压器上的安装简图

当变压器内部发生故障,油箱内部压力急剧增加,引起气体继电器跳闸触电动作,伴随温度的升高,探测器的感温元件熔断,触头接通,继电器 K2 线圈带电,不延时常开触点闭合,电磁结构动作,把快速排油阀打开开始排油。在 K2 整定延时过后,延时常开触头接通,K3 继电器线圈通电,常开触点闭合,开启

阀把氮气瓶打开,氮气通过减压阀、开启阀、注氮管路进入油箱底部,降低油箱内氧气浓度,迫使油箱内部变压器油循环,使油箱下部较低温度的油和顶层高温油混合,消除热油层,并使表层油温度降到闪点之下,从而阻止油箱内部起火。

根据资料记载和运行统计,国内已安装投运的排油注氮自动灭火系统运行正常、报警灵敏、维护简便,基本适应无人值班变电站的要求,因此,有必要在电力系统变电站建设中推广和采用排油注氮自动灭火系统。

3 无人值班变电站防火系统应注意的问题

- 1)对无人值班变电站,设计单位应根据变电站规模大小,在消防监督管理部门配合下选择与之相适应的自动灭火系统,并将变电站需保护的空間设计为已选定的灭火系统的保护范围以内。
- 2)排油注氮自动灭火系统由多个承压为 42 kg/m<sup>2</sup> 压力的药剂瓶和多个储存压力为 60 kg/cm<sup>2</sup> 压力的氮气动力瓶并联组成,因此,这一系统只要管理得当运行正常便是最理想的安全保障系统,但为预防人为因素以外的事故发生,压力容器间应设在专门钢瓶间内。
- 3)对新建无人值班变电站,应将土建工程与自动灭火系统管件铺设同时施工,按设计要求留出所需要的预埋件,以便缩短工期,减少费用,同时验收,同时投运。

4 建议

国家电力主管部门和消防监督管理部门应尽快组织力量总结经验,制订相应的无人值班变电站消防管理规定及定期巡视、检修、检测以及技术培训等方面的规章制度,使无人值班变电站消防管理做到有章可循,切实有效地提高无人值班变电站的安全性、可靠性。

(收稿日期:2007—01—10)

# 基于统一平台技术的智能操作票系统的应用

罗 劲

(成都电力局, 四川 成都 610016)

**摘 要:** 利用网络平台、智能仿真技术, 完成变电站多功能智能操作票系统。系统支持操作票自动规则校验及操作票自动执行功能, 以及智能操作票在各种模式下的实现方式。

**关键词:** 典型操作模式; 智能操作票; 专家系统; 系统模式

**Abstract:** The multifunctional intelligent operation order sheet system in substation is realized by using network platform technology and intelligence simulation technology. The system can accomplish automatic rule checkout, execute the operation order sheet automatically, and implement the intelligent operation order sheet in all kinds of modes.

**Key words:** representative operation mode; intelligent operation order sheet; expert system; system mode.

中图分类号: TM732 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)02-0028-02

## 1 三种典型操作模式的介绍及比较

随着电力系统无人值班变电站改造的不断深入和集控站模式的推出, 常规有人值守变电站逐渐退出, 对变电站的设备操作将从以就地操作为主逐渐过渡到可以在就地、当地监控、集控中心等任意地点安全操作。作为变电倒闸操作中重要组成部分的倒闸操作票, 其使用效率的高低, 将直接影响到变电运行的工作效率。下面以三种典型操作票开票模式之间优、缺点的比较, 介绍了变电站智能操作票系统的设计原理、技术特点、体系结构和系统功能。

### 1.1 常规有人值守变电站开票模式

该模式是目前使用较为广泛的电气设备倒闸操作模式。其运行方式是: 在接到调令, 确定操作任务后, 由变电站值班员填写操作票, 经值班长审批, 按值班调度员命令执行倒闸操作。该方式只能在站端受命, 方式单一。

### 1.2 无人值守变电站开票模式

无人值守的变电站, 一般由操作队人员完成, 和有人值守变电站相似, 仍然实行到变电站就地操作。调度值班员利用调度自动化 SCADA 系统对变电站进行监控, 一般只进行分闸、合闸及调压等单一的操作。该模式存在明显的缺点: 各变电站站端不具备填写、打印操作票的功能, 连续操作、送电操作还需先回中心打印操作票, 再下站操作, 这增加了值班员的工作量; 如遇调度根据电网运行情况临时调整调令时, 值班员就需回中心修改操作票, 若时间紧急, 便只能用

手填写操作票进行操作。这种操作方式既增加了运行值班员的工作量, 又大大降低了工作效率。

### 1.3 集控中心智能操作票开票模式

该方式是一种集合操作的模式。接到调令后, 集控中心操作队人员在中心填写操作票, 操作票填写完毕后, 可就地出票后携带操作票到站操作, 也可通过系统网络传输至变电站站端微机出票操作, 也可在变电站当地直接出票操作。各站站端智能操作票专家系统与中心主站系统联网, 实现数据、信息即时共享的功能。该模式能减轻运行值班人员的工作负担, 提高工作效率, 提高变电运行管理水平。

## 2 系统技术原理及特点

### 2.1 统一的支撑平台

智能操作票系统采用全新的面向对象技术和模块设计方法, 把系统分成两部分。一是底层支撑平台, 包括网络通讯子系统、数据库子系统、图形界面子系统、报表管理子系统和系统管理子系统; 二是上层应用软件: 包括操作票智能生成系统、操作票执行系统、操作票管理系统、人员权限管理系统等。实现了统一操作界面、统一维护修改、统一管理。

### 2.2 专家系统

系统运用专家系统的思想来设计, 通过建立典型间隔模型(单母线间隔、双母线间隔、旁路间隔等等)、运行方式模型(运行状态模型、检修状态模型、热备用状态模型、冷备用状态模型)等数学模型实现知识库的建立; 通过采集 SCADA 系统的遥信信息来获取各

关键点状态量进行知识获取,推理机利用这些拓扑数据来匹配并激活相应的规则,进行正向推理和反向推理,得出当前的运行方式和间隔类型,并寻找相关的知识项,最终形成满足条件的操作票;同时,系统具有自学习功能。

专家系统及推理机技术比较复杂,下面简要介绍其实现原理:

专家系统一般由知识库、知识获取、推理机、数据库等几部分组成。

知识库是专家系统的核心,它主要是根据专家知识和经验形成的一系列规则。根据分析对象的不同,知识库将划分为不同的模块,知识的表达方法也有多种。本系统拟采用产生式规则的表达方法。

推理机是根据输入的信息,结合知识库的规则进行推理。目前有多种经典的推理策略,本系统拟采用正向推理及反向推理及混合式推理策略。

数据库存放推理所需的各种数据和结论,实现数据的存储、管理和信息交换等功能。专家系统的数据库也可以用于管理、参考等方面。

知识获取是专家系统的重要组成部分,它是将实际中不断出现的新问题经过总结后添加到知识库中。常用的方法有机械式学习、专家指导学习、通过实例学习等。由于实现机器自学习存在相当大的难度,本系统主要通过机械式学习和专家指导学习的方法实现规则的动态维护。

### 2.3 基于实时信息和图形的系统

系统采用基于调度 SCADA 图形和操作票图形生成技术,解决了操作票的实时性要求,保证了操作票生成、预演、执行、检验的正确性。图形系统采用面向对象技术开发的全图形、全汉化系统,功能丰富、操作简洁、显示灵活、反应快速。同时,提供功能强大、操作方便的图形编辑器,各种电力系统中的对象可由图元表示,图元可用户自定义和生成。

### 2.4 信息整合

系统通过统一平台技术实现了操作票专家系统、五防系统、监控系统,变电站综合自动化系统的信息整合。

### 2.5 系统主要特点

1) 基于电网模型的自动成票推理:操作票系统可以根据用户指定的操作主设备和操作目的,根据电力设备当前运行状态,自动推理出一张操作票。操作的主设备可以是一次设备和部分二次设备。

2) 多种成票方式:系统提供多种成票方式。最常用为点图成票,即在网络接线图或厂站接线图上选中要操作的设备,系统自动生成一张符合要求的操作票。

3) 图形预演:系统可以根据指定的操作票执行操作预演,模拟操作票的执行过程。在预演中如果发现不符合安全操作的情况,将提示用户。

4) 安全校核:无论是自动生成还是手工生成的操作票,系统都将在编辑完成时、预发前和执行时都进行安全校核,以避免误操作带来的事故。

5) 危险点分析:系统还可以对操作票执行后所带来的后果进行危险点分析。如果系统发现执行某个操作票会产生危险点,将提示使用人员。

6) 全过程流程化管理:系统管理操作票生成、审核、签发和执行的整个生存周期。包括控制操作票执行流程中的每一步活动中有各种角色对操作票的访问权限;记录拟票人、发令人、拟票时间、发令时间等等,控制每个活动的流转方向等。

7) 自动生成运行值班日志:系统可以根据运行人员工作自动生成每班的运行值班日志。

8) 操作票与运行值班日志的查询管理:可以查询、统计历史操作票,并能分析出开票正确率等信息。

## 3 系统模式

### 3.1 集控中心模式

在集控中心模式下,集控中心值班员接到调度任务后,使用操作票智能生成系统开出操作票后,首先应用五防规则进行校验,通过校验后确认当前操作人和监护人是否具有相关的操作权限。通过权限确认后,则从第一步开始逐步解析操作步骤,并将遥控指令发送给调度监控系统(命令格式:目的设备地址|站号,设备点号),操作项目)。同时记录操作人、监护人信息和操作时间。

集控中心的调度监控系统接收到五防机的遥控指令后,解析命令格式,获取目的变电站信息和目的设备信息后,经由电力远动通道,向变电站设备或综合自动化装置发送遥控命令,执行操作。

遥控操作完成后,将操作的反馈信息和当前目的设备状态信息发回五防系统,五防系统对操作结果进行检查,如果操作没有成功,则中断本张操作票的执行;如果操作成功并且实时状态 (下转第 71 页)

将相关数据代入(2)、(3)式,以电流互感器标定电流的 80%作为负载平均电流,得到线路的有、无功功率损耗分别为:

$$\Delta P_l = 3 I_l^2 r_l 10^{-3} = 3 \times 320^2 \times (0.240\ 850 \times 9.45) \times 10^{-3} = 699.2\ \text{kW}$$

$$\Delta Q_l = 3 I_l^2 x_l 10^{-3} = 3 \times 320^2 \times (0.462\ 203 \times 9.45) \times 10^{-3} = 1\ 341.8\ \text{kvar}$$

将采样时间 35 d 共 840 h 代入上式,得到理论有功损失有、无功电量为:

$$\Delta W_P = 3 \times 320^2 \times (0.240\ 850 \times 9.45) \times 840 \times 10^{-3} = 587\ 325.63\ \text{kW} \cdot \text{h}$$

$$\Delta W_Q = 3 \times 320^2 \times (0.462\ 203 \times 9.45) \times 840 \times 10^{-3} = 1\ 104\ 432\ \text{kvar} \cdot \text{h}$$

从计算获得的有、无功损耗量值看,均比采样期间主、副计量装置实际记录量差值 1.78%和 20.85%高,这是因为理论线路损耗功率计算存在技术偏差以及线路参数理想化处理所致。以上推算主要是表达

趋势推演,虽不够精确,但其线路上存在高达 20.85%的损耗是毋庸置疑的。

## 4 结论

“三氮线”长期输送较大电量,负荷侧功率因数在 0.96 以上,在传输这么大的电能时,线路上产生的无功损耗量值,从以上的分析计算看,并与其用电基数相比,以及加权平均功率因数数值相比,其合理性得到证实。

综上所述,线路电抗所产生的无功损耗是确实存在的,站、厂之间的 35kV 输电线路在传输电力时的电抗值以及电抗性质(容、感性)是影响两端无功电量的重要因数。而线路电抗的性质,以及负载力率的变化相叠加将反映在主、副计量装置的量值上,了解两侧无功电量的组成,可以为以主表计量信息为计费依据提供更有力的技术支持。

(收稿日期:2008—01—29)

(上接第 29 页) 保持一致,则继续下一操作步骤的执行(所有步骤循环执行)。

在执行过程中,如果出现操作失败或实时状态不一致的情况,则随时中断本张操作票的操作。

### 3.2 有人值守变电站模式

在有人值守变电站模式下,直接在变电站端开票;交由五防系统进行规则校验,确认当前操作人和监护人是否具有相关的操作权限。通过权限确认后,则从第一步开始逐步解析操作步骤,并将遥控指令发送给当地监控系统(当地功能)。(命令格式:目的设备地址(站号,设备点号),操作项目)。同时记录操作人,监护人信息和操作时间。

当地功能系统接收到五防机的遥控指令后,解析命令格式,获取目的设备信息后,直接向变电站设备或综合自动化装置发送遥控命令,执行操作。

遥控操作完成后,将操作的反馈信息和当前目的设备的状态信息发回五防系统,五防系统对操作结果进行检查,如果操作没有成功,则中断本张操作票的执行;如果操作成功并且实时状态保持一致,则继续下一操作步骤的执行(所有步骤循环执行)。

在执行过程中,如果出现操作失败或实时状态不一致的情况,则随时中断本张操作票的操作。

### 3.3 并发操作模式(远方和就地同时操作)

在实际的过程中,可能会遇到这样的情况,集控中心和变电站端同时对变电站的设备进行操作。这个时候就必须要考虑就地操作和远方操作的优先级问题。

原则上,就地操作的优先级最高,其次是远方的遥控操作。即先按照变电站端的开票→规则校验→自动执行这一流程进行就地操作;操作完成后将信息反馈到五防系统;接着按照集控站的自动执行流程,执行远方的操作任务。

## 4 具体运用

新都供电局下辖 1 个集控中心,1 座 220 kV 变电站,5 座 110 kV 变电站,4 座 35 kV 变电站。基于统一平台的变电站智能操作票系统的投运,进一步提高了变电站的安全防误水平和综合自动化应用水平,充分发挥了计算机网络技术、通信技术和自动控制技术的潜能。该系统的应用使操作票开票工作和倒闸操作这一系列复杂、繁重的工作,变为由计算机辅助自动控制完成,进一步促进电气一、二次设备自动控制水平的提高和电力系统自动化应用水平的提高。该系统在新都局的成功试运行,对成都电业局的其他分局配置该系统的工作具有指导意义。

(收稿日期:2007—12—08)

# 快速排序的 Dijkstra 算法在配网抢修路径中的应用

王倩, 吕林

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 配电网最佳抢修路径问题实际上属于城市交通网络中的最短路径问题。针对 Dijkstra 算法的优缺点及在电力行业中的广泛应用, 提出了一种改进的 Dijkstra 算法, 对存放临时标注节点的无序序列按照快速排序的方法来转化为有序序列。实践证明, 这种算法满足最佳抢修路径的要求。

**关键词:** 最短路径; Dijkstra; 快速排序

**Abstract:** The subject of the best rush repair path in distribution network belongs to the subject of the shortest path in urban traffic network. According to the advantages and disadvantages of Dijkstra algorithm and its wide application to electric power industry, an improved Dijkstra algorithm is put forward; in virtue of fast compositor, the out-of-order list that deposits the temporary label nodes is transferred to in-of-order list. The example shows the algorithm satisfies the need of best rush repair path.

**Key words:** shortest path; Dijkstra algorithm; fast compositor.

**中图分类号:** TM755 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2008)02-0030-02

随着城市配电网的发展, 用户不断增加, 配电网也日趋复杂。由于长期以来, 电力建设存在着重发电、轻输配电的问题, 使中国城市配网建设相对落后。中国的配网存在很多的问题, 具体表现在: ①电源布点不合理, 供电半径过长, 线损高; ②网络结构不合理, 使运行方式安排不够灵活; ③负荷增长飞速、电网建设用地紧张。因此, 配电网发生故障的可能性将是不可避免的。一旦停电, 将会给社会造成严重的经济损失和不良的影响, 所以当电力网络发生故障时能够及时排除故障, 恢复供电网的正常供电, 从而缩短停电时间, 使经济损失减少到最低就显得尤为重要了。

于是, 这就引出了配电网最佳抢修路径问题。配电网最佳抢修路径问题, 既是 GIS 系统网络分析中的一个研究热点, 也是 DMS 的重要组成部分, 其目的是根据发生故障的地点以及抢修队目前所处的位置, 及时派出抢修人员到达现场, 从而缩短停电时间, 减少经济损失。

## 1 技术现状

目前对于配电网最佳抢修路径技术的研究大多集中在最短路径算法的研究上, 解决最短路径问题的算法在诸多工程领域都有较强的实用价值。一般来说最短路径问题分为单源最短路径和全源最短路径问题, 公认的比较好的 Dijkstra 算法比较适合于单源

最短路径, 而 Floyd 算法适合用于求解全源最短路径。目前求最短路径的算法还有  $A^*$ , Bellman-ford, TQ, DKA, DKD,  $K(K \leq 3)$  条渐次最短路径搜索算法等。

对于求配电网最佳抢修路径, 最适合的是 Dijkstra 算法, Dijkstra 算法是目前许多工程解决最短路径问题的理论基础, 只是不同工程对 Dijkstra 算法采用了不同的改进方法。

### 1.1 Dijkstra 算法基本思想

对图  $G=(V, E)$ , 源点  $v \in V$ , 设置两个顶点的集合  $S$  和  $T=V-S$ , 集合  $S$  中存放已找到最短路径的顶点, 集合  $T$  存放当前还未找到的最短路径的长度最短的顶点。初始状态时, 集合中只包含源点  $v_0$ , 然后不断从集合  $T$  中选取到顶点  $v_0$  路径长度最短的顶点加入到集合  $S$  中, 集合  $S$  中每加入一个新的顶点  $v_0$ , 都要修改顶点  $v_0$  到集合  $T$  中剩余顶点的最短路径长度值, 集合  $T$  中各顶点新的最短路径长度值为原来的最短路径长度值与顶点  $v_0$  的最短路径长度值加上  $v_0$  到该顶点的路径长度值中的较小值。此过程不断重复, 直到集合  $T$  的顶点全部加入到  $S$  中为止。这样就可以得到最短路径的值。在这种基于贪心策略的 Dijkstra 算法的过程中, 由于 Dijkstra 在运行时要执行两套嵌套的 FOR 语句, 因此其总的时间复杂度是  $O(n^2)$ 。

### 1.2 Dijkstra 算法的应用

在电力行业中, 改进的 Dijkstra 算法更是应用广

泛。利用三个数组存储结构来存储属性值<sup>[1]</sup>,通过直接插入的排序方法改进<sup>[2]</sup>,A \* 算法<sup>[3]</sup>,利用完全二叉树的堆排序方法来改进<sup>[4]</sup>,利用节点—弧段存储结构改进<sup>[5]</sup>等等。通过改进的 Dijkstra 算法在求取最短路径时无论在时间还是空间复杂度上都比传统算法改善了很多。

1.3 Dijkstra 算法的优缺点

Dijkstra 算法在电力行业中的应用远远不只以上的这些,下面将针对以上常见的算法来概括一下它的优缺点。经典的 Dijkstra 算法的主要不足之处是:临时标注节点以无序的形式排列,这样,在每次求最短路径时,要遍历所有节点,这严重影响了算法的执行速度。优点在于它形式简单,易于明白。

从文献[1]~[5]可以总结出,对 Dijkstra 算法的改进,从对临时标注节点的排序着手是一个改进方向。

2 基于按照分治和快速排序的方法改进 Dijkstra 算法

2.1 分治和快速排序的算法的思想

快速排序算法基本思想是:首先将要排序的数据按照一个基准值分割成独立的两部分,其中一部分的所有数据都比另外一部分的所有数据小,分别对这两部分记录继续进行排序,以达到整个数列有序。

假设有 A[1...N]数组,则快速排序的算法步骤是:

- ①设置两个变量 I、J,排序开始的时候 I:=1, J:=N;
- ②以第一个数组元素作为基准值,赋值给 X,即 X:=A[1];
- ③从 J 开始向前搜索,即由后开始向前搜索(J:=J-1),找到第一个小于 X 的值,两者交换;
- ④从 I 开始向后搜索,即由前开始向后搜索(I:=I+1),找到第一个大于 X 的值,两者交换;
- ⑤重复第 3、4 步,直到 I=J;
- ⑥第一遍排序完成。再调用快速排序对独立的两部分进行排序,依次下去,直到每部分都只有一个元素为止。

2.2 改进的 Dijkstra 算法的具体步骤

- (1)首先存放最短路径的集合 S 为空。
- (2)对存放临时标注节点的集合 T,调用分治法

和快速排序的算法,使序列有序;

(3)选择节点 node[j],使得 cost[j]是 nodelist 中权值最小的,其中,node[j]为当前求得的从源节点出发的最短路径的终点。

(4)对从 node[j]出发的结点 node[k]进行优化,既若 cost[j]+cost[j,k]<cost[k],则修改 cost[k]=cost[j]+cost[j,k];将 node[k]加入集合 S;

- (5)重复(3)、(4),直到 node[j]等于目标结点;
- (6)计算出最短路径,算法结束。

2.3 最短路径的具体实现步骤

- (1)选择要进行计算的源以及目标两个节点(sourcenode,desnode)。
- (2)判断两节点是否连通,若连通则进行(3),否则退出算法。
- (3)用改进的 Dijkstra 算法计算两节点之间的最短路径。
- (4)输出最短路径,并退出。

3 在配网抢修路径中的应用

3.1 数学模型

设 G=(V, E)为一有向图, V 为节点集, E 为边集, X<sub>ij</sub>为边(i, j)是否存在的逻辑指示因子, W<sub>ij</sub>为存在边(i, j)的权值。对 i∈V, k∈V, P(i, k)为点 i 到点 k 的一条路径。要求抢修队 i 到出事地点 j 的最短路径,即是数学表达式  $F=\min_{(i,j)\in E} \sum W_{ij}X_{ij}$ 。

3.2 实例

如果城市某处 e 发生配网故障,而抢修队在 s 处,它的网络拓扑图为图 1。

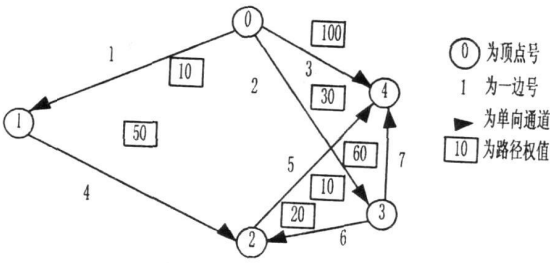


图 1 网络拓扑图

图 1 即是求顶点 0 到顶点 5 的最短路径。  
无序序列数组为[10, 50, 20, 60, 10, 30, 100],对它们进行快速排序,由以上的数字可 (下转第 41 页)

3 结 论

从仿真结果可以看出,所建模型工作正常、稳定。软件如果能够为其配上数据采集卡和相应的硬件驱动,只需要将程序稍做改动,将采集到的数据代替信号输入,再加上闪变评价部分,便可用于工程实测。使用 LabVIEW 进行软件设计具有实用性突破;工作界面方便快捷,便于操作,结果输出直观,便于观察记录。

参考文献

[1] GB12326 — 90. 电能质量 电压允许波动和闪变[S].  
[2] 孙树勤. 电压波动与闪变[M]. 北京:中国电力出版社,

1998.  
[3] IEC. Publications prepared by technical committee. 1997, 61000—4—15, No. 77. Flickermeter—functional and design specifications[S].  
[4] 向学军,杨盛,刘平. 电压闪变仪的设计与仿真[J]. 微计算机信息,2006,22(7).  
[5] UIE. WG. 1991. Disturbances flicker measurement and evaluation[S].  
[6] 高师湃,李群湛,贺建闽. 闪变测量系统研究[J]. 电力自动化设备,2000,22(6).

作者简介:

罗述俊(1983~),男,四川江油人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析。  
贺建闽(1955~),男,副教授,研究方向为电气化铁道供电系统,电网电能质量测控技术。(收稿日期:2007—11—10)

(上接第 31 页) 看出,右边的所有数都大于或等于 10,所以只需对 A[2]…A[7]进行排序。

A[2] A[3] A[4] A[5] A[6] A[7]  
50 20 60 10 30 100

第一次交换后:30 20 60 10 50 100(按照算法的第三步从后面开始找)

第二次交换后:30 20 50 10 60 100 (按照算法的第四步从前面开始找>X 的值,65>49,两者交换,此时 I:=3 )

第三次交换后:30 20 10 50 60 100 (按照算法的第五步将又一次执行算法的第三步从后开始找)

此时, i=j,第一趟排序结束,结果为:30 20 10 50 60 100,

再调用快速排序对 50 前后的两部分分别进行排序,最后结果为:10 10 20 30 50 60 100。

最后再调用 Dijkstra 算法,求出最短路径通道为 0→3→2→4:60。

4 结 束 语

前面提出的改进的最短路径算法,是借助于地理信息系统的实时信息,采用分治和快速排序的排序方法来进行改进的 Dijkstra 算法,这种算法时间复杂度为  $O(n * \log^2 n)$ ,空间复杂度为  $O(n)$ 。相比于经典的 Dijkstra 算法,它的效率无论在空间和时间上都有了大幅度的提高。该指标能满足配电网最佳抢修路径的要求。

参考文献

[1] 叶品勇,都洪基,沈曦 .Dijkstra 算法在最佳抢修路径中的应用[J]. 继电器,2006,34(12),39—41.  
[2] 李宁宇,刘玉树 .改进的 Dijkstra 算法在 GIS 路径规划中的作用[J]. 计算机与现代化,2004,(9),12—14,17.  
[3] 陈益富,卢潇,丁豪杰 .对 Dijkstra 算法的优化策略研究[J]. 计算机技术与发展,2006,16(9),73—75,78.  
[4] 李元臣,刘维群 .基于 Dijkstra 算法的网络最短路径分析 .微计算机应用[J],2004,25(3),295—298,362.  
[5] 张池军,杨永健,赵洪波 .基于路径依赖的最短路径算法的改进与实现[J]. 计算机工程与应用,2006,(25),56—58.  
[6] 孙才新,刘理峰. 电力地理信息系统及其在配电网中的应用[M]. 北京:科学出版社,2003.  
[7] 黄远 .Dijkstra 算法的基本思想及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.  
[8] 赵文静,祁飞 .数据结构与算法[M]. 北京:科学出版社,2005.  
[9] Benjamin F Zhan. Three Fastest Shortest Path Algorithms on Real Road Networks : Data Structures and Procedures[J] . Journal of Geographic Information and Decision Analysis , 1998 , 1 (1) : 69 — 82.  
[10] Pierre A. Humblet .Another Adaptive Distributed Shortest Path Algorithm. IEEE Transactions on communications, 1991, 39 (6),995—1003.

作者简介:

王倩(1980~):女,硕士研究生,助理工程师,研究方向为配电网自动化。  
吕林(1963~):男,副教授,研究方向为分布式发电,配电网自动化。(收稿日期:2007—11—13)

# 一起全站失压事故的调查分析

刘俊松<sup>1</sup>, 毛义鹏<sup>2</sup>

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 成都电业局, 四川 成都 610061)

**摘 要:**通过一座 110 kV 内桥接线变电站的失压事故调查, 重点就差动保护电流采样回路故障导致的主变差动保护误动原因、操作回路中合位继电器 HWJ 与合后继电器 HHJ 接点的混淆使用导致的备自投拒动原因进行了详细分析, 并提出了相应的防范措施。

**关键词:**继电器; 误动; 拒动; 分析

**Abstract:** After investigating the loss of voltage fault in one 110 kV substation with internal bridge connection, the reasons of miss operation of main transformer differential protection are analyzed in detail, which probably is the trouble of the sampling loop of the differential protection current. The reasons of miss trip of backup power switchover unit are also discussed, which must be caused by the misuse of the contacts of close relay HWJ and the after-close relay HHJ. Furthermore, the solution methods are proposed according to the above problems.

**Key words:** investigation; miss operation; miss trip; analysis.

中图分类号: TM732 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)02-0032-01

## 1 事故时的运行方式

如图 1 示, 2007 年 3 月 3 日, 事故前大佛站运行方式为: 110 kV 侯佛线作为全站主供电源, 110 kV 内桥开关 130 和 10 kV 分段开关 930 开关处于合位, 182 开关热备用, 110 kV 备自投处于投入状态, 全站 1、2 号主变总负荷达到 50.1 MW。运行方式如图 1 示。

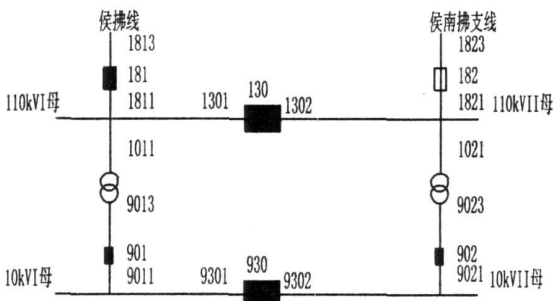


图 1 大佛站运行方式示意图

## 2 事故经过

2007 年 3 月 3 日 21:20, 在无故障情况下, 大佛变电站 1 号主变差动保护误动作, 181、130、901 开关跳闸, 由于 110 kV 备自投被闭锁, 备用线路侯南佛支线 182 开关未合上, 导致大佛变电站全站失压。

事故发生后, 将 1 号主变隔离, 由线路侯南佛支

线供全站负荷, 于 22:16 对 2 号主变及 10 kV 所有出线恢复送电。

## 3 事故原因分析

### 3.1 1 号主变差动保护误动作原因

从 1 号主变保护装置录波图上看, 1 号主变差动保护 A 相电流发生短暂(约 20 ms)突变后马上就恢复成正常的负荷电流, 正是 A 相电流的短暂突变增量(二次值约为 40 A)导致了差流的产生, 1 号主变差动保护启动, 181、130、901 开关跳闸。

大佛变电站安装了靠电流和电压突变启动的录波装置, 如果 A 相发生了故障, 必定会引起电流及电压的波动, 从而录波装置启动录波, 而事故后查看录波装置并无相关记录; 侯佛线对侧武侯站的录波装置也无故障录波纪录, 由此可以推断大佛站电气一次设备并未发生实际故障。后经现场检查证实, 1 号主变差动保护范围内确无任何故障点。

事后, 对差动保护的电流采样回路进行加流试验, 一切正常。为避免电流采样量再次出现瞬间突变, 对原故障装置的 VFC 插件、CPU1 插件和 MONI 插件进行了更换。更换下来的问题插件送生产厂家作进一步深入分析(1 号主变差动保护装置型号为 LFP-972, 已经运行了 5 年), 分析结果证明在运行过程中, 电流采集回路中一电容元件值 (下转第 68 页)

针对值班人员二次设备知识比较缺乏的情况,可开展继电保护专项培训,继保人员现场培训等培训方式,以全面提高技术水平为培训目标。

## 2.6 健全规章制度

不断完善倒闸操作相关的各种制度、规范,将各种措施进行制度化,并切实落实到实际的工作当中去,作为明确的工作要求去改变值班人员的操作习惯,做到在确保安全的前提下,尽量提高操作效率。

## 3 结论

随着电网规模的不断发展壮大,变电站的不断增加,倒闸操作次数也将快速的增长。要满足当前电网

发展的需要,提高倒闸操作效率已是势在必行。倒闸操作作为电网工作的重要环节,其效率的提升将直接影响到整个电力系统各项工作的发展。倒闸操作效率的提高,缩短了设备停电时间,从而提高了设备运行可靠性,为电网的安全、稳定运行奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 四川省电力公司·四川省电力公司变电站管理规范(试行)[Z]·川电生技(2004)90号.
- [2] 国家电网公司·变电站管理规范[Z]·国家电网生(2006)512号.
- [3] 四川省电力公司·四川省电力公司提高变电站倒闸操作效率的措施(试行)[Z]·川电生技(2007)181号.

(收稿日期:2008—02—14)

(上接第32页) 发生短暂突变是主变差动保护误动的原因。

## 3.2 110 kV 备自投被闭锁原因

从SOE记录“1DL HHJ 动作放电”可以得出:HHJ闭锁了110 kV 备自投(意思是由于HHJ合闸后)的返回,110 kV 备自投被放电闭锁)。

事后检查181开关操作回路,操作板上的合位继电器(HWJ)和合后继电器(KKJ/HHJ)共用一个接点出口,当板上5和5'短接后,出口为合后(KKJ/HHJ)信号,如果未短接5和5',则出口为合位(HWJ)信号,如图2示。

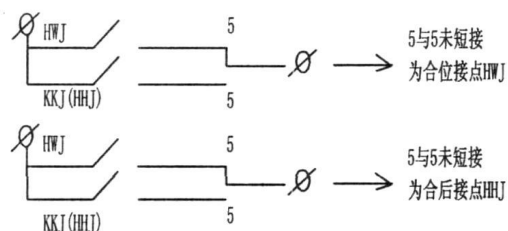


图2 HWJ 和 HHJ 接点示意图

而实际上操作板上该处未短接,备自投所接的HHJ合闸后)接点实际上是HWJ(合闸位置)接点。HWJ合闸位置)接点在181开关跳闸(不论跳闸原因)后就返回了;而HHJ合闸后)接点必须是181开关在正常手动或遥控操作跳闸后才返回,在事故跳闸后不返回。此次事故中当1号主变差动保护动作,181开关跳闸,HWJ(合闸位置)接点返回,110 kV 备自投被放电闭锁,不能启动。

因此181开关操作板上的5与5'未短接,HWJ接点未改成HHJ接点是110 kV 备自投在事故跳闸后被放电闭锁的原因。

## 4 防范措施

1)生产厂家在装置上提供了2种接点形式(合后和合位),设计单位应根据装置说明和现场实际需要,对加入系统的接点形式予以明确。在设备加入系统时的调试验收环节,继保人员应根据设计要求和现场需要进行必要的改接,对设计图有疑问时,必须向设计单位询问清楚。

2)继保人员应对备自投传动试验方法进行完善,确保备自投各个环节在试验中得到校验。母线失压情况有两种,一种是对侧出线开关跳闸引起,另一种是保护动作本侧进线开关跳闸引起。以往的备自投传动试验采用的是断开两段母线TV二次空气开关造成备自投装置上两母线失压进而动作的方法,该方法实际模拟的仅仅是第一种母线失压情况,有片面性,合后继电器(KKJ/HHJ)的逻辑状态没有得到完整检验。

3)对所有变电站备自投使用的HHJ接点情况进行全面清查,防止其他站有类似的HHJ和HWJ接点混用的情况存在。应特别注意近几年改扩建的变电站,原来无备自投,改扩建后新增了备自投装置的,容易忽略对原操作板的修改。

(收稿日期:2008—01—18)

# 发电机暂态过电压统计分析

杨 琳<sup>2</sup>,方 晴<sup>1</sup>,李群湛<sup>2</sup>,李建明<sup>3</sup>

(1. 广元电业局,四川 广元 628000;2. 西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031;  
3. 四川电力试验研究院,四川 成都 610072)

**摘 要:**电力系统中旋转电机随时都可能受到来自电网中的各种暂态电压的冲击,进而危害发电机绝缘安全。以 13.8 kV 发电机过电压监测数据为例,通过理论分析和大量的统计计算,得出了一年中侵袭发电机各种过电压分布情况。针对操作过电压侵袭发电机的频繁性和危害的严重性,对操作过电压进了详细的统计分析,得出了三相对地操作过电压幅值倍数的概率分布。

**关键词:**暂态过电压;统计分析;正态分布

**Abstract:** Rotating electrical machine is often subjected to the invasion of different transient over-voltage in power system, and then it can damage the security of generator insulation. Taking the over-voltage data monitored in 13.8kV generator for example, after a large work of theoretical analyses and calculations, the distribution of different over-voltage in a year is obtained. Furthermore, after the detailed statistic analyses of switching over-voltage, the probability distribution of amplitude of three-phase switching over-voltage is obtained.

**Key words:** transient over-voltage, statistic analysis, normal distribution.

中图分类号:TM307 文献标识码:B 文章编号:1003-6954(2008)02-0037-03

现代电力系统已形成超高压、大电网、大机组的布局,越来越多的大型水电机组并入 110 kV 及以上大电网中。随着电压等级的提高,电力系统内部过电压等级也随之增大,加之大多水电站处于山地多雷区域,雷击线路引起雷电过电压入侵发电厂变电所事故也时有发生。为了保证机组安全、可靠、经济运行,迫切需要对发电机组进行暂态过电压的监测与研究。随着过电压研究工作的深入和绝缘配合方法的改进,测试手段更先进,涉及过电压参数越来越多,并着重于统计规律和相关分析研究<sup>[1]</sup>。

以 13.8 kV 发电机过电压监测数据为例,通过理论分析和大量的统计计算,给出了一年中侵袭发电机各种过电压分布情况,针对操作过电压侵袭发电机的频繁性和危害的严重性,对操作过电压进行了详细的统计分析,得出了操作过电压三相对地幅值倍数的概率分布。

## 1 数理统计在过电压技术中的应用

数理统计在高电压技术应用很广,用统计方法来分析过电压是一个重要的课题。结合操作过电压的特点而建立数学模型,在这一基础上根据一维数据样

本,计算相对地过电压、持续时间等有关参数的样本统计值,且进行分布函数的假设检验和两个随机变量线性相关性的假设检验。

### 1.1 频数分布曲线与频率分布曲线

在科学实验中,通过试验获得大量的测试数据,这是对客观事物进行深入研究的基础。由于测试数据的波动性,这些原始数据参差不齐,直观的看,常常难于看出其中的规律性,只有用科学的方法加以整理之后,才能发现其中的规律性。因此,数据整理是对测试数据进入深入研究的第一步。

### 1.2 样本测定值的分布

采取抽样检验的方法,通过样本测定值了解样本分布,并由此去推断总体。为了使这种统计推断的结论正确可靠,应满足以下 3 个条件:保证所抽样本对总体有充分的代表性;采用科学的抽样方法进行抽样;在所获样本资料的基础上,运用正确的方法进行统计推断。

### 1.3 统计检验

统计检验在分析测试数据的统计分析中有着广泛的应用,可用来检验与判别测试数据中的异常值,检验平均值,判断因素效应与系统误差,检验方的一致性,判断测试方法与测试结果的精度,检验测定值

分布类型等<sup>[2]</sup>。

## 2 一年中侵袭发电机过电压分布情况

某水电厂发电机定子电压 13.8 kV,投入方式为经架空线路与 220 kV 升压变压器相联接入电网。收集到电厂一年中过电压监测结果,经整理得到 63 组有效数据。表 1 列出了各类过电压次数统计情况。

表 1 过电压发生次数统计

| 过电压类型    | 发生次数 |
|----------|------|
| 雷电过电压    | 1    |
| 操作过电压    | 54   |
| 谐振过电压    | 6    |
| 故障引起的过电压 | 2    |

由表 1 可看出,在监测结果中,绝大部分是操作过电压,达 54 起,占到总过电压频数的 85.7%,雷电过电压发生一起,为直击雷事故,故障过电压均为单相接地事故。就全年来看,每个月发生的过电压次数也不尽相同,其中 5~7 月过电压发生次数较多。图 1 列出了电厂一年中各月过电压发生的次数。

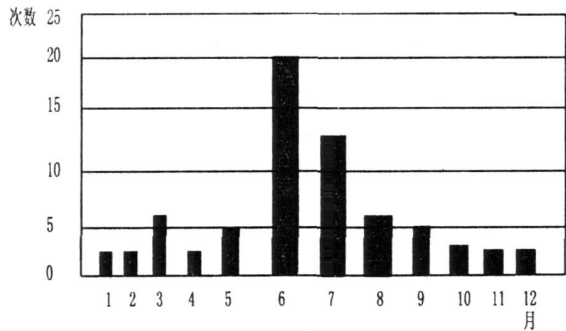


图 1 一年各月中过电压发生频度

在过电压发生次数及发生时间的数据统计中,其随机较大。由于目前只收集到 2007 年整年的过电压数据,故对过电压发生频度只作频率分析,要更深入地分析得出其概率分布曲线,必需有待于更多的数据样本。

## 3 发电机操作过电压统计分析

发电机母线端现场监测结果中绝大部分是操作

过电压,介于操作过电压在电力系统中发生的频率及其对发电机绝缘危害的严重性,这里重点研究操作过电压的统计分析。

监测得到的操作过电压数据共有 54 组,为简化计算,现在任取其中 10 组数据进行统计计算,因三相过电压数据并不完全独立,存在相关性,故选取数据时应三相数据一起取舍<sup>[1]</sup>。

表 2 操作过电压三相相对地最大倍数

| 发生时间     | A 相  | B 相  | C 相  | 持续时间        |
|----------|------|------|------|-------------|
| 4 月 1 日  | 2.08 | 2.58 | 2.20 | 365 $\mu$ s |
| 5 月 22 日 | 1.36 | 2.07 | 1.85 | 112 $\mu$ s |
| 5 月 26 日 | 1.53 | 2.30 | 2.10 | 119 $\mu$ s |
| 6 月 14 日 | 1.66 | 2.14 | 2.38 | 157 $\mu$ s |
| 6 月 23 日 | 2.16 | 2.17 | 2.16 | 117 $\mu$ s |
| 6 月 30 日 | 2.43 | 1.88 | 2.47 | 94 $\mu$ s  |
| 6 月 18 日 | 2.39 | 3.96 | 1.93 | 6.19 ms     |
| 7 月 5 日  | 3.4  | 3.42 | 2.21 | 1.63 ms     |
| 7 月 15 日 | 1.90 | 2.29 | 1.34 | 106 $\mu$ s |
| 7 月 23 日 | 3.43 | 1.82 | 2.83 | 3.25 ms     |

通过前述数理统计方法将上述数据由小到大分为 5 组,分别计算出其组距  $2.62/5=0.524$ ,算术平均值  $m^*=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i=2.283$ ,频数、频率  $P_i$  和累计频率等。由上述数据可得其分组统计数据表及直方图。

表 3 操作过电压分组统计表

| 分组          | 组中<br>$x_i$ | 频数<br>$m_i$ | 频率<br>$P_i$<br>(%) | 累计频<br>率(%) | 频率/<br>组距 |
|-------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|-----------|
| 1.340~1.864 | 1.524       | 5           | 16.7               | 16.7        | 0.319     |
| 1.864~2.388 | 2.097       | 15          | 50.0               | 66.7        | 0.954     |
| 2.388~2.912 | 2.515       | 6           | 20.0               | 86.7        | 0.381     |
| 2.912~3.436 | 3.427       | 3           | 10.0               | 96.7        | 0.190     |
| 3.436~3.960 | 3.960       | 1           | 3.30               | 100         | 0.063     |
| $\Sigma$    |             | 30          | 100                |             |           |

由直方可直观的看出,操作过电压倍数频率统计分布近似服从正态分布。为了验证这一假设,一般采用统计检验的方法。采用皮尔逊的  $\chi^2$  来检验。即

$$\chi^2=\sum\frac{(m_i-nP_i')^2}{nP_i'} \tag{1}$$

$$m=\sum x_iP_i \tag{2}$$

$$(S)^2=\frac{1}{n-1}\sum (x_i-m)^2 \tag{3}$$

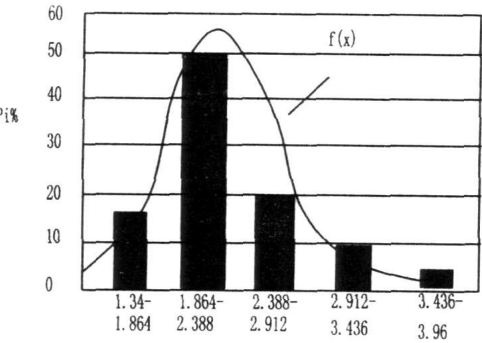


图 2 操作过电压倍数频率统计分布直方图

由以上三式分别计算出过电压数据的数学期望  $m=2.28$ , 方差  $S=0.587$  及  $\chi^2$  的数据如表 4 所示。

表 4  $\chi^2$  计算后数据表

| 分组          | 频数<br>$m_i$ | $P_i'$ | $nP_i'$ | $\frac{(m_i-nP_i')^2}{nP_i'}$ |
|-------------|-------------|--------|---------|-------------------------------|
| 1.340~1.864 | 5           | 0.18   | 5.4     | 0.03                          |
| 1.864~2.388 | 15          | 0.33   | 9.9     | 2.63                          |
| 2.388~2.912 | 6           | 0.29   | 8.7     | 0.84                          |
| 2.912~3.960 | 4           | 0.14   | 4.2     | 0.01                          |
| $\Sigma$    | 30          | 0.94   |         | 3.51                          |

取  $\alpha=0.05$ , 即显著性水平为 5%, 相应自由度  $f=4-2-1=1$ , 由  $\chi^2$  分布表中查出得出  $\chi^2_{0.05,1}=3.841$ ,  $\chi^2=3.51<3.84$ , 故可认为正态分布与假定实验结果并无矛盾<sup>[3]</sup>。这样一来, 三相对地操作过电压幅值的概率密度就可以写成:

$$f(x)=\frac{1}{0.587\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-2.28)^2}{2\times 0.587^2}} \tag{4}$$

发电机击穿电压一般在 5p.u 以上, 过电压统计结果中操作过电压幅值最高达 3.59p.u, 均值为 2.28p.u, 虽未超过击穿电压, 但其作用相当频繁。随着作用次数的增多, 会对绝缘产生累积效应逐渐削弱其绝缘水平。

中国电机绝缘水平较低, 很多机组仍使用 A 级、B 级绝缘, 且运行时间较长, 多数已进入绝缘老化期, 耐压水平已降低很多, 加之当冲击电压入侵定子绕组时在绕组中引起的电压分布不均, 其首端绕组上承受的过电压将更高。因此, 在均值 2.28p.u, 最大幅值 3.59p.u 操作过电压频繁冲击下, 绝缘极易受损, 甚至直接击穿。

4 结论

- 1) 暂态过电压侵袭发电机现象时有发生, 现场监测结果得到 63 组有效过电压数据, 电厂方面应加强发电机过电压保护。
- 2) 统计表明侵袭发电机绝大部分的是操作过电压, 占总频数的 85.7%, 一年中过电压集中发生在 5、6、7 月。
- 3) 操作过电压三相对地幅值最大达到 3.59 倍额定电压, 倍数关系服从正态分布  $N(2.28, 0.587^2)$ 。统计结果表明, 操作过电压幅值较高, 入侵发电机现象频繁, 对发电机绝缘危害相当严重。

参考文献

[1] 黄燕艳, 陈梁金, 施围. 750 kV 输电系统操作过电压的统计计算[J]. 高电压技术, 2004, 30(8): 6—8.  
[2] 邓勃. 分析测试数据的统计处理方法[M]. 清华大学出版社, 1995(5): 7—100.  
[3] 陈维贤. 内部过电压基础[M]. 水利水电出版社, 1981(12): 18—26.  
[4] 刘念, 谢驰, 滕福生. 大型发电机操作过电压的安全预测分析新方法[M]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2).  
[5] 杨琳, 刘庆林, 李群湛, 李建明. 发电厂过电压分析及其对绝缘老化的影响[J]. 四川电力技术, 2007, 30(3).  
[6] Xiufang Jia, Shutao Zhao, Baoshu Li, WeiZhao, A NEW METHOD OF TRANSIENT OVERVOLTAGE MONITORING FOR SUBSTATION, IEEE 2002.  
[7] 电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S]. GB50150—91.

(收稿日期: 2007—02—10)

# 天生桥换流站高压直流分压器雨闪事故分析

郭树永, 郝江涛

(南方电网超高压输电公司天生桥局, 贵州 兴义 562400)

**摘 要:**介绍了天生桥换流站一起由于高压直流分压器雨闪引起的单极跳闸事故,通过对事故的原因进行剖析,找出了直流设备外绝缘设计存在的不足,并提出了相应的改进方法,为以后高压直流输电系统的直流设备外绝缘设计提供了借鉴经验。

**关键词:**直流;雨闪;事故;增爬裙

**Abstract:** A single-pole tripping accident caused by rain flashover of HVDC voltage divider in Tianshengqiao Converter Station is introduced. After analyzing the accident causes, the existing shortcomings in external insulation design of DC devices are found out, and the corresponding method for improvement are proposed, which provides the experiences to external insulation design of DC devices for the future HVDC transmission system.

**Key words:** direct current; rain flashover; accident; creepage extender.

**中图分类号:**TM721.1 **文献标识码:**B **文章编号:**1003—6954(2008)02—0036—02

近年来,高压直流输电系统在中国发展迅猛,由于直流电场下特有的集尘效应以及外绝缘设计的裕度不足,使得直流设备的耐污能力、抗雨闪能力承受很大的考验,由换流站直流场外绝缘引起的事故时有发生。

结合天生桥换流站—500 kV 极 1 高压直流分压器雨闪引起的单极跳闸事故,介绍了引起雨闪的原因以及改进措施。

## 1 事故过程

### 1.1 事故经过

2005 年 5 月 25 日,天生桥地区有大暴雨,并伴有电闪雷鸣,±500 kV 天广直流双极运行,双极负荷为 200 MW。01 时 55 分,—500 kV 直流极 1 高压母线差动保护动作,启动 ESOF 跳闸至备用状态,负荷转移至+500 kV 极 2,极 2 带 200 MW 功率运行。

### 1.2 事故处理过程

事故发生后,通过分析故障录波,故障时极 1 高压母线电流 IDH 及极 1 中性点电流 IDN 均有较大故障电流(达到 3 500 A),同时极 1 交流侧换流变及换流变进线 2032、2033 断路器单元等多处电流显示均有故障电流,可基本排除二次设备故障引起事故的可能。

天生桥换流站的直流线路故障定位仪启动,显示测距为 0,塔号为 0,且因当时换流站地区雷雨交加,

跳闸时多名运行人员听到直流场区域有剧烈的“雷声”,初步认为在极 1 直流母线区域发生雷击或闪络,造成极 1 三套直流保护系统的直流母线差动保护(87HV)动作,使极 1ESOF 跳闸至备用状态。

跳闸后由于信号传输时间的原因,对侧广州换流站在接到天站 ESOF 请求前两套直流保护的低压保护动作(27-DU/DT),发出了直流线路故障恢复顺序请求,随后因为收到天站 ESOF 请求后极 1 闭锁;天站收到直流线路故障恢复顺序请求后,因极 1 已由直流母线差动保护动作 ESOF 跳闸,故极控系统发出了直流线路故障的信号。

事故后因为晚上视线所限,对直流一次设备进行检查,未能找到明显的放电痕迹。向调度申请对极 1 做零起升压试验,分别进行了 350 kV、400 kV 及 500 kV 的电压等级试验,均未发现异常;04 时 25 分根据调度令将极 1 恢复正常运行<sup>[1]</sup>。

## 2 事故原因分析

### 2.1 现场检查情况

天生桥换流站于 7 月 24 日直流停电检修期间组织人员对—500 kV 极 1 直流设备进行了全面检查,发现在极 1 高压母线直流分压器 R5 绝缘支柱上端第一片瓷裙与金属之间有一块约 4.5cm<sup>2</sup> 的放电痕迹,下部底座金属上也有几处放电痕迹。

### 2.2 天生桥换流站环境简介

天生桥换流站位于广西隆林县天生桥镇马窝村西南约 1 km 处, 周边山坡多稀疏灌木, 间有农田, 植被较好; 东有一公路, 无工业污染源。该地区降雨丰富, 年平均降雨量为 1 176 mm (取自隆林气象站), 每年 11 月至第二年 3 月降雨最少。整体环境状况良好, 大气环境污秽状况相对较轻。

2.3 直流分压器外绝缘参数

天生桥换流站高压直流分压器为瓷质绝缘子, 总结构高度为 7 410 mm, 大小伞伞形结构, 伞裙片数(大/小)为 106/105, 伞径(大/小)为 511 mm/474 mm, 伞伸出(大/小)为 70 mm/50 mm, 大伞间距为 65 mm, 爬电距离为 29 800 mm, 爬电比距为 57.8 mm/kV。

2.4 综合分析

在 2005 年 5 月份以前的盐密测量数据中, 天生桥换流站直流场设备绝缘子等值盐密的最大值为 0.035 mg/cm<sup>2</sup>, 属于清洁区。依据此数据计算天生桥换流站分压器需要的爬电比距, 计算时现场直流盐密取 1.3×0.035=0.045 5 mg/cm<sup>2</sup> (考虑积污期差异以及取样和测量误差, 乘以 1.3 倍的系数)。则天生桥换流站分压器需要的爬电比距为 54 mm/kV (根据 IEEE 公式计算)。天生桥换流站分压器实际爬电比距为 57.8 mm/kV, 基本满足污区等级要求, 但裕度不足。

中国电力科学研究院的试验表明, 直流负极性下雨闪电压低, 雨闪电压与套管长度基本呈线性关系。伞间距过小的套管, 在一定雨强下, 闪络电压显著下降。根据试验室瓷质绝缘子的试验结果, 大伞间距, 一般需要保持 90 mm 以上, 对于 6 mm/min 的特大雨, 伞间距应该在 160 mm<sup>[2]</sup>。而发生闪络的设备为一 500 kV 极 1 的高压直流分压器, 其大伞间距仅为 65 mm, 远不能满足抗雨闪的需求。

3 防雨闪措施

从雨闪形成的机理上来看, 雨水滴淋到脏污的套管伞裙表面时, 污秽会被冲下, 沿伞裙外边檐淌下形成污水帘(或污水柱)。在较小的降雨量时, 一般水帘或水柱不会使相邻 2 个伞裙“桥接”, 而是在上伞裙下边檐到下伞裙上边缘之间形成多串并联的“污水帘+空气间隙”。降雨量越大, 套管表面受雨量也越大, 伞裙下边檐污水帘越长, 空气间隙则越短。当空气间隙

不能承受过高的电压时, 间隙击穿。众多伞裙间空气间隙逐个击穿, 最终导致整个套管闪络<sup>[3]</sup>。因此, 防止雨闪的有效方法就是要增加空气间隙的长度, 加装较大直径的硅橡胶辅助伞裙。

天生桥换流站在 2006 年 2 月直流停电检修期间对此台直流分压器采取了增爬裙措施, 自高压端第 3 个瓷裙加装第一片硅橡胶伞裙起, 往下每隔 5 片瓷裙加装另一片伞裙, 按轴向等距原则逐一安装, 共安装了 18 个辅助裙。到目前为止未再发生雨闪事故。

但由于增加的辅助裙是用粘合剂粘接上的, 应特别注意安装时的施工质量, 注意使增爬裙粘接部位与瓷裙粘接部位紧密结合, 防止出现气泡或部分界面没有粘合, 导致沿界面击穿。粘合剂要求均匀、厚度合适。应避免粘合剂流淌悬挂形成绝缘子之间连丝或滴到下面的伞裙上。

增爬裙投运后, 巡视要注意观察, 如发现有变形破损、结合面脱胶、在粘接区有放电现象、硅橡胶伞裙憎水性消失等异常现象, 应及时进行分析处理。

4 结束语

由于直流电场下特有的集尘效应, 使空气中污物更容易被吸附在绝缘表面, 直流绝缘子积污要比交流绝缘子严重得多, 因此在今后的工程中对直流户外设备的爬距要留有足够的裕度。

为提高设备的抗雨闪性能, 伞间距的设计要合理, 或者建设户内直流场。对于已经投运的设备可以采取增爬裙的措施, 但要注意施工质量和日常维护。

参考文献

[1] 吕伟权, 郑丰, 王志滨, 等. 天生桥换流站高压直流输电系统典型异常事故汇编[R]. 超高压输电公司天生桥局, 2006.  
[2] 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.  
[3] 宿志一. 超高压变电设备污秽外绝缘设计的重点[J]. 中国电力, 2001, 34(1): 51—54.

作者简介:

郭树永, 1980~, 男, 助理工程师, 从事高压直流系统运行维护工作。  
郝江涛, 1975~, 男, 硕士, 从事高压直流系统运行维护工作。

(收稿日期: 2007—11—15)

# IEC 闪变测试系统分析研究

罗述俊, 马志远, 贺建闽

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:**闪变作为评定电能质量的重要指标,能更直接、更迅速地反映出电网的供电质量。讨论了基于 IEC 设计规范的闪变测试系统设计,依据 IEC 闪变仪的设计原理,建立灯—眼—脑环节的数学模型,得到闪变的评价指标——短时闪变严重度  $P_{st}$  及长时间闪变值  $P_{lt}$ 。利用 MATLAB/Simulink 和 LabVIEW Simulation Interface Toolkit 对电压闪变监测仪进行了设计与仿真,重点讨论了测试原理、数字化设计及软件结构。通过实际测量表明该系统性能良好。

**关键词:**电压波动;瞬时闪变度;调幅波

**Abstract:** As an important index to assess the power quality, voltage flicker can reflect the supply quality of power grid more directly and quickly. The design of voltage flicker measurement system is discussed based on IEC specifications. According to its design principles, the light—eyes—brain model is established, and then the evaluation indices of short—term flicker severity  $P_{st}$  and long—term flicker severity  $P_{lt}$  are obtained. A voltage flicker measurement system is designed and simulated based on virtual instrument development platform of MATLAB/Simulink and LabVIEW Simulation Interface Toolkit. The measuring principles, digital design and software structure are the emphases in the discussion. The actual measurements prove that the system performance is excellent.

**Key words:** voltage fluctuation; instantaneous flicker level; amplitude modulation waveform.

**中图分类号:**TM712 **文献标识码:**A **文章编号:**1003—6954(2008)02—0038—04

电压闪变为电压幅值波动所致。电压幅值波动不仅可导致给人眼造成不舒服感觉的灯光闪变,还可能使某些重要的电子仪器、控制系统或保护装置误动作,随着电子仪器的使用日益增多,电压闪变问题越来越引起人们的注意。

在 IEC 标准中,给出的是模拟式闪变仪的数学模型,即 IEC 闪变仪的各个环节传递函数适用于连续时间系统。随着计算机技术的发展,在工程测量应用中,更多地使用数字式闪变仪。IEC 闪变仪没有规定数字式闪变仪的设计方法,只是要求数字式闪变仪各个环节的输入—输出传递函数必须满足 IEC 标准。所以文章设计使用数字方法,将 IEC 闪变仪各个环节转变为离散时间系统的传递函数模型,也就是将 IEC 闪变仪的数字模型从  $s$  域向  $z$  域转换(或称映射)。

最后,通过计算机仿真验证其正确性。文章通过 MATLAB/Simulink 和 LabVIEW Simulation Interface Toolkit 混合开发平台实现了该系统的功能,对各种信号的测试结果也验证了该方法的正确性。

## 1 电压波动及闪变测量

### 1.1 闪变测试仪设计规范

IEC 已经公布了闪变测试仪的设计说明,它由 UIE 的提议发展而来。由 IFL 划分的  $P_{st}$  计算已经定义在 IEC 文件中。图 1 为 IEC 推荐的闪变测试仪框图。

框 1,将输入的被测电压适配成适合仪器的电压数值,并能发生标准的调幅波电压作仪器自检信号。

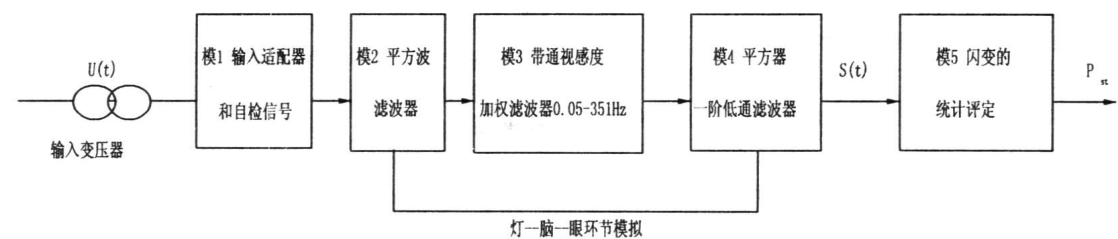


图 1 IEC 推荐的闪变测试仪框图

框 2~框 4, 为对灯—脑—眼环节的模拟。

框 2, 模拟灯的作用, 用平方检测方法从工频电压波动中调解出反映电压波动的调幅。

框 3, 由带通滤波器和加权滤波器构成。闪变仪要求在相对电压变动为 5% 的范围最为灵敏, 解调调幅波的幅值变动必须不小于 1% 的范围, 其二倍工频 100 Hz 的衰减必须在 90 dB 的数量级, 这个衰减作用由带通滤波器和加权滤波器完成。带通滤波器由截止频率为 0.05~35 Hz, 用来消除平方检测法得到的调幅波中直流分量和 100 Hz 分量。视感度加权滤波器用来模拟人眼对不同频率电压波动分量的选择特性。视感度加权滤波器的另一个作用是进一步衰减二倍工频左右的电压分量。

框 4, 平方器和一阶滤波器模拟人脑神经对视觉反映和记忆效应。框 4 输出为瞬时闪变视感度  $s(t)$ 。

框 5, 在线或离线统计分析。将框 4 输出的  $s(t)$  恒速采样做累计概率函数, 累计概率函数的分级不得少于 64 级, 采样频率要求不少于 50 Hz, 至少高于两倍停闪频率。框 5 输出为短时间闪变值  $P_{st}$ 。

## 1.2 闪变仪的实现

### 1.2.1 输入信号

输入信号即电压传感器采集到的数字信号。为工频正弦波, 调幅波为 0.05~35 Hz 正弦波(数字信号): 载波

$$u(t) = \sqrt{2} U [1 + \sum m \cos \Omega t] \cos \omega t \quad (1)$$

式中:  $U$  为电网额定电压有效值;  $\omega$  为电网工频电角频率;  $m$  为调幅波中频率为  $f$  的电压分量峰值与电网额定电压峰值之比;  $\Omega$  为调幅波中频率为  $f$  的电压分量的角频率。为分析方便起见, 设只有一个调幅波, 则输入信号构成为:

$$u(t) = \sqrt{2} U [1 + m \cos \Omega t] \cos \omega t \quad (2)$$

式中:  $\sqrt{2} U \cos \omega t$  为载波;  $\sqrt{2} m U \cos \Omega t$  为调幅波。

### 1.2.2 灯—脑—眼模型的数字实现

将  $s$  域连续传递函数转换成  $z$  域离散传递函数, 反复利用双线性变换法可得到所有数字滤波器的系统函数。将各模拟传递函数换为相应数字传递函数, 并将输入信号按采样频率要求离散化, 即可得到数字式闪变仪仿真系统框图。

1) 带通滤波器。对采集的电压信号, 经过六阶巴特沃斯带通滤波器, 带通频率范围为 0.05~35 Hz, 且要求 2 倍工频即 100 Hz 的衰减必须大于 90 dB, 由

滤波器模板程序 Butterworth Filter.vi 实现。

截止频率为 0.05 Hz; 传递函数为:

$$H(s) = \frac{s/\omega}{1 + s/\omega} \quad (3)$$

式中:  $\omega = 2\pi \times 0.05 \text{ s}^{-1}$ 。

应用 MATLAB 语言中的 bilinear ( ) 函数, 即双线性变换法, 将其转换到  $z$  域, 程序语句为:

[numd, dend] = bilinear (num, den, fs)

转换成  $z$  域表达式为:

$$H(z) = \frac{\alpha_0 - \alpha_1 z^{-1}}{1 - b_1 z^{-1}} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_0 = 0.999\ 975$ ;  $\alpha_1 = 0.999\ 975$ ;  $\alpha_2 = 0.999\ 951$ 。

六阶巴特沃斯 35 Hz 低通滤波器传递函数为:

$$BW(s) = [1 + b_1 (s/\omega_c) + b_2 (s/\omega_c)^3 + b_3 (s/\omega_c)^3 + b_4 (s/\omega_c)^4 + b_5 (s/\omega_c)^5 + b_6 (s/\omega_c)^6]^{-1} \quad (5)$$

式中:  $\omega_c = 2\pi 35 \text{ s}^{-1}$ ;  $b_1 = b_5 = 3.864$ ;

$b_2 = b_4 = 7.464$ ;  $b_3 = 9.141$ ;  $b_6 = 1$ 。

2) 视感度加权滤波器。中心频率为 8.8 Hz; 传递函数为:

$$K(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1} \times \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \quad (6)$$

式中:  $k = 1.740\ 82$ ;  $\lambda = 2\pi \times 4.059\ 81$ ;  $\omega_1 = 2\pi \times 9.154\ 94$ ;  $\omega_2 = 2\pi \times 2.279\ 79$ ;  $\omega_3 = 2\pi \times 1.225\ 35$ ;  $\omega_4 = 2\pi \times 21.900\ 00$ 。

转换到  $z$  域, 表达式为:

$$K(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4}}{1 - b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} - b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4}} \quad (7)$$

式中:  $\alpha_0 = 4.456\ 594 \times 10^{-5}$ ;  $\alpha_1 = 9.963\ 504 \times 10^{-8}$ ;  $\alpha_2 = 8.903\ 225 \times 10^{-5}$ ;  $\alpha_3 = 9.963\ 504 \times 10^{-8}$ ;  $\alpha_4 = 4.446\ 631 \times 10^{-5}$ ;  $b_1 = 3.969\ 506$ ;  $b_2 = 5.908\ 804$ ;  $b_3 = 3.909\ 089$ ;  $b_4 = 9.697\ 903 \times 10^{-1}$ 。

由此  $z$  域形式, 利用滤波器的直接形式得到前向系数和反向系数, 由 LABVIEW 的滤波器模板程序 IIR Filter.vi 实现滤波。

3) 平滑滤波。传递函数为:

$$H(s) = \frac{1}{1 + 0.3 s} \quad (8)$$

将其转换到  $z$  域, 表达式为:

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{1 - b_1 z^{-1}} \quad (9)$$

式中:  $a_0 = 2.603\ 489 \times 10^{-4}$ ;  $a_1 = 2.603\ 489 \times 10^{-4}$ ;  $b = 0.999\ 479$ 。

由于 IEC 的变换结果为归算到 8.8 Hz 的闪变值,当  $f=8.8\text{ Hz}$ ,  $\triangle V=0.25\%$  时,  $s=1$ , 据此计算得出  $K$  值。由滤波器模板程序 IIR Filter.vi 实现滤波。

### 1.2.3 闪变评价

闪变评价常用的一个指标是短期(10 min 测量时间) 闪变值  $P_{st}$ , 该值由 IEC 定义, 是一项重要的电能质量指标。  $P_{st}$  由下式求得:

$$P_{st} = \sqrt{0.031\,4\,P_{0.1} + 0.052\,5\,P_1 + 0.065\,7\,P_3 + 0.28\,P_{10} + 0.08\,P_{50}}$$

(10)

式中 5 个规定值  $P_{0.1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{50}$  分别为 10 min 内瞬时闪变视感度  $S(t)$  超过 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% 时间的觉察单位值。

另一个评价标准为长时间闪变值  $P_{lt}$ , 典型取 2 小时, UIE/IEC 推荐  $P_{lt}$  的取值算式是, 在已多次顺序地测有 10 min 的短时间闪变值  $P_{st}$  ( $k=1, 2, 3, \dots, n$ ) 的数据时,  $P_{lt}$  可由诸  $N$  个  $P_{st}$  的立方均根值得得:

$$P_{lt} = 3 \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_{stk}^3} \text{ 或 } P_{lt} = 3 \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} P_{stk}^3}$$

(11)

## 2 基于 LabVIEW Simulation Interface Toolkit (SIT) 的设计与仿真

### 2.1 LabVIEW 简介

LabVIEW 即虚拟仪器是美国 NI 公司的数据采集和仪器控制软件, 它为工程师和科学家们提供了最有力的图形化的编程环境。虚拟仪器的基本思想是利用计算机来管理仪器、组织仪器系统, 进而代替仪器完成测量, 最终达到取代传统电子仪器的目的。

MATLAB/Simulink 是 1992 年 MathWorks 公司推出的用来建模、分析和仿真各种动态系统的交互环境, 包括连续系统, 离散系统和混杂系统。Simulink

提供了采用鼠标拖放的方法建立系统框图模型的图形交互平台。通过 Simulink 提供的丰富的功能块, 可以迅速地创建系统模型, 而不需要书写一行代码。LabVIEW Simulation Interface Toolkit 能够将 MathWorks 公司的 MATLAB/Simulink 软件与 LabVIEW 进行无缝的集成。LabVIEW Simulation Interface Toolkit 可以自动地产生与 Simulink 模型接口的 LabVIEW 代码。具备快速构建有很好的可视性、人机界面逼真度高的仿真系统能力。

### 2.2 在 MATLAB/Simulink 中创建电压闪变仪的仿真模型

根据 IEC 推荐的检测方法在 MATLAB/Simulink 建立模型, 然后通过 LabVIEW Simulation Interface Toolkit 进行模型转化可参考文献[4]。

### 2.3 结果输出和校验

模型中代入四川德阳变电所的某时间段内的实测数据, 测试结果令人满意。

表 1 各级电压下的闪变限值

| 系统电压等级   | LV  | HV       | MV  |
|----------|-----|----------|-----|
| $P_{st}$ | 1.0 | 0.9(1.0) | 0.8 |
| $P_{lt}$ | 0.8 | 0.7(0.8) | 0.6 |

本标准中  $P_{st}$  和  $P_{lt}$  每次测量周期分别为 10 min 和 2 h; MV 括号中的值仅适用于 PCC 连接的所有用户为中电压级的用户场合。

IEC 在给出闪变仪测量原理的同时给出了校验标准, 校验值如表 2 所示。按照 IEC 闪变设计规范设计的闪变仪, 当调幅波为矩形波, 电压变化频度和波动幅值为表 2 规定值时, 要求  $P_{st}$  在  $1\pm0.05$  的范围内。从表中可见文中设计的电压闪变仪是正确的。

表 2 方波测试精度

| 变化频度(min) | 波动量 $\triangle V/V\%$ | $P_{st}$ | $P_{st}$ 误差( $\%$ ) | 三倍波动量时 $P_{st}$ | 三倍波动量时 $P_{st}$ 误差( $\%$ ) |
|-----------|-----------------------|----------|---------------------|-----------------|----------------------------|
| 1         | 2.724                 | 1.068 5  | 1.85                | 3.176 2         | 1.87                       |
| 2         | 2.211                 | 1.052 2  | 1.22                | 3.141 5         | 1.71                       |
| 7         | 1.459                 | 0.9838   | 1.62                | 2.871 0         | 1.30                       |
| 39        | 0.906                 | 1.006 1  | 0.61                | 3.005 4         | 0.18                       |
| 110       | 0.725                 | 0.994 3  | 0.57                | 2.956 8         | 1.44                       |
| 1 620     | 0.402                 | 0.993 4  | 0.66                | 2.945 9         | 1.8                        |
| 4 000     | 2.40                  | 0.985 7  | 1.43                | 2.956 8         | 1.44                       |

3 结 论

从仿真结果可以看出,所建模型工作正常、稳定。软件如果能够为其配上数据采集卡和相应的硬件驱动,只需要将程序稍做改动,将采集到的数据代替信号输入,再加上闪变评价部分,便可用于工程实测。使用 LabVIEW 进行软件设计具有实用性突破;工作界面方便快捷,便于操作,结果输出直观,便于观察记录。

参考文献

[1] GB12326 — 90. 电能质量 电压允许波动和闪变[S].  
[2] 孙树勤. 电压波动与闪变[M]. 北京:中国电力出版社,

1998.  
[3] IEC. Publications prepared by technical committee. 1997, 61000—4—15, No. 77. Flickermeter—functional and design specifications[S].  
[4] 向学军,杨盛,刘平. 电压闪变仪的设计与仿真[J]. 微计算机信息,2006,22(7).  
[5] UIE. WG. 1991. Disturbances flicker measurement and evaluation[S].  
[6] 高师湃,李群湛,贺建闽. 闪变测量系统研究[J]. 电力自动化设备,2000,22(6).

作者简介:

罗述俊(1983~),男,四川江油人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析。

贺建闽(1955~),男,副教授,研究方向为电气化铁道供电系统,电网电能质量测控技术。(收稿日期:2007—11—10)

(上接第 31 页) 看出,右边的所有数都大于或等于 10,所以只需对 A[2]…A[7]进行排序。

A[2] A[3] A[4] A[5] A[6] A[7]  
50 20 60 10 30 100

第一次交换后:30 20 60 10 50 100(按照算法的第三步从后面开始找)

第二次交换后:30 20 50 10 60 100 (按照算法的第四步从前面开始找>X 的值,65>49,两者交换,此时 I:=3 )

第三次交换后:30 20 10 50 60 100 (按照算法的第五步将又一次执行算法的第三步从后开始找)

此时, i=j,第一趟排序结束,结果为:30 20 10 50 60 100,

再调用快速排序对 50 前后的两部分分别进行排序,最后结果为:10 10 20 30 50 60 100。

最后再调用 Dijkstra 算法,求出最短路径通道为 0→3→2→4:60。

4 结 束 语

前面提出的改进的最短路径算法,是借助于地理信息系统的实时信息,采用分治和快速排序的排序方法来进行改进的 Dijkstra 算法,这种算法时间复杂度为  $O(n * \log^2 n)$ ,空间复杂度为  $O(n)$ 。相比于经典的 Dijkstra 算法,它的效率无论在空间和时间上都有了大幅度的提高。该指标能满足配电网最佳抢修路径的要求。

参考文献

[1] 叶品勇,都洪基,沈曦. Dijkstra 算法在最佳抢修路径中的应用[J]. 继电器,2006,34(12),39—41.  
[2] 李宁宇,刘玉树. 改进的 Dijkstra 算法在 GIS 路径规划中的作用[J]. 计算机与现代化,2004,(9),12—14,17.  
[3] 陈益富,卢潇,丁豪杰. 对 Dijkstra 算法的优化策略研究[J]. 计算机技术与发展,2006,16(9),73—75,78.  
[4] 李元臣,刘维群. 基于 Dijkstra 算法的网络最短路径分析. 微计算机应用[J],2004,25(3),295—298,362.  
[5] 张池军,杨永健,赵洪波. 基于路径依赖的最短路径算法的改进与实现[J]. 计算机工程与应用,2006,(25),56—58.  
[6] 孙才新,刘理峰. 电力地理信息系统及其在配电网中的应用[M]. 北京:科学出版社,2003.  
[7] 黄远. Dijkstra 算法的基本思想及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.  
[8] 赵文静,祁飞. 数据结构与算法[M]. 北京:科学出版社,2005.  
[9] Benjamin F Zhan. Three Fastest Shortest Path Algorithms on Real Road Networks : Data Structures and Procedures[J] . Journal of Geographic Information and Decision Analysis , 1998 , 1 (1) : 69 — 82.  
[10] Pierre A. Humblet. Another Adaptive Distributed Shortest Path Algorithm. IEEE Transactions on communications, 1991, 39 (6),995—1003.

作者简介:

王倩(1980~):女,硕士研究生,助理工程师,研究方向为配电网自动化。

吕林(1963~):男,副教授,研究方向为分布式发电,配电网自动化。(收稿日期:2007—11—13)

# 基于GA—BP算法神经网络的 电力系统稳定器研究

岳良顺<sup>1</sup>, 刘 念<sup>1</sup>, 梁 杉<sup>1</sup>, 卿尚猛<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 紫坪铺开发有限责任公司发电厂, 四川 成都 610091)

**摘 要:**为解决常规电力系统稳定器中受控系统参数难以识别的问题, 提出了一种可以根据电力系统运行工况自动调整控制参数的新型自适应电力系统稳定器(PSS), 运用神经网络完成电力系统被控模型的精确在线辨识。通过在线测量同步发电机的有功和无功参数, 自适应电力系统稳定器可按照相位超前补偿的设计原则实时自动调整稳定器参数, 以达到最佳的抑制低频振荡的效果。为了避免BP算法在神经网络训练当中陷入局部小等一系列缺点, 引入了一种GA和BP相结合的算法, 将其用于人工神经网络的设计, 同时将离线计算所得的PSS参数构成的样本对神经网络进行训练。通过在时域仿真结果表明自适应PSS能有效抑制电力系统低频振荡, 极大的提高电力系统的动态和暂态稳定性。

**关键词:**电力系统稳定器; GA—BP算法; BP神经网络; 相位补偿; 低频振荡

**Abstract:** The design and implementation of a neural-network-based power system stabilizer (PSS) are presented. Through measuring the parameters of active power and reactive power of the synchronous generator on-line, the parameters of PSS tuning can be achieved according to the environment in which it works through artificial neural network (ANN). A hybrid of genetic algorithm (GA) and back-propagation (BP) algorithm is introduced which can find the correct global minima without getting stuck at local minima, and genetic algorithm is adopted to optimize the initial value in ANN. BP algorithm is utilized to search in local part and fast gets the matrix of the weight value and the threshold. The time domain simulation results indicate that the proposed adaptive PSS can damp low-frequency oscillations effectively over a wide range of operating conditions and significantly improve the dynamic and transient stability.

**Key words:** PSS; GA—BP algorithm; BP artificial neural network; phase compensation; low-frequency oscillation.

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003—6954(2008)02—0042—04

电力系统稳定器(PSS)是抑制电力系统振荡, 特别是电力系统低频振荡的有效措施。传统的PSS是以电力系统某已给定运行点为基础进行设计的, 一旦电力系统接线发生变化或者运行点发生变化, PSS的运行特性往往变差。为了改善扰动状态下同步发电机的阻尼特性, 电力系统中广泛地采用了电力系统稳定器(PSS)。

日常运行时, 电力系统的状态随着负荷不可预见的大扰动而变化, 这样, 在某一方式下性能良好的参数不可能对所有的运行方式都实用, 特别是当运行点发生急剧变化时更是如此。要使PSS在很宽的运行范围内都有很好的运行特性, 就希望PSS的参数能根据在线测量的结果实时调整PSS的参数, 即具有自适应性。为此, 提出了自调整自适应型稳定器。自适应PSS能在线辨识由于运行工况变化而引起的参数变

化, 并不断修正PSS的参数, 从而达到跟踪运行工况变化的目的。但自适应控制需要在线辨识系统参数的变化, 且算法复杂, 实时运算量大, 对于快速时变电力系统要达到实际应用还存在一定的差距。因此, 提出了一种基于神经网络系统的变参数自适应控制。这种控制利用神经网络能以任意精度逼近任意非线性映射的能力, 对受控系统线性化后的传递函数的参数进行实时辨识, 而控制器的参数则根据神经网络的辨识结果自动进行调整, 它可以彻底解决常规自校正控制器中受控系统参数难于识别的问题。

## 1 基于神经网络PSS参数辨识

对于给定系统, PSS的各项系数 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $K_p$ 可由 $P$ 、 $Q$ 惟一确定, 也就是说, 以 $P$ 、 $Q$ 为输入,

$T_1、T_2、T_3、T_4、K_P$  为输出的映射关系是存在的,因此,可以用神经网络来逼近这种映射,达到辨识参数的目的,这就是文中提出的基于神经网络的传递函数参数识别的原理。基于神经网络 PSS 传递函数  $P(s)$  参数识别分 3 步进行:首先必须获取样本,即求取系统运行于不同的  $P$  和  $Q$  时,  $P(s)$  各系数的值;第 2 步对神经网络进行训练;第 3 步则是用训练好的神经网络进行参数辨识。

1.1 PSS 及其数据样本的获取

参考系统为一台发电机经过双回线接到无穷网上,如图 1 所示。

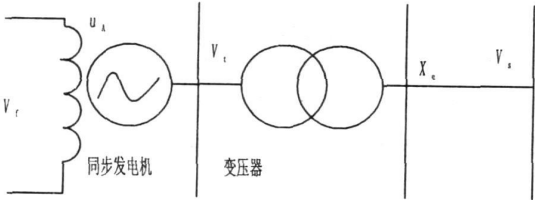


图 1 单机无穷大电网系统

本系统 PSS 的输入为发电机功率信号,它经霍尔元件换成直流电压信号,然后经过隔直环节和补偿环节,最后输出到励磁调节器,作为励磁调节器综合补偿环节的一个负的输入。如果 PSS 的参数取得合理,就会产生阻尼低频振荡的转矩。整个 PSS 装置的增益和相位补偿决定了它对系统阻尼的结果。其传递函数  $P(s)$  结构如图 2 所示。

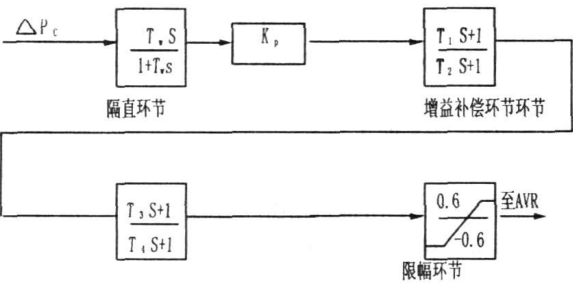


图 2 PSS 的传递函数

以 Philips—Heff 单机无穷大系统的线性化模型为例分析讨论,模型如图 3 所示<sup>[3,4]</sup>。

图 3 中,  $K_1 \sim K_6$  是描述单机无穷大系统小信号模型微分方程组的系数,其中:

$T_R = 0.02 \text{ s}, X_d = 1.86, X_q = 1.76, X_{d0}' = 0.3, X_e = 0.2, T_{d0}' = 8 \text{ s}, T_j = 13 \text{ s}, D = 8, K_A = 100, T_\omega = 10 \text{ s}$ 。Phillips—Heff 单机无穷大系统的线性化模型可以简化为如图 4 所示。

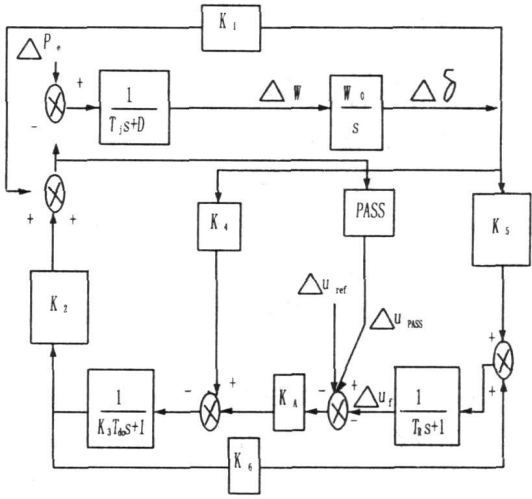


图 3 Phillips—Heff 系统的线性化模型

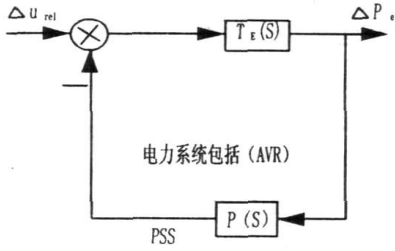


图 4 Phillips—Heff 简化图

其中发电机和励磁系统传递函数可以简化为  $T_0(s)$ , PSS 传递函数可以简化为  $P(s)$ 。可得:

$$T_0(s) = \frac{T_0(s)}{1 + T_0(s)P(s)} \tag{1}$$

$$\text{即 } P(s) = \frac{T_0(s) - T_1(s)}{T_0(s)T_1(s)} \tag{2}$$

如果  $T_0(s)$  传递函数的输出和输入分别为  $\Delta P_e$  和  $\Delta U_{ref}$ , 经 MATLAB 仿真计算且可以求得  $T_0(s)$  的传递函数的等效表达式为<sup>[6]</sup>:

$$T_0(s) = \frac{K_s}{s^2 + 2\omega_n \epsilon_1 + \omega_n^2} \cdot \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \cdot \frac{T_3 s + 1}{T_4 s + 1} \tag{3}$$

$$T_0(s) \text{ 的一对弱阻尼特征根方程为: } s^2 + 2\omega_n \epsilon_0 + \omega_n^2 = 0 \tag{4}$$

要求加入 PSS 后,将阻尼从  $\epsilon_0$  增加到  $\epsilon_1$  后,自然振荡频率不变,从而不影响同步力矩系数,则

$$T_1(s) = \frac{K_s}{s^2 + 2\omega_n \epsilon_1 + \omega_n^2} \cdot \frac{T_1s + 1}{T_2s + 1} \cdot \frac{T_3s + 1}{T_4s + 1} \quad (5)$$

将(3)和(5)代人(2)可得:

$$P(s) = \frac{2\omega_n(\epsilon_1 - \epsilon_0)}{K} \frac{T_2s + 1}{T_1s + 1} \cdot \frac{T_4s + 1}{T_3s + 1} \quad (6)$$

$$\text{增益 } K_p = \frac{2\omega_n(\epsilon_1 - \epsilon_0)}{K}, \text{取 } \epsilon_1 = 0.3 \quad (7)$$

$\frac{T_2s + 1}{T_1s + 1} \cdot \frac{T_4s + 1}{T_3s + 1}$ 为相位补偿环节。

选用  $P$ 、 $Q$  两个变量作为样本的输入, 样本输出为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $K_p$ 。按  $P = (0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9)$ ,  $Q = (0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, -0.1, -0.2, -0.3)$ , 取不同  $(P, Q)$  进行组合从而可求得其 PSS 所求参数值, 将其作为神经网络训练的数据样本。

## 1.2 基于 GA-BP 算法的神经网络设计和训练

人工神经网络(Artificial Neural Network)是一种模拟人类智能的技术, 它通过神经元建立起输入、输出状态间的“映射”关系, 具有很强的自组织、自学习能力。通过训练学习, 它能自动调整各神经元之间的结合程度, 使网络能正确映射其输入输出关系。

BP 网络是一个多层前馈型人工神经网络, 包含输入层、隐含层、输出层。其结构如图 5 所示, 在 BP 网络中, 不同层的节点相互连接, 然而同层的节点不连接, 输入信号经过归一化输入 BP 网络, 它由输入层单元传入隐层单元, 经隐层单元处理后再送入输出层单元(下一隐层单元), 最后由输出层单元处理后产生一个输出响应, 即期望值。

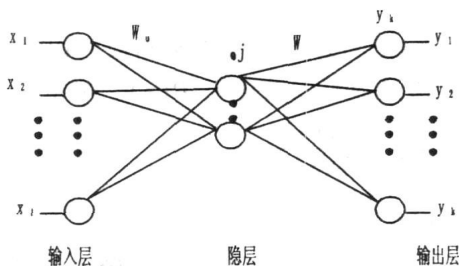


图 5 BP 网络结构图

当输出值达不到期望值时, 通过 BP 算法修改连接权值和阈值来逼近任何映射。其训练过程为: 首先根据网络当前的内部表达式, 对输入样本进行前向计算, 然后比较网络的输出与期望输出之间的误差, 若误差小于规定值, 则训练结束; 否则, 将误差信号按原有的通路反向传播, 逐层调整权值和阈值, 如此前

向计算和反向传播反复循环, 直至误差精度达到要求。然而, BP 算法在训练过程中, 极易陷入局部极小点的困境。一旦训练学习样本数目多, 输入输出关系比较复杂, 网络的收敛速度变得缓慢, 表现为对网络结构的初值要求很高。初值的不合理, 会造成 BP 算法的收敛摆动, 以至于不收敛。

遗传算法是模仿生物进化所得的一种优化的方法, 他借用了生物遗传学的机理, 通过自然选择、杂交、变异等操作, 实现了各个个体适应值的提高, 并对群体进行搜索, 将自然选择这一法则应用于科学领域研究和工程技术中的优化问题。GA 的最大优点在寻优过程中, 只使用适应度函数, 而不采用梯度和其他的辅助信息, 其寻优过程也是从解空间点集出发, 直到全局最优解。然而 GA 算法有它自身的缺陷, 当搜寻空间很大时, 特别是在用于训练 BP 网络时, 它需要很长时间才能收敛。所以这里提出了一种基于 BP-GA 算法训练神经网络的方法。

基于 GA-BP 算法的网络训练过程分为:

(1) 采用遗传算法优化 BP 网络的初始权重, 且其初始权值取为单独使用 BP 算法训练神经网络后所得的最终权值和阈值;

(2) 利用 BP 算法修改网络权重。BP 神经网络拓扑结构根据经验公式确定为  $2-10-4-5$ , BP 算法参数设定为: 动量项系数为 0.9, 学习率为 0.025。染色体编码采用实数编码, 权重初始化空间取  $[-5, +5]$ ; 阈值初始化空间取  $[-1, +1]$ 。染色体长度为  $n \times h + h \times o + 2 \times (h + o)$ , 其中,  $n$  是输入层节点数,  $h$  是隐层节点数,  $o$  是输出层节点数。群体大小  $P = 200$ ; 选择概率为 0.05; 交叉率为 0.1; 变异率为 0.05; 最大进化代数 1 000, 适应度函数表达式为:

$$fit(W_i) = \frac{1\ 000}{se(W_i)} \quad (8)$$

$se(W_i)$  是 GP 算法目标函数, 即搜索所有进化代中使网络误差平方和最小的网络权重。

## 1.3 基于神经网络的参数辨识

受训练后的神经网络, 可以认为已经具有映射所学习的动态系统输入输出关系的能力。对这样的网络, 只要从发电机机端测量得到  $P$  和  $Q$ , 将其作为神经网络的输入量, 神经网络就可输出当前运行状态的个 PSS 的各项参数值。

## 2 ANN 电力系统稳定器的实现

现代控制系统几乎都是离散的数字控制系统,所以要求得其离散传递函数表达式。已知连续系统的传递函数  $P(s)$ ,通过  $z$  变换可以求得离散系统的脉冲传递函数  $P(z)$ 。

$$P(z) = \frac{a_1 z + b_1}{(z + c_1)(z + c_2)} \quad (9)$$

因此,若已知  $T_1, T_2, T_3, T_4, K_P$ ,可求得  $P(z)$  的系数  $a_1, b_1, c_1, c_2$ 。

对 PSS 而言,被采样量为发电机输出有功、无功。对频率为 50 Hz 的电力系统,选取的采样频率为 1 000 Hz,即采样周期为 0.001 s。同样,选取适当的控制周期才能保证对受控系统实施有效、及时的控制。

下面,对 ANNPSS 的数字控制算法进行分析和设计。由图 2 可知 PSS 的输入端附加的电压离散表达式为:

$$U_{PSS} = P(z) = \frac{a_1 z + b_1}{(z + c_1)(z + c_2)} \Delta P_e \quad (10)$$

将式(10)变成离散形式,求得差分方程为:

$$U_{PSS} = a_1 \Delta P_e(t) + b_1 \Delta P_{t-T_0} - c_1 c_2 U_{PSS}(t - 2T_0) - (c_1 + c_2) U_{PSS}(t - T_0) \quad (11)$$

式中  $T_0$  为采样周期。具体实现时,在每一采样时段,先根据 BP 网络的辨识结果求得  $a_1, b_1, c_1, c_2$ ,再按式(11)迭代运算。因此,在每一采样时段,PSS 都有附加励磁电压输出(可能为零),称之为 PSS 的理论输出。但是,对文中所设计的 PSS,采样周期并不等于控制周期。所以,由式(11)得到的结果并不在每一采样时刻都送到控制器,而只有当控制时刻到来时,才将式(11)的结果送至控制器,在其他时刻,式(11)的迭代计算照常进行。

## 3 仿真及分析

在  $P=0.8$  pu,  $Q=0.6$  pu 仿真时,扰动源分别取为:

- (1)无穷大母线处第 1.0 s 发生三相短路,0.15 s 后切除。
- (2)第 1.0 s 切除一条线路运行。
- (3)发电机输入功率发生 10% 的阶跃响应。对

同一扰动源,还采用与没有安装 PSS(无 PSS)为对比,鉴别所设计的 ANNPSS 的有效性。

设计了一种基于神经网络的 PSS,并通过了单机系统仿真验证。仿真结果表明,所设计的 ANNPSS 能够较快地抑制电力系统功角受扰动时的低频振荡,减小系统的超调量,极大地提高了电力系统稳定性。前面所设计的基于神经网络的 PSS 具有能有效地增强系统的阻尼,提高系统的动态和暂态稳定性和具有相当强的自适应性和宽广的适应范围等特点。具有良好的工程实现前景,本次仿真是在单机系统下进行的,但可以推广到多机无穷大系统中。

### 参考文献

- [1] Y. Hsu and K. L. Liou, Design of self-tuning PID power system stabilizers for the synchronous generators, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6, no. 4, pp. 612-617, Dec. 1991.
- [2] Boonserm Changroo, Suresh Chandra Srivastava, Dhadbanjan Thukaram A Neural Network Based Power System Stabilizer Suitable for On-Line Training A Practical Case Study for E-GAT System IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 15, no. 1, march 2000.
- [3] 黄耀群,李兴源. 同步电机现代励磁系统及其控制[M]. 成都:成都科技大学出版社,1993.
- [4] 竺士章. 发电机励磁系统实验[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [5] YU Yao-nan. Electric power system dynamics [M]. New York: Academic Press, 1983.
- [6] 吴天明. Matlab 电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [7] 方思立,朱方. 电力系统稳定器的原理及其应[M]. 北京:中国电力出版社,1996.
- [8] 刘增煌,方思立. 电力系统稳定器对电力系统动态稳定的作用及与其他的控制方式的比较[J]. 电网技术.
- [9] 方思立,刘增煌. 带电力系统稳定器(PSS)的励磁调节器与最优励磁控制器的(EOC)比较[J]. 电网技术,1997.
- [10] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京:清华大学出版.
- [11] 阎平凡,张长水. 神经网络与模拟进化计算[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

### 作者简介:

岳良顺(1982~),男,湖北孝感人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定和高压绝缘监测。

(收稿日期:2007-12-10)

# 对监控系统转子电压显示波动大的原因分析

席 川, 黄建国

(四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

**摘 要:**介绍了青峰岭电厂综合自动化系统的总体情况, 调试现场微机监控系统时, 转子电压显示出现的故障。分析了故障原因, 提出了解决方法以及采取的防范措施。

**关键词:**监控系统; 转子电压; 可控硅; 缺相

**Abstract:** The overall situation of the integrated automation system of Qingfengling Power Plant is introduced. During testing the local microcomputer supervisory control system, it is shown that there is a fault of the rotor voltage. The reasons of the fault are analyzed, and the resolution methods and the precautionary measures are proposed.

**Key words:** supervisory control system; rotor voltage; silicon-controlled rectifier; phase lacking.

**中图分类号:** TM761 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2008)02-0046-01

## 1 故障概况

2007 年 7 月, 青峰岭电厂对容量为 1 250 kW 的 1 号发电机组的二次设备(励磁、监控、保护等)进行了综合自动化系统的改造, 改造完成后, 在进行试运行的过程中发现 GER6000 监控装置的监控画面显示的转子电压值有 30 V 左右的摆动(原先没有摆动, 试运行中出现的), 励磁、监控装置均无故障显示。

## 2 故障原因分析

结合现场实际情况分析发现产生以上故障可能存在以下几点原因:

- 1) 励磁装置本身调节有问题, 造成励磁电压波动。
- 2) 励磁装置提供的转子电压变送器有问题, 输出的 4~20 mA 电流信号不稳定。
- 3) 监控装置 PLC 的模拟信号采样模块有问题。

第一个原因分析: 励磁调节器采用的是电压闭环调节, 通过调用励磁装置的运行录波曲线, 发现转子电流并无很大的波动, 说明励磁装置本身调节不存在问题, 如图 1 所示。因为根据“励磁电压→励磁电流→发电机端电压→无功功率”的调节影响顺序, 如果励磁装置调节转子电压有 30 V 的波动, 则转子电流也会有很大的波动。

第二个原因分析: 通过在转子电压变送器的输出

端串入一个电流表来监视输出的毫安电流信号, 发现只有 0.1 mA 的摆动。根据计算得出, 4~20 mA 电流对应 0~150 V 的电压, 0.1 mA 也就只有 3 V 左右的摆动。因为变送器是有源输送, 所以, 通过测量转子电压变送器的输出端的直流电压, 大概有 10 V 左右, 也是稳定的。因此, 励磁装置提供的转子电压变送器不存在问题。

第三个原因分析: 监控的 PLC 采样模块出了问题, 因此将转子电流的两根输入线接到转子电压这组, 发现是稳定的, 再将转子电压的两根输入线接到电流的输入端, 发现还是有 30 V 左右的跳动, 将继续将转子电压两根线接到其它通道进行检测, 发现问题依旧存在, 但基本排除了监控装置 PLC 的模拟采样模块的问题。

以上三个原因都排除了以后, 通过分析想到了第四个原因: 有干扰信号, 致使变送器不能正常工作, 但是所有的输入输出都是正常的, 并且另外两台发电机组采用的是同样的装置, 于是通过将 2 号机的转子电压变送器换到 1 号机上试验, 结果监控装置显示的转子电压仍然存在 30 V 左右的摆动。

上述原因都排除以后, 通过观察可控硅的触发角度发现: 可控硅的角度  $\alpha$  偏小, 只有  $50^\circ$ , 而其它两台机带相同的负荷, 角度却是  $73^\circ$ 。1 号机与其他两台机的可控硅角度差别较大, 说明脉冲环节出了问题。使用万用表的交流档测量了 1 号机励磁电压中的交流分量, 发现有 73 V, 再测量另外两台机, 发现只有 20 V, 于是, 原因便被锁定在了这 (下转第 50 页)

过谐振;且消谐管只是个简便的消谐措施,由于其特性或质量不良,也经常造成消谐失效,对于铁磁谐振易发的变电站,为了防止谐振的发生及类似故障的发生应采取以下措施:

- 1) 改变运行方式,即改变阻抗比,使产生谐振的参数条件得以破坏。
- 2) 改变互感器的激磁阻抗  $X_L$ , 选用伏安特性好的电压互感器,以使工作点处于特性曲线的线性部

分,铁芯不易饱和,也就难于激发谐振。

3) 选用性能优良先进的消谐器,如 WNX 型微机电脑多功能消谐装置,此消谐装置能通过电脑单片机运算能自动判断分频、基波及高频谐振。

注:母线接地光字牌亮是由于高压熔断器熔断后在开口三角形产生的零序电压而出现的(因莲站绝缘监察继电器整定值为 20 V),在运行中且不可误判断为接地。

(收稿日期:2008—01—29)

(上接第 46 页) 里。停机检查励磁装置的脉冲回路,通过小电流试验,发现是脉冲存在缺相的问题。通过检查发现, +A 相的脉冲隔离变压器断了一根线,但励磁调节器并没有报出脉冲故障(主要是小机组设计方面的原因,暂不考虑),如图 1 所示。

## 4 故障防范措施

本次故障的直接原因是励磁整流柜的脉冲变压器断线导致励磁直流回路中串入了较大的交流分量,引起监控 PLC 对励磁电压采样的大波动,但由于发现及时同时也消除了其他的一些隐患。对脉冲缺相的产生提出了以下原因和一些防范措施:

缺相的结果是该相在运行过程中表现为开路状态,一般有以下情况:

- 1) 硅管由于单个器件的质量差异,长久非正常工作而出现异常,包括长期过负荷、散热不好、压装压力不够、换相阻容回路断路、有换相过电压等;
- 2) 该支路的快熔熔断;
- 3) 该支路的脉冲回路故障,脉冲丢失。

针对出现缺相故障采取的防范措施:①软件进行检测,进行脉冲回读。② 定时监测可控硅的控制角、快熔等。③ 停机时间较长时,开机前做小电流试验。

## 3 对故障危害的分析

出现此故障的后果:

- 1) 将导致远方控制室监控显示的励磁电压有大的波动,不利于运行人员进行观测;

- 2) 脉冲缺相虽然没有导致发电机组出现失控或跳机事故,发电机也仍然能满足正常发电运行,但是对于发电机的长期运行来讲还是存在一定的害处。因为缺少脉冲,造成了励磁变压器 A、B、C 三相电流间的不平衡,长期运行会导致某一相过热,如果励磁变压器的容量不够大甚至会被烧毁,并且因缺少脉冲,导致剩下的可控硅要增加更大的输出,如果发生强励,可控硅容量太小也会有被烧毁的风险。

## 5 结论

出现故障中,应先在运行中检查,然后在空转静态状态下进行励磁检查。总共花费时间在半天左右,经济损失不是很大,但具有典型性。从此次故障中能够得到宝贵的经验和教训:对励磁、监控、保护及其相关综合自动化设备的任何工作,都不能有一丁点马虎,以免留下隐患。以后在机组的检修过程中,有针对性地对发电机二次设备进行认真检查,对设备加强管理并做好预防工作,以保设备安全。

(收稿日期:2007—12—10)

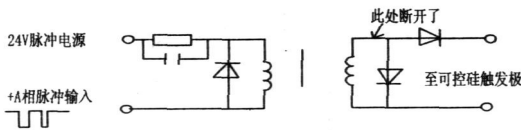


图 1 脉冲变压器板原理图

通过试验发现,当有一个可控硅不导通时,三相全控桥的直流输出中的交流分量会增大。当恢复此变压器时,监控显示恢复正常。



表 1 35 kV 母线 TV 加有消谐管 C 相及 B、C 高压保险熔断后电压情况 (单位:V)

| 故障性质    | 相 别  |      |      |       |       |       |      |
|---------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
|         | A    | B    | C    | AB    | BC    | CA    | LN   |
| C 相熔断   | 59.3 | 60.8 | 59.6 | 104.9 | 106.3 | 103.4 | 0.03 |
| B、C 相熔断 | 59.7 | 29.6 | 29.4 | 90    | 0.03  | 89.3  | 0.03 |

表 2 35 kV 母线 TV 取下有消谐管后 C 相及 B、C 高压保险熔断的电压情况 (单位:V)

| 故障性质    | 相 别  |      |     |       |    |      |      |
|---------|------|------|-----|-------|----|------|------|
|         | A    | B    | C   | AB    | BC | CA   | LN   |
| C 相熔断   | 59.6 | 61.1 | 0.9 | 104.9 | 60 | 59.8 | 35.4 |
| B、C 相熔断 | 59.7 | 0.7  | 0   | 59.4  | 0  | 59.8 | 34.3 |

谐管的总阻值增大,使绝缘监察继电器可靠动作,K 是一个用双金属片压成的热动元件,具有反时阻特性(电压高时启动快,电压低时启动慢)抗干扰能力强,因此正常运行时由于消谐管处于不工作的冷态,为一个低于 1 Ω 的电阻,故相当于将电压互感器开口三角形短接。

1.3 实验数据

通过认真分析及反复实验最后认为此异常现象是由 FXG-25 消谐器的消谐管引起,取下消谐管后此异常消失,表计及信号能正确反应;实验数据见表 1、表 2(所测数据均为取下二次保险后用万用表测得的二次电压)。

2 不发信和电压指示异常

110 kV 莲花寺变电站电压互感器高压侧熔断器熔断后不发信和电压指示异常的现象分析。

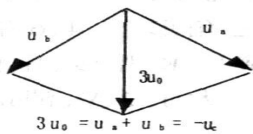


图 3 保险熔断时电流电压相量图

2.1 一相高压保险熔断

在一相高压熔断器熔断时,开口三角形会出现三倍零序电压 3u<sub>0</sub>,因开口三角形在正常情况下 3u<sub>0</sub>=

$u_a + u_b + u_c$ ,当熔断一相如 C 相熔断剩下的  $u_a、u_b$  为正常相电压,3u<sub>0</sub> 为  $u_a、u_b$  的相量和如图 4、图 5 所示。

3u<sub>0</sub> 即为 -u<sub>c</sub>根据参数大约 33 V,此电压不足以激发消谐管的双金属片 K,消谐管为一个低于 1 Ω 的电阻,此时图 4 可以等效为图 5。

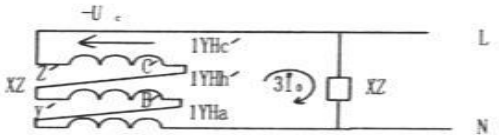


图 4 高压保险熔断时等值电路图

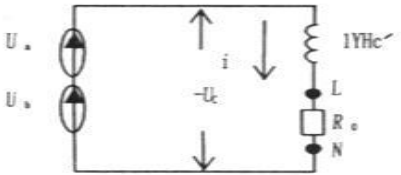


图 5 等效图

此时 R<sub>0</sub> 为一个低于 1 Ω 的电阻,因此开口三角形外部两端实测电压为 0.03 V(L,N 两端),但 3u<sub>0</sub> 即为 -u<sub>c</sub> 加在 1YH<sub>c</sub> 绕组上,绕组里就有激磁电流 i(实测电流有 0.31 A),在 C 相 TV 铁芯上产生磁通 Φ<sub>m</sub>,故在二次绕组感应出电势,如图 6、图 7 所示。

二次绕组感应出电势的大小由开口三角形绕组

与二次绕组的线圈匝数比即电压比确定(电压比为  $\frac{0.1}{3}/\frac{0.1}{\sqrt{3}}\text{kV}$ )。由于励磁电流  $i$  与磁通  $\phi_m$  同相滞后  $3u_0(-u_c)90^\circ$ , 二次绕组感应电势  $U_{c2}$  又滞后  $\phi_m 90^\circ$ , 故二次绕组感应电势  $U_{c2}$  与 C 相高压熔断器没有熔断时同相且大小几乎相等。

因此 C 相高压熔断器熔断后,C 相二次绕组实测电压还有 59.6 V,  $u_{ac}$  电压为 103.4 V。

2.2 两相高压保险熔断

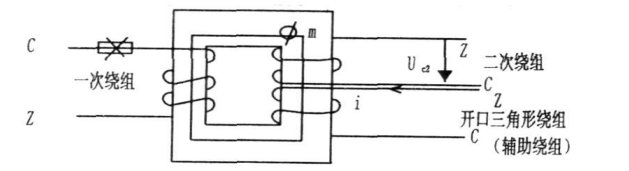


图 6 C 相 TV 原理接线

两相高压熔断器熔断时,从接线图来看,由于 B、C 相均熔断,A 相励磁电流构不成回路,应均无电压,但由于在中性点不接地系统中电压互感器高压侧中性点是接地的,故 A 相电流是入地后经该系统另两相(B、C)对地电容流回,如图 8 所示。

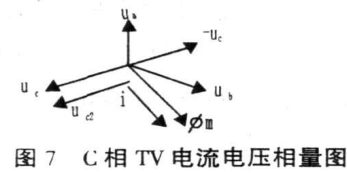


图 7 C 相 TV 电流电压相量图

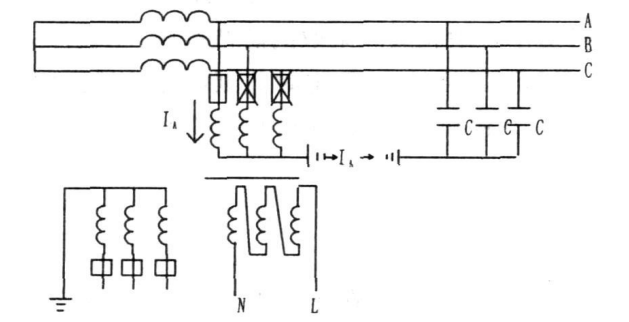


图 8 电压互感器两相高压保险熔断时原理接线图

在 A 相上感应出全电压,故 A 相电压指示不变;由于 B、C 高压熔断器熔断,在开口三角形出现三倍零序电压  $3U_0=U_a$ ,根据参数大约为 33 V,此电压同样由于消谐管的原因被短接,故开口三角形电压值为 0.03 V,电流在三角形绕组内流通,如图 9 所示。在 B、C 相铁芯上产生磁通及感应电压;但此电压均

为 A 相电压产生,A 相励磁电流  $i_0$  与磁通  $\phi_m$  同相且滞后  $U_a 90^\circ$ ,而 B、C 相二次绕组上的感应电压  $U_b$ 、 $U_c$  滞后于  $\phi_m 90^\circ$ ,故在相位上产生了变化,  $U_b$ 、 $U_c$  相位相同且与  $U_a$  反相,在数值上由于  $1YH_b'$ 、 $1YH_c'$  线圈串联,故  $U_b \approx U_c \approx -\frac{1}{2} U_a \approx 29.8 \text{ V}$ ,如相量图 10,故表计反应所测母线电压  $U_{ac}=89.3 \text{ V}$ ,  $U_{ab}=90 \text{ V}$ ,  $U_{bc} \approx 0.03 \text{ V}$ (由于线圈参数有微小差异)。

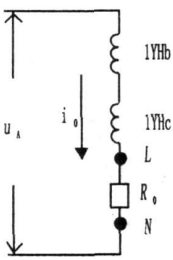


图 9 电压互感器两相高压保险熔断时等值电路

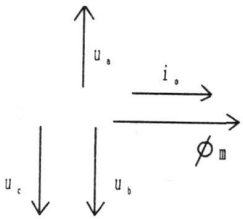


图 10 电流电压相量图

而莲花寺变电站电压回路断线信号的电压继电器所取电压为  $U_{ac}$ ,整定值  $U_{dz}=70 \text{ V}$ ,故不能发信。

取下消谐管后,恢复正常,熔断一相时如 C 相,  $U_a$  为 59.6 V、 $U_b$  为 61 V、 $U_c$  为 0.9 V,熔断二相时(B、C 相)  $U_a$  为 59.7 V、 $U_b$  为 0.7 V、 $U_c$  为 0 V,开口三角形电压  $U_{LN}$  为 34.3 V,且警铃响,电压回路断线光字牌亮,35 kV 母线接地,光字牌亮(注)。

从上面的分析可以看出由于消谐管的原因,在电压互感器保险熔断一相或两相时不能发出信号且在一相保险熔断时表计指示无任何变化,使一个或两个互感器带三相电压负载,长期如此运行下去将会造成电压互感器过载烧毁,并且也不利于运行人员对保险熔断后的分析判断。

既然消谐管主要作用是消除铁磁谐振,但又不能使电压互感器熔断一相或两相时不能发出信号,那么采取什么措施呢?就莲站而言,采取的措施是将消谐管取下运行,因莲站 35 kV 中性点不接地系统未发生

过谐振;且消谐管只是个简便的消谐措施,由于其特性或质量不良,也经常造成消谐失效,对于铁磁谐振易发的变电站,为了防止谐振的发生及类似故障的发生应采取以下措施:

- 1) 改变运行方式,即改变阻抗比,使产生谐振的参数条件得以破坏。
- 2) 改变互感器的激磁阻抗  $X_L$ , 选用伏安特性好的电压互感器,以使工作点处于特性曲线的线性部

分,铁芯不易饱和,也就难于激发谐振。

3) 选用性能优良先进的消谐器,如 WNX 型微机电脑多功能消谐装置,此消谐装置能通过电脑单片机运算能自动判断分频、基波及高频谐振。

注:母线接地光字牌亮是由于高压熔断器熔断后在开口三角形产生的零序电压而出现的(因莲站绝缘监察继电器整定值为 20 V),在运行中且不可误判断为接地。

(收稿日期:2008—01—29)

(上接第 46 页) 里。停机检查励磁装置的脉冲回路,通过小电流试验,发现是脉冲存在缺相的问题。

通过检查发现, +A 相的脉冲隔离变压器断了一根线,但励磁调节器并没有报出脉冲故障(主要是小机组设计方面的原因,暂不考虑),如图 1 所示。

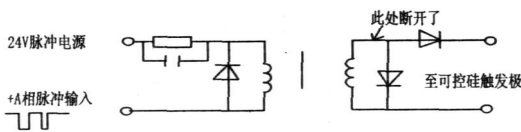


图 1 脉冲变压器板原理图

通过试验发现,当有一个可控硅不导通时,三相全控桥的直流输出中的交流分量会增大。当恢复此变压器时,监控显示恢复正常。

### 3 对故障危害的分析

出现此故障的后果:

- 1) 将导致远方控制室监控显示的励磁电压有大的波动,不利于运行人员进行观测;
- 2) 脉冲缺相虽然没有导致发电机组出现失控或跳机事故,发电机也仍然能满足正常发电运行,但是对于发电机的长期运行来讲还是存在一定的害处。因为缺少脉冲,造成了励磁变压器 A、B、C 三相电流间的不平衡,长期运行会导致某一相过热,如果励磁变压器的容量不够大甚至会被烧毁,并且因缺少脉冲,导致剩下的可控硅要增加更大的输出,如果发生强励,可控硅容量太小也会有被烧毁的风险。

## 4 故障防范措施

本次故障的直接原因是励磁整流柜的脉冲变压器断线导致励磁直流回路中串入了较大的交流分量,引起监控 PLC 对励磁电压采样的大波动,但由于发现及时同时也消除了其他的一些隐患。对脉冲缺相的产生提出了以下原因和一些防范措施:

缺相的结果是该相在运行过程中表现为开路状态,一般有以下情况:

- 1) 硅管由于单个器件的质量差异,长久非正常工作而出现异常,包括长期过负荷、散热不好、压装压力不够、换相阻容回路断路、有换相过电压等;
- 2) 该支路的快熔熔断;
- 3) 该支路的脉冲回路故障,脉冲丢失。

针对出现缺相故障采取的防范措施:①软件进行检测,进行脉冲回读。② 定时监测可控硅的控制角、快熔等。③ 停机时间较长时,开机前做小电流试验。

## 5 结论

出现故障中,应先在运行中检查,然后在空转静态状态下进行励磁检查。总共花费时间在半天左右,经济损失不是很大,但具有典型性。从此次故障中能够得到宝贵的经验和教训:对励磁、监控、保护及其相关综合自动化设备的任何工作,都不能有一丁点马虎,以免留下隐患。以后在机组的检修过程中,有针对性地对发电机二次设备进行认真检查,对设备加强管理并做好预防工作,以保设备安全。

(收稿日期:2007—12—10)

# 大型循环流化床锅炉技术发展现状及展望

邢 伟

(华电四川发电有限公司,四川 成都 610016)

**摘 要:**循环流化床锅炉技术是目前国际上公认的商业化程度最好的洁净煤发电技术。在分析国内外循环流化床锅炉技术发展现状的基础上,指出超临界是循环流化床锅炉技术发展的方向,并提出了 600 MW 超临界循环流化床锅炉研发应重点研究解决的几个技术关键。

**关键词:**超临界;循环流化床锅炉;技术关键

**Abstract:** Circulating fluidized bed (CFB) boiler technology is the most commercialized clean coal generation technology in the world. Based on the analyses of developing status of CFB technology, supercritical steam parameter CFB is pointed to be its future, several key technologies to develop 600MW supercritical CFB boiler are presented.

**Key words:** supercritical; circulating fluidized bed boiler; key technology.

**中图分类号:**TK221 **文献标识码:**A **文章编号:**1003—6954(2008)02—0051—02

常压循环流化床锅炉(CFB)技术,已经是为国际上公认的商业化最好的洁净煤发电技术,但在达到较高的供电效率方面并未具有明显的优越性。循环流化床技术及超临界发电技术均是成熟的,二者结合后的技术具有循环流化床低成本污染控制及高供电效率两个方面的优势,这是循环流化床锅炉技术发展的方向。研发 600 MW 超临界循环流化床锅炉应用是大型化过程中必须跨越的近期目标。

## 1 循环流化床锅炉技术发展现状

循环流化床技术在近十年间得到了迅速发展,容量不断提高。法国 Provence 于 1995 年建成投运了 250 MW 循环流化床锅炉;韩国 Tonghae 电厂的 2×220 MW 机组分别于 1998 年和 1999 年投运;波兰的 Turow 建成了 3 台 225 MW 和 3 台 266 MW 循环流化床锅炉,成为世界上总装机容量最大的循环流化床电厂;美国红山 2×250 MWCFB 机组和安装在佛罗里达州 JEA 电站的 2×300 MW 燃用煤和石油焦的 CFB 锅炉于 2002 年投运。这些机组的相继投运为 CFB 机组的大型化积累了丰富的经验。

中国自 1996 年引进芬兰奥斯龙技术在四川内江建成 100 MW 循环流化床电站以来,通过消化吸收,实现国产化,中国已建成一大批国产 100 MW 等级循环流化床电站。2006 年 4 月,由法国阿尔斯通(ALSTOM)公司引进的国内首台 300 MW 循环流化床亚临界锅炉机组在四川内江白马建成投运。采用引进技

术国内生产的云南大唐红河电厂、河北秦皇岛电厂、云南华电巡检司电厂、云南小龙潭电厂等 8 台国产 300 MW 循环流化床锅炉相继投运发电,还有十多台 300 MW 循环流化床锅炉正在建设之中。哈锅和东锅自主研发的 300 MW 等级循环流化床锅炉正分别在江西分宜电厂、广东宝丽华电厂安装建设,中国已成为世界上亚临界 CFB 锅炉装机容量最多的国家。同时已投运循环流化床机组在提高锅炉效率、降低厂用电、提高燃烧效率、攻克辅机常见故障等方面积累了许多经验,这标志着中国循环流化床锅炉技术水平已达到国际先进水平。

## 2 超临界是流化床锅炉技术发展方向

中国是世界上第二大能源消费国,以煤为主的一次能源结构在相当长的时间里是难以改变的,在国家“十一五”发展规划中,明确提出了国家能源政策的基础是“节约优先,煤为基础”,节能和减排是对火电发展过程中永恒的主题。为了满足资源的可持续利用,降低环境污染,大容量超临界(SC)火力发电机组越来越受到重视。目前,超临界机组可比亚临界参数机组的循环热效率提高约 2%~2.5%,先进的超临界机组热效率已达到 45%~47%。

循环流化床锅炉在达到较高的供电效率方面并未展现明显的优越性,提高蒸汽的压力和温度并增加其容量已成广泛的共识。随着循环流化床大型化的发展和 250 MW 再热循环流化床的顺利运行,以及

300 MW 等级亚临界循环流化床锅炉的商业化,国际上在 20 世纪末已展开了超临界循环流化床锅炉技术的研究。超临界循环流化床锅炉兼备了 CFB 燃烧技术和 SG 蒸汽循环的优点,可以得到较高的供电效率,脱硫运行成本比烟气脱硫(FGD)低 50%以上,初投资最多与煤粉炉持平,在不需要采用其它技术措施前提下,可将  $\text{NO}_x$  排放减低到  $150 \text{ mg/m}^3$  以下,是目前其它低  $\text{NO}_x$  燃烧技术都难以达到的排放指标。

原则上,循环流化床燃烧技术及超临界煤粉锅炉技术均是成熟的,二者的结合相对技术风险不大,结合后的技术综合了循环流化床低成本污染控制及高供电效率两个优势,是循环流化床锅炉技术发展的方向,有巨大的商业潜力。

### 3 超临界流化床锅炉技术研发现状

在国外,随着循环流化床锅炉大型化的发展和 300 MW 等级亚临界循环流化床锅炉的投运,美国福斯特惠勒(FW)公司和 ALSTOM 公司均在超临界循环流化床开发上投入了大量的人力和物力,开发制定了大容量超临界循环流化床锅炉的设计规范。

2002 年 12 月,FW 公司已与波兰的 PKE 电力公司签订了在波兰 Lagisza 电厂建造一台 460 MW 超临界 CFB 锅炉的合同。其锅炉蒸发量为  $1\,295 \text{ t/h}$ ,过热蒸汽压力 28.56 MPa,过热蒸汽温度  $563^\circ\text{C}$ ,燃用热值为  $18\% \sim 23 \text{ MJ}$  的烟煤,锅炉热效率为 94%,机组效率将达到 42.7%。它的主要设计特点是:单炉膛结构,采用引进 SIMENS 公司专利的本生直管直流(OTU)技术;在锅炉热负荷较高区域采用了内螺旋管,采用了 8 个方形分离器。该机组预计 2009 年投运,这将是世界上第一台超临界循环流化床锅炉,也是世界最大的一台循环流化床机组。

法国 ALSTOM 公司与 EDF 合作,已经完成了 600 MW 超临界循环流化床锅炉的概念设计。该 600 MW 超临界循环流化床锅炉主蒸汽流量  $1\,738.8 \text{ t/h}$ ,主蒸汽压力 27 MPa,主蒸汽温度  $600^\circ\text{C}$ ,烟气  $\text{SO}_2$  排放浓度  $200 \text{ mg/Nm}^3$ , $\text{NO}_x$  排放浓度  $200 \text{ mg/Nm}^3$ 。其主要设计特点是:锅炉为双支腿结构,单炉膛,燃烧室截面积为  $306 \text{ m}^2$ ,炉膛左右侧各布置三个旋风分离器和外置床,每组三个旋风分离器配置一个蒸汽冷却旋风分离器出口烟道。ALSTOM 公司对 600 MW 超临界 CFB 锅炉进行了初步研究,认为 600 MW CFB 锅炉的设计就

技术和工艺而言是可行的。但仍有许多技术要点需加以研究。

在“十五”期间,国内锅炉制造厂与科研院校在掌握 100~300 MW 等级亚临界循环流化床锅炉和超临界煤粉炉设计、制造技术的基础上,已经开始自主研发 600 MW 超临界循环流化床锅炉工作,并取得了初步成果。

哈锅和清华大学于 1999 年就开始了超临界循环流化床锅炉方案设计中的关键问题的初步研究。在他们共同承担的国家“十五”科技攻关项目中,已经对 600 MW 超临界循环流化床锅炉的水冷壁水动力特性、管壁温度等重大技术难点进行了详细研究计算,完成了 600 MW 超临界循环流化床锅炉的概念设计任务。在《国民经济和社会发展规划纲要》中明确指出:“中国将推进洁净煤发电技术,建设单机 600 MW 级循环流化床电站”。国家科委已立项支持本项目的发展。2007 年 1 月,东锅、哈锅、上锅等三大锅炉制造厂都相继完成了自主研发超临界 600 MW 循环流化床锅炉的初步设计方案,并已开始组织相关领域的技术攻关。

### 4 600 MW 超临界循环流化床锅炉研发的技术关键

600 MW 超临界 CFB 锅炉技术要立足于未来清洁煤发电技术之中,应在节能、减排、经济、可靠等方面具备独特的竞争优势,相关的技术攻关应加快推进,应专题研究、重点解决以下几个问题。

1)要认真客观地分析大型 CFB 锅炉在未来清洁煤发电技术中的定位,重点针对高硫低挥发份无烟煤、褐煤以及煤矸石、煤泥等其他低热值燃料开展研发,科学合理地确定超临界 CFB 锅炉研发的技术目标,使其和超临界煤粉炉相比,在锅炉热效率、厂用电率、污染物排放等技术指标方面具有竞争力。

2)600 MW 超临界 CFB 锅炉的炉膛截面将在现有 300 MW CFB 锅炉基础上放大 50%以上,要研究锅炉炉膛热负荷变化规律及其二维分布,研究确定锅炉热循环回路的布置(锅炉炉膛、分离器、回料阀及外置换热器),研究解决燃烧室宽度设计、大截面炉膛给煤均匀性和二次风穿透等问题。

3)由于存在磨损问题,超临界 CFB 锅炉不可能借用超临界煤粉炉广泛采用的螺旋 (下转第 87 页)

位<sup>[4]</sup>。同时,提高软、硬件的配置是提高测距成功率的重要手段。

4 结论

从行波的原理及影响行波测距因素的分析,从原理上看,与阻抗测距算法相比,行波法几乎不受过渡电阻和线路不对称等因素的影响,准确度优于阻抗法,但行波法存在反射波的识别问题,可能出现测距失败<sup>[2]</sup>。但以阻抗法作为补充,能有效地提高测距成功率。双端行波法的关键是准确记录下电流行波到达线路两端的时间,由于母线两端都只检测第 1 个到达的行波,线路过渡电阻的电弧特性、系统运行方式变化、线路分布电容及负荷电流等对测距准确性不会造成大的影响,既有很高的测距准确度,又有很高的测距可靠度,而且不受对端母线反射波、相邻线路透射波以及线路两侧母线结构的影响,仅从行波故障测距准确度和可靠度来考虑,双端行波测距方法是首选的测距方法。但双端法对 GPS 时钟的依赖太强。由于单端测距法不需要 GPS 时钟系统及两端数据通信等,测距结果的实时性强,也可能测距失败,因此,单端行波故障定位也具有重要的实际意义,但单端行波测距法还存在测距死区问题<sup>[5]</sup>。在目前状况之下,用单端法、双端法结合阻抗法进行联合测距,在行波法失效的情况下以阻抗法的测距结果作为补充,能弥补行波法的不足,实现故障定位<sup>[6]</sup>。同时由于行波测

距中线路精确长度、杆塔对应明细表及波速的选择对测距精度以及故障点查找也有着重要的影响,精确的线路长度应通过输电线路竣工验收资料实际数据为准,而对于波速度的选择是在一个经验值基础上通过多次故障实际情况修正获得。

综合以上的分析可知,只要从软件和硬件 2 个方面采取有效的措施,就可提高测距成功率,进而实现对高压输电线路的故障精确定位,以及时修复线路,最大限度地为电网的安全运行提供有力的保证。

参考文献

[1] XC-21 输电线路行波测距装置使用说明书[Z]. 科汇电气有限公司,2004—2006.  
[2] 董新洲,葛耀中,徐丙垠.利用 GPS 的行波测距研究[J]. 电力系统自动化,1996,(12).  
[3] 董新洲.小波变换在行波故障测距技术中的应用[D]. 西安交通大学博士论文,1996.  
[4] 陈平,葛耀中,徐丙垠.现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用[J]. 继电器,2004,32.  
[5] 骆敬年,颜廷纯.基于行波原理线路故障测距的误差分析及解决措施[J]. 华东电力,2006,10.  
[6] 杨延勇.基于小波分析的电流行波双端测距[D]. 山东大学硕士学位论文,2005.

作者简介:

陈厚斯(1978—),男,湖北石首人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统广域保护。

(收稿日期:2008—01—15)

(上接第 52 页) 管圈水冷壁技术,只能采用垂直管圈水冷壁。要研究超临界 CFB 锅炉水动力特性,按照安全、可靠、经济的原则,确定合理的质量流速,研究解决特殊工况下水冷壁的传热安全问题。

4)按照可靠、经济的原则,开展超临界 CFB 锅炉配套辅机和辅助设备的选型设计和技术研发工作,如:煤和石灰石破碎机、冷渣器及输渣设备、风机、空气预热器等,尽量避免锅炉辅助设备带来技术风险。

5)要瞄准达到通常湿法脱硫工艺 95%的脱硫效率的目标,研究提高石灰石利用率的手段和措施;要瞄准达到烟尘排放浓度低于 50 mg/Nm<sup>3</sup> 环保标准,研究选用经济可靠的除尘方式和设备。

5 结束语

600 MW 超临界循环流化床锅炉技术综合了循环流化床污染控制成本低及超临界机组高供电效率两个优势,是循环流化床锅炉技术发展的方向。

川南地区拥有储量丰富高硫、高灰、低热值无烟煤,是示范工程较为理想的燃料,同时,作为国家 100 MW 和 300 MW CFB 循环流化床锅炉示范电站的建设地,四川地区拥有较强的循环流化床锅炉运行、试验、维护技术力量,是自主研发 600 MW 超临界循环流化床锅炉示范工程理想的依托地。

(收稿日期:2007—12—10)

# 电力系统谐波检测综述

马晓蕾, 尹忠东, 周丽霞, 朱燕舞

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控室, 北京市 102206)

**摘 要:**谐波被认为是电网的一大公害,对电力系统谐波问题的研究已经引起了人们的关注。谐波问题的研究包括很多研究分支,如:畸变波形分析、各谐波源分析、谐波限制标准、谐波抑制以及谐波测量等。主要针对谐波测量展开,总结了各个谐波检测法,并加以分析比较。

**关键词:**谐波;电力系统;检测

**Abstract:** Harmonics are considered one of the serious harms for power system. The research of harmonics has obtained high attention among people. The researches of harmonics have many branches, such as distorted harmonic analysis, harmonic suppression and harmonic detection etc. Aiming at harmonic detection, the different detection methods of power system harmonics are summarized and compared.

**Key words:** harmonics; power system; detection.

**中图分类号:**TM714 **文献标识码:**A **文章编号:**1003—6954(2008)02—0053—04

近年来,随着电力电子装置的日益广泛,电能质量得到了有效的提高。但是,配电网中诸如换流器、变频调速、电弧炉、电气化铁路、家用电子电器等各种设备不断增加,这些负荷的用电特性(非线性、冲击性和不对称性)使电力系统中电压和电流的波形发生较严重的畸变,形成严重的谐波问题。

谐波被认为是电网的一大公害,对电力系统谐波问题的研究已经引起了人们的关注。谐波问题的研究包括很多研究分支,如:畸变波形分析、各谐波源分析、谐波限制标准、谐波抑制以及谐波测量等。主要针对谐波测量展开。

谐波检测伴随着交流电力系统得发展,产生了频域理论和时域理论,形成了多种检测方法。主要有:模拟滤波器、基于 fryze 传统功率定义的谐波检测法、基于傅立叶变换的谐波检测法、基于瞬时无功功率理论的谐波检测法、基于神经网络的谐波检测法、基于小波分析的谐波检测法。

## 1 模拟滤波器

早期的谐波检测方法都是基于频域理论,即采用模拟滤波原理。模拟滤波器有两种,一是通过滤波器滤除基波电流分量,得到谐波电流分量。二是带通滤波器得出基波分量,再与被检测电流相减后得到谐波电流分量,其原理和电路结构简单,造价低,能滤除一些固有频率的谐波。但这种检测方法有其自身

的缺点:误差大,实时性差,电网频率变化时尤其明显;对电路元件参数十分敏感,参数变化时检测效果明显变差,获得理想的幅频和相频特性很困难。故随着电力系统谐波检测要求的提高以及新的谐波检测方法日益成熟,这种方法已不再优先选用。

## 2 基于 fryze 传统功率定义谐波检测法

Fryze 功率理论,中心思想是把电流分为有功电流和无功电流,其中有功电流波形与电压相似,仅相差一个比例系数。

在三相 Fryze 时域功率理论中,各相电流可以分为有功分量和无功分量,三相电压和电流分别为  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  和  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  以 a 相为例(b、c 相类同),a 相瞬时电流可以分解为  $i_{ap}$ 、 $i_{aq}$ :

$$i_{ap}(t) = G e_a(t)$$
$$i_{aq}(t) = i_a(t) - i_{ap}(t)$$

其中  $G = \frac{P}{\sum_{k=a,b,c} e_k^2}$ , P 为三相系统得平均有功功率,也就是三相系统的瞬时功率中 P 的直流分量,等于 P 在一个周期内的积分:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P d\omega$$
$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) d\omega$$

三相有功电流可以表示为:

$$i_{ap} = \frac{e_a}{e_a^2 + e_b^2 + e_v^2} P$$

$$i_{bp} = \frac{e_b}{e_a^2 + e_b^2 + e_v^2} P$$

$$i_{cp} = \frac{e_c}{e_a^2 + e_b^2 + e_v^2} P$$

当电压无畸变时,上面两式在空间矢量上的物理意义就是有功电流矢量  $(i_{ap}, i_{bp}, i_{cp})^T$  与电压矢量  $(e_a, e_b, e_c)^T$  完全在同一条直线上,而无功电流矢量与电压矢量相互正交,其标量积的平均值为零。

当电网电压没有畸变时,假设三相电压可以表示为:

$$e_a = U_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$e_b = U_1 \sin(\omega t - 2\pi/3 + \varphi_1)$$

$$e_c = U_1 \sin(\omega t + 2\pi/3 + \varphi_1)$$

此时,  $\sum_{k=a,b,c} e_k^2 = \frac{3}{2} U_1^2$  不随时间而变化,因此  $G$  也是常数,得到的有功电流与电压波形相似,仅相差一个比例常数  $G$ ; 当电压畸变时,由于  $\sum_{k=a,b,c} e_k^2$  随时间变化,  $G$  不是常数,得到的有功电流与电压波形不相似。因此, Fryze 功率理论在电压无畸变时可以准确检测出三相系统无功电流,而电压有畸变时则不能准确检测出系统无功电流。然而当电压畸变程度不大时,  $\sum_{k=a,b,c} e_k^2$  随时间的波动很小,同样  $G$  的波动也很小,得到的基波有功电流与电压波形基本上相似,可以近似地检测出系统无功电流<sup>[1]</sup>。

基于 Fryze 传统功率定义的谐波检测法其原理是将负荷电流分解为与电压波形一致的分量,将其余分量作为广义无功电流(包括谐波电流)。它的缺点是:因为 Fryze 功率定义是建立在平均功率基础上的,所以要求得瞬时有功电流需要进行一个周期的积分,再加其他运算电路,要有几个周期延时。因此,用这种方法求得的“瞬时有功电流”实际是几个周期前的电流值。

### 3 基于瞬时无功理论的检测方法

瞬时无功理论是 1983 年日本学者赤木泰文提出的理论,即  $p-q$  理论。随着理论和应用得发展,它解决了谐波和无功功率的瞬时检测和不用储能元件就能实现抑制谐波和无功补偿等问题。

根据该理论,可以得到瞬时有功功率  $p$  和瞬时

无功功率  $q$ ,  $p$  和  $q$  中都含有直流分量和交流分量。由此可得被检测电流的基波分量,将基波分量与总电流相减即得相应的谐波电流。因为该方法忽略了零序分量,且对于不对称系统,瞬时无功的平均分量不等于三相的平均无功。所以,该方法只适用于三相电压正弦对称情况下的三相电路谐波和基波无功电流的检测<sup>[2]</sup>。

### 4 基于傅立叶变换的谐波检测法

1822 年法国数学家傅里叶(J·Fourier)首次提出并证明了将周期函数展开为正弦级数的原理,从而奠定了傅里叶级数(Fourier Progression, FP)与傅里叶变换(Fourier Transformation, FT)的理论基础。二者后被统称为傅里叶分析(Fourier Analysis, FA)。

它由离散傅立叶变换过渡到快速傅立叶变换的基本原理构成,这种方法根据采集到的 1 个周期的电流值或电压值进行计算,得到该电流所包含的谐波次数以及各次谐波的幅值和相位系数,将拟抵消的谐波分量通过傅里叶变换器得出所需的误差信号,再将该误差进行 Fourier 反变换,即可得补偿信号<sup>[3]</sup>。

使用此方法测量谐波,精度较高,功能较多,使用方便。其缺点是需要一定时间的电流值,且需进行二次变换,计算量大,计算时间长,从而使得检测时间较长,检测结果实时性较差。而且在采样过程中,当信号频率和采样频率不一致时,使用该方法会产生频谱泄漏效应和栅栏效应,使计算出的信号参数(即频率、幅值和相位)不准确,尤其是相位的误差很大,无法满足测量精度的要求,因此必须对算法进行改进。

目前,改进的傅立叶变换在减少频谱泄漏上有 3 种方法:①利用加窗插值算法对快速傅立叶算法进行修正的方法。该方法可减少泄漏,有效地抑制谐波之间的干扰和杂波及噪声的干扰,从而可以精确测量到各次谐波电压和电流的幅值及相位。②修正理想采样频率法。这种方法的主要思想是对每个采样点进行修正,得到理想采样频率下的采样值。该方法计算量不大,并不需要添加任何硬件,实时性比上一种方法好,适合在线测量,但只能减少 50% 的泄漏。③利用数字式锁相器(DPLI)使信号频率和采样频率同步。图 1 为频率同步数字锁相装置框图。图中数字式相位比较器把取自系统的电压信号的相位和频率与锁相环输出的同步反馈信号进行相位比较。当失

步时, 数字式相位比较器输出与二者相位差和频率差有关的电压, 经滤波后控制并改变压控振荡器 的频率。直到输入频率和反馈信号频率同步为止。一旦锁定, 便将跟踪输入信号频率变化, 保持二者的频率同步, 输出的同步信号去控制对信号的采样和加窗函数。这种方法实时性较好<sup>[4][5][6]</sup>。

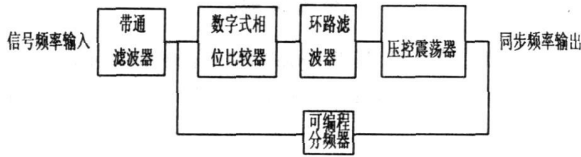


图 1 频率同步数字锁相装置框图

目前, 在电力系统稳态谐波检测中大多数采用快速傅立叶变换及其改进算法, 而对于波动谐波或快速变化的谐波, 则需另寻他法。

5 基于神经网络的谐波检测法

神经网络 (Neural Network, NN) 由心理学家 w.S.McCalloch 和数学家 W.Pitts 于 1943 年提出。1958 年 Rosenblatt 提出感知机, 第一次把 NN 的研究付诸工程实践, 此后, NN 得到迅速发展。

神经网络应用于谐波检测, 主要涉及网络构建、样本的确定和算法的选择。采用神经网络原理的谐波测量模型主要有: 基于自适应线性神经源的谐波测量方法; 基于多层 BP 网络的谐波测量方法和基于径向基函数网络的谐波测量方法等几种。用人工神经网络实现谐波与无功电流检测不仅对周期性变化的电流具有很好的跟踪性能, 而且对各种非周期变化的电流也能进行快速跟踪, 对高频随机干扰有良好的识别能力。谐波的 NN 检测方法显现出的优点有: 计算量小; 检测精度高, 各次谐波检测精度不低于 FT 和 WT, 能取得令人满意的结果; 对数据流长度的敏感性低于 FT 和 WT; 实时性好, 可以同时实时检测任意整数次谐波; 抗干扰性好, 在谐波检测中可以应用一些随机模型的信号处理方法, 对信号源中的非有效成份 (如直流衰减分量) 当作噪声处理, 克服噪声等非有效成份的影响。但是, NN 用于工程实际还有很多问题, 例如: 没有规范的 NN 构造方法, 需要大量的训练样本, 如何确定需要的样本数没有规范方法, NN 的精度

对样本有很大的依赖性, 等等<sup>[7]</sup>。

6 基于小波分析的谐波检测法

小波变换 (Wavelet Transformation) 是针对傅立叶分析方法在分析非稳态信号方面的局限性形成和发展起来的一种十分有效的时频分析工具。小波分析是一个时间和频率的局域变换, 因而能有效地从信号中提取信息, 通过伸缩和平移等运算功能对信号进行多尺度细化分析 (Multiscale Analysis)。小波分析能算出某一特定时间的频率分布并将各种不同频率组成的频谱信号分解为不同频率的信号块, 因而通过小波变换, 可以较准确地求出基波电流, 进而求得谐波。

6.1 基于小波包的算法

可以用于大型变压器励磁涌流波形的识别, 本方法引入短数据窗对采样数据进行分析, 具有良好的实时性。通过把小波变换应用于变压器差动保护的间断角测量, 实现了小波变换局部极大值测量间断角。计算机仿真表明, 本方法算法简单, 抗干扰能力强, 测量精度高, 可使间距误差达到 0.003 1 s, 间断角误差为 7.5°, 是比较小的。可降低间断角微机保护的成本, 有助于加速变压器差动保护微机化的进程。

6.2 正交小波变换分析

用“周期小波变换”精确地分解出基波及谐波信号, 然后在原始信号中减掉周期信号后, 用平滑延拓进行小波分解。在小波包分解过程中采用代价函数决定最优分解二叉树。一旦发现某个节点的  $\cos t = 0$ , 就不再对此节点进一步分解。设  $\zeta$  为阈值, 代价函数定义如下:

$$\cos t = \begin{cases} 0 & \text{power} \leq \zeta \\ \text{power} & \text{power} > \zeta \end{cases}$$
$$\text{power} = \sqrt{\sum c^2(t)}$$

用“周期小波变换”在处理高次谐波暂态过程时在边缘处有混频现象。由于电力信号的高次谐波所占比例较小, 实际计算结果能够满足工程需要。本算法能够广泛应用于大型钢铁企业及电力机车供电系统的谐波分析。

6.3 离散和连续小波包结合的方法

使用离散小波包变换的滤波器组将波形频谱分解成子波段, 然后用连续小波变换估计非零子波段的谐波内容, 可以同时检测识别所有谐波中包括整次、非整次和分谐波。该方法能精确量化谐波的频

率、幅值和相位。在澳洲西部系统中证明了该方法对波形合成和波形测量都是非常有效的。

#### 6.4 基于小波变换的用 KALMAN 滤波

利用本方法建立一个在线跟踪检测电源系统谐波的新模型,以小波和多尺度分析的紧密联系来表示小波比例函数之和的谐波幅值和相位角。这个模型可通过求解小波比例函数的系数直接估计出谐波幅值和相位角。这个模型是结合了 KALMAN 滤波技术来开展在线谐波跟踪方法的。仿真表明本模型比传统的模型有更好的跟踪能力。

#### 6.5 快速傅里叶变换和连续小波变换

可以同时和谐波、间谐波和信号闪变进行测量。对电源电路中容量的非线性装置的间歇运转造成电压和电流波形的谐波畸变和闪变有很好的检测效果。通过合成信号的仿真验证了这个算法的性能,在电弧炉支流电路的测量试验记录中验证了其可行性。试验的图解分析表明此算法运算时间较短,精确度也较好。

#### 6.6 分离谐波的算法

本方法结合了傅里叶变换和连续小波变换的特点,实例验证表明该算法能够把频率相近的整数次和非整数次谐波分离,实现较理想的检测,从而提高了谐波分析、检测的精度。

#### 6.7 基于小波变换的时变谐波检测方法

利用正交小波在  $L(R)$  空间线性张成的标准正交小波基和小波函数时频局部性的特点,将谐波时变幅值投影到小波函数和尺度函数张成的子空间上,从而把时变幅值的估计问题转化为常系数估计,利用最小二乘法即可实现时变谐波的检测。此方法可以准确检测时变谐波并且具有较快的跟踪速度<sup>[8]</sup>。

## 7 结束语

对谐波检测有多种方法,需要根据不同情况合理

选择谐波检测方法,为谐波分析提供详细、准确、实时的数据和信号,是提高检测效果、改善电能质量的重要一步。随着各种先进技术和理论的应用,特别是计算机在谐波检测中的具体使用,谐波检测的实时性和精度要求一旦解决,相信电网谐波检测技术将逐渐得到发展和完善。

## 参考文献

- [1] 陈艳慧,黄海鲲.基于 Fryze 功率理论的谐波检测算法与 p-q 算法的一致性[J]. 山东电力技术,2006,3: 15—16, 24.
- [2] 李芬华,胡建军.一种单相电路谐波以及基波电流检测方法[J]. 电测与仪表,2005,(8):18—19.
- [3] 涂春鸣,罗安.电网谐波分析与治理一体化系统的研究[J]. 计算机测量与控制.2003.12(7):632 634.
- [4] Grandke T. Interpolation algorithms for discrete Fourier transforms of weighted signals[J]. IEEE Trans on IM, 1983, 32: 350—355.
- [5] Xi Jiangtao. A new algorithm for improving the accuracy of periodic signal analysis[J]. IEEE Trans on IM, 1996, 8: 827—830.
- [6] Ferrero A. High accuracy Fourier analysis based on synchronous sampling techniques[J]. IEEE Trans on IM, 1992, 41(6): 780—785.
- [7] 栗时平,郑小平,金维宇.电力系统谐波检测方法及其实现技术的发展[J]. 电气开关. 2004, (1): 33—38.
- [8] 李红,杨善水.电力系统谐波检测的现状与发展[J]. 现代电子技术. 2004(9): 81—84.

### 作者简介:

马晓蕾(1982~),女,硕士研究生,研究方向为磁阀式可控电抗器、FACTS 技术。

尹忠东(1968~),男,博士后,副教授,从事 FACTS 技术、分布式发电及电能质量方面的研究。

周丽霞(1982~),女,博士研究生,研究方向为电能质量。

朱燕舞(1983~),男,硕士研究生,研究方向为 FACTS 技术。

收稿日期:2007—10—10)

## 简 讯

## 小波分析的电网谐波监测系统研制

从电监会颁布的《居民供用电合同》的背景和供电企业需要对电网谐波进行治理的角度出发,针对电网中缺少谐波监测系统的现状,提出了建设电网谐波监测网络的问题。主要阐述了电网谐波监测网络的组成,设计了基于 USB 接口高速传输的采集测量硬件系统;其次在软件设计时作者提出了信号分析方法,特别是在对电网谐波进行分析时采用了小波分析算法,另外根据实际中需要大容量存储数据的问题提出了解决的策略,从而最终完成了谐波监测装置的研制和谐波监测网络的组建。

# 电力传输线故障定位的行波技术 原理与应用综述

杜 刚<sup>1</sup>,陈云良<sup>2</sup>,党晓强<sup>2</sup>

(1. 成都电业局龙泉供电局, 四川 成都 610100; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:**基于行波信息对电力传输线故障点进行定位的技术近年来发展很快。结合架空线路分析行波传播的一般概念、电路模型、数学模型、速度选择问题和故障行波的特征,介绍利用故障行波进行测距的单端法、双端法和波速未知等三种原理;介绍外部施加行波脉冲信号对电力电缆故障进行分析和定位的常用方法。介绍行波测距装置的应用现状。最后对电力传输线故障中的行波技术应用做了评述。

**关键词:**行波理论;电力架空线;电力电缆;故障定位

**Abstract:** Technology for fault location of power transmission lines and power cable based on traveling waves has made a rapid progress and wild application in recent years. The general concept of traveling-wave theory combined with transmission line is introduced as well as circuit model of transmission line, mathematics model, the speed of fault traveling-wave and its wave features. Single terminal method, double terminal method and unknown wave speed method for fault location are introduced. Method of impulse signal input power cable for fault location is described. At last, some reviews of the application of traveling wave to fault location of power transmission lines and power cable are given.

**Key words:** traveling-wave theory; power transmission line; power cable; fault location.

中图分类号:TM773 文献标识码:A 文章编号:1003-6954(2008)02-0057-03

行波法故障定位原理提出已久,但由于当时技术条件限制,未能有成熟的产品推广应用。20 世纪 90 年代以来随着计算机、通信和信号采集处理技术的发展,人们对暂态波过程的处理能力得到提高,把行波信息和新技术联系起来应用于高压架空传输线和输电缆故障点定位和探测的研究应用很多。下面结合架空传输线说明行波传播的一般理论概念,介绍目前利用故障行波对电力传输线和电缆进行测距的常规技术,并对行波技术在该领域的应用做了评价和展望。

## 1 架空传输线上的行波传播

### 1.1 基本概念

电力系统分析中通常所采用的基于电路的数学模型适用于频率很低或波长很大的情况,当所考虑对象的物理尺寸大于波长也即频率很高时,就必须用电磁波理论取代电路理论。暂态行波是指系统非正常运行过程中突然出现,而后又逐渐消失的行波,产生的原因有短路、断线、操作、雷击和雷电感应等,它是系统处于非正常状态的特征。传输线上的行波测距是利用故障时刻的高频暂态分量进行的。

行波的折射与反射:传输线是均匀的分布参数元件,行波在沿线路传播时,所遇到的波阻抗通常不变,当行波传播至线路与其它设备的连接点时,电路参数发生突变,波阻抗也随之突变,行波电压、电流在线路上建立起来的传播关系被破坏,这时会有一部分行波返回到输电线路,另一部分通过连接点传至其他电路环节中,这种现象就称为行波的反射和折射现象。

### 1.2 数学模型

对于传输线—地等值电路,可以将线路看成是由无数个长度为  $dx$  的小段所组成。设单位长度导线的电感及电阻分别为  $L_0$ 、 $r_0$ ;单位长度导线对地的电容及电导分别为  $C_0$ 、 $g_0$ 。则长度为  $dx$  线段的参数应为  $L_0 dx$ 、 $r_0 dx$ 、 $C_0 dx$ 、 $g_0 dx$ ,则线路的等值电路如图 1。

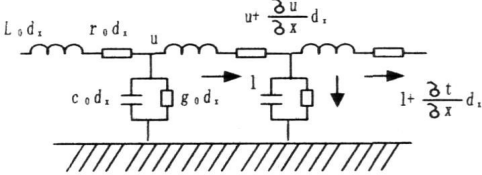


图 1 单导线线路的等值电路

行波传播的数学模型由上面等值电路推导得:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

通常输电线路的对地电导很小,可以略去。以地为回路的线路电阻要引起波的衰减和变形,其影响随波的传播距离而增加。略去  $r_0$ 、 $g_0$  后,应用拉氏变换求解方程(1)、(2)可得:

$$u = u_q(t - \frac{x}{v}) + u_f(t + \frac{x}{v}) \quad (3)$$

$$i = i_q(t - \frac{x}{v}) + i_f(t + \frac{x}{v}) \quad (4)$$

其中: $v$  为行波传播速度,  $u_q(t - \frac{x}{v})$  代表一个以速度  $v$  向  $x$  正方向行进的电压波,  $u_f(t + \frac{x}{v})$  代表一个以速度  $v$  向  $x$  负方向行进的波。通常称  $u_q$  为前行电压波,  $u_f$  为反行电压波。同样称  $i_q$  为前行电流波,  $i_f$  为反行电流波。行波方程具体解的表达式由给定的边界条件及初始决定。

### 1.3 波速度的选择

故障测距研究关心的是行波传播时间和波速以及此二者的精确化。电磁场的波动特性说明了电磁作用的传递以有限速度进行。波速的大小由媒质的特性决定:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (5)$$

式中: $\mu_r$ 、 $\epsilon_r$  分别为相对磁导率和相对介电常数。 $c \approx 3 \times 10^8$  m/s 为电磁波在自由空间传播的速度,即光速。电力电缆单位长度对地电容较大,故电缆中的波速一般为光速,架空传输线上的故障行波波速通常取为光速,由于实际波速的计算与架空线路的结构、所在地区大地的电阻率、线路的分布电感和分布电容有关,因此对于不同线路的实际  $v$  是不同的,采用光速代替实际行波速度会带来测距误差。

## 2 传输线上的故障行波测距分析

故障行波的产生如图2所示,当传输线MN上某点F发生故障时,由叠加原理,故障时F点电势为零,相当于在故障点F处加一个与该点正常负荷状态下大小相等、方向相反的电压。在该电压作用下,将产生由故障点F向线路两端传播的行波。设故障发生

时刻为  $t=0$ ,如图3故障点F的电压和电流行波向线路的两端传输,到达M、N点时由于波阻抗不连续,行波将发生反射和透射,反射后的行波再次到达故障点时,又将发生反射和透射,这种过程循环往复,直至能量消耗完毕进入故障后稳态。

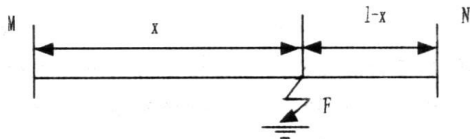


图2 线路故障示意图

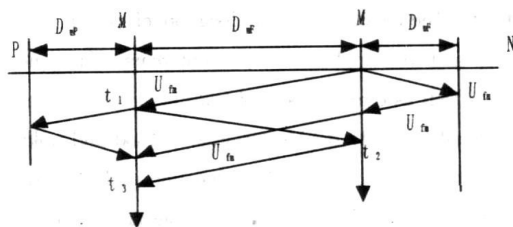


图3 故障行波的传播示意图

### 2.1 行波速度为已知的测距方法

#### 2.1.1 单端法

在传输线发生故障时,故障产生的电流行波在故障点于母线之间来回反射。单端法通过母线处感受到的故障初始行波脉冲与由故障点反射回来的行波脉冲之间时间差  $\Delta t$  测距。如图2所示以短路故障为例:设线路长度为  $l$ ,波速度为  $v$ ,故障点距离M端为  $x$ ,故障初始行波与由故障点反射波到达母线的时刻分别为  $T_1$ 、 $T_3$ ,则故障距离  $x$  为:

$$x = \frac{1}{2} v \Delta t = \frac{1}{2} v (T_3 - T_1) \quad (6)$$

#### 2.1.2 双端法

通过故障初始行波到达线路两端测试点的时刻来计算故障点的距离。如图2所示线路全长为  $l$ ,故障点距M端为  $x$ ,距离N端为  $l-x$ ,行波到达母线M端和N端的时刻分别为  $t_1$ 、 $t_1'$ ,则有:

$$x = \frac{v(t_1 - t_1') + l}{2} \quad (7)$$

由(6)和(7)式可知,测距关键在于准确记录电流行波到达线路两端的时间和波速信息。由前面分析比较知道双端行波测距法仅利用故障产生的第一个行波波头信号,不受故障点透射波的影响,而且初始行波一般比较强烈,线路过渡电阻的电弧特性、系统

运行方式变化、线路分布电容及负荷电流等对测距准确性不会造成较大影响。故利用双端数据利于更加准确地判断故障距离,但测距装置必须有两端数据的交换通道和两端时间同步设备,增加了装置的生产成本。

## 2.2 行波速度未知时的双端测距方法

实际的传输线三相间存在着电磁耦合,在发生不对称接地故障时会产生在线路的相与相之间运动的线模分量以及在线路与大地之间运动的地模分量。因此还可以选择通过相模变换捕捉零模和线模分量到达两检测点的时刻实现测距,消除波速对测距精度造成的影响。

相模变换是指对输入信号进行模变换,主要是为去掉各相间电磁耦合。在模空间,各模量相互独立,可采用单相线路的方法分别对各模量进行分析。如采用凯伦贝尔变换,由输入电流行波的采样值  $i_a(n)$ 、 $i_b(n)$ 、 $i_c(n)$  得到线模  $i_\alpha(n)$ 、 $i_\beta(n)$  和地模  $i_0(n)$  的离散值,即:

$$3i_\alpha(n) = i_a(n) - i_b(n) \quad (8)$$

$$3i_\beta(n) = i_a(n) - i_c(n) \quad (9)$$

$$3i_0(n) = i_a(n) + i_b(n) + i_c(n) \quad (10)$$

以图 2 为例,设线模速度为  $v_1$ ,零模波速为  $v_0$ ,线模分量到达母线 M 端和 N 端的时刻分别为  $t_1$ 、 $t_1'$ ,零模分量到达母线 M 端和 N 端的时刻分别为  $t_2$ 、 $t_2'$ ,则计算接地点:

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

在发生非接地型故障时,由于零模分量为零,无法获得  $t_2'$ 、 $t_2$ ,因此这种方法只能用于接地故障测距。该原理应用的最大困难在于零模分量衰减很快,因此在远距离传输线路中不易采用,目前也还没有采用该原理的线路行波测距装置。由于诸如发电机和变压器以及母线的单相接地故障比例很大,所以这种方法进行电气主设备绕组接地故障定位的科研前景仍然很大。

## 2.3 行波信号的提取

电压和电流的故障暂态分量从线路末端提取,由于其所覆盖的频带很宽,从几千赫兹到几百千赫兹,为了能够在二次侧观察到线路上的行波现象,要求电压、电流信号变换回路要有足够快的响应速度。常规的电容分压式电压互感器截止频率太低,不能满足行波测距的要求。如果要提取暂态电压,需要采用专门

设计的暂态信号耦合器。通过理论分析和实验结果证明常规电流互感器有很快的高频响应特性,它能传输高达 100 kHz 以上的高频信号,能够满足暂态行波测距的要求。由于其简单、经济、可靠,基于电流暂态量的行波故障测距技术得到推广。当然如果可以同时采集到线路末端互感器侧的二次行波型号,在原理上无疑是最为完备的。目前正处在研究试验阶段的光互感器可望成为传变暂态行波信号的理想工具。

## 3 电力电缆故障的行波定位

在电力电缆故障的探测与定位方法中,尚未达到与输电线故障在线检测与测距的成熟程度,很少有提到在线行波概念。一般所用外加脉冲的概念,其实也是一种对行波信息的利用。脉冲行波法是电缆故障测距中的常用方法,基于行波的电力电缆故障离线测距方法通常有:①低压脉冲反射法用于电缆的低阻、短路及断路故障。测试时,向故障电缆注入一个低压脉冲使其在电缆中传播,脉冲遇到阻抗不匹配点(短路、断路和中间接头等)时发生反射,记录反射脉冲与发射脉冲的时间差  $\Delta t$ 。同理于(6)式,由已知脉冲在电缆中的波速度为  $v$ ,可以计算阻抗不匹配点到测量点的距离。②脉冲电压法适用于高阻和闪络故障,由直流高压或脉冲高压信号击穿电缆故障点,利用放电电压脉冲在观察点与故障点之间往返一次的时间来测距,适用于高阻和闪络故障。③脉冲电流测试法,通常包括直流高压闪络法和冲击高压闪络法,同样适用于高阻和闪络故障,但由于克服了脉冲电压法的缺点,所以应用更广泛。上面方法测试原理中的共同点都是通过从外面向故障电缆注入电脉冲信号,然后利用放电脉冲在信号采集点与故障点之间往返一次的时间来确定故障点位置。

## 4 行波测距装置应用现状

20 世纪 90 年代以来,国内外制造商们已有很多行波测距的产品投入实际运行,并且积累了多年的运行经验,也产生了较大的经济效益。英国的 Hathaway 公司在 1992 年研制出利用行波暂态分量的现代行波测距装置原型样机,并在苏格兰电网投入试运行。1993 年,该公司推出正式的行波测距系统。至 2001 年为止,该公司分别在苏格兰和 (下转第 65 页)

[15] 吴京涛. 基于 PMU 的电力系统动态监测系统软件包的框架研究[D]. 北京:清华大学电机工程与应用电子技术系, 2001.

[16] 谢小荣, 李红军, 吴京涛, 等. 同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 10—14.

[17] Snyder A F, Hadjsaid N, Georges D, et al. Inter-area oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements, 1998 International Conference on Power System Technology, 1998, 2(8): 790—794.

[18] Xie Xiaorong, Li Jian, Xiao Jinyu, et al. Inter-area damping control of STATCOM using wide-area measurements. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004, 1: 222—227.

[19] Bretas N G, Phadke A G. Real time instability prediction through adaptive time series coefficients. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 1999, 1: 731—736.

[20] Wang Yi-Jen, Liu Chih-Wen, Sue Len-Dar. A remedial control scheme protects against transient instabilities based on phasor measurement units (PMUs) — A case study. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1191—1195.

[21] Nuqui R F, Phadke A G, Schulz R P. Fast On-line voltage security monitoring using synchronized phasor measurements and decision trees. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, 3: 1347—1352.

[22] Milosevic B, Begovic M. Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 121—127.

[23] Snyder A F, Ivanescu D, HadjSaid N, et al. Delayed-input wide-area stability control with synchronized phasor measurements and linear matrix inequalities. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1009—1014.

[24] Mekki K, Snyder A F, HadjSaid N, et al. Damping controller input-signal loss effects on the wide-area stability of an interconnected power system. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1015—1019.

(收稿日期: 2007—12—10)

(上接第 59 页) 南非的 132~400 kV 的电力系统中共安装了 30 套行波采集单元, 所监视的线路包括 3 条串联补偿线路和一条直流线路。加拿大的不列颠哥伦比亚水电公司在 1993 年研制出双端行波故障测距系统, 并安装在不列颠哥伦比亚省的 14 个 500 kV 变电所, 覆盖线路总长超过 5 300 km。该系统通过专门研制的耦合装置采集故障产生的高频电压信号。实际运行表明, 上述系统均可以将故障定位到 300 m 以内。国内科汇公司推出行波测距产品十多年来, 取得很大的成功。产品 XC-2000 投入在数个省网和南方电网以及 500 kV 葛南直流输电线路路上运行, 测距平均绝对误差小于 200 m。

5 结论与展望

行波测距技术能够实现高压架空线路故障的精确定位, 具有简单、可靠、适应性强和适用面广的特点。电力电缆故障的离线探测与定位较成熟, 其原理也比较简单, 发展方向是联系应用架空线上的成熟技术, 发展在线行波故障点定位。

现代行波故障测距系统需要解决的关键问题仍然包括的有: 信号的确定性与防范受扰动的问题; 波

速的精确性与测距误差如何进一步控制; 小波变换和 GPS 与行波测距的有效结合以及研制光互感器用于取得暂态信号等问题。新的基于行波信息的故障定位原理的开拓及行波和相关新技术的应用结合也是发展的大方向。

参考文献

[1] 徐丙垠, 李京, 陈平等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62—65.

[2] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 36—39.

[3] 陈平, 牛燕雄, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距系统的研制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 81—85.

[4] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安交通大学出版社, 2007.

[5] 乔峰, 余发山, 张宇华. 基于行波法的输电线路故障测距的研究[J]. 煤矿机电, 2004(5): 69—72.

[6] 张正团, 文锋, 徐丙垠. 基于小波分析的电缆故障测距[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 49—52.

作者简介:

党晓强(1975~), 男, 四川西昌人, 博士, 讲师, 从事电气设备故障诊断方面的教学和研究工作。

(收稿日期: 2008—01—20)

# 矫正开关函数提高 AC—AC 矩阵变换器的可靠性

赵葵银, 杨 青, 唐勇奇

(湖南工程学院, 湖南 湘潭 411101)

**摘 要:**提出一种矫正开关函数的容错控制技术,以降低 AC—AC 矩阵变换器断相时的故障发生率,提高变换器的可靠性。通过较详细的数学分析断相故障发生后,用合适的输入电压序列的对称与非对称模式矩阵的构建合成新的开关函数矩阵,进一步合成故障情况下所需的输出波形,使矩阵变换器在缺相时依然能继续运行。仿真与实验结果验证该容错方案的可行性。

**关键词:**容错算法;开关函数;AC—AC 矩阵变换器;断相故障;可靠性;序列

**Abstract:** A novel remedial approach of switching function for the fault-tolerant control is presented to reduce open-phase failures occurring in AC—AC matrix converters and to improve the reliability of AC—AC converter. By detailed mathematics analyses, switching function matrices, containing symmetric and anti-symmetric mode matrices with appropriate sequences of input voltages, are developed to synthesize the redefined output waveforms under the faults, so AC—AC matrix converter can continue its operation. The simulation and experimental results show the feasibility of the fault-tolerant scheme.

**Key words:** fault-tolerant algorithm; switching function; AC—AC matrix converter (MC); open-phase failure; reliability; sequence.

中图分类号:TM762,TP277 文献标识码:A 文章编号:1003—6954(2008)02—0060—02

直接 AC—AC 矩阵变换器(Matrices Converter, 简称 MC)是一种高效、节能、可靠、有发展前途的新型电力变换器,它有许多优点,如:不需储能元件,输入和输出电流均为正弦波,输入功率因数高,可实现能量再生,能量可双向流动,具有四象限运行能力,结构紧凑,低噪音,使用寿命长。另外,MC 的诱人之处还体现在经济性方面:相对其它 AC—AC 变换电路而言,它只需数量较少的开关,且过压保护的方法不复杂,费用较低<sup>[1]</sup>。MC 的应用领域非常广泛,被寄予厚望的潜在应用领域是在航空航天和军事应用中,这些领域中,减小体积和重量以及在较高温度的环境下可靠运行是一个至关重要问题,甚至超过了装置的费用与复杂性问题<sup>[2]</sup>。在这些应用中,当系统故障时必须确保继续运行,因此改善 MC 系统的可靠性尤为重要。为提高系统的可靠性,减少 MC 的故障发生率。在对 MC 开关函数的数学分析的基础上,提出了一种新的 MC 开关函数矫正控制策略与容错算法。

开关函数矩阵由对称与非对称模式两部分组成,当 MC 某一相发生断相故障后,重新改进与矫正三个开关函数矩阵,由矫正后的开关函数矩阵和时变的输

入电压一起,直接重新合成输出波形,确保 MC 继续正常运行。该方法是基于数学分析的矫正方法,方案可靠,且算法简单,易于实现,不需要更改原有系统的硬件。仿真与实验结果验证了所提出的故障容错方案的可行性。

## 1 矫正开关函数算法

变换器故障主要包括开关开路、变换器的断相、电机绕组开路以及绕组短路等故障。在实际应用中,MC 使用较长时间后,因绝缘老化,断相开路故障发生的几率往往很高,多数情况会导致单相开路。基于中性点的连接方法,分析 MC 的开关函数,提出一种矫正 MC 开关函数的故障容错方案。为得到一个具有容错能力的 MC,提出的故障容错解决方案是两中性点之间增加一连接支路,用 TRN(使用双向晶闸管或反并联的晶闸管)控制连接。正常情况下,三相对称的输入电压被描述为: $v_{IK} = V_{im} \cos(\omega_l - (k-1)(2\pi/3))$ ,  $k=1, 2, 3$ , 其中,  $V_{im}$  为幅值,  $\omega_l$  为线路频率;三相平衡输出电压被描述为:

$v_{Oj} = V_{om} \cos(\omega_o t + \theta_o - (j-1)(2\pi/3))$ ,  $j=1, 2, 3$ , 其中,  $V_{om}$  为幅值;  $\omega_o$  为输出频率;  $\theta_o$  为输出电压相角。用开关函数矩阵  $[m_{jk}]_{ABC}$  来合成期望的输出电

压,表达式为:

$$[v_{o1} \quad v_{o2} \quad v_{o3}]^T = [m_{jk}]_{ABC} [V_{I1} \quad V_{I2} \quad V_{I3}]^T \quad (1)$$

式中,元素  $m_{jk}(j=1,2,3; k=1,2,3)$  表示开关  $S_{jk}$  的调制函数;上标  $T$  表示转置矩阵。考虑到三相输入端的电压源和变换器输出端的感性负载的对称性,调制函数必须满足关系式<sup>[8]</sup>:

$$m_{j1} + m_{j2} + m_{j3} = 1 (j=1,2,3)。$$

当系统检测到开关断路、断相、绕组开路故障时,与故障相有联系的开关矩阵元素不能与被损坏的相建立电气连接。此时,触发 TRN 来连接电源与负载的中性点,使变换器工作在两相控制模式,那么余下两相的输出电压和电流的幅值须被调整为乘以  $\sqrt{3}$  倍,而相位也须在原来基础上相移  $30^\circ$ 。假定缺相故障发生在 C 相, A、B 相的输出电压按调整和修正后的幅值与相角,重新定义为<sup>[3]</sup>:

$$v_{oj}^r = \sqrt{3} V_{om} \cos(\omega_o t + \theta_o - (\pi/6)) - (j-1)(\pi/3), j=1,2 \quad (2)$$

C 相损坏时,由修正的开关函数矩阵  $[m_{jk}^r]_{AB}$  与三相输入电压重新构造所需的输出电压,定义为:

$$[v_{o1}^r \quad v_{o2}^r]^T = [m_{jk}^r]_{AB} [V_{I1} \quad V_{I2} \quad V_{I3}]^T \quad (3)$$

求取开关函数矩阵  $[m_{jk}^r]_{AB}$  可按:

$$[m_{jk}^r]_{AB} = \frac{1}{3} [J_{23}] + \frac{4V_{om}}{9V_{om}} \begin{bmatrix} m_s^r(1) & m_s^r(2) & m_s^r(3) \\ m_{as}^r(2) & m_{as}^r(1) & m_{as}^r(3) \\ m_{as}^r(1) & m_{as}^r(3) & m_{as}^r(2) \end{bmatrix} + \frac{2V_{om}}{9V_{om}} \begin{bmatrix} m_{as}^r(2) & m_{as}^r(1) & m_{as}^r(3) \\ m_{as}^r(1) & m_{as}^r(3) & m_{as}^r(2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $m_s^r(i) = \cos[(\omega_o + \omega_l)t - (i-1)(2\pi/3)]$ ,  $m_{as}^r(i) = \cos[(\omega_o - \omega_l)t - (i-1)(2\pi/3)]$ ,  $i=1,2,3$ ,  $[J_{23}]$  是一个  $2 \times 3$  的单位矩阵,下标  $s$  与  $as$  分别表示对称与非对称方式的元素,对称与非对称方式矩阵均含有输入电压矢量的正序与负序分量。

同样地,若缺相故障发生在 A 相, B、C 相的输出电压按调整和修正后的幅值与相角,重新定义为:

$$v_{oj}^r = \sqrt{3} V_{om} \cos[(\omega_o t + \theta_o - (2\pi/3) - (\pi/6)) - (j-2)(\pi/3)], j=2,3 \quad (5)$$

A 相损坏时,求取开关函数矩阵  $[m_{jk}^r]_{BC}$  按:

$$[m_{jk}^r]_{BC} = \frac{1}{3} [J_{23}] + \frac{4V_{om}}{9V_{om}} \begin{bmatrix} m_s^r(2) & m_s^r(3) & m_s^r(1) \\ m_{as}^r(3) & m_{as}^r(1) & m_{as}^r(2) \\ m_{as}^r(2) & m_{as}^r(1) & m_{as}^r(3) \end{bmatrix} + \frac{2V_{om}}{9V_{om}} \begin{bmatrix} m_{as}^r(3) & m_{as}^r(2) & m_{as}^r(1) \\ m_{as}^r(2) & m_{as}^r(1) & m_{as}^r(3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

同样地,若缺相故障发生在 B 相, C、A 相的输出

电压按调整和修正后的幅值与相角,重新定义为:

$$v_{oj}^r = \sqrt{3} V_{om} \cos[(\omega_o t + \theta_o - (4\pi/3) - (\pi/6)) - (j-3)(\pi/3)], j=1,3 \quad (7)$$

B 相损坏时,修正的开关函数矩阵  $[m_{jk}^r]_{CA}$  按:

$$[m_{jk}^r]_{CA} = \frac{1}{3} [J_{23}] + \frac{4V_{om}}{9V_{om}} \begin{bmatrix} m_s^r(1) & m_s^r(2) & m_s^r(3) \\ m_{as}^r(3) & m_{as}^r(1) & m_{as}^r(2) \end{bmatrix} + \frac{2V_{om}}{9V_{om}} \begin{bmatrix} m_{as}^r(3) & m_{as}^r(2) & m_{as}^r(1) \\ m_{as}^r(1) & m_{as}^r(3) & m_{as}^r(2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过以上分析可知,只要通过适当的元素序列就可以得到缺相时的容错开关矩阵,合成新的输出电压,可使变换器继续运行。MC 的输入电流通过转置开关函数矩阵被求得,由于非对称两相运行,该电流包含的  $\omega_o$  和  $2\omega_o - \omega_l$  分量的谐波,要注意的是,故障期间的输入电流质量是次要的,因为让变换器故障后继续运行只是一个短期的应急与保护过程。

## 2 方案验证

通过 Matlab 仿真与实物实验,验证提出提高 MC 可靠性的故障容错方案。仿真与实验参数为:输出频率为 55 Hz,开关频率为 10 kHz,三相平衡 R-L 负载 ( $5 \Omega$ ,  $15 \text{ mH}$ ),电源相电压为 200 V, 50 Hz。图 1 为在 C 相缺相故障时, A、B 两相电流与线电压的仿真波形,可以看出,电压幅值约 600 V (理论值为  $200 \text{ V} \times \sqrt{3} \times \sqrt{3} = 600 \text{ V}$ ),并产生了  $30^\circ$  的相移,状态过度平稳。以 DSP(TMS320F2407)和 FPGA(EPM7128S)为核心,建立 AC-AC 矩阵变换器的实验装置,测试提出的控制策略,图 2、图 3 分别为 C 相故障情况下稳态和瞬态时的输出电流波形,从实验中可看出,系统过度过程平稳,波形正弦度较好,达到了预期的性能,系统能可靠工作。

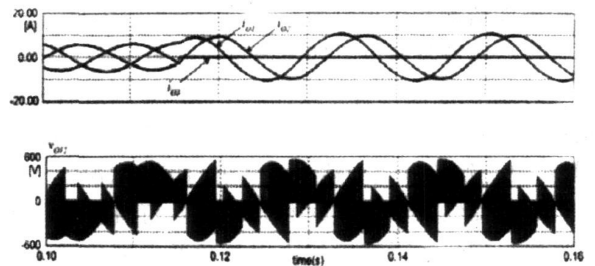


图 1 C 相故障(缺相)情况下的输出电流与输出线电压的仿真结果 (下转第 81 页)

## 6 结论

中国在今后相当长一段时间内对能源需求量还很大,要实现能源的可持续发展,达到高效、节能、环保的目的,必须探求合理的能源利用方式。

以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统是一种提供清洁、可靠、高质量电能并实现冷热电联供的新技术,作为集中供电大电网的补充,它对环境安全及经济、能源的可持续发展起着战略意义。

分布式供能系统有多种方案,而中国对分布式供能系统的研究起步较晚,但作为集中供能系统的有益补充,分布式供能系统是中国未来能源系统的一种必然趋势。由于设备昂贵,技术有限,对实体组装进行现场研究是不现实的,所以,借助模块化模型的建立,并在此基础上进行仿真分析就成了进一步研究与优化分布式供能系统的有利手段。

前面以模块化模型的形式较为系统地给出了以

微型燃气轮机为核心的几种主要分布式供能系统,在模块化模型的基础上提出相应结合技术或相关优化方法,旨在为分布式供能系统的仿真优化打下良好的基础。

## 参考文献

- [1] 杨策,刘宏伟,李晓等.微型燃气轮机技术[J].热能动力工程,2003.
- [2] 黄锦涛,丰镇平,刘莉.微型燃气轮机冷热电联产系统运行模式研究[J].热力发电,2004.
- [3] 冯志兵,金红光.燃气轮机冷热电联产系统与蓄能变工况特性[J].中国电机工程学报,2006.
- [4] 段立强,徐刚,林汝谋,等.IGCC系统热力与环境性能结合的评价准则[J].中国电机工程学报,2004.
- [5] 翁一虎,翁史烈,苏明.以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统[J].中国电力,2003.
- [6] Omar Othman Badran. Gas turbine performance improvement [J]. Applied Energy, 1999.

(收稿日期:2007-12-22)

(上接第61页)

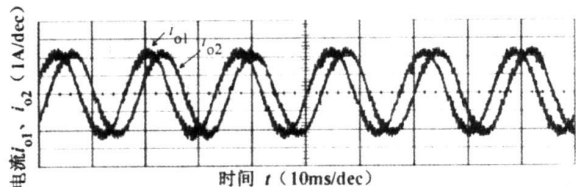


图2 C相缺相故障时输出电流的  
实验结果(1 A/格,10 ms/格)

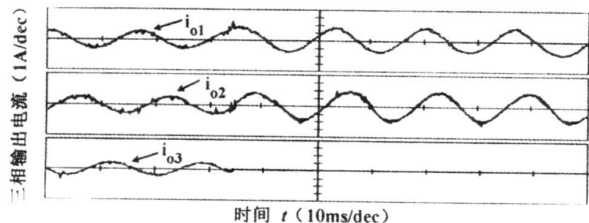


图3 故障发生时的瞬态输出电流波形的  
实验结果(1 A/格,10 ms/格)

## 3 结论

无论哪一相发生故障,均可在数学分析方法的基础上,重新构建的开关函数矩阵,合成新的输出信号,

使MC在缺相情况下仍然可以继续工作,大大减少了因某一相断相时MC停止运行的几率。仿真与实验已经证明该容错方案的可行性,提出的矫正开关函数矩阵策略,可用来提高MC抗故障的鲁棒性。

## 参考文献

- [1] 王兆安,黄俊.电力电子技术(第4版)[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [2] O. Simon, J. Mahlein, M. N. Muenzer, and M. Bruckmann, "Modern Solutions for Industrial Matrix Converter Applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 2, pp. 401-406, Apr. 2002.
- [3] P. Wheeler, J. Clare, L. Empringham, M. Apap, and M. Bland, "Matrix Converters", Power Engineering Journal, vol. 16, no. 6, pp. 273-282, Dec. 2002.
- [4] T. H. Liu, J. R. Fu, and T. A. Lipo, "A Strategy for Improving Reliability of Field-Oriented Controlled Induction Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29, no. 5, pp. 910-918, Sep./Oct. 1993.
- [5] 汤宁平,王建宽,吴汉光.矩阵变换器的SPWM控制技术及其实现[J].电工技术学报,2003(4):25-29.

作者简介:

赵葵银,男,1968年生,硕士,副教授,研究方向:电力电子与电气传动、过程控制。

(收稿日期:2007-12-10)

# WAMS 技术发展现状及四川电网应用模式探讨

李 建

(四川省电力公司,四川 成都 610041)

**摘 要:**近年来,同步相量测量技术得到了长足的发展,广域监测系统获得广泛应用。概述了广域监测技术的发展历程及应用现状,并总结了广域监测相比传统监测的优势。在此基础上,探讨了广域监测技术在四川电网的应用模式。

**关键词:**广域监测系统;同步相量测量

**Abstract:** In recent years, synchronized phasor measurement technique has got a rapid progress and wide-area measurement system (WAMS) has been widely used. The development history and the application status of WAMS technique are summarized, and the advantages of WAMS over the conventional system for monitoring and measuring are described. On this basis, the application mode of WAMS technique in Sichuan power grid is discussed.

**Key words:** wide-area measurement system; synchronized phasor measurement.

**中图分类号:**TM93 **文献标识码:**B **文章编号:**1003-6954(2008)02-0062-04

全国联网的实施已使中国电力系统呈现大区交直流互联运行的状态。互联电网范围的扩大和系统容量的增长,使电力系统面临许多新的问题,例如:弱联系的长链式同步交流电网的区域间低频振荡问题;大区电网暂态稳定在线预警与协调控制问题;复杂电力系统实时监视、辨识、仿真问题。这些问题的出现都对电网的实时监测和反事故能力提出了更高的要求。随着卫星授时技术、数字信号处理技术和通信技术的发展,同步相量测量(Synchronized Phasor Measurement, SPM)技术及以此为基础的动态安全监控系统已成为目前电力系统稳定监测与控制的重要发展趋势。

## 1 广域监测相比传统稳态监测的优势

广域监测系统(Wide-Area Measurement System, WAMS)弥补了传统的适用于稳态监测的SCADA/EMS系统不能监测和辨识电力系统动态行为的不足,相对而言广域监测具有以下四方面重要优势:

1) 监测断面具有一致性。不同地点的所有监测量可统一到具有精确时标的同一时间断面,能够以更同步、更一致的方式描述电力系统的运行状况。

2) 可提供同步的实时相角信息。可直接获得表征发电机同步运行特征的内电势角及电网关键节点的相角信息,为稳定控制策略的在线生成和选取提供更充分的实时信息。

3) 使动态过程监测和辨识成为可能。具有毫秒

级的数据刷新率且全网同步,可监测系统的动态行为并辨识参数的动态变化。

4) 能提供全局化的分析与控制决策信息。广域测量使得控制决策所需的反馈信息不必局限于本地,可优选具有高可观性的监测量作为反馈量,有利于克服仅依据本地信息的控制方法不能考虑电网中其它区域的暂态行为,从而难以满足电网全局稳定的缺点。

## 2 WAMS 的发展及应用现状

美国1992年开始将同步相量测量单元布置于其电网的关键厂站,实现就地监测、扰动事件重演等功能,并研究使用同步测量的相量进行系统参数辨识应用的可行性<sup>[1-2]</sup>。随后,在EPRI(Electric Power Research Institute)的支持下,WSCC(Western System Coordinating Council)、NYPA(New York Power Authority)、TVA(Tennessee Valley Authority)、SCE(Southern California Edison)等电力公司进一步推进广域监测的应用,经由光纤通信网络实现同步相量的实时上送,开发了完整的监测系统<sup>[3-4]</sup>,并研究开发基于同步相量测量的动态安全评估(Dynamic Security Assessment, DSA)<sup>[5]</sup>、谐波状态估计(Harmonic State Estimation)<sup>[6]</sup>、振荡失步判断<sup>[7]</sup>等功能。在1996年夏天美国的两次大停电<sup>[8]</sup>及2003年的美一加8.14大停电<sup>[9]</sup>中,WAMS准确地记录了事故发生的过程,为事故原因分析提供了广阔区域内具有统一时间断面和时序的暂

态过程同步数据。在开发负荷监测系统、负荷模拟方法及负荷模型方面,美国也做了不少工作。美国电科院(EPRI)与新墨西哥州大学(New Mexico State University)合作,选择典型的居民负荷、商业负荷、工业负荷和农业负荷馈线安装数据采集装置,捕捉负荷对电压扰动的响应,用所测得的数据,识别每一类负荷的响应,转换并简化,利用分类数据进行外推。法国 1992 年开始设计基于 PMU 的协调防御计划,希望通过实时判断同调区之间的功角稳定情况,进行解列、切负荷、切机控制,目的是防止局部故障向全网扩散<sup>[10-11]</sup>。日本 1993 年开始尝试使用 PMU 构造同步监测网,至 2002 年已配置了 11 个同步监测点,实现广域动态监测、电网参数估计、谐波估计等功能,并计划将同步测量引入自适应保护<sup>[12]</sup>。

中国于 1995 年研制出使用全球卫星定位系统同步授时的 PMU<sup>[13]</sup>,并成功应用于黑龙江东部电网的区域稳定监测系统<sup>[14]</sup>。在黑龙江区域稳控系统的基础上,文献[15]提出广域动态安全监测系统的理论框架,对 WAMS 技术的深入研究和应用发展起到重要推动作用。2003 年 1 月,国调中心结合中国电网的特点,在 IEEE Std 1344-1995 的基础上,制定了《电力系统实时动态监测系统技术规范(试行)》,并于 2005 年 5 月通过专家评审,申报为国家电网公司的企业标准。该标准为同步相量测量技术在中国的广泛应用确定了统一标准的接口方式和性能指标。2003 年至 2007 年期间,国调中心、华北、东北、华东、华中、西北等区域电网以及江苏、广东、山东、贵州、湖北、湖南、广西等省网已经成功实施了一系列广域监测工程,使中国 PMU 布点接近 400 个厂站,以 20 ms(甚至 10 ms)间隔向数据中心站实时上送同步相量数据,实现了发电机进相运行监视、快速计算和控制策略搜索、功角稳定预测、在线低频振荡监测、同步故障记录重演等功能。各网省 WAMS 系统在历次事故分析及系统试验中提供了可靠的同步断面数据,发挥了重要作用。其中,2004 年 4 月 8 日,华东电网在黄渡附近做了一次单相短路试验,通过分析 PMU 记录的暂态试验数据,查清了之前系统发生短路故障时母差保护误动的原因。东北和华北的 WAMS 系统完成了 2004 年 3 月 25 日和 2005 年 3 月 29 日东北大扰动试验过程中,东北网内主要发电厂和变电站以及东北—华北联络线的动态监测和数据记录,为分析东北—华北联网送电能力及校核仿真结果提供了直接的数据源。西

北电网 2007 年 4 月进行了大扰动试验,利用 WAMS 系统获取扰动过程的同步断面,验证仿真模型修正后电网稳定特性的变化。

目前,同步相量测量主要还应用于广域监测,但学者们已经在广域控制研究领域取得了较大的进展:文献[16]较全面地分析了同步相量测量应用于暂稳控制的可行性;文献[17-18]系统地研究了将同步相量技术应用于互联电网广域阻尼控制,解决区域间低频振荡问题;文献[19-20]探索了利用实测的同步相量进行暂态稳定预测以及在线生成切机、切负荷的暂稳控制策略;文献[21-22]探讨了将同步相量应用于电压稳定预测和控制的方法;文献[23-24]讨论了通信时滞和通道故障对广域控制的影响,并提出了利用线性矩阵不等式的处理方法,有利于广域控制器的实用化设计。

### 3 四川电网 WAMS 系统应用模式探讨

四川电网目前已经建成“在线安全稳定预警及控制决策系统”,该系统基于 EMS 状态估计后数据,实现在预想故障集下的电网安全稳定评估及辅助决策,已成为调度员和运行方式分析人员的高效率得力工具。因此,四川电网 WAMS 系统的高级应用建设应与在线安全稳定预警及控制决策系统相结合,整合并综合利用电力系统的稳态和动态运行信息,集电网稳态及动态监测、安全评估、安全预警、模型及参数辨识等功能于一体,共同构成四川电网动态监测预警系统。

#### 3.1 电网动态监测

广域监测是 WAMS 系统的基本应用功能。根据 WAMS 具有全网同步测量以及毫秒级数据刷新能力的优势,可重点实现发电机功角监测、频率监测、枢纽站电压监测、关键断面功率监测等功能。上述电网动态过程的实时监测作为 EMS 系统稳态监测的补充,并结合历史数据追忆功能,构筑全方位的在线监测平台和事故分析支撑平台。

#### 3.2 利用 WAMS 信息的状态估计模块

整合 EMS 系统的实时量测、WAMS 的相量量测数据估计全网的母线电压幅值和相角,检测可疑数据,辨识不良数据,计算支路潮流,估计出全部状态量,为电力系统的可观测部分和不可观测部分提供一致的、可靠的电网潮流解。利用 WAMS 信息的状态

估计可借助PMU的精确测量优势,提供更可靠的量测量,作为状态估计中权重更高的基础数据,可改善状态估计的收敛性,提高状态估计的辨识能力和电网状态量估计结果的准确度。

### 3.3 低频振荡实时检测及分析

基于广域测量的功角、电压和功率等同步数据,采用Prony算法等分析方法,对系统动态特性模型进行分析,获取系统低频振荡的频率、阻尼比等特征信息,辨识主导低频振荡发生的关键状态量并进行同调机组分群。在此基础上,通过“在线安全稳定预警及控制决策系统”的辅助决策功能,进一步提出抑制低频振荡的措施,提供稳定控制的辅助决策方案。

### 3.4 电力系统负荷模型辨识

由于现阶段离线仿真中负荷模型对仿真结果影响较大,且尚无有效手段获得较为准确可靠的负荷模型。因此考虑利用WAMS主站接收的动态数据,通过将数字仿真结果与实测结果不断进行比较,利用负荷辨识软件建立负荷模型,并且在WAMS的日常运行中不断对负荷模型进行校核修正。最终将所建模型应用于电网的仿真计算与分析,改善仿真计算的准确度。

### 3.5 优化系统解列控制

当系统发生稳定破坏时,快速检测系统的失步振荡状态,并且准确定位系统的振荡中心位置,启动振荡报警及相应的处理过程。通过快速分析各个局部系统之间的功率平衡变化情况,将系统迅速而合理地解列为供需尽可能平衡而各自保持同步运行的两个或几个孤立网;同时与低周减载、高周切机、低频自启动水轮发电机等措施相互配合,防止系统长时间不能拉入同步或造成系统频率和电压崩溃,扩大事故。

## 4 结语

概述了广域监测技术在国内外的发展历程及应用现状,并在此基础上,结合四川电网的实际情况,讨论了WAMS系统的高级应用与在线安全稳定预警及控制决策系统相结合的应用模式,对四川电网即将进行的WAMS系统建设工作具有参考意义。

### 参考文献

[1] Burnett R O, Butts M M, Cease T W. Synchronized phasor measurements of a power system event. IEEE Transactions on

Power Systems, 1994, 9(3): 1643—1650.

- [2] Phadke A G. Synchronized phasor measurements in power systems. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2): 10—15.
- [3] Bhargava B. Synchronized phasor measurement system project at southern California Edison Co. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999, 1: 16—22
- [4] Cease T W, Feldhaus B. Real time monitoring of the TVA power system. IEEE Computer Applications in Power, 1994, 7(3): 47—51.
- [5] Mittelstadt W A, Hauer J F, Krause P E, et al. The DOE wide area measurement system (WAMS) project — Demonstration of dynamic information technology for the future power system. Proceedings of the Fault and Disturbance Analysis and Precise Measurement in Power Systems Conference, Arlington, Virginia, 1995.
- [6] Meliopoulos A P S, Fardanesh B, Zelingher S, et al. Harmonic measurement system via synchronized measurements. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1094—1100.
- [7] Centeno V, Phadke A G, Edris A. Adaptive out-of-step relay with phasor measurement developments in power system protection. Sixth International Conference on, 1997: 210—213.
- [8] Taylor C W, Erickson D C. Recording and analyzing the July 2 cascading outage. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(1): 26—30.
- [9] Hauer J F. WAMS outreach project: Sharing of knowledge & technology. DOE Transmission Reliability Program Peer Review, 2004.
- [10] Denys Ph, Counan C, Hossenlopp L, et al. Measurement of voltage phase for the French future defence plan against losses of synchronism. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 62—69.
- [11] Faucon O, Dousset L. Coordinated defense plan protects against transient instabilities. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(3): 22—26.
- [12] Saitoh H. GPS synchronized measurement applications in Japan. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, 2002, 1(10): 494—499.
- [13] 丁仁杰. 电力系统同步相量动态测量技术的研究与实现[D]. 北京:清华大学电机工程与应用电子技术系, 1995.
- [14] 闵勇,丁仁杰,任勇,等. 电力系统全网同步监测系统[D]. 清华大学学报,1997,37(7): 86—88.

[15] 吴京涛. 基于 PMU 的电力系统动态监测系统软件包的框架研究[D]. 北京:清华大学电机工程与应用电子技术系, 2001.

[16] 谢小荣, 李红军, 吴京涛, 等. 同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 10—14.

[17] Snyder A F, Hadjsaid N, Georges D, et al. Inter-area oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements, 1998 International Conference on Power System Technology, 1998, 2(8): 790—794.

[18] Xie Xiaorong, Li Jian, Xiao Jinyu, et al. Inter-area damping control of STATCOM using wide-area measurements. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004, 1: 222—227.

[19] Bretas N G, Phadke A G. Real time instability prediction through adaptive time series coefficients. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 1999, 1: 731—736.

[20] Wang Yi-Jen, Liu Chih-Wen, Sue Len-Dar. A remedial control scheme protects against transient instabilities based on phasor measurement units (PMUs) — A case study. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1191—1195.

[21] Nuqui R F, Phadke A G, Schulz R P. Fast On-line voltage security monitoring using synchronized phasor measurements and decision trees. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, 3: 1347—1352.

[22] Milosevic B, Begovic M. Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 121—127.

[23] Snyder A F, Ivanescu D, HadjSaid N, et al. Delayed-input wide-area stability control with synchronized phasor measurements and linear matrix inequalities. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1009—1014.

[24] Mekki K, Snyder A F, HadjSaid N, et al. Damping controller input-signal loss effects on the wide-area stability of an interconnected power system. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1015—1019.

(收稿日期: 2007—12—10)

(上接第 59 页) 南非的 132~400 kV 的电力系统中共安装了 30 套行波采集单元, 所监视的线路包括 3 条串联补偿线路和一条直流线路。加拿大的不列颠哥伦比亚水电公司在 1993 年研制出双端行波故障测距系统, 并安装在不列颠哥伦比亚省的 14 个 500 kV 变电所, 覆盖线路总长超过 5 300 km。该系统通过专门研制的耦合装置采集故障产生的高频电压信号。实际运行表明, 上述系统均可以将故障定位到 300 m 以内。国内科汇公司推出行波测距产品十多年来, 取得很大的成功。产品 XC-2000 投入在数个省网和南方电网以及 500 kV 葛南直流输电线路路上运行, 测距平均绝对误差小于 200 m。

5 结论与展望

行波测距技术能够实现高压架空线路故障的精确定位, 具有简单、可靠、适应性强和适用面广的特点。电力电缆故障的离线探测与定位较成熟, 其原理也比较简单, 发展方向是联系应用架空线上的成熟技术, 发展在线行波故障点定位。

现代行波故障测距系统需要解决的关键问题仍然包括的有: 信号的确定性与防范受扰动的问题; 波

速的精确性与测距误差如何进一步控制; 小波变换和 GPS 与行波测距的有效结合以及研制光互感器用于取得暂态信号等问题。新的基于行波信息的故障定位原理的开拓及行波和相关新技术的应用结合也是发展的大方向。

参考文献

[1] 徐丙垠, 李京, 陈平等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62—65.

[2] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 36—39.

[3] 陈平, 牛燕雄, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距系统的研制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 81—85.

[4] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安交通大学出版社, 2007.

[5] 乔峰, 余发山, 张宇华. 基于行波法的输电线路故障测距的研究[J]. 煤矿机电, 2004(5): 69—72.

[6] 张正团, 文锋, 徐丙垠. 基于小波分析的电缆故障测距[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 49—52.

作者简介:

党晓强(1975~), 男, 四川西昌人, 博士, 讲师, 从事电气设备故障诊断方面的教学和研究工作。

(收稿日期: 2008—01—20)

# 如何提高倒闸操作效率

杨渝嘉

(南充电业局, 四川 南充 637000)

**摘要:**通过对变电站目前倒闸操作过程现状的分析,找出存在的问题及效率低下的原因,针对原因提出改进措施及建议,不断提高倒闸操作速度,提升电网运行管理水平。

**关键词:**倒闸操作;效率;安全;改进措施

**Abstract:** After the analysis on the current status of substation switching operation, the existing problems and the reasons of low efficiency are found out. Based on the above information, the suggestions and improvement measures are proposed to improve the current operation efficiency and to bring the power grid management into a higher level.

**Key words:** switching operation; efficiency; safety; improvement measure.

**中图分类号:**TM732 **文献标识码:**B **文章编号:**1003—6954(2008)02—0066—03

变电站倒闸操作是变电站运行的基础工作之一,是保证电网安全、稳定运行的重要环节,因此倒闸操作的正确性尤为重要。为切实保证倒闸操作的安全,电力系统各级部门制定了详细规定,采取众多措施来防止误操作事故发生。目前,变电站倒闸操作效率低下已成为了电力工作中比较突出的问题。由于操作时间过长将导致送电时间延后,用户迟迟不能用电。停电时间太长,检修的有效工作时间缩短,不能按时完成工作。在事故情况下未能及时完成操作,延误了事故处理时间,致使电网事故扩大,造成严重损失。因此,提高倒闸操作效率已成为了电力系统迫切需要解决的问题之一。

## 1 影响倒闸操作速度的原因

根据变电站的实际操作情况及运行经验,影响变电站倒闸操作速度的原因主要有。

### 1.1 倒闸操作准备工作不充分

由于没有相关规定的约束,变电站在倒闸操作前没有做好操作的准备工作,往往是在调度正式下达调度命令后才开始准备操作票,在正式开始操作后才准备安全工器具。往往又因为匆忙准备,操作票准确性不高,反复修改,由于安全及操作工具忘带,又重新返回拿取。浪费了大量时间,同时还影响到整个操作的速度,危及到操作安全。

### 1.2 值班人员业务素质不高

值班员对变电站设备熟悉度不够,对现场设备位置不熟悉,到现场后不能准确找准位置,到处寻找。对设备本身情况不熟悉,对操作设备没有把握,甚至

不知道如何操作,才临阵学艺,使操作速度变慢。

### 1.3 操作顺序不合理

变电站的倒闸操作票是进行现场操作的依据,操作票的内容直接反映操作的步骤,通过对各个变电站的操作票的查看情况来看,目前操作票主要有三个方面的问题,一是操作票缺乏针对性,其操作的目的是为有效隔离出检修设备,确保施工安全,倒闸操作任务应同施工任务相结合,比如只是单纯的一次设备检修,其相应的二次设备就没有必要再进行操作。二是操作票繁琐、冗长,值班人员为求稳妥将大量操作前的检查项目列入操作票内进行确认,或者将可不写入操作票内容写入票内,此举不仅增大了写票工作量,而且还增大了操作量,使操作时间延长。三是没有合理安排操作顺利,只注重了操作的技术顺利,未考虑操作的便利顺序,致使操作时在主控室同开关场之间反复往返,浪费大量时间。

### 1.4 调度指令繁琐

调度为追求稳妥,将操作任务细化,把综合性的指令分解成逐项指令下发,让值班人员逐步完成,以减少出错的几率。这种做法其实也降低了操作的效率,以某 500 kV 变电站主变由运行转检修的操作为例,调度若采用逐项命令下令是先将主变由运行转热备用,其次再将主变由热备用转冷备用,最后才是由冷备用转检修。这样进行操作,值班人员将使用三张倒闸操作票,三次接、回调度指令,至少往返主控和现场两次。若直接使用综合指令,值班人员只需要使用一张操作票,一次接、回调度指令,往返一次,极大地缩短了操作时间。

### 1.5 对操作速度重视程度不够

由于长期以来,电力系统对变电站倒闸操作只是强调安全第一,并没有对操作速度提出要求,值班人员养成“缓慢”操作的习惯,对倒闸操作没有紧迫感,主观认为慢一点更加安全,只要能顺利完成操作就算圆满完成任务,并没有把操作效率等同于工作效率来看,因此操作速度不可能提高。

### 1.6 缺陷的影响

在倒闸操作中设备出现缺陷对操作造成直接影响,造成操作暂停,甚至会导致整个操作过程被迫中断。如在操作刀闸时刀闸合不到位,只能中断操作通知检修到现场处理,这就至少将需要时间几个小时,若是因为刀闸一次故障需要更换的话,时间将会更长。

## 2 提高倒闸操作效率的措施及建议

通过对倒闸操作原因的分析,已看出了所存在的种种问题。如何能在确保安全的前提下,不断进行改进,提出更加科学合理的办法解决好问题,就能有效缩短操作时间,提高操作效率。

### 2.1 提前做好设备停送电准备工作

1) 针对计划性的停电工作,各变电站、集控站可召开停电检修准备会,对停电工作进行充分讨论和安排,包括危险点分析及控制、工作内容、注意事项、操作准备等,做到准备充分、分工明确、措施可靠。

2) 加强“两票”的准备工作。为缩短操作票填写时间和保证在操作完成后尽快办理工作许可手续,检修人员必须在工作前一天下午将工作票送至变电站,并主动配合当值正班完成工作票的审核。值班人员应根据工作票要求,结合停电申请及时填写操作票,并完成操作票的审核工作,确保操作票的正确完善。

3) 操作人员应提前完成安全工器具的准备工作,对微机“五防”装置进行检查,并应将检修、操作所需工器具、接地线、标示牌等放置在准备使用的地点,以备待用。

4) 要求现场施工负责人在检修工作完成前提前告知值班人员,以便值班人员能做好设备验收、工作终结、设备送电准备。

### 2.2 进一步规范操作票

1) 电业局应根据实际情况制定操作票实施细则,对操作票进行统一的规范。可在细则中明确哪些内容需要上票,哪些内容可以不用上票,精简操作步

骤,特别是二次设备操作部分,为操作票“瘦身”。

2) 制定典型操作票流程。

### 2.3 优化调度业务流程

通常变电站值班人员同调度部门,若变电站与调度之间联系不够,凭自己理解办事,会造成双方配合不好,操作不顺利,延误操作时间,因此加强同调度的联系尤为重要,主要有以下措施:

1) 调度对计划性的倒闸操作应提前下达预令(或进行联系),使值班人员能准确掌握操作内容、顺序等,以便能及时准备好操作票。

2) 对于送电操作,值班人员应主动提前同调度联系,汇报工作即将结束的情况,并向调度了解操作情况,以便合理填写好操作票。

3) 调度一旦下达预令和确定操作时间,应尽量准时下达调度指令,无特殊情况不应随意变动指令,以确保操作的准时完成。

4) 调度的指令任务应尽量以综合性指令下达,充分发挥值班人员的主观能动性,使整个操作连贯和衔接紧密。

### 2.4 改进倒闸操作模式

1) 除操作人和监护人外,安排现场检查人负责现场设备的检查,避免操作人员在远方操作开关、刀闸后又到现场检查实际位置,由现场检查人通过无线通讯设备(如对讲机)汇报现场设备实际位置,减少了往返次数,缩短了操作时间。

2) 在启用保护装置前要核对保护定值正确,由于保护的定值项很多,在正式操作时打印定值清单再进行逐项核对将用很长时间,值班人员可提前对保护定值进行核对,并在定值清单上签字确认,待正式开始操作时只核对定值清单即可。

3) 减少二次压板的操作,目前的倒闸操作对二次压板操作项较多,但从技术上来说是没有必要的多余操作。如对于线路重合闸的投退,传统做法是在开关拉开后就立即退出,开关合上后就投入,但实际上规程上只是规定在对线路充电时才需要退出重合闸。因此,对于重合闸只在调度下令对线路充电时退出,一般情况就可以不再进行投退。

4) 新投运的变电站可在正式启动前一天将保护定值预先置入,并投入相关的保护压板,将设备转至冷备用状态,待调度正式下令时再由冷备用转运行。

### 2.5 注重现场培训

在强调理论培训的同时,加强现场设备及实际操作的培训,加强事故处理的演练,提高应急处理能力。

针对值班人员二次设备知识比较缺乏的情况,可开展继电保护专项培训,继保人员现场培训等培训方式,以全面提高技术水平为培训目标。

## 2.6 健全规章制度

不断完善倒闸操作相关的各种制度、规范,将各种措施进行制度化,并切实落实到实际的工作当中去,作为明确的工作要求去改变值班人员的操作习惯,做到在确保安全的前提下,尽量提高操作效率。

## 3 结论

随着电网规模的不断发展壮大,变电站的不断增加,倒闸操作次数也将快速的增长。要满足当前电网

发展的需要,提高倒闸操作效率已是势在必行。倒闸操作作为电网工作的重要环节,其效率的提升将直接影响到整个电力系统各项工作的开展。倒闸操作效率的提高,缩短了设备停电时间,从而提高了设备运行可靠性,为电网的安全、稳定运行奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 四川省电力公司.四川省电力公司变电站管理规范(试行)[Z].川电生技(2004)90号.
- [2] 国家电网公司.变电站管理规范[Z].国家电网生(2006)512号.
- [3] 四川省电力公司.四川省电力公司提高变电站倒闸操作效率的措施(试行)[Z].川电生技(2007)181号.

(收稿日期:2008—02—14)

(上接第32页) 发生短暂突变是主变差动保护误动的原因。

## 3.2 110 kV 备自投被闭锁原因

从SOE记录“1DL HHJ 动作放电”可以得出:HHJ闭锁了110 kV 备自投(意思是由于HHJ合闸后的返回,110 kV 备自投被放电闭锁)。

事后检查181开关操作回路,操作板上的合位继电器(HWJ)和合后继电器(KKJ/HHJ)共用一个接点出口,当板上5和5'短接后,出口为合后(KKJ/HHJ)信号,如果未短接5和5',则出口为合位(HWJ)信号,如图2示。

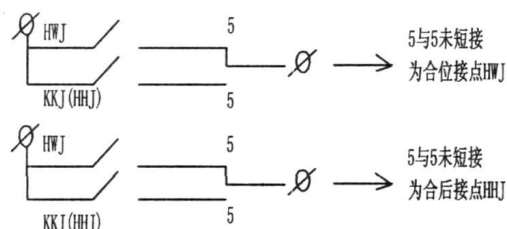


图2 HWJ 和 HHJ 接点示意图

而实际上操作板上该处未短接,备自投所接的 HHJ 合闸后接点实际上是 HWJ 合闸位置接点。HWJ 合闸位置接点在181开关跳闸(不论跳闸原因)后就返回了;而 HHJ 合闸后接点必须是181开关在正常手动或遥控操作跳闸后才返回,在事故跳闸后不返回。此次事故中当1号主变差动保护动作,181开关跳闸,HWJ 合闸位置接点返回,110 kV 备自投被放电闭锁,不能启动。

因此181开关操作板上的5与5'未短接,HWJ 接点未改成 HHJ 接点是110 kV 备自投在事故跳闸后被放电闭锁的原因。

## 4 防范措施

1)生产厂家在装置上提供了2种接点形式(合后和合位),设计单位应根据装置说明和现场实际需要,对加入系统的接点形式予以明确。在设备加入系统时的调试验收环节,继保人员应根据设计要求和现场需要进行必要的改接,对设计图有疑问时,必须向设计单位询问清楚。

2)继保人员应对备自投传动试验方法进行完善,确保备自投各个环节在试验中得到校验。母线失压情况有两种,一种是对侧出线开关跳闸引起,另一种是保护动作本侧进线开关跳闸引起。以往的备自投传动试验采用的是断开两段母线TV二次空气开关造成备自投装置上两母线失压进而动作的方法,该方法实际模拟的仅仅是第一种母线失压情况,有片面性,合后继电器(KKJ/HHJ)的逻辑状态没有得到完整检验。

3)对所有变电站备自投使用的 HHJ 接点情况进行全面清查,防止其他站有类似的 HHJ 和 HWJ 接点混用的情况存在。应特别注意近几年改扩建的变电站,原来无备自投,改扩建后新增了备自投装置的,容易忽略对原操作板的修改。

(收稿日期:2008—01—18)

谈以主表计量信息为计费依据的合理性

周 敏<sup>1</sup>, 谭开斌<sup>2</sup>

(1. 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072; 2. 成都电业局, 四川 成都 610000)

**摘 要:**专线供电模式中, 线路电抗性质所引起的无功损耗对线路两侧无功计量量值的影响, 是客观事实。分析损耗的形成对力调考核的顺利执行有积极的作用。以实测数据, 分析线路电抗对主、考核表无功量值的影响趋势, 对按照容性、感性无功绝对值之和考核力调提供技术分析思路。

**关键词:**线路电抗; 无功损耗; 力调考核

**Abstract:** In the special power supply model, the reactive power losses caused by the line reactance have an influence on the measurement of reactive power on both sides of the line, which is an objective fact. Analyses on the formation of power losses have a positive effect on the implementation of assessment of power factor. Based on the measured data, the trend of the influence of line reactance having on the measurement of reactive power is analyzed, and a new method is introduced using the sum of absolute value of inductive power and absolute value of capacitive power for the assessment of power factor.

**Key words:** line reactance; reactive power loss; assessment of power factor.

中图分类号: TM933 文献标识码: B 文章编号: 1003—6954(2008)02—0069—03

客户专线电能计量的标准配置为在专线两侧分别安装主计量装置、考核计量装置。按照《供用电营业规则》的相关规定, 以产权分界点(专线电源侧计量点)为计费结算关口, 即以主表为计费电能表。在实际运作中, 结合规范功率因数调整电费的收取, 特别是多功能电能表的普及, 对用电客户按照容性无功、感性无功的绝对值之和, 计算月加权平均功率因数的技术手段已经健全。由于供电方是以主表计量信息为计费依据, 而受电方是以副表信息来比对供电方电费收取的合理性, 两套计量装置记录数据的差异关系到电费的顺利结算, 上、下网无功参与力调将直接影响客户的经济利益。特别是涉及到力调电费的确认, 需要提供技术支撑并得到客户的认可, 为此, 对专线无功电量的分析是计量管理的重要课题。

从输、配网运行理论得知, 当线路参数达到一定的数值后, 线路电抗除表现为线路有功损耗外, 还会影响无功潮流, 并由此引起线路两侧无功计量量值的变化。

下面以实例分析专线线路电抗对计量的影响。

1 线路与主要参数

35 kV“三氮线”是供电局直供Ⅰ类。  
客户玖源公司专用线路。线路全长 9.3 km(架

空线路)加 0.15 km 电缆。该公司属化工生产企业, 负荷稳定, 正常情况下, 负荷在 20 000 kW 左右(三班制, 长期运行在计量装置标定值的 80%左右), 潮流方向单一(下网)。计量关口主表设在电源侧(站端), 示意图见图 1。

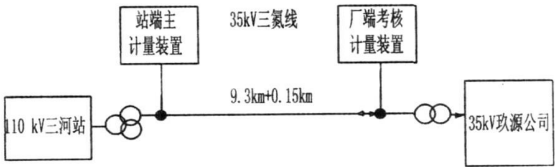


图 1 计量关口主表设在电源测(站端)示意图

2 问题的提出

用户提出就地对功率因数补偿后功率因数已完全满足系统的要求达 0.978, 但线损仍然较大。在对线路两端主表、考核表电量数据分析中, 其无功电量存在较大差量。针对抄表环节所反映的情况, 制定方案, 对专线两侧计量装置进行电量数据采样见表 1。

有功电量部分: 采样期间, 站、厂端电量的差值趋势满足线损对有功电量的影响趋势。实测数据, 站端比厂端多 1.78%(其中包含两侧互感器合成误差、电能表基本误差、二次压降合成误差对计量带来的影响)。

表 1 玖源公司 35 kV“三氮线”厂、站端电量数据采集对比分析表

| 抄表时间       | 站        端 |          | 厂        端  |          | 运行参数           |
|------------|------------|----------|-------------|----------|----------------|
|            | 有功电量       | 无功电量     | 有功电量        | 无功电量     | (2005.05.10)   |
| 2005.05.10 | 7 152.67   | 1 936.08 | 9 966.87    | 2 244.81 | 站端:cos φ=0.967 |
| 2005.06.14 | 7 734.51   | 2 090.00 | 10 538.36   | 2 366.63 | 厂端:cos φ=0.978 |
| 电量差量       | 581.84     | 153.92   | 571.49      | 121.82   | 负荷率:80%        |
| 差量百分比      | 有功部分:1.78% |          | 无功部分:20.85% |          |                |
| 站、厂端       |            |          | 1.14%       |          |                |
| 功率因数差量     |            |          |             |          |                |

备注:采样以站端为基准。共 35 天。(表中电量数字未乘以变比!)

无功电量部分:而无功电量则存在较大差量,站端比厂端多 20.85%。考虑到线路两侧计量装置经现场校核,均处于正常状态运行,负荷潮流方向单一,客户主要负荷为常规工厂动力用电,没有能够对电能计量产生较为明显影响的类似谐波源,站、厂之间的 35 kV 输电线路在传输电力时的电抗值以及电抗性(容、感性)是影响两端无功电量的重要因数。

3 测试结果分析

由相关理论得知,输电线路(架空线路)在输送电力时,导线的电抗是影响电力网电能损耗和电压损耗的主要成因。

由于电力线路在传输电能时,其线路的电阻  $r_0$ 、电抗  $x_0$ 、电导  $b_0$ 、电纳  $g_0$  实际上是延线路均匀分布的。按这种分布参数计算非常复杂,为了计算方便,当线路长度小于 300 km 以内时,常将分布参数的电力线路用集中参数  $R$ 、 $X$ 、 $Q$ 、 $B$  的等值电路代替,这样计算误差不大且不需要考虑参数的修正。

对于 35 kV 及以下的架空线路,由于线路短,线路电容影响极小,电导和电纳作微小化处理,等值电路可由图 1 简化为图 2。

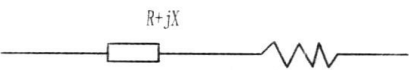


图 2 简化等值电路

由于在计算线路电感时还需要考虑导线的排列方式,但“三氮线”的实际情况是至少含有两种以上排列方式,即上字形、水平形,不同的排列会影响线路电抗,但影响量对于 9.45 km 的 35 kV 线路是很小的。故本次分析,主要是了解计算过程、方法,对线路电抗进行定性分析,以便印证线路两侧无功电量差的合理

性。

对于 35 kV“三氮线”而言,架空线路部分:在忽略电导  $b_0$  和电纳  $g_0$  后,线路的电参数由串联电阻  $r$  和电感  $x_0$  组成,线路电抗呈感性运行。电缆部分:电路主要参数由串联电阻  $r$  和电容  $l_0$  组成,线路电抗呈容性运行。由于电缆的长度只占线路总长度的 1.59%,线路以架空线路为主,两者相抵,总的电抗仍然呈感性。

由相关资料得知,导线电阻分直流电阻和交流电阻。对于频率为 50 Hz 的 35 kV 输电线路,主要由趋肤效应产生的交流电阻并不明显,实际计算时可不考虑,通常只取其直流电阻来考虑对线路损耗的影响。

直流电阻由下式计算: $r=r_0l$  (1)  
式中,  $r_0=l_0/\varpi$ ——每千米导线的计算电阻,Ω/km (可查表获得);

- $\varpi$ ——给定 20 °C 温度下的导线电导率;
- $s$ ——导线的截面积;
- $l$ ——电网导线长度。

导线通以交流电后,在导线周围产生交变磁场的大小,取决于线路的感抗,而感抗的大小,与导线间距、排列方式、直径、相对导磁率和交流频率有关。

在假设线路全部呈“上”字形排列的前提下,将“三氮线”线路 技术参数输入线损计算程序,获得以下数据(不含电缆部分的影响量):

$$r_l=0.240\ 850\ \Omega/\text{km}\qquad x_0=0.462\ 203\ \Omega/\text{km}$$

三相电网有功功率损耗与无功损耗分别按下式确定:

$$\triangle P_l=3I^2r_l10^{-3}\tag{2}$$
$$\triangle Q_l=3I^2x_010^{-3}\tag{3}$$

式中:  $I$ ——线路的计算电流,A;  
 $r_l$ ——线路电阻,Ω;  
 $x_0$ ——线路电抗,Ω。

将相关数据代入(2)、(3)式,以电流互感器标定电流的 80%作为负载平均电流,得到线路的有、无功功率损耗分别为:

$$\Delta P_l = 3 I^2 r_l 10^{-3} = 3 \times 320^2 \times (0.240\ 850 \times 9.45) \times 10^{-3} = 699.2\ \text{kW}$$

$$\Delta Q_l = 3 I^2 x_l 10^{-3} = 3 \times 320^2 \times (0.462\ 203 \times 9.45) \times 10^{-3} = 1\ 341.8\ \text{kvar}$$

将采样时间 35 d 共 840 h 代入上式,得到理论有功损失有、无功电量为:

$$\Delta W_P = 3 \times 320^2 \times (0.240\ 850 \times 9.45) \times 840 \times 10^{-3} = 587\ 325.63\ \text{kW} \cdot \text{h}$$

$$\Delta W_Q = 3 \times 320^2 \times (0.462\ 203 \times 9.45) \times 840 \times 10^{-3} = 1\ 104\ 432\ \text{kvar} \cdot \text{h}$$

从计算获得的有、无功损耗量值看,均比采样期间主、副计量装置实际记录量差值 1.78%和 20.85%高,这是因为理论线路损耗功率计算存在技术偏差以及线路参数理想化处理所致。以上推算主要是表达

趋势推演,虽不够精确,但其线路上存在高达 20.85%的损耗是毋庸置疑的。

## 4 结 论

“三氮线”长期输送较大电量,负荷侧功率因数在 0.96 以上,在传输这么大的电能时,线路上产生的无功损耗量值,从以上的分析计算看,并与其用电基数相比,以及加权平均功率因数数值相比,其合理性得到证实。

综上所述,线路电抗所产生的无功损耗是确实存在的,站、厂之间的 35kV 输电线路在传输电力时的电抗值以及电抗性质(容、感性)是影响两端无功电量的重要因数。而线路电抗的性质,以及负载力率的变化相叠加将反映在主、副计量装置的量值上,了解两侧无功电量的组成,可以为以主表计量信息为计费依据提供更有力的技术支持。

(收稿日期:2008—01—29)

(上接第 29 页) 保持一致,则继续下一操作步骤的执行(所有步骤循环执行)。

在执行过程中,如果出现操作失败或实时状态不一致的情况,则随时中断本张操作票的操作。

### 3.2 有人值守变电站模式

在有人值守变电站模式下,直接在变电站端开票;交由五防系统进行规则校验,确认当前操作人和监护人是否具有相关的操作权限。通过权限确认后,则从第一步开始逐步解析操作步骤,并将遥控指令发送给当地监控系统(当地功能)。(命令格式:目的设备地址(站号,设备点号),操作项目)。同时记录操作人,监护人信息和操作时间。

当地功能系统接收到五防机的遥控指令后,解析命令格式,获取目的设备信息后,直接向变电站设备或综合自动化装置发送遥控命令,执行操作。

遥控操作完成后,将操作的反馈信息和当前目的设备的状态信息发回五防系统,五防系统对操作结果进行检查,如果操作没有成功,则中断本张操作票的执行;如果操作成功并且实时状态保持一致,则继续下一操作步骤的执行(所有步骤循环执行)。

在执行过程中,如果出现操作失败或实时状态不一致的情况,则随时中断本张操作票的操作。

### 3.3 并发操作模式(远方和就地同时操作)

在实际的过程中,可能会遇到这样的情况,集控中心和变电站端同时对变电站的设备进行操作。这个时候就必须要考虑就地操作和远方操作的优先级问题。

原则上,就地操作的优先级最高,其次是远方的遥控操作。即先按照变电站端的开票→规则校验→自动执行这一流程进行就地操作;操作完成后将信息反馈到五防系统;接着按照集控站的自动执行流程,执行远方的操作任务。

## 4 具体运用

新都供电局下辖 1 个集控中心,1 座 220 kV 变电站,5 座 110 kV 变电站,4 座 35 kV 变电站。基于统一平台的变电站智能操作票系统的投运,进一步提高了变电站的安全防误水平和综合自动化应用水平,充分发挥了计算机网络技术、通信技术和自动控制技术的潜能。该系统的应用使操作票开票工作和倒闸操作这一系列复杂、繁重的工作,变为由计算机辅助自动控制完成,进一步促进电气一、二次设备自动控制水平的提高和电力系统自动化应用水平的提高。该系统在新都局的成功试运行,对成都电业局的其他分局配置该系统的工作具有指导意义。

(收稿日期:2007—12—08)

# 基于概率密度函数的对称电压凹陷预测方法

曾 智, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:**提出了基于对线路上故障概率密度函数积分的方法, 从而对系统网络中发生三相对称短路故障时所关心节点的电压凹陷幅值和一定时间内的发生频次这两个特征量进行预测, 并由此对电压凹陷在网络中的传递进行分析。再根据系统网络的阻抗矩阵  $Z$ , 建立网络对应的电压凹陷矩阵, 并由电压凹陷矩阵提供的信息, 从而减小在网络中需要计算的线路数。最后以一个实际系统作为算例进行了计算和分析, 仿真结果证明了上述算法的有效性和优越性。

**关键词:**故障概率密度函数; 电压凹陷; 电能质量

**Abstract:** A new analytical method for predicting the features of the balanced voltage sags is proposed. The features include the magnitude and the frequency of the balanced voltage sags. Based on this method, the transfer of the voltage sag in HV networks can be analyzed. Furthermore, according to the impedance matrix of positive sequence, voltage sag matrix can be easily established. Based on the information of the voltage sag matrix, the number of the lines which should be calculated can be decreased. Finally taking a real system for example, the simulation results show the effectiveness and the significant advantage of this method.

**Key words:** fault probability function; voltage sag; power quality.

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003—6954(2008)02—0072—03

现代化供电侧与用电户最重要且不可回避的电能质量问题就是电压凹陷。IEEE 定义电压凹陷为: 供电系统中某点的工频电压有效值突然下降为额定值的 10% 至 90%, 并在随后的 10 ms 至 1 min 短暂持续期后恢复正常<sup>[9]</sup>。在影响电能质量的各种现象中, 电压凹陷问题是造成电压敏感设备不能正常工作的最重要原因。电压凹陷的特点是影响面大, 从而带来的经济损失大, 危害突出。电压凹陷主要会造成程序逻辑控制器 PLC 误动作, 调速装置失灵, 以及计算机系统丢失数据等危害, 从而对各类敏感用户造成大量经济损失。设备对电压的敏感程度越高, 电压凹陷所造成的危害就越大。严重的电压凹陷则可能产生巨大的经济损失甚至人员伤亡。发生电压凹陷原因可能有电网系统和用户用电两方面。系统方面原因一般包括由网络中远距离的节点各种短路故障, 感应电动机启动或者变压器激磁涌流等。用户原因则包括用户内部短路故障或者冲击性负荷的投运。

## 1 电压凹陷的特征量及其预测

这里关心的是系统网络发生三相对称短路故障情况时对关心节点造成的电压凹陷。在描述短路故障引起的电压凹陷时, 一般使用的是电压凹陷幅值, 发生频次以及持续时间这三个特征量, 它们之间是相

互关联的。凹陷幅值即为电压幅值偏离额定值的最大值, 它主要与节点短路故障发生的位置和类型有关, 发生频次是指针对某一负荷节点一定时间内一定凹陷程度的电压凹陷次数, 它与相应凹陷程度对应的凹陷域和凹陷域内线路的故障率有关, 电压凹陷持续时间是指出凹陷发生到结束之间的时间, 它主要取决于故障保护的类型。这里主要关心的电压凹陷特征量是针对某负荷节点电压凹陷幅值, 以及一定时间内电压凹陷的发生频次。

电压凹陷幅值和发生频次这两个特征量与电压凹陷在电网中的传递密切相关。当电网系统中任意节点发生三相对称短路故障时候, 故障节点的电压标么值降为 0, 即发生幅值为 1 的电压凹陷。而与故障节点相邻的各个节点也会发生幅值程度不一的电压凹陷。

针对某一节点的电压凹陷幅值以及一定时间内凹陷发生频次这两个特征量的预测国外许多学者对此进行了研究。主要的方法包括: 以概率论数理统计理论为基础的蒙特卡罗仿真法<sup>[2]</sup>。根据随机产生一组随机信息进行预测, 该方法能较好地反映了电力系统的随机性, 主要缺点在于仿真计算量大, 占用计算机存储空间过大。临界距离法<sup>[4][5]</sup>提出了凹陷域的概念, 指出在凹陷域内的短路故障会造成相应的电压凹陷, 该方法计算简单并适合辐射状网络的计算, 但

并不适用与复杂环网。而针对环网的故障点法<sup>[8]</sup>, 同样针对凹陷域, 根据对网络在选取的多个故障点进行故障仿真。但最大问题是故障点的选取只能依靠人工选择和经验, 并没有固定的法则。

针对三相对称短路故障, 提出以线路故障位置为变量的故障率密度函数对线路进行积分, 从而得到所关心负荷节点一定时间内发生的电压凹陷幅值以及电压凹陷发生频次的方法。再根据网络系统的阻抗矩阵, 得到电压凹陷矩阵<sup>[1]</sup>, 并根据电压凹陷矩阵所提供的信息, 进一步减少需要计算的线路。与前所提方法相比<sup>[2, 4, 5, 8]</sup>, 这里提出的方法不仅适用于环型网络, 且大大简化了计算步骤。

2 电压凹陷幅值和频次预测方法

根据高压环网的特点, 略去电阻, 线路阻抗参数均以纯电抗表示, 且故障前网络中所有节点的电压标么值均为 1。

在上述两个设定下, 当网络任意节点  $g$  发生三相对称短路故障时, 节点  $g$  的短路“注入”电流  $i_g$  可以表示如下:

$$i_g = -\frac{1}{Z_{gg}} \tag{1}$$

式(1)中,  $Z_{gg}$  为网络阻抗矩阵第  $g$  行第  $g$  列元素, 也即为网络节点  $g$  的自阻抗。

此时网络另一任意节点  $k$  的电压可以表示为:

$$V_k = 1 - \frac{Z_{kg}}{Z_{gg}} \tag{2}$$

式(2)中,  $V_k$  为节点  $g$  发生对称短路故障后节点  $k$  的电压, 容易看出相对故障前, 节点  $k$  的电压幅值下降了  $Z_{kg}/Z_{gg}$ , 即节点  $k$  发生了幅值为  $Z_{kg}/Z_{gg}$  的电压凹陷。 $Z_{kg}$  为系统网络阻抗矩阵对应第  $k$  行第  $g$  列元素, 即表示网络上节点  $k$  和节点  $g$  之间的互阻抗。

一般来说, 由于线路暴露在恶劣的自然环境和天气状况会导致使其有更大的可能发生短路故障。线路  $i-j$  上任意位置  $p$  (可以称之为虚拟节点  $p$ ) 对关心节点  $k$  之间的互阻抗  $Z_{kp}$  和虚拟节点  $p$  的自阻抗  $Z_{pp}$  可以用下式(3)(4)表示:

$$Z_{kp} = (1-\lambda) Z_{ki} + \lambda Z_{kj} \tag{3}$$

$$Z_{pp} = (1-\lambda)^2 Z_{ii} + \lambda^2 Z_{jj} + 2\lambda(1-\lambda) Z_{ij} + \lambda(1-\lambda) Z_{ij} \tag{4}$$

上两式中  $\lambda = Z_{ip}/Z_{pj}$ , 且  $\lambda \in [0, 1]$  表示发生对称短路故障的虚拟节点  $p$  的位置,  $Z_{ij}$  为线路  $i-j$  的

电抗,  $L_{ip}$  为节点  $i$  与虚拟节点  $p$  之间的线路距离,  $L_{pj}$  为虚拟节点  $p$  与节点  $j$  之间的线路距离。再将式(3)和(4)代入式(2), 即可以得到网络上任意线路上任意位置发生三相对称故障时, 节点  $k$  发生的电压凹陷幅值。

根据以上分析, 要进一步对关心节点一定时间内发生一定凹陷幅值程度电压凹陷次数进行预测, 还需要知道任意线路发生对称短路故障的针对位置变量  $\lambda$  的故障概率密度函数, 以  $g(\lambda)$  表示,  $\lambda \in [0, 1]$  表示发生对称短路故障的任意虚拟节点  $p$  的位置, 故障概率密度  $g(\lambda)$  为故障位置变量参数  $\lambda$  的函数。粗略考虑情况下, 可以将  $g(\lambda)$  认为是在线路上均匀分布的。

于是对于关心节点  $k$  来说, 在一定时间内由于任意线路  $i-j$  发生三相对称短路故障而发生凹陷幅值大于  $A$  小于  $B$  ( $0 \leq A \leq B \leq 1$ ) 的电压凹陷次数  $n$  可以表示如下:

$$n = \int_{\lambda=A}^{\lambda=B} G(\lambda) g(\lambda) d\lambda \tag{5}$$

在式(5)中,  $G(\lambda) = Z_{kp}/Z_{pp}$ ,  $Z_{kp}$  和  $Z_{pp}$  由式(3)(4)给出, 如前所述,  $g(\lambda)$  为位置变量的故障概率密度函数, 应该注意,  $G(\lambda)$  和  $g(\lambda)$  均为  $\lambda$  的函数。

根据式(5), 要进一步得到网络所有线路一定故障率情况下发生三相对称短路故障时, 关心节点发生凹陷幅值大于  $A$  小于  $B$  ( $0 \leq A \leq B \leq 1$ ) 的电压凹陷次数  $N$  可以容易得到: 只需要用式(5)逐一计算每条线路得到  $n$ , 再将得到的每一个  $n$  累加起来即为所求的  $N$ 。

3 根据电压凹陷矩阵缩小计算范围

一般来说, 在大型系统网络中随着距离的增大, 故障节点对关心负载节点  $k$  不会对造成一个较大幅值的电压凹陷。于是距离负载节点  $k$  过远的节点发生三相对称短路故障时, 可以不与考虑, 也就是说根据式(5)计算关心节点  $k$  凹陷幅值大于  $A$  小于  $B$  ( $0 \leq A \leq B \leq 1$ ) 的电压凹陷次数时某些线路不用计算, 此问题可采用电压凹陷矩阵<sup>[1]</sup>分析如下。

首先设:

$$\beta_{kf} = Z_{kf}/Z_{gg} \tag{6}$$

$\beta_{kg}$  表示节点  $g$  发生三相对称短路故障后, 节点  $k$  的电压凹陷幅值。将每一个节点对应的元素计算就可以形成电压凹陷矩阵如图 1。电压凹陷矩阵对角

线上的元素均为1,它表示任一节点发生三相对称短路故障时,发生故障的节点电压幅值改变量为1。容易看出  $\beta_{kf} \neq \beta_{fk}$ 。

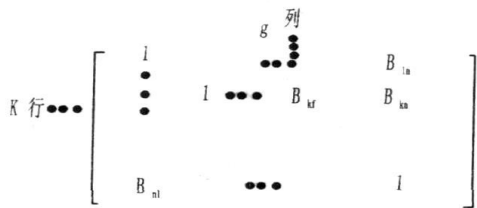


图1 电压凹陷矩阵

由系统的阻抗矩阵直接可以得到如图1的电压凹陷矩阵。在得到系统电压凹陷矩阵以后,对于关心的节点  $k$  来说,需要直接观察第  $k$  行元素。对于任意线路  $i-j$  来说,可以先观察  $\beta_{ki}$  和  $\beta_{kj}$ 。 $\beta_{ki}$  和  $\beta_{kj}$  分别表示节点  $i$  和节点  $j$  发生对称短路故障情况时,关心节点  $k$  发生的电压凹陷幅值。如果  $A \leq \beta_{ki} \leq B$  或者  $A \leq \beta_{kj} \leq B$ ,则此线路  $i-j$  需要按上式(5)计算,反之此线路则不用计算。 $A$  和  $B$  意义如式(5)所示。这样,特别针对大型网络,可以大大减少需要计算的线路数,从而减小了计算量。

## 4 实验结果

图2所示为某一实际系统。具体接线如图。具体网络阻抗参数都为标么值,表示如下,不计电阻:线路1-2的阻抗参数  $z_{12}=j0.105$ ,同理  $z_{45}=j0.184$ , $z_{24}=j0.08$ , $z_{23}=j0.065$ , $z_{34}=j0.05$ 。线路1-2的长度  $L_{1-2}=33$  km,同理  $L_{4-5}=58$  km,  $L_{2-4}=98$  km,  $L_{2-3}=78$  km,  $L_{3-4}=60$  km。设在各线路上任意一点发生三相对称短路的概率是相等的,即故障概率密度函数  $g(\lambda)$  是在线路上均匀分布的,如图3所示。再设网络中任意每千米线路一年之中发生三相对称短路故障的概率均为0.1次。

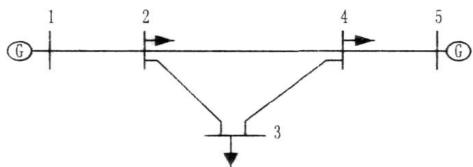


图2 某实际系统接线图

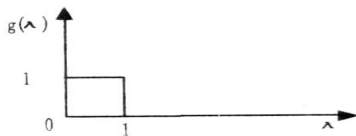


图3 线路上均匀分布的故障概率密度函数

以2节点作为关心节点进行说明。当2节点发生三相对称短路故障时,2节点本身会发生一个凹陷幅值为1的电压凹陷,而与2节点相邻的线路上发生三相对称短路故障时,2节点会发生凹陷幅值小于1的电压凹陷。根据网络的阻抗参数和式(2)、(3)、(4),可以计算网络线路上任意虚拟节点发生三相对称短路故障时,2节点发生的电压凹陷幅值。

进一步要得到2节点一定凹陷幅值一年中发生的次数只需要根据式(5)对每一条线路逐一积分即可。根据前文所述,可以根据电压凹陷矩阵减小运算量。具体分析如下:根据网络阻抗参数可以容易的得到网络的阻抗矩阵,再根据前文所述式(6)等式逐一可得到网络电压凹陷矩阵的每个元素,于是可得到电压凹陷矩阵如图4。

|      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|
| 1.00 | 0.58 | 0.48 | 0.49 | 0.30 |
| 0.80 | 1.00 | 0.82 | 0.84 | 0.51 |
| 0.75 | 0.93 | 1.00 | 0.93 | 0.57 |
| 0.71 | 0.89 | 0.86 | 1.00 | 0.61 |
| 0.38 | 0.48 | 0.46 | 0.54 | 1.00 |

图4 系统电压凹陷矩阵

针对2节点,观察第2行。如需要计算2节点  $0.9 \leq k \leq 1$  电压凹陷幅值发生的频次,只需要计算线路1-2,线路2-3,线路2-4即可。根据如图4电压凹陷矩阵,观察第2行第4,5列原素,可以发现线路4-5上的4节点和5节点发生三相对称短路故障,2节点发生的电压凹陷幅值分别为0.84和0.51,均不在  $[0.9, 1]$  中,不需要对线路4-5进行积分计算,同理可以分析线路3-4。2节点其它电压凹陷幅值情况分析完全类似。根据电压凹陷矩阵,可以减小一定的计算量。2节点发生各程度电压凹陷幅值在一年中发生的频次如表1所示。(下转第94)

燃料重油均应注意采用较低的加热温度和加热强度。

2)煤焦油的燃烧特性和一般燃料重油特性不尽相同,煤焦油的热解和燃烧时挥发份与水份同时析出。因此,能否利用煤焦油简单替代重油在直接在重油燃烧器上燃烧还有待进一步研究。

3)对煤焦油燃烧技术仍需进一步的深入研究。在实际工程技术中,对燃料输送过程中燃烧器喷嘴的改进和配风是提高煤焦油燃烧效率的重要途径。

参考文献

[1] 于连海. 煤基合成燃料油的研究与开发[M]. 杭州:浙江大学, 2005.

[2] 何宏舟, 吴德华. 重油燃烧技术的现状与展望[J]. 锅炉技术, 2004, 35(3): 40—44.

[3] 张同翔. 合成燃料油的开发[M]. 杭州:浙江大学, 2004.

(收稿日期: 2007—11—15)

(上接第 74 页)

表 1 2 节点电压凹陷各程度幅值发生频次

| 2 节点发生的<br>电压凹陷幅值 K   | 需要计算<br>的线路        | 一年发生<br>的次数 |
|-----------------------|--------------------|-------------|
| $0.9 \leq K \leq 1$   | 1—2, 2—3, 2—4      | 9.4         |
| $0.8 \leq K \leq 0.9$ | 1—2, 2—3, 2—4, 3—4 | 12.1        |
| $0.7 \leq K \leq 0.8$ | 4—5                | 2.3         |
| $0.6 \leq K \leq 0.7$ | 4—5                | 1.9         |
| $0.5 \leq K \leq 0.6$ | 4—5                | 1.1         |

参考文献

[1] Quaia, S.; Tosato, F. A method for analytical voltage sags prediction [J]. Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna Volume 4, Issue.

[2] 宋云亭, 郭永基, 张瑞华. 电压骤降和瞬时供电中断概率的蒙特卡罗仿真[J]. 电力系统自动化, 2003 27(18): 21—24.

[3] 张伯明, 高景德. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

[4] 李妍, 段余平, 邱军, 熊信良, 尹项根. 环网配电网电压暂降分析的临界比距法[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 51—55.

[5] Bollen M H J. Fast assessment method for voltage sags in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(6): 1480—1487.

[6] Olguin, G.; Bollen, M. H. J. Stochastic assessment of unbalanced voltage dips in large transmission systems [J]. Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna Volume 4, Issue, 23—26 June 2003 Page(s): 8 pp. Vol. 4: 23—26.

[7] E. E. Juarez; A. Hernandez. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 21, Issue 3, July 2006, 1493—1500.

[8] Lim, Y. S.; Strbac, G. Analytical approach to probabilistic prediction of voltage sags on transmission networks [J]. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings — Volume 149, Issue 1, Jan 2002, 7—14.

[9] IEEE Std 1159—1995. IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality New York: IEEE Press, 1995.

作者简介:

曾智 (1981~), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与电力市场。

杨洪耕 (1949~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事电能质量监测和控制技术方面的教学和研究工作。

(收稿日期: 2008—01—24)

5 结论

上面针对实际情况中较易发生的三相对称短路故障所造成的电压凹陷, 提出了对线路上故障概率密度函数积分的方法, 从而对一定时间内电压凹陷的幅值和发生的频次进行预测, 以及进一步分析电压凹陷在更大范围电网中传递。再由电压凹陷矩阵提供的信息, 减小需要计算的线路数。电压凹陷矩阵直接可以由网络节点阻抗矩阵得到。所提方法与前文所提临界距离法<sup>[4][5]</sup>相比的优势在于本方法适应于实际中更常见的环形网络。而与同样针对环网的故障点法<sup>[8]</sup>相比, 本方法优点在于完全不需要对故障点发生位置进行预设。与蒙特卡罗仿真法<sup>[2]</sup>相比, 本方法优点在于大大简化了计算过程和步骤。

所提方法需要进一步研究和探讨的问题包括: 仅考虑了网络系统发生三相对称短路故障, 而没有考虑实际中更常见的各种不对称短路故障的情况。综合考虑各种对称与不对称短路故障情况所造成的电压凹陷以及根据此方法对电压凹陷的特征量的预测值进一步对电压凹陷造成的经济损失性评估是值得更深入探讨的问题。

# IGCC 发电技术及主要设备分析

李纪财, 曾成碧, 肖 利

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 简要介绍了整体煤气化联合循环(IGCC)发电技术的基本思想和特点。对用于 IGCC 系统的主要设备进行分析, 阐述了各部件在系统中的作用和特性, 指出 IGCC 系统设备与常规发电设备的差异以及由于技术不成熟所存在的一些问题, 并提出改进措施和发展方向。为 IGCC 系统进一步设计优化奠定基础。

**关键词:** 煤气化; IGCC; 主要设备

**Abstract:** The theory and characteristics of integrated gasification combined cycle(IGCC)is briefly introduced. Based on the analyses of the main equipment used in IGCC and their functions in the system, the differences between IGCC and the conventional generating set are pointed out as well as some problems of the immature technology. Thereafter, the improvement measures and the developing direction are proposed, which could build the foundation of further design and optimization for IGCC.

**Key words:** coal gasification; IGCC; main equipment.

中图分类号: TM611.3 文献标识码: A 文章编号: 1003—6954(2008)02—0075—03

节能减排是中国经济可持续发展的保障。整体煤气化联合循环(IGCC — Integrated Gasification Combined Cycle)使煤气化成为中低热值煤气, 然后供到联合循环中去燃烧做功, 借以达到以煤代油或天然气的目的, 间接实现了煤在联合循环中作为燃料的应用。不仅具有较高的热效率, 同时具有良好的环保性能。目前, 它已成为国内外研究和发展的重点。

IGCC 为多种高技术的集成, 主要包括高性能燃气轮机、煤的气化技术、煤气净化技术、空分装置、匹配协调的余热锅炉和汽轮机以及系统一体化优化等。由于工作条件变化很大, 构成部件与常规电力设备有很多不同, 因此有必要对其进行分析, 从而改进现有 IGCC 的某些关键技术及工作系统, 推动该技术尽快走向商业化。

氧或空气)发生气化过程, 成为中低热值煤气(以 CO、H<sub>2</sub> 为主要成分), 生成的煤气进入净化系统, 煤气中的颗粒、硫、汞等污染成分被分离出来, 净化后的煤气进入燃气轮机的燃烧室中燃烧并做功, 拖动发电机; 从燃气轮机排出的高温气体进入余热锅炉, 产生的蒸汽推动汽轮发电机组, 形成联合循环发电系统。其原理流程图如图 1。

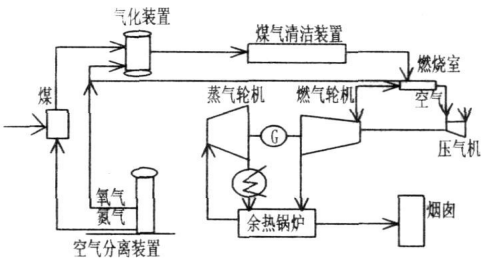


图 1 典型的 IGCC 流程图

## 1 IGCC 的基本思想

整体煤气化联合循环发电系统, 是将煤气化技术和高效的联合循环相结合的先进动力系统。它由两大部分组成, 即煤的气化与净化部分和燃气—蒸汽联合循环发电部分。第一部分的主要设备有气化炉、空气分离装置、煤气净化设备, 第二部分的主要设备有燃气轮机发电系统、余热锅炉、蒸汽轮机发电系统。

IGCC 的工艺流程为: 煤(以水煤浆或干煤粉的形式)进入气化装置, 在气化装置中与气化介质(蒸汽、

整体煤气化联合循环中的“整体”有两个含义: ①在这个系统中, 气化炉所用的蒸汽和空气多数情况下都直接来自于系统内的汽轮机和燃气轮机。同时, 气化过程中产生的各种显热, 都在系统适当的工艺环节中充分地利用, 这样的系统是一个有机的整体; ②系统流程及系统内各处的参数都要从机组整体性能最优的角度仔细考虑和设计。

## 2 IGCC 发电技术的特点

IGCC 装置自 20 世纪 70 年代初期研发,至今已有 30 多年了,在整个技术的总体上已经取得了重大发展,进行了商业示范运行,取得了不少经验,验证了其本身所具有的优势。除文献[2]中介绍的高效、环保等多种优点外,还具有以下两点:①能充分综合利用煤炭资源和煤化工结合成多联产系统,便于与生产甲醇、醋酸、尿素等化工过程相结合,使煤得以充分综合利用,同时生产电、热、燃料气和化工产品,有利于降低生产成本。②当天然气和石油枯竭时,可用 IGCC 改造现有燃油气的联合循环。IGCC 也可用于对现有蒸气电站的增容改造,便于实施电站的分阶段建设,能有效的利用建设资金。

同其他技术一样,IGCC 也存在不足:①由于某些技术尚未完全成熟,致使其投资费用和发电成本较高,单系列大机组的煤气化装置可用率尚存在问题,尚不能强有力的与 FGD 的燃煤超临界机组竞争。②整体化要求高,系统十分复杂,在诸多的子系统中任何一个发生问题,便会影响全局。

为此,继续开发和改进现有 IGCC 的某些关键技术及其工作系统,以求充分发挥 IGCC 装置的潜在优势,确实是推动该技术走向商业化的当务之急。

## 3 IGCC 的主要设备分析

### 3.1 IGCC 的煤气化炉

气化炉及其系统是 IGCC 系统的关键部件,它将煤炭、石油焦等转化为合成气。在气化炉中的反应是部分氧化反应,投入气化炉中的气化剂只相当于完全燃烧所需量的  $1/5 \sim 1/3$ ,生成的煤气主要成分是 CO 和  $H_2$ 。对发电用途的气化炉,主要要求是高的碳转化率和冷煤气效率、热煤气效率、大容量以及与发电设备运行的匹配性好等。在已经进行的试验和示范电站研究当中,应用于 IGCC 电站的炉型有喷流床气化炉、流化床气化炉和固定床气化炉。

从目前的应用情况来看,普遍看好的气化炉主要是以氧气为气化剂的喷流床气化炉,其气化生产能力大,生成的煤气热值较高,适宜与发电工程相匹配。并且在已经进行的几个示范电站的运行过程中,都表现出了较好的性能,代表着发展趋势。

气化炉目前存在的不足:一方面是可用率不高,维护费用比较高;另一方面,采用纯氧作气化剂,增加了整个系统的能耗和投资成本。采用低浓度的富氧做气化剂或者采用空气作气化剂的气化炉是一个发展方向,但需要进一步研究和实践检验。研究和开发大容量的、能量转化率很高的煤的气化炉,是最终实现 IGCC 发电方案的关键所在。

### 3.2 空分装置与空气侧系统整体化

为了供给气化炉所需的纯氧或高浓度富氧的气化剂,需设置制氧空分设备及其系统,空分设备主要包含  $O_2$  制备和  $N_2$  制备装置。在 IGCC 系统中,通常制备高纯度的  $O_2$  (一般在 95% 以上) 作为气化剂;对于干煤粉供料的气化装置,还需要制备高纯度的  $N_2$  (纯度大于 99.9 %) 用于煤粉的输送和飞灰再循环。制氧技术可以分成两大类:低温制氧和常温制氧。低温制氧主要是基于深冷法制氧,技术成熟可靠,生产能力大,所得氧气纯度高。目前对各种压力等级空分系统大多采用该方法分离空气以制取氧气。常温制氧方法现在还不具备大规模提供高纯度氧气的的能力。深冷的空分设备比较成熟,但是投资比较高,尤其是耗能太大。

目前正在研究使液  $N_2$  和液  $O_2$  先增压后气化的空分和基于离子转移膜技术的空分等低能耗、低投资的新型空分制氧技术,将有效降低 IGCC 电站厂用电率,提高净效率。

IGCC 中空分系统和燃气轮机系统组成的空气侧系统的整体综合优化对 IGCC 系统的热力性能、比投资费用以及运行可靠性等都有很大影响。按照 IGCC 电站中制氧厂的高压空气来源,空气侧整体化有独立空分、完全整体化和部分整体化三种一体化方式。相对于独立的空分系统而言,完全整体化空分的 IGCC 具有显著的成本优势。此外,整体化的 IGCC 能够减少空分的耗功,从而电站的净出力会增加,系统效率提高。但是由于完全整体化空分系统复杂,可靠性会相对下降。另外整体化率过高,导致电站启动较慢,运行不灵活。而独立空分系统会使厂用电率增大,但具有启动灵活、系统可靠等优点。部分整体化可兼顾两方面的优点。

目前 IGCC 电站较多倾向于采用部分整体化方式,整体化率在 25%~50% 之间。空分系统同整个电站的整合,以及如何降低空分系统造价,降低空分系统能耗是需要进一步研究的问题。

### 3.3 IGCC 的净化系统

IGCC 的净化措施贯穿于整个系统中,包括燃料气化系统、粗煤气净化系统和燃气轮机联合循环系统等。其中,粗煤气净化系统是其核心部分。目前在 IGCC 中使用的粗煤气净化有常温湿法净化和高温干法净化。两者在工艺上都由除尘和脱硫两个环节组成,只是除尘和脱硫环节的技术细节不同。

现多采用常温湿法除尘脱硫工艺,常温湿法净化的优点是技术成熟,但在采用冷却方法利用煤气显热的过程中要产生一定的损失,影响到 IGCC 整体的效率。可采用显热回收系统,尽量减少粗煤气显热和潜热的损失。

高温净化粗煤气的显热利用较好,但还不成熟。高温除尘仍然是一个难题,因为在高温下,除了过滤,很难有效地除去煤气化中的细颗粒飞灰。目前已经开发出用陶瓷材料制成的各种过滤器,但是这些陶瓷过滤器普遍存在着设备庞大、使用寿命短、清灰困难的问题。高温脱硫也是一个障碍,有关的方法还都在研究之中。随着技术的不断发展,采用高温干法净化技术是提高系统效率的一个有效手段是发展 IGCC 的一项重要技术。

### 3.4 IGCC 的燃气轮机

IGCC 是以燃气轮机为主的联合循环,其热功转换利用的核心部件是燃气轮机,加入系统的全部或大部分热量先在高温区段借助燃气轮机实现高效热功转换,输出有效功,然后充分回收燃气轮机排热产生蒸汽,再在中、低温区段通过汽轮机实现热功转换、输出有效功。燃气轮机性能的提高是发展 IGCC 的前提。

目前,IGCC 中的燃气轮机多以现有的烧油气的燃气轮机为母型。但由于其所用燃料为中低热值的合成煤气,主要成分为  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ ,并且含有较多的  $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$  等惰性气体,不同于主要成分是  $\text{CH}_4$ ,所含杂质很少的天然气,这使得着火点、火焰传播速度以及燃烧产物的组成等燃烧特性发生变化。从而要求重新设计燃烧器,以保证点火迅速、燃烧稳定,燃烧效率高。燃料热值减小,在维持燃气透平的初温恒定不变的前提下,导致燃料的质量流率和容积流率增加,致使压气机有可能发生喘振现象。因此,需要对压气机和燃气透平等进行改造,以求使压气机与燃气透平的工质流量能够合理地匹配,并使压气机的工作点与喘振边界之间留有足够的喘振裕量。为此,可以单独修改压

气机的设计或燃气透平的设计,也可以同时改变压气机和燃气透平的运行条件,即改变压气机进口导叶的开启程度和燃气透平的进气温度。

### 3.5 IGCC 的汽轮机

IGCC 系统中蒸汽轮机多采用滑压方式运行和设计,采用全周进汽结构,不装调节级。启动完成后,蒸汽调节阀处于全开状态,一般不用它来调节负荷,汽轮机负荷将随燃气轮机负荷与燃料量变化而自动变化;当联合循环采用非再热循环时,汽轮机后几级蒸汽湿度会比常规火电站汽轮机者大,为此可借鉴核电站汽轮机除湿经验,在湿度大的区域设置排泄孔或疏水捕获栅;由于联合循环中一般不采用抽汽回热循环,汽轮机排汽流量与主蒸汽进口流量之比大大高于常规的汽轮机两流量之比值,因此在相同功率等级时,其末级叶片就相对比较长;为了降低凝结水中溶解氧的含量,常规火电站多设置抽汽除氧器,联合循环则是在冷凝器或其附近设置除氧器增设凝结水再循环水系统或辅助蒸汽系统,利用 HRSG 热量或其它蒸汽热源来除氧,从而有效利用了燃气轮机排热。

由于 IGCC 中燃气轮机具有快速启停和变负荷能力,其汽轮机的设计也应适应这种变负荷的能力,同时还不影响其带基本负荷的性能。为了适应 IGCC 工作的需要,满足效率高、启动快的要求,必须继续探索其结构的设计问题。

### 3.6 IGCC 的余热锅炉

在 IGCC 中余热锅炉是回收燃气轮机的排气余热,借以产生推动蒸汽轮机发电所需蒸汽的换热设备,是整个联合循环系统中一个重要的有机组成部分,起承上启下的作用。其结构、性能以及参数都极大地影响到系统中其它设备乃至整个系统的性能。

目前,在 IGCC 中采用的余热锅炉与烧天然气或液体燃料的余热锅炉型联合循环中采用的余热锅炉基本类似,只是在 IGCC 中由于使用的合成煤气的发热量比较低,流经余热锅炉的燃气流量稍大,故可以多产生一些蒸汽。当然,在煤气的气化系统和除灰脱硫系统中还会附带产生一些饱和蒸汽,需要在余热锅炉中进一步过热,致使两者的换热面积之分配关系也会略有差异。

在今后先进联合循环的设计中,主蒸汽参数将逐步提高,以利用高效蒸汽循环的效率来抵偿不断增涨的燃料价格。但是压力越高,气包的筒壁就越厚,对于余热锅炉的高压锅筒来说,它将大 (下转第 84 页)

过程中加强对该设备巡回检查,发现问题及时处理。

2) 一般情况下,当机组负荷在 300 MW 时,将其冷却水调整控制在 250~300 t/h,这样可以维持冷却水回水温度在 70~75 ℃;当机组负荷在 200 MW 时,将其冷却水调整控制在 150~180 t/h,这样可以维持冷却水回水温度在 65~70 ℃,在调整过程中应注意保证 6 号低加疏水温度应大于 7 号低加凝结水出水温度,这样既能满足负荷的需要,又能减少疏水管及凝结水管路的振动现象。

3) 在底灰冷却器、斗式提升机或刮板输灰机故障停运时,凝结水温度突然发生变化,很容易造成 6 号低压加热器的水位波动,如果不及时调整 8 号低压加热器的水位,会造成 8 号低压加热器水位过高而打开危急疏水,影响到整个低压加热器的稳定运行。因此,在发生以上故障时,应加强低压加热器的水位监视,及时修改 8 号低压加热器的水位设定值,使疏水畅通,故障消除后,恢复正常运行。

4) 在甩负荷或滑停时,应注意调整底冷器冷却水量,避免造成除氧器高水位事故的发生及除氧器水温急剧下降给机组带来不安全因素。

5) 对于灰控阀冷却水,因为灰控阀运行的环境温度很高(基本上是锅炉运行床温 890 ℃左右),其冷却水流量不能太小,否则,灰控阀得不到充分的冷却,

但又不能使其冷却水流量太大,否则,这部分的凝结水回水温度会很低。通过调整试验,维持灰控阀冷却水流量在 70 t/h 左右(阀门开度固定),回水温度尽管只能达到 43 ℃,但能充分保证设备的安全,况且,其流量也较小,对凝结水温度影响不大,工况变化时,也不需要有很大的运行调整。

## 7 凝结水系统改造后的效果检验

凝结水系统改造后,通过一段时间的实际运行表明:系统改造既节约了另外设计安装底冷器冷却水系统的成本,降低了底灰的排放温度,降低了底灰系统各设备正常运行的环境温度,延长了设备的运行时间;同时因为回收了低灰的部分热量,降低了排渣热损失,提高了机组的经济性。另外冷却水温调整方便,消除了原设计带来的管路振动,提高了机组的安全性,给机组长期稳定运行创造了良好条件。

### 参考文献

- [1] 吴季兰. 汽轮机设备及系统[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [2] 景朝辉. 热工理论及应用[M]. 中国电力出版社, 2006.

(收稿日期:2007-11-01)

(上接第 77 页) 而笨重。如果在余热锅炉的高压部分采用直流锅炉的设计方案,那么就可以取消笨重的高压锅筒,使联合循环机组得以快速启动,并获得高效率。

## 4 结论

随着社会的进步,人们逐渐认识到能源的有限性和环境保护的重要性,研究和发展 IGCC 技术是基于建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需要。IGCC 是 21 世纪火电动力发展的主要方向之一,也是中国开拓洁净煤发电新模式所需的高新技术。

IGCC 系统非常复杂,由于工作条件变化很大,构成部件与常规电力设备有很多不同,目前尚未完全成熟,还需要经历一个发展和完善的过程。前面对 IGCC 工作原理和特点做了简要介绍,对系统的主要设备进行分析,指出存在的一些问题,并提出改进方法和发展方向,从而为各构成部件做进一步的研究和

改进奠定基础。

### 参考文献

- [1] 段立强,徐钢,等. IGCC 系统热力与环境性能结合的评价准则[J]. 中国电机工程学报, 2004. 12, 24(12).
- [2] 许世森. IGCC 与未来煤电[J]. 中国电力, 2005. 2, 38(2).
- [3] 董卫国. IGCC 发电和煤气化技术[J]. 电力设备, 2001. 3, 2(1).
- [4] 林汝谋,金红光,等. IGCC 中燃气轮机技术方案与设计优化[J]. 燃气轮机技术, 2001. 9, 14(3).
- [5] Robert Farmer. IGCC Power Generation Plants in Commercial stage of Development[J]. Gas Turbine World, 2004, 34(5).
- [6] 高健,倪维斗,等. IGCC 系统中空气气化炉与氧气气化炉的对比研究[J]. 燃气轮机技术, 2007. 6, 20(2).
- [7] 姚秀平. 燃气轮机及其联合循环发电[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [8] 迟全虎. IGCC 联合循环系统建模与设计优化研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2004.

(收稿日期:2008-01-14)

# 以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统方案

肖 利, 曾成碧, 李纪财

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 简要介绍了分布式供能系统及微型燃气轮机的相关概念, 着重分析了以微型燃气轮机轮机为核心的冷热电联供系统和微型燃气轮机—燃料电池联合循环系统, 并将这些供能系统以模块化的形式表示。在模块化组合形式的基础上提出相关结合技术和优化方法, 为分布式供能系统的建模与进一步的仿真优化打下良好的基础。

**关键词:** 分布式供能系统; 微型燃气轮机; 联供/联合循环系统; 模块化系统

**Abstract:** A brief introduction of distributed energy resource system and micro-turbine is presented, heating and cooling power system and micro-turbine-fuel cell combined cycle system are analyzed emphatically, and these systems in the form of modulation are indicated. Some correlative association technologies and optimization methods are proposed on the basis of the modulation in order to build the good foundation for further modeling and simulation of the distributed energy resource system.

**Key words:** distributed energy resource system; micro-turbine; combined/hybrid cycle system; modularized system.

**中图分类号:** TM611.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2008)02-0078-04

纵观世界各国的经济发展历程, 人均 GDP 从 10 000 到 30 000 美元的时段对能源的需求基本没有变化, 而需求增长最快的阶段是 1 000 至 10 000 美元阶段。根据中国国家统计局不久前公布的 2006 年国民经济统计数字, 中国人均 GDP 首次超过 2 000 美元, 预计 2020 年将达到 3 000 美元。可见, 中国在今后很长一段时间内对能源的需求量会不断增长。所以, 中国在能源利用问题上面临的严峻挑战是如何少走弯路, 达到高效、节能、环保的目的。

分布式供能作为未来世界能源技术的重要发展方向, 具有能源利用率高, 环境负面影响小, 能源供应可靠性高, 经济效益好等诸多优点。要解决目前世界能源面临的四大问题: 合理调整能源结构; 进一步提高能源利用效率; 改善能源产业的安全性; 解决环境污染, 分布式供能系统作为集中供能系统的有益补充功不可没。

下面简述以微型燃气轮机为核心的几种主要的分布式能源系统, 以模块组合的形式给出, 并在模块化模型的基础上提出相关的组合技术或优化方法, 为中国分布式能源系统的仿真优化打下良好的基础。

## 1 分布式供能系统

分布式供能系统是相对传统的集中供能系统而言的, 是指将系统以小规模、分散式的方式布置在用

户附近, 可独立地输出电、热或(和)冷能的系统, 主要指分布式供电及部分冷热电联供。当今用于分布式供电的设备主要有微型燃气轮机、燃料电池和内燃机。表 1 给出了分布式供能系统中主要的几种分布式发电技术。

表 1 分布式发电技术

| 发电技术     | 能源种类  |
|----------|-------|
| 内燃机发电    | 化石能源  |
| 燃气轮机发电   |       |
| 微型燃气轮机发电 |       |
| 常规燃气轮机发电 |       |
| 燃料电池发电   | 可再生能源 |
| 太阳能发电    |       |
| 风力发电     |       |
| 小水利发电    |       |
| 生物质发电    | 二次能源  |
| 氢能发电     |       |
| 垃圾发电     | 一般废气物 |

化石能源是目前国际上分布式发电技术的主要能源; 先进的微型燃气轮机由于其具有尺寸小、重量轻、燃料适应性强、低燃料消耗率低、污染物排放少, 噪音低、振动小等一系列优点, 可广泛应用于各种分布式发电系统和冷热电联供系统。所以, 先进微型燃气轮机将成为中国 21 世纪分布式供能系统的主流设备之一。

2 先进微型燃气轮机的工作原理

微型燃气轮机是单机输出功率范围为 25~300 kW,以天然气、甲烷、汽油、柴油等为燃料的超小型燃气轮机,由燃气涡轮机、压气机、燃烧室、回热器、发电机及逆变控制部分组成。有回热的微型燃气轮机的简单循环热效率能够达到 20%~30%,由微型燃气轮机和高温燃料电池组成的联合循环系统发电效率能达到 60%以上,而由微型燃气轮机组成的冷热电联产系统效率可以超过 80%。

先进微型燃气轮机采用向心式涡轮机、离心式压气机和高校板式回热器,并且高速交流发电机与燃气轮机设计为一体。微型燃气轮机工作时,从压气机排出来的高压空气先在回热器内接受透平排气的预热,然后进入燃烧室与燃料混合燃烧。发电机与压气机、透平同轴,透平旋转带动发电机发出高频交流电。微型燃气轮机工作原理示意图如图 1 所示。

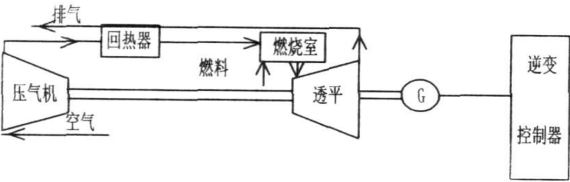


图 1 微型燃气轮机工作原理示意图

根据美国盖乐普公司 1999 年的调查,中国的微型燃气轮机需求量约在 1 500~1 900 台。中国冷热电联产系统起步较晚,主要受到天然气的限制。由于西气东输工程的实施,很多城市特别是长江三角洲地区的一些经济发达的省市有了较稳定的天然气供应,以微型燃气轮机为核心的分布式能源需求表现将会更为积极,所以对微型燃气轮机进行模块化的仿真分析是一项极为重要的项目。

微型燃气轮机的性能受到很多因素的影响,主要包括环境温度、压缩机等熵效率、涡轮机等熵效率、回热器回热温度、压缩比、涡轮机进口温度等。在对其进行研究的过程中主要是在仿真分析中优化微型燃气轮机的有效参数,不断改善其工作性能。

3 微型燃气轮机的分布式冷热电联供系统

冷热电联产系统作为分布式能源系统的一个主

要发展方向,由于节能、环保,可增加用户电力可靠性等诸多优点,在国内外已得到广泛重视。分布式冷热电联供系统是各种一次能源转换技术的集成运用,它是在一个区域内同时提供用户对电、热、冷等多种终端用能需求,以实现能源梯级利用、高效环保的系统。

以微型燃气轮机(MT)为核心的冷热电联供系统建立在能源梯级利用基础上,目的在于提高能源利用率,减少 CO<sub>2</sub> 及有害气体排放。表 2 列举了以微型燃气轮机为主的冷热电联产(CCHP)系统方案。

表 2 微型燃气轮机冷热电联产系统方案

| 项目   | 系统设备                  | 功能   | 热效率(%) |
|------|-----------------------|------|--------|
| 方案 1 | MT+余热锅炉               | CHP  | 80.5   |
| 方案 2 | MT+余热锅炉+热水<br>溴化锂制冷机组 | CCHP | 70.4   |
| 方案 3 | MT+排气再燃型空调机           | CCHP | 80     |
| 方案 4 | MT+排气再燃热交换型空调机        | CCHP | 83     |
| 方案 5 | MT+热水锅炉+电制冷机          | CCHP | 80.5   |

典型冷热电三联产系统一般包括:动力系统和发电机(供电)、余热回收装置(供热)、制冷系统(供冷)等。可以针对不同的用户需求,选择不同的冷热电联产系统方案。图 2 为方案 2 的系统模块图。

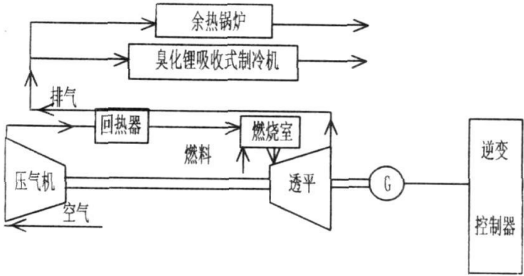


图 2 冷热电联供系统

文献[3]研究表明:冷热电联产系统在高负荷时有明显节能优势,但在负荷降低时,节能优势逐渐减少,甚至当负荷降到一定程度下时,节能性能不如参照系统。此种情况下可以考虑冷热电联产系统与蓄能技术相结合。

理论上,冷热电三联产系统与植物大棚联合循环,排放的 CO<sub>2</sub>、水蒸汽、少量的氮氧化物和余热能促进植物生长,从而达到零排放和全能量利用的效果。

因此,可以在模块化仿真的基础上考虑设计柔性

联产系统,使之能够适应不同季节,不同时段各种负荷,并保持终端能源利用效率最高,希望最终能够达到的目标是使系统能够在各种变化的市场经济条件、气候条件和负荷条件下实现优化的运行和控制。

#### 4 微型燃气轮机—燃料电池联合循环系统

燃料电池将燃料的化学能直接转化为电能和热能,因其自身优良的环保性和高效率,使其作为新一代发电系统备受各国关注。从环境友好性方面来看,燃料电池更被认为是分布式供能系统的优先选择。高温燃料电池由于燃料的多样性及高品位余热,因而与微型燃气轮机组成联合循环发电系统性能更佳。目前,能与微型燃气轮机组成联合循环发电系统的高温燃料电池有熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)和固体氧化物燃料电池(SOFC)。

根据美国能源部的研究,固体氧化物燃料电池(SOFC)和熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)与燃气轮机(MT)组成的联合循环发电系统可以获得70%以上的发电效率,除CO<sub>2</sub>之外,联合循环系统的其它排放几乎为零。

微型燃气轮机—高温燃料电池的联合循环系统(MCFC—MT、SOFC—MT)的工作原理分别为:作底层循环的MCFC使用燃气轮机的排气作为阴极空气源,而涡轮进口的空气通过燃料电池阳极高温排气中剩余燃料的再燃烧加热,MCFC工作于常压下,典型的MCFC—MT联合循环系统模块图如图3所示;MCFC也可作顶层循环,工作于加压下。作顶层循环的SOFC取代燃烧室,其高温排气进入微型燃机涡轮机膨胀做功。SOFC—MT联合循环发电系统模块图如图4所示。

微型燃气轮机—高温燃料电池联合循环系统作为一种分布式发电系统,其商业化产品将会在未来5~10年面世,工业燃气轮机—高温燃料电池适用于中心电站式系统,在未来10年或更长时间内将无法实现商业化,但其技术在理论上是可行的。尽管中国在这方面的研究才刚刚起步,但不能否认微型燃气轮机—高温燃料电池联合循环系统在中国未来是具有非常大潜能的。可以通过模块化组装,指导中国在联合循环系统上的仿真优化,进一步完善本国的研究系统,以设计出属于中国自己的产品,促进产品商业化

步伐。通过搭建仿真模块,可以分析燃气轮机在轴承、发电机、可靠性和耐用性等方面与燃料电池堆大小改进和匹配;还可以设计MT—高温燃料电池系统与溴化锂制冷系统组合的模块,理论上可以实现冷热电联供,只是系统更为复杂。

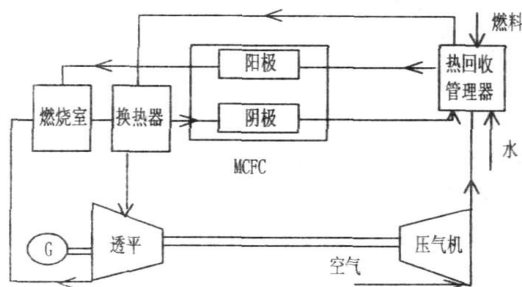


图3 MCFC—MT联合循环系统

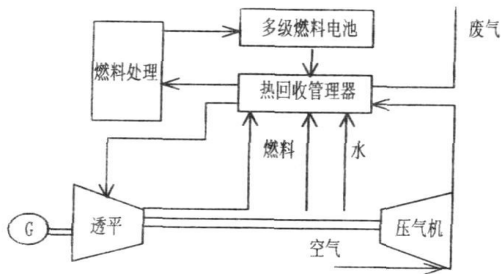


图4 SOFC—MT联合循环系统

#### 5 微型燃气轮机的其他应用

先进微型燃气轮机可广泛应用于各种分布式供能系统,还体现在:

(1)微型燃气轮机与热泵联合循环,利用微型燃气轮机的动力驱动热泵,将余热用于提升热煤温度。以期最大限度利用余热。

(2)微型燃气轮机太阳能辅助循环系统,利用太阳能补充高日照情况下的制冷需求。

(3)微型燃气轮机在垃圾掩埋场和偏远地区的应用,有效利用微型燃气轮机的燃料适应性,将生物气化或石油开采中的伴生气供微型燃机发电。

(4)微型燃气轮机应用于汽车混合动力系统,作为备用电源和便携式电源。

根据不同场合,不同用户需求,分别设计不同的系统方案,并进行建模仿真与优化设计,以便设计出实用有效的产品满足用户需求。

6 结 论

中国在今后相当长一段时间内对能源需求量还很大,要实现能源的可持续发展,达到高效、节能、环保的目的,必须探求合理的能源利用方式。

以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统是一种提供清洁、可靠、高质量电能并实现冷热电联供的新技术,作为集中供电大电网的补充,它对环境安全及经济、能源的可持续发展起着战略意义。

分布式供能系统有多种方案,而中国对分布式供能系统的研究起步较晚,但作为集中供能系统的有益补充,分布式供能系统是中国未来能源系统的一种必然趋势。由于设备昂贵,技术有限,对实体组装进行现场研究是不现实的,所以,借助模块化模型的建立,并在此基础上进行仿真分析就成了进一步研究与优化分布式供能系统的有利手段。

前面以模块化模型的形式较为系统地给出了以

微型燃气轮机为核心的几种主要分布式供能系统,在模块化模型的基础上提出相应结合技术或相关优化方法,旨在为分布式供能系统的仿真优化打下良好的基础。

参考文献

[1] 杨策,刘宏伟,李晓等.微型燃气轮机技术[J].热能动力工程,2003.

[2] 黄锦涛,丰镇平,刘莉.微型燃气轮机冷热电联产系统运行模式研究[J].热力发电,2004.

[3] 冯志兵,金红光.燃气轮机冷热电联产系统与蓄能变工况特性[J].中国电机工程学报,2006.

[4] 段立强,徐刚,林汝谋,等.IGCC 系统热力与环境性能结合的评价准则[J].中国电机工程学报,2004.

[5] 翁一虎,翁史烈,苏明.以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统[J].中国电力,2003.

[6] Omar Othman Badran. Gas turbine performance improvement [J]. Applied Energy, 1999.

(收稿日期:2007—12—22)

(上接第 61 页)

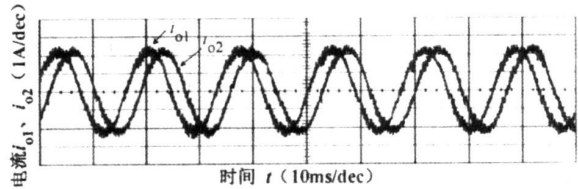


图 2 C 相缺相故障时输出电流的  
实验结果 (1 A/格,10 ms/格)

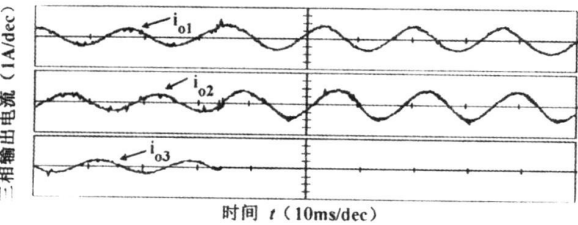


图 3 故障发生时的瞬态输出电流波形的  
实验结果 (1 A/格,10 ms/格)

3 结 论

无论哪一相发生故障,均可在数学分析方法的基础上,重新构建的开关函数矩阵,合成新的输出信号,

使 MC 在缺相情况下仍然可以继续工作,大大减少了因某一相断相时 MC 停止运行的几率。仿真与实验已经证明该容错方案的可行性,提出的矫正开关函数矩阵策略,可用来提高 MC 抗故障的鲁棒性。

参考文献

[1] 王兆安,黄俊.电力电子技术(第 4 版)[M].北京:机械工业出版社,2000.

[2] O. Simon, J. Mahlein, M N. Muenzer, and M.Bruckmann, "Modern Solutions for Industrial Matrix Converter Applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 2, pp. 401—406, Apr. 2002.

[3] P. Wheeler, J. Clare, L. Empringham, M. Apap, and M. Bland, "Matrix Converters", Power Engineering Journal, vol. 16, no. 6, pp. 273—282, Dec. 2002.

[4] T. H. Liu, J. R. Fu, and T. A. Lipo, "A Strategy for Improving Reliability of Field-Oriented Controlled Induction Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29, no. 5, pp. 910—918, Sep./Oct. 1993.

[5] 汤宁平,王建宽,吴汉光.矩阵变换器的 SPWM 控制技术及其实现[J].电工技术学报,2003(4):25—29.

作者简介:

赵慕银,男,1968 年生,硕士,副教授,研究方向:电力电子与电气传动、过程控制。

(收稿日期:2007—12—10)

# 300 MW 循环流化床锅炉机组凝结水管路改造

刘延芬, 魏志全

(四川白马循环流化床示范电站有限责任公司, 四川 内江 641005)

**摘 要:** 简要介绍了中国引进的首台 300 MW CFB 锅炉机组主要技术参数, 重点说明了凝结水管路在运行中出现的故障及对经济性的影响, 并对此进行了简要分析, 采取了行之有效的解决办法, 对后续同型机组有借鉴意义。

**关键词:** 循环流化床锅炉机组; 凝结水系统; 振动; 改造

**Abstract:** The main technical parameters of the first imported 300MW CFB boiler unit are introduced briefly. It focuses on the faults appeared during the operation of condensate pipe and their influence on the economy. Then the analyses are carried out and some effective measures are adopted, which is helpful for the later units of the kind.

**Key words:** CFB boiler unit; condensate water; vibration; safety; renovation; calculation.

**中图分类号:** TK264.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2008)02—0082—03

四川白马循环流化床示范工程是国家“九五”期间以技贸结合方式引进大型循环流化床(简称 CFB)锅炉技术的依托工程。锅炉岛由法国 ALSTOM 公司设计制造, 配套汽轮机为东方汽轮机厂生产的 N300—16.7/537/537—8 型汽轮机和东方电机厂生产的 QFSN—300—2—20 型发电机。

该工程于 2003 年 5 月 15 日开工, 2005 年 12 月 30 日首次并网一次成功, 2006 年 4 月 17 日通过国内 168 h 满负荷试运行并投入商业运行。

## 1 凝结水系统简介

300 MW 循环流化床锅炉机组的凝结水管路同煤粉炉机组相比, 没有太大的区别, 凝结水经过凝结水泵升压后经过轴封加热器、8、7 号低压加热器、6 号低压加热器、5 号低压加热器后至除氧器。不同之处在于因为锅炉布置底冷器和外置床的需要, 其灰控阀(底冷器灰控阀: 控制床料的排放以调整床压; 外置床灰控阀: 控制循环物料进入外置床以调整过热蒸汽、再热蒸汽的温度和调整锅炉床温)需要的冷却水由凝结水泵出口杂用管接出, 回水至除氧器。

## 2 凝结水系统运行中的故障

在机组投入运行后, 随着负荷的升高, 除氧器及凝结水至除氧器处管道很容易发生振动, 另外, 溶解氧经常不合格。在逐步排除了其它可能原因后, 其振动和溶解氧超标最大可能来自于灰控阀回水温度太

低, 通过在运行中运行人员将灰控阀冷却水流量阀门关至最小开度, 维持 60 t/h 的最小流量, 振动现象可以得到缓解, 溶解氧含量减小。

## 3 凝结水系统运行中的故障分析

对于以上出现的故障, 公司组织了人员专门分析和运行调整, 尽量提高灰控阀冷却水回水温度, 但因要维持灰控阀冷却水的最低流量, 调整手段受到了限制, 回水温度只能调整到 40~50℃左右。这样的低温水与经过了 8、7、6、5 号低压加热器约有 145℃的凝结水混合而造成了除氧器及凝结水管道振动。另一方面使除氧器效果变差, 给水含氧量增大。另外, 因为凝结水温度降低, 除氧器压力和温度下降导致机组给水温度下降, 对机组的安全性带来一定的影响。从安全角度来看, 一方面会造成凝结水管道振动, 时间久了, 容易引起管道和法兰泄漏, 加剧了对高压给水管道的腐蚀, 给机组运行带来很大的事故隐患。通过以上分析, 公司决定对凝结水系统进行改造。

## 4 凝结水系统改造

凝结水系统、底冷器改造是在 D 修期间进行的。作为循环流化床锅炉的主要设备, 是锅炉正常运行的重要环节, 公司锅炉底冷器原来采用 ALSTOM 设计的三分仓底冷器, 由于不能适应公司采购的媒质变化的要求, 在底冷器一、二仓内容易发生再燃烧导致结焦;

也容易因煤质变差,渣量过大而出力受限,长期造成锅炉床压因负荷变化或煤质变化而急剧升高造成锅炉降负荷甚至停炉,其排渣温度很高(高负荷时达到 300℃甚至更高),造成后一级输送设备一底灰斗式输送机因高温导致严重磨损。经过一段时间的运行证明,ALSTOM 公司设计的底冷器不能适应公司燃烧的煤种,在机组 D 修期间,对底冷器进行了更换,改成了国产的滚筒式冷渣器。并从机组经济性方面考虑回收部分底灰的热值,因此滚筒式冷渣器的冷却介质采用了凝结水。为了保证在低负荷时轴风加热器有足够的冷却水冷却轴封漏汽,保证轴封系统工作正常,因此在设计改造时将底冷器冷却水从轴封后 8 号低加前的凝结水管路引出至底灰冷却器,回水经回水电动门后至 6 号低加入口。为了保证底灰冷却器有足够的冷却水又不能使其回水温度过低,每个系统都有门进行调节。

5 凝结水系统改造的热值计算

5.1 改造前后的数据对比

改造前后的数据对比见表 1,以额定工况 300 MW 计算。

5.2 改造前后的热值计算

排汽热损失 $\triangle Q_1$   
改造前排汽热损失 $\triangle Q_{前}=158.33\times(2\,569.02-157.39)=381.83\times10^3\text{ kW}$   
改造后排汽热损失 $\triangle Q_{后}=165.55\times(2\,569.02-157.39)=399.25\times10^3\text{ kW}$

$\triangle Q_1=\triangle Q_{后}-\triangle Q_{前}=399.25\times10^3-381.83\times10^3=17.42\times10^3\text{ kW}$   
第 7 级抽汽焓增 $\triangle Q_7$   
 $\triangle Q_7=6.94\times2\,760-5\times2\,870=4.80\times10^3\text{ kW}$   
第 8 级抽汽焓增 $\triangle Q_8$   
 $\triangle Q_8=13.89\times2\,680-10.55\times2\,730=8.42\times10^3\text{ kW}$   
底冷器热值回收 $\triangle Q_{底}$   
 $\triangle Q_{底}=77.78\times(319.75-177.61)=11.06\times10^3\text{ kW}$   
改造前后的热量差  $Q$   
 $Q=\triangle Q_7+\triangle Q_8+\triangle Q_{底}-\triangle Q_1=4.80\times10^3+8.42\times10^3+11.06\times10^3-17.42\times10^3=6.86\times10^3\text{ kW}$   
可以看出,改造后新增热值  $6.86\times10^3\text{ kW}$

6 凝结水系统改造后的运行注意事项

凝结水系统经过改造后,系统的运行方式将随之发生了变化。通过一段时间的运行调整,总结出了特殊工况下的运行规律,在运行中,应主要注意以下问题:

1) 低负荷时排渣量将相对减少,进入 4 个底冷器的冷却水量较大,如果不及时调整,经过 8、7 号低加的冷却水量将明显减少,而进入 6 号低加的冷却水量相对偏多,凝结水温度的偏差很容易使 6 号低加的正常疏水管发生振动现象。因此低负荷时应及时加强对底冷器冷却水量的调整,尽量提高回水温度与 7 号低加出水温度相匹配,以消除管道振动。并在运行

表 1 改造前后数据对比

| 参 数             | 改造前      | 改造后    | 备注                  |
|-----------------|----------|--------|---------------------|
| 排汽流量(kg/s)      | 158.33   | 165.55 | 额定工况                |
| 排汽压力(kPa)       | 6.5      | 6.5    | 设计为 6.4 kPa,取实际运行参数 |
| 排汽焓值(kj/kg)     | 2 569.02 |        | 查表                  |
| 凝结水焓值(kj/kg)    | 157.39   |        | 查表(取凝汽器温度 36℃对应焓值)  |
| 7 级抽汽流量(kg/s)   | 6.94     | 5      | 额定工况                |
| 7 级抽汽焓值(kj/kg)  | 2 760    | 2 870  | 查表                  |
| 8 级抽汽流量(t/h)    | 13.89    | 10.55  | 额定工况                |
| 8 级抽汽焓值(kj/kg)  | 2 680    | 2 730  | 查表                  |
| 底冷器冷却水流量(kg /s) |          | 77.78  | 额定工况,取平均值计算         |
| 冷却水焓值(kj/kg)    |          | 177.61 | 冷却水进口水温 42℃         |
|                 |          | 319.75 | 冷却水出口水温 76℃         |

过程中加强对该设备巡回检查,发现问题及时处理。

2) 一般情况下,当机组负荷在 300 MW 时,将其冷却水调整控制在 250~300 t/h,这样可以维持冷却水回水温度在 70~75 °C;当机组负荷在 200 MW 时,将其冷却水调整控制在 150~180 t/h,这样可以维持冷却水回水温度在 65~70 °C,在调整过程中应注意保证 6 号低加疏水温度应大于 7 号低加凝结水出水温度,这样既能满足负荷的需要,又能减少疏水管及凝结水管路的振动现象。

3) 在底灰冷却器、斗式提升机或刮板输灰机故障停运时,凝结水温度突然发生变化,很容易造成 6 号低压加热器的水位波动,如果不及时调整 8 号低压加热器的水位,会造成 8 号低压加热器水位过高而打开危急疏水,影响到整个低压加热器的稳定运行。因此,在发生以上故障时,应加强低压加热器的水位监视,及时修改 8 号低压加热器的水位设定值,使疏水畅通,故障消除后,恢复正常运行。

4) 在甩负荷或滑停时,应注意调整底冷器冷却水量,避免造成除氧器高水位事故的发生及除氧器水温急剧下降给机组带来不安全因素。

5) 对于灰控阀冷却水,因为灰控阀运行的环境温度很高(基本上是锅炉运行床温 890 °C 左右),其冷却水流量不能太小,否则,灰控阀得不到充分的冷却,

但又不能使其冷却水流量太大,否则,这部分的凝结水回水温度会很低。通过调整试验,维持灰控阀冷却水流量在 70 t/h 左右(阀门开度固定),回水温度尽管只能达到 43 °C,但能充分保证设备的安全,况且,其流量也较小,对凝结水温度影响不大,工况变化时,也不需要有很大的运行调整。

## 7 凝结水系统改造后的效果检验

凝结水系统改造后,通过一段时间的实际运行表明:系统改造既节约了另外设计安装底冷器冷却水系统的成本,降低了底灰的排放温度,降低了底灰系统各设备正常运行的环境温度,延长了设备的运行时间;同时因为回收了低灰的部分热量,降低了排渣热损失,提高了机组的经济性。另外冷却水温调整方便,消除了原设计带来的管路振动,提高了机组的安全性,给机组长期稳定运行创造了良好条件。

### 参考文献

- [1] 吴季兰. 汽轮机设备及系统[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [2] 景朝辉. 热工理论及应用[M]. 中国电力出版社, 2006.

(收稿日期:2007-11-01)

(上接第 77 页) 而笨重。如果在余热锅炉的高压部分采用直流锅炉的设计方案,那么就可以取消笨重的高压锅筒,使联合循环机组得以快速启动,并获得高效率。

## 4 结论

随着社会的进步,人们逐渐认识到能源的有限性和环境保护的重要性,研究和发展 IGCC 技术是基于建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需要。IGCC 是 21 世纪火电动力发展的主要方向之一,也是中国开拓洁净煤发电新模式所需的高新技术。

IGCC 系统非常复杂,由于工作条件变化很大,构成部件与常规电力设备有很多不同,目前尚未完全成熟,还需要经历一个发展和完善的过程。前面对 IGCC 工作原理和特点做了简要介绍,对系统的主要设备进行分析,指出存在的一些问题,并提出改进方法和发展方向,从而为各构成部件做进一步的研究和

改进奠定基础。

### 参考文献

- [1] 段立强,徐钢,等. IGCC 系统热力与环境性能结合的评价准则[J]. 中国电机工程学报, 2004. 12, 24(12).
- [2] 许世森. IGCC 与未来煤电[J]. 中国电力, 2005. 2, 38(2).
- [3] 董卫国. IGCC 发电和煤气化技术[J]. 电力设备, 2001. 3, 2(1).
- [4] 林汝谋,金红光,等. IGCC 中燃气轮机技术方案与设计优化[J]. 燃气轮机技术, 2001. 9, 14(3).
- [5] Robert Farmer. IGCC Power Generation Plants in Commercial stage of Development[J]. Gas Turbine World, 2004, 34(5).
- [6] 高健,倪维斗,等. IGCC 系统中空气气化炉与氧气气化炉的对比研究[J]. 燃气轮机技术, 2007. 6, 20(2).
- [7] 姚秀平. 燃气轮机及其联合循环发电[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [8] 迟全虎. IGCC 联合循环系统建模与设计优化研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2004.

(收稿日期:2008-01-14)

# 行波测距在 500 kV 变电站的应用 及其存在问题研究

陈厚斯<sup>1</sup>, 吕飞鹏<sup>1</sup>, 韩传鼎<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 南方电网超高压输电公司梧州局, 广西 梧州 543002)

**摘 要:**介绍了利用电流行波进行 500 kV 输电线路故障测距的方法, 分析了目前电力系统故障定位最为准确的 A 型、D 型行波测距原理。对两种算法的理论基础和应用条件进行了分析和讨论, 并在该基础上分析了 XC-21 行波测距装置在 500 kV 交流输电线路上的应用和出现的问题及原因。

**关键词:**故障测距; 行波; 输电线路

**Abstract:** The fault location method for 500kV transmission line based on current traveling wave theory is presented, the type A and D methods are analyzed which are the most accurate methods of the fault location in power system at present. On the basis of analyzing the principle and application condition of the two algorithms, the application of XC-21 fault location equipment based on traveling wave to 500kV AC transmission line are proposed as well as the existing problems and causes.

**Key words:** fault location; traveling wave; transmission line.

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)02-0085-03

## 1 A 型、D 型测距原理

仅介绍在 T 站运行的 XC-21 装置所采用的测距原理即 A 型、D 型测距原理。XC-21 利用行波在输电线路上有固定的传播速度这一特点, 通过检测故障暂态电流行波在故障点与母线之间的传播时间测距<sup>[1]</sup>。

### 1.1 单端行波测距原理(A 型)

在被监视线路发生故障时, 故障产生的电流行波会在故障点及母线之间来回反射。装设于母线处的行波测距装置接入来自电流互感器二次侧的暂态电流行波信号, 使用模拟高通滤波器滤出行波波头脉冲。

根据到达母线的故障初始行波脉冲 S1 与由故障点反射回来的行波脉冲 S2 之间的时间差来实现故障测距, 找出故障点<sup>[1]</sup>。设波速度为 V, 故障初始行波以及由故障点反射波到达母线的的时间分别为  $T_{S1}$ 、 $T_{S2}$ , 则故障距离:

$$X_L = \frac{1}{2} V (T_{S2} - T_{S1}) \quad (1)$$

在相间故障存在较大的过渡电阻以及单相接地故障时, 对端反射波在故障点有较大的透射(折射), 当故障点在线路中点以内时, 来自故障线路方向的第二个行波波头是故障点反射波, 根据它与故障初始行

波的时间差, 来实现测距。当故障点在线路中点以外时, 来自线路方向的第二个行波波头是来自故障线路对端的反射波, 根据它与故障初始行波的时间差, 可以计算出故障点距对端的距离:

$$X_R = \frac{1}{2} V (T_{S1} - T_{S2}) \quad (2)$$

XC-21 利用故障行波之间的关系, 识别故障电流行波波形, 计算故障距离, 但由于装置的数字处理能力有限, 往往需要手动计算出故障距离。

### 1.2 两端行波测距原理(D 型)

设故障初始行波波头到达两侧母线的的时间分别为  $T_S$  和  $T_R$ , 装于线路两端测距装置记录下行波波头到达两侧母线的的时间, 则故障距离可由下式来算出:

$$X_S = \frac{1}{2} [(T_S - T_R) gV + L] \quad (3)$$

$$X_R = \frac{1}{2} [(T_R - T_S) gV + L] \quad (4)$$

此种方式在 T 站采用通过电话与对侧交换数据的方式来测距。理论上这种测距方式采用内置的 GPS 实现两端的时钟同步, 使得线路两端的时间同步误差平均不超过 1  $\mu$ s 由此产生的绝对测距误差不超过 150 m<sup>[2]</sup>。但此种方式对 GPS 时钟的依赖和要求很高。

## 2 XC-21 在 T 站的应用分析

输电线路分布狭长, 长期暴露在自然界中, 经受

各种自然条件的侵害,南方的夏季雷暴、飓风,春秋季多雾,秋冬季干燥多山火,所有这些情况都对线路的安全运行构成威胁,为了电网的安全运行、快速的恢复供电,必须对故障实施精确定位。所以在T站设置了XC-21行波测距装置。

1)基于阻抗法的保护测距,在故障点的过渡电阻、线路不对称、电压电流变换器等因素的影响下测距的误差很大。在某些情况下甚至达到80 km,如500 kV HL I线在2006年9月9日6时6分52秒动作跳闸时,RCS-931保护装置的测距误差达到72 km,在某些情况之下甚至不能测出距离,如2004年9月19日、2004年10月2日和2006年8月2日线路跳闸的时候REL561保护装置未能测出故障距离。但是在某些情况之下,基于阻抗原理的测距法依然是行波测距法的有效补偿。

2)从2004年至2006年9月,T站共出现22次线路故障跳闸,其中有6次未能实现双端测距,其中16次双端测距成功,只要双端行波测距成功,其误差是很小的,基本上在500 m以内,所以在大多数的情况之下,双端测距能有效地实现故障精确定位。当然双端法也是T站首选的测距方式。然而对于单端测距,在复杂的故障情况之下都可能存在波形误判的可能性,同时也可能由于干扰及设备自身的原因而导致测距失败<sup>[3]</sup>。但若是波形清晰测距成功的情况下,其测距误差也是在500 m以内的。如2004年7月4日、2006年8月2日SH II线跳闸的时候未能实现双端测距,但由于波形清晰,成功地实现了单端测距。

### 3 测距失败的原因及分析

以2006年9月9日500 kV HL I线由于风偏导致输电线路对树放电即线路C相瞬时接地故障为例。在一天之内500 kV HL I线C相连续6次故障,故障发生在距T站220 km处,均重合成功。同样,在12时13分55秒再次对树放电的时候,本侧装置触发的时刻为6 306  $\mu\text{s}$ ,而对侧是7 171  $\mu\text{s}$ ,同样本侧测距失败(当然对于上述两次测距失败的原因,也可能是本侧所记录的是干扰信号,而由于装置不能无缝记录,所以漏记了故障行波,导致测距失败)。由于线路对树的放电电弧电阻的不确定性以及瞬时性而使装置未能记录到故障点的反射波,或是故障行波在返回故障点的时候故障已经消失而导致本侧单端测距也失败,而由于故障发生在对侧的近端,故障行波往返

时间短而记录下了返回行波以成功的测距。而在13时30分10秒故障时,本侧装置触发的时刻为312 384  $\mu\text{s}$ ,而对侧是369 915  $\mu\text{s}$ ,由于时钟的原因而使双端测距失败,但由于成功地记录了返回的故障行波,而使单端测距成功。

基于以上的分析可知,在山火或风偏对树放电等复杂故障情况下,测距有时候也会失败。研究发现,GPS接收机普遍存在输出信号瞬时不稳定性、卫星失锁以及时钟跳变等问题,因而其输出的时间信息和秒脉冲信号不能直接利用,必须附加高稳定度守时钟,并且需要消除偏差超过某一限定范围的时间同步信号。而单端行波测距的关键是准确求出行波第1次到达测量端与其从故障点反射回到测量端的时间差,并包括故障行波分量的提取。由于行波在特征阻抗变化处的折反射情况比较复杂(如行波到达故障点后会发生反射也会通过故障点折射到对侧母线上)非故障线路不是“无限长”由测量点折射过去的行波分量经一定时间后,又会从测量点折射回故障线路等,使行波分析和利用单端行波准确故障测距有较大困难<sup>[2]</sup>。由于装置的自身原因和自然界故障的复杂性造成测距的失败如:

1)装置2次启动之间要有一段等待的死区时间(约70~80 ms),在实际运行期间发现2次启动之间的时差小于75 ms左右时,第2次的暂态行波信号将丢失。

2)当电压过零或接近于零时,产生的电流行波比较微弱,造成测距装置工作失败。

3)母线上没有其他元件,在故障行波到达母线后,由于只能测量到母线分布电容产生的持续时间较短、幅值较小的电流脉冲信号,而至行波测距的失败。

4)高阻故障时,行波测距装置通过降低检测门槛值来提高检测灵敏度,同时也降低了装置的抗干扰能力,导致测距失败的几率上升,特别在受干扰(雷电)区域的线路上。

5)同时接入多回出线的变电站行波会转化为其他线路和设备的行波,由于不能无缝连续记录或记录下来也无法确定故障行波波头的到达时刻,而造成测距失败。

由以上的分析可知,在进行波形分析时(特别是行波法测距失败的情况之下),应结合保护动作故障信息进行参考,或把行波测距和故障录波进行信息集成,把线路在各种故障情况下的暂态电流、电压本质表征分析提出特性模型,以利于故障线路精确定

位<sup>[4]</sup>。同时,提高软、硬件的配置是提高测距成功率的重要手段。

4 结 论

从行波的原理及影响行波测距因素的分析,从原理上看,与阻抗测距算法相比,行波法几乎不受过渡电阻和线路不对称等因素的影响,准确度优于阻抗法,但行波法存在反射波的识别问题,可能出现测距失败<sup>[2]</sup>。但以阻抗法作为补充,能有效地提高测距成功率。双端行波法的关键是准确记录下电流行波到达线路两端的时间,由于母线两端都只检测第 1 个到达的行波,线路过渡电阻的电弧特性、系统运行方式变化、线路分布电容及负荷电流等对测距准确性不会造成大的影响,既有很高的测距准确度,又有很高的测距可靠度,而且不受对端母线反射波、相邻线路透射波以及线路两侧母线结构的影响,仅从行波故障测距准确度和可靠度来考虑,双端行波测距方法是首选的测距方法。但双端法对 GPS 时钟的依赖太强。由于单端测距法不需要 GPS 时钟系统及两端数据通信等,测距结果的实时性强,也可能测距失败,因此,单端行波故障定位也具有重要的实际意义,但单端行波测距法还存在测距死区问题<sup>[5]</sup>。在目前状况之下,用单端法、双端法结合阻抗法进行联合测距,在行波法失效的情况下以阻抗法的测距结果作为补充,能弥补行波法的不足,实现故障定位<sup>[6]</sup>。同时由于行波测

距中线路精确长度、杆塔对应明细表及波速的选择对测距精度以及故障点查找也有着重要的影响,精确的线路长度应通过输电线路竣工验收资料实际数据为准,而对于波速度的选择是在一个经验值基础上通过多次故障实际情况修正获得。

综合以上的分析可知,只要从软件和硬件 2 个方面采取有效的措施,就可提高测距成功率,进而实现对高压输电线路的故障精确定位,以及时修复线路,最大限度地为电网的安全运行提供有力的保证。

参考文献

[1] XC-21 输电线路行波测距装置使用说明书[Z]. 科汇电气有限公司,2004—2006.  
[2] 董新洲,葛耀中,徐丙垠.利用 GPS 的行波测距研究[J]. 电力系统自动化,1996,(12).  
[3] 董新洲.小波变换在行波故障测距技术中的应用[D]. 西安交通大学博士论文,1996.  
[4] 陈平,葛耀中,徐丙垠.现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用[J]. 继电器,2004,32.  
[5] 骆敬年,颜廷纯.基于行波原理线路故障测距的误差分析及解决措施[J]. 华东电力,2006,10.  
[6] 杨延勇.基于小波分析的电流行波双端测距[D]. 山东大学硕士学位论文,2005.

作者简介:

陈厚斯(1978—),男,湖北石首人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统广域保护。

(收稿日期:2008—01—15)

(上接第 52 页) 管圈水冷壁技术,只能采用垂直管圈水冷壁。要研究超临界 CFB 锅炉水动力特性,按照安全、可靠、经济的原则,确定合理的质量流速,研究解决特殊工况下水冷壁的传热安全问题。

4)按照可靠、经济的原则,开展超临界 CFB 锅炉配套辅机和辅助设备的选型设计和技术研发工作,如:煤和石灰石破碎机、冷渣器及输渣设备、风机、空气预热器等,尽量避免锅炉辅助设备带来技术风险。

5)要瞄准达到通常湿法脱硫工艺 95%的脱硫效率的目标,研究提高石灰石利用率的手段和措施;要瞄准达到烟尘排放浓度低于 50 mg/Nm<sup>3</sup> 环保标准,研究选用经济可靠的除尘方式和设备。

5 结束语

600 MW 超临界循环流化床锅炉技术综合了循环流化床污染控制成本低及超临界机组高供电效率两个优势,是循环流化床锅炉技术发展的方向。

川南地区拥有储量丰富高硫、高灰、低热值无烟煤,是示范工程较为理想的燃料,同时,作为国家 100 MW 和 300 MW CFB 循环流化床锅炉示范电站的建设地,四川地区拥有较强的循环流化床锅炉运行、试验、维护技术力量,是自主研发 600 MW 超临界循环流化床锅炉示范工程理想的依托地。

(收稿日期:2007—12—10)

# 火电厂废水“零排放”系统

李 锐<sup>1</sup>, 何世德<sup>1</sup>, 杜云贵<sup>2</sup>, 张占梅<sup>1</sup>, 杨运平<sup>1</sup>

(1. 重庆远达水处理工程有限公司, 重庆市 400039; 2. 重庆大学资源与环境科学学院, 重庆市 400044)

**摘 要:** 随着中国经济的快速增长, 水资源的短缺矛盾日益突出。作为耗水大户的电力企业, 必须提高水资源的重复利用率、节约用水, 这就要求火电厂实施废水“零排放”。概要介绍了火电厂废水“零排放”应用现状, 阐述了火电厂废水“零排放”实现的措施及确保火电厂废水“零排放”的有效方法。

**关键词:** 火电厂; 节水; 零排放

**Abstract:** With the rapid rise of our national economy, the contradiction of water lacking becomes acute increasingly. Because of using water greatly, the power plant must improve the reusing rate of water and use water frugally. It means the power plant must realize the zero discharge of waste water. The application status of zero discharge of waste water is introduced briefly, and the measures of realizing zero discharge of waste water are described as well as some effective methods for guaranteeing the zero discharge of waste water in power plant.

**Key words:** power plant; water saving; zero discharge of waste water.

**中图分类号:** X703; TK227.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2008)02-0088-03

中国是一个淡水资源极度匮乏的国家, 随着经济社会的发展, 资源型和水质型缺水已成为制约中国经济社会可持续发展的瓶颈。电力工业是国民经济的基础产业, 经济发展离不开电力的增长, 电力工业既是用水大户, 也是排水大户。在中国, 火力发电厂作为耗水大户, 其用水量约占工业用水量的 30%~40%, 仅次于农业用水量。近年来, 随着环保监管力度的加强, 特别是水资源费和排污费征收更趋合理, 水的成本在电厂运行成本中所占份额越来越大。火电厂节约用水、提高水的重复利用率、减少排放的实施势在必行, 意义重大, 节水工作的开展与否直接影响电力企业的生产经营和持续发展。火电厂废水“零排放”是节水的最佳途径。所谓“零排放”, 是指不向外界排出对环境有任何不良影响的水, 进入电厂的水最终以蒸汽的形式进入大气中, 或是污泥等适当的形式封闭、填埋处置。实现废水“零排放”, 电厂必然将实现最大程度的节水, 同时最大限度的保护水环境, 最终实现电厂经济效益和社会效益的全面改善<sup>[1-3]</sup>。

20 世纪 70 年代提出的工艺, 经 30 年来的研究、设计、运用, 近年来该工艺已基本成熟。许多发达国家在引进该工艺的基础上, 根据本国的具体情况, 充分利用当今的新技术、新设备, 真正做到火电厂用水闭路循环, 确保废水“零排放”。美国科罗拉多州的 R·D·Nixon 电厂、Hayden 电厂和澳大利亚立德尔贝司渥德火电厂等成功实现废水“零排放”, 并取得了多年运行的满意经验<sup>[4]</sup>。

中国火电厂废水“零排放”启动较晚, 该项目在国家重点建设项目西柏坡火电厂进行试验应用, 达到了国家电力公司科学技术项目合同预期目标和要求的主要技术经济指标。实现了火电厂废水“零排放”的总目标, 环保效益和社会效益显著<sup>[5]</sup>。目前, 国内部分电厂也相继完成了废水“零排放”, 如北票发电厂、大同热电厂、河津发电厂、沙角 C 电厂、神华阳光电厂和太原第一热电厂等。由于火电厂废水“零排放”项目经济、环境、社会效益巨大, 一些火电厂也正陆续开展此项工作。

## 1 国内外火电厂废水“零排放”现状

火力发电厂废水“零排放”工艺是美国、加拿大

## 2 火电厂各水系统水质特征

火电厂废水系统一般由循环冷却排污水、脱硫废水、含油废水、含煤废水、排泥废水、除灰废水、其他工业废水和生活污水等构成。其中循环冷却排污水和除灰废水排水水量较大, 占整个火电厂废水的 80%

表 1 火电厂各水系统水质特征

| 废水名称         | 废水来源                       | 排放特征     | 主要污染物                                                              | 占总废水百分比(%)    |
|--------------|----------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|---------------|
| 生活污水         | 生活区生活污水                    | 连续水量     | BOD、SS                                                             | 0.5~3         |
|              | 生产区生活污水                    | 变化系数 2.5 |                                                                    |               |
| 冷却系统排污水      | 湿式冷却塔排污水                   | 连续, 定值   | Ca <sup>2+</sup> 、Cl <sup>-</sup> 、SS                              | 30~70         |
| 含油废水         | 油库油处理间有洗涤排水                | 经常, 不连续  | 油污                                                                 | 0.1~1         |
|              | 大小修或事故排放含油废水               | 非经常性排水   |                                                                    |               |
|              | 工业冷却及杂用排水                  | 连续, 基本定量 |                                                                    |               |
| 经常性化学排水      | 化学除盐再生水                    | 经常, 不连续  | pH、COD、Cl <sup>-</sup> 、SS                                         | 2~7           |
|              | 化学预处理污泥水                   | 经常, 不连续  |                                                                    |               |
|              | 锅炉高温排污水                    | 连续, 定期   |                                                                    |               |
|              | 取样排水                       | 不连续, 量少  |                                                                    |               |
| 非经常性<br>化学排水 | 锅炉化学清洗                     | 非经常      | Ph、COD、SS、Ca <sup>2+</sup> 、<br>SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、重金属 | 2~5           |
|              | 炉管、空气预热器、除尘器<br>及烟囱的不定期冲洗水 | 非经常      |                                                                    |               |
|              | 凝汽器管泄漏检查水                  | 非经常      |                                                                    |               |
|              | 湿冷塔清洗水                     | 非经常      |                                                                    |               |
| 除灰废水         | 冲灰水                        | 连续, 定量   | COD、SS、Ca <sup>2+</sup> 、<br>SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、重金属    | 20~50         |
|              | 冲渣水及水封溢流水                  |          |                                                                    |               |
| 煤场排水         | 输煤系统冲洗水                    | 经常, 不连续  | SS                                                                 | 0.5~2(随降雨量而定) |
|              | 煤场雨水                       | 不定期      |                                                                    |               |

左右。其它废水水量由火电厂的具体用水情况而定。  
火电厂各废水系统水质详见表 1。

3 火电厂废水“零排放”实现的措施

火电厂废水实施“零排放”从技术上讲有多种方案, 根据产生废水的种类分类收集, 进行分质、分类处理和综合处理。例如将电厂废水集中处理后再用, 但由于电厂废水的水量大, 水质差别大, 同时许多污染物的含量极低, 因此处理难度大, 从经济角度考虑是不可行的。而将各系统废水分别处理和回收利用, 在生产过程中减少用水和排水, 不仅技术上可行, 经济上也可以承受<sup>[6]</sup>。火电厂废水“零排放”的实现必须采取有效、可行的措施; 依据火电厂各用水系统的现状, 对火电厂水系统水量平衡进行分析, 做出总体规划; 使水在各用水系统之间梯度循序使用, 将多余废水处理回用, 或水在单个水系统中自身闭路循环使用, 从而达到废水“零排放”的目的。

3.1 水系统水量平衡分析, 总体规划

火力发电厂内存在着各种用水系统, 各用水点的

用水量以及对水质的要求也不尽相同。准确的水量平衡是实现火电厂“零排放”的关键, 必须把全厂用水看作一个整体, 统筹规划全厂的取排水水量、水质, 协调好各用水系统用水分配, 做好水量平衡。优化各用水系统的关系, 根据其水质、水量要求, 为废水处理回用找到归宿, 减少系统补给水量, 最终达到节水、“零排放”的目的。

3.2 梯度循序使用

火电厂各用水系统繁多、复杂, 水质、水量不尽相同。采用梯度循序使用水资源可充分利用水资源, 节省电厂运行成本, 降低环境污染程度。辅机冷却水和循环冷却水排水水质相对较好, 仅 TDS 浓度较高, 可充分用于水质要求相对较低的脱硫工艺用水等, 脱硫废水经处理后可用于除灰、煤场用水等。

3.3 闭路循环使用

清污分流是用水单位常采用的手段, 污染较重的废水不宜与轻污染水混合处理, 以减轻处理难度和降低处理成本。除灰废水和煤场废水污染物种类繁多, 污染较重, 处理后回用于其它水系统不经济。一般经济措施为除灰废水和煤场废水经简单处理后, 闭路自身循环使用。

### 3.4 处理后回用

火电厂循环冷却水排水量一般较大,其他用水系统如脱硫用水、除灰煤场用水等水系统用水量有限,不能全部采纳循环冷却排污水。为达到电厂废水“零排放”的目的,就必须将多余的循环冷却排污水处理后回用。一般将多余循环冷却排污水经膜处理后自身回用或回用作锅炉补给水。

## 4 确保火电厂废水“零排放”有效方法

### 4.1 加强水务管理

火电厂废水“零排放”设计建设是短期的过程,而运行管理才是长久之事。火电厂废水“零排放”的实施离不开强有力的管理措施,必须加强水务管理。水务管理的目的在于:“在满足电厂安全运行的前提下,按照各工艺系统用水量及对水质的要求,结合水源条件,合理选择水源和供水系统;根据各排水点的水量水质和环保要求,合理确定各排水系统及废水处理方案;通过行之有效的技术措施,对电厂各车间各设备用排水量进行平衡及重复使用,并监测和控制运行中的用排水量和排水水质,以最小的投资获得最大的节能效益,从而达到节约用水和保护环境的。”<sup>[7]</sup>

### 4.2 提倡节约用水

火电厂节约用水将减少电厂取水量和废水排放量,更有利于火电厂废水“零排放”的实现。火电厂循环冷却排污水占电厂总废水量的比例最大,直接影响电厂废水“零排放”项目的顺利实施。而浓缩倍率直接决定循环冷却水系统的补水量和排水量,电厂减少耗水量和废水量的关键是提高循环水的浓缩倍率。以 $2\times 600\text{ MW}$ 机组循环冷却系统为例,浓缩倍率为2时,其补充水量和排污水量分别为 $3\,592\text{ t/h}$ 和 $1\,680\text{ t/h}$ ;当浓缩倍率提高到4时,其补充水量和排污水量分别降到 $2\,394\text{ t/h}$ 和 $471\text{ t/h}$ <sup>[8]</sup>。因此,如何提高浓缩倍率、减少排污水量,是当前火电厂节水治污、废水“零排放”的重要研究课题。西柏坡电厂采用分级浓缩串联补水新技术,以提高整个循环水系统的浓缩倍

率。即1、2号机组循环水浓缩倍率为1.76,其循环排污水用弱酸阳离子交换树脂处理后作为3、4号冷却塔的循环补给水,3、4号机组的循环水浓缩倍率为4。西柏坡电厂循环水浓缩倍率的提高,为其废水“零排放”的实施提供了有利的条件<sup>[5]</sup>。

## 5 结束语

火电厂废水“零排放”是一个复杂的系统工程,必须统筹规划,完善水系统水量平衡,采取水资源梯度循序使用、自身循环使用及处理后回用等措施,兼顾治水、管水、节水,以确保火电厂废水“零排放”的实现。废水“零排放”方案的实施,不仅保护了环境,同时还节约了用水,缓解了当地水资源短缺矛盾,为发电公司带来巨大的经济效益。

### 参考文献

- [1] 王文兵. 火电厂废水零排放改造方案[J]. 电力建设, 2000, 12: 41~44.
- [2] 魏飞, 张雅杰. 火电厂废水处理发展现状[J]. 内蒙古环境保护, 2004, 17(3): 22~25.
- [3] 龙国庆. 火电厂废水零排放工艺综述[J]. 机电工程技术, 2004, 33(8): 9~10.
- [4] 王佩璋. 火力发电厂全厂废水零排放[J]. 电力环境保护, 2003, 19(4): 25~29.
- [5] 王家生, 黄种买, 易赛莉, 等. 大同热电有限责任公司废水零排放工艺研究[J]. 电力环境保护, 2002, 18(2): 21~23.
- [6] 裘晟, 李磊. 火电厂水务管理与零排放设计研究[J]. 水利电力机械, 2004, 26(5): 49~53.
- [7] 张贵祥, 董建国, 李志民等. 火电厂废水“零排放”设计研究与应用[J]. 电力建设, 2004, 25(2): 52~54.
- [8] 张福常, 杨培育. 西柏坡电厂废水零排放工程的设计与施工[J]. 电力建设, 2001, 22(1): 23~27.

### 作者简介:

李锐(1971~), 男, 高级工程师, 主要从事火电厂废水处理设计工作。

(收稿日期: 2007-12-28)

# 节约能源 保护环境

煤焦油替代重油作为动力燃油的热天平分析

廖勇波<sup>1</sup>, 于 娟<sup>2</sup>

(1. 广东省轻纺建筑设计院, 广东 广州 510080;  
2. 上海交通大学机械与动力工程学院热能所, 上海市 200240)

**摘 要:**用微量热天平研究了煤焦油和重油的热解特性和燃烧特性,并在此基础上初步分析了用煤焦油代替重油作为动力燃料时应该注意的因素。结果显示,不能简单用煤焦油替代重油直接在重油燃烧器上燃烧,为了防止煤焦油中挥发份过早析出导致结焦积炭,进燃烧器之前煤焦油的加热应注意采用较低的加热温度和加热强度。

**关键词:**煤焦油;热解;燃烧;热天平;重油

**Abstract:** The pyrolysis and combustion characteristics of coal tar and heavy oil are analyzed using thermobalance to study the factors needing attention for substituting the coal tar for the heavy oil as power fuel. The results show that the coal tar cannot be burned directly using the burner designed for heavy oil. In order to avoid agglomeration and char accumulation resulting from the volatile matter of the coal tar liberating too early, the temperature and the intensity should be lower in heating the coal tar before entering into the burner.

**Key words:** coal tar; pyrolysis; combustion; thermobalance; heavy oil.

中图分类号:TM721.1 文献标识码:B 文章编号:1003—6954(2008)02—0091—04

目前,中国仍有相当多工矿企业采用重油作为企业动力设备燃料。随着近年来中国社会经济的飞速发展,各种能源油品的消耗也大量增加,使中国的工业用重油价格大幅上涨,企业生产成本的负担仍然很重<sup>[1,2]</sup>。由于煤焦油的价格比重油便宜,热值只比重油略低,市场供应较充足,如果能将煤焦油替代重油用于锅炉及工业窑炉上,对于缓解能源紧张状况、减轻企业经济负担将起到重要作用。然而,由于煤焦油的主要成分是芳香族及稠环芳香族化合物,碳元素含量较大,而氢元素含量很低,因此在燃烧时会大量生成不易燃烧完全的碳黑,造成周边环境的严重污染。

所以开发适用于煤焦油的燃烧技术对于煤焦油的成功应用至关重要。下面通过热天平实验,对煤焦油的热解及燃烧特性进行初步分析,并与重油进行比较,希望在此基础上能为煤焦油燃烧系统的设计提供参考和依据。

1 实验

1.1 实验样品分析

煤焦油是有刺激性气味的黑色或黑褐色的粘稠状液体,其成分与性质主要依赖于原料煤的性质及加

表 1 常用燃料重油与煤焦油的主要特性<sup>[3]</sup>

| 检测项目                       | 120 号   | 180 号   | 煤焦油      | 试验方法       |
|----------------------------|---------|---------|----------|------------|
| 恩氏粘度(100℃)                 |         |         | 2~3      | GB/T266    |
| 闪点(开口)℃                    | ≥80     | ≥80     | 96~105   | GB/T267    |
| 灰分%                        | ≤0.1    | ≤0.13   | ≤0.13    | GB/T508—85 |
| 水分%                        | ≤0.3    | ≤0.5    | ≤4       | GB/T260    |
| 硫含量%                       | ≤1      | ≤1      | ≤0.8     | GB/T387    |
| 密度 g/cm <sup>3</sup> (20℃) | 0.96    | 0.9     | 1.1 左右   | GB/T1884   |
| 发热量(kcal/kg)               | ≥10 400 | ≥10 400 | 9 000 左右 |            |

注:上表中重油分类是市场上常用的种类;作为比较,其中 120、180 号重油常用于锅炉和工业窑炉燃料;

上表中重油数据是按照燃料油的行业标准,煤焦油是按照资料上查得的大致范围。

工时的情况,所以不同种类煤焦油之间的性质可能有很大的差别。表 1 是中高温煤焦油的主要特性。

由表 1 来看,煤焦油的发热量比重油略低,水分含量较高,密度也较大,粘度、闪点、灰分和硫分与重油相似,其中灰分和硫分较低,对燃烧和环境有利。

在马弗炉中对重油和煤焦油进行脱挥发分实验,即在 920 °C 的温度下精确加热样品 7 min,每种样品重复实验两次,最后得到脱除水分和挥发分后的样品残碳含量为:重油 12.83%,煤焦油 17.64%。如果忽略灰分的影响,在此加热条件下,重油和煤焦油的残碳含量差别不是很大。考虑到挥发分的析出特性对燃烧很重要,下面将借助热天平对重油和煤焦油的热解和燃烧过程进行测量分析。

## 1.2 热天平实验

本实验采用的实验仪器是 WRT-2P 型微量热天平。它是一台具有微机数据处理系统,能够在设定好的温度程序下测量物质的质量随温度变化的热重实验分析仪器。由于微量热天平比常量热天平所用的试样量少,样品中温度梯度小,测定试样内部不致产生二次效应,所以失重曲线明显,分辨率高,适宜于重量大而失重小的试样。

本次实验样品用量约 7 mg,升温速率 30 °C/min。实验分成热解和燃烧两类实验,其中热解实验所用气氮为高纯氮气,燃烧实验氧气浓度设定为 10%,气体总流量为 160 ml/min。分别对重油和煤焦油进行实验,结果如图 1~图 4 所示,下面分别对这两个过程进行分析。

## 2 热解特性分析

由图 1 可以看出,重油的热解失重过程可分为 3 个温度区间:第一区间中,TG 曲线出现一段幅度很小的下降,DTG 曲线出现较小波动,试样有略微的失重。该温度区间一般是试样随着温度的升高失去残留水分的阶段。第二区间中,TG 曲线急剧下降,同时 DTG 曲线剧烈变化。该温度区间是试样热解失重过程的主要阶段,试样的绝大部分失重发生在该区间,失重率可高达 70%以上。第三区间中,TG 曲线和 DTG 曲线都开始趋于平缓。该温度区间是残留物的缓慢分解过程,并在最后生成固定碳和灰分。

由图 2 可以看出,煤焦油的热解失重过程可分为 2 个温度区间:第一区间,TG 曲线先缓慢下降再急剧

下降然后又缓慢下降,DTG 曲线始终剧烈变化,无法区分出水分蒸发和热解两段。与重油相比,煤焦油挥发分释放早,但最大失重率小,热解反应过程长。第二区间,TG 曲线和 DTG 曲线都开始趋于平缓,是残留物的缓慢分解过程。

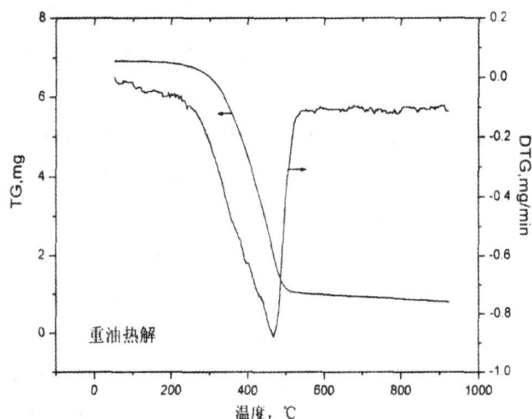


图 1 重油的热解失重曲线及微分曲线

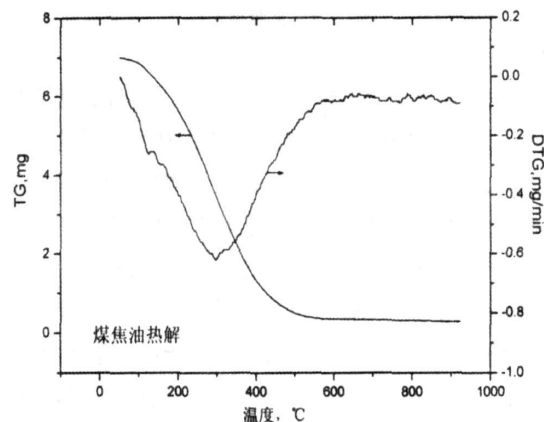


图 2 煤焦油的热解失重曲线及微分曲线

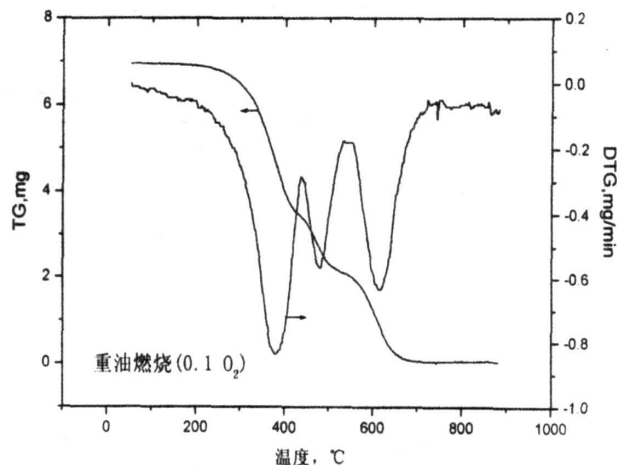


图 3 重油的燃烧失重曲线及微分曲线

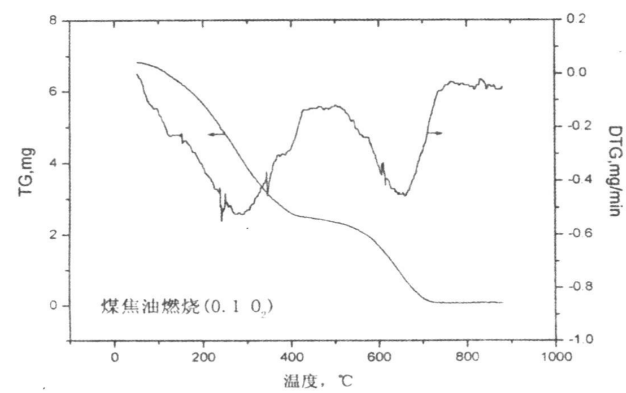


图 4 煤焦油的燃烧失重曲线及微分曲线

图 4 煤焦油的燃烧失重曲线及微分曲线

为克服燃料油的粘度,提高管输和泵送效率,习惯上采用提高油温的方法。从上述分析可知,对于重油和煤焦油,应采用不同的油温加热制度。如果加热温度过高和多次重复加热,由于导热管高热的界面会造成油中胶质沥青质的部分焦化,并使油中胶质沥青质的沉降和团状集聚的速度加快,形成底层油密度增高,上层油密度小的反差,在燃烧时易发生严重的结焦积碳,给燃烧设备造成损坏,加大维修工作的强度。由于煤焦油挥发分析出早,因此,对煤焦油的加热要特别注意,采用较低的加热温度,并减少加热次数。

为比较重油和煤焦油热解的难易程度,定义一个表征热解特性的指标——热解指数如下:

$$I=(d\alpha/dt)_{\max}/(T_{\max}\times\Delta T) \tag{1}$$

式中:  $\alpha$  为试样消耗份额;  $\alpha=(W_0-W)/(W_0-W_\infty)$ ;  $(d\alpha/dt)_{\max}$  为最大失重率;  $W_0$  为试样初始质量;  $W$  为试样在温度为  $T$  时的质量;  $W_\infty$  为试样最终质量。  $T_{\max}$  为对应于最大失重率的温度。  $\Delta T$  为  $\Delta T=T_2-T_1$ ;  $T_1$  为失重率达到 5% 时的温度;  $T_2$  为失重率急剧减小并趋于平缓时的温度。显然,  $I$  越大,越容易热解;  $T_1$  越小,挥发份开始释放的时间就越早;  $(d\alpha/dt)_{\max}$  越大,  $\Delta T$ 、 $T_{\max}$  越小,总体热解反应进行过程就越集中,物质就越容易被热解;反之,则不易热解。

根据实验结果图线,重油和煤焦油热解过程中的特征点及热解指数列于表 2。

由表 2 可见,煤焦油的热解指数要小于重油的热解指数,说明煤焦油更难热解,在燃烧时更难着火。

3 燃烧特性分析

在气氛氧浓度为 10% 的条件下,重油和煤焦油的燃烧实验结果如图 3 和图 4 所示。由图 3 可见,重油的燃烧过程分为 3 个区间:第一区间,TG 曲线失重平缓,是重油的干燥阶段。第二区间,重油着火,发生剧烈失重。由 DTG 曲线可知,该区间又可分为三个子阶段,分别对应不同物质的燃烧。与热解曲线相比,可以知道,前两个 DTG 峰是挥发分的燃烧峰,最后一个 DTG 峰对应的是残碳的燃烧。第三区间,TG 曲线不再失重,是燃烧结束阶段,剩下的物质是灰分。

由图 4 可见,煤焦油的燃烧过程分为 4 个区间:第一区间,对应 DTG 曲线的第一个峰,与热解曲线相比,是挥发分的燃烧阶段。第二区间,TG 曲线下降变缓,DTG 曲线变化较平。第三区间,对应 DTG 曲线的第二个峰,与热解曲线相比,是残碳的燃烧阶段。第四区间是燃烧结束阶段。

从重油和煤焦油的燃烧过程可以看出,重油不同阶段的燃烧紧凑,前面的燃烧对后续的燃烧影响显著,残碳易燃烧。煤焦油的两个燃烧阶段相隔较远,比重油,残碳燃烧滞后。原因在于,重油相比煤焦油,是一种组分更为复杂的燃料油,至少包括两类燃烧特性截然不同的组分。而正是这两类组分的挥发燃烧,特别是第二个峰所对应的组分对重油残碳的着火燃烧起了关键作用。煤焦油挥发分类别较单一,热解早,燃烧时间长,燃烧强度不高,对残碳的燃烧作用小,残碳难以着火、燃尽。

4 结论

1) 为了防止煤焦油中挥发份过早析出导致结焦积炭,进燃烧器之前的煤焦油的加热和伴热相对一般

表 2 重油和煤焦油热解过程中的特征点及热解指数

| 名称  | 加热速率(℃/min) | T <sub>1</sub> (℃) | T <sub>2</sub> (℃) | T <sub>max</sub> (℃) | (dα/dt) <sub>max</sub> (%/min) | I×10 <sup>-6</sup> (%/min·K <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|
| 重油  | 30          | 292                | 543                | 468                  | 0.881                          | 7.500                                      |
| 煤焦油 | 30          | 121                | 553                | 299                  | 0.620                          | 4.800                                      |

燃料重油均应注意采用较低的加热温度和加热强度。

2)煤焦油的燃烧特性和一般燃料重油特性不尽相同,煤焦油的热解和燃烧时挥发份与水份同时析出。因此,能否利用煤焦油简单替代重油在直接在重油燃烧器上燃烧还有待进一步研究。

3)对煤焦油燃烧技术仍需进一步的深入研究。在实际工程技术中,对燃料输送过程中燃烧器喷嘴的改进和配风是提高煤焦油燃烧效率的重要途径。

参考文献

[1] 于连海.煤基合成燃料油的研究与开发[M]. 杭州:浙江大学,2005.

[2] 何宏舟,吴德华.重油燃烧技术的现状与展望[J]. 锅炉技术,2004,35(3):40-44.

[3] 张同翔.合成燃料油的开发[M]. 杭州:浙江大学,2004.

(收稿日期:2007-11-15)

(上接第 74 页)

表 1 2 节点电压凹陷各程度幅值发生频次

| 2 节点发生的<br>电压凹陷幅值 K   | 需要计算<br>的线路     | 一年发生<br>的次数 |
|-----------------------|-----------------|-------------|
| $0.9 \leq K \leq 1$   | 1-2,2-3,2-4     | 9.4         |
| $0.8 \leq K \leq 0.9$ | 1-2,2-3,2-4,3-4 | 12.1        |
| $0.7 \leq K \leq 0.8$ | 4-5             | 2.3         |
| $0.6 \leq K \leq 0.7$ | 4-5             | 1.9         |
| $0.5 \leq K \leq 0.6$ | 4-5             | 1.1         |

参考文献

[1] Quaia, S.; Tosato, F. A method for analytical voltage sags prediction [J]. Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna Volume 4, Issue.

[2] 宋云亭,郭永基,张瑞华.电压骤降和瞬时供电中断概率的蒙特卡罗仿真[J]. 电力系统自动化,2003 27(18): 21-24.

[3] 张伯明,高景德.高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,1996.

[4] 李妍,段余平,邱军,熊信良,尹项根.环网配电网电压暂降分析的临界比距法[J]. 电网技术,2006,30(11):51-55.

[5] Bollen M H J. Fast assessment method for voltage sags in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(6):1480-1487.

[6] Olguin, G.; Bollen, M.H.J. Stochastic assessment of unbalanced voltage dips in large transmission systems [J]. Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna Volume 4, Issue , 23-26 June 2003 Page(s): 8 pp. Vol.4:23-26.

[7] E. E. Juarez; A. Hernandez. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 21, Issue 3, July 2006 :1493-1500.

[8] Lim, Y. S.; Strbac, G. Analytical approach to probabilistic prediction of voltage sags on transmission networks [J]. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings - Volume 149, Issue 1, Jan 2002 : 7-14.

[9] IEEE Std 1159-1995. IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality New York: IEEE Press, 1995.

作者简介:

曾智(1981~),男,硕士研究生,研究方向为电能质量与电力市场。

杨洪耕(1949~),男,博士,教授,博士生导师,长期从事电能质量监测和控制技术方面的教学和研究工作。

(收稿日期:2008-01-24)

5 结论

上面针对实际情况中较易发生的三相对称短路故障所造成的电压凹陷,提出了对线路上故障概率密度函数积分的方法,从而对一定时间内电压凹陷的幅值和发生的频次进行预测,以及进一步分析电压凹陷在更大范围电网中传递。再由电压凹陷矩阵提供的信息,减小需要计算的线路数。电压凹陷矩阵直接可以由网络节点阻抗矩阵得到。所提方法与前文所提临界距离法<sup>[4][5]</sup>相比的优势在于本方法适应于实际中更常见的环形网络。而与同样针对环网的故障点法<sup>[8]</sup>相比,本方法优点在于完全不需要对故障点发生位置进行预设。与蒙特卡罗仿真法<sup>[2]</sup>相比,本方法优点在于大大简化了计算过程和步骤。

所提方法需要进一步研究和探讨的问题包括:仅考虑了网络系统发生三相对称短路故障,而没有考虑实际中更常见的各种不对称短路故障的情况。综合考虑各种对称与不对称短路故障情况所造成的电压凹陷以及根据此方法对电压凹陷的特征量的预测值进一步对电压凹陷造成的经济损失性评估是值得更深入探讨的问题。

# 中国电机工程学会第十届青年学术会议征文要求

各有关单位、青年科技人员:

中国电机工程学会第十届青年学术会议将于2008年9月中旬在吉林省吉林市召开,会议由中国电机工程学会主办,东北电力大学承办。

中国电机工程学会第十届青年学术会议以“和谐电力与可持续发展”为主题,广泛邀请电力工程各个专业领域的青年科技人员参加,交流青年科技人员的最新科研成果,发现和培养优秀青年科技人才。

## 一、征文范围

### 1、电厂动力工程

- 洁净煤发电技术;
- 汽轮机和燃气发电机;
- 热电联产;
- 热力设备安全运行技术;
- 状态检测与故障诊断技术;
- 大机组寿命评估与延寿技术;
- 机组控制系统的稳定性问题研究;
- 水轮发电机制造和运行管理技术;
- 抽水蓄能技术;
- 大型水电施工技术;
- 核电安全运行技术;
- 电站空冷技术;
- 电站节水、节油新技术;等等。

### 2、电网技术

- 电力系统规划;
- 电力系统可靠性;
- 电力系统调度自动化;
- 电力系统运行优化;
- 电力系统分析与控制;
- 智能保护及变电站综合自动化;
- 电力战略防御系统;
- 输电技术;
- 电力电子及其应用技术;
- 高压及电磁兼容;
- 电力设备在线检测技术;
- 线路与电站防污新技术;
- 电力市场;
- 农村供用电技术;等等。

### 3、信息及自动化技术

- 数字化电力系统;
- 电力系统MIS网络技术;
- 电力系统通信新技术;
- 计算机监控系统;
- 计算机在电力系统中的应用;
- 电力企业信息管理系统安全技术;

- 计算机及信号处理在检测与诊断技术中的用;
- 数据仓库与数据挖掘技术等。

### 4、新能源发电与节能技术

- 风力发电技术;
- 太阳能发电技术;
- 核能发电技术;
- 地热利用新技术;
- 煤的利用和替代能源;
- 氢能;
- 垃圾发电技术;
- 电厂节能技术
- 蓄电池新技术;
- 分布式能源系统理论及关键技术;等等。

### 5、电力企业经营管理

- 电力需求侧管理;
- 电网改造技术经济评价;
- 电力企业风险管理;
- 水河流域梯级开发项目管理、融资管理;
- 梯级水电站联合运营优化;
- 电力企业人力资源管理;
- 电力企业发展战略与企业文化培育;
- 电力企业绩效评估;
- 电网经营企业对标管理;
- 供电企业营销管理;
- 电力需求预测与分析。
- 电价理论研究;等等。

### 6、电力与环境

- 电厂脱硫、脱氮技术;
- 污水处理技术;
- 大气污染控制技术;
- 除尘技术;
- 烟气分析技术;
- 除灰技术;
- 粉煤灰综合利用。

本会议接受不限于以上议题的,与会议主题相关的理论与技术及其应用论文。

## 二、论文要求

1、论文字数(包括图、表)不超过5000字,全文用A4纸排版,版芯215×145mm,单行编排,Word格式。全文内容应该包括:标题、作者(作者姓名、单位、通信地址)、摘要(中、英文)、关键词、正文(包含引言、结论)和参考文献。

2、论文题目用三号黑体,控制在25中文字以内。

3、作者用五号宋体,按在论文的地位编排,不同单位作者请用上角标注。

4、摘要用小五号宋体,中文不超过250字,英文不超过300单词。

5、关键词用小五号宋体,不超过5个单词,中英文对照。

6、正文(含:引言、结论)的标题用四号楷体、各分节标题用小四号宋体,正文的具体内容均用五号宋体。正文按1, 2, 3...编排顺序,引言编为1,以后各节内容顺序往后编排,各分节按1.1, 1.2, 1.3...的顺序进行编排,各标题前后各空一行。论文中的公式、插图、表格序号不分节,一律用阿拉伯数字顺序编排。

7、参考文献用小五号宋体。参考文献按作者、论文题目、刊名、卷号、期号、出版年顺序编排;参考论著按作者、书名、出版社、出版顺序编排。

8、文章最后一页请提供作者简介,包括出生年月、性别、职称、学位、从事的主要工作或研究方向。联系方式(通信地址、邮编、电话或手机号码、传真、电子邮件地址等)

三、提交的会议论文应未正式发表,第一作者为年龄在40周岁以下的青年科技工作者。投稿论文将经过严格评审,一经录用,会议组委会将正式通知作者,并邀请作者出席大会。会议将出版论文光盘,评选优秀论文。

四、征文截止日期:2008年6月30日

五、论文提交方式:在线提交(网址: <http://www.nedu.edu.cn>)或通过电子邮件发送到: [cj@mail.nedu.edu.cn](mailto:cj@mail.nedu.edu.cn)

联系人:曹娟、马桂兰、周云龙

电话:0432-4806324、4806655

传真:0432-4885335

E-Mail: [cj@mail.nedu.edu.cn](mailto:cj@mail.nedu.edu.cn)

网址: <http://www.nedu.edu.cn>

注:在征文报送中国电机工程学会的同时抄送一份给四川省电机工程学会。

学会邮箱: [cn\\_meimei@126.com](mailto:cn_meimei@126.com)