

汽轮机中不同扰动源对共振机理低频振荡的影响

冯 双¹, 孔珍宝², 徐 钢², 高爱民²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要: 汽轮机输出的功率扰动可能引发共振机理的低频振荡, 威胁电力系统的安全稳定运行。文中比较了扰动位于汽轮机本身机械部分和位于调速器部分对共振机理低频振荡的影响。首先介绍了共振机理的基本原理, 在此基础上推导证明了汽轮机对其调速器内扰动信号具有较强地抑制作用。然后在单机无穷大系统中分别对扰动位于汽轮机本身机械部分和位于调速器部分时对低频振荡的影响进行仿真, 仿真结果表明相同幅值和频率的扰动信号分别位于上述2种位置时, 后者比前者产生更大的低频振荡幅值, 验证了理论分析的有效性, 为实际应用中共振机理低频振荡的抑制措施提供了参考。

关键词: 汽轮机; 低频振荡; 调速器; 共振机理

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2013)06-0001-04

随着我国电力系统的规模越来越大, 电网互联在带来错峰、水火电互补、极大提高发电和输电的经济性和可靠性的同时, 也使得电力系统的振荡失稳问题变得越来越严重。对于大规模互联系统, 最有可能发生的稳定性问题之一是低频振荡问题^[1-3]。在这方面, 世界各国都有过惨痛教训^[4,5], 因此对低频振荡机理进行研究并采取相应的抑制措施具有非常重要的意义。负阻尼机理是目前理论证明并被广泛接受的低频振荡机理^[6], 即发电机组的快速高倍数励磁调节器在系统中产生了负阻尼, 使得系统的总阻尼很小甚至为负, 当系统受到扰动时, 容易引起功率的增幅振荡。基于负阻尼机理设计的电力系统稳定器 PSS, 可以很好地抑制系统低频振荡。然而现实中电力系统的有些低频振荡现象无法通过负阻尼机理解释, 按照负阻尼机理设计并安装了 PSS, 振荡依然发生^[7]。针对这些现象, 国内外学者从振荡机理上展开研究, 共振机理是研究的热点之一。

对于共振机理, 文献[8]最早研究电机自振角速度与外加机械转矩角速度相接近所造成的振荡。文献[9]从频率角度分析了强制功率振荡在单机和多机系统中的振荡情况。文献[10]认为汽轮机压力脉动可能引起电力系统共振机理低频振荡。文献[11]研究了汽轮机调速系统摆动对电力系统低频振荡的影响。这些已有研究成果表明, 当汽轮机及其调速系统中存在机械功率扰动, 若扰动量中包含频率与电力系统自然振荡频率相同的正弦分量, 电力系统就会发生低频振荡。这说明可从汽轮机及其调速系统的角度抑制电力系统共振机理低频振荡^[12]。为了找出最易引起低频振荡的机械功率扰动源, 以便有针对性的采取抑制措施, 有必要对比研究汽轮机的机械功率扰动及其调速

系统的机械功率扰动对电力系统低频振荡的影响。

本文首先介绍了共振机理的低频振荡原理, 随后推导出汽轮机数学模型的传递函数, 从理论上比较了在共振频率点汽轮机对不同扰动的作用, 证明了汽轮机对位于调速器内的扰动信号有较强抑制作用。然后在 Matlab 中建立包含汽轮机及调速器的单机无穷大系统仿真模型, 通过仿真验证不同机械扰动源产生的功率扰动对共振机理的低频振荡的影响。仿真结果与理论分析一致, 可以对进一步的研究提供理论支持。

1 共振机理的基本原理

典型的单机无穷大系统的结构如图1所示。

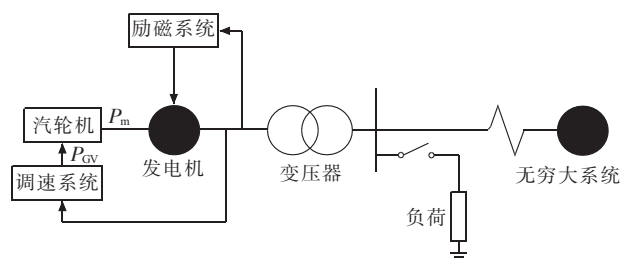


图1 典型的单机无穷大系统

发电机采用二阶经典模型, 转子运动方程为:

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - 1) \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 1 \quad (2)$$

在工作点处线性化, 并改写为只含有发电机转子角 $\Delta\delta$ 变量的二阶系统:

$$M\Delta\ddot{\delta} + D\Delta\dot{\delta} + K\Delta\delta = \Delta P_m \quad (3)$$

$$\Delta\ddot{\delta} + 2\beta\Delta\dot{\delta} + \omega_0^2\Delta\delta = \Delta P'_m \quad (4)$$

式(3,4)中: $\Delta P'_m = \frac{\Delta P_m}{M}$; $K = \frac{E'U}{X_\Sigma} \cos \delta_0$ 为同步力矩系数;

$\beta = \frac{D}{2M}$ 为阻尼系数; $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}$ 为自然振荡频率。

研究负阻尼机理时忽略机械功率 P_m 的变化, 研究共振机理时, 就要考虑 P_m 的变化, 假设机械功率 $\Delta P_m \neq 0$, 其形式为:

$$\Delta P_m = r \cos \omega t \quad (5)$$

则式(4)变为非齐次常系数二次微分方程:

$$\Delta \ddot{\delta} + 2\beta \Delta \dot{\delta} + \omega_0^2 \Delta \delta = h \cos \omega t \quad (6)$$

式(6)中: $h = \frac{r}{M}$ 。

该微分方程的解为通解和特解之和, 可写成 $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ 。当 $\beta < \omega_0$ 时, 它的解为:

$$x_1(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} t + \varphi_0) \quad (7)$$

$$x_2(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

通解 $x_1(t)$ 是一个减幅振荡, 经过一段时间后, 这部分振荡就衰减到可以忽略不计的程度。余下的就只有特解 $x_2(t)$, 它表现为振幅不变的振荡, 这就是共振达到稳定状态时的振荡。经计算, 可得出特解 $x_2(t)$ 的 A 和 φ 的值:

$$A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \quad (9)$$

$$\varphi = \arctan \frac{-2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (10)$$

由此可见, 振幅与 ΔP_m 的 ω 有关, 当 ω 为某一值时, 振幅达到最大值。用求极值的方法可得到使振幅达到极大值的 ω 为:

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad (11)$$

相应的最大振幅为:

$$A_r = \frac{h}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (12)$$

在弱阻尼 $\beta \ll \omega_0$ 的情况下, 式(11, 12)中近似为

$$\omega_r = \omega_0, A_r = \frac{h}{2\beta\omega_0}。$$

由此可以看出, 系统原动机功率若存在一种扰动, 当这种扰动的频率与系统的自然频率一致或接近时, 就可能引起系统发生共振的低频振荡现象。

根据上面的推理可知, 共振机理低频振荡的频率, 即系统的自然振荡频率:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (13)$$

共振振荡的最大幅值:

$$A_{m_{\max}} = \frac{r}{|D| \sqrt{\frac{K}{M}}} \quad (14)$$

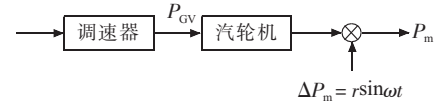
共振振荡的阻尼比为:

$$\xi = \frac{D}{2M\omega_0} \quad (15)$$

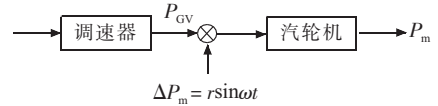
由此可以看出, 决定振荡的频率、幅值和阻尼比等振荡特性的相关系统参数主要包括同步力矩系数 K 、阻尼转矩系数 D 、机组惯性时间常数 M 和扰动输入量的幅值 r 。

2 汽轮机对不同扰动作用的理论分析

上述分析表明, 汽轮机输出的机械功率若存在频率与电力系统自然振荡频率相同的正弦分量, 电力系统就容易发生增幅的低频振荡。汽轮机输出的机械功率中扰动信号的源头可能位于汽轮机本身的机械部分, 也可能位于调速器部分。有必要比较这 2 种扰动源对电力系统低频振荡的影响, 以便有针对性的采取抑制措施。本文在汽轮机的输出功率中直接添加功率扰动信号 $\Delta P_m = r \sin \omega t$, 表示扰动源位于汽轮机本身的机械部分, 如图 2(a) 所示; 在调速器的输出中添加功率扰动信号 $\Delta P_{GV} = r \sin \omega t$, 表示扰动源位于调速器中, 如图 2(b) 所示。



(a) 扰动源位于汽轮机中



(b) 扰动源位于调速器中

图 2 不同位置的机械功率扰动源

由于调速器的扰动信号要经过汽轮机转化为输出机械功率扰动, 因此, 为比较 ΔP_m 和 ΔP_{GV} 的影响, 只需要考虑汽轮机对调速器扰动信号的作用, 即只需要将图 2(b) 经过等效变换成图 2(a) 的形式, 如图 3 所示。 ΔP_{GV} 经过汽轮机转化为幅值为 r_1 、频率为 ω_1 的信号 ΔP_{m1} , 比较 ΔP_{GV} 和 ΔP_{m1} 即可。



图 3 图 2(b) 的等效图

串联组合的单再热器汽轮机的简单结构如图 4 所示^[13, 14], 由线性环节组成, 不改变信号的频率, 因此 $\omega_1 = \omega$ 。其中各参数的典型值如表 1 所示。

表 1 中, T_{CH} 为蒸汽容积时间常数; T_{RH} 为再热器时间常数; T_{CO} 为交叉管时间常数; F_{HP} 为高压缸功率比例; F_{IP} 为中压缸功率比例; F_{LP} 为低压缸功率比例。则汽

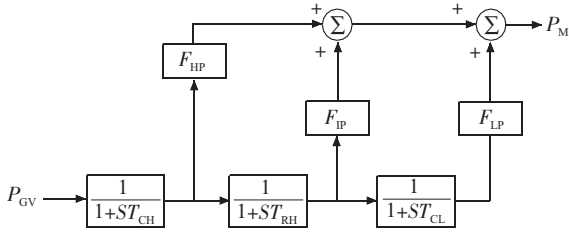


图4 串联组合的单再热器汽轮机简化模型

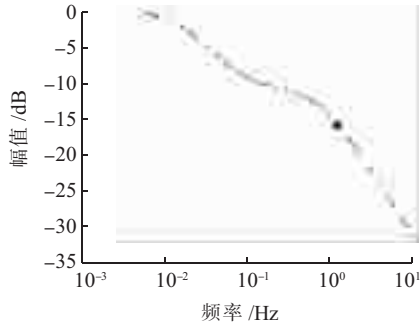
表1 汽轮机模型的典型参数值

T_{CH}/s	T_{RH}/s	T_{CO}/s	F_{HP}	F_{IP}	F_{LP}
0.2	7	0.4	0.3	0.4	0.3

轮机的输出功率 P_m 与输入量 P_{GV} 的关系式为:

$$\frac{P_m}{P_{GV}} = \frac{F_{HP}}{1+sT_{CH}} + \frac{F_{IP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})} + \frac{F_{LP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})(1+sT_{CO})} \quad (16)$$

代入各参数的典型值,做出 P_{GV} 到 P_m 的传递函数的伯德图,如图5所示。

图5 P_{GV} 到 P_m 的传递函数的伯德图

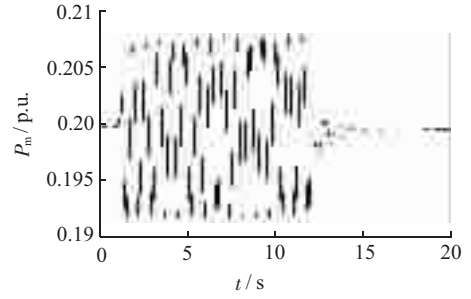
由图5可知,扰动信号的频率位于低频振荡频率区间(0.2~2.5 Hz)^[14]时,伯德图纵坐标小于-10 dB,在频率为1.34 Hz时,信号衰减了16.34 dB,即经过汽轮机后,扰动信号幅值 r_1 约为原幅值 r 的1/6。

由上可知,位于调速器内的机械功率扰动信号经过汽轮机后,其幅值比原值小得多,即汽轮机本身的特性使其对调速器内的扰动信号具有较强的抑制作用。因此汽轮机本身的机械功率扰动对电力系统共振机理低频振荡的影响更大,在研究抑制措施时,应着重考虑汽轮机本身的扰动。

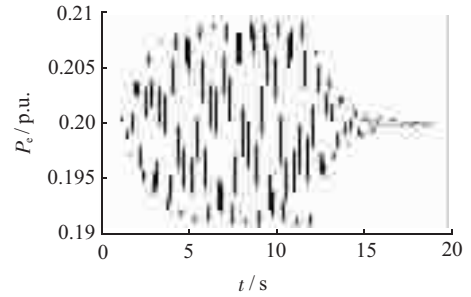
3 仿真分析

在 Matlab 中建立上述单机无穷大系统仿真模型,包含调速器、汽轮机、励磁控制器,系统参数见文献[14]。首先在较轻负载情况下进行突加负载实验,可以确定系统的自然振荡频率。测得自然振荡频率为1.34 Hz,角频率为8.42 rad/s。在调速器的输出信号中添加扰动信号 $\Delta P_{GV} = 0.05\sin 8.42t$,其中信号幅值为标么值,

在1 s时投入扰动,在12 s时切出扰动。汽轮机的输出信号 P_m 、发电机的输出有功功率 P_e 波形如图7所示。



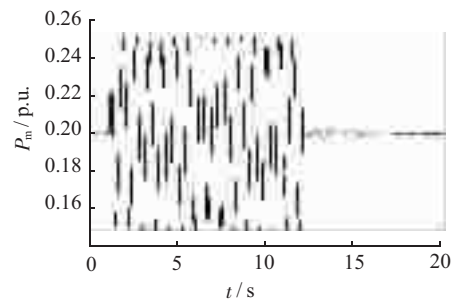
(a) 汽轮机输出信号



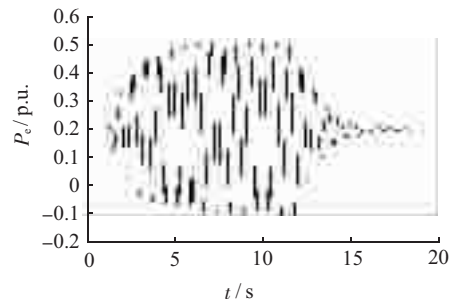
(b) 发电机输出有功功率

图7 扰动信号位于调速器时系统仿真波形

由图7(a)可知,调速器中的扰动信号经过汽轮机后,汽轮机输出信号振荡幅值为0.008 p.u.,约为原扰动幅值的1/6,该扰动信号引发了系统共振机理的低频振荡,发电机的输出有功功率振荡幅值为0.05 p.u.。将同样的扰动信号直接添加到汽轮机的输出信号中,模仿汽轮机本身机械部分产生的功率扰动,即 $\Delta P_m = \Delta P_{GV} = 0.05\sin 8.42t$,进行相同的扰动投切实验,对应的仿真结果如图8所示。



(a) 汽轮机输出信号



(b) 发电机输出有功功率

图8 扰动信号位于汽轮机本身机械部分时系统仿真波形

由图 8(b)可知,汽轮机本身机械部分产生的扰动信号经过共振后,发电机中的振荡幅值达到 0.31 p.u.。

根据图 7 和图 8 的比较可知,扰动信号位于调速器的时候,汽轮机对其具有较强抑制作用,产生的低频振荡幅值较小,而扰动信号位于汽轮机本身机械部分的时候,产生的低频振荡幅值较大,这与第 2 节的理论分析一致。

4 结束语

汽轮机及其调速器中的扰动信号容易在电力系统中产生共振机理低频振荡,有必要有针对性地采取抑制措施。汽轮机的输入至输出的幅频特性,表明其对调速器中的低频扰动信号具有较强地抑制作用,相同幅值和频率的扰动信号分别位于调速器中和汽轮机中的时候,后者比前者产生更大的低频振荡幅值。因此从汽轮机及其调速器的角度考虑低频振荡抑制措施时,应着重关注汽轮机本身的机械功率扰动。

参考文献:

- [1] 王 青, 闵 勇, 张毅威. 低频振荡的功率振荡增量分布计算新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 1-4.
- [2] 叶 慧, 吴 熙, 桂国亮. 并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制抑制低频振荡研究[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(4): 30-33.
- [3] SANCHEZ-GASCA J J, CHOW J J. Performance Comparison of Three Identification Methods for the Analysis of Electromechanical Oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 995-1002.
- [4] 李 丹, 苏为民, 张 晶, 等. “9.1”内蒙古西部电网振荡的仿真研究[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 41-47.
- [5] 王梅义, 吴亮昌, 蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 10-25.
- [6] 刘宪林, 柳 焯, 姜和恭. 考虑阻尼绕组作用的单机无穷大系统线性化模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 9-11.
- [7] 中国电力科学研究院. 安保线功率振荡问题研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 1999.
- [8] 高景德, 张麟征. 电机过渡过程的基本理论及分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 541-571.
- [9] VOURNAS C D, KRASSAS N, PAPADIAS B C. Analysis of Forced Oscillations in a Multimachine Power System [C]//IEEE Conference Publication, British, 1991: 443-448.
- [10] 韩志勇, 贺仁睦, 徐衍会. 由汽轮机压力脉动引发的电力系统共振机理低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 14-18.
- [11] 李传彪. 汽轮机调速系统摆动及其对低频振荡影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- [12] 文贤旭, 钟晶亮, 钱 进. 电网低频振荡时汽轮机控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26): 107-110.
- [13] 徐高山, 龚雪丽. 汽轮机及其调节系统模型参数测试[J]. 热力发电, 2009, 38(11): 39-42, 52.
- [14] 姚永灵, 徐 斌. 江苏省内在役 1000 MW 汽轮机的特点与运行问题[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(3): 69-71.

作者简介:

- 冯 双(1990), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 从事电力系统的运行与控制研究工作;
- 孔珍宝(1962), 男, 江苏南京人, 工程师, 从事电网及发电厂技术管理工作;
- 徐 钢(1967), 男, 江苏仪征人, 硕士, 高级工程师, 从事继电保护与励磁试验及研究工作;
- 高爱民(1969), 男, 江苏宝应人, 高级工程师, 从事发电厂自动控制技术试验及研究工作。

Influence of Different Mechanical Disturbances on Low Frequency Oscillation of Resonance Mechanism

FENG Shuang¹, KONG Zhenbao², XU Gang², GAO Aimin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Frontier Electric Technologies Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Output power disturbance of steam turbine could lead to low frequency oscillation of resonance mechanism, threatening the safe and steady operation of the power system. This paper compares the influences of the disturbance of mechanical part of steam turbine with disturbance of governor. The fundamental principles of resonance mechanism are presented in this paper firstly. Then, it will be proved that steam turbine has strong restrain effect on disturbance of governor through mathematical derivation. Influences of disturbance of mechanical part of steam turbine and disturbance of governor on low frequency oscillation are simulated in a single-machine and infinite bus system separately. The simulation results illustrate that disturbance of mechanical part of steam turbine leads to larger amplitude than disturbance of governor when the disturbances are of same amplitude and frequency. The simulation results are in accordance with theoretical analysis, which can provide reference for suppressing low frequency oscillation of resonance mechanism.

Key words: low frequency oscillation; steam turbine; governor; resonance mechanism

面向多级调度管理的云搜索体系架构研究

孙大雁¹, 丁 杰², 彭 林², 施建华³

(1.江苏省电力公司,江苏 南京 210024;2.中国电力科学研究院信息通信研究所,江苏 南京 211106;

3.南京南瑞集团公司信息与通信技术分公司,江苏 南京 211106)

摘 要:提出了一种面向大电网多级调度管理一体化的云计算搜索引擎体系架构设计方法。该方法引入云计算理念,在大电网多级调度管理一体化 IT 基础设施资源充分整合的基础上,通过调度数据网络将分布于各调度中心的业务数据资源进行有效组织、布局和管理,按照“需则可用”的总体思路,为调度管理等业务应用提供高效的数据共享、交互、检索等各类服务,实现“按需共享”目标,并支持数据的定制化访问和可视化展现。文中着重分析了大电网多级调度管理一体化云搜索引擎的体系架构、技术体系和应用整体设计,为基于成熟、稳定、可靠的开源搜索引擎平台研发系统原型提供理论依据。

关键词:智能电网;调度管理;调控一体化;云计算;搜索引擎

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2013)06-0005-03

随着特高压交直流电网建设、区域电网互联以及风电等间歇性新能源的接入,电网运行特性愈加复杂,迫切需要对传统的管理模式进行创新,实现管理模式由粗放型向集约化转变,促进各级调度的一体化运行,建立调控一体化技术体系,为国家电网公司的“大运行”体系提供技术支撑。为有效提高生产管理的集约化支撑能力、大电网的协调控制能力以及多级调控间的协同处理能力,需进一步解决电网调控一体化信息检索和共享方式。然而调度的同质化管理要求对数据和信息获取提出全新要求。

近年来互联网上快速发展的搜索引擎技术提供了快速信息检索的有效方法,但这些搜索引擎主要针对网页信息,算法具有一定的局限性^[1-3],无法适应国网调度与分控中心一体化运行、与省网调度同质化管理的业务要求,难以支撑调度管理的纵向贯通体系。针对上述问题,本文结合电力行业智能信息处理技术的应用实践^[4,5],在现有智能化搜索的研究进展基础上^[6,7],以现有调度管理信息检索需求为导向,提出基于云计算支撑技术的搜索引擎体系结构及应用部署模式。该搜索框架关注于高电力信息搜索的查准率、查全率和查找速度,充分利用云计算技术优点^[8,9],实现节点分布式管理、资源动态伸缩、服务高可用等功能,为用户提供个性化、智能化的电力资源搜索服务,支撑多级调度机构数据的纵向贯通,为研发性能良好的电力资源搜索引擎系统提供依据。

1 搜索引擎问题选型

随着 D5000 的建设,调度信息的规范性越来越高,使调度领域的信息搜索逐渐具备了技术可行性。调度管理应用代表了调度领域对信息搜索的主要需

求,可以基于 OMS 对调度信息搜索做典型分析。调度管理对信息搜索的需求,主要体现在扩大信息搜索范围、多级搜索集成等方面:一是扩大信息搜索范围,目前在 OMS 中已实现了基于文字索引的关键词搜索,支持对调度管理(3 区)范围内中的各类文档资料索引提取及搜索功能。云计算环境下的搜索引擎需要扩大搜索范围,横向覆盖 1 区、2 区、3 区的关系库和文件,实现调度中心内部的全面搜索;二是多级搜索集成,需要在关键词搜索的基础上,研究跨调度中心的搜索引擎纵向集成,从而保证搜索的灵活性和全面性。以上需求,在 D5000 调度管理类应用的建设中已有了不同程度的实现,但随着应用功能的深化,目前基于文件索引的信息搜索已不能完全满足需求,迫切需要扩大搜索覆盖面,实现纵向多级调度之间的分布式搜索。

2 云搜索体系架构设计

在智能电网调度技术支持系统的已有成果基础上,进行了探索性的研究和分析,结合云计算的理念并充分借鉴了电力行业研究成果^[10,11],从 IT 角度构建了调度管理层面的云搜索体系架构,对部署形式及其所提供的按需服务进行了探索性的研究和分析,形成了资源和管理适度集中的部署方案,充分发挥云计算作为调度生产管理重要技术支撑手段的作用。

2.1 部署架构

在云搜索整体架构中,搜索引擎分两级部署(国网省一级,地县一级),两级搜索通过远程服务调用进行数据交换。调度机构使用云桌面系统,厂站也通过云桌面实现接入,形成“两级部署,多级应用”的部署架构。如图 1 所示。

在云搜索引擎的部署模式中,全部功能都集中部署在调度中心,通过和数据中心相类似的方式为用户

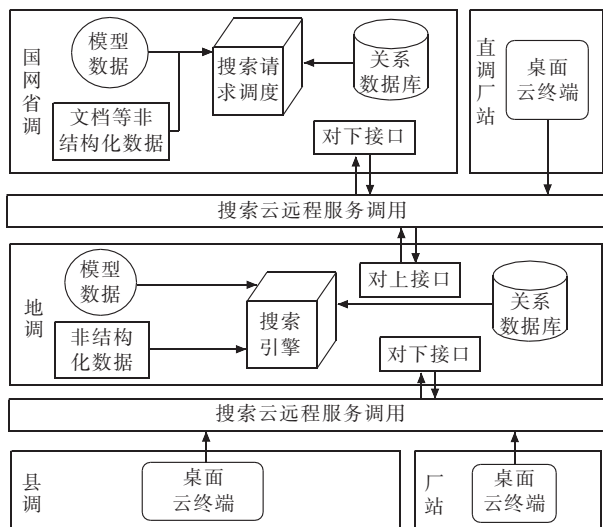


图1 云搜索引擎部署架构

提供服务,改进了传统的数据中心之间的数据交换方式,上下级搜索引擎之间通过远程服务调用实现了更快速灵活的集成,而且只传递搜索结果,并通过排序减少数据流量,实现广域规模下的分布式部署架构。因此调度中心的搜索节点部署基本相同,二级搜索引擎具有向上、向下的服务接口,一级搜索引擎仅有向下的服务接口。各级调度机构和厂站节点在部署上完全相同,通过桌面终端,获得搜索服务并应用。

2.2 服务架构

为满足调度领域的搜索需求,云搜索引擎需要提供基于结构化数据、非结构化以及下级搜索引擎等数据源,覆盖调度领域各类数据的信息搜索服务。对于搜索服务的使用者,由于搜索引擎的分布式部署架构屏蔽了上下级搜索引擎之间的关系,而且国调、省调所部署的搜索引擎在功能上是类似的,因此讨论搜索服务功能只用基于单搜索节点。搜索服务可分为两大类:人机服务和公共服务。人机服务是直接向用户提供的搜索服务,可集成到云搜索引擎的整体门户中;公共服务是向各级搜索模块提供的公共服务,可通过标准的SOA服务接口被其他模块调用。两大类服务的最终目标都是为了支持应用模块,如图2所示。

2.3 技术架构

以云搜索引擎的服务架构和调度管理应用需求为依据,从搜索技术和云计算技术两个方面进行技术选型,构建云计算环境下搜索引擎的服务平台,支持上层业务应用。整体技术架构如图3所示。

电力搜索层通过将 IEC 61970、D5000 等模型中的数据结构固化到搜索引擎框架,提供面向调度管理(早会报、设备查询、日志查询等)的电力搜索服务。在检索结果反馈上,搜索云基于 B/S 架构,采用富客户端技术进行信息展现。在具体的信息展现上,主要关注于两方面目标:一是丰富的用户界面;二是智能的数据模型。

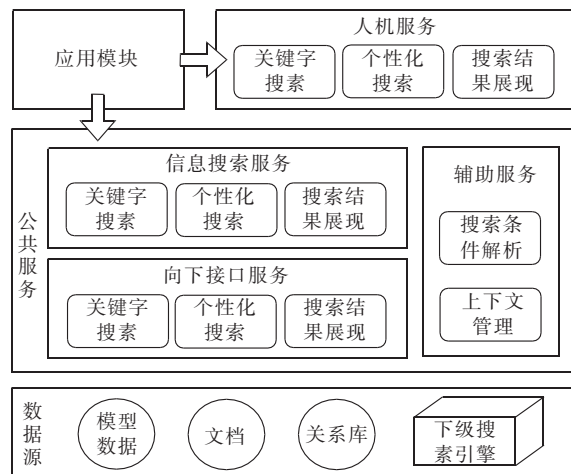


图2 搜索引擎服务架构

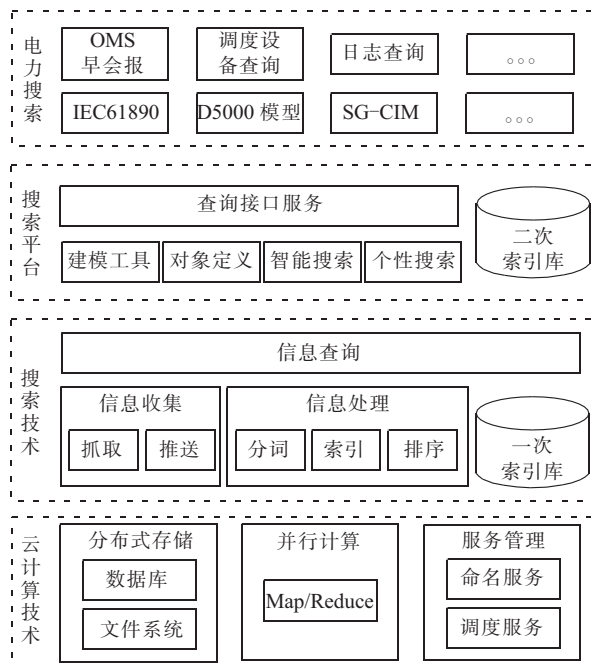


图3 搜索引擎技术架构

对此通过富客户端技术集成桌面应用的交互性和传统网络应用的部署灵活性,进行信息展现建模和成本分析,基于 Web 服务驱动实现面向服务的展现层模型。

搜索平台层提供搜索服务的操作接口,包括信息发布与提交、信息索引和信息查询等。信息的发布与提交采用了主动与被动相结合的方式:一方面通过抓取器轮询文件目录和数据库,在发现数据变更的情况下对变更数据进行处理;另一方面针对业务系统提交的信息进行主动索引建立。信息的索引与检索是沿用开源搜索引擎框架,主要在开源框架的基础上增加中文分词和专属电力行业的索引字段。搜索云底层技术关注于各类数据的索引和存储,技术选型上主要融合了搜索技术和云计算技术,主要关注于分布式存储的高可用性和可扩展性,借鉴 HDFS 的技术架构和实现机理进行文件备份和元数据管理,并在云存储的基础上构建分布式文件系统来进行索引文件的高效存储。

3 搜索引擎应用整体流程

搜索引擎的整体应用流程主要包含4个阶段:索引抽取、索引存储、数据查询、用户访问。信息搜索请求原则上都必须经过4个阶段流转。由于索引抽取是开销最大的阶段,在索引存储阶段引入缓存机制,使绝大多数搜索请求只用经历后3个阶段就可以快速得到结果。基于应用流程,分析构成搜索应用的模块视图,建立对应的应用架构,形成包含4个步骤的主流程、6个主要模块的应用总体设计,如图4所示。

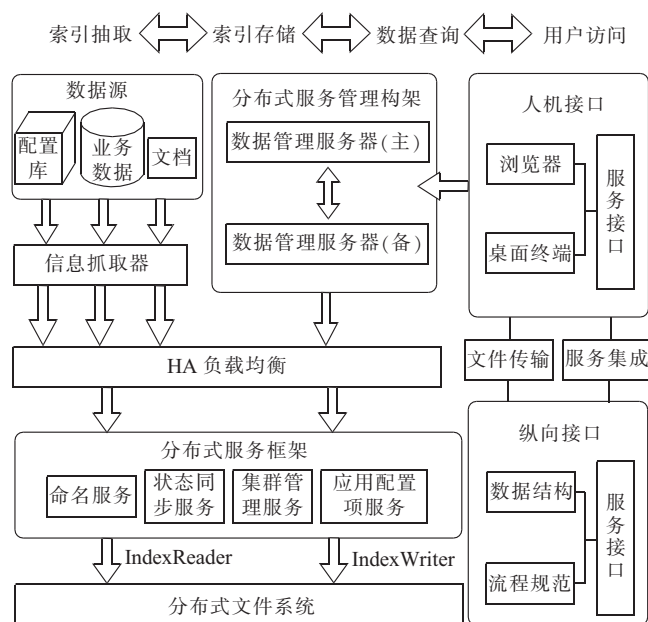


图4 搜索引擎应用流程

4 结束语

本文针对调度管理应用对信息搜索的主要需求,探讨了面向多级调度管理的云搜索引擎体系架构。通过借鉴云计算、信息检索等技术的特征,研究了面向调度机构的搜索部署架构、服务架构、应用架构,分

析调度信息搜索的应用模式,在扩大信息搜索范围、多级搜索集成、高性能搜索、个性化搜索等方面进行可行性分析和应用设想,更好地支撑调度业务一体化运作。

参考文献:

- [1] 张卫丰,徐宝文. Web 搜索引擎框架研究[J]. 计算机研究与发展, 2005, 11(3): 376-378.
- [2] 刘畅. 综合搜索引擎与垂直搜索引擎的比较研究[J]. 情报科学, 2007(1): 97-102.
- [3] 印鉴,陈忆群,张钢. 搜索引擎技术研究与发展[J]. 计算机工程, 2005, 31(14): 54-56.
- [4] 崔晓祥,李娟. 基于支持向量机回归的电力系统负荷建模[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(3): 37-42.
- [5] 尹飞,李新家,祝永晋,等. 单亲遗传算法在电力计量器具配送问题中的研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(1): 43-46.
- [6] 赵海波,黄勇理,陈胜,等. 基于电厂运行数据库的专业智能搜索引擎[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(8): 25-28.
- [7] 袁林. 基于搜索引擎的电力调度知识管理系统[J]. 电力信息化, 2008, 06(7): 115-118.
- [8] WEISS A. Computing in the Cloud[J]. ACM Networker, 2007, 11(4): 18-25.
- [9] 陈康,郑纬民. 云计算:系统实例与研究现状[J]. 软件学报, 2009, 20(5): 1337-1348.
- [10] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 云计算:构建未来电力系统的核心计算平台[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 1-8.
- [11] 王德文,宋亚奇,朱永利. 基于云计算的智能电网信息平台[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 7-12.

作者简介:

孙大雁 (1970), 男, 江苏无锡人, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行及管理;
丁杰 (1983), 男, 江苏盐城人, 工程师, 研究方向为电力系统自动化、智能系统、模式识别;
彭林 (1976), 男, 四川巴县人, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化;
施建华 (1977), 男, 安徽宁国人, 工程师, 研究方向为电力系统自动化。

Research on Search Engine Architecture for Multi-Level Scheduling Management Based on Cloud Computing

SUN Dayan¹, DING Jie², PENG Lin², SHI Jianhua³

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. Information & Communication Department, China Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China;

3. Information & Communication Department, NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper presents a method to design the architecture of cloud computing based search engine for the large-scale power network's unified multi-level scheduling management. With the integration of IT infrastructure resources of the large-scale power network's unified multi-level scheduling management system, the data resources from various dispatching centers are effectively organized, dispatched and managed. This makes it possible to provide services of data sharing, interaction and retrieval for power network scheduling and management. Also, it is possible to custom data visiting and to visualize the data. The analysis of integrated cloud search engine architecture for the multi-level scheduling management is particularly stressed to provide a theoretical basis for overall design of search engine prototype system.

Key words: smart grid; dispatching management; dispatch control integration; cloud computing; search engine

变压器差动保护误动原因分析及对策综述

袁宇波, 李 鹏, 黄浩声

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘 要:从理论联系实际的角度综述分析了引起变压器差动保护误动的一些主要原因,包括变压器空载合闸励磁涌流、相邻变压器空投引起的和应涌流、外部故障切除恢复性涌流;电流互感器(TA)暂态饱和、局部暂态饱和;变压器零序涌流助增对变压器差动保护的影响等,根据这些误动原因提出了相应的解决对策。正确地认识和理解这些问题,有助于引起研发、设计、调试、运行等部门的重视,并通过适当的措施来避免这些原因引起的误动,提高变压器保护在现场运行的动作准确率。

关键词:变压器差动保护;励磁涌流;和应涌流;零序环流

中图分类号:TM772

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)06-0008-04

变压器作为电力系统中的重要元件,在电网中的地位非常重要,因此需要给变压器安装可靠的保护装置,随着微机保护的不断应用,数字变压器保护在电力系统中的应用日益广泛,但也暴露出来一些问题。近年来,变压器差动保护引起的保护误动频频出现,据统计,2000 年至 2004 年全国 220 kV 及以上变压器差动保护共动作 1126 次,而其中误动就有 246 次,误动率高达 22.2%^[1],有些误动原因没有进行详细分析就再次将变压器投入运行了,未具体查出原因,给电网的安全运行造成了一定的隐患。因此需要充分地调研引起变压器差动保护误动的一些主要原因,对事故原因进行深层次的理论分析、建模并提出避免这些误动建议,引起研发、设计、调试、运行等部门的重视,有助于提高变压器保护动作准确率。

1 二次回路原因引起差动保护误动

多年运行统计表明,变压器差动保护误动,经常是由于二次回路接线错误或二次设备性能欠佳而导致变压器差动保护误动。由于变压器差动保护二次接线复杂,牵涉到 Y/△变换问题,现场安装调试人员一旦疏忽就容易将二次接线接错,通常表现为电流互感器(TA)极性接反、TA 接线组别错误、TA 接线相别错误。数字变压器保护不要求在 TA 的二次侧进行转角,由数字保护可以自动完成转角,如对于 Y₀/△-11 的变压器,变压器各侧 TA 均采用 Y 接线,这种接线在数字变压器保护中是允许的,但是在选择软件处理模式时,没有选择消除零序这一项,在发生区外故障时就会引起变压器差动保护误动^[2]。另外 TA 断线也会引起变压器差动保护误动,如何进行 TA 断线闭锁也是一个很关键的问题。

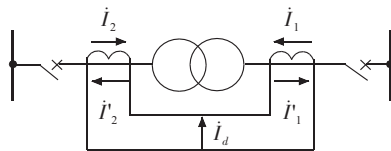
解决上述问题,根本之策在于加强对继电保护安

装人员和运行人员的培训,提高其业务水平,对在保护运行与调试过程中的一些关键注意事项进行重点的检查,其次保护厂商要严把保护产品质量关。

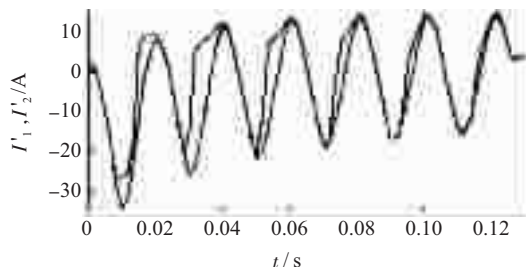
2 区外故障引起差动保护误动

通常变压器各侧电压等级是不一致的,因此差动保护所用的各侧 TA 的型号也有所差异。当变压器发生区外短路故障时,穿越性故障电流比正常运行时要大的多,尤其短路电流中含有较大的非周期分量,如果有一侧 TA 严重饱和或两侧 TA 饱和程度不一样,就可能产生较大的不平衡电流,容易引起差动保护误动。变压器差动保护二次接线如图 1(a)所示,图 1(b)、图 1(c)为变压器高压侧发生区外故障时某次误动的变压器各侧电流及差流录波,可以看出高压侧 TA 已经严重暂态饱和,高压侧电流发生严重畸变,导致两侧差电流很大,差流峰值几乎与两侧电流峰值接近。

为防止区外故障时变压器差动保护误动,建议采取以下措施:(1)选取 TA 时,尽量使变压器各侧 TA 型号一致,宜均采用 TYPY 级 TA。(2)测试 TA 伏安特性、二次负载、绘制 10%误差曲线,保证在最大外部短路电



(a) 变压器二次接线图



(b) 变压器两侧电流

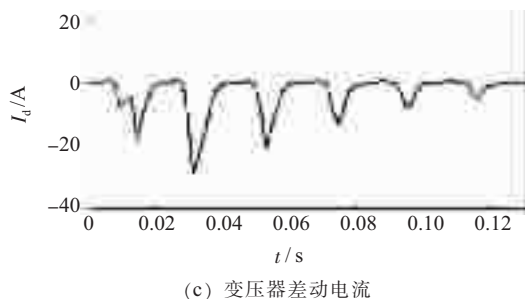


图1 区外故障变压器两侧电流及差流录波图

流时误差不超过 10%, 如果超过, 可加大二次电缆截面, 采用较大的变比的 TA 或者两组 TA 串联使用。(3) 在保证灵敏度的前提下, 适当提高制动系数。(4) 采用新型抗 TA 暂态饱和的差动保护原理。

3 恢复性励磁涌流

变压器差动保护也出现区外故障切除后误动的事件, 主要和恢复性涌流相关, 变压器经历外部故障切除扰动可以按故障电流是否流经变压器来划分成 2 种情况: 一种是短路时故障电流不流过变压器; 另一种是故障电流流过变压器^[3]。图 2(a) 为变压器发生外部故障的系统接线示意图, 假设在 $t=0$ 时刻故障点 K 发生三相短路故障, 在 $t=\tau$ 时刻故障被切除, 此时励磁绕组电压变化如图 2(b) 所示。可见, 外部故障的切除, 变压器铁心经历类似合闸过的过程, 会形成恢复性涌流, 可能导致铁心饱和。

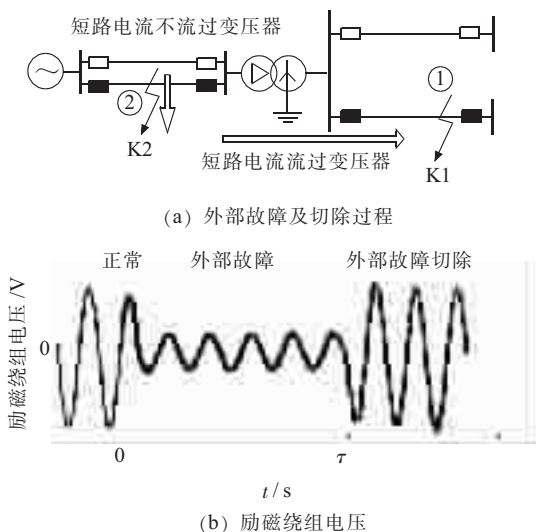


图2 外部故障切除示意图及此过程中励磁绕组的电压

恢复性涌流是否能够导致变压器差动保护误动, 研究表明: 故障切除越快, 恢复涌流产生的可能性越小; 故障切除越慢, 恢复涌流产生的越大。

对于超高压电网, 故障切除快, 电压支撑强, 恢复涌流一般较难产生; 考虑到故障电流流过变压器的情况下, 变压器在外部故障切除时受到电流自然过零切除的约束, 同时受外部故障的严重程度(主要指变压器

励磁支路电压的降低程度)的影响, 因此变压器区外故障切除后的电压恢复过程被认为与变压器的空载合闸过程存在一定的差别, 变压器外部故障切除后形成的恢复性涌流与故障传递剩磁有较大关系, 恢复性涌流的峰值与典型的空载合闸涌流峰值相比明显较小, 但是二次谐波含量并不低, 难以引起差动保护的误动。

4 TA 局部暂态饱和引起的差动保护误动

TA 局部暂态饱和与 TA 暂态不一致应该来说本质上是一致的^[4]。分析表明, TA 暂态特性不一致形成的差电流很可能是造成变压器差动保护区外故障切除后误动的原因。因为变压器在外部故障扰动期间, TA 暂态特性的不一致将形成差电流, 且随着外部故障的切除逐渐消失, 此时差动保护呈现出以下几个特征:

- (1) 变压器两侧差流包含 TA 引起的差电流和恢复性涌流两部分, 差动保护动作量较大;
- (2) 恢复性涌流二次谐波含量因为 TA 引起的差电流的存在而降低, 二次谐波制动判据可能失效;
- (3) 差动保护制动量因为电流从故障电流恢复成正常的负荷电流, 明显减小。

因此, 建议保护厂商和运行人员为变压器差动保护选择暂态性能良好的 TA, 调整 TA 的负载使得变压器两侧的 TA 的饱和特性趋向一致, 同时选择具有抗 TA 保护的保护装置。

5 空载合闸引起差动保护误动

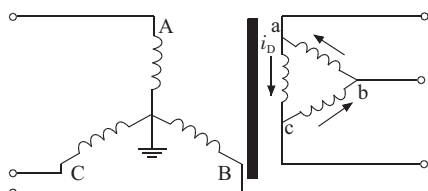
关于变压器空载合闸励磁涌流问题。长期以来, 变压器空载合闸励磁涌流引起的变压器差动保护误动一直困扰着继电保护工作者, 为此国内外学者作了大量的研究工作, 根据励磁涌流区别于变压器内部故障电流的特征, 提出了许多识别励磁涌流的方法。目前我国通常采取二次谐波制动和波形对称原理来防止励磁涌流引起差动保护误动^[5]。由于二次谐波制动原理中的二次谐波制动系数取值无法从理论上得到推导, 只是靠一些经验值(目前我国通常取二次谐波制动系数为 15%~20%), 对于现代大型变压器, 铁心饱和点提前, 空载合闸时励磁涌流二次谐波含量可能低至 10% 以下, 在这种情况下, 差动保护很可能会误动。另外二次制动系数应该怎么取, 也是一个问题, 目前常用的算法有以下几种^[6]: (1) 谐波比最大相制动; (2) 分相制动; (3) 按故障相制动; (4) 综合相制动。

谐波比最大相制动即是三相或门制动, 它防止误动性能较好, 但是它的最大缺点是故障时空投变压器可能会误闭锁导致延时切除故障甚至拒动。分相制动恰恰与谐波比最大相制动相反, 它是三相与门制动, 防拒动性能较好, 但如果空投时出现某一相二次谐波含

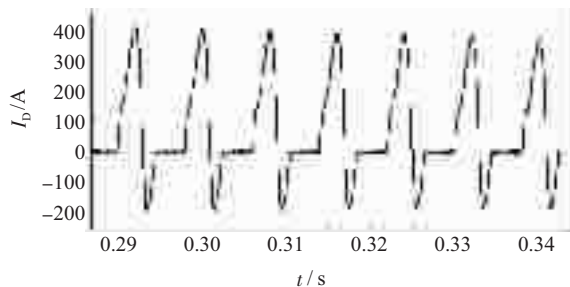
量较低或对称性涌流就会误动。按故障相制动是利用三相中差流基波值最大的那一相来制动,而综合相制动采用差流最大二次谐波值与最大基波值得比值作为制动比。按故障相制动和综合相制动通过提高制动比的分子值(基波电流),一定程度上提高了带故障空载合闸时差动保护的速动性,但是二者在某些情况下仍可能会误动或延时动作。

6 变压器空载合闸零序环流的助增问题

现场在空载合闸时,出现一些原因不明的误动。对于图 3(a)所示 Y/△接线变压器,在空载合闸时,由于三相铁心饱和情况的不平衡,会引起变压器三角形侧的环流,如图 3(b)所示。



(a) 变压器接线图



(b) 变压器三角形侧环流

图 3 环流助增引起的对称性涌流

误动的原因是否与该现象有关,不同的变压器转角方式是否也有影响,很有必要研究励磁涌流的助增现象。从目前报道变压器空载合闸误动的涌流波形来看,出现了一些新的现象,空充变压器时某一相出现了和内部故障短路电流相似的波形特征,该相差流中二次谐波的含量很小且初始波形对称性极好,导致变压器差动保护误动^[7]。

之所以会出现这种现象,主要是和数字变压器差动保护的转角方式有关。对于目前国内普遍采用的 Y₀/△-11 接线的变压器,大部分数字变压器差动保护装置对变压器各侧电流进行相位校正的实现方式既可用传统接线校正的方式也可用计算机软件来实现,两种方式可供用户自由选择。考虑到接线的简单性和方便性,对于新投运的变压器,技术人员多采取变压器各侧电流互感器统一 Y 接线,然后通过软件进行相位校正。利用软件进行相位幅值又通常有 2 种方式:一种是基于相间差动原理,本质上和传统接线原理是一样的,如 SEL,ABB;另一种是基于相电流差动消零序)原理,

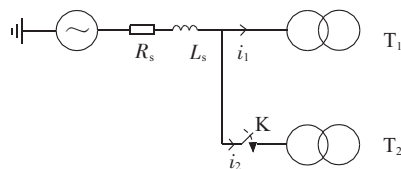
如 SIEMENS,这个原理的一个重要环节就是要消除变压器 Y₀ 侧的零序电流,否则区外故障时差动保护会误动^[8]。对于 Y₀/△-11 变压器经过推导^[9],可得:

$$\begin{cases} i_{Ad} = \frac{2}{3}i_{ma} - \frac{1}{3}(i_{mb} + i_{mc}) \\ i_{Bd} = \frac{2}{3}i_{mb} - \frac{1}{3}(i_{mc} + i_{ma}) \\ i_{Cd} = \frac{2}{3}i_{mc} - \frac{1}{3}(i_{ma} + i_{mb}) \end{cases} \quad (1)$$

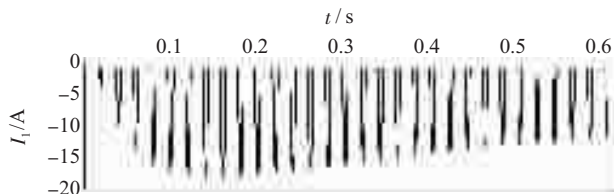
由式(1)可看出变压器空载合闸时,各相差电流是由三相励磁电流构成,因此每相差电流二次谐波含量也是由三相励磁电流决定,在一个平面内的 3 个相量必然线性相关,总有可能在某些条件下,三相涌流中的二次谐波互相抵消,使得某一相差电流的二次谐波为 0 或接近于 0,而其他两相二次谐波应该比较大,如果采用分相制动就会发生误动。因此对于采用相电流差动原理的数字变压器差动保护,建议不要采用分相制动原理。

7 和应涌流引起差动保护误动

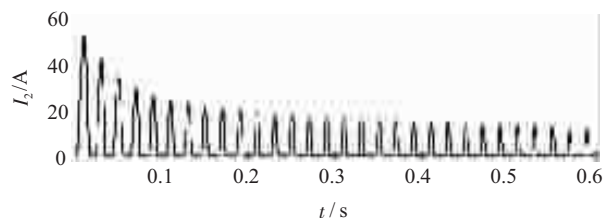
众所周知,当变压器空载合闸时,会出现励磁涌流,与此同时,与之并联或串联的变压器也将出现浪涌电流。对于图 4(a)所示系统,变压器 T₁ 正常运行,变压器 T₂ 空载合闸,由于并联运行的 2 台变压器的合闸磁链之间通过系统侧电阻相互耦合,产生相互影响的,在 T₁ 中产生浪涌电流,称为和应涌流。相应 T₂ 合闸的励磁涌流及 T₁ 产生的励磁涌流波形如图 4(b)、图 4(c)所示。



(a) 和应涌流产生示意图



(b) 和应涌流 T₁



(c) 空载涌流 T₂

图 4 变压器并联型和应涌流

近些年来,关于和应涌流引起变压器差动保护误动的报道时有报道,引起了不少学者的注意,引起和应涌流的主要原因是空投变压器的励磁涌流引起公共接点的电压偏移,普遍认为和应涌流具有以下特点:

(1) 和应涌流与空投变压器的励磁涌流交替产生,且二者偏向于时间轴的不同侧。

(2) 和应涌流先是逐渐增大,之后逐渐减小。

(3) 和应涌流衰减比较慢。

但是目前对于和应涌流引起差动保护误动的原因还不完全清楚,观点也不统一。文献[10]认为和应涌流引起变压器暂态饱和,使得励磁涌流二次谐波分量明显减少,直流分量衰减较快,间断角消失,导致二次谐波制动式差动保护的误动;直流分量衰减较快,将导致速饱和型差动保护的误动;间断角消失会使靠间断角闭锁的差动保护误动。文献[11]认为和应涌流主要成分是零序电流,因此零序差电流是造成和应涌流误动的主要原因。且和应涌流本身并不是导致差动保护误动的原因,和应涌流中衰减很慢的非周期分量导致TA局部暂态饱和才是引起差动保护误动的主要原因。为防止和应涌流引起变压器差动保护误动,建议采取以下措施:

(1) 在满足灵敏度的前提下,适当提高保护动作定值。实践证明,这种方法简单有效^[12];

(2) 当主变开关空载合闸期间,尽量将两台变压器安排到不同的母线分段上进行启动,同时如调度允许,应断开空载合闸的主变中性点接地刀闸,减少两个变压器的通过公共母线的电压耦合,以避免或减小出现和应涌流的机会。

(3) 在保护装置中增加小工频电流非周期分量衰减较慢引起的TA局部暂态饱和判据,如增加角差闭锁,反时限电流差动保护等。

(4) 在条件允许的情况下更换剩磁系数较小的TPY系列TA,减少TA在小工频电流、长非周期分量下传变的误差。

8 穿越性涌流

2台变压器串联,空投下级变压器出现励磁涌流时,上级变压器会流过穿越性涌流。理论上穿越性涌流流过变压器的两侧,不会产生差流,但实际上由于励磁涌流含有较高的非周期分量,极易引起TA饱和,出现与变压器区外故障相类似的情况,TA饱和程度不一样,产生较大的差电流,引起差动保护误动。另外,励磁涌流从上级变压器一侧传变到另一侧,也可能造成变压器暂态饱和,使变压器产生较大的励磁电流,全部流入差动回路,从而在继电器中产生较大的暂态差电流,现场实验也证明了这一点^[13]。实际上如果线路差动保

护两侧TA选型不一致,出现穿越性涌流时,保护也可能误动^[14]。要解决穿越性涌流引起的差动保护误动问题,首先保护厂家要提高保护识别励磁涌流的能力,其次要重视TA选型。对于线路差动保护,TA选型尽可能一致,对于变压器差动保护,严格把TA传变控制在10%误差之内,不仅要考虑稳态误差,还要考虑暂态误差。

9 结束语

本文分析了引起变压器差动保护误动的一些主要原因,包括励磁涌流、和应涌流、外部故障切除恢复性涌流、TA饱和、零序环流等一系列因素导致的变压器保护误动,并根据这些原因提出了相应的解决对策。从分析结果来看,变压器差动保护误动原因有的是二次回路因素,有的是保护原理的原因,也有的是TA暂态饱和问题。但实际上,很多变压器差动保护误动不能只简单的归结为上面的某一种原因,往往误动是由于很多方面的不利因素交织在一起造成的,比如空投某一台变压器时,而同在一条线路上相邻的变压器差动保护发生误动,从前面的分析知道,在这种情况下,和应涌流、穿越性涌流、TA饱和这些不利因素均可能出现,因此只简单把保护误动归结为某一种原因是不妥当的。

目前,变压器差动保护所面临的问题主要还是保护能否可靠闭锁以及TA饱和问题,随着光电互感器的不断发展和推广,TA饱和问题必将能够很好地得以解决,变压器差动保护误动也将得以改善。

参考文献:

- [1] 周玉兰. 1999~2003年全国电网元件保护运行情况[J]. 中国电力, 2005, 38(5): 13-19.
- [2] 苏忠阳, 韩宏跃, 黄明辉. 500 kV北郊变电站变压器差动保护误动原因分析[J]. 广东电力, 2002, 15(2).
- [3] 刘中平, 陆于平, 袁宇波. 变压器外部故障切除后恢复性涌流的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8).
- [4] 袁宇波. 自适应数字变压器差动保护原理与方法的研究[D]. 南京: 东南大学电气工程系, 2003.
- [5] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 42-46.
- [6] 吕珍, 岳蔚, 刘沛. 变压器差动保护二次谐波制动判据的仿真研究[J]. 继电器, 2003, 31(6).
- [7] 吴奕. 主变空载合闸涌流造成微机差动保护跳闸的分析[J]. 江苏电机工程, 2004, 23(4): 61-63.
- [8] 邓祥力, 刘世明. 变压器保护两种转角方式的比较[J]. 继电器, 2004, 32(16).
- [9] 王维俭, 侯炳蕴. 大机组继电保护理论基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 144-155.
- [10] 李德佳, 王维俭, 毕大强. 变压器暂态饱和与和应涌流实例分析[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 12-15.

一起不同电压同杆双回线纵联零序保护动作分析

孙文华¹, 袁宇波², 黄浩声²

(1.常州供电公司,江苏 常州 213003;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

摘要:文中分析了一起500 kV和220 kV同杆并架线路,在500 kV线路末端发生故障时,220 kV线路纵联零序保护误动的原因,并从一般性原理上分析同杆架设双回路零序互感引起纵联零序保护误动的机理。分析表明在弱电耦合的情况下由于零序互感的存在,在相邻线路发生接地故障时,由于本线路两侧零序电压出现反相,使得纵联零序方向保护误判为线路内部故障,引起保护装置误动,为同类事故的分析提供了参考。

关键词:不同电压等级,同杆并架,零序互感,纵联零序保护

中图分类号: TM72

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)06-0012-03

随着电网结构的快速发展,由于建设走廊的限制、土地资源及经济性等方面的原因,同杆双回线路甚至同杆多回线的局面会大量出现,同杆架设双回线虽然在土地利用和节约资源上占有优势,但由于零序互感的存在,对继电保护的整定和动作正确性带来了影响^[1-5]。相邻线路故障引起本线路保护的不正确动作将会引起两回线同时切除的严重后果,会直接影响到系统的安全运行^[6,7]。某地区500 kV与220 kV电压等级同杆架设多回线路就曾发生过一起此类问题。针对该案例,通过现场故障录波数据的分析,查找保护动作原因,验证了同杆架设双回线之间的零序互感将影响保护动作的正确性,为正确分析同类事故提供了参考。

1 案例分析

如图1所示,某500 kV线路和220 kV线路同杆架设,故障前500 kV系统正在启动,处于单侧充电状态,在充电500 kV线路的过程中,在500 kV线路末端发生短路故障,220 kV线路纵联零序保护动作。相应线路两侧故障录波如图2和图3所示。

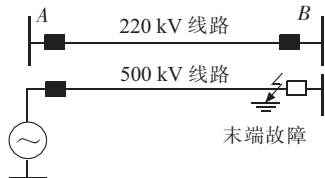


图1 系统的接线图

从图2、图3可以看出,两侧的零序电压出现了反相的特征,且零序电流超前零序电压 90° ,出现了区内故障的特征,导致纵向零序方向保护误动。

2 相邻线路流过零序电流时的故障特征

若平行架设的两回线路电气上完全没有联系,如两条线路分排运行,或两回线分别属于不同的电压等

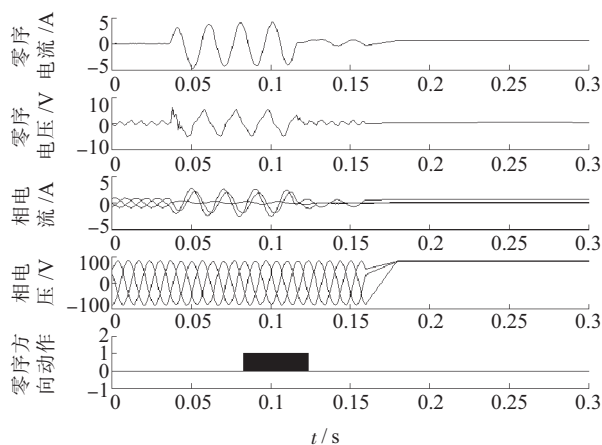


图2 220 kV A侧的电流电压波形

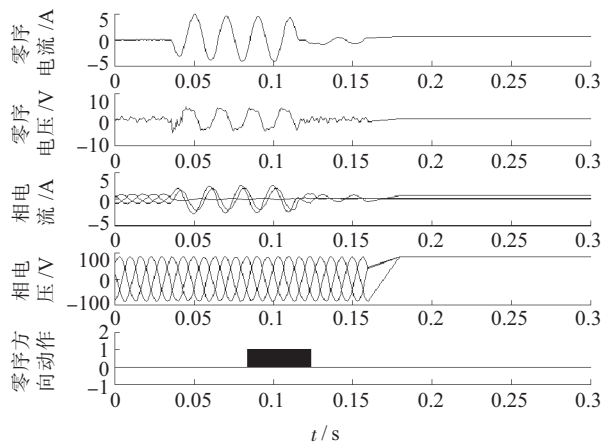


图3 220 kV B侧的电流电压波形

级(本案例),当相邻线上流过零序电流时(发生单相接地故障),由于互感的影响,将会在本线路上产生零序感应电流,并使电网各点出现相应的零序电压,如图4所示。 AB 与 MN 为有互感且无电气联系的线路,当 AB 线路区外故障或首端发生单相接地短路时, AB 线路流过零序电流, MN 线路上将会感应零序电压,相当于 MN 上叠加了一个大小为 $\dot{I}_0 X_{0m}$ 的零序电压源, Z_{M0} 与 Z_{N0} 为线路 MN 两侧背后的等值零序阻抗。

线路 MN 各点的零序电压分布如下:

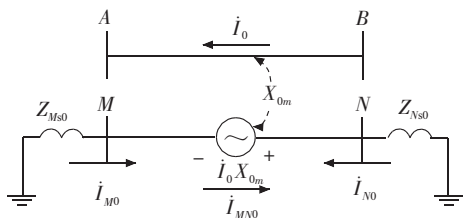


图4 系统接线示意图

$$\dot{U}_0(\alpha) = -\dot{I}_{MN0} [(1-\alpha)Z_{Ms0} - \alpha Z_{Ns0}] \quad (1)$$

式(1)中: α 为线路从M侧开始计算的距离百分比。

其中AB为I回线,MN为II回线,MN线路上各点电压和电流分布如图5所示。

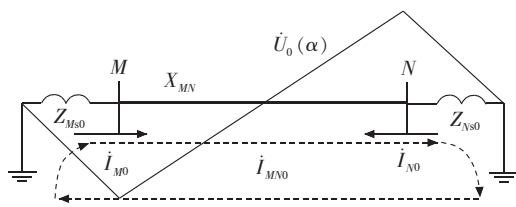


图5 MN线路上各点电压和电流分布示意图

由互感引起的零序电压在线路的电气中点为0,在保护安装处达到最大,并在变压器接地阻抗的末端又变为0,M侧、N侧的零序电压相位相反,M侧、N侧的零序电流实际为同一个穿越性环流,但由于两侧参考方向都由母线指向线路,因此两侧的零序电流大小相等方向相反。由此得到M点、N点的电压为:

$$\dot{U}_{M0} = \dot{U}(0) = -\dot{I}_{MN0} Z_{Ms0} = -\dot{I}_{M0} Z_{Ms0} \quad (2)$$

$$\dot{U}_{N0} = \dot{U}(1) = \dot{I}_{MN0} Z_{Ns0} = -\dot{I}_{N0} Z_{Ns0} \quad (3)$$

式(2,3)显示,当理想情况忽略线路电阻分量时,MN线M侧和N侧测量到的零序电流均超前零序电压相位 90° ,如图6所示。与下面分析的本线路内部接地故障情况一致,从而妨碍零序方向继电器正确判断故障,只要当MN线的零序电流超过保护零序停信值,就会造成纵联零序保护误动。

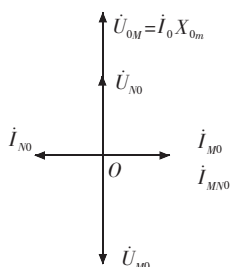


图6 互感引起的零序电流与零序电压的关系

3 内部故障时的电压电流分布

内部故障时,等效为在故障点并联一个零序电压,零序电流的分布是沿着故障点向两侧流动,故障点的零序电压最高,各电压电流的相量如图7、图8所示。

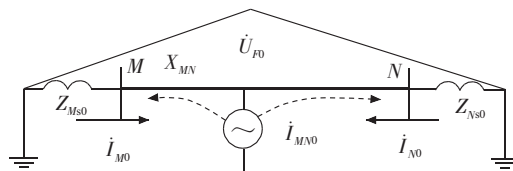


图7 内部故障时零序电压的分布

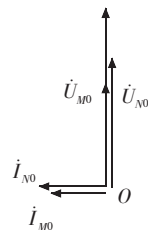


图8 内部故障时的相量图

对于发生故障的线路,零序电流超前零序电压,两端零序功率的方向同时指向线路。

从上面的分析比较可以看出:(1)内部故障时零序电流是注入性的,分别向线路两侧注入并入地,因此两侧零序电流同相,零序电压也同相,且电流超前电压,零序功率方向指向线路内部;(2)互感引起的零序电流是穿越性的环流,因此两侧零序电流反相,零序感应电压可以视为串联于线路,因此线路两侧的零序电压极容易反相,两侧零序电流同样也超前零序电压,零序功率方向为指向线路内部,纵联零序保护误判为线路内部故障。

内部故障零序电流超前零序电压的原因是两侧的零序电流都是流入母线所致,而零序互感引起的误动,电流是穿越型的,因此两侧电流反相,但电压也反相了,负负得正,虽然线路内部没有发生故障,但从两侧零序功率方向的角度看,后果和内部故障相同。

4 结束语

随着电力系统的快速发展和电网结构的越趋复杂,某些特殊的系统工况相继出现,当500 kV发展成省级电网的主干网后,220 kV的电网逐步辐射状运行,出现弱电联系运行方式变多,本文结合现场事故案例,从理论上分析了同杆架设多回线路零序互感引起纵联零序保护误动的机理,为电网故障分析提供依据和借鉴,同时由于光纤电流差动保护从原理上对零序互感具有免疫力,建议在新上线路和老线路保护改造时优先采用。

参考文献:

- [1] 王梅义. 高压电网继电保护运行技术[M]. 北京: 电力工业出版社, 2006: 72-92.
- [2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 235-250.
- [3] 张运洲, 李晖. 中国特高压电网的发展战略论述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 1-7.

- [4] KALYUZHNY A, KUSHNIR G. Analysis of Current Unbalance in Transmission Systems With Short Lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1040-1048.
- [5] 徐建国. 对国外超高压同塔多回送电线路技术的调研分析[J]. 电力建设, 2001, 22(7): 15-18.
- [6] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2004: 142-152.
- [7] 曾耿晖, 黄明辉, 刘之尧, 等. 同杆线路纵联零序保护误动分析及措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 103-107.

作者简介:

孙文华(1965), 男, 江苏江都人, 高级工程师, 研究方向为电能质量在线监测、安全管理及继电保护等;

袁宇波(1975), 男, 江苏丹阳人, 高级工程师, 从事电力系统继电保护试验和研究工作;

黄浩声(1979), 男, 浙江温岭人, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、直流控保系统等。

Analysis on Protection Actions of Zero-sequence Direction Relay for Double-parallel Lines with Different Voltage Level

SUN Wenhua¹, YUAN Yubo², HUANG Haosheng²

(1. Changzhou Power Supply Company, Changzhou 213003, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: This paper analyzes the process of zero-sequence direction relay mal-operation of a double parallel 500 kV and 220kV lines after a fault occurred at the end of the 500 kV line. The mechanism is studied, which shows that the mal-operation is caused by the zero-sequence mutual inductance between multi-transmission lines. In the case of grounding fault occurred at one of parallel line, the existence of zero-sequence mutual inductance would activate the zero-sequence direction relay of the other line. The conclusion of this paper will provide a valuable reference for similar faults analysis.

Key words: different voltage level, double-circuit parallel transmission line, zero-sequence mutual inductance, zero-sequence direction relay

(上接第 11 页)

- [11] 孙恭南, 唐伟, 叶菁. 防止和应涌流误动的方案讨论[J]. 电力系统装备, 2004(5): 70-71.
- [12] 王怀智, 孙显初, 常林. 和应涌流对变压器差动保护影响的试验研究[J]. 继电器, 2001, 29(7): 52-54.
- [13] 周云波, 曹良. 一起主变压器差动保护误动事故及防治对策[J]. 电网技术, 2001, 25(12).
- [14] 李磊, 马杰, 张玮, 等. L90 光纤差动保护误动原因分析[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 97-99.

作者简介:

袁宇波(1975), 男, 江苏丹阳人, 高级工程师, 长期从事继电保护试验和研究工作;

李鹏(1982), 男, 陕西周至人, 博士, 研究方向为电力系统继电保护、直流控保技术等;

黄浩声(1979), 男, 浙江温岭人, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、直流控保系统等。

Review on Analysis and Strategy for Transformer Differential Protection Malfunction

YUAN Yubo, LI Peng, HUANG Haosheng

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The reasons of some typical transformer differential protection malfunction, such as excitation inrush current of transformer no-load closing, sympathetic inrush of energized transformer, restorative inrush caused by external fault cleared, TA transient saturation, partial transient saturation, and assistant of zero-sequence circulation current are theoretically and practically reviewed in this paper. Based on the analysis, some strategies are proposed to avoid these malfunctions. Understanding these problems correctly is helpful in developing, designing, debugging and operating protection device, which will improve the accuracy of transformer protection during field operation.

Key words: transformer differential protection, excitation inrush current, sympathetic inrush, zero-sequence circulation current

欢迎投稿 欢迎订阅

一起风电场主变低压开关异常的保护动作分析

汪文东

(国华江苏风电有限公司, 江苏 盐城 224200)

摘 要:针对一起风电场 220 kV 变电站主变低压开关触头发热导致短路故障, 对开关故障发生原因, 相关 35 kV 母差保护、主变保护、风机集电线路保护动作情况进行了全面分析, 重点对主变低后备保护拒动原因进行了分析, 对如何预防故障, 合理保护配置, 降低故障影响进行了阐述, 且避免同类事故的发生。

关键词:风电场; 变电站; 主变; 开关; 保护配置

中图分类号: TM561

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)06-0015-04

2012 年某月, 某风电场 220 kV 变电站主变低压侧 301 开关由于绝缘击穿发生三相短路, 35 kV 母差正确动作, 主变低压侧开关拒动, 主变低后备复压过流保护拒动, 经高后备复压过流动作, 方切除故障, 造成主变低压侧开关柜后仓烧损, 被迫更换。

1 故障经过

1.1 故障前运行方式

风电场主接线如图 1 所示。220 kV 母线、220 kV 出线运行, 1 号、2 号主变(各 100 MW)运行, 35 kV I 段母线、35 kV II 段母线、母联 310 开关运行, 35 kV 13 条集电线路运行, 所有风机运行, 平均风速 6.6 m/s, 功率 62 MW。

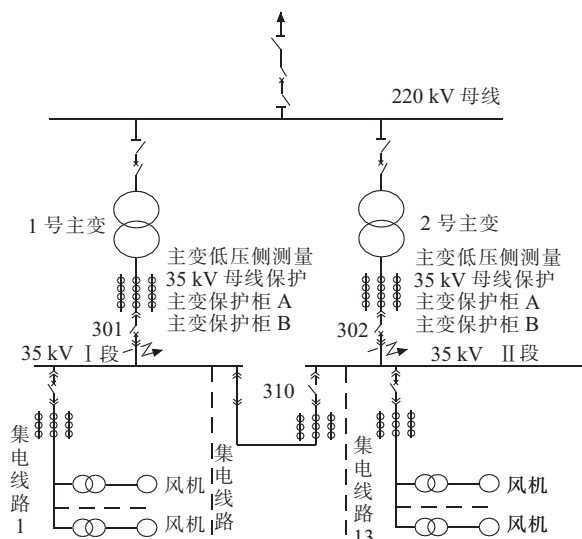


图 1 某风电场系统主接线图

1.2 故障发生现象

2012 年某月, 某风电场负荷 62 MW, 综合自动化系统突然报警, 综自监控画面显示 35 kV I 段母线所有集电线路开关、35 kV 母线联络 310 开关、1 号主变高压侧 2601 开关跳闸, 220 kV 母线、220 kV 出线、2

号主变、35 kV II 段母线及集电线路显示运行正常, 1 号主变低压侧 301 开关显示合位, 运行人员迅速至继保室、35 kV 开关室、220 kV GIS、主变查看设备情况, 发现综自画面显示正确, 35 kV 母差、1 号主变后备保护动作出口, 1 号主变低压侧 301 开关机械指示在合位, 开关柜后仓烧损。

1.3 故障过程

(1) 将 1 号主变低压侧 301 开关摇至仓外, 对开关柜体、手车进行详细检查, 发现开关本体导电臂与母线连接动静触头已变形, 发热痕迹明显, 柜体内与母排连接静触头绝缘件已烧损。

(2) 调取故障录波波形进行综合分析, 得出如下故障过程。35 kV I 段母线 301 开关本体导电臂与母线连接动静触头发热导致 B 相绝缘首先击穿, 发生单相接地, 另两相电压升高后发展成 BC 相接地短路, 进一步发展为三相短路, 母差保护跳闸出口, 集电线路及母联可靠跳闸, 但由于 301 开关拒动, 导致故障影响范围扩大。

(3) 35 kV 母差动作, 301 开关拒动后, 主变低压侧后备保护拒动(分析由于保护整定设置问题), 高压侧过流一段后备保护经 5126 ms 动作, 跳开主变高压侧 2601 开关切除故障。1 号主变过流一段保护调度下发限额时间为 5.1 s, 在一定程度上延长了电弧的存在, 导致开关柜烧损。

(4) 2 号主变低压侧母线三相电压、2 号主变低压侧三相电流波形如图 2、图 3 所示。

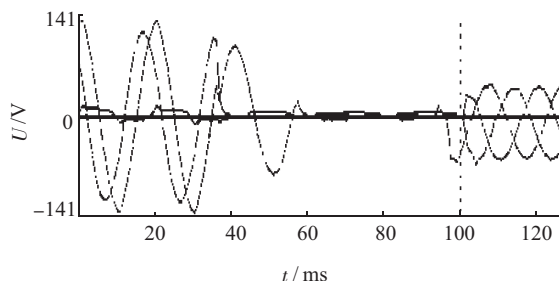


图 2 2 号主变低压侧母线三相电压故障波形

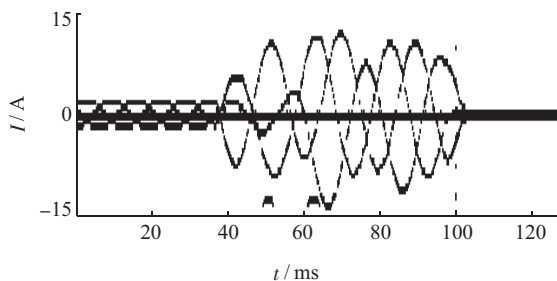


图3 2号主变低压侧三相电流故障波形

(5) 1号主变低压侧母线三相电压、1号主变低压侧三相电流波形如图4、图5所示。

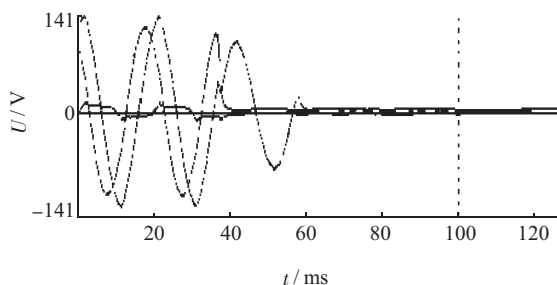


图4 1号主变低压侧母线三相电压故障波形

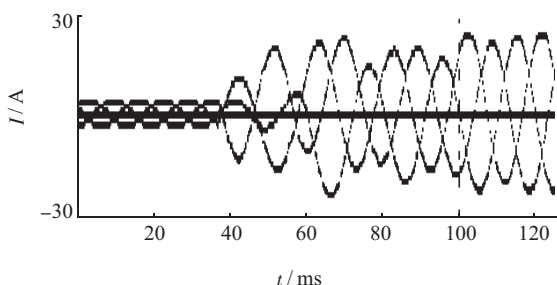


图5 1号主变低压侧三相电流故障波形

1.4 故障原因分析

经现场检查及保护动作分析,发现301开关手车与柜体母排连接动静触头有明显发热痕迹,确定此次事故的原因为1号主变301开关手车导电臂与柜体母排连接动静触头接触不良,导致发热,并最终导致绝缘击穿,发生短路。母差保护可靠动作后,母联及I段母线其他开关可靠分闸,301开关由于开关动静触头接触不良,引起过热并导致开关跳闸线圈动作特性发生变化,当发生故障,保护出口后开关不能可靠分闸,最终导致故障进一步加重。

2 相关保护分析及建议

由于该次故障点为1号主变低压侧开关,在低压侧开关的母线侧,属于低压侧母线设备,母差保护动作后,由于低压侧开关拒动,故障点不能切除,主变低后备保护由于保护定值设置问题拒动,导致开关故障经主变高后备常延时切除,最终烧损,这说明在保护设计,配置及整定上存在一定的问题。

2.1 35 kV 母差保护

故障发生后,35 kV 母差正确动作,跳开一段母线母联及其他开关,事后经检查保护出口跳301开关接点动作正常,回路正常,但301开关由于过热引起动作特性变化,导致拒动。

2.2 主变低后备保护

2.2.1 主变低后备保护配置整定

(1) 主变低后备保护配置。主变保护采用某厂微机型变压器保护,主变低后备配置主变低压侧复合电压闭锁方向过流保护,电压元件取主变低压侧电压,电流取自主变低压侧开关柜流变,该保护作为35 kV 母线、35 kV 出线保护的后备保护。

(2) 故障时保护定值整定。电流元件启动定值^[1]整定为可靠躲过最大运行负荷电流:

$$I_{j.dz} = \frac{1.5}{0.95} \times \frac{1650}{2000/5} = 6.51 \text{ A}$$

灵敏系数校验。作为35 kV 母线、35 kV 线路的后备保护,按照35 kV 最长线路两相短路的条件校验,两相短路电流在系统最小阻抗为0.052 3 p.u.,主变阻抗为0.014 6 p.u.,35 kV I段母线35 kV 集电线路最大线路阻抗为0.206 p.u.,最长线路末端两相短路时,1号主变低压侧两相短路电流为:

$$I_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1}{0.0523 + 0.146 + 0.206} \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 35} = 3.53 \text{ kA}$$

灵敏度校验:

$$K_{sen} = \frac{I_d}{6.5 \times 2000/5} = \frac{3530}{6.5 \times 2000/5} = 1.35 > 1.2$$

动作时间即与35 kV 线路过流保护动作时间配合,整定为1.5 s。

低电压定值,作为35 kV 母线、35 kV 线路的后备保护,当35 kV 线路考虑(最长一条线路)末端发生三相短路时,其 U_n 为主变低压侧额定电压,主变低压侧电压为:

$$\frac{0.206}{0.0523 + 0.146 + 0.206} U_n = 0.254 U_n$$

考虑一定的灵敏度整定 $U_{iset} = 0.4 U_n$ 。负序电压定值 U_{2set} 按照继电保护整定计算导则整定为8 V (线电压)。主变压器保护装置控制字投入整定情况:(1) 低侧过流经低侧复压闭锁投入;(2) 低侧过流经高侧复压闭锁退出;(3) 低压侧电压互感器(TV)断线对本侧复压闭锁投入;(4) 高侧复压闭锁低侧过流退出;(5) 跳闸出口为跳主变低压侧开关。

2.2.2 根据录波波形对保护动作分析

(1) 电流元件,本次主变低压侧故障持续电流为8.2 kA,电流元件整定完全满足动作要求;

(2) 电压元件,本次故障持续三相电压近似为0,

整定满足条件;

(3) 方向元件,整定指向母线,满足要求;

(4) 低压侧 TV 断线判据元件,根据装置内部程序设定如单相电压 U_a, U_b, U_c 任一相小于 20 V,零序电压 $3U_0$ 大于 20 V 即判定单相或两相断线,通过上述录波图形分析,故障首先是发生 B 相接地,B 相电压接近于 0,后发展成三相短路,判定符合断线判定要求,按照逻辑闭锁本侧复压闭锁元件。

保护整定时防止 35 kV 母线 TV 断线造成失压,造成复压过流保护误动,故整定时设定 TV 断线时闭锁低后备保护。由于故障首先是 B 相接地后经 60 ms 发展成三相短路,根据程序内部设定单相电压 U_a, U_b, U_c 任一相小于 20 V,零序电压 $3U_0$ 大于 20 V 即判定单相或两相断线,满足 TV 断线判据的要求,低后备保护虽然电流条件满足,但电压条件由于低侧判断为 TV 断线,而高侧电压闭锁低侧电流判据功能又设置为退出,导致低后备保护拒动,属于保护整定设置不当。

在以上分析的基础上,后经现场实校保护装置,逻辑动作情况证明上述分析,并实际检查保护电流互感器(TA)回路接线,极性方向符合要求,母线侧为正极性,排除了电流方向元件设置错误的可能。

2.3 主变高后备保护

2.3.1 主变高后备保护配置整定

(1) 主变高后备保护配置。主变高后备配置主变高压侧复合电压闭锁过流保护,主变高后备保护是系主变本体、主变外部故障的后备保护,电流取自高压侧流变。

(2) 故障时保护定值整定。电流元件启动定值整定为可靠躲过最大运行负荷电流:

$$I_{j.dz} = \frac{1.5}{0.95} \times \frac{251}{600/5} = 3.3 \text{ A}$$

灵敏系数校验(按照主变低压侧 35 kV 母线两相短路的条件校验),主变低压侧 35 kV 母线两相短路电流为(考虑 35 kV 母联打开):

$$I_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1}{0.0523+0.146} \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 230} = 1.09 \text{ kA}$$

灵敏度:

$$K_{sen} = \frac{I_d}{3.3 \times 600/5} = \frac{1090}{3.3 \times 600/5} = 2.75 > 1.2$$

动作时间即按照调度限额 5.1 s。

低电压定值,作为主变外部故障的后备保护,当主变低压侧三相短路时,其 U_n 为主变高压侧额定电压,主变高压侧电压为:

$$\frac{0.146}{0.0523+0.146} U_n = 0.74 U_n$$

考虑一定的灵敏度整定为 $0.85 U_n$,负序电压定值按照继电保护整定计算导则整定为 8 V(线电压)。装置控

制字投入整定情况:① 高侧过流经高侧复压闭锁投入;② 高侧过流经低侧复压闭锁退出;③ 高压侧 TV 断线对本侧复压闭锁投入;④ 低侧复压闭锁高侧过流退出;⑤ 跳闸出口:跳主变高低压侧开关。

2.3.2 主变高后备保护动作分析

由于主变低后备保护电压判据不满足条件导致保护拒动,高后备电流、电压判据动作条件均满足,经 5.1 s 动作跳高低压侧开关切除故障。

2.4 建议

2.4.1 主变低后备保护

本次主变低侧后备保护^[2]拒动是由于保护 TV 断线闭锁复压设置不当造成。(1) TV 断线闭锁复压可以改为退出,缺点是当保护装置检测到电压不正常,可能会导致复压元件条件满足,保护可能误动;(2) 低侧后备保护 TV 断线闭锁复压选择投入,但是低侧后备保护经高侧复压闭锁须由退出改为投入,即使判断出本侧 TV 回路异常时,本侧复压元件不满足条件,但本侧复合电压过流保护可经高侧复合电压判据合理判断是否动作。

2.4.2 主变高后备保护

高后备复压过流保护调度限额为 5.1 s,是综合考虑到系统故障时,风场主变不要提前切除,确保系统保护可靠动作,未考虑另增加设置方向过流保护,整定合理时间,保证主变本体或低压侧故障时能保证经合理时限切除,主变高压侧后备保护配置不合理,这也是本次故障损坏程度加重的原因之一。为保证主变本体或低压侧出线近距离故障时高后备保护^[2]经适当时间延时切除主变,结合本次保护动作情况建议做如下改进:

(1) 主变高压侧增加设置复压方向过流保护,方向指向主变,时间整定与低后备保护时间配合,设定 0.5 s 级差,整定为 2 s,跳闸出口跳主变高低压侧开关。

(2) 和调度部门沟通,优化调度下发主变复合电压过流保护时间限额。综合考虑风机低电压穿越功能^[3],如系统发生故障风机机端电压跌落超过 10%,风机最长提供故障电流时间为 2 s,如经 2 s 系统故障没有切除,风机机端电压不能自动恢复到 90%,风机将自动脱网停运,对系统而言风机则不能继续提供故障电流,原先限额 5.1 s 意义不大,为简化高后备保护设置,如经调度部门认可,在不影响系统保护动作的情况下,建议高后备保护时间整定缩短,不带方向,能保证达到同样保护效果。

2.5 主变差动保护

2.5.1 原设计分析

原变压器差动保护设计未将主变低侧开关上下静触头短路故障纳入主变差动保护范围,本次故障主变差动未启动,符合现场实际。结合本次故障分析按照原

设计需考虑优化以下问题:(1) 如主变低侧开关下静触头短路故障,35 kV 母线差动保护正确动作,301 开关如能可靠动作,故障能瞬时切除,但本次是由于开关拒动,最终导致故障损坏进一步加剧。(2) 如主变低侧开关上静触头由于发热导致短路故障,也在 35 kV 母线差动保护范围,35 kV 母线差动保护正确动作,即使 301 开关能正确动作,故障点也不能立即切除,存在保护死区,需主变后备保护经一定延时方能切除故障。

2.5.2 主变差动保护范围调整建议

结合 35 kV 开关触头发热导致短路事故的频发性,综合分析建议将主变低侧流变按图 6 所示调整。

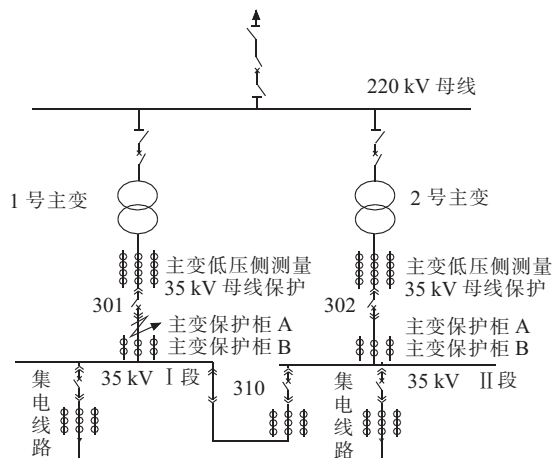


图 6 主变低侧流变调整图

经此完善,当发生类似本次开关静触头发热引起短路故障,对 301 开关上静触头与保护 TA 之间故障时存在的死区(对 35 kV 母差保护而言),主变低压侧 301 开关由于机构问题拒动等问题,均可通过变压器差动保护瞬时动作经主变高压侧开关切除故障。以上完善调整同样适用于风场 2 号主变保护。

2.6 风场其他保护动作

以上分析主要针对和本次故障直接相关的 35 kV 母差、1 号主变保护动作情况,风场变电站 220 kV 出线保护、220 kV 母差保护均反映正确,未误动,35 kV 风机集电线路过流保护均未能启动,35 kV I 段风机在集电线路开关经母差保护动作跳闸后均可靠停运,35 kV II 段风机在故障期间脱网,说明风机低电压穿越功能还需进一步完善。经计算集电线路故障电流未达到电流 I 段定值,故集电线路电流 I 段对 35 kV 母线故障不具备灵敏度,且电流 I 段设置方向,指向线路,故本次故障线路一段保护属于正常反应;故障电流达到电流保护 II 段动作值,但电流保护 II 段未启动,经核查由于电流保护 II 段设置方向性,方向指向线路,反方向故障保护未启动,属正常反应。

结合以上分析,需对集电线路^[4]保护进行改进,如取消电流保护 II 段方向性,电流 II 段对 35 kV 母线故障具备灵敏度,但应考虑当变压器高侧或系统发生故

障时应能够与变压器高侧后备保护具备配合性。主变高压侧三相短路时集电线路电流为:

$$I_{\text{set}} = \frac{1}{0.146+0.548} \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 35} = 2.26 \text{ kA}$$

大于电流二段整定值,故电流二段如取消方向在主变高压侧发生短路故障时,二段保护会在高后备保护前动作,属于越级动作,为保证保护选择性,故需电流保护增加三段保护,按照如下方式整定,并取其大者。

(1) 线路额定负荷整定:

$$I_{\text{set}} = 1.5 \times 1.3 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 35} = 0.483 \text{ kA}$$

(2) 避开主变高压侧三相短路整定:

$$I_{\text{set}} = 1.05 \times \frac{1}{0.146+0.548} \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 35} = 2.373 \text{ kA}$$

综合上述结果取其大者,二次电流 29.66 A。

(3) 时间 0.5 s,方向指向母线。

灵敏度校验按照 35 kV 母线两相短路进行校验,35 kV 母线两相短路电流为:

$$I = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{3000}{400/5} = 32.475 \text{ kA}$$

灵敏系数 $K = 32.475/29.66 = 1.1 > 1$,故定值取 29.66 A。

这样 35 kV 母线如发生故障,可以起到对母差保护后备的作用,即使主变高压侧或系统发生故障也能通过电流动作值整定保证选择性,确保集电线路保护不误动。另通过上述风机低电压穿越性能分析,当系统故障时风机低电压保护可以起到变压器高侧后备保护的远后备作用。

3 结束语

本次主变低压侧开关柜事故,是由于开关本体触头发热引起,故障如不能及时切除,极易引发烧损事故,一方面要积极做好继电保护定期检查完善,另一方面运行人员应加强巡查力度,尤其在大负荷过后,应加强开关触头检查,必要时可与厂家联系进行技改,在开关触头部位安装远红外探头进行在线测温,以便运行人员及时发现异常。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2004:165.
- [2] 陈启卷. 电气设备及系统 [M]. 北京:中国电力出版社,2007:312.
- [3] 周双喜,鲁宗相. 风力发电与电力系统 [M]. 北京:中国电力出版社,2011:357.
- [4] 崔晓祥,高磊,刘孝刚. 一起风电线路跳闸故障的分析 [J]. 江苏电机工程,2012,31(1):12-13.

作者简介:

汪文东(1971),男,江苏盐城人,工程师,从事风电技术管理工作。

(下转第 22 页)

基于物联网技术的智能变电站辅助系统及应用

林 敏

(江苏省电力公司,江苏 南京 210024)

摘 要:物联网技术的快速发展为智能变电站的辅助系统优化与信息融合提供了基础。文中结合国网 220 kV 西泾智能变电站,介绍物联网技术中的数据采集传输系统,提出了基于改进 SOM 方法的传感器优化布置方案;针对现有辅助系统数据标准不统一的问题,研究基于 IEC 61850 标准的统一建模方法,提出了基于物联网的辅助系统管控平台架构方案。

关键词:物联网技术;智能变电站;辅助系统

中图分类号:TM63

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)06-0019-04

国网公司提出加快建设统一坚强智能电网的发展战略,指出要更加注重应用先进的网络信息和自动控制等技术提高电网的智能化水平。物联网利用各种信息传感设备,实时采集任何需要监控、连接、互动的设备或过程等各种需要的信息,并形成一个巨大的信息交互共享网络,实现对相关设备的统一管理。物联网技术具有节点与节点之间信息自动采集、分析、处理等特点,体现信息化、自动化、互动化特征,其在统一坚强智能电网建设中有着广泛的应用前景^[1-4]。

变电站辅助系统是指为保障变电站主设备正常工作的支撑系统,其包括图像监视、安全警卫、火灾报警、消防、采暖通风、检修防误入间隔系统等等。目前,常规变电站配置的各辅助系统均为独立设置,不具备智能交互能力,系统之间的数据共享和集成度不高。不同厂商制造的辅助系统采用了各自的私有协议,无法与站内其他设备和系统互通信息,缺乏统一的管理与展示平台,不能满足智能变电站对信息集成管理的需求^[5,6]。

1 智能变电站传感器系统

1.1 信息采集类型

为实现智能变电站辅助系统的集成应用,需要采集比常规变电站更加丰富的信息,包括变电站设备的运行温度、检修间隔的视频信息、站内巡检视频信息、变电站水浸信息、围墙震动信息、高压围栏入侵信息、红外对射入侵信息、SF₆泄漏信息、主变红外热像信息等。这些信息均由布置在宿主设备的传感器采集完成,并通过不同的传输网络给辅助分析系统,实现所有数据的高级应用。

1.2 传感器网络组合

1.2.1 有线传感器网络

对于信息传输要求带宽大、可靠性高以及布线施工比较简单信息,例如视频、振动、消防、门禁等信

息采用有线传感方式。(1) 高清视频传感器节点。通常采用 H.264 高清标准的视频信号带宽高达 8 Mb/s,适合选择有线传输方式,采用 100 Mb/s 的以太网和 1 Gb/s 的交换机,交换机到视频服务器采用 1 Gb/s 的光纤网络。(2) 墙体震动传感器节点。每个震动传感器的实时采样速率为 64 kb/s,处于连续工作状态,其传输速率达 500 kb/s,传输距离达 200 m,选择 CAN 总线。(3) 消防报警器传感器。限于消防法规的管制,消防报警器只能选用专用有线传输网络,该种网络将供电和通信集成于 2 根信号线中,通过消防管理部门的检测准予使用。(4) 门禁 RFID 阅读器。针对通用型门禁阅读器,选择有线方式,具体采用以太网管理。(5) 无线传感器骨干节点。骨干节点将收集到的节点信息传输回平台,传输距离要求高达 500 m,选择有线方式,采用 RS-485 总线。

1.2.2 无线传感器网络

电气绝缘要求高或布线困难,且数据传输速率低的信息,适合采用无线方式传输,例如高压设备运行温度监测节点,环境温湿度节点,机柜门磁开关节点、水浸节点等。

2 传感器布置算法

智能变电站从建筑结构上分为多个功能区域,各个区域由于电气设备安装位置和建筑结构不同,对传感器节点的布置要求也不相同,在考虑无线节点布置方案时必须对节点布置方案进行研究,尽可能采用优化布置的方案。现有无线传感器网络的节点布置的方法可分为几何覆盖法和智能布置法。

2.1 几何布置算法

几何布置法是指根据现场设备的安装位置,按照一定的空间规则布置传感器,实现对设备的监测。几何布置法可分为点覆盖、区域覆盖和栅栏覆盖算法。该方法的特点是需要保证监测范围内任一点至少属于一个传感器的监测范围,同时尽量减少各传感器之间的范

围交叉。该方法的不足是没有根据被监测设备的重要性,实施以监测对象为依据的传感器布置。

2.2 智能部署算法

智能算法从物理学以及自组织迭代的角度来研究,其中比较有代表性的是 VFA (Virtual Force Algorithm) 方法和 SOM (Self-Organized Mapping) 方法。VFA 的方法从物理学的角度出发,设定临界距离,假设当传感器节点之间的距离大于临界值时,节点间存在引力作用,当节点间距离小于临界值时,存在斥力作用。引力和斥力的大小跟距离有关,最后证明所有的节点在这种引力和斥力的作用下会达到某种平衡,从而达到对检测区域的覆盖。SOM 方法基于网络中并不是所有的区域都是需要关心的区域,只有那些经常有事件发生的地方才是传感器节点最应该覆盖的地方,从而提出了事件驱动的概念。在 SOM 方法中,网络监测区域中分布的各事件点选择离自己最近的节点作为 Winner 节点,事件点是 Winner 节点移动的目标,每迭代一次,所有 Winner 节点移动一次,从而所有节点的相对位置变换一次,下一次迭代重新计算 Winner 节点,再次移动。

2.3 SOM 算法改进

SOM 算法是在了解所有事件的位置之后,优化节点与事件之间的相对位置。很明显,SOM 的方法相比 VFA 更具目的性,但当某个节点不是任何事件的 Winner 节点时,那么这个节点便失去了它应有的作用,如果因为某些原因,初始分布时这种节点比较多,那么网络的覆盖率会下降,节点的利用率也会大大降低,这对于整个网络来说无疑是有害的。为了解决这个问题,经研究分析发现,原有的 SOM 方法只要做出一定程度的改进就可解决这种节点不能移动的现象,结合 VFA 算法的优势,将 VFA 算法中节点间相互的引力和斥力引入到 SOM 算法中,但不是应用于所有节点,而仅应用到那些不是任何事件 Winner 的节点,那些是事件 Winner 的节点继续应用原有的 SOM 算法。下面给出西泾变中针对 SOM 覆盖率的改进方法。

伪代码:

Step1. Set loops=0; Set MaxLoops=MAX_LOOPS;

Step2. While(loops < MaxLoops)

for($x_i \in \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_k\}$)/ * 对于每个事件 */

找出 x_i 的 winner_i

for($s_i \in \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_k\}$)/ * 对于每个传感器节点

*/

if ($s_j \in \{winner_1, winner_2, winner_3, \dots, winner_k\}$)/ *

该节点不是任何事件的 Winner*/

Calculate F_j ;

$W_j^{new} = W_j^{old} + \alpha_{VFA} * F_j$; /* 新坐标用虚拟力的方式更新 */

Else

$W_j^{new} = W_j^{old} + \alpha \sum_{i=1}^k (x_i - W_j^{old})$; /* 用 SOM 的方式更新节点

坐标 */

loops++;

Step3: output $s_i \in \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_k\}$; /* 输出迭代完成的节点 */

通过将 VFA 的虚拟力思想应用到被抛弃的节点,从而使得那些被抛弃的节点重新靠近事件,进而有机会成为某些事件的 Winner 节点,可以参与迭代,完成对事件的覆盖,提高网络的覆盖率。

西泾变中的节点布置采用圆型模型作为节点的感知区域模型,并使用改进的 SOM 算法作为节点的布置策略,各布置策略的效果如图 1—4 所示。

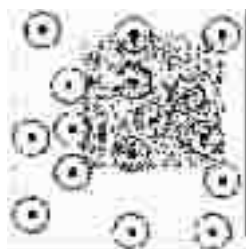


图 1 初始分布



图 2 VFA 算法分布



图 3 SOM 算法分布



图 4 改进 SOM 算法分布

由图 1—4 可看出,使用改进 SOM 算法的节点布置策略,不仅可以很好地实现了对事件的覆盖,而且节点的连通性能也有很大的提高。西泾变通过采用圆型模型作为节点的感知区域模型,并使用改进的 SOM 算法作为节点的布置策略,实现了在保证通信可靠性的基础上,提高无线传感网络的覆盖度。

3 协同感知与多源异构信息的融合

在多传感器系统中,各传感器感知的信息通常具有不同的特征:模糊的或者错误的,相互支持或互补,甚至是相互矛盾或竞争。同时,系统所处的环境也受到各种随机因素的影响而不断地变化。所以需要多个同一类型传感器或多种不同类型传感器进行协同感知,以实现对目标的全面准确检测^[7-9]。协同感知是信息融合的基础,用于在多传感网络系统中感知目标状态、各

种信息的变化等,通过将感知到的信息传输到管控平台进行数据特征提取,信息融合和判断决策,实现对感知目标状态信息的智能化应用。

采用事件驱动策略可以及时发现系统或周围环境中发生的异常事件,并快速通知给管控平台,从而快速作出反应。事件驱动策略能自动捕捉各个协同传感模块采集的事件信息,对其进行处理并通知上层处理系统,为协同感知提供技术基础。在事件驱动策略中,事件处理流程按逻辑被分为4层:事件源、事件通道、事件处理和下游事件驱动活动。策略完整地覆盖了协同感知模型、事件源、事件处理和下游事件驱动活动分别对应协同感知模型中的信息源、信息管理和信息效果表示。在多传感系统中,由各种传感器负责收集信息,并把处理后的信息传输到融合处理系统。同时根据传感器采集信息的内容,可以得知协同系统中的全局信息,从而根据各自的协同机制作出反应,完成协同处理工作。(1) 在策略模型中,事件源即各种传感器感知的信息。为了在每次感知的信息获取后能够被执行,需要对采集的信息生成格式统一的标准事件,并将其放入事件通道中。(2) 事件通道通常是一个消息传递网络,在事件源和事件处理引擎之间传递格式标准化的事件消息。(3) 事件处理是事件驱动架构的核心,实现协同感知中的信息管理。它利用一个复杂事件处理引擎,处理搜集到的基本信息,从而得到更加有效的信息。(4) 下游事件驱动活动主要负责将得到的复杂事件信息发送给信息融合系统。事件管理模型模块主要负责对事件元数据的管理。事件元数据包括事件定义、事件模式匹配条件和处理规则等。

西泾变智能辅助系统中,采取事件驱动协同感知模型以实现有效的协同感知。在安防系统中,振动、红外等传感器采集到的砸墙、人员或动物进入变电站等信息作为事件源,传感网络作为事件通道,在管控平台进行事件处理,通过振动的报警精确位置和红外的翻墙告警协同,确认异常入侵,管控平台调用相应视频采集,得到可靠的入侵事件,通过下游事件驱动活动,发送信息融合系统进一步处理。此外,在消防和水浸系统中,同样采用事件驱动策略的协同感知,有效降低虚警率,提高信息可靠性。

4 辅助系统 IEC 61850 标准化建模

IEC 61850 标准吸收了在面对对象建模、组件、软件总线、网络、分布式处理等领域的最新成果,已成为目前智能变电站网络通信标准。西泾变的智能监测和辅助控制系统中,结合 IEC 61850 标准提出了一种物联网数据交换应用规范,即实现特定通信服务映射(SCSM)对无线传感网(WSN)的映射。通过 GOOSE

数据传输服务实现传感器数据的上送,由于物联网对于低功耗方面的特殊要求及无线传输的限制,相对 ISO/IEC 8802-3 上的映射做了适当的精简,同时不提供在线模型读取及在线配置服务,配置信息以 ICD 方式提供。IEC 61850 标准中没有物联网传感器相关的建模,本文提出了一种传感器建模方式,实现传感器之间的无缝互连,在有联动要求的设备之间实现互操作。传感器设备模型扩展如表 1—3 所示。

表 1 高压电气设备运行温度传感器模型
(WSN-001/MEAS/STMP)

建模信息	属性名	属性类型	M/O	语义
公用逻辑 节点信息	Mod	INC	M	模式
	Beh	INS	M	行为
	Health	INS	M	健康状态
测量信息	NamPlt	LPL	M	逻辑节点铭牌
	Tmp	MV	M	传感器温度

表 2 温湿度传感器模型(WSN-001/MEAS/SHGT)

建模信息	属性名	属性类型	M/O	语义
公用逻辑 节点信息	Mod	INC	M	模式
	Beh	INS	M	行为
	Health	INS	M	健康状态
测量信息	NamPlt	LPL	M	逻辑节点铭牌
	Tmp	MV	M	传感器温度
	Hum	MV	M	传感器湿度

表 3 给排水传感器模型(WSN-001/MEAS/SWSD)

建模信息	属性名	属性类型	M/O	语义
公用逻辑 节点信息	Mod	INC	M	模式
	Beh	INS	M	行为
	Health	INS	M	健康状态
状态信息	NamPlt	LPL	M	逻辑节点铭牌
	AlmFlth	SPS	O	污物告警
	AlmLv	SPS	O	水位告警
测量信息	ValSup	MV	M	用水量
	ValDr	MV	M	排水量
	ValLev	MV	M	水箱水位

5 辅助系统智能管控平台

智能变电站辅助系统由多个子系统构成,这些子系统需要一个公共的管控平台来统一进行管理和控制。站端管控软件集成了站端所有的辅助系统,与集控站智能辅助系统主机完成自动数据交换,接受集控站智能辅助系统主机的命令^[10]。智能辅助系统具备与变电站综合自动化设备的 IEC 61850 协议通道接口,实现各子系统数据集中展示和统一管控的功能。管控系统功能架构图如图 5 所示。

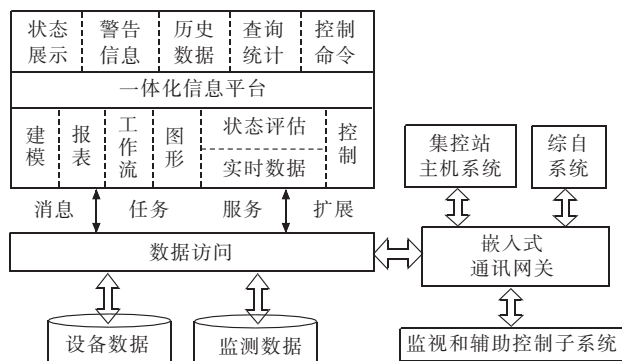


图 5 站端智能管控系统功能架构图

站端智能管控系统是一个兼顾实时监控和历史分析的综合系统。通常来说,实时监测数据在使用过程中对实时性要求比较高,而历史数据对数据存储容量要求较高。主机系统目前采用关系型数据库来完成各种数据的存储,并预留对实时数据库的扩展,为远期接入高实时数据提供接口。

6 结束语

本文结合 220 kV 西泾智能变电站介绍了物联网技术在状态监测与辅助控制系统中的应用。研究基于多传感器协同感知与信息融合技术,提高变电站辅助系统的信息可靠性;基于 IEC 61850 标准建立无线传感网络功能模块的模型,实现不同系统之间的信息交互;开发了多技术融合的集成智能辅助管控平台,完成

全站状态监测及辅助系统数据的集中展示和智能管控,取得了较好的运行效果。

参考文献:

- [1] 卢志俊,黄若函,周招洋. 物联网技术在智能电网中的应用[J]. 电力系统通信,2010,31(213):50-52.
- [2] 王 哲,孙纯军. 物联网技术在智能变电站中的应用[J]. 电力建设,2011,32(10):41-46.
- [3] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报,2009,29(34):1-8.
- [4] 王保云. 物联网技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报,2009,23(12):1-7.
- [5] 鲁东海,孙纯军,秦 华. 基于物联网技术的智能变电站辅助控制与监测系统设计与应用[J]. 华东电力,2011,39(4):567-571.
- [6] 曹一家,何 杰,黄小庆,等. 物联网技术在输变电设备状态监测中的应用[J]. 电力科学与技术学报,2012,27(3):16-27.
- [7] 刘祥志,姜坚鑫,郑清风,等. 变电站视频监控系统行为识别功能设计与实现[J]. 电力系统自动化,2010,34(22):117-119.
- [8] 李 娜,陈 晰,吴 帆,等. 面向智能电网的物联网信息聚合技术[J]. 信息通信技术. 2010,4(2):21-28.
- [9] 陈积明,林瑞仲,孙优贤. 无线传感器网络的信息处理研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(9):1107-1111.
- [10] 龚钢军,孙 毅,蔡明明,等. 面向智能电网的物联网架构与应用方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(20).

作者简介:

林 敏(1956),男,福建福州人,高级工程师,长期从事电力系统运行管理工作。

System and Application of the Internet of Things in Smart Substation Auxiliary

LIN Min

(Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: The rapid development of the Internet Of Things(IOT) technology provides basis for auxiliary system optimization and smart substation information fusion. By taking the 220 kV XiJing smart substation an example, the acquisition and transmission system, one of IOT technologies, is introduced in this paper. Based on the analysis, an optimal arranging scheme of sensors using modified SOM algorithm is proposed. Since the data standard of auxiliary systems is not unified, a unified modeling method based on IEC 61850 standard is studied, and an IOT based auxiliary systems' management and control platform architecture scheme is proposed.

Key words: Internet of Things, Smart substation, Auxiliary systems

(上接第 18 页)

Analysis of Relay Protection Tripping Caused by a Fault on Low Voltage Switch of Main Transformer

WANG Wendong

(Guohua Jiangsu Wind Power Co., Ltd., Yancheng 224200, China)

Abstract: A short-circuit failure of the main transformer caused by overheat of its low voltage switch contact in a wind power plant's 220 kV substation is studied. The reason of the fault, the action of relative 35 kV differential busbar protection, the main transformer protection and the wind turbines protection are analyzed. Based on the analysis of the operation rejection of main transformer's low voltage level back-up protection, countermeasures and suggestions for preventing fault, deploying protections configuration and reducing fault effect are presented to avoid similar accidents.

Key words: wind power plant; transformer substation; main transformers; switch; protection configuration

基于变电站测控数字量的自适应备自投联切装置

冯迎春¹, 陆圣芝¹, 袁 松²

(1.扬州供电公司,江苏 扬州 225001;2.南通供电公司,江苏 南通 226006)

摘 要:基于传统备自投装置联切负荷时缺乏灵活性的缺点,文中提出一种自适应备自投联切装置,对其工作原理进行了介绍,论述了装置与变电站综自系统的信息交互,研究了备自投联切装置在站内设备均正常运行或可能故障状态下的控制流程。该装置能够根据实时变化的负荷情况智能化切除次要负荷,避免了备自投动作后造成变压器过载导致事故范围扩大,从而获得良好的供电可靠性和经济性。

关键词:自适应;备自投装置;以太网;联切负荷

中图分类号: TM762

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)06-0023-02

近年来,为保证供电可靠性,备自投装置在变电站主变中低压侧的应用逐年增多^[1]。但当变电站的负载率较高时,主变低压侧备自投动作将负荷切至另一台主变供电,很容易造成该台运行主变的过载,严重时甚至可能造成该台主变的停运,扩大事故范围^[2-4]。因此,需要根据负荷情况联切部分线路,保证供电变压器不过载。国内外的设备厂家生产的备自投装置,仅设置了过负荷联切回路,根据预先整定的过负荷减载轮次联切负荷^[5,6],缺乏灵活性,易多切或少切负荷。本文提出一种自适应备自投联切装置,能够根据实时负荷情况实现自适应联切负荷,该装置是对变电站主变中低压侧备自投装置的有效补充,较好地解决了主变中低压侧备自投动作后主变安全运行的问题,从而避免变压器过热损坏、变电站全站停电等严重事故的发生。

1 备自投联切装置的工作原理

备自投装置要实现智能性地联切负荷功能,需取得流过变压器各侧开关和所有出线开关的电流来进行计算判断,并且接入联跳所有出线的控制回路。然而,传统备自投装置能接入的模拟量和开关量较少,不具备进行电流综合计算判断的功能,其联切负荷只能通过压板投切预先安排的数条线路来实现,缺乏灵活性,在不掌握主变运行状态的情况下容易多切或少切负荷。如果在已定型的传统备自投装置的基础上进行软、硬件的改造,除了破坏装置本身硬件的模块化与软件的通用性以外,为了与众多的主变、线路间隔联络,还需要施放大量的电流回路、控制回路等二次电缆,使得备自投装置的回路繁杂,施工改造难度大。本文提出的备自投联切负荷装置,通过与原有变电站综自系统通信,收集所需监测线路的负荷信息和备自投装置的工作信息,对线路负荷情况进行综合运算分

析。当发生一台主变失电,备自投动作跳开主变低压侧开关时,该装置根据最近时刻实时负荷情况和预先设定的线路重要性排序,智能切除有可能导致另一台主变过载的次要负荷,确保分段开关合上后,运行变压器不过载。

如图 1 所示。本装置与变电站综自系统通过以太网连接,采用 104 规约通信,获取所需监测线路的实时电流、开关位置信息、备自投装置的运行状态及备自投动作信息,对于线路开关的联切操作也通过综自系统转发遥控指令。整个系统之间的数据交互均通过以太网通信搭建,对于原有变电站综自系统无影响,且施工方便,只需要连接通信、综自系统配置转发表即可。

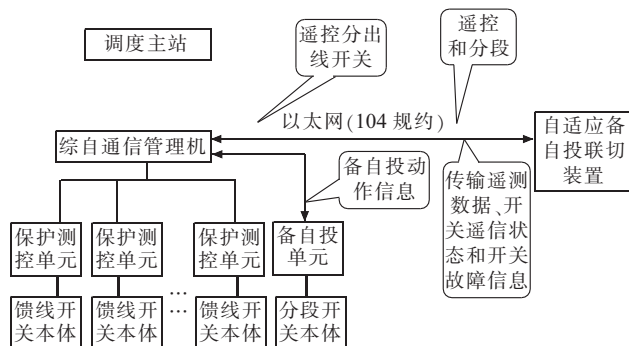


图 1 变电站信息传输交互图

2 正常运行时控制流程

某变电站一次系统如图 2 所示。正常运行时,1QF,2QF 合位,3QF 分位。自适应备自投联切装置从综自通信管理机获得线路 $a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n$ 电流值,计算母线 I, II 馈线电流总值 $I_A + I_B$,并存储在装置缓存区。当变压器 X 故障失电时,备自投动作,跳开 1QF,备自投联切装置在获得综自通信管理机发出的备自投动作信息和 1QF 开关跳闸信息后,启动判断程序(如图 3 所示),调用数据库中变压器 X 失电前一刻的各线路电流值并计算馈线电流总值 $I_A + I_B$,与非故障变压器 Y 电流

限额值 I_Y 比较,如后者大于前者,即判断变压器无过载可能,通过综自通信管理机遥控合分段开关 3QF;如电流条件不满足要求,则按照负荷重要等级由低到高依次模拟切除馈线负荷,直到满足变压器不过载条件后,形成线路跳闸逻辑表,装置通过综自通信管理机联切线路开关,确认线路开关跳闸后,再遥控合分段开关,完成自适应备自投联切装置的整个动作过程。

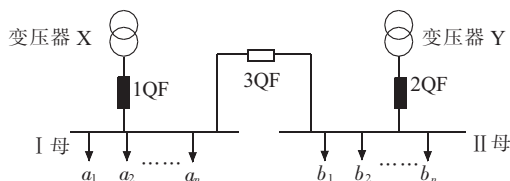


图2 某变电站一次系统图

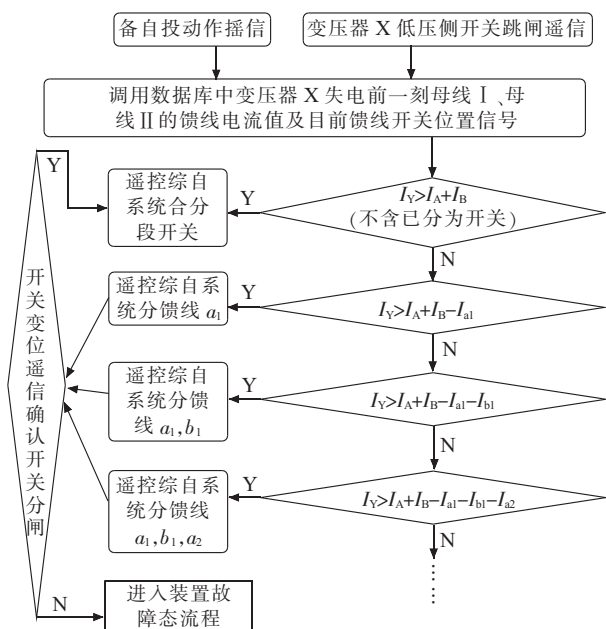


图3 备自投联切装置逻辑判断程序框图

自适应备自投联切装置完成负荷的联切之后向调度主站发送操作遥信,以方便监控和调度确认开关分合闸动作原因,同时在装置内部以文件的形式存储动作逻辑及出口动作信息,以备查询。

3 故障状态下的控制流程

在站内设备或其信息获取异常情况下,自适应备自投联切装置能够与其他设备的配合,完成备自投联切负荷。(1) 某馈线开关无合位置遥信,但有电流。按照该馈线已投入运行处理,流程同正常运行时的流程操作,并报馈线位置异常软遥信至调度,提示处理。(2) 某馈线开关拒动。在自适应备自投联切装置按正常态流程下发需要联切的线路遥控分闸指令后,根据遥信、遥测综合判断某馈线开关没有动作,则启动装置故障态流程,选取剩余线路中负荷重要等级最低的线路电流与该馈线电流进行比较,当一条或多条线路电流累加值大于等于该馈线电流时,装置通过综自通

信管理机遥控这一条或多条线路开关分闸,其它流程仍同正常态流程操作。(3) 备自投装置故障或信息缺失。当无法获取备自投动作遥信,但是从综自系统获知变压器中低压侧开关跳闸变位,母线失电且没有外部闭锁备自投信号时,自适应备自投联切装置启动流程,预判可联切负荷线路,不发遥控指令,将结果上报至调度主站,由调度判断进行人工干预。(4) 自适应备自投联切装置自身故障。当装置自检出错或装置掉电时,装置具有遥信硬接点输出,并接入综自系统,上报调度主站,以便通知检修人员及时赶至现场进行处理。

4 结束语

本文通过研究自适应备自投联切装置的工作原理,提出一种备自投联切装置在站内设备均正常运行或可能故障状态下的控制流程,能够满足基于变电站测控数字量的自适应备自投联切负荷系统功能。

自适应备自投联切装置通过变电站综自系统来采集所需信息和进行联切负荷操作,整个系统之间的数据交互均通过以太网通信搭建。进行老站改造时施工简单方便,只需要增加一些通信电缆,对于原有备自投设备及综自系统影响甚小。该系统的投运可大大提升原有变电站备自投系统的智能化水平。本文设计的备自投联切装置能够克服传统备自投装置联切负荷时选择性机械单一、缺乏灵活性的缺点,可根据实时变化的负荷情况切除负荷,在确保电网主设备安全运行的前提下尽可能减少负荷损失,提高了电网的供电可靠性和经济性。

参考文献:

- [1] 张雄伟,蒋 琪,陈静如.一起备自投拒动事故的分析及解决方案[J].江苏电机工程,2012,31(6):19-21.
- [2] 许 琦,曹建权.防止因备自投动作引起变压器过载跳闸的分析及对策[J].江苏电机工程,2012,31(4):30-33.
- [3] 冯 玲.如何防止备自投装置动作后造成过负荷[J].电气时代,2006(11):106-107.
- [4] 邵 骁,张 琳.重负荷变电站低压侧备投方式应用的探讨[J].江苏电机工程,2008,27(5):51-53.
- [5] 王 凯,段 玫.主变备自投及过载切负荷装置的应用[J].宁夏电力,2007(5):37-38,59.
- [6] 范寿忠.备自投过负荷联切功能的实现[J].电力系统保护与控制,2010,38(5):139-140.

作者简介:

冯迎春(1966),男,江苏盐城人,高级工程师,从事供电公司技术管理工作;
陆圣芝(1981),女,江苏宝兴人,工程师,从事电网运行和继电保护专业管理工作;
袁 松(1974),男,江苏南通人,工程师,从事电网运行和继电保护专业管理工作。

基于感应电动机的暂态电压稳定判据的研究

向昌明¹, 谢晓清²

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 江苏省电力公司检修分公司, 江苏 镇江 212004)

摘 要:提出一种负荷采用感应电动机模型时的暂态电压稳定的判断方法。该判据通过比较扰动后感应电动机电磁转矩和机械转矩以及转差的变化情况来判断负荷的稳定性,以系统的最大传输功率与负荷功率需求的关系来确定负荷失稳是否会导致暂态电压失稳。以单机单负荷系统和 IEEE39 节点系统为例,用 MATLAB 软件进行仿真分析,仿真结果验证了所提出的方法的准确性。

关键词:暂态电压稳定;负荷稳定;感应电动机;最大传输功率;稳定判据

中图分类号:TM346

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)06-0025-04

近几十年来暂态电压失稳事故在电力系统中时有发生^[1,2],给国民经济和人民生活带来严重影响。时域仿真是研究暂态电压稳定问题最常用的方法,它能精确计及动态元件的影响,但计算量大,耗时长,因此一些文献提出了快速判断电力系统暂态电压稳定的方法。文献[3]以电动机功率不平衡量(机械功率与电磁功率之差)的符号和变化趋势或功率不平衡量与机械功率的比值来判断系统的暂态电压稳定性;文献[4]认为受到扰动后,在端电压达到最大值的情况下感应电动机仍减速,则判定系统失去暂态电压稳定,在端电压最小值的情况下仍加速,就可判断它能保持暂态电压稳定;文献[5]以电磁转矩和机械转矩差值达到极值作为判断系统暂态电压失稳的时刻。此外,文献[4]和[5]都把负荷失稳等同于暂态电压失稳,但负荷失稳并不是电压失稳的充分条件^[6],负荷失稳是否会导致暂态电压失稳,还需进一步的判断。本文在文献[5]的基础上,结合负荷失稳与暂态电压失稳的关系,提出了基于感应电动机的暂态电压稳定判据。

1 感应电动机动态特性

感应电动机是电力系统负荷的主要成分,也是最重要的动态负荷,其动态特性对电力系统暂态过程有着显著的影响^[7]。考虑机电暂态的感应电动机的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{dE'}{dt} = -2\pi f_0 \cdot E' - [E' - j(X - X')]I / T' \\ T_J \frac{ds}{dt} = T_m - T_e \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: E' 为转子暂态电势; T' 为暂态时间常数;转子开路电抗 $X = X_s + X_m$;暂态电抗 $X' = X_s + X_m // X_r$; R_s 和 X_s 分别为感应电动机定子绕组的电阻和漏电抗; R_r 和 X_r 分别为转子绕组的等值电阻和漏电抗; X_m 为励磁

电抗; s 为感应电动机转子转差; T_m 和 T_e 分别为机械转矩和电磁转矩; T_J 为转子惯性时间常数。感应电动机的戴维南稳态等值电路如图1所示的等值电路来模拟^[8]。

图1中,等值电势和阻抗分别为:

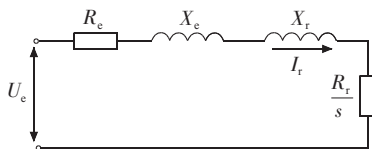


图1 感应电动机戴维南等值电路

$$\dot{U}_e = \frac{jX_m \dot{U}_s}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (2)$$

$$R_e + jX_e = \frac{jX_m (R_s + jX_s)}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (3)$$

2 暂态电压稳定判据

部分文献将电压稳定等同于负荷稳定,文献[4]和[5]把负荷失稳作为电压失稳的充分条件,认为只要有1台感应电动机失稳,系统即失去暂态电压稳定。但文献[6]则认为负荷失稳不是电压失稳的充分条件,只有对失稳节点的电压支持力度小的系统才会失去电压稳定;文献[9]指出感应电动机的失稳不一定会导致系统电压失稳,应根据系统的具体情况来分析。因此本文对扰动后的系统先判断负荷是否失稳,若负荷稳定,则系统保持暂态电压稳定;若负荷失稳,则进一步判断系统是否会暂态电压失稳。

2.1 负荷失稳判定

感应电动机的电磁转矩、机械转矩与转差的关系曲线如图2所示。

根据给定的端电压和 $T_m = T_e$ 可以得出感应电动机的运行点。由图2可得,感应电动机存在稳定运行点 a 和不稳定运行点 b ,端电压越高,所对应的不稳定运行点的转差越大,若感应电动机的转差大于不稳定平衡

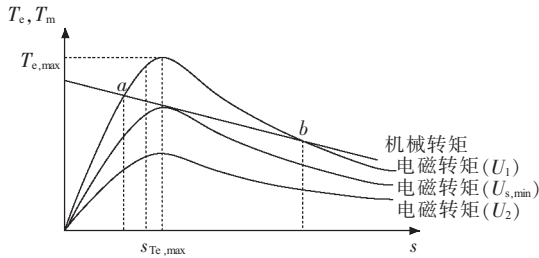


图2 感应电动机转矩转差特性曲线

点的转差,其机械转矩恒大于电磁转矩,感应电动机进入堵转过程,因此当感应电动机的转差大于端电压极大值所对应的不稳定转差时,其转速会逐渐减小。设端电压为极大值时所对应的不稳定转差为 $s_{us(U_{max})}$,故障切除后转差 s_m 选取极小值,若 $s_m > s_{us(U_{max})}$,则判定该负荷失稳,否则该负荷稳定,系统保持暂态电压稳定。

在大扰动的暂态过程中,转矩差极大值对应的时刻驱动转子加速的力矩最大,转子的加速度最大,此时是最有利于转子加速的时刻,可以根据转矩差 ΔT ($\Delta T = T_e - T_m$) 极大值时刻转子的状态给出负荷稳定的判断:在大扰动的过程中,如果转矩差 ΔT 达到极大值 ΔT_{max} 时, $\Delta T_{max} < 0$,即转子仍然减速,转子转差将不断增大,最终堵转,可以判断负荷失稳。

2.2 暂态电压失稳判定

暂态电压失稳往往出现在负荷需求大于系统的最大传输功率,扰动之后线路输送的最大功率减少,达不到负荷的功率需求,因此可以将系统能供给的最大传输功率与负荷需求功率进行比较来判断系统是否失去暂态电压稳定。感应电动机失稳后,若系统能供给的最大传输功率小于感应电动机的需求功率,则系统电压失稳;若系统能供给的最大传输功率表大于感应电动机的需求功率,而感应电动机仍然堵转,则是感应电动机本身失稳,系统仍然是电压稳定的。由图1可得,系统供给感应电动机的电磁功率:

$$P_e = \frac{R_r U_e^2 / s}{(R_e + R_r / s)^2 + (X_e + X_r)^2} \quad (4)$$

当转差变化时,系统能够提供的最大电磁功率:

$$P_{e,max} = \frac{U_e^2 \sqrt{R_e^2 + (X_e + X_r)^2}}{(R_e + \sqrt{R_e^2 + (X_e + X_r)^2})^2 + (X_e + X_r)^2} \quad (5)$$

若由2.1节判断负荷失稳,则比较 $P_{e,max}$ 与电动机负荷机械功率 P_m 。若 $P_{e,max} > P_m$,则系统负荷失稳,系统暂态电压稳定,若 $P_{e,max} < P_m$,则系统暂态电压失稳。

综合以上的分析,本文提出的电力系统暂态电压稳定判断方法为:(1)在故障清除后,若端电压为极大值时所对应的不稳定转差 $s_{us(U_{max})} < s_m$,则该负荷失稳,否则该系统是暂态电压稳定的;(2)在故障清除后,

如果转矩差达到极大值时,转子仍然减速,即 $\Delta T_{max} < 0$,则该负荷失稳。

对于负荷失稳的系统,若 $P_{e,max} > P_m$,则系统负荷失稳,暂态电压稳定,否则系统暂态电压失稳。

3 仿真分析

对所提出的暂态电压稳定判据进行仿真验证,采用 MATLAB/Simulink 软件进行时域仿真。

3.1 单机单负荷系统

选择图3所示的单机单负荷系统,设发电机母线为平衡节点,其电压幅值为1 p.u.,线路阻抗为 $Z = j0.02786$ p.u.,变压器变比为115/13.2,负荷采用60%感应电动机+40%恒阻抗负荷,感应电动机额定容量为800 MV·A,额定电压为13.2 kV,定子电阻 $R_s = 0.01$ p.u.,定子电抗 $X_s = 0.145$ p.u.,励磁电抗 $X_m = 3.3$ p.u.,转子电阻 $R_r = 0.008$ p.u.,转子电抗 $X_r = 0.145$ p.u.。故障采用5 s时输电线路末端发生三相短路,经过时域仿真分析可得,故障切除时间为0.268 s时,感应电动机失去稳定。采用本文判断方法所得的暂态电压稳定分析结果如表1所示。

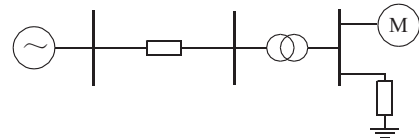


图3 单机单负荷系统

表1 单机单负荷系统暂态电压稳定分析结果

MATLAB 仿真		本文判断方法		
故障切除时刻 /s	时域仿真结果	判断时刻 /s	判据	结论
5.240	暂态电压稳定	5.281	$s_{us(U_{max})} = 0.1835 > s_m = 0.14$	暂态电压稳定
5.260	暂态电压稳定	5.310	$s_{us(U_{max})} = 0.1831 > s_m = 0.16$	暂态电压稳定
5.269	电动机失稳	5.302	$s_{us(U_{max})} = 0.1827 > s_m = 0.1655$	暂态电压稳定
5.275	电动机失稳	5.308	$s_{us(U_{max})} = 0.1821 > s_m = 0.1815$	暂态电压稳定
5.276	电动机失稳	5.315	$s_{us(U_{max})} = 0.1820 < s_m = 0.1831$ $P_{e,max} = 1.25 > P_m = 0.9$	电动机失稳,但暂态电压稳定
5.280	电动机失稳	5.311	$s_{us(U_{max})} = 0.1819 < s_m = 0.1902$ $P_{e,max} = 1.245 > P_m = 0.9$	电动机失稳,但暂态电压稳定
5.480	电动机失稳	5.517	$\Delta T_{max} = -0.012 < 0$ $P_{e,max} = 1.245 > P_m = 0.9$	电动机失稳,但暂态电压稳定

由表1可以看出,故障切除时间小于0.268 s,时域仿真和本文判断方法的结论均为系统暂态电压稳定;切除时间大于0.275 s时,2种方法都能得出电动机失稳的结论;同时,本文判断方法所得的负荷失稳极限切除时间为0.275 s,与时域仿真方法的相对误差为2.6%,因此可以得出:本文判断方法可以较准确地判

断负荷稳定性以及系统的暂态电压稳定性。

但当故障切除时间在 $(0.269, 0.276)$ 区间内时,本文判断方法的结论与时域仿真结果不一致,这主要是由于第2节判断方法(1)偏于乐观造成的。当 $s_{us(U_{max})}$ 略大于 s_m 时,本文方法判定为系统暂态电压稳定,但当转差 s 从 s_m 逐渐增大,感应电动机的电磁转矩下降,可能会小于机械转矩,从而导致感应电动机堵转;当 $s_{us(U_{max})}$ 与 s_m 差值较大时,即故障切除时间较短时,由于电动机端电压较高,对应的电磁转矩较大,不会随着 s 的增大而小于机械转矩,所以与时域仿真的结果相同。

以故障持续时间 0.40 s 为例分析系统的暂态电压稳定性,系统最大传输功率、感应电动机的机械功率以及端电压曲线如图4所示。故障后系统提供的最大电磁功率 $P_{e,max}$ 大于感应电动机的机械功率,说明系统提供的功率能够满足负荷的功率需求,因此虽然感应电动机堵转,但负荷的端电压保持在 0.9 p.u. 以上,并没有低于限定值 0.75 p.u. ^[9],所以负荷失稳并没有引起电压失稳,系统还是暂态电压稳定的。

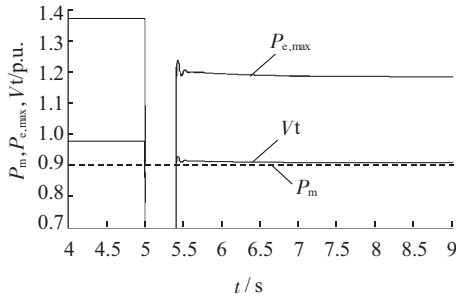


图4 系统最大传输功率和负荷端电压

3.2 IEEE39 节点系统

IEEE39 节点系统如图5所示。假设节点31为无穷大平衡节点,其电压维持等于不变,发电机采用经典二阶模型。系统初始潮流及线路参数参见文献[10]。对发电机端的负荷节点39和发电机升压变高压侧的负荷节点20,23,25,29采用恒阻抗负荷,而其他负荷节点采用感应电动机并联恒阻抗模型,模型参数采用3.1节的值。故障采用节点15于 5 s 发生三相短路,经过一定时间清除故障。经过时域仿真分析可得,故障切除时间为 0.151 s 时,系统失去暂态电压稳定。以节点15的感应电动机为分析对象,系统的暂态电压稳定分析结果如表2所示。

由暂态电压稳定分析结果可以看出,本文判断方法所得的负荷失稳极限切除时间为 0.182 s 。因此可以得出,与时域仿真法相比较,本文的方法可以比较快速地判断系统的暂态电压稳定性,且准确度较高。

以故障持续时间 0.22 s 为例来分析系统的暂态电压稳定性。负荷节点3,15和18的端电压如图6所示。负荷15和18节点的系统最大传输功率如图7所示。

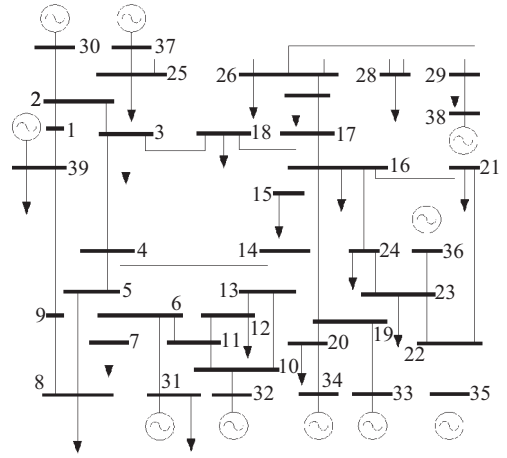


图5 IEEE39 节点系统

表2 IEEE39 节点系统暂态电压稳定分析结果

MATLAB 仿真		本文判断方法		
故障切除时刻/s	时域仿真结果	判断时刻/s	判据	结论
5.030	暂态电压稳定	5.061	$\Delta T_{min}=0.006>0$, $s_{us(U_{max})}=0.2031>s_m=0.12$	暂态电压稳定
5.151	暂态电压稳定	5.191	$s_{us(U_{max})}=0.1865>s_m=0.1750$	暂态电压稳定
5.152	暂态电压稳定	5.182	$s_{us(U_{max})}=0.1864>s_m=0.1752$	暂态电压稳定
5.182	暂态电压稳定	5.215	$s_{us(U_{max})}=0.1830>s_m=0.1823$	暂态电压稳定
5.183	暂态电压稳定	5.220	$s_{us(U_{max})}=0.1826<s_m=0.1828$ $P_{e,max}=0.880>P_m=0.92$	暂态电压稳定
5.205	暂态电压稳定	5.233	$s_{us(U_{max})}=0.1799<s_m=0.1932$ $P_{e,max}=0.872>P_m=0.92$	暂态电压稳定
5.400	暂态电压稳定	5.445	$\Delta T_{max}=-0.015<0$, $P_{e,max}=0.868>P_m=0.92$	暂态电压稳定

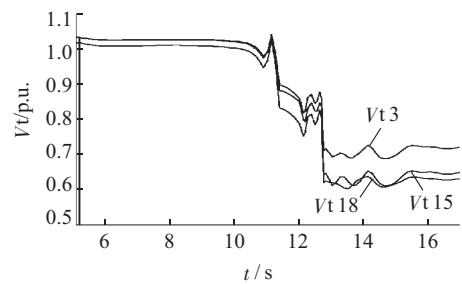


图6 负荷节点3,15和18的端电压

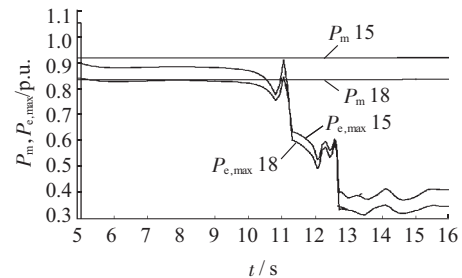


图7 系统最大传输功率

母线3,15和18都有感应电动机并联恒阻抗模型的负荷,且故障点远离发电机,处于负荷区域。扰动后,

负荷节点的电压经过波动最终跌落到限定值 0.75 p.u. 以下。作为主导负荷节点,节点 15 的最大传输功率无法满足动态负荷的功率需求,与节点 15 相比,节点 18 离故障点较远,故障后系统最大传输功率较接近于感应电动机的机械功率,但随着节点 15 失去稳定,其最大传输功率逐渐减小,最终也远小于感应电动机的机械功率,所以系统发生暂态电压失稳。

4 结束语

本文提出了一种基于感应电动机的暂态电压稳定判据,该方法通过转矩差极大值时刻的正负性以及比较故障后转差极值与负荷电压极大值时刻的不平衡转差来判断负荷是否失稳,并以系统的最大传输功率能够满足负荷的功率需求来确定负荷失稳是否会导致暂态电压失稳。通过 MATLAB/Simulink 仿真分析验证了本文方法能够准确、方便地判断和区分系统的暂态电压稳定性和负荷失稳,且与时域仿真相比,缩短了判定时间。

参考文献:

- [1] 张晓阳,王朝明,马春生.考虑电压稳定的 AVC 系统的研究[J]. 江苏电机工程,2010,29(2):30-33.
- [2] 张洪喜.基于 PMU 的支路电压稳定指标[J]. 江苏电机工程,2012,31(2):59-62.
- [3] 段献忠,何仰赞,陈德树.仿真计算中暂态电压稳定性的判断[J]. 华中理工大学学报,1995,23(4):25-28.
- [4] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥.感应电动机暂态电压失稳的定量分析[J]. 电力系统自动化,1996,20(6):12-15.
- [5] 孙华东.计及感应电动机负荷的电压稳定分析及其应用研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2005.
- [6] 廖其龙,颜伟,刘欢.负荷失稳的有界性分析及其与电压稳定的关系[J]. 电力系统自动化,2010,34(3):38-43.
- [7] 林舜江,李欣然,刘杨华.考虑负荷动态模型的暂态电压稳定快速判断方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):14-20.
- [8] 汤涌.电力系统电压稳定性分析[M].北京:科学出版社,2011:32-33.
- [9] 李鹏,余贻鑫,贾宏杰.关于更精确的电压稳定极限描述中所需模型与方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10):21-26.
- [10] 高明,姚建国,张文斌,等.对分布式潮流协调计算收敛机理的一种新分析[J]. 江苏电机工程,2008,27(4):58-62.

作者简介:

向昌明(1965),男,江苏泰兴人,高级工程师,从事电力系统运行和技术工作;
谢晓清(1988),男,江苏无锡人,硕士研究生,从事电力系统运行与控制工作。

Research on the Criterion for Transient Voltage Stability Based on Induction Motor

XIANG Changming¹, XIE Xiaoqing²

(1. Jiangsu Frontier Electric Technologies Co.Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Maintenance Branch, Jiangsu Electric Power Company, Zhenjiang 212004, China)

Abstract: A criterion for transient voltage stability of the power system with induction motor is proposed. The criterion determines the stability of the induction motor by analyzing slip change and comparing the values of electromagnetic torque and mechanical torque. Whether transient voltage instability of power system would be introduced by load instability is determined by the relationship between power systems' maximum power transmission capacity and load's power demand. The correctness of the proposed criterion is verified by the simulation results of a single-generator-single-load system and the IEEE39-bus system.

Key words: transient voltage stability; load stability; induction motor; maximum transmission power; stability criterion

(上接第 24 页)

An Adaptive Automatic Switching Device Based on Substation Digital Data

FENG Yingchun¹, LU Shengzhi¹, YUAN Song²

(1. Yangzhou Electric Power Company, Yangzhou 225001, China;

2. Nantong Electric Power Company, Nantong 226006, China)

Abstract: Traditional automatic switching device lacks of flexibility in load-shedding. Adaptive automatic switching device is proposed to against the defect of traditional device. This paper introduces the principle of adaptive automatic switching device. Information interaction between the device and the substation integration automation system is discussed. The control processes of station equipment in the cases of normal state and fault state are studied. The proposed device intelligently shed less-important load according to real-time load situation. This approach can avoid fault expand brought by transformer overload after automatic switching device activated. It helps to improve power supply reliability and economy.

Key words: Adaptive; Automatic switching device; Ethernet network; Load-shedding

用电信息采集系统集抄用户采集成功率提升研究

顾国栋,周 玉,钱立军,陈 霄
(江苏省电力公司,江苏 南京 210024)

摘 要:为解决自动抄表问题,进一步提高用户电表采集成功率,文中从故障对象、故障现象、故障原因等方面入手,分析了用电信息采集系统采集失败的原因。经统计分析和现场抽样检查,影响采集成功率的因素主要集中在主站与终端之间和终端与电表之间。且分别分析了主站与终端之间和终端与电表之间的几类故障现象和原因,并给出了提升采集成功率的方法,可有效提高集抄用户采集成功率。

关键词:采集成功率提升;主站;终端;电能表

中图分类号:TM734 **文献标志码:**B **文章编号:**1009-0665(2013)06-0029-03

电力用户用电信息采集系统^[1-4]是对电力用户的用电信息进行采集、处理和实时监控的系统,实现用电信息的自动采集、计量异常监测、电能质量监测、用电分析和相关信息发布、分布式能源监控、智能用电设备的信息交互等功能,是实现电网智能化的技术保障之一。

江苏省已全面推进电力用户用电信息采集系统的建设,实现了大范围的用户用电信息的自动采集和计量异常监测。但是在实际运行当中,主站与终端之间和终端与电表之间的一些故障影响了整个采集系统的采集成功率,本文以江苏省用电信息采集系统为依托,根据全省低压用户用电信息的统计和现场抽样核查,分析了几类采集故障现象和原因,并提出了提高采集成功率的方法。

1 系统采集成功率现状及采集失败原因

江苏全省低压用户采集投运终端总数为 863 036 台,投运电能表总数 21 463 082 只,采集电表成功 20 480 804 只,采集成功率为 95.42%。经过统计分析和现场抽样核查,将采集失败原因归结为主站与终端之间、终端与电表之间 2 个层面:其中主站与终端之间终端通信失败 59 827 只,占投运终端 6.94%,涉及电能表 334 390 只,失败率占比 1.56%;终端与电表之间电表失败 647 888 只,失败率占比 3.02%,涉及终端 192 289 只,占投运终端 22.28%。如表 1 所示。

1.1 主站与终端通信异常

全省主站与终端之间失败终端 59 827 台,对采集成功率影响占比为 1.56%。影响采集成功率主要原因有

表 1 采集失败统计情况

序号	故障类型	故障原因	失败终端数 / 只	占比 / %	失败终端数 / 只	占比 / %	对成功率影响占比 / %
1	主站与终端之间	终端无法通信(停电)	3231	5.40	26 866	8.03	0.13
2		终端无法通信(其他:设备遗失,天线故障,网络完全无信号,无 sim 卡或 sim 卡无效)	16 660	27.85	134 865	40.33	0.63
3		终端通信堵塞(登录、事件上报频繁)	30 763	51.42	138 276	41.35	0.64
4		终端时钟偏差	1609	2.68	2496	0.75	0.01
5		终端信号弱(不稳定)	7624	12.74	31 887	9.54	0.15
合计			59 827	—	334 390	—	1.56
6	终端与电表之间	非运行电能表(现场被拆除或更换的电能表)	29 950	15.58	63 531	9.81	0.30
7		档案不正确(参数未下发、同一终端下表计归属部门不一致)	3645	1.90	17 011	2.63	0.08
8		用户停电(营销业务)	7984	4.15	10 767	1.65	0.05
9		非正常建档	11 067	5.76	19 175	2.96	0.09
		智能表时钟偏差	20	0.01	30	0.00	0.00
10		其他(终端通信口故障,电表 485 总线故障,II 型采集器故障,485 线接错或者断开,用户自己停电,载波通信路径故障,485 局部线故障,电表 485 端口故障)	139 623	72.62	537 374	82.95	2.50
合计			192 289	—	647 888	—	3.02

终端无法通信、终端通信堵塞、终端时钟偏差、终端信号弱(不稳定)等^[5-7]。其中终端无法通信 19 891 台,对采集成功率影响占比为 0.76%;终端通信堵塞 30 763 台,对采集成功率影响占比为 0.64%;终端时钟偏差 1609 台,对采集成功率影响占比为 0.01%;终端信号弱(不稳定)7624 台,对采集成功率影响占比为 0.15%。

1.1.1 终端无法通信

全省终端无法通信总数为 19 891 台,占投运终端 2.30%,涉及电能表 161 731 只,对采集成功率影响占比为 0.76%。其中有停电事件记录且长时间无法通信的终端为 3231 台,占投运终端 0.37%,涉及电能表 26 866 只,对采集成功率影响占比为 0.13%;其他无法通信的终端全省总数为 16 660 台,占投运终端 1.93%,涉及电能表 134 865 只,对采集成功率影响占比 0.63%。主要包括设备遗失,设备自身质量问题,天线故障,网络完全无信号,无 sim 卡或 sim 卡无效等。从现场抽样 24 台因其他原因无法通信的终端调查结果来看,人为把电源线剪断或空开跳开造成终端停电的 2 台,占无法通信的终端 8.33%;终端自身质量问题 10 台,占无法通信的终端 41.67%;网络完全无信号(地下室)12 台,占无法通信的终端 50%。

1.1.2 终端通信堵塞

全省因频繁登录或事件上报而造成终端通信堵塞总数为 30 763 台,占投运终端 3.57%,涉及电能表 138 276 只,对采集成功率影响占比为 0.64%。此类故障基本为设备自身故障造成的,表现为终端登录、事件上报频繁,数据采集不稳定或不齐全。

1.1.3 终端时钟偏差

全省终端时钟偏差大于 15 min 的总数为 1609 台,占投运终端 0.19%,涉及电能表 2496 只,对采集成功率影响占比为 0.01%。其中 DC-GL14(RS485 方式)65 台;DJ-GZ24(载波方式)9 台;GPRS 电能表 1535 台,GPRS 电能表为绝大多数,占时钟偏差终端 95.40%,主要为目前主站无法对 GPRS 电能表进行校时。

1.1.4 终端信号弱(不稳定)

全省终端信号弱(不稳定)总数为 7624 台,占投运终端 0.88%,涉及电能表 31 887 只,对采集成功率影响占比 0.15%。此类故障基本为终端所在区域通信信号弱造成的,从现场抽样 20 台信号弱的终端调查结果来看,移动信号弱的 10 台,占抽样信号弱的终端 50%;终端安装位置不符合要求的 6 台,占抽样信号弱的终端 30%;天线(5 M)过长导致信号衰减过大的 4 台,占抽样信号弱的终端 20%。

1.2 终端与电表通信异常

全省应采电能表 21 463 082 只,终端与电表之间失败电能表 647 888 只,对采集成功率影响占比为

3.02%。影响采集成功率主要原因有非运行电能表、档案参数不正确、营销业务停电、非正常建档、智能表时钟偏差及电能表 485 总线故障、485 线接错或者断开等其他故障。

1.2.1 非运行电能表

全省终端与电表之间采集失败电能表 647 888 只,系统内非运行电能表 63 531 只,占比为 9.81%,对采集成功率影响占比为 0.30%。此类故障基本为现场电能表被拆除或更换,营销档案未及时归档造成的。

1.2.2 档案参数不正确

全省终端与电表之间采集失败电能表 647 888 只,系统内档案参数不正确电能表 17 011 只,占比为 2.63%,对采集成功率影响占比为 0.08%。此类故障基本为主站调试不力造成的。

1.2.3 营销业务停电

全省终端与电表之间采集失败电能表 647 888 只,系统内营销业务停电电能表 10 767 只,占比为 1.65%,对采集成功率影响占比为 0.05%。此类故障属正常业务停电。可从影响采集成功率原因中剔除。

1.2.4 非正常建档

全省终端与电表之间采集失败电能表 647 888 只,因临时用电和卡表在采集系统内建空档案的电能表 19 175 只,占比为 2.96%,对采集成功率影响占比为 0.09%。其中,临时用电电能表 3945 只,占比为 0.61%;卡表 15 230 只,占比为 2.34%。

1.2.5 智能表时钟偏差

全省采集系统中可比对智能电能表 12 045 511 只,时钟偏差大于 15 min 的电能表 10 790 只,占比 0.09%。时钟偏差大于 15 min 的电能表中采集失败电能表 30 只,对采集成功率影响可忽略。

1.2.6 其他

全省终端与电表之间采集失败电能表 647 888 只,因其他原因造成采集失败的电能表为 537 404 只,占比为 82.95%。此类故障对采集成功率影响占比为 2.5%。其他原因主要包括终端通信口故障,电表 485 总线故障,II 型采集器故障,485 线接错或者断开,用户自己停电,载波通信路径故障,485 局部线故障,电表 485 端口故障等。从现场抽样 50 只失败电能表调查的结果来看,施工接线问题(电能表 485 总线故障、485 线接错或者断开、485 局部线故障)43 只,占抽样失败电能表 86%;电能表 485 端口故障 3 只,占抽样失败电能表 6%;电能表空开被拉掉或停电 4 只,占抽样失败电能表 8%。

2 提高采集成功率的方法

要提高采集成功率,需对造成采集失败的故障进

行排除。本文针对主站与终端之间和终端与电表之间通讯异常,分别提出了排除方法。

2.1 主站和终端通信异常排除方法

(1) 因停电或其他现场问题(不包括移动信号问题)造成终端完全无法通信的,建议加大运维资源投入,建立健全运行维护体系,对于设备自身质量问题的,尽快更换,并充分应用主站系统统计分析功能,常态化开展对采集设备异常的处理和消缺。解决此类故障可提高采集成功率 0.76%。

(2) 因频繁登录或事件上报造成终端通信堵塞的,建议加强终端运行质量的跟踪分析,建立终端运行异常运维体系,及时处理运行异常终端,提高终端可用率和可靠率。解决此类问题可提高采集成功率 0.64%。

(3) 因终端时钟偏差造成采集成功率低的,建议对主站无法校时的 GPRS 电能表加强运行质量的跟踪管控。解决此类故障可提高采集成功率 0.01%。

(4) 因终端信号弱(不稳定)造成采集成功率低的,建议加强与省移动公司沟通,解决区域性信号弱问题;并根据现场实际情况,合理选择终端安装位置或将终端天线引出等,对于终端天线(5 M)过长导致信号衰减过大,建议换装 1.5 M 天线。解决此类故障可提高采集成功率 0.15%。

2.2 终端与电表通信异常排除方法

(1) 因现场电能表被拆除或更换而造成采集成功率低的,建议加大营销档案的梳理工作,及时维护和更新系统内电能表档案。解决此类故障可提高采集成功率 0.30%。

(2) 因系统内参数未下发、同一终端下表计归属部门不一致而造成采集成功率低的,建议核对清查采集系统内电能表的档案信息,使采集与营销系统的档案一致。对运行中拆除和更换的电能表,在做好档案更新同时及时下发参数。解决此类故障可提高采集成功率 0.08%。

(3) 因非正常建档(卡表及临时用户等)问题而造成采集成功率低的,建议在采集系统内删除卡表档案,

加快远程费控普及应用,尽快更换卡表。解决此类故障可提高采集成功率 0.09%。

(4) 因电表 485 总线故障、485 线接错或者断开、载波 485 局部线故障、电表 485 端口故障等问题造成采集成功率低的,建议健全运维体系,加强运维力量,强化载波采集器的质量管控。解决此类故障可提高采集成功率 2.50%。

3 结束语

本文以江苏用电信息采集系统海量数据为依托,剖析了通信主站与终端、终端与电表间的通信异常原因,并基于异常原因提出了提高采集成功率的有效方法,为电力用户实现全采集提供了技术保障。

参考文献:

- [1] KIKUCHI H, MURATA K, TAKAHASHI F. Automatic Meter Reading Systems for Bulk Customers [J]. Fuji Electric Journal, 1998(17).
- [2] 宇文肖娣. 电力用户用电信息采集系统的应用[D]. 保定:华北电力大学硕士学位论文, 2011.
- [3] 王晓峰, 李庚清. 用电信息采集系统发展新趋势[J]. 电力需求侧管理, 2010, 12(5): 59-61.
- [4] 宋思扬. 电力营销中用电信息采集系统建设研究[D]. 北京:华北电力大学硕士学位论文, 2011.
- [5] 徐伟, 王斌, 姜元建. 低压电力线载波通信技术在用电信息采集系统中的应用[J]. 电测与仪表, 2010, 47(7A): 44-47.
- [6] 陈兰英, 孔媛媛. 电力线载波通信技术的发展与应用前景[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(6): 56-58.
- [7] 梁怡帆. 应用低压电力载波技术实现远程抄表[J]. 江苏电机工程, 2004, 23(3): 60-62.

作者简介:

顾国栋(1968),男,江苏无锡人,高级工程师,从事电力计量研究工作;

周玉(1982),男,江苏镇江人,工程师,从事电力计量研究工作;

钱立军(1977),男,江苏无锡人,工程师,从事电力计量研究工作;

陈霄(1985),男,江苏连云港人,工程师,从事电力计量研究工作。

Research on the Improvement of the Data Acquisition Success Rate of Power-consuming Information Acquisition System

GU Guodong, ZHOU Yu, QIAN Lijun, CHN Xiao

(Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: To collect data automatically and improve the data acquisition success rate, the reasons of data acquisition failure are analyzed from the view of malfunction object, phenomenon and cause. According to statistical analysis and sampling inspection, it is concluded that the factors affecting data acquisition success rate mainly concentrate between the main station and the terminal and the terminal and energy meter. This paper analyzes several kinds of problems occurring between the main station and the terminal and the terminal and energy meter. Based on these analyses, a new method is proposed to improve the data acquisition success rate.

Key words: Data acquisition success rate, Main station, Terminal, Electric energy meter

基于 LabVIEW 的稳控装置测试系统设计

周晓宁,袁 康,梁 晖,曲晓蕾

(国网电力科学研究院 / 南京南瑞集团公司,江苏 南京 210003)

摘 要:随着电网发展对稳控装置的要求越来越高,稳控装置的发展速度日益加快,如何开发有效的稳控装置测试系统、提高测试效率、保证稳控装置的可靠性是摆在装置生产企业面前的一个重要问题。文中分析了稳控装置测试系统的功能需求以及需要解决的问题,提出了一种基于 LabVIEW 的稳控装置测试系统,该系统能够有效地提高稳控装置测试系统的开发效率和使用效率,为稳控装置的质量和电网安全稳定运行提供强有力的保障。

关键词:LabVIEW;稳控装置;测试系统;虚拟仪器

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)06-0032-03

电力系统稳定控制装置是为保障电网安全稳定运行而专门设计的一种专用自动控制装置,通常被配置于电力系统稳定第二道防线和第三道防线中^[1,2]。随着特高压电网建设和大区互联电网建设的不断发展,电网结构日益复杂,区域电网间的联系不断加强,稳控装置的应用愈发广泛。同时,由于稳控装置的应用焦点逐渐转向区域性电网和跨区互连电网的安全稳定控制^[3,4],其影响范围也不断扩大。一旦稳控装置出现故障,轻则导致装置退出运行,电网由于失去保护而不得不限负荷运行,重则导致装置误动、拒动,给电网运行和设备安全造成巨大损失。因此,通过有效的测试手段保证稳控装置的可靠性是摆在装置生产企业面前的一个重要问题。

由于电网的不断发展,对稳控装置的计算、控制和协调能力不断提出新的更高的要求。另外随着数字化变电站的推广应用,也为稳控装置的设计研发带来了新的课题。因此稳控装置的更新升级速度也不断加快,以南瑞稳定的产品为例,从早期的 DPY,UFV-2 系列,到 UFV-200,FWK-300 系列,再到 SCS-500,SCS-600 系列^[5,6],产品的更新频率逐渐提高到 2~3 年。如何能让测试系统快速适应不同装置的测试需要,并且降低开发人员和测试人员的工作量、提高工作效率,是开发稳控装置测试系统的首要问题之一。

1 测试系统需求分析

1.1 测试系统功能要求

稳控装置的测试主要包括 3 个方面:(1) 单板硬件测试:测试板内硬件功能,如采样回路、开入开出、存储芯片等;(2) 整机硬件测试:测试板间通信情况,包括总线背板、插件通信接口等;(3) 整机软件测试:测试整套装置逻辑功能,对于由多套装置组成的稳控系统,还需要测试整个系统的逻辑功能配合情况。

1.2 需要解决的问题

传统的测试方法主要存在以下几方面的问题:

(1) 硬件测试效率。由于稳控装置更新速度快,批量较小的特点,不可能采用类似工业流水线的全自动测试方式。因此,在测试过程中必将有许多需要测试人员参与的环节,如仪器设置、数据记录等等。如果能够提高测试环节中的自动化水平,那么将大大提高硬件测试的效率。

(2) 软件测试效率。稳控装置的应用往往是针对电网特性量身定制的,因此除了极少数的应用外(如低频低压减载装置),大部分稳控装置的逻辑功能是不尽相同的,这给稳控装置的软件调试带来了极大的挑战。目前,通过使用专用的稳控装置测试仪器可以模拟大多数电网的典型故障,给软件测试带来了很大的便利,但对于需要多装置协同的稳控系统调试、以及精确测试装置响应时间等应用而言,目前仍缺乏较为简易的实现方式。

(3) 测试系统开发和培训效率。在硬件测试中,提供给测试人员的用户界面一般有 2 种,一种是利用测试装置的液晶显示屏为用户提供操作环境,由于现在的装置显示模块多采用嵌入式操作系统开发,开发工作量较大且界面友好度较差,不同装置的界面难以统一,对测试人员培训造成了一定的障碍,而且对于不支持即插即用的板件而言,每次更换测试样品后等待系统启机会明显影响测试效率;另一种方式是利用装置通讯接口与 PC 机连接,在 PC 机上开发测试程序,这种方式测试效率较高,用户界面友好度较好,但目前多使用 C/C++ 进行开发,对开发人员的要求相对较高。

2 基于 LabVIEW 的稳控装置测试系统

2.1 设计原则

为了解决上述问题,本文提出了一种基于 LabVIEW 的稳控装置测试系统,该系统的设计原则是:(1) 能够

满足不同型号稳控装置的测试要求,并能够以尽可能小的开发工作量进行升级,以适应新装置的测试需要;(2)能够提供友好的操作方式,以提高测试人员的工作效率;(3)能够以比较便捷的方式,满足多装置协调测试等软件测试需求。

2.2 虚拟仪器和 LabVIEW

虚拟仪器(VI),是指在以通用计算机为核心的硬件平台上,由用户自己定义、设计虚拟的操作面板,测试功能由测试软件来实现的一种计算机仪器系统^[7]。

实验室虚拟仪器工程平台(LabVIEW)是一种用于科学和工程领域的图形化编程开发环境^[7],它是实现虚拟仪器的主要工具。选择 LabVIEW 作为测试系统的开发工具,至少具有以下几个方面的优势:

(1)灵活性和可扩展性。与传统仪器相比,虚拟仪器以软件为核心,打破了传统仪器固定外观、固定功能的模式,让用户根据自己的实际需要,灵活地定制系统。采用基于 LabVIEW 和虚拟仪器开发测试系统,不仅可以充分满足稳控装置不断变化的测试需求,而且更新速度快,成本低。

(2)友好的人机界面。对于终端用户而言,需要面对的不再是一堆各种式样的仪器面板,而是采用图形化编程技术实现的虚拟面板。这样,无论针对何种装置的测试,都可以开发出风格接近的控制面板,便于测试人员熟悉和掌握操作方法。

(3)强大的互连能力。LabVIEW 不仅提供了对 RS-232、RS-485 串口协议的支持,而且能满足 GPIB, VXI, PXI 等工业总线的控制需要,另外还能提供了基于 TCP/IP, ActiveX 等标准的库函数。因此,基于 LabVIEW,不仅可以通过工业总线和网络将众多仪器设备构成一个整体,还可以利用软件模拟各种仪器设备,以满足不同的测试需求。

(4)便捷的开发方式。LabVIEW 是一种纯图形化的开发环境,相对于 C/C++ 而言,更容易上手,有助于提高测试系统的开发效率。同时,利用 LabWindows/CVI,还可以集成 C 语言程序,从而方便地继承既有成果,有效地减少重复开发。

2.3 硬件测试系统的实现

与软件测试相比,稳控装置的硬件测试只与装置和板件的型号相关,测试内容固定、重复性强。因此,在设计时将硬件测试系统与软件测试系统独立开来加以实现。出于用户界面统一和良好的可扩展性的考虑,硬件测试系统的用户界面由两部分组成:提供测试内容选择的树形结构和测试过程中使用的虚拟面板。如图 1 所示。

LabVIEW 中提供了功能丰富的树形结构控件,通过树形结构+事件响应的设计(如图 2 所示),可以将



图 1 硬件测试系统用户界面

各种类型的测试集成到一个应用程序中,让测试人员方便快捷地找到测试项目,通过双击所需的测试选项,即可在虚拟面板中打开操作界面,改变了以往测试过程中在各种软件间切换的状况,提高了测试效率。

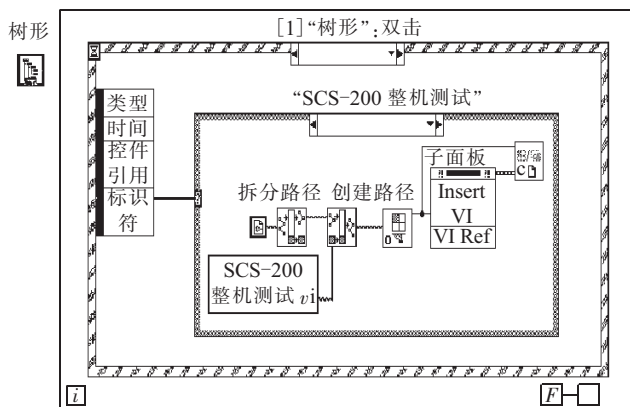


图 2 树形结构的事件响应

虚拟面板的设计则采用 LabVIEW 提供的子面板技术。子面板是 LabVIEW 8.0 之后引入的容器型控件,其使用方式与动态调用类似,但具有 2 个明显的优点:一是通过子面板调用 VI,可直接将被调用 VI 的前面板加载到调用方的子面板界面中;二是通过子面板调用其他 VI 时,自动终止子面板中调用的前一个 VI^[8],不需要人为释放资源。这样,测试系统开发人员只需针对不同的测试应用分别编写相应的子 VI,再在主系统中增加相应的选项通过子面板控件进行调用即可。如此一来,既可以保证用户界面的统一风格,又体现了良好的可扩展性。

2.4 软件测试系统的实现

软件测试系统的作用是验证稳控装置或系统的逻辑正确性,主要包括控制系统、数据输出、数据输入等部分,软件测试系统的组成框图如图 3 所示。

(1) 控制系统由 PC 机、工控机或专用控制器实现,主要负责用户界面、数据输入输出控制、数据分析等功能。

用户界面提供给测试人员的操作界面,对输出模

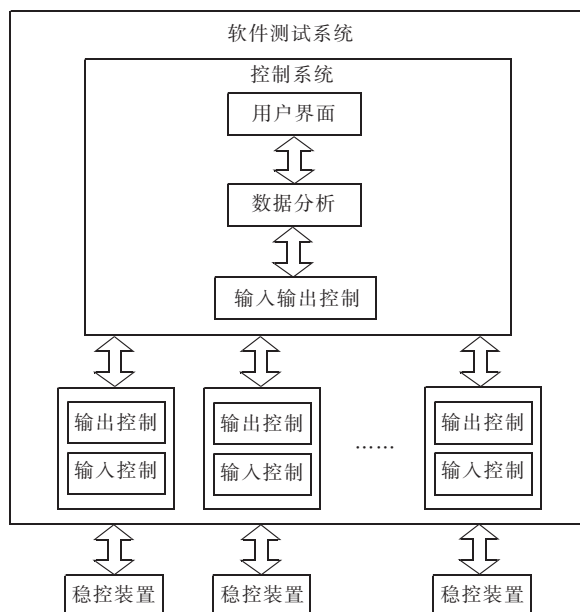


图3 软件测试系统组成框图

式、故障类型、时序关系等参数进行设置,并将测试结果反馈给测试人员;输入输出控制是通过 GPIB,PXI 等接口控制 I/O 单元,将根据用户设置的相关参数生成的数据交由输出单元产生输出信号,读取输入单元的采集数据;数据分析则将输入输出信号进行处理,生成测试结果,反馈给测试人员。数据分析的简要流程图如图 4 所示。

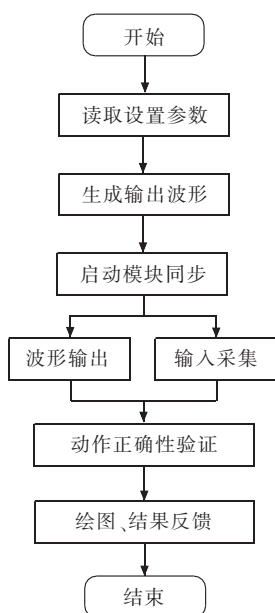
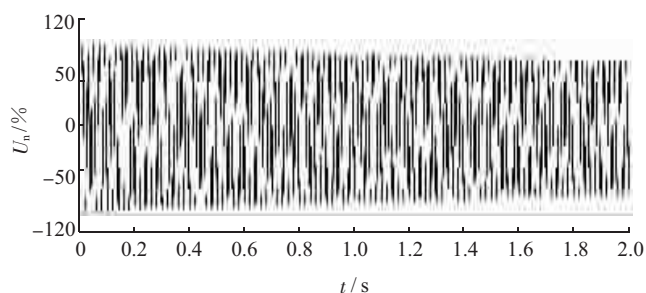


图4 数据分析流程

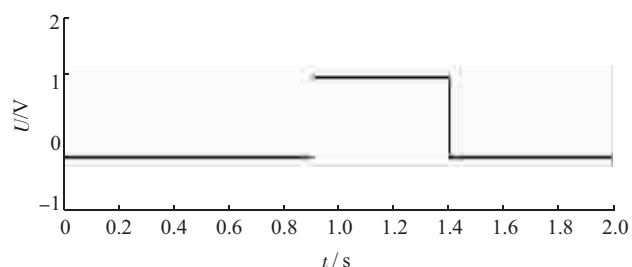
(2) I/O 单元包括模拟量 / 数字量输出以及模拟量 / 数字量输入单元,可以采用支持 GPIB,RS-232 控制的独立仪器,如任意波形发生器、示波器、台式万用表等;也可以采用基于 PCI,PXI 总线的模块化仪器。

模拟量 / 数字量输出单元是利用输出的模拟 / 数字信号,模拟稳控装置决策所需的电气量、开关量等信

号,模拟量 / 数字量输入单元是采集稳控装置输出的控制信号,以验证稳控装置动作的正确性。验证稳控装置低压动作的波形如图 5 所示。其中输出是母线电压下降的过程,输入是装置出口动作的情况。



(a) 低压动作测试输出波形



(b) 低压动作测试输入波形

图5 低压动作测试波形

依靠虚拟仪器的信号同步技术,可以精确同步多路输入 / 输出信号,从而达到多装置协同测试、精确测试装置响应时间等应用的需求。

3 结束语

基于 LabVIEW 的虚拟仪器技术与传统的测试系统开发方式相比,在灵活性、可扩展性、互联能力等方面都具有明显的优势,将该技术应用于稳控装置测试系统的开发,可以充分发挥其优点,以较小的人力、物力和时间成本,充分满足稳控装置不断变化的测试需求,有效地提高稳控装置测试系统的开发效率和使用效率。同时,基于 LabVIEW 的稳控装置软件测试系统可以有效地解决多装置协同的稳控系统调试、以及精确测试装置响应时间等应用难题,提高装置测试的针对性和准确性,为稳控装置的质量和电网安全稳定运行提供强有力的保障。

参考文献:

- [1] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
- [2] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J]. 电力系统自动化,2006,30(3):1-10.
- [3] 周 磊,周 霞,罗凯明,等. 江苏低频低压减载与负荷联切协调配置研究[J]. 江苏电机工程,2012,31(4):6-8.
- [4] 丁留宝,王 健. 银东直流西北侧电网稳定控制系统实现[J]. 江

STATCOM 接入泰州电网仿真分析

叶 勇,陆 路,李 杰

(泰州供电公司,江苏 泰州 225300)

摘 要: 文中介绍了静止无功发电机 (STATCOM) 的工作原理,以泰州地区 220 kV 电网为模型,结合理论分析和 MATLAB 软件辅助仿真的方法,分析了泰州电网的运行情况,设计了泰州地区 220 kV 电网 STATCOM 接入点及接入容量方案,仿真实验验证了 STATCOM 对 220 kV 电网潮流的改善能力及对 220 kV 母线电压的支撑能力。

关键词: 无功补偿;静止同步补偿器;潮流分布;无功功率

中图分类号: TM761 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-0665(2013)06-0035-04

目前,电力系统存在无功补偿容量不足,大部分补偿装置难以满足现代电力系统的补偿要求。现代电力系统中感性负载占很大比例,大量感性负载必须吸收无功功率才能正常工作,提供无功功率合理的方法应该是在需要消耗无功功率的地方进行补偿^[1]。针对泰州电网近几年的运行数据,现有无功补偿装置落后的 2 个方面:(1) 部分电容器补偿投切装置选用机械式交流断路器,寿命短,响应速度慢,投切过程会对系统产生冲击电压和冲击电流;(2) 大多数补偿器为有级调容,无功补偿精度不高。

静止无功发电机(STATCOM)提供了一个很好的解决方案,它是由变流器构成的静止无功调节装置,可以发出和吸收无功功率。直流侧的电容器维持了直流电压,不需要大容量。STATCOM 能提供稳定的无功电流,在改善系统电压质量,提高稳定性方面有很大优势^[2]。在输电线路中,应用 STATCOM 将能维持电压水平,本文针对泰州 220 kV 电网部分进行补偿后的电压分析;同时应用 STATCOM 也可以减少网损,本文针对不同补偿方案进行了网损分析。

1 STATCOM 的工作原理

1.1 STATCOM 的特性

STATCOM 又称为静止同步补偿器,是在 20 世纪 80 年代以来出现的更为先进的静止无功补偿装置,属于 FACTS 的重要组成部分^[3]。STATCOM 基本原理如图 1 所示。STATCOM 是通过电压源变流器(VSC)实现的可控无功电源,VSC 的直流侧是一组直流支撑电容,经过 PWM 将直流电压逆变为交流输出电压,同时可以控制交流输出的电压幅值和相位^[4]。STATCOM 的交流输出经过限流电抗器与系统连接,忽略其损耗后,可以将 STATCOM 与系统之间无功功率的交换理解为改变 VSC 的输出电压幅值 U_i 来控制。具体控制过程如表 1 所示。

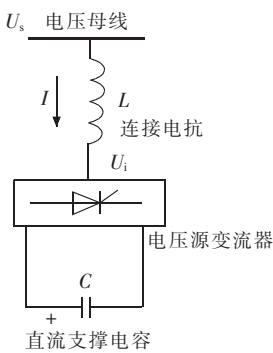


图 1 STATCOM 的基本原理

表 1 STATCOM 电压控制

序号	条件	结果
1	输出电压幅值 U_i 与系统电压 U_s 同相,且幅值高于系统电压 U_s	STATCOM 向交流系统发出无功功率
2	输出电压幅值 U_i 与系统电压 U_s 同相,且幅值低于系统电压 U_s	STATCOM 从交流系统吸收无功功率
3	输出电压幅值 U_i 与系统电压 U_s 同相,且幅值等于系统电压 U_s	STATCOM 处于零无功运行状态

STATCOM 的 U - I 特性如图 2 所示,STATCOM 可以在容性额定值到感性额定值范围内提供连续可调节的无功功率。从图 2 中不难看出 STATCOM 在暂态过程中有短时过载的输出能力。

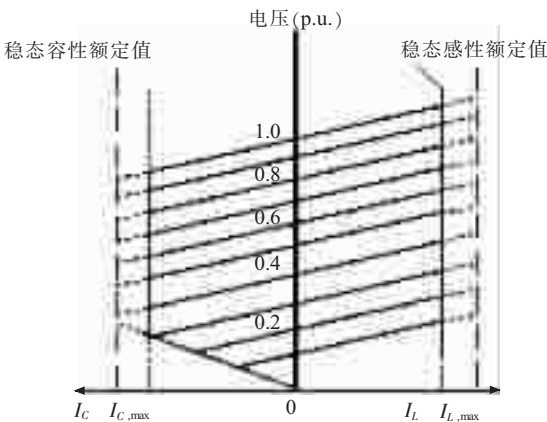


图 2 STATCOM 的 U - I 特性

1.2 STATCOM 的控制

STATCOM 在输电系统中的主要控制目标,一般有维持系统电压、提高系统暂态稳定性、增强系统阻尼等,按控制物理量划分,可以分为:(1) 直接电流控制。直接电流控制是对电流瞬时值的跟踪控制,参数设计比较困难,而且要求电路中电力电子开关器件的开关频率高,这样的控制法不适用于大功率 STATCOM 场合。(2) 间接电流控制。间接电流控制分为单 δ 控制和逆变器导通角 θ 与 δ 配合控制,因为 θ 与 δ 配合控制法包含的系统参数有极大的不确定性,所以要求 STATCOM 控制器自适应性强,实现难度也较大。一般间接电流控制法采用单 δ 控制,并且应用于大容量 STATCOM,但针对大容量系统的开关频率降低,输出的电压会有大量谐波产生,为减少谐波从而提高直流电压的利用率,可采用多重化、多电平或 PWM 控制技术^[5]。图 3 为 ± 20 Mvar STATCOM 装置控制器示意图,主要实现的功能如表 2 所示。

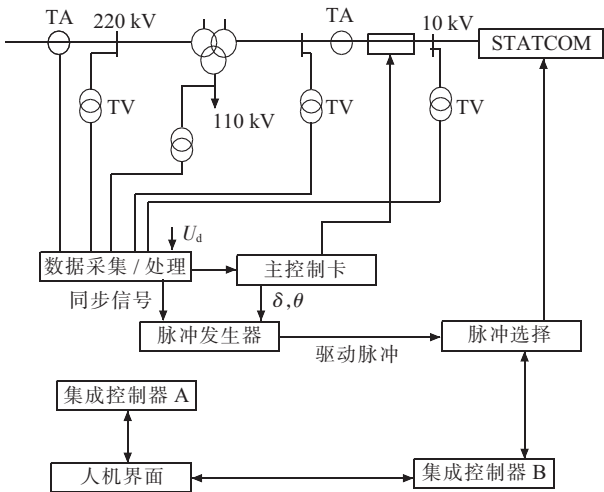


图 3 STATCOM 本地控制系统结构示意图

表 2 ± 20 Mvar STATCOM 装置控制器主要功能

序号	实现功能
1	产生驱动脉冲,经门极驱动电路放大后去控制 GTO 的导通和关断。
2	脉冲同步,产生与电网电压同步的脉冲信号,使 STATCOM 可靠的并网运行。
3	控制 STATCOM 的运行状态: (1)开环手动方式(手动调节 δ 角,用于调试) (2)闭环恒无功方式(使 STATCOM 在给定无功状态下运行,考验其运行能力) (3)闭环恒电压方式(根据控制目标的要求,控制 STATCOM 装置输出电压和电网电压的相角差 δ ,从而准确控制其输出无功功率。
4	完全控制 STATCOM 装置的电流,保护其不过流。
5	自我容错功能,如 TV 断线,控制系统能报警。

1.3 STATCOM 的补偿

电力系统中的负荷电流含有无功分量,STATCOM 投运前,负荷电流的无功分量完全由系统承担,当

STATCOM 接入系统后,将产生容性无功电流补偿,为系统提供了无功支撑^[7]。理论上 STATCOM 将完全抵消负荷无功电流,使系统功率因数等于 1。目前工程应用的大容量 STATCOM 基本采用的是电压型变换器(VSI),其工作原理如图 4 所示。

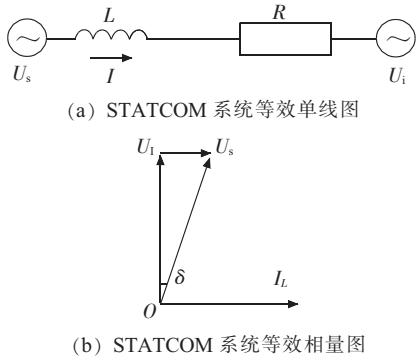


图 4 STATCOM 系统等效单线图及相量图

从电网侧可以直接将 STATCOM 等效为一个幅值和相位可以变化的电压源。图 4 中 STATCOM 的交流输出经过限流电抗器 L 连接系统, R 为 STATCOM 的有功损耗等效电阻^[6]。其中, U_i 为 VSC 交流输出电压的有效值, P 和 Q 分别为 STATCOM 向系统输出的有功和无功功率。实际运行时,STATCOM 输出电压与接入母线电压相位并不相同,存在一个相位差 δ ,其大小决定了 STATCOM 的工作状态^[7,8](直流电压大小、输出功率大小及方向等);STATCOM 的电流相量并不严格垂直于接入母线的电压相量,即 STATCOM 不仅是无功源,它还始终从系统吸收有功功率,将 δ 影响 STATCOM 的运行特性总结如表 3 所示。

表 3 δ 对 STATCOM 的影响

相位差 δ 的大小	STATCOM 运行特性
$\delta < 0$	吸收系统有功功率,向系统注入感性无功功率
$\delta > 0$	吸收系统有功功率及感性无功功率,逆变器组输出电压小于系统电压

2 STATCOM 接入对泰州电网潮流的改善分析

2.1 泰州电网潮流分布分析

泰州地区近年来采用变电站投切电容器的方式进行无功功率补偿,效果显著,但是部分线路的无功功率传输仍相对较多,还有待进一步优化。现将泰州电网的 220 kV 网络建立数学模型,将各个变电站线路进行编号,采用 MATLAB 软件编程对整个 220 kV 电网潮流做 STATCOM 接入仿真计算分析。220 kV 变电站参数及功率要求数据如表 4 所示(因为数据量大,只列出一部分变电站数据)。

从表 4 数据可得出唐子、顾庄、帅垛、同济、洋桥、

表 4 220 kV 变电站参数及功率需求数据表($U_{\text{标}}=220 \text{ kV}$, $S_{\text{标}}=100 \text{ MV}\cdot\text{A}$) p.u.

实际变电站名	1 节点名称	2 电压幅值	3 电压角度	4 输出有功	5 输出无功	6 输入有功	7 输入无功	8 并联电导	9 并联电纳	10 节点类型	13 电压最大值	14 电压最小限值
昭阳变	B1	1	0	0	0	1.348	0.28	0	0	3	1.5	0.5
楚水变	B2	1	0	0	0	0.44	0.083	0	0	3	1.5	0.5
唐子变	B3	1	0	0	0	1.425	0.386	0	0	3	1.5	0.5
生祠变	B4	1	0	0	0	0.959	0.223	0	0	3	1.5	0.5
靖江变	B5	1	0	0	0	0.754	0.258	0	0	3	1.5	0.5
凤城变	B8	1.038	0	11.22	2.006	0	0	0	0	2	1.5	0.5
顾庄变	B9	1	0	0	0	1.542	0.294	0	0	3	1.5	0.5
帅垛变	B10	1	0	0	0	2.428	0.493	0	0	3	1.5	0.5

洋思、昭阳、沈星、陆庄、黄桥、徐庄、马华这些变电站需求的无功功率相对较多。若补偿不够,则会造成输电网络中的大量无功传输。为避免大量无功传输,结合泰州电网 220 kV 变电站现状,设计补偿方案如表 5 所示。

表 5 STATCOM 装置补偿方案 Mvar

方案 1		方案 2	
变电站名	补偿容量	变电站名	补偿容量
唐子	18	昭阳	15
顾庄	20	沈星	12
帅垛	20	陆庄	24
同济	15	黄桥	20
洋桥	30	徐庄	20
洋思	20	马华	20

2.2 仿真计算结果

不通方式下线路总损耗统计如表 6 所示。

表 6 不同方式下线路总损耗统计表($S_{\text{标}}=100 \text{ MV}\cdot\text{A}$)

状态	总损耗
未补偿	0.125 102 378 060 139 -1.575 322 010 096 24i
现有电容器无功补偿	0.118 237 607 354 049-1.482 540 749 386 18i
STATCOM 接入方案 1	0.110 266 834 625 328-1.336 301 421 827 40i
STATCOM 接入方案 2	0.118 341 913 936 410-1.344 640 135 433 72i

由表 6 可以直观得出按照方案 1 接入 STATCOM 补偿无功后,输电网功率总损耗值最低。

2.3 结果分析

比较不同补偿方式下的电压数据表、功率分布数据表以及功率总损耗可以初步得出按照做无功补偿,补偿效果最理想。由电压、功率数据绘制未补偿和接入 STATCOM(按方案 1)电压、功率对比曲线,曲线如图 5、图 6 所示。

经过分析可以直观得出以下结论:(1) 对输电网合理的无功补偿,可以有效地维持电压水平,提高系统的稳定性;(2) 在输电网合理接入 STATCOM 装置后,可增强系统的稳定性和最大限度地减少网络的损

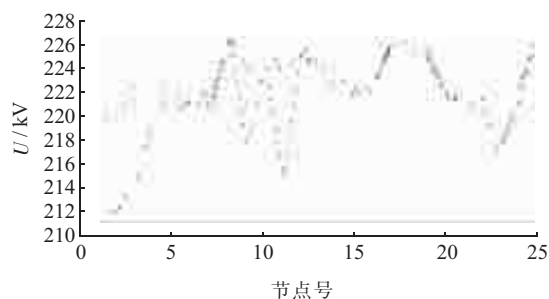


图 5 电压分布曲线(STATCOM 方案 1 和未补偿对比)

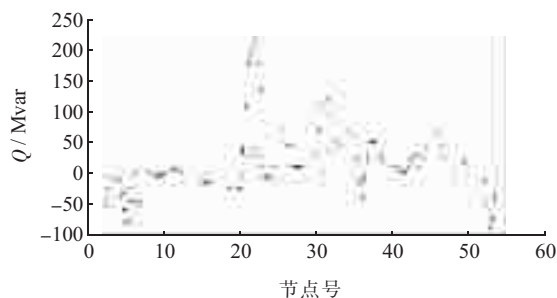


图 6 无功分布曲线(STATCOM 方案 1 和未补偿对比)

耗,使电网质量提高。

3 结束语

FACTS 技术是电力电子技术与现代控制技术结合的产物,它为改善系统运行特性提供了新的手段。本文通过对泰州 220 kV 电网中 23 个变电站做了 STATCOM 不同接入点的仿真,分析讨论了不同无功补偿方式下各节点电网电压、输电线路潮流分布所受到的影响,并经过对比提出工程应用的可行性方案。为今后更有效地使用 STATCOM,从以下 2 点深入研究:

(1) 对于一个综合电力系统来说,STATCOM 装置的安装位置的选择在提高电力系统稳定性方面起着重要的作用,各种 STATCOM 装置同时作用于系统时可能存在相互之间的动态干扰问题,如何评估相互影响的程度及寻找有效途径来解决问题等都是值得研究的。例如:多个 STATCOM 装置控制系统的协调配合问题;STATCOM 控制纳入现有的电网调度控制系统问题;STATCOM 装置与已有的常规控制、继电保护的

衔接问题等等。

(2) 本文所有的工作都假设系统是平衡的, 实际中的电力系统因为电流电压都含有正序、负序和零序分量导致其不平衡。下一步可考虑在单机无穷大系统中设计不平衡条件下的 STATCOM 控制系统, 研究其暂态稳定状况, 对比不同故障之后 STATCOM 抑制系统振荡的效果。随着电力技术的不断发展, 将提出各种新技术以及优化控制策略, 输电线路的功率传输将更加优化。

参考文献:

- [1] 单渊达. 电能系统基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009, 264-267.
- [2] 姜齐荣, 刘文华, 韩英铎, 等. ± 20 Mvar STATCOM 控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2000(12): 24-28.
- [3] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 4-5.

- [4] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理及应用[M]. 清华大学出版社, 2006: 190-196.
- [5] MATHUR R M. 基于晶闸管的柔性交流输电装置[M]. 徐政译. 北京: 机械工业出版社, 2005: 78-89.
- [6] 刘文华, 卢军锋, 郑征, 等. 基于 SHE-PWM 的 D-STATCOM 的控制器和脉冲发生器的设计[J]. 北京: 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(9): 1188-1191.
- [7] 叶慧, 吴熙, 桂国亮. 并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制抑制低频振荡研究[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(04): 30-33.
- [8] 王轩, 傅坚, 滕乐天, 等. 链式静止同步补偿器电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12).

作者简介:

叶勇(1957), 男, 江苏六合人, 工程师, 从事变电检修、科技培训、企业管理工作;
陆路(1984), 男, 江苏泰州人, 工程师, 从事电网调度控制工作;
李杰(1982), 男, 江苏泰州人, 工程师, 从事电网调度工作。

Simulation of Taizhou Power Grid with STATCOM

YE Yong, LU Lu, LI Jie

(Taizhou power supply company, Taizhou 225300, China)

Abstract: The operational principle of STATCOM is introduced firstly. Combining theoretical analysis with MATLAB software simulation, the operational state of the Taizhou 220 kV power grid is analyzed. Based on the analysis, the access point and the capacity of STATCOM to be integrated into Taizhou power grid are recommended. Using the recommended design, simulations of the Taizhou power grid with STATCOM have been implemented. Simulation results show that STATCOM can improve 220 kV power flow distribution and support the voltage of 220 kV.

Key words: reactive power compensation; static synchronous compensator; power flow distribution; reactive power

(上接第 34 页)

苏电机工程, 2013, 32(1): 37-39.

- [5] 宋锦海, 李雪明, 姬长安, 等. 安全稳定控制装置的发展现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 91-96.
- [6] 宋锦海, 余文杰, 宣筱青, 等. 适应特高压互联电网的 SCS-500E 安全稳定控制平台研制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 91-95.
- [7] 付家才. LabVIEW 工程实践技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 1.
- [8] 陈树学, 刘萱. LabVIEW 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 365.

作者简介:

周晓宁(1954), 男, 广西鹿寨人, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制;
袁康(1982), 男, 山东龙口人, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制;
梁晖(1981), 男, 江苏淮安人, 助理工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制;
曲晓蕾(1985), 女, 山东莱州人, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制。

Design of Control Device Test System Based on LabVIEW Stability Control Device

ZHOU Xiaoning, YUAN Kang, LIANG Hui, QU Xiaolei

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

Abstract: The development of power system has a growing demand on stability devices. Stability control device producers face the problems of designing stability control device test system effectively, improving testing efficient, and guaranteeing devices' reliability. The demands of stability control device in term of functions and the problems urgent to be solved are analyzed in this paper. Based on these analyses, a LabVIEW based design of stability control devices test system is proposed. The proposed design is effective to promote the efficient of designing the test system.

Key words: LabVIEW; stability control device; test system; virtual instrument

基于无线传感器网络的输电线路在线监测系统

陈久林¹, 徐陈成², 吴在军², 窦晓波²

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 江苏省智能电网技术与装备重点实验室(东南大学电气工程学院), 江苏 南京 210096)

摘 要: 输电线路在线监测系统对保障输电线路的安全运行具有重要意义。根据高压输电线路的布局 and 监测参数的特点, 设计并实现了一种层次型无线传感器网络。子网为 ZigBee 网络, 负责传感器数据的采集; 骨干网为基于 IEEE 802.11 的多跳自组织网络, 负责数据的远距离可靠传输。设计了输电线路在线监测系统的无线传感器节点和监测子站, 介绍了其软件和硬件结构。进行了无线链接质量测试, 得出常对数距离衰减模型与实测数据相符, 可以通过接收信号强度指示(RSSI)值判断无线通信质量。

关键词: 无线传感器网络; 输电线路; 在线监测; RSSI

中图分类号: TM726

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)06-0039-04

作为电能生产、输送、供应的载体, 电力设施是输送动力和光明的通道, 而高压输电线路更是远程电能输送的关键设施, 与百姓日常生活息息相关。对高压输电线路运行状态的检测一般依靠传统的人工巡视方法来进行, 这种方法受主观因素影响较大, 难以保证结果准确无误, 而且不能做到实时在线测量, 效率低, 不能及时发现高压输电线路上的安全隐患, 甚至可能导致发生杆塔倒塌等重大的安全事故, 造成大面积停电, 影响民众的日常生活。由于高压输电线路所在环境、位置都不同, 区域差异大, 如果采用常规巡检手段, 检查一次周期长, 而且无法第一时间发现隐患。同时受到各类技术及条件的限制, 输电线路上的实时信息也无法实时传输至控制中心。

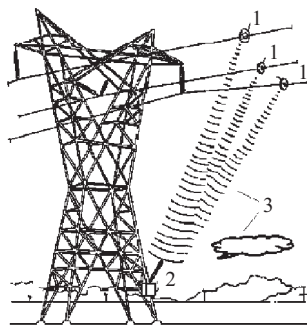
将无线传感器网络技术引入输电线路在线监测, 已成为近年来的技术趋势。文献[1]提出基于无线公网和 ZigBee 无线传感器网络技术的输电线路综合监测系统, 设计了监测主机和传感器节点。文献[2]提出基于 WiFi, EPON, 无线公网等通信方式的 ARM 架构的输电线路监测数据远程通信系统。文献[3]提出了基于无线传感器网络的高压输电线路在线监测系统。文献[4]探究了无线传感器网络在实际电力设施环境下的工作特性, 指出了无线传感器网络投入实际应用的可行性。本文提出一种层次型无线传感器网络架构, 分析和讨论了在线监测系统实施过程中可能遇到的问题及其解决方案, 并测试分析了无线传感器网络在工作环境下的无线链接质量, 为实际应用提供参考。

1 输电线路在线监测系统设计

1.1 输电线路在线监测系统架构

输电线路在线监测系统由无线传感器节点、监测

子站和监控中心组成, 如图 1 所示。根据监测需求部署无线传感器节点, 通常安装在各回路导线上。无线传感器节点负责采集输电线路的各项状态监测数据, 并发送到监测子站, 主要包括线路图像视频、微气象、导线覆冰舞动、绝缘子风偏、导地线振动、导线温度、绝缘子污秽度、杆塔倾斜等监测数据。监测子站部署在无线传感器节点附近, 通常安装在杆塔上。一方面监测子站负责收集附近的传感器监测数据; 另一方面监测子站为簇头节点, 构成无线多跳网络, 将数据传送至汇聚节点(监测网关), 再由汇聚节点接入互联网或电力部门内部网络, 传到后端的监控中心。汇聚节点通常设在高压变电站。



1 为无线传感器节点; 2 为监测子站; 3 为 2.4 Hz 无线信道

图 1 输电线路在线监测系统结构

监测子站和附近的无线传感器节点组成子网, 为星形网络, 传感器节点可以 1 跳接入监测子站。子网采用 ZigBee 技术, 这是一项近距离、低功耗、低成本的无线通信技术^[5], 最高带宽为 250 kb/s, 在小范围的网络中既能满足温度、弧垂等标量数据传输的需要, 又可以兼顾图片等大量数据传输需求。监测子站为簇头节点, 处理能力和传输能力均较强, 构成骨干网络, 采用基于 IEEE 802.11b/g 标准^[6]的自组织网络, 能支持远距离传输, 配以高增益天线, 传输距离可达几十公里。单跳链

路的带宽可高达 11 Mb/s 或 54 Mb/s, 满足监测系统的带宽需求。

1.2 无线传感器节点的设计

传感器节点主要包括传感器模块、电源模块和无线通信模块。传感器按监测数据需求选择, 可以包括温度传感器、湿度传感器、风速风向传感器、导线覆冰传感器、泄漏电流传感器、导线张力传感器、导线弧垂传感器等。无线通信模块选择支持 ZigBee 标准的模块, 在接收到监测子站发出的数据采集指令后采集数据并发送数据。

1.3 监测子站的设计

监测子站主要包括主控模块、电源模块、ZigBee 通信模块和基于 IEEE 802.11 标准的通信模块。由于监测子站放置在杆塔上, 因此选用太阳能电池供电。主控模块选择低功耗芯片。

1.4 监控中心的设计

监控中心负责将收集到的监测数据进行存储、处理和分析。可以提供历史数据查询、紧急事件报警、故障点定位、数据可视化等功能。对于特殊的数据, 如泄漏电流等还需要辅助专家知识进行后处理和分析。

2 输电线路在线监测系统实现

2.1 硬件实现

本系统设计的监测子站的硬件结构如图 2 所示。

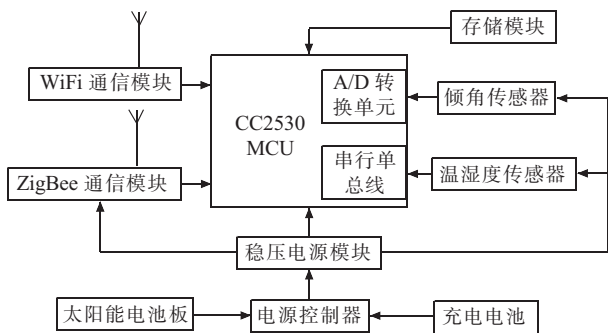


图 2 监测子站硬件结构

CC2530 是 TI 公司的 ZigBee 芯片。它以 8051 微处理器为内核, 自身携带的射频收发器用来实现无线传感器网络节点的通信。它封装体积小, 改进了 RF 输出功率、灵敏度、选择性和抗干扰性。

数字温湿度传感器 DHT21 是一款含有已校准数字信号输出的温湿度复合传感器, 具有响应快、抗干扰能力强、性价比高等优点。它的单线制串行接口, 使系统集成变得简易可靠。

角度 / 加速度传感器 MMA7361 芯片为 3 轴小量程加速度传感器, 可以检测物体运动的方向和角度。它根据物件运动和方向改变输出信号的电压值, 用处理器的 A/D 转换器读取输出电压信号, 就能够检测运动方向或角度, 可用于测量杆塔倾角。

2.2 软件实现

监测子站工作流程如图 3 所示。

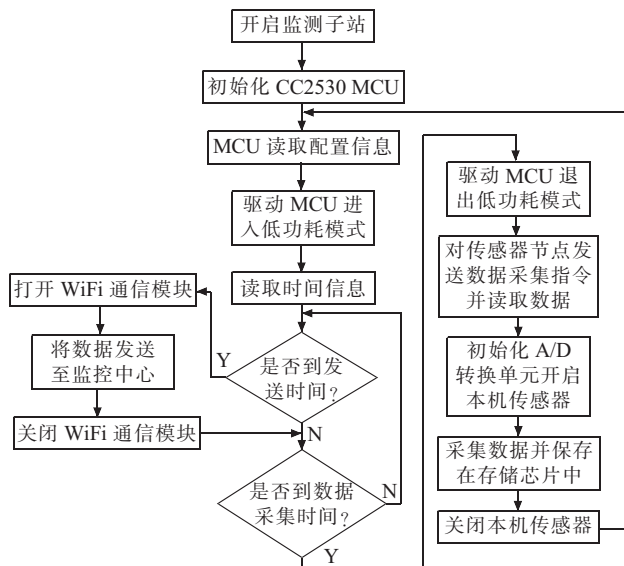


图 3 监测子站工作流程

监测主机开启后先读取配置信息, 包括所连接的各传感器节点的 16 位地址、数据发送时间安排、采集时间安排等。此后驱动 CC2530 MCU 进入低功耗运行模式。程序主循环中, 每隔一定时间读取一次时间信息, 与数据发送时间安排和采集时间安排进行对比, 周期性地进入数据发送或数据采集分支流程。系统中的存储芯片构建了一个循环存储结构, 程序可根据存储游标直接存储或访问数据。WiFi 通信模块是监测子站中最耗电的部分, 在硬件上将其设计为由程序控制开关, 可极大地降低系统功耗。

3 链接质量测试

为探究影响无线传感器网络通信质量的因素, 使用设计的无线传感器节点和监测子站进行测试。测试中, 数据包由 20 Byte 的传感器数据组成, 每次发送 100 个数据包。在以下 4 种环境中: (1) 空旷地带; (2) 有变电柜电磁干扰; (3) 有墙壁阻隔; (4) 有楼层阻隔, 进行接收信号强度指示 (RSSI) 和收包率 (PRR) 测试。在各测试环境中, 改变无线传感器节点和监测子站的距离, 记录相关数据。测试距离从 0 m 到通信距离上限 (约 100 m), 步距 2 m。从监测子站的液晶屏读取数据包的接收个数和 RSSI 值。

3.1 无线信道模型

无线信道模型采用常对数距离衰减模型^[7]。该模型适用范围广, 能较好的反映无线信号强度与通信距离的关系。该模型中, 接收端在距离发送端处接收到的信号强度:

$$\gamma(d) = P_t - PL(d_0) - 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - X_\sigma - P_n \quad (1)$$

式(1)中: P_t 为发送端的发射功率; $PL(d_0)$ 是在参考距离 d_0 处的信号衰减强度; η 为信号衰减系数; X_σ 为高斯随机数; P_n 为噪声信号强度。

4种测试环境下RSSI与通信距离 d 的关系如图4所示。由图可见其接近指数关系。

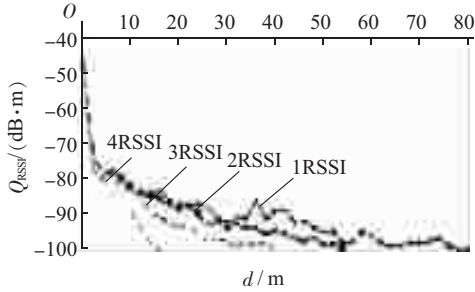


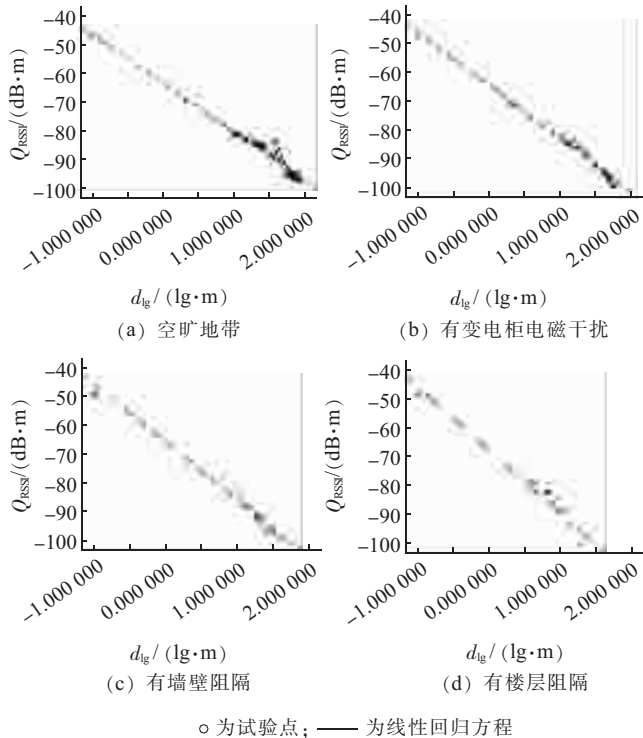
图4 RSSI与 d 关系曲线

图4中, Q_{RSSI} 为RSSI,dB·m。设 d_{lg} 为以10为底数的对数化距离 d ,对 d_{lg} 和RSSI进行相关性分析和线性拟合。数据分析结果如表1所示。

表1 RSSI与 d_{lg} 相关性分析数据

不同试验环境	a组	b组	c组	d组
r	-0.981	-0.991	-0.986	-0.981
$b1$	-17.654	-18.803	-20.088	-22.045
c	-63.470	-64.064	-65.705	-67.936
η	1.77	1.88	2.01	2.20

表1中, r 为 d_{lg} 与RSSI的线性相关系数, $b1$ 和 c 为拟合直线的斜率和叠加常数,为信号衰减系数。各测试环境的RSSI与 d_{lg} 拟合直线如图5所示。



○为试验点;——为线性回归方程

图5 RSSI与 d_{lg} 拟合直线

图5中, Q_{RSSI} 为RSSI,dB·m。 d_{lg} 与RSSI的线性相关系数高于0.98,线性度非常高,与采用的无线信道模型吻合。自由空间模型中 η 理论值为2.0,实测得到的 η 分布在1.77~2.20,与自由空间模型相符。这反映无线信号衰减速率与环境有关。空旷地带 η 为1.77,值最小,信号衰减最慢,有效通信距离最大。在有变电柜电磁干扰环境中 η 为1.88,较空旷空间略大,信号衰减变快。而在有墙壁干扰时, η 为2.01,衰减更快,有效通信距离更小。

3.2 通信质量测试

无线通信质量的好坏由无线信号强度表征,与此相关的2个量为RSSI和链接品质指示(LQI)^[8]。PRR指测试中所接收数据包数量占所发送数据包的比率。PRR的值亦可表征无线通信质量。若PRR持续处于低数值水平,通信质量差。收包率PRR为一个统计量,不能实时获得。为实时监测通信质量,需参考RSSI或LQI的值。各测试环境下PRR随通信距离变化的关系如图6所示。通信距离较短时,PRR保持为100%,通信质量好。到了一定通信距离后,PRR会迅速降低,通信质量下降。

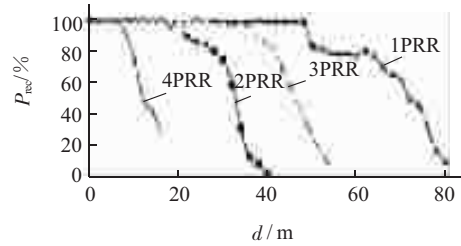


图6 PRR与 d 关系曲线

图6中, P_{rec} 为PRR,%。对测得的PRR与RSSI数据进行相关性分析,4种测试环境下的 r 分别为0.555,0.521,0.545,0.608。在空旷环境、有变电柜电磁干扰、有墙壁阻隔的环境下,PRR与RSSI的线性相关系数 r 都为0.56以下,线性相关程度不强。在有楼梯及墙壁干扰的环境下, r 为0.608,较其他环境有增大,这是由于该环境下测试数据数量较少。PRR与RSSI的拟合曲线如图7所示。

图7中, Q_{RSSI} 为RSSI,dB·m; P_{rec} 为PRR,%。其横轴为RSSI,纵轴为收包数Rcount(每组试验当中数据包的接收数量)。RSSI值在-40~-90 dB·m时,PRR基本为100%,通信质量好。RSSI降至-90 dB·m时,PRR开始下降,RSSI低于-95 dB·m时,PRR小于60%,通信质量较差。因此,可以从RSSI值来判断当前PRR及通信质量。对于灵敏度为-100 dB·m的CC2530芯片,保持RSSI高于-95 dB·m,可以保证良好的通信质量。

4 结束语

(1) 无线传感器网络应用于高压输电线路具有优

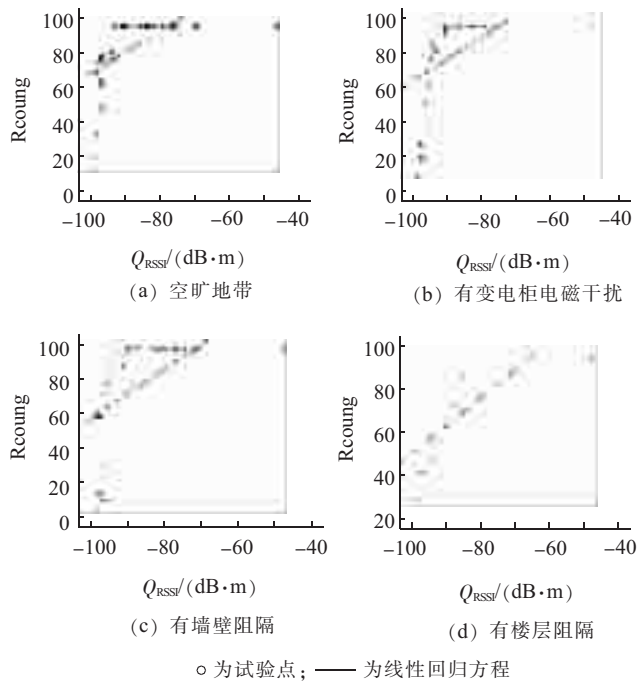


图 7 PRR 与 RSSI 拟合直线

势,然而又面临诸多困难,传输带宽、传输距离、节点供电等是其中的关键问题。本文详细分析了输电设备的在线监测需求,设计了一种层次型无线传感器网络架构,并详细讨论了实施中遇到的主要问题。

(2) 常对数距离衰减模型与实测值相符度良好, RSSI 与对数化后的距离 d 线性相关度很高。该无线信道模型可以很好地预测无线信号强度。

(3) 无线信号的衰减与环境相关,信号衰减系数随环境变化。电磁干扰会加快无线信号衰减,墙壁阻隔等会进一步加快无线信号衰减。PRR 能表征通信质量的好坏。可以用 RSSI 作为参考实时监测通信质量。

参考文献:

- [1] 桂 勋,冯 浩.基于无线公网和 ZigBee 无线传感器网络技术的输电线路综合监测系统[J].电网技术,2008,32(20):40-43.
- [2] 王 玮,黄在朝.基于 ARM 的输电线路状态监测数据传输终端[J].江苏电机工程,2011,30(5):44-46.
- [3] 赵增华,石高涛,韩双立,等.基于无线传感器网络的高压输电线路在线监测系统[J].电力系统自动化,2009,33(19):80-84.
- [4] GUNGOR V C, LU B, HANCKE G P. Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid-A Case Study of Link Quality Assessments in Power Distribution Systems[J]. IEEE, 1998, 13(3):971-978.
- [5] 吴为国,茅 丰.基于无线通信技术的电缆温度实时监测系统[J].江苏电机工程,2013,32(3):54-56.
- [6] IEEE 802.11-2007 IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks-specific Requirements; Part11 Wireless LAN Medium Access Control(MAC)and Physical Layer (PHY) Specifications[S]. 2007.
- [7] 刘 雨.无线传感器网络中的信息处理[D].北京:北京邮电大学,2006.
- [8] IEEE Std 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY): Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks(LR WPANs)[S]. 2003.

作者简介:

陈久林(1970),男,江苏高邮人,高级工程师,从事电力系统继电保护的试验与研究工作;

徐陈成(1990),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络在电力系统中的应用;

吴在军(1975),男,江苏南京人,副教授,研究方向为变电站自动化系统;

窦晓波(1979),男,江苏南京人,副教授,研究方向为变电站自动化系统。

On-Line Monitoring System for Transmission Line Based on Wireless Sensor Network

CHEN Jiulin¹, XU Chencheng², WU Zaijun², DOU Xiaobo²

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

2.Jiangsu Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment

(School of Electrical Engineering, Southeast University), Nanjing 210096, China)

Abstract: An on-line monitoring system is of great importance to ensure the safety operation of power transmission lines. A layered wireless sensor network (WSN) is designed based on arrangement and monitoring parameters of transmission line. ZigBee based sub-network aims to collect data from sensors and IEEE 802.11 based backbone network is designed for transmitting data with a long distance reliably. Wireless sensor nodes and monitoring substation of on-line monitoring system are designed, and corresponding hardware and hardware of them are introduced. A wireless link quality experiment is implemented, which shows that constant logarithmic distance decay model is highly consisted with the measured data, and RSSI could be taken as an indicator of the radio link quality.

Key words: Wireless Sensor Network(WSN); transmission line; On-line monitoring; Received Signal Strength Indication (RSSI)

扬州智能电网输变电状态监测系统应用研究

吴晨曦

(扬州供电公司,江苏 扬州 225000)

摘 要:目前,国内设计风光互补系统配置一般采用经验来估算,这往往会造成系统装机容量严重不足或者过剩现象。风光互补独立供电系统的优化配置可看作一个多目标优化问题,2 个冲突的目标是极大化供电可靠性和极小化成本。文中供电可靠性采用计算机软件模拟蓄电池组一年的每日的荷电状态值(SOC)来验算保证;成本的优化可采用遗传算法动态搜索模式,搜索计算出最小化系统配置花费。结合扬州智能电网输变电状态监测系统的具体建设,将风光互补前端供电技术在该项目中的成功应用进行了详细介绍。

关键词:智能电网;输变电状态监测;风光互补储供电;遗传算法(GA)

中图分类号:TM72

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)06-0043-04

智能电网是对电网未来发展的一种愿景,即以包括发电、输电、配电、储能和用电的电力系统为对象,应用数字信息技术和自动控制技术,实现从发电到用电所有环节信息的双向交流,系统地优化电力的生产、输送和使用。输变电状态监测系统是智能电网建设中的一个重要子项,而其前端供电技术的研究,是关乎整个系统顺利运作的核心环节之一。

1 风光互补储供电系统基本原理

风光互补发电系统是对风能和太阳能的综合利用,由于太阳能与风能在时间上和地域上都有很强的互补性。白天太阳光最强时,风很小,晚上太阳落山后,光照很弱,但因地表温差变化大而风能加强。在夏季,太阳光强度大而风小,冬季,太阳光弱而风大。太阳能和风能在时间上的互补性使风光互补发电系统在资源上具有最佳的匹配性,风光互补发电系统是资源条件最好的独立电源系统。

风光互补联合供电装置的组成如图 1 所示。主要由高功率的太阳能电池板、轻便高效的低风速启动型碳纤维叶片风力发电机、大储存容量的胶体电池组、先进的太阳能充电控制器及逆变器等组成。

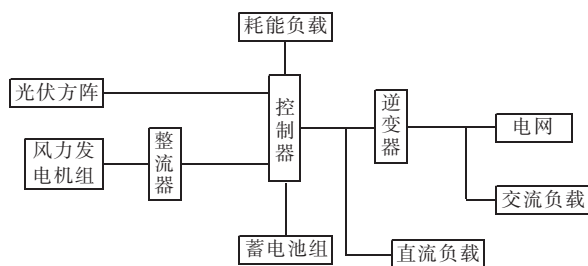


图 1 风光互补发电系统组成示意图

在风力达到一定风速时,风力发电机组将风能转换为交流形式的电能,但由于所产生的交流电压不很

稳定,所以必须通过整流器整流,给蓄电池充电。而光伏方阵由若干太阳能电池板串联和并联构成,其作用是把太阳能直接转换为直流形式的电能,也向蓄电池充电。蓄电池起着储存和调节电能的作用,当日照充足或风力很大导致产生的电能过剩时,蓄电池将多余的电能储存起来;当系统发电量不足时或负荷用电量增加时,则由蓄电池向负荷补充电能,并保持供电电压的稳定。为此需要设计专门的控制器,根据日照的强弱、风力的大小及负荷的变化,不断对蓄电池的工作状态进行切换和调节,使其在充电、放电或浮充电等多种工况下交替运行^[1-3]。

2 风光互补储供电系统的优化

目前风光互补发电系统的部件价格比较贵,据估算,在上兆瓦级的大型风光互补系统中,科学合理地配制可以比一般的估算配制要节省 1/3 左右的成本。所以,科学合理的系统配置设计是风光互补系统广泛应用所亟待解决的问题。

2.1 优化设计步骤

以蓄电池为主储能装置的风光独立发电系统,希望尽量做到全年各月都能均衡发电,这样配置的蓄电池容量可以减小,也可以减少系统的无效能量损失,提高系统的整体效率。但是对于风光发电系统,采用传统的算法,对于大多数地区而言,太阳能和风能资源的互补性总是不很理想。本文优化设计中提出一种建立各个部件的数学模型,以时间为步长进行系统性能的模拟,并以此为基础试图找出联系有限个气象特征参数和系统配置关系的公式。在优化配置计算中,要考虑到光伏组件和风力发电机的发电量在随季节变化而变化。优化配置的主要步骤:(1) 建立模型算法的参数输入数据库,包括各种部件单体的商业性质的特性参数和年维护费用等数据。(2) 建立系统各部件的数学模型,并采用计算机模拟来检验一个系统的配置包括必

要数量的系统部件和安装的细节是否满足一年中负载的需求。(3) 对第二步骤符合要求的各种配制,使用遗传算法的动态搜索模式,搜索计算出最小化系统配置花费。

系统的控制目标就是在最大限度利用光伏发电量和满足负载需求的前提下,使蓄电池工作在优化的充放电状态中,并使其充放电循环次数尽可能少。优化配置算法将主要针对光伏电池,风力发电机和蓄电池的尺寸及数量来进行优化配置。在优化配置计算中,要考虑到光伏组件和风力发电机的发电量在随季节变化而变化。优化的光伏组件和风机的大小可以被定义为:

$$\text{最小化系统费用} = c_s \times a_s + c_w \times a_w \quad (1)$$

约束条件:

$$d(t) \leq W(t) \times a_w + S(t) \times a_s \quad (2)$$

式(1,2)中: a_w 和 a_s 分别为风机和光伏的尺寸, m^2 ; c_w 和 c_s 分别代表相应的单位费用,元/ m^2 ; $d(t)$ 为每天负载的平均日需求量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $W(t)$ 和 $S(t)$ 分别为风机和光伏电池的单位面积发电功率, $(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^2$ 。

为了长期可靠地满足负荷需要,本文采用了Hybrid2应用软件,该软件根据输入的联合发电系统结构、负载特性以及安装地点的风速、太阳辐射数据获得一年8760 h的模拟运行结果。为了精确确定系统每小时的运行状态,采用了更精确地表征组件特性及评估实际获得的风光资源的数学模型。每24 h为一段,用每小时的平均风速,太阳辐射度和负载大小的数据来计算发电和负载需求量的差值 ΔP 。使用一种模拟多次不同的风机和光伏组件的数量,使 ΔP 的值为近似为0的迭代方法来确定最终优化后的风机和光伏组件的数量。通过计算每种配置的年费用,最后选择出最低费用的为最优化配置。此算法的流程框图如图2所示。

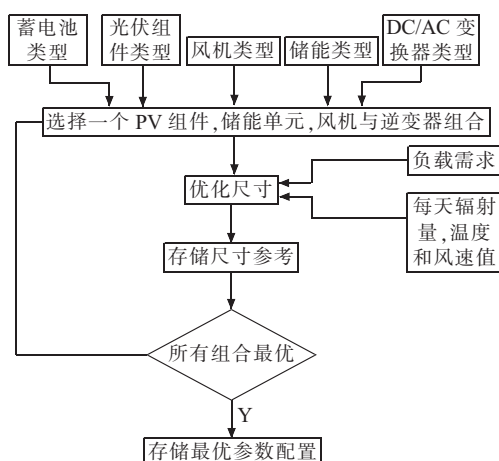


图2 优化算法流程图

2.2 优化指标

2.2.1 蓄电池组的荷电状态(SOC)

SOC是描述蓄电池状态的一个重要参数,通常把

一定温度下蓄电池充电到不能再吸收能量的状态定义为SOC 100%,而将蓄电池再不能放出能量的状态定义为SOC。采用电量累积法来验算SOC,即通过累积蓄电池在充电或放电时的电量来估计电池的SOC,并根据安装当地的气象条件(日照度和平均风速),利用Hybrid2工具软件在计算机上模拟一年中蓄电池的充放电电量。

2.2.2 系统首期投资

各组件的价格对优化配置的数量起到很大的影响,设计者应该对各组件的各方面价格情况有详细地了解。(1) 风力发电系统:风力发电部分除风轮、齿轮箱及发电机外,还要添加相应的控制器。另外,还需要较高的塔架以安装风轮。对于较大型的风力机,还要在安装之前修筑运输道路。(2) 光伏发电系统:光伏模板需配备整流器等调节设备,另外还有固定方阵所需的支架。(3) 蓄电池:需视容量配备相应的充放电控制器,还需配备相应的直流/交流转换器。

2.3 优化系统数学模型

在这种算法中,系统的运行是一年中以1 h为间隔来进行模拟。而在这个间隔内,假定风机和光伏阵列产生的电能是一个恒值。因此,这些组件在这个间隔(1 h)内产生的能量可以用数学公式来表示。根据光伏阵列的 $I-V$ 特性及负载要求,光伏阵列有 N_p 个组件的并联和 N_s 个组件的串联。光伏阵列在第 i 天($1 \leq i \leq 365$)的 t 小时($1 \leq t \leq 24$)内的最大功率输出点:

$$P_M^i(t, \beta) = N_s \cdot N_p \cdot V_{OC}^i(t) \cdot I_{SC}^i(t, \beta) \cdot FF^i(t) \quad (3)$$

$$I_{SC}^i(t, \beta) = \left[I_{SC,STC} + K_1 [T_C^i(t) - 25] \right] \frac{G^i(t, \beta)}{1000} \quad (4)$$

$$V_{OC}^i(t) = V_{OC,STC} - K_v T_C^i(t) \quad (5)$$

$$T_C^i(t) = T_A^i(t) + \frac{T_{NCT} - 20}{800} G^i(t, \beta) \quad (6)$$

式(3—6)中: $I_{SC}^i(t, \beta)$ 为光伏组件的短路电流值,A; $I_{SC,STC}$ 为在标准状态下的短路电流值,A; $G^i(t, \beta)$ 为光伏电池板在 β 度的倾斜面所接受到的总辐射度, W/m^2 ; K_1 为短路电流的温度系数, $\text{A}/^\circ\text{C}$; $V_{OC}^i(t)$ 为开路电压值,V; $V_{OC,STC}$ 为标准状态下的开路电压值; K_v 为开路电压的温度系数, $\text{V}/^\circ\text{C}$; $T_A^i(t)$ 为环境温度, $^\circ\text{C}$; T_{NCT} 为制造商提供的太阳能电池的正常工作温度, $^\circ\text{C}$; $FF^i(t)$ 为填充因子,它可以由组件制造商提供。

$G^i(t, \beta)$ 由每天水平面上的日照度来计算。太阳能方阵的倾角选择在使冬天和夏天辐射量差异尽可能小,而全年总辐射量尽可能大,二者应兼顾。光伏阵列中太阳能组件的串联数量由蓄电池最大输入电压 V_{DC}^m

和单个光伏组件的最大开路工作电压 V_{OC}^m 来确定:

$$N_s = \frac{V_{DC}^m}{V_{OC}^m} \quad (7)$$

在实际工程计算中, N_s = 系统直流电压 (蓄电池电压) / 单个组件的工作电压。在 i 天内, 光伏组件电量实际给储能部件充的电量值 $P_{PV}^i(t, \beta)$ 与光伏阵列最大输出功率 $P_M^i(t, \beta)$ 的比值定义为电池的转换因数:

$$n_s = \frac{P_{PV}^i(t, \beta)}{P_M^i(t, \beta)} = n_1 \times n_2 \quad (8)$$

式(8)中: n_1 为由制造商提供蓄电池的工作效率, %; n_2 为转换因子, 它取决于电池的充电模型算法, 并表示实际光伏组件的发电和相对应的最大功率输出点之间的差异。如按照理想的光伏最大功率点跟踪(MPPT)原则运行, 则 $n_2 \approx 1$, 其他情况下它是一个小于 1 的变值。根据目前测量得到, 大部分地区太阳辐射度的值在 $0 \sim 900 \text{ W/m}^2$ 变化, 所以转换因子的平均值在 70% 左右。光伏电池变换器(DC/DC)的数量可由下式确定:

$$N_{ch} = \frac{N_{PV} \times P_{PV}^m}{P_{ch}^m} \quad (9)$$

式(9)中: P_{PV}^m 为单位光伏组件在标准能量下的最大功率输出, W; P_{ch}^m 为所选的 DC/DC 变换器容量等级, W。这 2 个参数都是由产品制造商提供。

风机的风速和输出功率之间关系图是由风机制造商标定, 该关系可以表示出风能转换为电能的趋势。如果知道准确的风机功率特性就可以通过调节风机发电电流的大小, 实现 MPPT, 使风机的换能效率提高^[4]。在能量平衡优化过程中, 安装高度为 h 米的风机在 i 天 t 小时发电转化到储能元件后的值记作 $P_{WG}^i(t, h)$, 可以由以下的线性关系式确定:

$$P_{WG}^i(t, h) = p_1 + [v^i(t, h) - v_1] \frac{P_2 - P_1}{v_2 - v_1} \quad (10)$$

式(10)中: $v^i(t, h)$ 为高度是 h 米的风速(m/s)功率和风速对, $v_1 < v^i(t, h) < v_2$ 。可以根据以下的关系来计算 h 米处的风速:

$$v^i(t, h) = v_{ref}^i(t) \cdot \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^a \quad (11)$$

式(11)中: $v_{ref}^i(t)$ 为在参考高度 h_{ref} 米试验风速的输入参数, a 幂指数的取值范围在 $1/7 \sim 1/4$ 之间, 在这里取 $\alpha = 1/4$ ^[5]。

蓄电池单元主要参数为容量, 用符号 C_n 表示, 通常在 C 的下角处标明放电时率, 如 C_{10} 表明 10 h 放电

率, C_{120} 表明 120 h 率放电。蓄电池的放电深度(DOD), 在优化过程开始的时候由设计者确定:

$$C_{min} = D_{DOD} \times C_n \quad (12)$$

式(12)中: C_{min} 为蓄电池在放电过程中的最低电量值, A·h; D_{DOD} 为蓄电池的放电深度, %。

根据光伏组件和风机产品及负载实际需求, 蓄电池充放电过程可以在数学上模拟成以下公式:

$$C^i(t) = C^i(t-1) + n_B \frac{P_B^i}{V_{BUS}} \Delta t \quad (13)$$

$$C^i(24) = C^{i+1}(0) \quad (14)$$

式(13, 14)中: $C^i(t)$, $C^i(t-1)$ 蓄电池在 i 天内 t 和 $t-1$ 小时的容量, A·h; n_B 是蓄电池在充放电过程中的效率; V_{BUS} 为直流母线电压; P_B^i 为电池充/放电能量 (在放电时 $P_B^i < 0$, 在充电时候 $P_B^i > 0$); Δt 为模拟的时间段, 在这里令 $\Delta t = 1 \text{ h}$ 。蓄电池的串联数量 n_B^s 由直流母线电压和各个单体电池的工作电压来确定:

$$n_B^s = \frac{V_{BUS}}{V_B} \quad (15)$$

蓄电池单元的容量与总的电池数量, 串联数和每个单体电池的容量有关:

$$C_n = \frac{N_{BAT}}{n_B^s} \quad (16)$$

利用以上源于模拟算法的模型方程来检验基于能量算法的成本函数的最小化方法, 是否满足整个一年当中负载容量的需求。目前国内设计风光互补系统配置一般采用经验来估算, 这往往会造成系统装机容量严重不足或过剩现象。风光互补独立供电系统的优化配置可看作一个多目标优化问题, 2 个冲突的目标是极大化供电可靠性和极小化成本。早期对这问题的研究有非线性规划、整数规划、二次规划、动态规划等。其研究较为成熟, 并取得了一定的效果。但这些方法也有明显的局限性。现代风光互补系统规模越来越大。控制量越来越多, 其解空间是多维、复杂的, 这些方法不容易实现全局最优。多数情况下只能找到局部最优解。

遗传算法(GA)是一种崭新的全局优化算法, GA 的搜索过程是从一群初始点开始搜索, 而不是从单一的初始点开始搜索, 这种机制意味着搜索过程可以有有效的跳出局部极值点。GA 在形式上简单明了, 不仅便于与其他方法的相结合, 而且非常适合于大规模并行计算机运算, 因此可以有效地用于解决复杂的风光互补系统模拟和优化问题。

3 风光互补储供电系统为本项目前端装置供电

在本项目中, 前端设备(包括: 高清视频装置、微气

象装置、全工况装置、无线通信终端装置等)均采用了高效的经特别设计的风光互补联合供电装置进行供电,确保高清视频装置、全工况装置能 3×24 h 不间断运行,微气象装置能 15×24 h 不间断运行。

考虑到扬州市属于微风地区,常年风力不大(如表 1 所示),而且 110 kV 输电线路铁塔及杆塔承受力有限,经过对多款风机发电特性的对比试验,最后选择了启动风速仅为 2.68 m/s、重量不超过 6 kg、额定功率可达 200 W 的自带内置控制器的免维护型碳纤维叶片风力发电机。在扬州现场将近 16 个月的实际运行情况表明,该款风力发电机组安装方便、运行稳定、性能优异,在阴雨天气和夜间对太阳能发电形成了有力补充,从而确保了蓄电池中始终有比较充足的电量,支持前端设备安全渡过连续无风无太阳极端天气。

表 1 扬州地区年平均风速表 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

月份	1	2	3	4	5	6
扬州	3.7	3.7	3.5	3.3	3.0	2.9
月份	7	8	9	10	11	12
扬州	3.0	2.9	2.9	2.8	3.2	3.4

在太阳能发电组件方面,根据前端设备总的电源功率和容量的不同要求,采用每套视频装置供电系统配置 4 块太阳能电池板(高配)和每套微气象装置供电系统配置 2 块太阳能电池板(低配)的不同的供电配置方案。单块单晶硅太阳能电池组件额定功率 150 W/块,转换率达 15% 以上,使用寿命达 20 年以上。从而尽可能保证在阳光充足的时候有足够的发电用来储存,以供系统夜间及无风天气下运行。根据对供电系统数月的实际运行情况分析,纯粹单靠风力发电或太阳能发电均无法保证系统能做到 3×24 h 不间断运行,只有采用高效的风光互补联合供电技术才能保证系统的 3×24 h 不间断运行。对于蓄电池组容量的选择,一方面要考虑与风光互补供电装置相匹配,另一方面要考虑其理论蓄电量能否支持系统 3×24 h 不间断运行。因在无

风无太阳即系统无法发电的天气下,系统前端设备的不间断运行时间长短就主要取决于蓄电池组蓄电量的大小。在本项目中,选用了大容量高性能免维护专用太阳能胶体电池,单块电池容量达 200 ($\text{A}\cdot\text{h}$)/块,可在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内使用,使用寿命为 5~7 年。对应于高配情况,配置了 4 块电池,总容量达 800 $\text{A}\cdot\text{h}$;对应于低配情况,配置了 2 块电池,总容量达 400 $\text{A}\cdot\text{h}$ 。

4 结束语

扬州项目前端设备已经过近 16 个月的连续运行考验,到目前为止,视频监控装置、微气象装置、全工况装置及无线通信装置无论白天还是晚上基本未发生由于供电不足而导致前端设备停运的情况。本项目在前端设备采用的风光互补联合供电系统,以及该系统所采用的优化配置方案,具有稳定、可靠地特性,具有一定的推广价值。该系统的稳定运行,是整个智能电网输电线路状态监测系统顺利运行的重要基石。

参考文献:

- [1] 何勇琪,张建成,鲍雪娜.并网型风光储混合发电系统中储能系统容量优化研究[J].华北电力大学学报,2012,39(4):1-5.
- [2] 冬雷,廖晓钟,刘广忱,等.分布式风光互补发电系统及其多目标优化控制策略研究[J].仪器仪表学报,2005,08(26):750-753.
- [3] 丁晓群,陆鹏程,周玲.智能配电网 AVC 技术探讨[J].2011,30(2):52-54.
- [4] HABIB M A, SAID S A M, E-I Hadidy M A, et al. Optimization Procedure of Hybrid Photovoltaic Wind Energy System[J].Energy, 1999, 24(11):919-929.
- [5] BOROWY B S, SALAMEH Z M. Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1996, 11(2):367-375.

作者简介:

吴晨曦(1985),男,江苏扬州人,助理工程师,从事电力基建方面的工作。

Research on State Detection System Application in Yangzhou Smart Grid

WU Chenxi

(Yangzhou power supply company, Yangzhou 225000, China)

Abstract: At present, the design of wind-solar hybrid power supply systems is based on personal experiences which could cause a deficient or excess in installed generation capacity. The design of standalone wind-solar hybrid power supply systems could be taken as a multi-objective optimization problem whose two objectives are maximizing systems' reliability and minimizing cost. The power supply reliability is guaranteed by checking a single year's battery's SOC which is mimicked by computer software, and the minimal cost for designing a wind-solar hybrid power supply system is searched by a dynamic GA. Combing with the concrete construction of Yangzhou smart grid state detection, the successful application of wind-solar hybrid power supply systems technology is introduced in detail.

Key words: smart grid; state detection; wind-solar hybrid power supply; GA

利用泄漏电流递归分析法研究绝缘子雾凇闪络

薛恒嵩

(南京供电公司,江苏 南京 210008)

摘 要:绝缘子的运行状态直接关系到输电线路的安全运行。由于泄漏电流贯穿于绝缘子运行始终,能够直接反映绝缘子表面状态及放电特征。在实验条件下模拟雾凇环境,以硅橡胶绝缘子为试样,将其悬挂于雾凇环境下不同时间,雾凇即在绝缘子表面凝结,然后分别施加电压至发生闪络。通过高速摄像机记录闪络现象和过程,采用递归分析法研究泄漏电流的非线性特征,将闪络发展过程中泄漏电流的内在变化在递归图及其定量指标中表征出来,结果表明泄漏电流的非线性特征变化与闪络过程中绝缘子表面放电现象具有很好的一致性,有效揭示了绝缘子雾凇闪络过程的发展以及闪络发生的机理,从而提高户外绝缘子运行的可靠性与准确性。

关键词:绝缘子;雾凇闪络;泄漏电流;递归特征;状态检测

中图分类号:TM855

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)06-0047-04

在电力系统输电线路中,绝缘子能够同时满足机械负荷与电气绝缘双重性能的要求。伴随着超高压、特高压输电工程的开展,绝缘子在得到日益广泛应用的同时,也成为影响电网安全稳定运行的重要因素^[1]。寒冷浓雾天气容易引发雾凇现象,绝缘子长时间在雾凇环境下运行时,表面将覆盖不同程度的雾凇层,加剧绝缘子表面电场分布的不均匀程度,进而导致局部放电的发生和泄漏电流的增大,最终降低绝缘子表面电气性能甚至引发闪络故障,给电力系统的安全运行造成威胁^[2,3]。因此,开展绝缘子雾凇闪络的检测研究,不仅有助于预防闪络事故的发生,提高绝缘子运行可靠性,而且能够加强对绝缘子的监管能力,减少维护费用,对保障电力系统安全运行具有重大意义^[4]。泄漏电流贯穿于绝缘子运行过程始终,能够在运行中连续、直观、综合地反映各种因素对绝缘子运行状态的影响^[5]。绝缘子表面的动态变化必然引起流过绝缘子表面的泄漏电流发生变化,通过检测泄漏电流可以随时反映绝缘子在各种因素影响下真实的运行状态。然而,由于影响绝缘子泄漏电流的因素很多,当前泄漏电流特征量的选取与研究结果存在较大的分散性,尚未形成统一的绝缘子运行状态预警系统,仍然需要进行大量的试验和分析,在总结当前研究方法的优点同时,进一步挖掘泄漏电流的内在变化机理,改善检测方法,从而能够及时反映绝缘子的绝缘性能,预防闪络事故的发生。

针对雾凇的形成条件,本文在实验室人工模拟试验系统下分别研究绝缘子在各种雾凇环境下的闪络现象与过程,并采集闪络过程中绝缘子表面的泄漏电流,在对比分析当前泄漏电流检测方法的基础上,将递归分析理论引入对泄漏电流的分析之中,得到泄漏电流时间序列的递归图及其定量指标,根据递归图拓

扑结构和纹理差异以及相应的递归定量指标表征了绝缘子运行状态与雾凇环境因素的关系,为绝缘子运行提供了一种可视化的检测方法。

1 试验系统与方法

绝缘子雾凇闪络试验装置如图 1 所示。试验以单片硅橡胶绝缘子为试样,采用无水乙醇清洗试样表面并置于干燥容器室温干燥 24 h,然后垂直悬挂于人工雾室中。采用循环冷凝系统将雾室温度控制为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,待试样温度与环境温度相一致时,采用超声波盐雾发生装置将 NaCl 盐溶液雾化并注入雾室,盐雾电导率为 $1.0\sim 5.0\text{ ms/cm}$,注入速率为 $2.1\text{ cm}^3/\text{min}$,雾室内的风速小于 1.0 m/s 。当雾室相对湿度达到 100%饱和时,将绝缘子在雾室中所设定的实验条件分别维持 3 h,5 h,9 h 和 15 h,然后分别施加 30 kV/ms 工频交流电压,采用高速摄像机记录绝缘子表面的雾凇积聚及闪络过程中表面放电现象。采用多功能数据采集卡(PCI-9111 DG/HR)采集闪络过程流过绝缘子表面的泄漏电流,采样率为 5.0 kHz 。

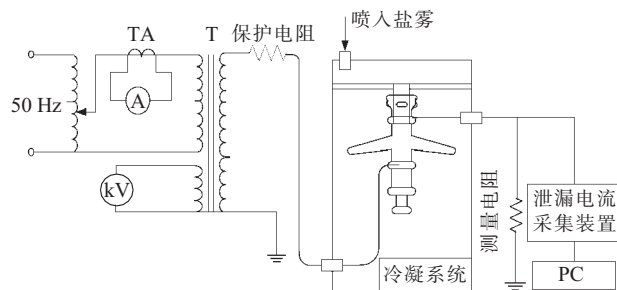


图 1 试验系统

2 试验结果与讨论

2.1 绝缘子表面雾凇状态

绝缘子表面雾凇形态如图 2,3 所示。盐雾中无数

0℃以下而尚未结冰的过冷雾滴在伞群表面不断积聚冻结形成雾凇沉积物和雾凇层。雾凇中雾滴与雾滴间的空气间隙很多,呈现典型的白色外表和粒状结构,其主要特征为:粒径很小,比重较轻,内聚力较差,结构蓬松,中间有大量气孔。

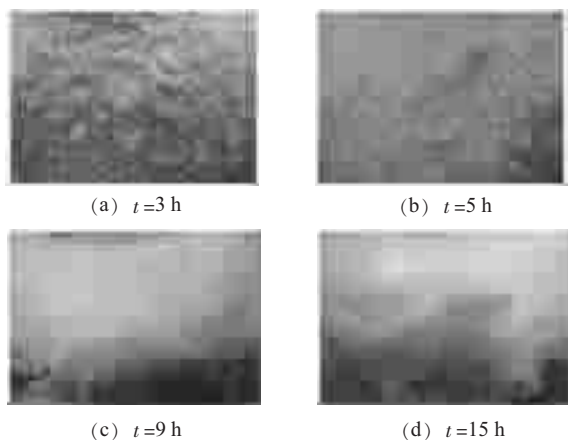


图2 绝缘子上表面雾凇状态

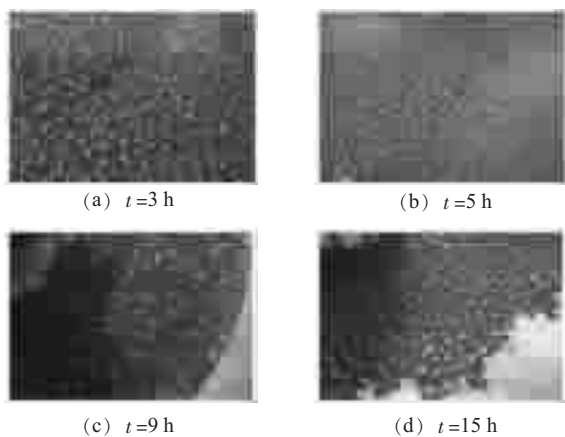


图3 绝缘子下表面雾凇状态

从图2,3中可知,由于伞群结构的不同,伞群上、下表面雾凇在形成过程、形态、覆盖量以及物理性质上存在较大的差别。随着盐雾的注入,伞群上表面从靠近护套部位开始逐渐形成微霜,雾滴不断冻结沉积,局部出现粒状雾凇并且逐渐增加,随着注入时间的增加,伞群上表面被雾凇包裹,雾凇变得松散柔软,厚度不断增大。伞群下表面开始形成离散的微小冰花,伴随雾滴的粘附,微小冰花的分布密度不断增大,当盐雾注入时间继续增加时,附着的冰花不断增大但仍为离散状态。所用NaCl溶液浓度越高,相同时间内在绝缘子表面形成的雾凇层越薄,但雾凇结构更加紧密。

2.2 雾凇闪络现象与过程

雾凇环境下绝缘子的闪络放电现象与过程如图4所示。将开始施加电压的时刻记为0时刻,则雾凇闪络可分为以下6个阶段。

(1) 阶段I:雾凇在交变电场作用下融化,润湿绝缘子表面并形成导电层。由于雾凇粒径小且结构蓬松,

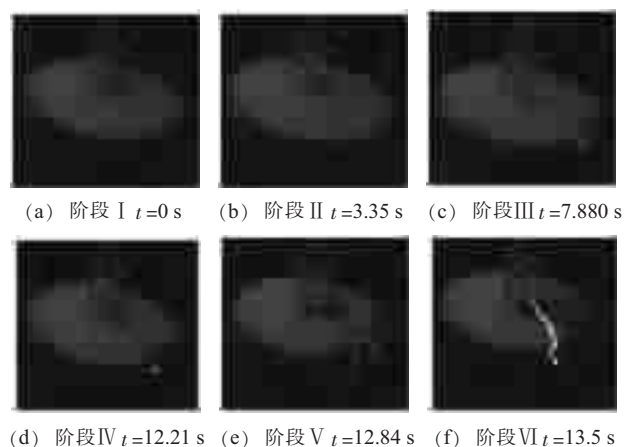


图4 绝缘子表面污闪放电过程

在外加交流电压作用下,带电粒子发生振动而产生热效应,导致绝缘子表面的雾凇融化并形成导电层,引发泄漏电流流过绝缘子表面。随着润湿程度和外加电压的增加,泄漏电流逐渐增大。在绝缘子表面完全湿润后,在泄漏电流产生的焦耳热作用下,雾凇的融化速度加快,进一步降低表面电阻,增大泄漏电流。

(2) 阶段II:随着电压的升高和表面泄漏电流的增大,在绝缘子伞群边缘部位开始出现微弱的电晕放电点,并伴随有间断可闻的放电声音。从图3中可知绝缘子结构导致表面雾凇分布状况存在差异,因此泄漏电流形成的路径和电流密度不同,使得绝缘子表面受到的泄漏电流热效应也存在差异。在绝缘子表面边缘,雾凇层较薄,导电层形蒸发速度较快,容易形成干燥区,进而改变绝缘子表面的电场分布,同时边缘地带表面曲率半径较小,局部电场强度较大,容易最先形成微弱的电晕放电。

(3) 阶段III:电晕放电不断发展。由于电极附近电流密度较大,泄漏电流流过产生较多的焦耳热,导电层形蒸发速度较快,在电极部位曲率半径较小的地带也出现多处可见放电点,且亮度较前一阶段增强,放电声音持续可闻。

(4) 阶段IV:随着绝缘子伞群表面干燥区的形成和外加电压的增加,当局部电场强度达到空气的击穿场强时,干燥区就会产生局部放电和电弧。绝缘子表面电弧瞬间产生的位置是随机的。绝缘子表面导电层及形成的干燥带可以近似等效为电阻串联组成,由于表面雾凇分布的不均匀以及不断融化同时不断的蒸发现象的发生,干燥带的形成位置不断变化,因此绝缘子表面电弧瞬间产生的位置存在随机性。

(5) 阶段V:局部电弧产生后,由于电弧的下降型伏安特性且电阻较干燥区小,使绝缘子表面总电阻显著降低,泄漏电流出现突然增加现象,局部电弧的出现使绝缘子表面的电位重新分布,当其他干燥区的电场强度足以使空气发生碰撞电离时,产生新的局部电弧,

即局部电弧可能多处同时产生。随着外加电压的进一步增加,由于绝缘子表面污层电解质的正温度系数影响和局部电弧的下降型伏安特性,泄漏电流将增大,使得提供给电流的能量增加,电弧温度升高,有利于电离过程的发展,最终导致局部电弧伸长。

(6) 阶段Ⅵ:局部电弧向前延伸至另一处局部电弧时,将汇集在一起形成更长的局部电弧并继续延伸,当局部电弧长度发展至总放电路径长度的 60%~80%时,局部电弧将快速向前发展至绝缘子闪络。

绝缘子下表面各处局部电弧向前伸长过程中最初都是贴着绝缘子下表面向前延伸,但当局部电弧延伸至绝缘子边缘时,局部电弧的发展出现两种情况:一是沿着绝缘子上表面继续向前延伸,另一种则是逐渐飘离绝缘子表面形成空气间隙电弧向上发展。局部电弧漂移成空气间隙电弧向上延伸并发生串接时,被短接的绝缘子片爬电距离内的所产生的所有局部电弧都将瞬间熄灭。这主要是由于绝缘子爬电距离被短接瞬间,被短接部位的电场强度急剧减小,无法维持局部电弧的燃烧。

2.3 雾凇闪络过程泄漏电流时频分析

泄漏电流作为沿面放电和绝缘子绝缘性能的集中体现,涵盖了丰富的有关污闪形成全过程的状态信息。在表面绝缘较好或雾凇形成的导电层完全湿润绝缘子表面时,无电弧放电存在,电流为表面阻性污层电流,幅值很小;当表面绝缘性能下降,有电弧产生,在一个周波内,既有其值较小的污层电流,又有其值较大的电弧电流;当电弧放电不断增强,周波内无熄弧或者零休存在,电弧持续燃烧,电流变成电弧电流,发生闪络。雾凇闪络发展 6 个阶段的泄漏电流波形及其频谱特征如图 5—10 所示。

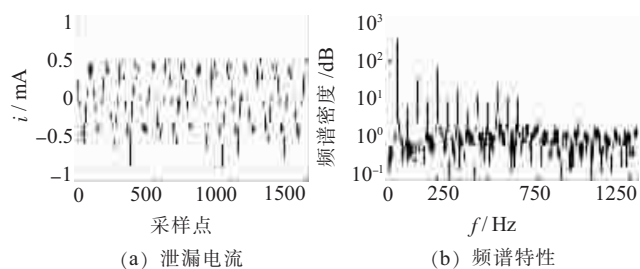


图 5 阶段 I

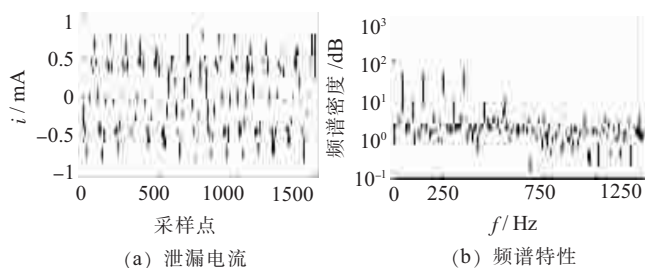


图 6 阶段 II

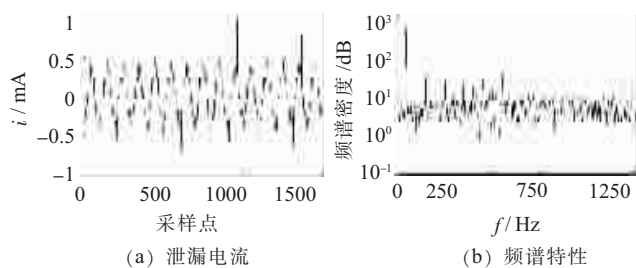


图 7 阶段 III

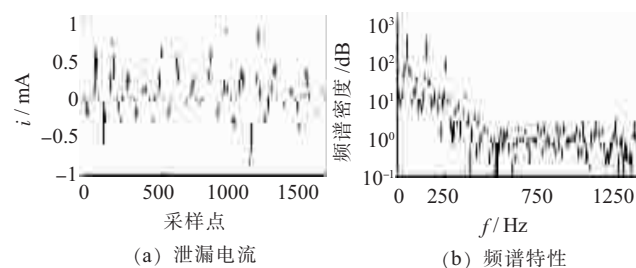


图 8 阶段 IV

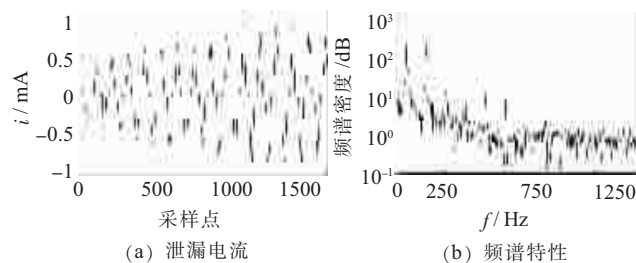


图 9 阶段 V

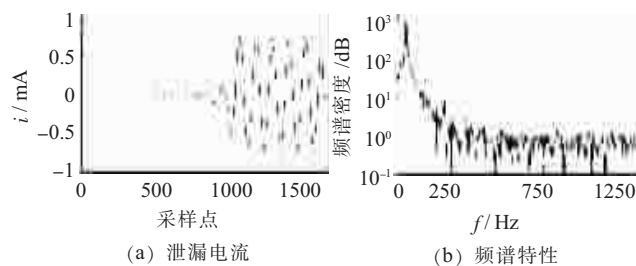


图 10 阶段 VI

(1) 阶段 I:泄漏电流主要为阻性电流,波形呈现为发生了一定畸变的正弦波,峰值在 0.5 mA 左右。此时绝缘子表面层雾凇卡是融化,表面形成导电通道,但没有干燥带放电发生。

(2) 阶段 II:电流波形为近似三角的锯齿波,电流信号峰值达到 1 mA。此时绝缘子表面完全湿润,形成良好的导电通道,实验中可以听到微弱的放电声音,表明有微弱的放电发生。

(3) 阶段 III:此时在第二阶段电流信号的顶端开始出现叠加脉冲,脉冲峰值可以达到 3 mA。在绝缘子片上表面可以看到一些点放电现象发生(电晕放电),并伴随有持续的放电声音。此时的峰值叠加尖端脉冲即为电晕放电信号。

(4) 阶段 IV:泄漏电流开始出现近 50 mA 的脉冲峰值,此时的电流基波也呈现尖端脉冲的形状。实验中

可以观察到,在这个阶段绝缘子表面开始出现干燥带放电现象,放电位置不断移动变化但始终不曾间断,其中不时出现较为强烈的电弧放电。

(5) 阶段 V: 此时为闪络前的放电阶段。在绝缘子上、下表面均可以观察到多处强烈的电弧放电,且放电强度不断发展,电弧不断连接拉长。此时泄漏电流峰值急剧增大,达到 100 mA 以上。由于此阶段放电相对稳定,没有出现峰值突出的脉冲。

(6) 阶段 VI: 闪络阶段。局部电弧逐渐连接伸长,最终跨接两电极,绝缘子表面发生闪络。

在污闪实验中,泄漏电流随时间总体上呈现不断增加的趋势,在起始阶段,电流值平稳,少有冲击起伏,在电弧产生发展阶段,电流冲击起伏越来越明显,到临闪阶段,出现非常大的放电脉冲。每次的放电脉冲过后,都会出现短期的小电流,这是因为放电脉冲导致了绝缘子表面变干燥,而后污层受湿和干带形成需要时间,在此期间绝缘性能恢复,泄漏电流比较小且平稳。

2.4 泄漏电流递归分析表征雾凇闪络

(1) 递归图定性检测绝缘子雾凇闪络。由于泄漏电流时间序列中包含大量工频信号,对进行非线性分析产生负面的影响。由于放电电流频带一般高于工频,因此可以采用小波变换多分层理论对电流信号进行分解,滤去工频分量。采用时间序列相空间重构方法对重构后的泄漏电流时间序列进行递归分析,得出雾凇闪络过程中递归图的变化。在雾凇闪络起始的前 3 个阶段,大多数递归点均匀、平行于主对角线分布,只有少量递归点以杂散的形式存在,表明泄漏电流具备较强的周期性变化,绝缘子表面放电主要是随机性的放电,而没有发生剧烈变化,并且放电之间的相关性较差。而在后期递归图拓扑结构发生显著的变化,出现多个类似“十字”的空白地带,递归点在各个空白地带之间进行密集分布,递归点分块的交替变化有效表征了绝缘子表面放电发生的阶段性突变,反映了电弧放电通道的形成、熄灭与再次形成的过程,正是由于表面放电的这种交替变化才能最终在某一个放电通道形成贯穿金具两端的闪络电弧。

(2) 泄漏电流递归定量指标。雾凇闪络发展各个阶段的递归定量指标如图 11 所示。随着闪络各个阶段的发展,递归率(RR)和确定性(DET)均呈现下降的趋势。该变化特征表明随着绝缘子表面放电的发展,泄漏电流中具有规律性的组分逐渐减少,不确定性组分逐渐增加,表面放电从起始的随机发生的微小火花放电经过弱的电弧放电,最终形成稳定、强烈的放电通道。

3 结束语

针对雾凇环境引发的绝缘子闪络事故,基于雾凇

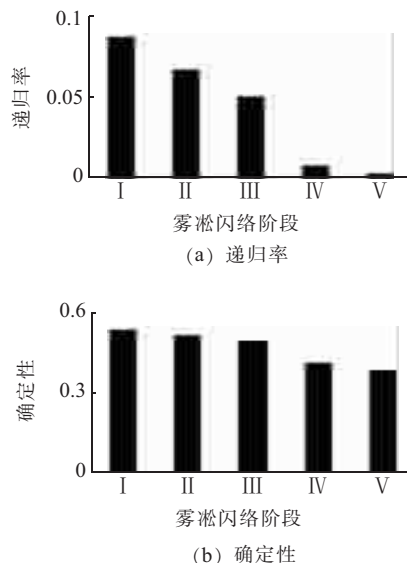


图 11 雾凇闪络发展各个阶段泄漏电流的递归定量指标

闪络现象的观察采用递归分析方法分析泄漏电流的非线性特征,监测并揭示了绝缘子在雾凇环境下的闪络过程与机理,结果表明:电导率较高的雾凇覆层容易引发绝缘子表面发生闪络;在雾凇覆盖绝缘子表面初期较易引发绝缘子闪络;泄漏电流的递归图变化定性表征了绝缘子雾凇闪络发展各个阶段的表面放电特征,并且递归定量分析进一步增强了对闪络过程的监测以及对闪络机理的理解。

参考文献:

- [1] DU B X and LIU Y. Pattern Analysis of Discharge Characteristics for Hydrophobicity Evaluation of Polymer Insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 114-121.
- [2] 蒋兴良,舒立春,孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 20-24.
- [3] 谢述教,蒋兴良,王强,等. 覆冰绝缘子直流闪络特性研究现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 16-18.
- [4] GUBANSKI S M, DERNFALA K, ANDERSSON J, et al. Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5): 1065-1080.
- [5] DOUAR M A, MEKHALDI A, and BOUZIDI M C. Flashover Process and Frequency Analysis of the Leakage Current on Insulator Model Under Non-uniform Pollution Conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4): 1284-1297.
- [6] 张佰庆,崔艳东,童维占. 防污闪 RTV 硅橡胶喷涂施工的工艺及要点[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(6): 58-60.

作者简介:

薛恒嵩(1981),男,江苏扬州人,工程师,从事电力系统管理工作。

江苏电网 500 kV 智能变电站建设技术综述

吴 威¹, 宋亮亮²

(1.江苏省电力公司, 江苏 南京 210024; 2.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘 要:随着智能变电站技术的不断发展以及建设方案的日益复杂, 智能变电站长期的运行性能对其建设模式提出了要求。文中在国网公司现有智能变电站典型建设方案的基础上, 介绍了江苏电网已投运的 500 kV 天目湖智能变电站二次系统中的新技术应用, 在满足运行可靠性的前提下, 提出了进一步推广一、二次设备结合程度, 提高智能变电站信息融合水平, 实现二次设备功能优化。

关键词:智能变电站; 建设技术; 智能组件

中图分类号: TM63

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)06-0051-04

我国智能电网建设进入了快速发展阶段, 其中“十二五”期间国网公司将建设 110 kV 及以上智能变电站 6100 座。基于 IEC 61850 标准的智能变电站将变革传统变电站的一、二次设备, 设备高度集成化、智能化的变电站将简化运行人员操作, 缩短设备停电维护时间, 促进电网向调控集中化, 设备维护向集约化发展。

根据国网公司智能变电站建设“统一规划、统一标准、统一建设”的原则要求, 目前江苏电网先后建成投运 220 kV 西泾智能变电站, 500 kV 常熟智能变电站、220 kV 广汇智能变电站、500 kV 天目湖智能变电站等。和常规变电站相比, 智能变电站采用了众多新技术, 如一、二次设备状态监测、电子式互感器、一体化监控系统、1588 网络对时技术、一体化保护测控装置等。光纤传输方式相比传统电缆具有抗干扰强、占用空间少、数据信息量大的优点; 同时对监控系统的统一建模和网络通信传输方式为实现设备互联互通以及开展智能变电站高级应用打下基础。由于 500 kV 变电站在电网中的地位重要性, 其在一、二次设备的可靠性要求更高。在当前智能变电站技术方案不断优化条件下, 综合考虑其运行可靠性、技术性、经济性指标显得尤为重要^[1]。

1 天目湖变电站简介

天目湖变电站是江苏电网按智能化要求设计建设的 500 kV 变电站, 由原当涂 - 惠泉双线开断环入形成当涂 - 溧阳双回线、溧阳 - 惠泉双回线, 该站是“皖电东送”通道的江苏落点站。

天目湖变电站本期建设规模: 500 kV 采用二分之三接线方式, 为敞开式结构, 4 串共 10 组断路器, 为北京 ABB 产 SF₆ 断路器; 2 台 1000 MV·A 主变均为中电装备东芝生产; 220 kV 部分采用双母双分段

接线方式, 采用 GIS 结构, 为河南平高东芝生产, 共 12 个出线间隔; 35 kV 部分主要用于无功补偿及站用电, 2 台主变各带一条母线, 2 台站用变, 4 台电容器。

根据现有智能变电站建设标准的规定^[2], 天目湖变电站的主变压器配置油中含水、油中气体和铁心接地电流等在线监测装置, 并埋置局放传感器。500 kV 断路器配置 SF₆ 气体压力等在线监测装置, 220 kV GIS 设备配置 SF₆ 气体压力等在线监测装置, 并埋置局放传感器。500 kV 和 220 kV 避雷器配置泄漏电流和动作次数在线监测装置。

天目湖变电站二次系统采用传统互感器+合并单元就地数字化的接口方案, 实现电流电压模拟量采集数字量输出; 二次设备采用一体化技术方案, 包括合并单元和智能终端一体化, 保护和测控装置一体化, 所有过程层设备均采用就地按断路器布置, 减少了就地柜的数量; 继电保护系统采用“直采直跳”模式, 除失灵联跳其他开关和主变跳母联、分段采用网络方式跳闸外, 其余保护功能都是采用点对点的直跳方式, 保证跳闸回路的可靠性。采用一体化监控系统集成 SCADA 数据采集、视频监控、二次安防、状态监测系统等功能。

2 天目湖变电站二次系统结构

天目湖变电站间隔层和过程层设备及网络系统搭建依据国网相关技术标准^[3,4]建设。该站网络结构采用典型的三层两网设计, 过程层设备主要包括模拟量输入合并单元加智能终端和独立的电压互感器合并单元, 间隔层设备主要包括保护测控一体化装置、保护装置、独立测控装置以及故障录波器, 站控层设备主要包括监控后台、远动装置、一体化信息平台等。

站控层配置全站统一的双重化星型网络, 各电压等级的间隔层保护装置、保护测控装置、测控装置、故障录波器和站控层监控后台、远动装置、一体化平台都同时接入双重化的站控层网络中, 双网络冗余工作, 保

证网络的可靠性^[5,6]。

500 kV 过程层网络按 GOOSE 网、SV 网独立双重化设计,220 kV 过程层网络按 GOOSE、SV 共网双重化设计,站控层网络采用 MMS、GOOSE、SNTP 时间同步三网合一、双网设计。全站二次系统结构关系图如图 1 所示。

3 天目湖变电站二次系统功能分析

3.1 保护测控功能合一

天目湖变电站 500 kV 开关和 220 kV 线路、母联、分段采用保护测控一体化装置。由于 500 kV 开关保护和 220 kV 线路保护、母联保护、分段保护都是双重化配置,因此该站的测控功能也随着保护实现了双重化。装置的保护和测控功能都由同一个 CPU 实现,保护功能和测控功能相互独立,互不影响,保护功能和测控功能的定值和软压板相互独立,可在不同的界面进行整定,且定值和软压板互不影响。但是保护功能和测控功能的程序版本并未区分,装置异常处理或检修维护时可能会相互影响。保护功能和测控功能所需的 SV 信息和 GOOSE 信息都是通过同一个物理链路传输的,且装置检修压板也只有一个,因此装置的保护功能和测控功能不能单独检修,只能以装置为单位进行检修。

3.2 双测控功能应用

正常运行时,2 套测控之间同时工作、相互独立,

同时向站控层上传遥测量、遥信量等信息,接收到站控层的命令也都能执行。但对于监控后台和调控中心而言,开关、刀闸的位置信号以及一次设备本体信号只需显示一个即可,同时显示多个反而会造成不一致而影响运行监视的效果;对于监控后台和调控中心的下发的遥控命令而言,也只需要一套保护测控装置执行即可。因此,双套测控存在主、从关系,对于开关位置信号、本体信号等,监控后台或调控中心只显示主测控的信号,从测控的信息只存入数据库而不显示;对于遥控命令,监控后台或调控中心只发送给主测控执行。对于智能 IED 装置自检信息、告警信号,需要同时监视。因此,监控后台和调控中心同时显示这些信息。

双测控的主、从关系可通过监控后台根据当前各测控装置的运行情况确定,通常默认运行在 A 套。监控系统可手动切换双测控的主、从状态,也可根据链路状态、告警信号等自动切换,现场运行时为了保证监控系统不会频繁切换测控装置,一般选择手动切换模式。监控系统数据库中同时存在两套测控装置的实时运行数据,但由于监控系统的运行数据还要给远动装置,为此在监控数据库中定义了一套虚装置,其值对应为当前运行的实装置值。

双测控的应用实现了在不影响正常运行的情况下对测控的检修工作,且一套测控异常时,可以通过一套测控实现正常的监视和控制,提高了设备运行的可靠

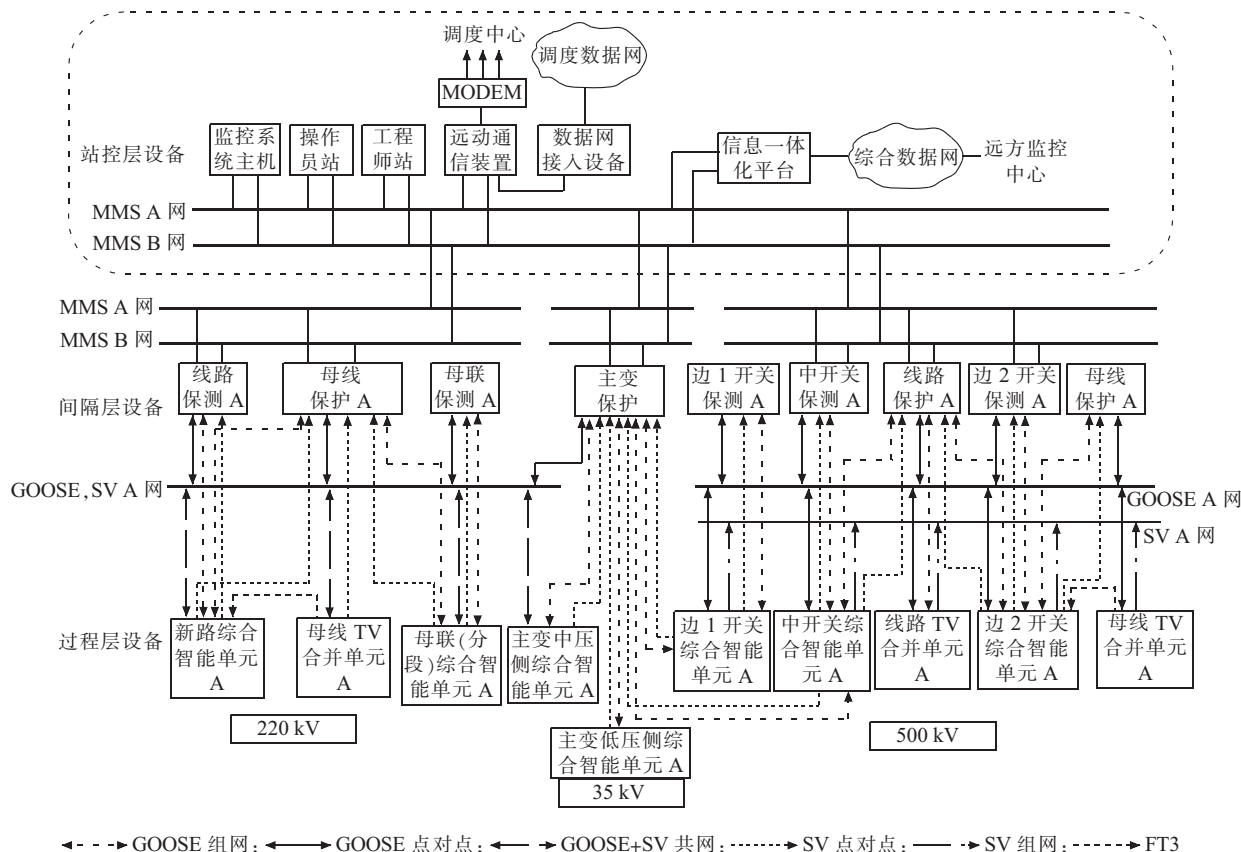


图 1 500 kV 天目湖变电站二次系统结构图

性。但保护测控装置需要进行保护检修时,需要将主测控切换到另一套装置才能进行,装置恢复运行时也需要检查测控功能处于正常运行状态,一定程度上增加了操作复杂度。

3.3 模拟量输入智能组件应用

电子式互感器在先期的试点智能变电站中的运行情况并非理想,影响现场可靠运行的关键技术步还需深入研究,为此,从保证设备运行可靠性的角度出发,智能变电站中在模拟量采样方面逐渐转向采用常规互感器+合并单元的方式实现采样的就地数字化。在控制和信息采集方面,智能变电站普遍采用智能终端作为二次设备与一次设备之间的接口实现数字化。智能变电站应用中,合并单元和智能终端都是就地布置设备,都布置在一次设备的就地控制柜内。为了提高设备功能的整合程度,该站采用智能终端和合并单元一体化设计,既实现电流电压模拟量的采集上送,又完成就地开关量信息的采集和保护测控控制命令的执行。全站模拟量输入合并单元加智能终端采用双重化配置,A套、B套上下布置的方式位于同一面就地汇控柜内。500 kV 线路、主变另设单独的电压合并单元,布置于边断路器就地汇控柜内(主变 220 kV 电压合并单元布置于主变中压侧控制柜内),完成电压信号的单独采集,并直接送至保护测控装置。

模拟量输入合并单元加智能终端的合并单元功能和智能终端功能相对独立,由不同插件完成,即 SV 点对点接口和 GOOSE 点对点接口分别布置在不同的插件上,避免了相互影响。合并单元智能终端一体化装置分别设置 SV 检修压板和 GOOSE 检修压板,且与 SV、GOOSE 报文分别对应。模拟量输入合并单元加智能终端 CPU 插件的接口可同时输出 GOOSE 和 SV 报文,减少设备接口的配置。

3.4 二次设备组屏原则

天目湖变电站全站线路保护、开关保护测控、母线保护、主变保护、母联保护、分段保护、模拟量输入合并单元加智能终端及合并单元均为双套配置。其中 500 kV 开关保护测控、500 kV 线路保护、主变保护、500 kV 母线保护、220 kV 母线保护的 A 套和 B 套分别组于两面屏柜中,500 kV 开关保护按串组屏,500 kV 线路保护按线路单独组屏,500 kV 母线保护 I 母和 II 母组于一面屏柜中,主变保护按主变单独组屏,220 kV 母线保护按双母线组屏,220 kV 母联保护、220 kV 分段保护、220 kV 线路保护的 A 套和 B 套组于一面屏柜中。

该布置方式节省了大量屏位,减小了保护小室的面积,但对其中一套装置异常而另一套正常时的检修工作提出了新的要求。现场应制定专门的运行规程,需

对另一套或两套正常运行的装置做好安全措施,如布置红布幔,在运行装置的电源空开下方布置醒目的标记等。

3.5 光纤二次回路命名规范

天目湖变电站智能二次设备之间的回路采用光纤传输方式,大大简化了电缆数量,节约了建设成本,同时避免了就地电缆传输信号抗干扰性差的问题。国网“六统一”技术规范对二次回路及端子排的命名进行了规范,但未涉及光纤二次回路的命名。为确保光纤回路的正确性,方便光纤回路正常运维及检修,现场建设过程中对所有过程层光纤二次回路进行了统一规范命名,命名信息中包含该光纤的始末端装置名称(如智能单元 A,光配架)和对应的端口编号(如 #3/R1,1-A-7),如图 2 所示。

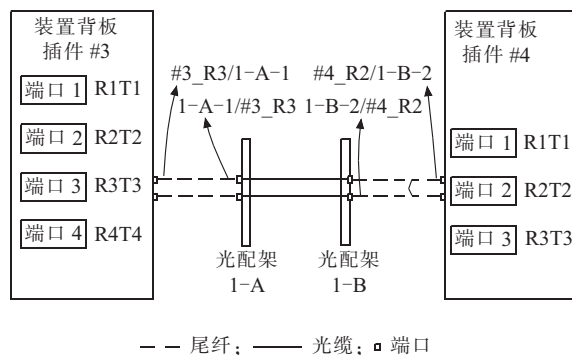


图2 智能设备光纤二次回路命名示意图

同时由于智能装置背板的光纤端口数量较多(如主变、母差等),为方便运行检修人员正常巡检,正确制定相关安全措施(涉及具体拔光纤时需要对照竣工图纸),对各端口的使用功能进行定义,用作直观标示,如表1所示。

4 结束语

本文研究了智能变电站的技术发展过程,介绍了江苏 500 kV 天目湖变的技术方案和特点,对首次采用的保测合一装置、双测控功能、合并单元智能终端一体化、智能设备就地布置、光纤二次回路命名等工程应用进行了分析。一年的工程运行表明该方案满足智能变电站安全可靠运行的要求。随着智能变电站技术的不断发展,下一阶段将在不断总结现有建设和运行经验的基础上,进一步推广一、二次设备结合程度。提高智能变电站信息融合水平,主要包括以下几个方面:

(1) 推进变电站集成优化设计,提高结构布局合理性。开展设备模块化设计、标准化配送式设计、设备接口标准化等。

(2) 提升变电站高级功能应用水平。合理规划数据信息类型,优化二次网络结构,构建变电站一体化监控系统,提升设备状态可视化、智能告警、辅助决策等

表 1 智能二次设备光口连接关系表

装置 1	端口 1	装置 2	端口 2	装置 3	端口 3	光纤芯号	接收数据集用途
XX 线 ## 保护	#3_R1	过程层 GOOSE 交换机 A	P1_T	—	—	1	母线保护动作闭重、远跳
	#3_T1		P1_R		—	2	—
XX 线 ## 保护	#3_R3	光配架 1-A (光配架 2-B)	1-A-1 (2-B-1)	XX 线 ## 智能终端	#2_T2	尾纤	开关位置 压力低闭锁重合闸 另一套智能终端闭重 本套智能终端闭重放电
	#3_T3		1-A-2 (2-B-2)		#2_R2	尾纤	—

高级功能应用水平。

(3) 总结已有智能变电站设计、调试、运行维护经验,开展相应分析,进一步规范江苏电网智能变电站典型设计和调试方法,形成标准化作业流程。

(4) 进一步修订完善智能变电站技术标准体系。加快编制和修订智能变电站领域技术标准,推动重点技术标准的国际化,构建江苏电网适应新一代智能变电站建设需求的标准体系。

参考文献:

[1] 国家电网公司基建部. 智能变电站建设技术[M]. 北京:中国电力出版社,2012:132-151.
[2] 王 勇,梅生伟,何光宇. 变电站一次设备数字化特征实现[J].

电力系统自动化,2010,34(13):93-98.

[3] Q/GDW 494—2009,330~750 kV 智能变电站设计规范[S].
[4] Q/GDW 441—2010,智能变电站继电保护技术规范[S].
[5] 冯 军. 智能变电站原理及测试技术[M]. 北京:中国电力出版社,2011:57-59.
[6] 吴 罡,李 琳,李 翔,等. 110 kV 智能变电站设计方案初探[J]. 江苏电机工程,2011,30(2):31-35.

作者简介:

吴 威(1975),男,江苏海门人,工程师,从事电网建设管理及的研究工作;
宋亮亮(1985),男,江苏启东人,工程师,从事电力系统继电保护及智能变电站相关技术的研究工作。

Review on 500 kV Substation Construction Technology in Jiangsu Power Grid

WU Wei¹, SONG Liangliang²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;
2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the continuing evolve of smart substation technology, as well as the increasing complexity of construction scheme, the long-term operating performance of smart substation has proposed requirements to construction mode. This paper introduces new technical application of secondary system in the 500 kV TIAN-Muhu substation based on the State Grid's existing typical building program. On the premise to meet operational reliability, it proposes to promote a further combination of secondary equipment and to increase information fusion level of smart substation, which will achieve the secondary device function optimization.

Key words: Smart Substation, Construction Technology, Unification of Relay and Control

(上接第 50 页)

Research on Insulator Rime Flashover Through Leakage Current Regression Analysis

XUE Hengsong

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: The state of insulator is critical to secure operation of transmission and distribution lines. The leakage current is a reflection of the surface state and discharge character of insulator because it exists all the time. Under laboratory environment, the rime is mimicked by human. Silicone rubber insulators are placed into the mimicked rime with various times to damage their insulation in different extent, and then voltage is applied to them to trigger flashover. Through using high speed video camera to record the phenomenon and process of flashover, the nonlinear character of leakage current can be studied by regression analysis which provides recurrence plot and quantitative index to characterize leakage current's internal variation. The result shows that the nonlinear character of leakage current is consistent with insulator's surface discharge phenomenon. The research reveals occurrence mechanism and developing process of insulator's flashover under rime environment, which helps to ensure the reliability of outdoor insulators.

Key words: insulator; rime flashover; leakage current; regression character; state detection

中压电力电缆状态检测技术及应用

沈飞飞¹, 张建梁², 吕培强², 杨启明², 莫宏伟², 王 一², 杨 杰³, 徐 斌³
(1.扬州供电公司, 江苏 扬州 225000; 2.苏州供电公司, 江苏 苏州 215000;
3.哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:目前, 在中压电力电缆状态监测与检测过程中, 水树评价与评估方法相关经验不足和积累数据缺失。基于此分析不同程度开展的破坏性检测、非破坏性检测、在线监测、非电量分析法等各自的优势与缺点, 提出了状态监测与检测新技术, 实践应用红外诊断、在线局放、阻尼振荡波状态检测、超低频介损测试及新型传感监测技术的优势, 可用于实时监测并分析中压电缆及附件设备的局部放电的状态, 使得检测结果更为可靠, 较好地弥补了现有中压交联电缆绝缘性能监测手段存在的局限和不足。

关键词:状态检测; 交联聚乙烯; 实践应用; 评估分析

中图分类号: TM206

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)06-0055-04

在我国城乡配电网网架中, XLPE 电缆由于其优异的介电性能以及安装、运行维护方便的特点, 得到了较广泛应用。目前局部区域电缆网已经接近或超过 20 年, 按照 30 年至 40 年电缆设计预期寿命, 需要提前评估这些在役电缆的运行工况、老化程度以及预期寿命, 合理安排状态评价对现役不同老化程度的电缆进行状态检修, 亟需深入探究中压电缆在长期运行工况下存在的局部放电现象, 由此积累的一些不良效应和这些微弱的放电能量的积聚将缓慢地损伤绝缘, 最终导致电缆线路绝缘击穿, 发生突发性被迫停运故障, 势必严重影响到供电可靠性和优质服务水平。因此, 基于中压电力电缆状态监测与检测的新技术应用, 意在有效地了解电缆及附属设备的运行状况, 合理安排局部更新和维修计划, 进而提高 XLPE 电缆的供电可靠性和运行寿命, 具有极为重要的经济价值和社会效益。

1 电力电缆状态测试技术综述

目前, 电力电缆一般测试技术方法如图 1 所示。

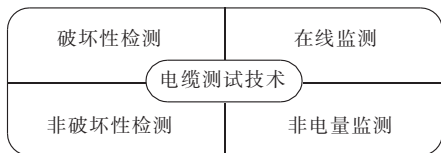


图 1 电力电缆测试技术

(1) 破坏性检测方法及其评估。通过对被试电缆加压, 使得运行电缆在额定电压作用下不显现的水树等隐性缺陷, 加速在高电场下连续或不连续发展, 集中表现局部放电大幅度甚至突变增加, 存在水树发展为电树, 现场往往发生击穿现象。

(2) 非破坏性检测方法及其评估。有主流等温松弛电流法、介电频谱法、残余电荷法、损耗电流谐波分量法等。其中等温松弛电流法, 是通过观测水树等缺陷引起的界面极化强度随水树变化而正向变化, 同时依据电缆绝缘材料中的本体与电极的极化, 基本维持不变不与投运年限相关的特点, 得到导致水树缺陷的极化值与本体极化值的比值作为老化趋势的判据^[1]; 介电频谱法, 是通过介电频谱随着外加电压的变化判定水树等缺陷的极化强度增加, 或者采用检测水树的介质损耗随水树发展长度及含量的变化值, 确定相应损耗的增加。

(3) 在线监测技术。利用较大比重水树枝的非线性效应, 通过测量电流中的谐波分量中三次谐波量或直流成份, 积累测量数据比过来研判电缆的老化程度。通常电缆局部放电在线监测方法关注电缆附件及两侧电缆局部放电变化量的检测。

(4) 非电量监测技术。一是直接测量抽检材料中水树枝的长度和含量的分布, 推算电缆的老化程度和剩余寿命。二是量测其热延伸的变化度确定材料的劣化程度; 或者采用动态机械谱、差热分析等方法, 测量电缆绝缘的热力学曲线, 换算活化能的变化间接反映电缆的老化程度。

2 在线和离线局放测试方法比较

在线和离线局放测试特点如表 1 所示。

表 1 在线和离线局放测试特点

局放测试	优点	缺点
在线局放	不需停电, 定位电缆附件缺陷	监测少部分电缆缺陷, 无法量化
离线局放	精确定位放电电源等故障, 可比性强	需停电, 升压电源等设备配合

(1) 在线局部放电监测技术。优点是可以在运行中测试而不需停电;可以定位大多数电缆附件缺陷和少数电缆缺陷;一般不需要额外的电源;在现场的环境中测试(包括负载、温度等),有助于了解电缆绝缘的实际状况^[2]。缺点是只能监测到少部分电缆缺陷;局放脉冲信号随着电缆长度衰减很快,准确的局放分布图已经不可能;缺乏统一标准和标定方法,不同测试结果缺乏可比性;测试技术复杂度较高;一般都需要分段测试,对于较长的直埋电缆测试更为困难。且测定和评估只能在额定电压水平下,对背景噪声的处理有一定难度;另外在线局部放电监测系统不能按照 IEC 的标准进行校准,局放水平无法量化,也不具备可比性。

(2) 离线局部放电检测技术。优点是测试结果与出厂测试有可比性;可高于运行电压测试,有助于判别缺陷类型;可以比较精确地定位放电源等故障;干扰少,测试结果比较可信;可以测试数公里长的电缆线路;操作相对比较简单,能较快给出测试结果;可以得到局部放电起始点压(PDIV)和局部放电熄灭电压(PDEV)。缺点是需要设备停电,且升压电源等设备体积比较大、比较重。

3 状态测试新技术的应用

电缆状态监测的核心是获取状态评估信息的及时性、准确性和科学性,通过对异常、缺陷部位的发展趋势、严重程度作出判断,从而制定合理的检修计划。在状态检测过程中,关键是通过运行巡视、在线监测、局放测试等手段获取电缆状态数据。

3.1 在线测温

红外诊断作为一种先进的不停电检测技术,在国家电网《输变电设备状态检修试验规程》中作为电缆及附件的例行试验项目。以 2012 年 8 月 10 kV 114 曹合线 86-1-41-1(1 号)电缆终端及连接部位红外检测工况为例:电缆终端头型号 WRSY-10/3.2 70 mm²,出厂日期 2000 年 11 月,投运日期 2001 年 3 月,测试仪器 HY6800+7°,测试距离 8 m,环境参照体温 29.63 °C,风速 2.0 m/s,辐射系数 0.90,测得表面温度 104.24 °C,换算温差 74.61 °C。

(1) 参照《带电设备红外诊断应用规范》DL/T 664—2008 附录 A 电流致热型设备缺陷诊断判据:一般缺陷(温差不超过 15 K,未达到重要缺陷的要求),严重缺陷(热点温度>90 °C或 $\delta \geq 80\%$),危急缺陷(热点温度>130 °C或 $\delta \geq 95\%$)^[3]。

(2) 研判设备类别和部位,电缆终端头与金属部件的连接;热像特征,以线夹以下电缆终端头为中心的热像,热点明显;故障特征,局部发热不良。

3.2 在线局放

本项目应用 HVPD 公司研发的 PDSurveyor 手持式局部放电在线巡检仪的 TEV 局放检测功能,对苏州工业园区 64 座配电所(开闭所)的 82 台开关和分支电缆进行局放检测,测试记录如表 2 所示。

表 2 测试记录表

配电所名	开关柜编号	TEV/dB
腾飞开闭所	261	18,18,21
腾飞开闭所	280	19,17,21
.....		
克曼开闭所(I 厂)	2A2	19,17,19
克曼开闭所(I 厂)	2A2 后	20,20,20

参照 PDSurveyor 局放测试导则,根据 TEV 测试结果对局放水平状态进行分类,分类区间如表 3 所示。

表 3 分类区间表

指示灯颜色	TEV 值范围 /dB	状态说明
LED1 绿色指示灯	15	OK/ 无放电
LED2-3 黄色指示灯	20~25	中度放电 / 监测
LED4-5 橙色指示灯	30~35	中高度放电 / 检查
LED6 红色指示灯	40~45	高度放电 / 禁止运行并试验

由于表 3 局部放电各种状态对应 TEV 数值间存在空挡,因此对表 3 进行修正,修正后的局部放电状态表如表 4 所示。

表 4 修正后的局部放电状态表

TEV 值范围 /dB	状态说明
(0,17.5]	OK/ 无放电
(17.5,27.5]	中度放电 / 监测
(27.5,37.5]	中高度放电 / 检查
(37.5,47.5]	高度放电 / 禁止运行并试验

根据修正后的局部放电状态分类表,对表 2 所示测试结果进行分类,形成基于 TEV 测试的局部放电状态统计结果:无放电状态点 / TEV 值范围(0,17.5],共 70 个;中度放电状态点 / TEV 值范围(17.5,27.5],共 254 个;中高度放电状态点 / TEV 值范围(27.5,37.5],共 27 个;高度放电状态点 / TEV 值范围(37.5,47.5],共 3 个。

为了验证表 4 局部放电状态划分的合理性,采用以上局部放电状态统计结果进行方差分析。分析过程中,每一个状态数据视为一区组。由于在 4 种状态中被测数据量不等,所有运用方差分析中不等重复数的单因素方差分析来检验。以下为计算过程。

试验数据分组 $t=4, i=1, \dots, t$, 各区组重复数分别为无放电状态点 $r_1=70$, 中度放电状态点 $r_2=254$, 中高度放电状态点 $r_3=27$ 和高度放电状态点 $r_4=3$, 则试验数

据总数 $r_i=r_1+r_2+r_3+r_4=354$ 。

试验数据总和:

$$T_{..} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{r_i} x_{ji} \quad (1)$$

其中组内和:

$$T_{.i} = \sum_{j=1}^{r_i} x_{ji} \quad (2)$$

式(2)中: $i=1, \dots, t$; x_{ji} 为试验指标。

r 个试验数据的总平方和:

$$S_T = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{r_i} x_{ji}^2 - \frac{1}{r} T_{..}^2 \quad (3)$$

组间平方和:

$$S_A = \sum_{i=1}^t \frac{1}{r} T_{.i}^2 - \frac{1}{r} T_{..}^2 \quad (4)$$

组内平方和:

$$S_E = S_T - S_A \quad (5)$$

计算得到组间平方和 $S_A=5\ 816.00$; 自由度 $f_A=4-1=3$; 组内平方和 $S_E=864.51$; 自由度 $f_E=354-4=350$; 均

方 $\bar{S}_A = \frac{S_A}{f_A} \approx 1\ 938.67$; 均方 $\bar{S}_E = \frac{S_E}{f_E} \approx 2.47$; $F = \frac{\bar{S}_A}{\bar{S}_E} \approx$

784.89。根据上述计算结果,得到方差分析表,如表5所示。

表5 方差分析表

方差来源	平方和	自由度	方差
组内	864.51	350	2.47
组间	5 816.00	3	1 938.67
总和	6 680.51	353	—

查方差表,当 $f_1=3$, $f_2=350$, $F_{0.01}(3, 350)=3.78$; $F > F_{0.01}(3, 350)$ 。上述方差分析表明表4的状态划分是合理的。根据表4所示修正后的局部放电状态表,本项目对苏州工业园区64座配电所(开闭所)的82台开关和分支电缆进行局放检测结果可知:苏州工业园区64座配电所(开闭所)的82台开关和分支电缆中,无放电的比例为20%,中度放电的比例为71%,中高度放电为8%,高度放电的比例为1%。

3.3 离线检测

3.3.1 阻尼振荡波状态检测

基于时域反射法的局放源定位及振荡波形阻尼衰减的介质损耗测量,采用阻尼振荡波电压代替工频交流电压作为测电压,符合 IEC 60270 有关脉冲电流法局放现场测试标准要求,现场采用阻尼振荡波测试装置使得被测电缆在较低的测试电压即可暴露局部放电,主要依据是振荡波激励下测得的现场局部放电谱图,一旦发现局部放电,立即停止局部放电测量,可以

有效保护被测电缆线路,避免意外击穿故障。但对于电缆长度小于100 m的短电缆,存在局放定位盲区;另外,通过数学公式计算得到的介质损耗测量结果的有效性、准确性尚待进一步验证。

3.3.2 0.1 Hz 超低频电压下介损测试

苏州华池街配电所20 kV电力电缆介损测试。测试时间:2011年8月24日;测试地点:华池街配电所;被测电缆型号:YJV22-3*300mm²-12/20 kV;长度:1.235 km;电缆投运时间:1998年;测试环境温度:29~30℃;相对湿度85%。

(1) 测试方法:0.1 Hz 超低频电压下,采用高压侧采样的电缆介损测试系统,对被测电缆进行 $0.5U_0$, $1.0U_0$, $1.5U_0$, $2.0U_0$ 4个阶段的升压,记录介损(介损变化率)随测试电压的变化曲线。

(2) 通过本次实测数据得到以下结论:①A相的介损变化率 $(2U_0-U_0)=0.445\%$;B相的介损变化率 $(2U_0-U_0)=0.323\%$;C相的介损变化率 $(2U_0-U_0)=0.278\%$ 。依据 IEEE 400—2001《有屏蔽层电力电缆系统绝缘层现场型试验与评估导则》的介损变化率超过0.1%作为立刻更换、完全老化状态的判据,被试电缆处于老化状态,建议更换中间接头后再次复查。②对运检单位来说,应尽早对相关龄段电缆状态跟踪评价,避免交联绝缘层里水树枝迅速转化成电树枝造成的大范围停电故障。

3.3.3 损耗电流谐波分量检测

以苏州工业园区现场试验案例说明,测试时间为2012年6月;被测试电缆情况:型号 YJV22-3*240 mm²-8.7/15 kV;2002年投入运行;线路长度:378 m。采用3 kV(5 kV, 7 kV, 9 kV)谐振电压幅值,其中以B相电缆测试结果为例,在3 kV, 5 kV, 7 kV, 9 kV 试验电压下的损耗电流波形及损耗电流谐波分量显示,最大介质损耗值分别为0.033 5%, 0.034 1%, 0.035 9%, 0.049 7%,均小于0.1%,且损耗电流三次谐波不明显,说明该相电缆绝缘状态良好。

4 新型传感监测技术

4.1 设置传感器

在现场局部放电监测时,由于采用了不同的信号处理技术,所以在时域与频域中同步辨析出交变场中监测到的各种信号^[4]。

(1) 高频电流传感器用于监测高频脉冲泄漏电流。采用钳式关合高频电流传感器,自电缆接地屏蔽线或就近电气设备外壳接地线上取得脉冲电流信号,无须在加装时停运电缆及设备;利用罗哥夫斯基线圈从电气设备的接地线处测取信号,信号频率可达到30 MHz,大幅提升了局部放电的测量频率。

(2) 超声波传感器用于测量伴随局部放电产生的超声波信号,现场可直接利用该信号或者结合电脉冲、电磁波信号对局放源进行物理定位,并判别局部放电的类型^[5]。

(3) 甚高频传感器用于监测高频的电磁波信号,通过采集由局部放电现象伴随的电磁波信号(其频率可达3 GHz以上)从而达到检测放电信号的作用。

4.2 设置滤波器

(1) 带通滤波器用于处理高频电流传感器信号的频率范围为100 kHz~30 MHz,超声波传感器频带范围为80~300 kHz。

(2) 由于带阻滤波器仅滤除频率介于高频及低频间的信号,所以其他频率的信号均可通过,在波形监测过程中可采用该滤波器滤除干扰^[6]。

(3) 自适应滤波器可滤除波形监测过程中的某些连续噪声。对于现场某些较强连续噪声的环境中,可采用该滤波器,但根据奈科斯特稳定性判据(Nyquist Theorem),滤波器上限截止频率应等于或小于1/2采样频率。

4.3 智能级应用软件

(1) 人机界面:动态显示二维、三维图像;实现图表、二维图形、三维图形、幅值-脉冲、相位-脉冲等灵活显示方式。

(2) 通信方面:全面支持RS-232/422/485,USB,TCP/IP,Modem等通信模式;跟踪模式下可自动测量及下载数据。

(3) 综合诊断:方便现场直观准确地对波形做出诊断及分析;历史数据比对提示功能等。

5 结束语

实践应用红外诊断、在线局放、阻尼振荡波状态检测、超低频介损测试及新型传感监测技术,可用于实时

检测并分析中压电缆及附件设备的局部放电的状态,使得检测结果更为可靠。同时由于区域性使用的交联聚乙烯材料、生产工艺标准规范不尽一致,电缆管沟结构、敷设方式、运行年限的不同特点,测试系统抗干扰能力随之存在一些差异,研究老化因子与敷设方式、运行年限、批次电缆型号、规格等信息的相关性,以化学分析、介电频谱、绝缘电阻等方法进行验证,修正不同年限电缆老化评估判据。另外值得关注的是,结合现有的微弱信号检测技术,抗干扰的硬件和软件技术,采集的有效信息非常微弱,仍不能完全满足现场测试对精度的要求。所以进一步丰富、完善基于中压电力电缆状态监测与检测的新技术发展,为后续在线监测技术和高电压等级电缆线路绝缘状态诊断研究,具有进一步推广的价值和应用前景。

参考文献:

- [1] 段乃欣,马翠姣,邱 昌,等.交联聚乙烯电缆敷设后的局部放电检测[J].供用电,2001,18(4):12-14.
- [2] 李华春.电缆局部放电在线检测方法的分析比较[J].电力设备,2005,06(5):29-32.
- [3] 罗俊华,马翠姣,邱 昌.XLPE电力电缆局部放电在线检测[J].高电压技术,1999(4):32-34.
- [4] 周亚非,秦 阳.在线局部放电监测技术的实际应用[J].高电压技术,2001,27(1):30-31,34.
- [5] 王 凯,杨娟娟,徐 洋,等.超高频技术检测高压电力电缆及接头中局部放电的研究[J].电线电缆,2002(3):35-37,46.
- [6] 游一捷,黄 继,邓巨怡,等.用局放超声故障检测仪探测电缆头故障[J].高压电缆,2000(1).

作者简介:

沈飞飞(1978),男,江苏苏州人,高级工程师,从事配电网运行检修工作;

张建梁(1976),男,江苏苏州人,高级工程师,从事配电网运行检修工作;

吕培强(1969),男,江苏苏州人,高级工程师,从事配电网运行检修工作。

Medium Voltage Power Cable State Detection Technology and Application

SHEN Feifei¹, ZHANG Jianliang², LYU Peiqiang², YANG Qiming², MO Hongwei², WANG Yi², YANG Jie³, XU Cheng³

(1. Yangzhou power supply company, Yangzhou 225000, China; 2. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215000, China;

3. College of electrical and electronic engineering, Harbin University of Science and Technology, Haerbin 150080, China)

Abstract: At present, water tree based evaluation methods used for medium voltage power cable condition monitoring and testing are inexperienced and lack of accumulated data. Therefore, the analyses, such as destructive testing, non-destructive detection, on-line monitoring, and non-electricity analysis derived from are naturally with disadvantages. For coupling with these disadvantages, a new technology of condition monitoring and testing is proposed with the utilizations of infrared diagnosis, online partial discharge, damped oscillation wave status online detection, ultra-low frequency dielectric loss test and new sensing monitoring technology. The proposed technology can be used for real-time monitoring and analysis of partial discharge of medium voltage cable and accessory equipment, which can obtain a more reliable result.

Key words: State monitoring; Crosslinked polyethylene; Practical application; Evaluation analysis

基于电力需求响应的负荷管理系统

史湘谊¹, 李 颖¹, 王春宁¹, 宋 杰², 田 伟³, 陈 璐²

(1.南京供电公司, 江苏 南京 210008; 2.南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003;

3.中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘 要:文中对电力需求侧管理和需求响应的概念进行了介绍,在此基础上,对电力负荷管理系统的发展进行回顾,并结合智能电网的建设,从电力需求响应的视角,指出了电力负荷管理系统的参考发展方向,电力负荷管理主站应能掌握用户响应能力数据,负控终端应具有精细化用电控制能力。通过电力负荷管理系统,为需求响应的实施作准备。

关键词:电力需求侧管理;需求响应;电力负荷管理;接口标准

中图分类号:TM73

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)06-0059-03

电力需求响应概念自从提出后,成为了缓解系统短期容量短缺和推迟电网升级投资的有效方法,对电力工业和经济发展以及环保等方面都有着重要的战略作用^[1]。国内也有很多学者进行了大量研究工作。但在我国的实际推广过程中,面临着销售电价政府管制^[2]、激励政策不足等问题而难以实施基于市场化的需求响应。我国从 1977 年开始电力负荷控制技术的研究,于上世纪 90 年代建设电力负荷管理信息系统,有效支持了电力需求侧管理的实施,在确保电网安全、稳定,支持国民经济可持续发展、促进降耗减排,确保社会稳定,提高电网企业经营管理水平等方面发挥了重要作用^[3]。以江苏电网为例,用电负荷管理系统已覆盖全省 17 万家企业、最大可控负荷超过 3000 万 kW,有效保障了夏季高峰期间的电网供需平衡。本文首先简单介绍了电力需求响应的概念和认识,指出需求响应定义中在本质上是调动用户积极性和用户如何实现用电调节,是一种电网与用户的友好互动行为,而需求响应系统就是提供电网与用户互动的手段。随着电动汽车等新兴用电负荷的出现,能量双向、实时、可控地在车辆和电网之间流动^[4],并可以合理量化预测其需求^[5],用户与电网的互动能力将极大提高。

1 电力需求响应概念

1.1 需求响应概念认识

2006 年,美国能源部在其一份报告中正式提出了需求响应的概念,并将其定义为电力用户响应电价变化或激励支付,改变其固有的电力消费模式,其中激励支付的目的是在批发市场价很高或系统可靠性有威胁时促使终端用户减少用电^[6]。按照用户不同的响应方式可将电力市场下的经典需求响应划分为以下 2 种类型:基于价格的 DR(price-based DR)和基于

激励的 DR(incentive-based DR)^[7]。

需求响应概念提出后,国内学者进行了大量研究,文献[8]则指出需求响应的本质是依靠市场价格机制和激励机制来激活市场各参与方的全面竞争与协作。同时也有学者指出了我国现有体制下开展需求响应面临的问题。文献[9]指出我国厂网分开后,销售电价由政府管制,用户无法看到批发市场的价格信号,当用电需求变化时,不能做出购电决策,也就不可能形成需求响应。文献[10]指出我国供电企业实施峰谷分时电价所面临的供电成本不确定性、峰谷倒置、合同电量比重过大导致的经营风险。文献[11]指出输配电没有分离,就算找到便宜的电,怎样租用输电网络也是个问题。

本文根据国内外对需求响应的相关研究,认为实施需求响应的核心目的在于协助维持电网供需平衡,其本质是通过调动用户积极性,根据电网的需求调节用电,当发电不足时,减少用电;当电网低谷时,增加用电;当电网中可再生能源波动时,及时调节用电,以达到电网经济、稳定运行的目的。

1.2 基于电力负荷管理的需求响应技术支持系统

需求响应的实施包括两方面的内容,一是电网公司如何调动用户积极性,根据电网的需求调节用电行为,其中价格机制和激励机制实质上是调动用户积极性的手段,属于需求响应项目设计范畴;二是电网和用户如何实现友好的双向互动,即如何实现价格信号与激励信号在电网与用户之间的顺畅交互,属于需求响应支持系统的功能范畴。文献[12]总结了需求响应实施所需要的技术支持,指出需要建立先进计量技术、远方通信技术、智能控制技术,并需要重视技术标准和政策的保障作用。文献[13]认为需求响应可以根据用户响应性能分为高性能、一般性能和低性能项目,并提出实现对需求资源调度的方法可以由可中断负荷、紧急需求响应、直接负荷轮流控制和用电设备托管等构成。经过多年发展,电力负荷管理系统已经基本实现了多

功能用电监控、远方抄表与自动采集、防窃电、异常工况报警、外延联网功能、灵活可靠的通信手段、易升级等^[14],为电网公司实施负荷管理提供了有效的基础设施,也为需求响应的实施提供了一定的技术条件。

本文就第二方面,即需求响应技术支持系统的内容,提出基于电力负荷管理系统的解决方案,即不研究国内现阶段下电价信号与激励机制如何建立等涉及经济、政策、电力监管等方面的问题与障碍,只从技术支持的角度,考虑如何通过电力负荷管理系统的发展为需求响应的实施提供技术支撑。

1.3 需求响应实施架构

需求响应技术支持系统的主要功能在于实现电网与用户间需求信号和响应状态的双向交互,即能将需求信号由电网下发给电力用户,电力用户的响应状态可以及时反馈给电网。其实施架构如图1所示。

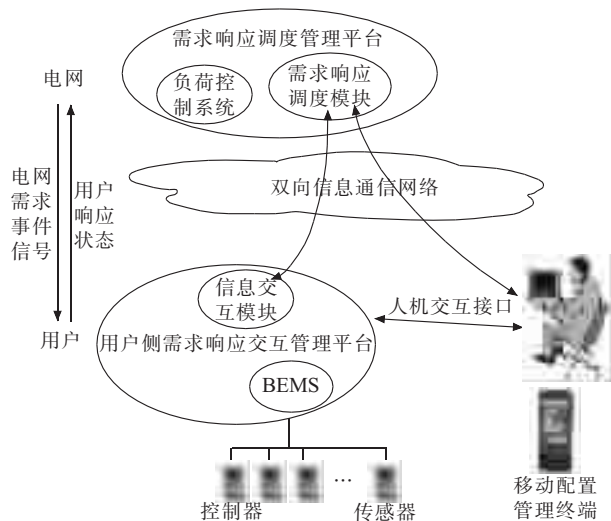


图1 需求响应技术支持系统逻辑架构图

技术支持系统由位于电网公司的需求响应调度管理平台、用户侧需求响应交互管理平台构成,2个平台间通过双向信息通信网络实现通信连接。同时,为便于用户对响应策略进行管理和配置,需要提供良好的人机交互接口,并考虑可以通过移动配置管理终端进行更便捷的管理。

2 电网需求响应调度管理平台

电网需求响应调度管理平台可在既有电力负荷管理系统的基础上,增加需求响应调度模块来予以实现,从而有助于在电力企业与用户之间架起互动的服务体系,建立双向互动的服务渠道^[15]。

2.1 主要功能

需求响应调度管理平台,作为需求响应的请求发起方,协调电网区域内用户的负荷调节行为,在已有电力负荷管理功能基础上,提供电网与用户交互的平台。(1) 接入电网供需数据,根据发电计划和负荷预测数

据,分析需要用户响应调节的功率、区域、时间,以制定需求响应计划;(2) 根据区域电网供需状况,确定需要调节的用户群体;(3) 根据电价表和协议,生成需求响应信号,并向用户设备发送需求响应信号;(4) 接收用户设备的运行状态和响应反馈,以便于制定和调整负荷管理预案

2.2 价格型需求响应信号设计与实现

价格信号是调动用户响应的有效措施,也是需求响应两种项目中的一种主要形式,其实现可以有几种方式。(1) 由于电价调整较少,用户一般可根据电网公司发布的电价表,手动调节用电,实现削峰填谷;(2) 由于手动方式实施难度和不确定性较大,电网公司可以向用户下发电价信号、用户侧设备根据电价配置用电策略自动调整用电。

本文就第二种方式提供技术实现手段。即电网公司根据政府审核的电价表,采用一定的通信协议,将电价信息进行编码并下发。其实施流程如图2所示。

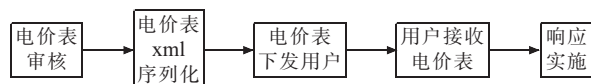


图2 价格型需求响应项目实施流程图

电价信号可以通过xml协议文本的形式来完成下发,清楚表示任一时段的电价,以便于用户端设备识别和配置用电策略。

2.3 激励型需求响应信号设计与实现

激励信号是弥补用户调整用电成本的一种措施,也是需求响应两种项目中的一种,一般称为“可中断负荷”,其实现流程是:(1) 电网与用户签订协议,约定提前通知时间、中断用电容量、中断持续时间,以及对应的补偿标准;(2) 当电网需要用户调节用电时,调度管理平台提前向用户设备发送信号,并通知到用户用电管理人员;(3) 用户根据签订的协议,调节用电设备完成响应行为;(4) 响应完成后,电网公司根据用户中断功率、持续时间和补偿协议进行交易结算;如果没有达到协议规定,则进行违约责任处理。

本文需求响应技术支持系统主要提供中断信号的下发功能。即用户在与电网公司签署协议后,可进行用电策略的预先配置;而电网公司下发中断信号,则可自动启动用户的策略,实现用电行为的调整如图3所示。

激励信号可以通过xml协议文本的形式来完成下发,表示未来某一时间段内削减用电的补偿价格 $[2 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$ 。

3 用户需求响应交互管理平台

用户侧的需求响应交互管理平台是实施需求响应的最终执行者,可以在电力负荷管理终端的基础上,增

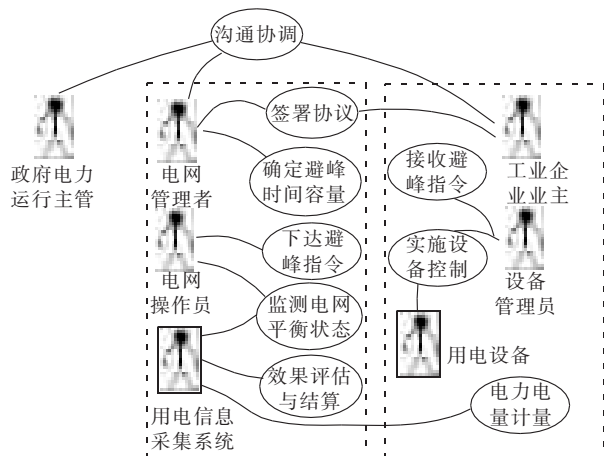


图3 传输激励型需求响应项目实施流程图

加模块,可以作为电网和用户用电设备的沟通桥梁。如图4所示。

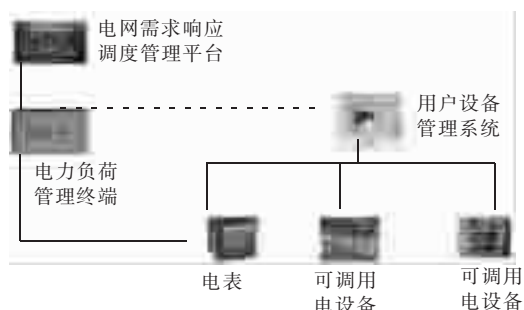


图4 用户需求响应交互管理平台架构图

需求响应交互管理平台一般由一个交互管理终端连接主要可调设备或用户能源管理系统,需要具备以下功能:

(1) 接收电网需求响应调度管理平台下发的各种信号,并根据接口标准,按照约定协议进行解析;

(2) 配置用电策略,即配置好收到信号后将启用的设备运行状态。如果用户具有本地设备管理系统,可以在管理系统中配置;如果不具备本地设备管理系统,则连接主要的分路或可调设备;

(3) 响应控制功能,用电管理人员可以登录交互终端,设定是否响应以及中断推出指令。

用户交互管理平台的响应工作流程,以电价型项目为例,其一般流程如图5所示。

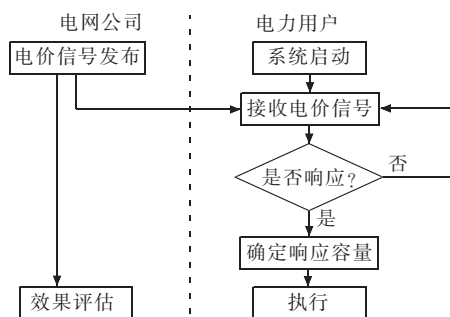


图5 用户需求响应交互管理平台工作流程图

4 结束语

通过对需求响应概念实质的认识,结合我国电力负荷管理工作的实践经验,在我国尚缺乏实施电力需求响应政策的环境下,从需求响应的核心理念出发,提出了基于电力负荷管理系统的需求响应技术支持系统,既为需求响应的实施提供了技术准备,也为电力负荷管理系统的进一步发展进行了展望,其实施将有助于减少有序用电的工作量与工作难度。

参考文献:

- [1] 张钦,王锡凡,王建学,等. 电力市场环境下需求响应研究综述[J]. 电力系统及其自动化,2008,32(3):102-104.
- [2] 全生明. 需求侧响应机制的国际经验及对我国的启示[J]. 电力需求侧管理,2009,11(2):76-78.
- [3] 张惟. 智能电网下电力负荷管理系统功能拓展及实施研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- [4] 许晓慧,陈丽娟,张浩,等. 规模化电动汽车与电网互动的方案设想[J]. 江苏电机工程,2012,31(2):53-55.
- [5] 许文超. 电动汽车充电站需求影响因素及预测方法[J]. 江苏电机工程,2011,30(3):42.
- [6] 赵欣,高山. 美国电力市场中的需求响应与高级计量[J]. 电力需求侧管理,2007,09(4):68-70.
- [7] US Department of Energy. Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them: a Report to the United State Congress Pursuant to Section 1252 of the Energy Policy Act of 2005[EB/OL]. [2007-07-21].
- [8] 赵鸿图,朱治中,于尔铿. 电力市场中需求响应市场与需求响应项目研究[J]. 电网技术,2010,34(5):146-153.
- [9] 全生明,卢键明,谢传胜,等. 需求侧响应机制的国际经验及对我国的启示[J]. 电力需求侧管理,2009,11(2):73-76.
- [10] 张荣乾. 供电企业执行峰谷分时电价的风险分析及实证研究[D]. 北京:华北电力大学,2006.
- [11] 杨莹,黎娜娜,周肖. 需求侧响应在中国局部地区实施的可行性分析[J]. 华中电力,2007,20(2):62-64.
- [12] 曾鸣,王冬容,陈贞. 需求侧响应的技术支持[J]. 电力需求侧管理,2010,12(2):8-11.
- [13] 石怀德,郝为民. 基于需求响应技术的电力供需双向调节机制综述[C]// 中国通信学会普及与教育工作委员会. 2011年电力通信管理暨智能电网通信技术论坛论文集. 北京:中国通信学会普及与教育工作委员会,2011:1-3.
- [14] 赵守清. 电力负荷管理系统建设的若干思考[J]. 中国电力教育,2011(15):106-107.
- [15] 李卫良,田伟,王晓丹. 以AMI为核心的智能配用电技术体系研究[J]. 江苏电机工程,2011,30(3):1-6.

作者简介:

史湘谊(1976),女,江苏南京人,助理工程师,从事电力营销自动化、电力计量管理工作;

李颖(1963),男,江苏南京人,工程师,从事电力科技信息管理工作;

(下转第65页)

基于波形特征量的变压器平衡绕组故障诊断方法

王建明, 李 鹏

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘 要:文中提出了一种利用变压器各侧电流及差动电气量特征,进行区外线路故障引起的 220 kV 变压器内部故障定位的方法,根据现场主变差动保护录波波形的幅值、相位特征进行理论分析和计算,利用推理排除的方法逐步开展主变故障点和故障类型识别,最终判断本次主变故障为平衡绕组绝缘破坏导致平衡绕组发生单相首尾短路,对故障排查和定位过程进行了详细的阐述,通过故障分析表明故障中变压器保护正确动作,并为开展现场一次设备检查和故障处理提供了支撑。

关键词:变压器;差动保护;平衡绕组

中图分类号:TM41

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)06-0062-04

变压器是电力系统最重要的变电设备,其运行状态直接影响电网的安全,变压器故障会对电力系统和用户造成重大的危害和影响,主变出现故障后,快速准确地判断故障原因及故障点,并及时加以排除,对系统的安全稳定运行至关重要^[1]。目前国内外对于变压器内部故障、区内外故障情况下的分析已经较多。随着微机变压器保护的普遍应用,变压器差动保护的動作准确率得到了提高,但有时保护动作后并不易排查出故障点^[2-7]。充分利用变压保护的故障录波数据,灵活运行电网故障分析的理论和方法,仔细分析保护动作原因,有助于明确主变故障点及故障类型。

1 故障及保护动作情况

故障前系统如图 1 所示。主变接线形式为,变比为 220 kV/110 kV/35 kV,△绕组为平衡绕组,主变高/中/低压侧电流互感器(TA)变比分别为 1200/5, 1200/5 及 2000/5;110 kV 母线上 702 线路、703 线路运行。

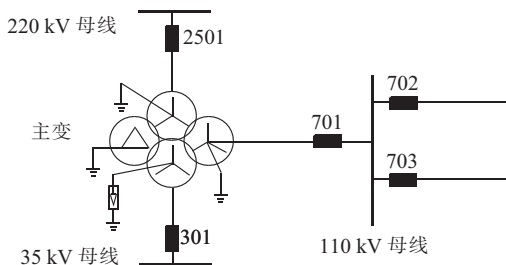
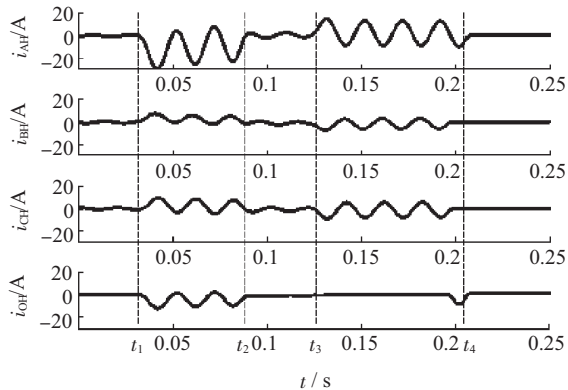


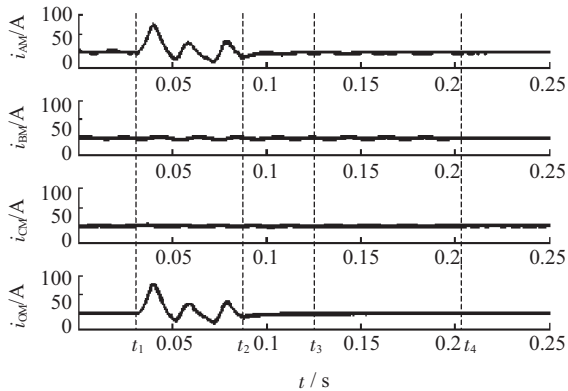
图 1 故障前系统接线图

当 110 kV 702 线路发生 A 相永久接地故障时,保护动作跳开 702 开关,经延时后 702 开关重合不成功三跳。702 线路三跳后,主变 2 套差动保护动作、重瓦斯动作、压力释放阀动作跳开主变三侧开关。主变保护装置录波波形及时序如图 2 所示。

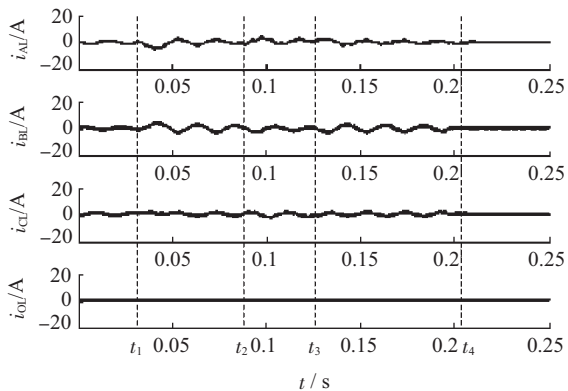
收稿日期:2013-06-12;修回日期:2013-07-25



(a) 主变高压侧(220 kV)相电流及零序电流



(b) 主变中压侧(110 kV)相电流及零序电流



(c) 主变低压侧(35 kV)相电流及零序电流

图 2 主变保护故障录波

从图2录波可见,故障过程可分为3个阶段。其中 t_1 时刻为702线路重合于故障, t_2 时刻702线路合于故障后三相跳开, t_3 时刻主变高压侧出现故障电流, t_4 时刻主变三侧跳开。

(1) 第一阶段($t_1 \sim t_2$):702线路重合于故障后,主变高、中压侧A相出现故障电流,且方向相反,对主变为穿越性电流,具有区外故障特征;主变中压侧TA发生饱和。

(2) 第二阶段($t_2 \sim t_3$):702线路三跳故障切除后,主变高、中压侧电流恢复正常,110 kV母线电压恢复正常,故障特征消失。

(3) 第三阶段($t_3 \sim t_4$):主变高压侧出现故障电流,中、低压侧没有故障电流,三侧均没有零序电流;且主变高压侧A相电流与B相、C相电流反向,约等于B相、C两相电流之和取负值,B相、C相电流同相且基本相等,幅值约为A相电流的1/2。

2 故障分析

针对该事故过程所表现出来的特征,有如下疑问需要进行合理的解释:当主变外部故障清除之后,主变高压侧再次出现故障电流,且主变差动保护、重瓦斯及压力释放动作,表明可能主变内部发生故障,故障类型是什么,故障点在哪里,为了便于开展变压器故障分析,首先对变压器差动电流进行计算。

2.1 变压器保护差动电流计算

变压器差动保护在进行判别之前需要进行各侧电流幅值相位校正,对于相间电流差动保护原理,采用Y $\rightarrow$ Δ 转角方式,Y接线绕组转角公式为:

$$\begin{bmatrix} i_{A\varphi d} \\ i_{B\varphi d} \\ i_{C\varphi d} \end{bmatrix} = K_{ph\varphi} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A\varphi} \\ i_{B\varphi} \\ i_{C\varphi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: φ 取H,M或L分别表示主变高、中、低压侧;主变高压侧的平衡系数 $K_{phH}=1/\sqrt{3}$,中压侧平衡系数

$$K_{phM} = \frac{U_M \times n_M}{\sqrt{3} U_H \times n_H}, \text{ 低压侧的平衡系数 } K_{phL} =$$

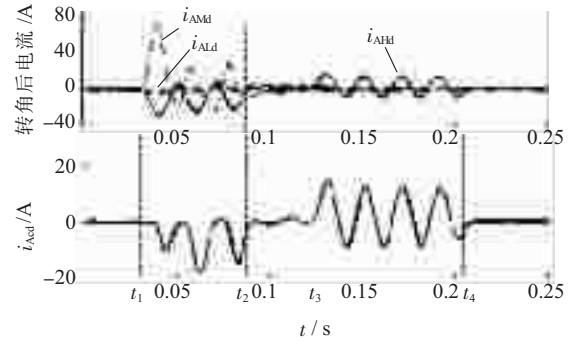
$$\frac{U_L \times n_L}{\sqrt{3} U_H \times n_H}; n_H, n_M \text{ 及 } n_L \text{ 分别为高、中及低压侧 TA 变$$

比; $i_{A\varphi}, i_{B\varphi}$ 及 $i_{C\varphi}$ 为主变 φ 侧Y接线绕组电流; $i_{A\varphi d}, i_{B\varphi d}$ 及 $i_{C\varphi d}$ 为对应的转角后电流。主变各相差动电流 i_{Acd}, i_{Bcd} 及 i_{Ccd} 计算公式为:

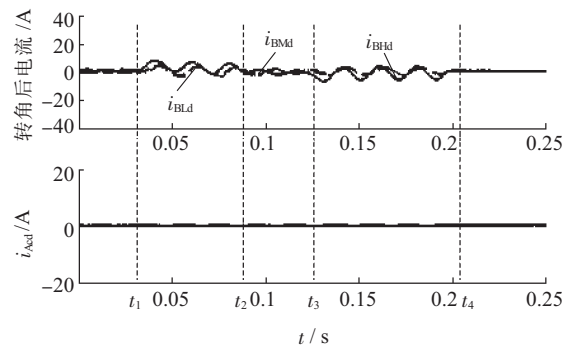
$$\begin{bmatrix} i_{Acd} \\ i_{Bcd} \\ i_{Ccd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{AHd} \\ i_{BHd} \\ i_{CHd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{AMd} \\ i_{BMd} \\ i_{CMd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{ALd} \\ i_{BLd} \\ i_{CLd} \end{bmatrix} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,该转角方式的变压器差动是相

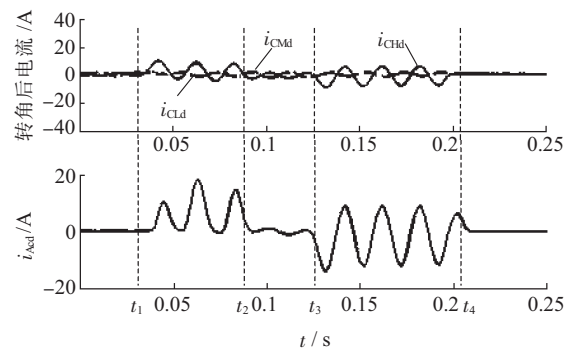
间差动原理,在正常运行或区外故障时,各相差流理论上等于0。将图2所示主变各侧电流代入式(1,2),得到图3所示的转角后主变各侧电流及差动电流。



(a) A相电流及差流



(b) B相电流及差流



(c) C相电流及差流

图3 转角后主变各侧电流及差动电流

2.2 主变故障分析

为了明确本次主变故障的故障点和故障类型,结合图2和图3的主变各侧电流及差流,利用排除推理的方法进行主变故障分析。

由图3主变差动电流可见,在702线路重合于故障期间(第一阶段),重合后约9 ms主变保护A相、C相出现差流,且差流反向,这是由于区外故障使主变中压侧TA饱和导致中压侧A相电流发生畸变,差流计算时按式(1)进行转角,使A相、C两相出现反向差流,且差流偏向时间轴的一侧。由于主变差动保护采用谐波制动,区外故障主变差动保护启动,但并未动作。第三阶段主变A相、C相出现差流,且差流反向,B相没有差流。由此可判断主变未发生高/中/低压侧的两

相短路故障,因为差流计算按式(1)进行转角,如果高/中/低压侧两相短路会导致三相均出现差流。

图2中主变故障电流波形表明第三阶段主变三侧均没有零序电流,据此可判断主变高压侧故障电流不可能是由高/中/低压侧Y绕组发生单相接地故障引起的;同时,由于高/中/低压侧Y绕组或△绕组发生单相匝间短路时会出现零序电流,则排除发生了单相匝间短路故障的可能性^[8]。进一步由图2波形可见,主变高压侧B相、C相电流同相且基本相等,与A相电流反向,幅值约为A相电流的1/2,具有的主变△侧发生A相、C相两相短路的特征。

结合以上现象及分析结果,推断主变故障点为平衡绕组(△绕组)发生A相绕组首尾短路(类似主变△侧A相、C相两相短路),由于平衡绕组的电流不接入差动保护,排查此类故障具有较大的难度。

2.3 故障电流分析

$Y_n/\Delta-11$ 接线变压器△侧a相、c相两相短路及电流分布如图4所示。

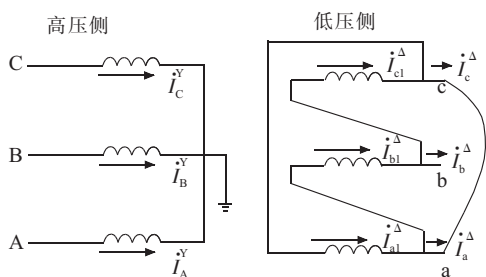


图4 $Y_n/\Delta-11$ 接线变压器△侧两相短路及电流分布

根据电网故障分析理论,a相、c相两相短路时b相为特殊相,利用序分量方法,相应边界条件如下^[8,9]:

$$\dot{I}_b^{\Delta}=0; \dot{I}_a^{\Delta}=-\dot{I}_c^{\Delta}; \dot{U}_a^{\Delta}=\dot{U}_c^{\Delta} \quad (3)$$

各序分量关系如下:

$$\dot{I}_{f(0)}^{\Delta}=0; \dot{I}_{f(1)}^{\Delta}=-\dot{I}_{f(2)}^{\Delta}; \dot{U}_{f(1)}^{\Delta}=\dot{U}_{f(2)}^{\Delta} \quad (4)$$

则变压器Y侧电流相量关系如图5所示。

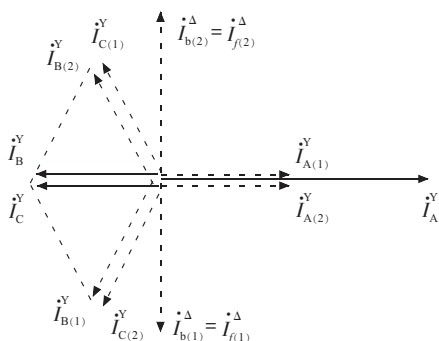


图5 变压器△侧两相短路Y侧电流相量

由图5可见,变压器△侧A相、C相两相短路时Y侧及△侧各电流满足下面的关系。

$$\dot{I}_B^Y = \dot{I}_C^Y = -\frac{\dot{I}_A^Y}{2} = \dot{I}_H \quad (5)$$

$$\dot{I}_{bl}^{\Delta} = \dot{I}_{cl}^{\Delta} = -\frac{\dot{I}_{al}^{\Delta}}{2} = \dot{I}_L \quad (6)$$

$$\dot{I}_a^{\Delta} = -\dot{I}_c^{\Delta} = -3\dot{I}_L, \dot{I}_b^{\Delta} = 0 \quad (7)$$

对于图1主变,平衡绕组A相绕组首尾短路时(类似于A相、C相两相短路)根据式(1,2)可知主变差动电流为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{Acd} = \frac{\dot{I}_{AH} - \dot{I}_{BH}}{\sqrt{3}} = -\sqrt{3} \dot{I}_H \\ \dot{I}_{Bcd} = \frac{\dot{I}_{BH} - \dot{I}_{CH}}{\sqrt{3}} = 0 \\ \dot{I}_{Ccd} = \frac{\dot{I}_{CH} - \dot{I}_{AH}}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \dot{I}_H \end{cases} \quad (8)$$

可见,主变A相、C相有差流,且差动电流反向,B相没有差流,符合图3中主变差动电流的特征。

3 现场检查

故障发生后,现场对一次设备开展检查和试验。

(1) 主变220 kV侧C相套管中下部瓷套破裂。

(2) 对故障变压器采油样进行油色谱分析表明气体成分及含量呈现高能量放电后的特征。

(3) 主变绕组电容量数据测试异常,其中平衡绕组介损测试加压10 kV后变压器内有明显放电声,降至2 kV,平衡绕组介损为0.94%,电容量比上次试验增大明显。验证了故障分析的结果。

综合保护动作的行为、故障录波分析以及现场一次设备检查,本次主变故障的原因:702线A相接地故障及重合于故障,使主变经受两次中压侧近区短路电流冲击,造成内部绕组变形,平衡绕组绝缘损坏,平衡绕组A相短路引起差动保护动作。变压器内部绝缘故障引起的压力造成压力释放阀和重瓦斯动作。故障过程中主变保护动作行为正确。

4 结束语

利用主变故障录波,通过排除推理的方法进行主变故障分析,明确了故障位置和故障点,有助于开展为一次设备检查和故障处理。故障类型为主变平衡绕组A相短路故障,具有主变△侧A相、C相两相短路的特征,主变高压侧B相、C相电流同相且基本相等,而A相电流与其反向且大小相差2倍,与故障电流分析结论相符。故障过程中主变保护动作行为正确。电网中有时会发生这种典型的故障,差动保护动作,但故障点不易排查,建议现场结合故障电流仔细分析排查故障点。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2002:45-103.
- [2] 袁宇波,陆于平,许扬,等. 切除外部故障时电流互感器局部

- 暂态饱和对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 12-17.
- [3] 曹海欧, 张量, 陈久林, 等. 变压器保护 T60 比率制动原理[J]. 江苏电机工程, 2005, 24(6): 35-37.
- [4] 袁宇波, 李澄, 葛永高, 等. 复杂故障情况下的变压器差动保护动作特性分析[J]. 江苏电力工程, 2006, 25(5): 9-11.
- [5] 黄浩声, 陈久林, 陆扬, 等. 利用 TA 差异性配置的主变故障点诊断分析[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(4): 12-14.
- [6] 陆于平, 吴济安, 袁宇波. 主设备数字式保护技术的讨论[J]. 江苏电机工程, 2003, 22(3): 6-9.
- [7] 曹 良. 主变压器微机保护的双重化[J]. 江苏电机工程,

2003, 22(3): 13-15.

[8] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材(下册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 389-434.

[9] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995: 120-142.

作者简介:

王建国(1963), 男, 江苏如东人, 高级工程师, 长期从事电网设备运行管理和技术工作;

李 鹏(1982), 男, 陕西周至人, 博士, 研究方向为电力系统继电保护、直流控保系统等。

Method for Transformer Balancing Wing Fault Diagnosis Based on Waveform Characteristic

WANG Jianming, LI Peng

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Utilizing the current and differential current waveform characteristic of transformer, a method for analyzing a 220kV transformer fault caused by an external zone fault is proposed in this paper. Based on the transient fault recorder data of transformer differential protection, theory analysis and calculation is implemented. The fault location and type is identified gradually by utilizing the reasoning and exclusion method. It is indicated that the transformer fault is balancing wing short circuit due to insulation damage. It shows that the transformer differential protection tripped correctly in this fault. More, the progress of this fault investigation and location is introduced, which is benefit to primary equipment inspection and deal with fault condition.

Key words: Transformer; differential protection; balancing wing

(上接第 61 页)

王春宁(1966), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 从事供电企业科技开发及管理工作;

宋 杰(1981), 男, 山东威海人, 工程师, 从事智能电网、需求响应、电力负荷管理方面的研究和开发工作;

田 伟(1985), 女, 安徽颍上人, 工程师, 从事智能电网、调度自动化等研究工作;

陈 璐(1987), 女, 江苏常州人, 助理工程师, 从事智能电网、需求响应、电力负荷管理方面的研究和开发工作。

Load Management System Based on Demand Response

SHI Xiangyi¹, LI ying¹, WANG Chunling¹, SONG Jie², TIAN Wei³, CHEN Lu²

(1. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China; 2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 3. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The concepts of power demand side management and demand response are introduced, and then the development of power load management system is reviewed. Combining with smart grid construction, from the perspective of demand response, the direction of power load management development is presented. The direction is that the main power load management center should be able to grasp users' response capability data and load control terminal should be able to precisely control its consumption. The power load management system is a basis of the implementation of demand response.

Key words: Power Demand Side Management, Demand Response, Power Load Management, Interface Standard

广 告 索 引

南京南瑞继保电气有限公司

思源电气股份有限公司

南瑞科技股份有限公司

《江苏电机工程》协办单位

封一

封二

前插 1

前插 2、3

《江苏电机工程》协办单位

宿迁电力设计院有限公司

江苏南瑞帕威尔电气有限公司

南京苏逸实业有限公司

前插 4

(黑白) 文前

封三

封四

新型现场计量装置接线检查方法的研究

陶 军¹, 杨世海², 金在东³

(1.江苏省电力公司, 江苏 南京 210036; 2.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

3.南京电力自动化设备三厂, 江苏 南京 210012)

摘 要:电能计量装置的准确性和二次回路的接线正确与否关系到发电厂、电网经营企业和各类用户的经济利益, 投运前必须进行测试。接线检查是保证计量准确和接线正确的有效手段, 但现场开展计量接线检查工作面临回路测量点选取困难、自动化程度低、对操作人员主观判断依赖性强、恢复接线时可能产生差错等问题, 且存在误判风险。针对上述问题, 文中提出一种新型现场计量装置接线检查方法并设计自动测试仪器实现方案, 开发样机并分析验证其研制成果。测试验证结果表明, 新型现场计量装置自动接线检查测试仪能够满足现场需求。

关键词:电能计量装置; 二次回路; 接线检查; 故障检测

中图分类号: TM933.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)06-0066-03

目前装表接电人员在用户现场电能计量装置没有合闸送电、现场又没有电源可用的情况下, 仅能依靠万用表简单测试一下计量装置接线是否正确, 且通常需要解开部分二次线端子才能正确检查^[1]。这种接线检查方式既不方便又不准确, 容易造成人为错误。因此迫切需要功能完备、可以对计量装置接线状况进行全面自动检测的新手段。

目前国内装表接电主要采用人工手动检查方式, 缺少装表接电自动测试仪器, 无法满足方便、快捷、准确的测试要求^[2], 因此有必要研究开发自动接线检查测试仪。

1 接线检查的方法研究

1.1 计量装置接线检查的必要性

高压电能计量装置由电压互感器(TV)、电流互感器(TA)、计量二次回路和电能表组成^[3]。为了保证电能计量的准确性, 应保证 TV、TA 的准确性和计量二次回路接线的正确性。随着制造工艺水平的提高, 传统计量器具本体质量和可靠性日益提高, 因二次回路接线错误导致计量差错案例大幅增加, 造成了较大电费损失, 因此计量装置投运前必须进行接线检查。

1.2 计量装置二次接线检查原理

利用三相标准电压电流源产生标准三相电压(U)、电流(I), 分别同时施加在 TV 和 TA 的一次侧, 给计量装置上电, 模拟用电状况。互感器二次侧感应出二次电压(u)、二次电流(i), 并通过计量二次回路连接至电能表端子。根据电能表端测得的电压、电流和相位等数据分析二次回路接线状况, 与一次端的电压、电流、相位状况对比分析, 从而判断错误接线, 测试原理如图 1 所示。

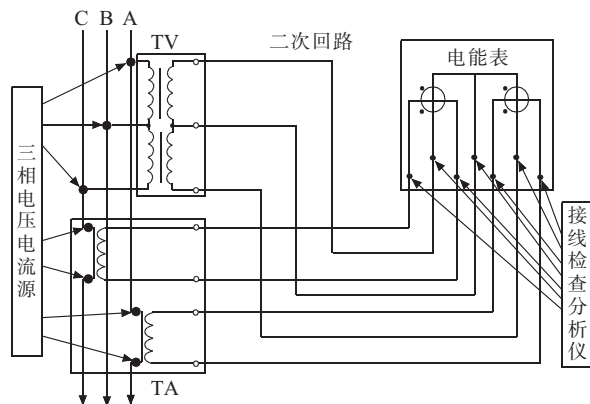


图 1 计量装置接线检查测试原理图

2 接线检查自动测试仪设计研发

根据上述的原理和测试方法研制自动接线检查分析仪, 仪器整体包含 2 个部分: 一次用标准电压电流模拟测试源模块和二次用电能表接线测试分析模块。测试仪器可单人操作, 替代了 2 人在电缆两端对讲的传统校线方法, 提高了工作效率、节省了人力成本和通讯器材、提高了现场安全系数。

2.1 标准电压电流模拟测试源模块及功能

采用电网模拟源, 按照三相四线制输出 U_A, U_B, U_C 分别对 U_N 的三组电压和 I_A, I_B, I_C 三组电流。电压分为 2 档输出, 分别为经 TV 输出和不经 TV 输出 2 种。设备以进口高速数字微处理器 DSP 为核心, 采用新型特定脉冲功率器件构建程控高稳定度、高性能的全电子式测试功率电源。采用 PWM 调制功率放大器, 输出容量大、体积小、输出效率高($>85\%$), 且发热量低、负载特性好、可靠性高。测试源配置故障检测、保护和报警功能。采用便携式结构设置, 方便现场携带使用。采用内置锂电池供电方式, 可以连续使用 4 h 以上, 满足现场无电状态下的使用要求。

2.2 电能表接线测试分析模块及功能

电能表接线测试分析模块用于自动测量电能表端的电压电流参数,分析其大小和相位 TV,TA 一次输入的矢量对应关系是否正确。本测试仪采用掌上式设计理念,接线直观,操作简单方便。采用大屏幕点阵液晶显示器,结果清晰明了。采用钳形电流互感器方式测量电流,测量操作快捷方便。测试仪可自动分析识别常见的三相三线 48 种、三相四线 96 种接线错误。支持显示相量六角图,方便判定接线,并可同时测量三相电压、电流、相位等电工参数。

3 自动接线检查测试仪功能验证

3.1 低压三相四线计量装置接线测试

(1) 正确接线情况。将模拟测试源的一次电压 U_A, U_B, U_C, U_N 引线夹在低压 A, B, C 三相走线铜排端子上, 电流 I_A, I_B, I_C 端子分别夹在 A, B, C 三相 TA 的一次侧。将分析仪二次引线接到电能表的表尾端子。模拟测试源正确输出电压、电流值, 分析仪界面测试出相序为 U_a, U_b, U_c 和 I_a, I_b, I_c , 说明测试仪的判断正确。

(2) 电压逆相序情况。将模拟测试源的一次电压 U_A, U_B, U_C, U_N 引线夹在低压走线铜排端子 A, B, C, N 上, 电流 I_A, I_B, I_C 端子分别夹在 A, B, C 三相 TA 一次侧。将分析仪二次引线接到电能表的表尾端子。模拟测试源正确输出一次电压、电流值, 但由于计量装置二次接线 A, B 两相电压逆相序, 分析仪界面测试出相序为 U_a, U_b, U_c 和 I_a, I_b, I_c , 判断正确。

(3) 单相电流极性反情况。将模拟测试源的一次电压 U_A, U_B, U_C, U_N 引线夹在低压走线铜排端子 A, B, C, N 上, 电流 I_A, I_B, I_C 端子分别夹在 A, B, C 三相 TA 的一次侧。将分析仪二次引线接到电能表的表尾端子。模拟测试源正确输出一次电压、电流值, 由于计量装置 A 相极性反, 分析仪界面测试出相序为 U_a, U_b, U_c 和 $-I_a, I_b, I_c$, 判断正确。

(4) 两相电流错相情况。将模拟测试源的一次电压 U_A, U_B, U_C, U_N 引线夹在低压走线铜排端子 A, B, C, N 上, 电流 I_A, I_B, I_C 端子分别夹在 A, B, C 三相 TA 一次侧。将分析仪二次引线接到电能表的表尾端子。模拟测试源正确输出一次电压、电流值, 由于计量装置 A, B 相电流线相序接反, 分析仪界面测试出相序为 U_a, U_b, U_c 和 I_a, I_b, I_c , 判断正确。

(5) 三相电流极性全反情况。将模拟测试源的一次电压 U_A, U_B, U_C, U_N 引线夹在低压走线铜排端子 A, B, C, N 上, 电流 I_A, I_B, I_C 端子分别夹在 A, B, C 三相 TA 一次侧。将分析仪二次引线接到电能表的表尾端子。模拟测试源正确输出一次电压、电流值, 由于计量装置三相电流极性全反, 分析仪界面测试出相序为 $U_a,$

U_b, U_c 和 $-I_a, -I_b, -I_c$, 判断正确。

3.2 高压 10 kV 三相三线计量装置接线测试

(1) 正确接线情况。将模拟测试源的一次电压 U_A, U_B, U_C, U_N 引线接在 TV 一次侧对应端子 A, B, C, N 上, 电流 I_A, I_C 分别夹在 A 相和 C 相 TA 一次侧。将分析仪二次引线接到电能表的表尾端子。模拟测试源正确输出一次电压、电流值, 分析仪界面测试出二次相序为 U_c, U_b, U_a 和 I_a, I_c , 2 个计量元件电压幅值均为 100 V, 判断正确。

(2) 两相电压相序接反情况。将模拟测试源的一次电压 U_A, U_B, U_C, U_N 引线接在 TV 一次侧对应端子 A, B, C, N 上, 电流 I_A, I_C 分别夹在 A 相和 C 相 TA 一次侧。将分析仪二次引线接到电能表的表尾端子。模拟测试源正确输出一次电压、电流值, 由于 TV 二次线 A, C 两相相序接反, 分析仪界面测试出二次相序为 U_c, U_b, U_a 和 I_a, I_c , 判断正确。

(3) 单相电压二次极性反情况。将模拟测试源的一次电压 U_A, U_B, U_C, U_N 引线接在 TV 一次侧对应端子 A, B, C, N 上, 电流 I_A, I_C 分别夹在 A 相和 C 相 TA 的一次侧端头, 计量第一元件的 TV 二次线 a-b 极性接反。接线原理及同名端标注如图 2 所示。

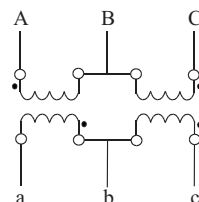


图 2 三相三线计量装置 TV 接线原理示意图

将分析仪二次引线接到电能表的表尾端子, 模拟测试源正确输出一次电压、电流值, 分析仪界面测试出二次电压 $U_{ab}=100\text{ V}, U_{cb}=100\text{ V}, U_{ac}=173\text{ V}$ 。二次相量图如图 3 所示, 根据相量图可知测试仪判断正确。

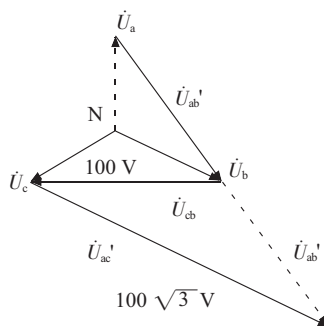


图 3 三相三线计量装置 TV 极性反相量图

图 3 中, $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ 为 A, B, C 三相二次电压相量, $\dot{U}'_{ab}$ 为错接线状态下 A, B 相之间的线电压相量, $\dot{U}'_{ac}$ 为错接线状态下 A, C 相之间的线电压相量。

上述多种接线方式的验证测试表明, 新型现场计量装置接线检查测试仪在执行现场接线检查时实时准

确,能够满足电力装表接电工作的需要。相对传统的人工查线,有根本性的优势,避免了人为误判。

4 现场应用实例解析

某厂站设有上网关口计量点,因更换IV母TV需停运IV母,为保证上网线路不停电,通过倒闸操作将挂接于IV母上的线路负荷临时转移到III母。倒闸操作完成后,运行人员发现上网线路的关口电能表所计电量突降,但查询SCADA系统发现该线路一次潮流并没有显著改变,且位于该厂站关口点对侧的关口校核点所计电量也未见异常突变。由此判断L1线路关口电能计量装置存在故障及电量差错现象,且与倒闸操作、母线电压切换有关。为排查问题,线路停电后,采用本文研发的接线检查自动测试仪进行现场排查,直接从屏柜小母线加压,测试仪显示关口表端电压缺相,存在错接线问题。进一步排查发现该厂站二次回路在基建时期遗留了比较隐蔽的错误接线问题,如图4所示。

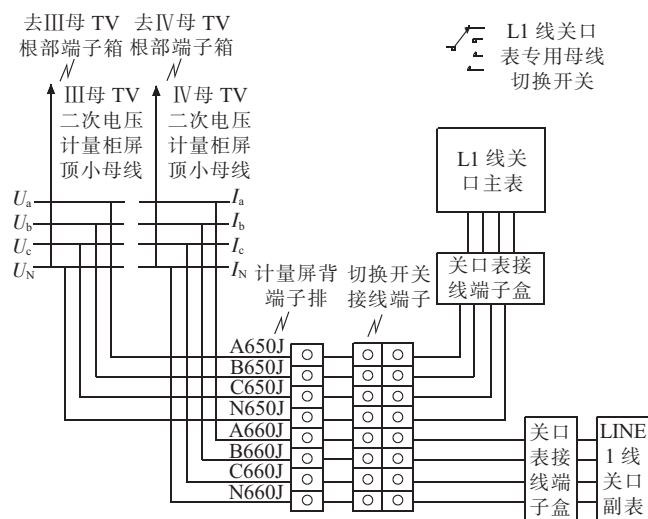


图4 某厂站错接线示意图

图4中,III母、IV母TV计量二次电压回路在从小母线引下后,进入L1线关口表电压切换开关前,在端

子排上B相接反。即将III母B相接到了IV母B相,而IV母B相则接到III母B相。由此造成III母与IV母之间任何一条母线停运时,正常在运的母线TV计量二次回路均发生B相失压现象,因为本应正确切换的B相电压错误接到了另一条停运的母线上。

该故障具有隐蔽性,常规运行时难以发现。只有发生一条母线停运、相应母线TV同时停运时,才会发生其中一条线路无压的现象,从而为发现该隐患提供明显的外在表现。本文所述方法和据此研发的新型现场计量装置接线检查自动测试仪为现场排查错接线提供了高效准确的工具,迅速找到故障原因和错接线点。

5 结束语

实际案例分析表明,本文提出的测试方法和据此研制的新型现场计量装置接线检查自动测试仪适用于电能计量装置投运前的验收检查和计量装置故障排查处理,简化了测试过程,提高了现场测试效率,节约了人力和物力,能够准确地自动判断接线,鉴别计量装置接线情况,提高了错接线判别的安全性和可靠性,对于计量现场工作具有重要意义。

参考文献:

- [1] 吕宏,曹敏.电能计量装置错误接线判断的方法和步骤[J].云南电力技术,2001,29(2):32-34.
- [2] 李音,王哲.三相三线电能计量装置错误接线的简化分析[J].电测与仪表,2006(3):24-25.
- [3] 李斌,黄奇峰,杨世海.高压多绕组电压互感器二次负荷配置优化与改造工程实施[J].江苏电机工程,2012,31(5):5-8.

作者简介:

陶军(1956),男,江苏南京人,工程师,从事电测计量工作;
杨世海(1976),男,安徽淮北人,高级工程师,从事电能计量检测与研究工作;

金在东(1972),男,江苏南京人,工程师,从事电测计量装置研发工作。

A New Method for Field Electric Energy Metering Device Line Connecting Detection

TAO Jun¹, YANG Shihai², JIN Zaidong³

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210036, China;

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

3. The Third Plant of Nanjing Electric Automation device, Nanjing 210022, China)

Abstract: The accuracy of electric energy metering device and correctness of secondary line connection are related with the economic benefits of electric power plant, electric grid corporation and consumers. Line connection detection is an effective method to ensure metering accuracy and line connection correctness. However, many problems, such as difficulty of selecting measure point, low automation degree, strong dependence to operator's subjective judgment, and possible mistake in restoring lines may face with line connecting detection. To solve these problems, a new method and design scheme of field electric energy metering device line connection detection is proposed in this paper. A sample machine is developed using the proposed design. Experiment has been implemented, which approves that the new apparatus can satisfy the need of field work.

Key words: electric energy device; secondary line; connection detection; fault detecting

盐碱环境中变电站接地体材料的腐蚀行为研究

杨 明¹,程 好²

(1.江苏省电力设计院,江苏 南京 211102;2.连云港供电公司,江苏 连云港 222100)

摘 要:文中通过实验室埋片腐蚀失重试验、自腐蚀电位和腐蚀速率的测试,研究了 3 种变电站地网材料(镀锌钢、铜、导电防腐涂料)在沿海盐碱土壤(原状土和回填土)中的腐蚀行为和规律。研究结果表明,在盐碱土壤中镀锌层呈现高的腐蚀活性,对钢不具有保护作用,纳米碳导电防腐涂料对钢也没有明显的保护效果,而铜在回填土中的腐蚀速率约仅有镀锌钢的 1%。研究成果为变电站接地材料的选择提供了技术支撑。

关键词:接地材料;盐碱土;腐蚀速率

中图分类号:TG179

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)06-0069-03

变电站的接地网是确保变电站工作接地、保护接地和防雷保护接地的必要设施,也是保障人身和设备安全、保证变电站可靠运行的重要手段,对系统安全运行起着重要的作用。但是长期埋在地下的接地网,由于土壤的腐蚀作用,7~8 年便发生严重损坏^[1]。从而毁坏电网中的二次设备,如直流、保护、通信等设备,引发事故甚至危及人身安全,接地装置的腐蚀是导致事故的主要原因之一^[2]。

近年来随着我国电力需求量的增大,在沿海等盐碱地区将建设更多的变电站等电力设施,其腐蚀环境的恶劣将使得接地网的腐蚀和安全问题更为突出。因此开展盐碱土壤中接地材料腐蚀行为和防腐蚀材料的研究,对保证接地网接地性能的稳定性,和电力系统的安全运行有着非常重要的作用。变电站的接地材料主要有镀锌钢、铜或镀铜材料以及镀锌钢+导电涂料。我国变电站的接地体大多采用镀锌钢材料,不能解决接地体的腐蚀问题^[3]。而铜的耐腐蚀性强,在土壤中的铜接地网表面会产生附着力极强的 Cu(OH)₂,它的形成对内部的铜材起到了很好的保护作用,有效地阻断了腐蚀的进一步进行^[4],美国和欧洲国家大都使用铜材作为变电站接地网材料。近年来国内一些大的发电项目地网也开始采用铜材,如浙江北仑电厂、大亚湾核电、秦山核电、广东抽水蓄能电站等。但有研究表明,当土壤中含有氯离子时,由于 Cu 会与土壤中大量氯离子形成(CuCl²⁻)络合离子,加速了铜的局部腐蚀^[5];有报道称沿海地区镀锌钢+导电涂料具有较好综合技术性能^[6]。

1 试样和试验方法

1.1 试样

试验用的试样有市售 4 mm 厚的镀锌扁钢接地体(镀锌层厚度实测值为 33.2~108.6 μm)、涂覆有纳

米碳防腐导电涂料的镀锌钢(涂层厚度为 100.4~123.7 μm)和 1 mm 厚的黄铜板。试样尺寸为 100 mm×40 mm(长×宽)。用刚玉砂布打磨除去铜和镀锌钢试样表面氧化皮至光亮,称取初始重量,在试样一端机械引出导线,铜片的导线端及镀锌钢片两端用热缩带封闭,测量暴露面积,用无水乙醇和丙酮去污、去脂。试验用土壤为江苏沿海某变电站场地原始土和回填土,土壤的腐蚀性参数如表 1 所示。

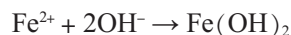
表 1 试验用土壤的腐蚀性参数

土壤名称及编号	Cl ⁻ /(mg·kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(mg·kg ⁻¹)	土壤电阻率/(Ω·m)	pH	氧化还原电位/mV
原始土(1号)	6394	776	1.40~2.45	7.8	150.6
回填土(2号)	15 008	664	4.24~7.06	7.9	215.9

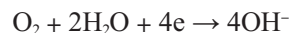
1.2 试验方法

接地网在土壤中的腐蚀属于典型的电化学腐蚀,同时存在着阴极反应和阳极反应 2 个过程,阴极、阳极和土壤电解质共同构成腐蚀电池。以铁为例,其主要电极反应过程如下。

(1) 阳极反应过程:



(2) 阴极反应过程:



接地网在土壤中的腐蚀主要受阴极反应过程控制;氢氧化亚铁在土壤中的氧和水的作用下进一步反应生成氢氧化铁,最后转化成氧化铁等腐蚀产物。本实验将试样埋入上述 2 种土壤中,一定时间后取出试样,清除试样表面的腐蚀产物,烘干,称重,计算自腐蚀状态下腐蚀失重量。在埋设期间定期测量试样的自腐蚀电位和腐蚀速度,研究盐碱土壤下接地材料的腐蚀行为和演变规律。试样的自腐蚀电位采用阻抗大于 10 MΩ 的数字电压表和饱和硫酸铜电极测量。试样的腐蚀

速度通过测量极化电阻并通过式(1)计算得到:

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{\Delta E/I} = \frac{B}{R_p} \tag{1}$$

式(1)中: B 为塔费尔常数; R_p 为极化电阻,它是自腐蚀电位附近的极化电位 ΔE 与极化电流 I 的比值。

本试验试样的极化电阻采用三电极体系的恒电位法测量,参比电极为饱和甘汞电极,铂电极为对电极,室温下测试,测试仪器为PS-168型电化学测试系统,极化电位为自然电位偏移正负10 mV。测试装置示意图如图1所示。

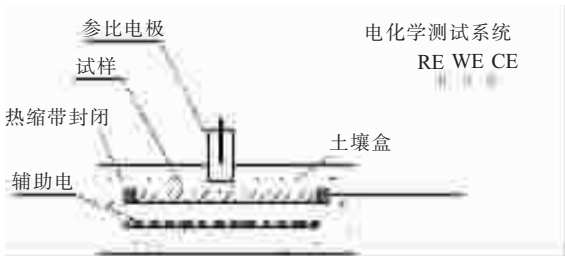


图1 试样极化电阻测量示意图

2 试验结果和讨论

2.1 试样腐蚀状况和腐蚀量

试样在2种土壤中埋设腐蚀219 d后从土中取出,各试样已发生了不同程度的腐蚀,不同接地材料在土壤中的腐蚀情况如图2—4所示。

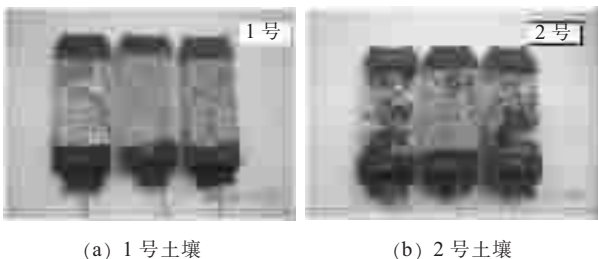


图2 镀锌钢在土壤中腐蚀情况

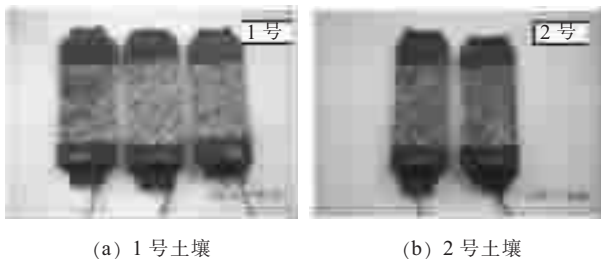


图3 涂覆有导电涂料镀锌钢在土壤中腐蚀情况

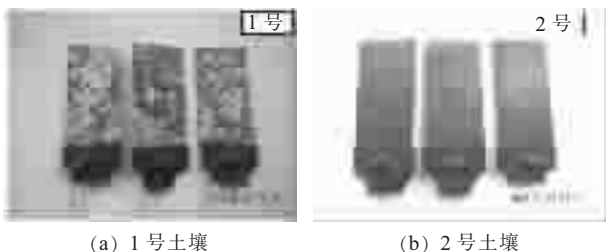


图4 铜片在土壤中腐蚀情况

由图2(a)可见,镀锌钢片表面出现白色的氢氧化锌和黄色的氧化铁,表明不仅镀锌层已发生局部破坏,内部的钢也发生了腐蚀,2号土壤中的腐蚀较1号土严重。由图3可见,试样表面的导电涂层已鼓泡破损,且已出现铁腐蚀的黄色锈迹,表明导电涂层在这2种土壤中对镀锌钢接地体没有明显保护效果。由图4可见,铜片在1号土壤中表面已有较多的绿色铜锈,出现较大面积的腐蚀坑斑,而在2号土壤中只出现细小的腐蚀浅坑,腐蚀较为轻微。镀锌钢和铜的腐蚀失重量如表2所示。

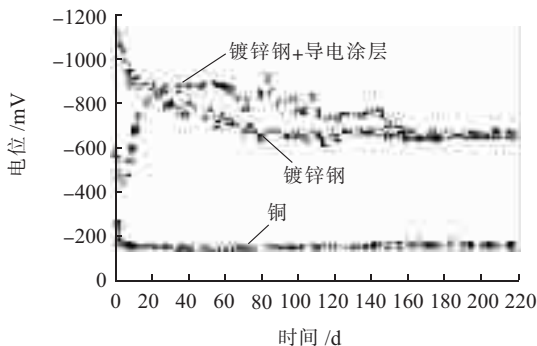
表2 接地体试样腐蚀失重量

土壤	1号		2号	
试样	镀锌钢	铜	镀锌钢	铜
腐蚀失重 / [g·(dm ²) ⁻¹]	2.876	0.844	5.350	0.158
平均腐蚀速率 / {[g·(dm ²) ⁻¹]·a}	4.788	1.407	8.912	0.264

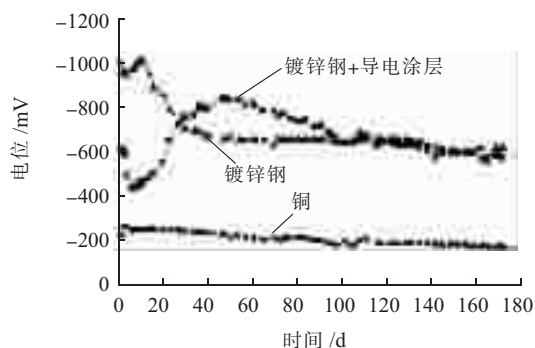
由表2可见,不同土壤对镀锌钢和铜具有不同的腐蚀性,就不同土壤,镀锌钢在2号土壤中腐蚀速率较高,为1号土壤的1.86倍;而铜在2号土壤中的腐蚀速率则较低,仅为1号土壤的18.8%。这是由于2号回填土与1号的原始土相比,疏松,含氧量高的原因,对于氧去极化引起腐蚀的镀锌钢,氧气含量越大,腐蚀越严重;而对于铜而言,氧气含量充分时能在铜表面形成具有保护作用的Cu(OH)₂。在同一土壤中,不同的接地体材料具有不同的抗腐蚀能力,在1号土壤中,铜的腐蚀速率是镀锌钢的29.3%,在2号土壤中铜的腐蚀速率是镀锌钢的3.0%,说明在2种盐碱土中铜均具有较高的耐腐蚀能力。接地材料埋设试验表明:(1)钢表面的镀锌层以及导电涂层在盐碱土壤中在较短时间内就腐蚀或失效,对接地体保护效果较小。(2)在2种盐碱土壤中,铜的腐蚀速率分别是镀锌钢的29.3%和3.0%,铜的耐蚀性明显好于镀锌钢。

2.2 试样自腐蚀电位随时间演变

镀锌钢、导电涂料镀锌钢和铜试样在土壤中的自腐蚀电位随时间的演变如图5所示。



(a) 1号土壤中不同材料自腐蚀电位变化



(b) 2号土壤中不同材料自腐蚀电位变化

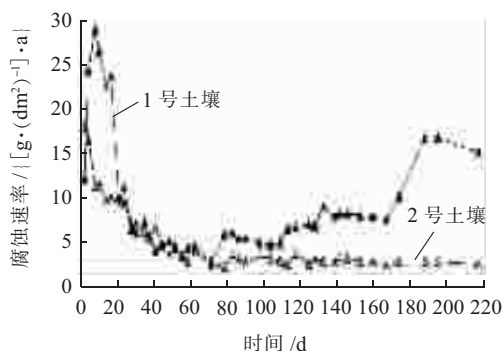
图5 3种接地体试样在土壤中的自腐蚀电位随时间变化

由图5可见,镀锌钢初期自腐蚀电位较负,表明镀锌层处于活性腐蚀状态,随着埋设试验的进行,镀锌层不断腐蚀破损,电位逐步正移,在2种土壤中埋设分别约为70 d和30 d时,电位已正于-700 mV,与钢的自腐蚀电位相当,说明此时镀锌层已破坏。而后电位分别稳定-700~-650 mV和-700~-550 mV之间,表明试验期间钢一直处于活化腐蚀状态。导电涂层镀锌钢初始有涂层的保护,电位较低,随后电位较快负移,在2种土壤中埋设分别约为10 d和30 d时,电位已负于-700 mV,开始表现出锌的电位,说明此时导电涂层已破损,到约50 d时,电位达到最负值,而后又逐渐正移,镀锌层逐步开始腐蚀,分别约在160 d和100 d,电位已基本与镀锌钢试样的电位重合。由此表明镀锌钢和导电涂层在2种土壤中有效保护时间很短。铜在2种土壤的电位明显正于镀锌钢试样,其耐蚀能力较高。

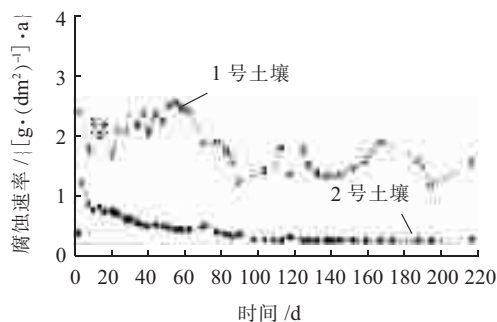
2.3 试样腐蚀速率随时间演变

镀锌钢和铜试样在2种土壤中的腐蚀速率随时间的变化如图6所示。

从图6(a)可见,镀锌钢在埋设初期腐蚀速率较高,同样表明镀锌层在盐碱土壤中具有较高的腐蚀活性,随着埋设时间的延长,腐蚀速率逐渐降低,内部钢开始腐蚀,1号原始土中的腐蚀速度基本维持在约3 (g/dm²)·a,而在含氧量高的2号土中腐蚀速率又再次升高6~17 (g/dm²)·a。对于铜试样来说,在1号土壤



(a) 镀锌钢在土壤中腐蚀速率变化



(b) 铜在土壤中腐蚀速率变化

图6 接地体试样在2种土壤中的腐蚀速度随时间变化

中初期腐蚀速率约为2.5 (g/dm²)·a,而后略有下降至1.1~1.9 (g/dm²)·a之间波动;而在2号中其腐蚀速率明显较低,初期为1.1 (g/dm²)·a,随着铜表面氧化膜的不断形成,腐蚀速率逐步降低,基本稳定在约0.1 (g/dm²)·a。由此可见,在试验的2种盐碱土中,铜材的腐蚀速率均低于镀锌钢的腐蚀速率。在原始土中,铜的腐蚀速率约为镀锌钢的1/2,但在回填土中铜的腐蚀速率比镀锌钢有明显的降低,约只有其1%。

3 结束语

通过镀锌钢、导电涂层镀锌钢和铜3种接地体材料在取自江苏沿海某变电站场地盐碱土中的腐蚀试验,得到以下结论:

(1) 在盐碱土壤中镀锌层呈现高的腐蚀活性,对钢不具有保护作用。纳米碳导电防腐涂料对钢也没有明显的保护效果。

(2) 不同的土壤对不同的接地体材料的腐蚀特性不同,在2种盐碱土壤中,铜的平均腐蚀速率分别为1.407 (g/dm²)·a和0.264 (g/dm²)·a,是镀锌钢的29.3%和3.0%,铜的耐蚀性明显好于镀锌钢。

(3) 镀锌钢在原始土中,铜在回填土中的腐蚀速率表现为随时间逐渐下降并趋于稳定的规律;铜在2种土壤中的稳定腐蚀速率分别约为1.5 (g/dm²)·a和0.1 (g/dm²)·a,镀锌钢在原始土中的腐蚀速率约为3 (g/dm²)·a,在回填土的腐蚀速率大于10 (g/dm²)·a,应根据土壤的性质选择合适的接地体材料。

参考文献:

- [1] 杨道武,朱志平,李宇春,等. 电化学与电力设备的腐蚀与防护[M]. 北京:中国电力出版,2004:220-221.
- [2] 黄小华,邵玉学. 变电站接地网的腐蚀与防护[J]. 全面腐蚀控制,2007,21(5):21-25.
- [3] 张富顺. 变电所铜接地网与扁钢接地网的经济评价[J]. 江苏电机工程,2006,25(2):23-24.
- [4] 朱忠伟,吴一平,葛红花. 变电站接地网腐蚀与防护研究进展[J]. 上海电力学院学报,2009,25(9):570-574.
- [5] 鹿中晖,章钢娅,王永红,等. 铜在典型内陆盐土中的腐蚀特征

(下转第84页)

某 600 MW 超临界锅炉受热面热偏差特性研究

马新立, 爻建军

(江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要:利用热电偶和 IMP 数采系统测量 600 MW 超临界锅炉各级受热面温度, 进行热偏差特性试验。分析了水冷壁、过热器及再热器安全性, 并对高温过热器和高温再热器出现的问题提出了相应的解决办法。

关键词:超临界锅炉; 热偏差; 超温

中图分类号:TK229.2

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)06-0072-05

锅炉水冷壁、过热器和再热器受热面内工质的压力和温度都相当高, 且布置在烟温较高的区域, 因而其工作条件恶劣, 受热面温度接近管材的极限允许温度, 而锅炉容量的日益增大, 使其过热器和再热器系统的设计和布置更趋复杂。电站锅炉的大量运行实践表明, 水冷壁、过热器与再热器的超温爆管是一个十分复杂的问题, 同时受到结构与运行两方面的影响。系统布置与结构设计不合理会引起工质流量与吸热量的不均匀而造成超温爆管。锅炉受热面热偏差特性试验的目的在于测试热偏差状况, 分析热偏差过大的原因, 提出解决受热面超温爆管的措施。

1 锅炉概况

锅炉为超临界参数变压直流本生型锅炉, 一次再热, 单炉膛, 尾部双烟道结构, 采用挡板调节再热汽温, 锅炉主要参数如表 1 所示。采用前后墙对冲燃烧方式, 24 只 HT-NR3 旋流燃烧器分三层布置在炉膛前后墙上, 燃烧器上部布置有燃尽风(OFA)风口, 12 只燃尽风风口分别布置在前后墙上。燃用晋南、晋东南地区贫煤、烟煤的混合煤种。采用中速磨直吹式制粉系统, 每炉配 6 台磨煤机, 其中 1 台备用。

表 1 锅炉主要参数

名称	BMCR
过热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1900
过热器出口蒸汽压力/MPa(g)	25.4
过热器出口蒸汽温度/℃	571
再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 607.6
再热器进口蒸汽压力/MPa(g)	4.71
再热器出口蒸汽压力/MPa(g)	4.52
再热器进口蒸汽温度/℃	322
再热器出口蒸汽温度/℃	569

2 试验方法

所有壁温测点均采用炉外壁温测点。选用 D0.5

收稿日期: 2013-06-05; 修回日期: 2013-07-10

mm 镍铬-镍硅热电偶丝, 将该丝用电容式点焊仪粘焊在选定的管壁上, 然后用保温材料将其保温并固定, 所测壁温代替管内工质温度。测点壁温数据信号通过 IMP 数据采集系统接入计算机进行采集。在稳定运行条件下通过 DCS 获取的对应点压力等参数, 计算出每个测点管子的焓增, 通过下列公式计算受热面的热偏差系数^[1]:

$$\rho_n = \Delta i_n / \Delta i \quad (1)$$

式(1)中: ρ_n 为热偏差系数; Δi_n 为第 n 根管子的蒸汽焓增; Δi 为参与比较的所有管子的蒸汽焓增的平均值。

3 热偏差试验

热偏差试验主要内容如表 2 所示。

表 2 热偏差试验主要内容

工况	主要内容
1	低负荷 317 MW 稳燃
2	168 h 考核运行, 负荷 600 MW
3	切高加, 负荷 600 MW
4	电厂日常习惯运行工况, 600 MW
5	变燃烧器三次风挡板开度, 变燃尽风量
6	变燃尽风层三次风挡板开度, 降低总风量
7	变燃尽风前后墙风量比例, 后/前=67%/33%
8	磨出口分离器挡板开度由 50% 变至 40%
9	氧量调平, 提高风量, 省煤器出口氧量 3.22%
10	变燃尽风(AAP)风量, 氧量 3.07%
11	变磨煤机组合, 由 ABCDF 变为 ABCDE
12	氧量调平, 变氧量, 氧量 2.63%
13	氧量调平, 变氧量, 氧量 3.22%
14	氧量调平, 变氧量, 氧量 3.84%
15	性能考核试验 1, 氧量 2.59%
16	性能考核试验 2, 氧量 3.48%
17	性能考核试验 3, 磨组合由 ABDEF 变至 ABCDF
18	锅炉最大出力试验, 锅炉主汽流量 1989 t/h

3.1 螺旋水冷壁热偏差

在 18 个工况下对螺旋水冷壁热偏差进行了测量, 热偏差情况如图 1—6 所示。

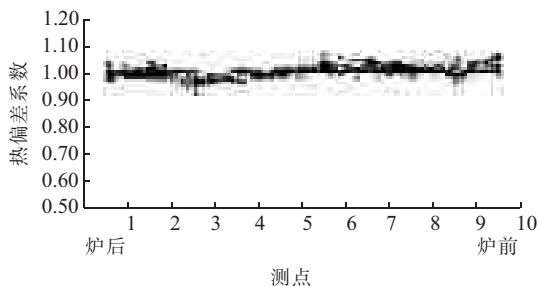


图 1 左侧墙螺旋水冷壁沿炉方向热偏差系数曲线

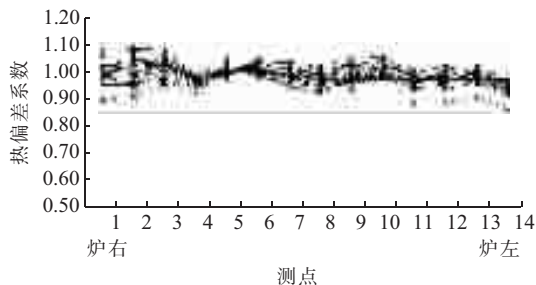


图 2 前墙螺旋水冷壁沿炉宽度方向热偏差系数曲线

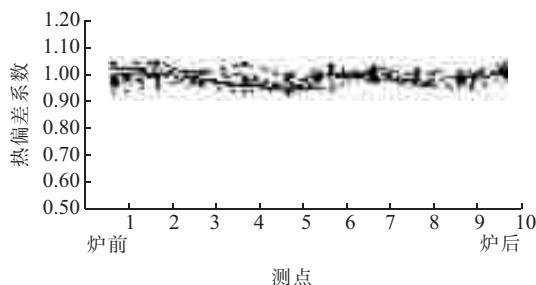


图 3 右侧墙螺旋水冷壁沿炉方向热偏差系数曲线

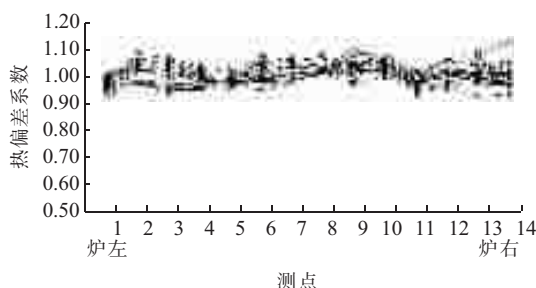


图 4 后墙螺旋水冷壁沿炉宽度方向热偏差系数曲线

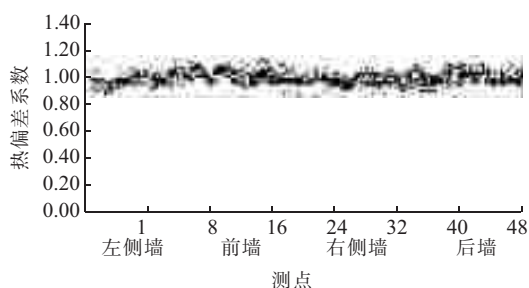


图 5 沿炉膛四周墙螺旋水冷壁热偏差系数曲线

图 1—5 中,沿炉膛四周,角隅部份和中间部份的水冷壁热偏差系数波动非常小,且变化无规律性。图 6 中,其热偏差系数波动也非常小。

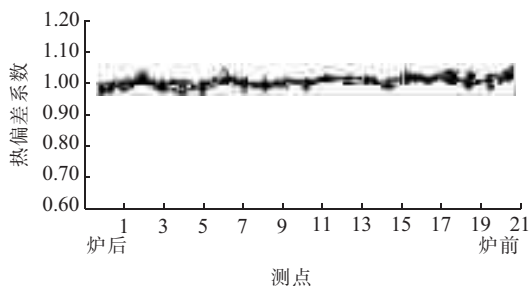


图 6 左墙螺旋水冷壁同屏管热偏差系数曲线

不同工况下螺旋水冷壁热偏差系数的平均值与最大值如表 3 所示。各试验工况中所有螺旋水冷壁壁温最大值与最小值之差不超过 20°C 。这主要是由于同一管屏中管子以相同方式绕过炉膛的角隅部份和中间部份,水冷壁管中流量偏差小、流速高、管壁受热均匀。螺旋水冷壁在试验过程中测得最高壁温为 417°C , 远远低于材料的许用壁温 540°C , 有较大的安全裕度。在不同工况试验时,前、后墙热偏差系数的分布与沿炉膛宽度方向送风量、单个燃烧器的出力有一定的关系,在出力大的燃烧器附近通过的水冷壁管焓增较大。

表 3 螺旋水冷壁热偏差统计表

偏差系数	左墙宽度	前墙宽度	右墙宽度	后墙宽度	炉膛四周	左墙同屏
平均	1.05	1.06	1.04	1.06	1.09	1.03
最大	1.07	1.11	1.07	1.11	1.12	1.06

3.2 屏式过热器热偏差

各工况下对螺旋水冷壁热偏差进行了测量^[2,3],热偏差情况如图 7—10 所示。

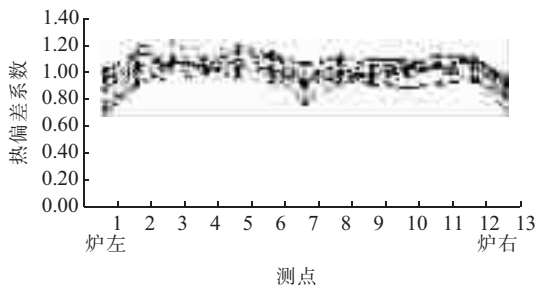


图 7 前排屏式过热器沿炉宽方向热偏差系数曲线

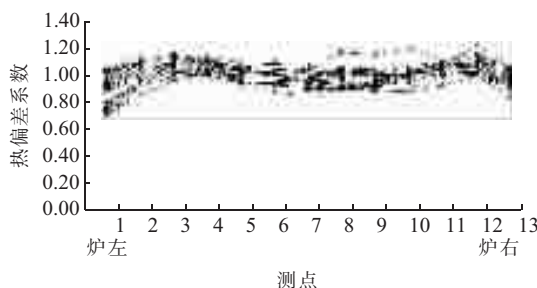


图 8 后排屏式过热器沿炉宽方向热偏差系数曲线

屏式过热器布置沿炉深方向布置了 2 排,每一排管屏沿炉宽方向布置 13 片屏,共 26 片,每片屏由 24

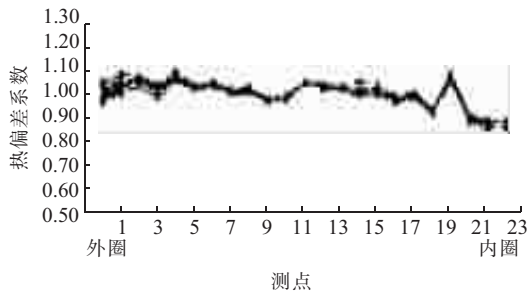


图 9 前排屏式过热器第 7 屏同屏管热偏差系数曲线

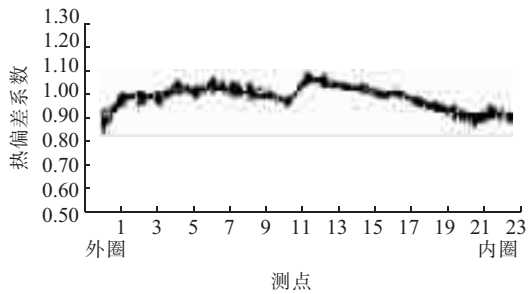


图 10 后排屏式过热器第 7 屏同屏管热偏差系数曲线

根管组成。由图 7、8 可看出,前排与后排屏式过热器沿炉宽度方向热偏差系数曲线均略呈“马鞍”型分布,且波动幅度不大。在距侧墙第 2、第 3 屏位置出现峰值,数值较小。具体到单个工况下,曲线分布有左高右低,右高左低,这主要是在燃烧调整时沿炉宽方向热负荷及送入炉膛氧量分布发生变化引起的。

为控制工质流量减小热偏差,使同屏各管的壁温比较接近,在管排的入口处、屏过进口集箱上设置了不同尺寸的节流圈,有 $D12.5\text{ mm}$ 、 $D13\text{ mm}$ 、 $D14\text{ mm}$ 、 $D15\text{ mm}$ 、 $D16.5\text{ mm}$ 、 $D20.5\text{ mm}$ 和 $D23.5\text{ mm}$ 7 种规格,具体位置如表 4 所示。

表 4 屏过进口集箱节流圈直径 mm

同屏管编号	1 外	2	3	4	5	6
节流直径	23.5	30.2	20.5	20.5	16.5	16.5
同屏管编号	7	8	9	10	11	12
节流直径	15.0	15.0	14.0	14.0	14.0	13.0
同屏管编号	13	14	15	16	17	18
节流直径	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	12.5
同屏管编号	19	20	21	22	23	24 内
节流直径	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5

前排、后排屏式过热器同屏管热偏差系数如图 9、10 所示,曲线窄幅波动,前排略呈外圈高内圈低,后排在外高内低的同时还略呈中部高内外低,这与前、后排屏过进出口集箱中工质的流速不同,造成压差不同从而影响管子中的工质流速有一定关系,但热偏差系数均在 1.11 以内,属较小值,证明屏过入口集箱上节流圈直径的选取与受热面包括集箱的设计是合理的,

特别是最外圈管径采用大管径是恰当的。屏式过热器试验过程中测得最高壁温为 $563\text{ }^{\circ}\text{C}$,远远低于材料的高位报警值 $621\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和许用壁温 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$,受热面是安全的。前排第 20 号管热偏差系数呈异常波动,在停炉进入炉内检查发现是该管突出管屏,辐射换热面积加大造成的,还发现有个别管屏沿炉高度方向产生较大的弯曲。不同工况下屏式过热器热偏差系数的平均值与最大值如表 5 所示。

表 5 屏式过热器热偏差统计表

热偏差系数	前排宽度	后排宽度	前排同屏	后排同屏
平均值	1.12	1.12	1.08	1.09
最大值	1.22	1.23	1.10	1.11

3.3 高温过热器热偏差

在各工况下对高温过热器热偏差进行了测量,热偏差情况如图 11—14 所示。

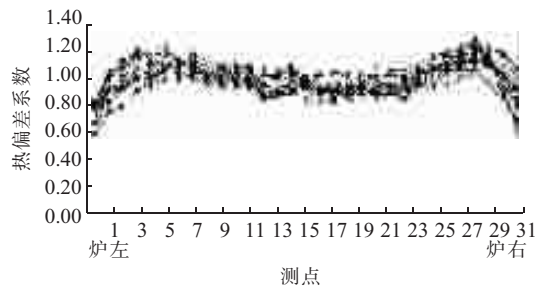


图 11 高温过热器沿炉宽度方向热偏差系数曲线

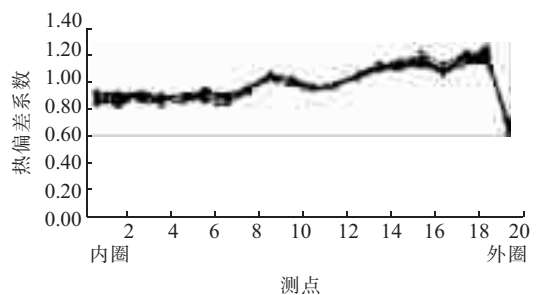


图 12 高温过热器 5 屏同屏管热偏差系数曲线

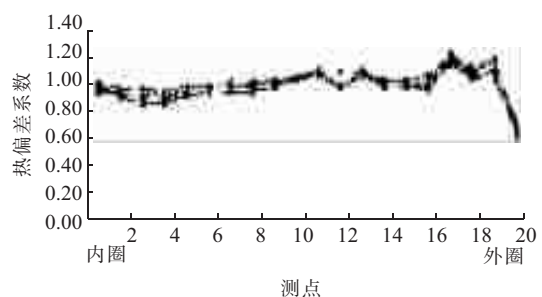


图 13 高温过热器 16 屏同屏管热偏差系数曲线

高温过热器沿炉宽方向布置有 31 片,每片管屏由 20 根管子并联绕制而成。试验期间高过第 17 屏第 7 根管出口炉外 T91 管出现一次爆管,爆管做金相分析后,认为该管长时处于超温运行,瞬间温度达到加热相变下临界点 $Ac1$ 附近,引起超温爆管。经仔细检查,在

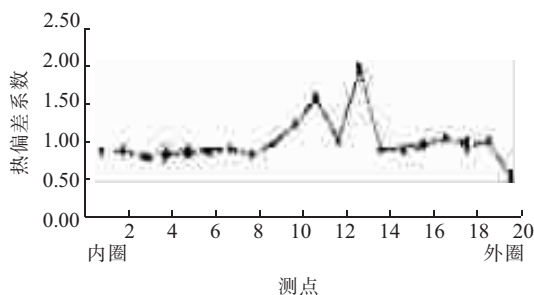


图 14 高温过热器 17 屏同屏管热偏差系数曲线

高过入口集箱中发现异物。

从图 11 可看出高温过热器沿炉膛宽度热偏差系数曲线,呈典型的“马鞍”型分布,热偏差系数数值较低且左右两侧均匀对称,在距侧墙 4 至 5 屏左右位置各出现一个峰值,各工况的平均峰值为 1.2,最大峰值为 1.31。水平烟道沿炉宽方向烟温分布是呈中央高两侧低,根据以往的经验,造成宽度方向热偏差系数曲线“马鞍”型分布,主要原因是沿炉宽方向烟气流速的分布及管中工质流速的不同造成的。在管排的入口处、高过进口集箱上也设置了不同尺寸的节流圈,有 $D13\text{ mm}$ 、 $D12.5\text{ mm}$ 、 $D12\text{ mm}$ 、 $D11.5\text{ mm}$ 、 $D11\text{ mm}$ 五种规格。具体位置如表 6 所示。

表 6 高过进口集箱节流圈直径 mm

同屏管编号	1 外	2	3	4	5
节流直径	30.4	13.0	13.0	13.0	13.0
同屏管编号	6	7	8	9	10
节流直径	13.0	12.5	12.5	12.5	12.0
同屏管编号	11	12	13	14	15
节流直径	12.0	12.0	12.0	11.5	11.5
同屏管编号	16	17	18	19	20 内
节流直径	11.5	11.0	11.0	11.0	13.0

通过图 12、13 可看出,2 屏同屏管热偏差系数曲线峰值均不高,曲线略呈左低右高,即靠近外圈管热偏差系数高于内圈,趋势还是比较明显的,但最外圈管因采用了大口径管,工质流量大,焓增过于偏小,仅为管组平均焓增的 65% 左右,这对同屏管系数均匀性有一定影响。高过第 5、16 屏同屏管最大热偏差系数分别是 1.28、1.21,不同工况下最大热偏差系数的平均值为 1.23、1.17,最高管壁温度在 $588\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $606\text{ }^{\circ}\text{C}$,属于一个比较高的温度水平,25.9 MPa 压力下壁温高位报警值为 $593\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图 14 为第 17 屏同屏管热偏差系数曲线,测点 7 所对应的管在试验期间存爆过管,检修清楚异物后该管在运行中壁温正常,但测点 10、11、13 热偏差系数明显偏大,壁温在 $600\sim 646\text{ }^{\circ}\text{C}$,已超过壁温高位报警值 $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于其他所监测管的壁温均明显低于这几点,分析超温原因:可能是该位置位于集箱正中位置,工质

流速低,过热器管入口或管内易置留异物,造成流通面积减小,冷却条件差,壁温升高;高过管屏管间定位装置变形,管子突出管屏面,吸热量增大,也有可能引起壁温升高。不同工况下高温过热器热偏差系数的平均值与最大值如表 7 所示。

表 7 高温过热器热偏差统计表

热偏差系数	沿炉膛宽度	沿炉膛宽度	第 16 屏同屏管	第 17 屏同屏管
平均值	1.20	1.23	1.17	1.89
最大值	1.31	1.28	1.21	1.93

3.4 高温再热器热偏差

在各工况下对高温再热器热偏差进行了测量,热偏差情况如图 15、16 所示。

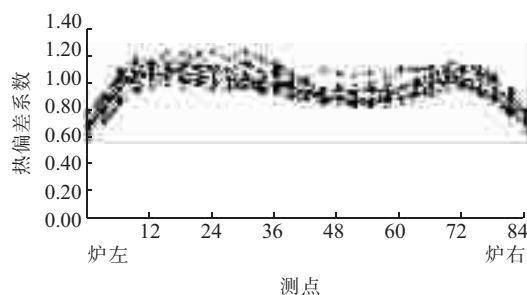


图 15 高温再热器沿炉宽度放向热偏差系数曲线

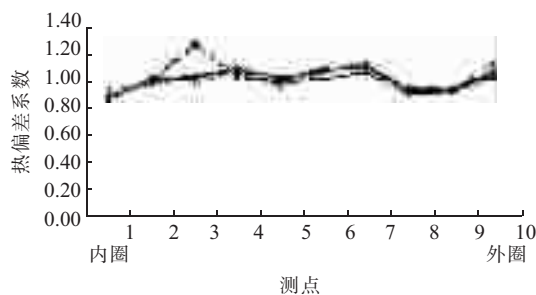


图 16 高温再热器 42 屏同屏管热偏差系数曲线

高温再热器蛇形管屏共 84 片,每片管屏由 10 根管子并绕成 U 形。沿炉膛宽度热偏差系数分布如图 16 所示,外形呈典型的“马鞍”型分布。热偏差系数数值较低,但沿烟道宽度分布不是很对称,烟道左侧热偏差系数水平略高于右侧,针对不同的工况,明显地出现左高右低或右高左低,这主要是再热蒸汽压力低,比热小,对烟温与烟气流速偏差比较敏感。热偏差系数在距侧墙约 $1/5$ 炉宽位置各出现一个峰值,沿宽度最大热偏差系数是 1.33,不同工况下最大热偏差系数的平均值为 1.22。同屏管分别选取距左侧墙 $1/8$ 炉宽(第 11 屏)与 $1/2$ (第 42 屏)炉宽位置上的两片管屏安装测点。高再进口集箱上也设置了 $D41.8\text{ mm}$ 、 $D23.0\text{ mm}$ 2 种规格的节流孔。具体位置如表 8 所示。

由图 16 可以看出,其热偏差系数数值较低,波动较小,且曲线的波动变化与节流圈规格存在比较明显的因果关系,若针对测点 1、4、7、8 再增加 2 种规格的

表 8 高再进口集箱节流圈直径 mm

同屏管编号	1 外	2	3	4	5
节流直径	41.8	23.0	23.0	23.0	23.0
同屏管编号	6	7	8	9	10 内
节流直径	23.0	23.0	41.8	41.8	41.8

节流孔,可进一步减少高再的热偏差系数。高温再热器在试验过程中测得最高壁温为 603°C , 受热面壁温高位报警值为 648°C , 且远远低于材料的许用壁温 700°C , 受热面是安全的, 且有较大裕度。高温再热器热偏差系数的平均值与最大值如表 9 所示。

表 9 高温再热器热偏差统计表

热偏差系数	沿炉膛宽度	第 42 屏同屏
平均值	1.22	1.15
最大值	1.33	1.31

图 16 中测点第 3 点热偏差系数出现不正常的波动, 分析其主要原因有 2 种可能性: 一是管内有杂物, 造成流通面积减小; 二是管屏中管子间的定位滑块发生变形、分离, 造成管子突出管屏面, 吸热量增加。

3.5 各受热面温度在机组升负荷时的变化情况

锅炉升负荷时, 随着主汽压力、机组电负荷升高, 各主要受热面出口工质温度的变化如图 17 所示。各受热面管壁温度升高比较平稳, 有 2 处小的波动主要是运行中减温水量和燃料量的波动引起的。

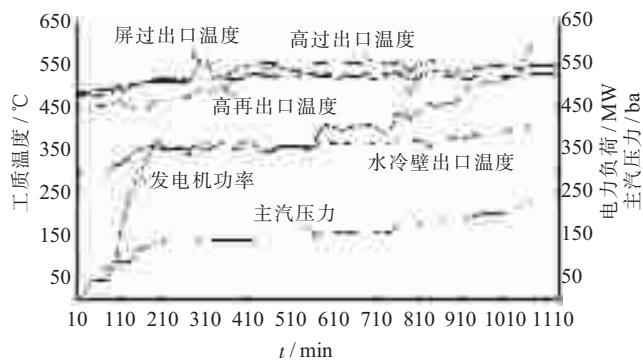


图 17 锅炉升负荷时工质温度变化曲线

3.6 沿炉膛宽度烟温分布

在屏式过热器下部, 通过前墙水冷壁上 8 个观察孔用辐射高温计进行了沿炉膛宽度烟温的测量, 其温度分布如图 18 所示。

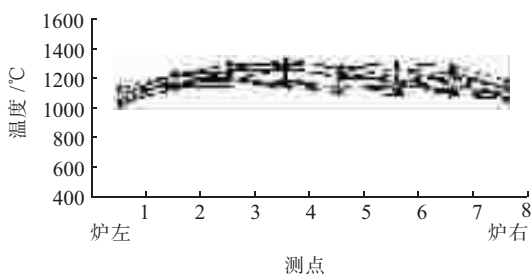


图 21 沿炉膛宽度烟温分布

从图 18 看出, 在该标高沿炉膛宽度烟温分布曲线总体呈中间高两边低, 幅度约 150°C 。这与屏式过热器、高温过热器及高温再热器沿宽度方向壁温分布曲线有所不同, 后者均呈有两个峰值的“马鞍”型分布。这是因为受热面中工质的焓增不仅与烟气的温度有关, 还与烟气流速、受热面周围环境温度、进口集箱与出口集箱内的压力分布等因素有关。

由上分析得出: (1) 锅炉主蒸汽及再热蒸汽均能达到设计参数, 且具有较好的汽温调节特性; (2) 螺旋水冷壁、屏式过热器、高温再热器, 在启动及各试验工况下, 受热面最高壁温均小于各自金属材料的许用壁温, 且有较大的安全裕度, 没有超温的危险; (3) 高温过热器在不同工况运行时, 温度偏差大的管壁温已非常接近, 甚至超过受热面壁温高位报警值, 存在一定危险; (4) 在炉膛出口烟温沿炉宽方向呈中间高两边低趋势分布, 峰值与谷值相差约 150°C 。

4 结束语

(1) 高温过热器作为末级受热面, 壁温裕度较小, 壁温高位报警值与主汽温差仅 22°C , 有必要进一步采取措施降低其温度偏差; 对壁温出现异常波动的管壁温度在运行中需加强监视, 有机会查明超温原因; 高温过热器及高温再热器受热面蛇形管间布置的定位滑动块, 在运行半年后检查发现不少变形、脱开, 建议对其改进; 高温过热器管屏最外圈蛇形管工质焓增, 仅为管组平均值 65% 左右。建议通过更改其节流圈尺寸或管径, 增加管中工质焓增, 以减少受热面出口工质的温度偏差。

(2) 通过合理的组织燃烧, 使燃烧所需风和燃料沿炉膛宽度均匀进入炉膛。

(3) 高再进口集箱上仅设置了 $D41.8\text{ mm}$, $D23.0\text{ mm}$ 2 种规格的节流孔, 建议再适当增加节流孔的规格, 对减少高再热偏差能起到积极的作用。

参考文献:

- [1] 王恩禄, 田子平, 缪正清, 等. 分配集箱静压分布参数 C_f 值的理论分析[J]. 动力工程, 1997, 17(3): 26-31.
- [2] 王峻晔, 吴国江, 王德平, 等. 锅炉过热器汇流集箱流动机理研究[J]. 热能动力工程, 1998, 78(6): 406-408.
- [3] 徐巧生, 张辉涛. 某 600 MW 超临界锅炉屏式过热器爆管原因分析[J]. 2012, 30(5): 72-75.

作者简介:

马新立(1969), 男, 江苏常州人, 高级工程师, 从事大型锅炉调试、试验及改造工作;

爰建军(1971), 男, 江苏南通人, 高级工程师, 从事大型机组热控调试、试验及改造工作。

江苏省燃煤机组脱硝装置运行现状分析

彭祖辉

(江苏方天电力技术有限公司,江苏 南京 211102)

摘 要:详细分析了江苏省脱硝装置的容量、所占比例及类型分布状况,并结合脱硝在线监控系统运行数据分析了已建脱硝装置的运行状况以及脱硝装置运行中存在的问题,最后提出了燃煤机组脱硝改造及对脱硝装置监管的对策建议。

关键词:脱硝;现状;建议

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)06-0077-04

目前,我国以煤为主的能源结构导致大气污染物排放总量居高不下,区域性大气污染问题日趋明显,长三角、珠三角和京津冀地区等城市群大气污染呈现明显的区域性特征,NO_x 等的污染问题未得到有效控制,酸雨的类型也从硫酸型向硫酸和硝酸复合型转化,今年以来,已出现 PM_{2.5} 严重超标的雾霾天气。氮氧化物作为主要污染物,已被列为国民经济和社会发展“十二五”规划约束性指标,到 2015 年氮氧化物排放总量需比 2010 年下降 10%。

2012 年 1 月 1 日开始,《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223—2011)正式实施,另根据国务院关于《重点区域大气污染防治“十二五”规划的批复》(国函[2012]146 号),江苏省沿江八市属于重点控制区范围,火电行业燃煤机组自 2014 年 7 月 1 日起执行烟尘、SO₂ 和 NO_x 特别排放限值,所有火力发电锅炉及燃气轮机氮氧化物执行 100 mg/m³ 排放限值。目前大多数的现有大中型燃煤电厂(热电厂)已开始进行污染治理设施的改造。同时,根据《国家发展改革委关于调整华东电网电价的通知》(发改价格[2011]2622 号)文件的精神,2011 年 12 月,为鼓励燃煤发电企业落实脱硝的要求,江苏省物价局发布了《江苏省物价局关于调整电价有关问题的通知》(苏价工[2011]358 号),通知中明确了江苏省燃煤脱硝机组 2011 年 12 月 1 日开始试行脱硝电价,脱硝电价的标准为 0.008 元/(kW·h)。

1 江苏省燃煤火电机组脱硝装置运行状况

1.1 脱硝机组所占容量和改造计划

根据国家和江苏省政府的要求,江苏省火电燃煤机组脱硝装置改造进度不断提升,脱硝机组容量所占比例不断增大,自 2010 年 8 月至 2012 年 12 月,江苏省脱硝机组容量及所占全省 135 MW 及其以上火电燃煤机组总容量的比例如图 1 所示。

从图 1 可以看出,截至 2012 年 12 月底,全省脱

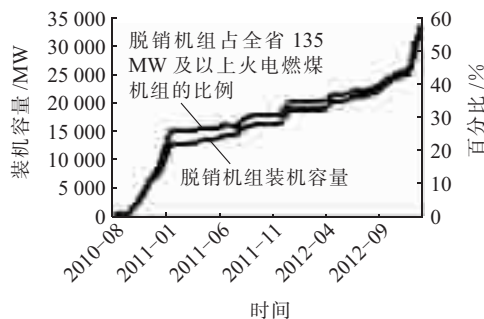


图 1 江苏省脱硝机组容量及所占全省 135 MW 及以上火电燃煤机组总容量的比例图

硝机组装机容量占全省 135 MW 及以上火电燃煤机组的比例达到 55.84%。根据江苏省脱硝装置改造计划,预计至 2015 年全省脱硝机组容量及所占全省 135 MW 及其以上火电燃煤机组总容量的比例如图 2 所示。

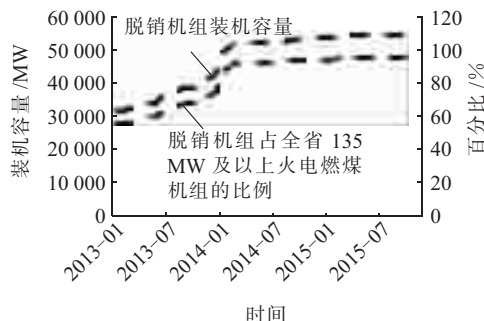


图 2 江苏省脱硝机组容量及所占全省 135 MW 及以上火电燃煤机组总容量的比例图

根据规划,预计到 2013 年 12 月底,全省脱硝机组总装机容量占全省 135 MW 及其以上火电燃煤机组总容量的比例将突破 90%。从图 2 可以看出,2013 年将是现有火电燃煤机组脱硝改造的关键之年。

1.2 已建脱硝装置类型分布

江苏省已投运烟气脱硝装置主要包括选择性催化还原法(SCR)、选择性非催化氧化还原法(SNCR)2 种型式^[1],2 种技术比较如表 1 所示。

江苏省火电燃煤机组脱硝改造选择类型中以 SCR 技术为主,截至 2012 年 12 月底,江苏省已上脱硝装置燃煤机组分类图如图 3 所示。

表 1 SCR 与 SNCR 脱硝技术比较

工艺名称	SCR	SNCR
脱硝效率 / %	70~90	30~60
操作温度 / °C	200~500	800~1100
NH ₃ /NO _x 摩尔比	0.4~1.0	0.8~2.5
氨泄漏 / [mg·(m ³) ⁻¹]	<5	5~20
总投资	高	低
操作成本	中等	中等

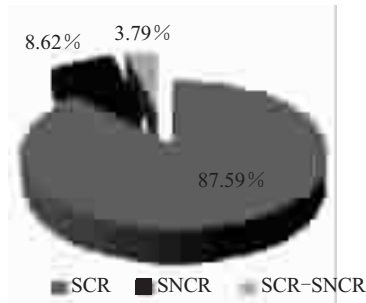
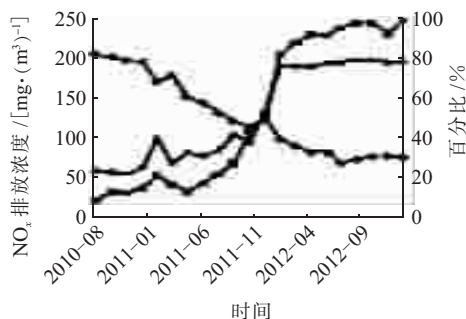


图 3 江苏省燃煤脱硝机组分类图

从图 3 可以看出,由于 SCR 技术脱硝效率高,江苏省脱硝装置绝大部分采用 SCR 技术,占有率达到 87.59%。采用 SCR 脱硝技术机组,氮氧化物排放浓度基本维持在 100 mg/m³ 以下,能够满足现行氮氧化物排放标准。对于常规大型燃煤机组而言,若采用低氮燃烧技术(否则脱硝入口 NO_x 浓度将更高),一般可将锅炉出口的氮氧化物浓度控制在 400 mg/m³ 以下^[2],机组排放浓度要达标(100 mg/m³),则脱硝效率至少需达到 75% 左右,而目前 SNCR 技术很难达到该要求。

1.3 已建脱硝装置运行状况分析

按月统计 2011 年以来江苏省脱硝机组运行指标(即 NO_x 排放浓度、脱硝效率、投运率),截至 2012 年 12 月底,脱硝机组 NO_x 排放浓度、投运率、脱硝效率变化趋势如图 4 所示。

图 4 2011~2012 年脱硝机组 NO_x 排放浓度、投运率、脱硝效率变化趋势

根据统计数据可以看出,江苏省脱硝机组氮氧化物排放浓度自 2011 年以来,不断下降,同时脱硝效率、投运率等指标不断攀升。其中,2011 年 7 月、2012 年 1 月 2 个时间点,全省脱硝机组排放浓度出现明显下降、脱硝效率及投运率同期出现明显大幅上升趋势。

(1) 2011 年 7 月时间点。2011 年 7 月,根据国家有关规定,在成功建设燃煤机组烟气脱硫实时监控及信息管理系统的基础上,汲取其建设经验,并结合江苏实际,全国首套实现脱硝装置全方位监管的燃煤机组脱硝实时监控及信息管理系统正式建成。系统的建设有利于电力监管机构和政府有关部门开展电力行业节能减排工作,提升电力环保监管水平与针对性,强化环境监察快速反应能力;有利于电厂推进节能减排任务,提高企业环保水平。系统的投运对全省氮氧化物减排产生了巨大的推动作用。系统投运仅半年,全省脱硝机组平均排放浓度由 2012 年 6 月的 175.58 mg/m³ 下降至 2012 年 12 月的 121.57 mg/m³,投运率由 16.19% 提升至 48.26%,脱硝效率由 26.56% 攀升至 52.26%。

(2) 2012 年 1 月时间点。2011 年 7 月 29 日,国家环境保护部联合国家质量监督检验检疫总局发布了修订后大气污染物排放标准,自 2012 年 1 月 1 日起,新建火力发电锅炉及燃气轮机氮氧化物(以 NO₂ 计)执行 100 mg/m³ 排放限值。同时 2011 年 11 月 30 日江苏省物价局发布通知,规定对安装并运行脱硝装置的燃煤发电企业,经国家或省级环保部门验收合格的,脱硝补贴电价按 0.008 元/(kW·h)执行。

在上述政策的引导下,江苏省火电脱硝机组排放浓度出现明显下降、脱硝效率及投运率明显上升,其中全省考核期 NO_x 浓度首次降至 100 mg/m³ 限值以下,达到 96.77 mg/m³,投运率及脱硝效率分别跃升至 80.54%、75.65%。

1.4 脱硝装置运行中存在问题

1.4.1 还原剂流量控制问题

对于脱硝系统,还原剂的使用量(即还原剂流量控制)是整个系统安全运行的关键问题之一。若还原剂(SCR: NH₃, SNCR: 尿素)喷入不足,烟气中 NO_x 就不能被充分吸收反应,排口氮氧化物浓度会超标;若还原剂喷入过量,产生的逃逸 NH₃ 常与烟气中的 SO₂, SO₃, NO, NO₂ 等酸性成分发生反应,在后段烟气设备的表面产生复杂的氨盐化合物,如生成硫酸氢氨(NH₄HSO₄)、硫酸铝氨盐等化合物^[3],这些化合物会附着于空气预热器表面,使空预器性能降低,影响机组的安全运行。此外,过量的 NH₃ 还会和烟气中的飞灰和硫氧化物发生反应,产物会沉积在催化剂和热交换器表面,从而导致催化剂的损耗和热交换器的效率^[3]降低。因此还原剂的喷入量的控制成为脱硝系统,甚至整个机组安全运行的关键问题之一,而还原剂的喷入量的控制常选择 2 个指标作为控制条件,即排口 NO_x 浓度、氨逃逸率;但目前氨逃逸测量尚未有行之有效比较准确的方法,因此喷氨流量的控制精度较低,经常出现控制逻辑反复动作,超调、失调情况频繁发生。

1.4.2 氨逃逸测量问题

在脱硝系统化学分析仪表中,氨逃逸的准确测量具有重要意义,氨的注入量既要保证有足够的氨与氮氧化物进行反应,以降低排口浓度,又要避免向烟气中注入过量的氨。注入过量的氨不仅会增加腐蚀,缩短催化剂的寿命,还会污染烟尘,增加在空气预热器中的氨盐沉积,增加向大气的氨排放,特别是会形成氨盐(硫酸氢氨),在温度降低时,硫酸氢氨会吸收烟气中的水分,形成腐蚀性溶液,堵塞催化剂,造成催化剂失活。在烟气经过空预器时,在热交换表面会形成硫酸氢氨,并产生沉积,降低空预器效率^[5]。一般 SCR 出口氨逃逸应控制在 2.5 mg/m^3 ,这样可延长空预器的检修及催化剂更换周期。2010 年 2 月,环保部发布了《火电厂烟气脱硝工程技术规范选择性非催化还原法》(HJ562—2010),该规范对 SNCR 系统设计的技术要求是:SNCR 法适用于脱硝效率要求不高于 40% 的机组;氨逃逸浓度控制在 8 mg/m^3 以下。该规范对 SCR 系统设计的技术要求是:在催化剂最大装入量情况下设计脱硝效率不得低于 80%;氨逃逸浓度宜小于 2.5 mg/m^3 。但 SCR 出口的烟气温度高、湿度高、未进行除尘处理且腐蚀性高,使氨逃逸检测难度增大,且氨逃逸量相对而言,浓度偏小,准确测量难度很大。

1.4.3 反应温度控制问题

催化剂成本占 SCR 总投资的 15%~20%,因此要尽可能地提高催化剂的利用效率,提高经济效益。由于催化剂只在特定的温度范围内才起作用,因而 SCR 系统运行时要选择最佳的操作温度。如果 SCR 反应器的反应温度过低,会造成反应动力减小和氨泄漏,进而造成锅炉尾部受热面的积灰结垢;泄漏的氨与 SO_3 反应形成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4HSO_4 ,会造成空预器等设备的堵塞与腐蚀。因此,氨泄漏必须小于 2.5 mg/m^3 。如果 SCR 反应器的反应温度过高,则会形成 N_2O 以及催化剂的堵塞和失效。在 SCR 系统中,最佳的反应温度由所使用的催化剂类型和烟气成分来决定。如常用的钛基氧化钒 SCR 催化剂的最佳反应温度为 $343\sim 399^\circ\text{C}$ 。当烟温接近最佳反应温度时,反应速率会增加,这时使用较少量的催化剂可达到同样的脱硝效果。SCR 烟气脱硝装置一般要求入口烟气温度大于 320°C 才能连续运行,而目前绝大部分火电机组均参与调峰运行,调峰严重的机组负荷变化范围在 40%~100%。而一般锅炉省煤器出口的烟气温度,负荷在 60% 以上时,烟温才超过 320°C ,脱硝装置才能运行,造成 SCR 烟气脱硝装置的投运率偏低^[6]。同时,机组低负荷运行期间也是锅炉低氮燃烧系统效果较差的时段,所以即使机组加装了 SCR 烟气脱硝装置,在机组低负荷阶段,出口氮氧化物仍会超过排放标准。

2 燃煤机组脱硝改造及脱硝装置监管建议

2.1 加强脱硝装置的全方位监管

江苏省环保厅等相关政府部门,自 2012 年 1 月 1 日起,利用“燃煤机组脱硝实时监控及信息管理系统”对全省 135 MW 以上脱硝燃煤机组的脱硝补贴电价 $0.008 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 进行考核。该系统作为全省脱硝补贴电价量化管理的载体,实现了对全省所有脱硝机组的全面覆盖,能够进一步规范全省脱硝机组的生产运行管理,动态跟踪分析发电企业脱硝装置运行情况和脱硝水平,促进发电企业科学合理地组织生产,保护脱硝运行良好的发电企业的积极性,促进脱硝不达标的发电企业提高运行管理水平。

从“十一五”期间脱硫监管的经验来看,虽然国家的节能减排的监管日趋严格,但仍然有少数发电企业存在人为修改上传监测数据,弄虚作假的现象。2011 年 11 月 7 日,环保部发布《关于 2010 年脱硫设施不正常运行电厂名单及处罚结果的公告》,对 8 家电厂存在着不正常运行脱硫装置、不正常使用自动监控系统、监测和 DCS 数据弄虚作假、二氧化硫超标等行为进行处罚。因此,为了保障脱硝补贴电价考核的有效开展,提升电力环保监管水平与针对性,确保电力监管的公平、公正、公开,充分利用“燃煤机组脱硝实时监控及信息管理系统”,一方面实现对全省脱硝机组的全向度、全层次、全领域、全环节实时监管,为政府实现节能减排目标提供有效的手段,同时促进电力企业不断提升环保水平;另一方面,在现有平台基础上,不断挖掘有价值的信息数据,为相关政府部门的决策提供依据。

2.2 优化脱硝电价考核模型

2.2.1 实行阶梯电价考核

目前发布的脱硝电价考核政策中,其中排放浓度指标满足《火电厂大气污染物排放标准》(假设其他条件均达标),则享受全额脱硝电价补贴,否则扣除全部脱硝电价补贴。该考核模型利于促进火电机组全部达标运行,但只要排放浓度在排放标准以内,电厂从经济等角度考虑,即使能够将排放浓度再降低,其仍然选择高浓度运行。因此,建议在脱硝电价考核模型中,依据排放浓度,制定梯度的脱硝电价补贴办法,用经济杠杆鼓励企业尽一切可能降低排放浓度。

2.2.2 兼顾新老机组脱硝成本差异性

根据国家电监会对重点省份的数据测算表明,同步建设脱硝装置的单位总成本约为 $0.0113 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,而老机组改造过程中,由于涉及到其他设备的改造(如引风机升级改造),成本较新机组要高,约为 $0.0133 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,但在脱硝电价考核中,新老机组补贴标准完全一致,对老机组的脱硝改造产生了一定的负面影

响。建议相关政府部门能够兼顾新老机组脱硝成本的差异性,优化脱硝电价补贴规则,进一步提升老机组脱硝改造的积极性,促进氮氧化物减排工作的深入推进。

2.3 因地制宜合理选择机组脱硝改造方案

目前国内外常用的低氮燃烧、选择性非催化还原、选择性催化还原等技术都各自有其优势、适用条件,脱硝技术特别是还原剂的选择,与企业所在地域、燃烧工艺、炉型、燃料、现场条件等密切相关,而且技术可靠性、一次性投入及运行成本也不同。(1) 低氮燃烧技术:工艺成熟,投资与运行费用较低,其应作为燃煤电厂在役机组和新建机组氮氧化物控制的首选技术^[7]。(2) SCR 技术:氮氧化物去除率高、应用成熟,但投资费用与运行费用高,适合在煤质多变、机组负荷变动频繁以及对空气质量要求较高的区域的新建燃煤机组上使用^[8]。(3) SNCR 技术:投资与运行费用较低,但氮氧化物去除率有限。

综上所述,对于常规燃煤机组,建议首先对机组进行低氮燃烧改造,然后选择 SCR 或 SCR-SNCR 技术改造;对于循环流化床机组,根据改造前氮氧化物排放浓度及 SCR,SNCR,SCR-SNCR 技术特点进行测算,多角度综合评估选择最优方案。

3 结束语

本文利用燃煤机组脱硝在线监控系统积累的大量

运行数据,对 2010 年至 2012 年间江苏省燃煤机组脱硝装置运行状况及发展趋势进行了统计分析,并总结了运行过程中发现的还原剂流量控制、氨逃逸测量、反应温度控制等三大技术难点、问题,对脱硝监管以及燃煤机组脱硝改造提出了一些对策建议,为火电厂脱硝改造和规划脱硝设施的运行提供了大量基础数据。

参考文献:

- [1] 李 敬,王振国,陈 楠. 燃煤电厂脱硝技术研究[J]. 内蒙古科技与经济,2011,236(10):109-110.
- [2] 陈建明,樊爱兵. 江苏省火电厂氮氧化物的污染状况及对策思考[J]. 江苏电机工程,2008,27(5):23-26.
- [3] 王瑞军,白云辉,崔华先. 烟气脱硝对锅炉运行的影响[J]. 云南电力技术,2011,39(2):70-75.
- [4] 沈 丹. 选择性催化还原法(SCR)脱硝系统主要技术问题研究[D]. 南京:东南大学,2007.
- [5] 朱卫东. 火电厂烟气脱硝监测分析及氨逃逸量检测[J]. 分析仪器,2010,42(1):88-94.
- [6] 沈保中,陈 震,徐小明. 执行 SO₂ 和 NO_x 新排放标准的压力及建议[J]. 电力与能源,2012,44(1):13-16.
- [7] 胡志杰,盛 春. 480 t/h 锅炉低氮燃烧系统改造及效果分析[J]. 江苏电机工程,2010,29(5):66-69.
- [8] 项 昆. 3 种烟气脱硝工艺技术经济比较分析[J]. 热力发电,2011,40(6):1-8.

作者简介:

彭祖辉(1963),男,福建宁德人,高级工程师,从事电力环保、火电厂脱硝、脱硝技术研究工作。

Analysis on Present Operation Situation of Flue Gas Denitrification System in Coal-fired Power Units of Jiangsu Province

PENG Zuhui

(Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: This paper firstly introduces the capacity, proportion and type distribution of the denitration facilities utilized in Jiangsu province, and then analyzes the present operation situation of the existing denitration facilities combined with real data obtained by the on-line monitoring system. Finally, according to the various problems encountered during operation processes of denitration facilities, some supervision countermeasures are proposed.

Key words: flue gas denitrification; operation situation; suggestion

(上接第 76 页)

Analysis on Thermal Deviation of High Temperature Heating Surfaces in 600 MW Supercritical Boiler

MA Xinli, SHU Jianjun

(Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Through monitoring the temperature of various high temperature heating surfaces with thermocouples and IMP data acquisition systems, experimental tests on thermal deviation are performed in one 600 MW supercritical boiler. The issues associated with the safety of water wall, high temperature superheaters and reheaters are analyzed, and several solution measures are proposed.

Key words: supercritical steam boiler; thermal deviation; overheating

可再生能源国际标准的现状及发展

江 林

(江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

摘 要:标准化对推广可再生能源技术的应用甚至主导其发展具有举足轻重的作用。文中简介了国际级、区域级、国家级及特定行业标准制定机构,阐述了可再生能源国际标准的进展情况,分析了中国参与国际可再生能源标准制定情况,提出了我国在可再生能源标准化工作上的建议。

关键词:国际标准;可再生能源;标准化

中图分类号:F416.2

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)06-0081-04

近年来,全球可再生能源发展迅猛。可再生能源标准化已日益成为可再生能源技术实施产业化的重要环节,成为企业及其相关技术和产品占领全球市场的重要基础性工作。由于标准化对推广可再生能源技术的应用甚至主导可再生能源技术的发展具有举足轻重的作用,因此国际社会、发达国家都非常重视可再生能源技术标准化工作,并取得了很好的成效。

1 标准简介

标准是对一定范围内的重复性事物和概念所做的统一规定。它以科学、技术和实践经验的综合成果为基础,以获得最佳秩序、促进最佳社会效益为目的,经有关方面协商一致,由主管机构批准,以特定形式发布,作为共同遵守的准则和依据。标准化是指为在一定的范围内获得最佳秩序,对实际的或潜在的问题制定共同的和重复使用的规则的活动。它包括制定、发布及实施标准的过程。标准化的重要意义是改进产品、过程和服务的适用性,防止贸易壁垒,促进技术合作。标准化的实质是“通过制定、发布和实施标准,达到统一”,目的是“获得最佳秩序和社会效益”。

国际标准的标准制定过程大致分为 6 个阶段,即提案阶段、准备阶段、技术委员会阶段、询问阶段、批准阶段和出版阶段。国际标准的影响非常大,一般一项国际标准从提出文稿到批准为标准至少需要 2 年,往后的 3~5 年需要对它进行不断地维护和完善,所以国际标准制定是涉及重大创新、知识产权、市场开发的综合能力的体现。

2 国际可再生能源标准制定机构

在全球范围内有 4 个层级的标准制定机构:国际级、区域级、国家级和特定行业标准制定组织^[1]。表 1 列出的是各层级涉及可再生能源和能源效率的主要标准制定组织。

表 1 各层级涉及可再生能源和能源效率的标准制定组织

等级	覆盖地区	涉及可再生能源和能源效率的标准制定组织
国际级	全球	ISO—国际标准化组织 IEC—国际电工委员会
	欧洲	CEN—欧洲标准化委员会 CENELEC—欧洲电工技术标准化委员会 ARSO—非洲标准化组织
	非洲	SADCSTAN—南部非洲发展标准化合作组织 AFSEC—非洲电工技术标准化委员会 AFRAC—非洲认可合作组织
区域级	亚太	PASC—太平洋地区标准大会 ASEAN—标准和质量咨询委员会
	欧亚	欧亚国际标准化、计量和认证委员会 COPANT—泛美技术标准委员会
	美洲	AMN—南方共同市场协会 CROSQ—加共体区域标准和质量组织 CANENA—美洲国家电工标准协调委员会
	中东	RCREEE—可再生能源和能源效率的区域中心
	国家级 组织 / 国家委员会	全球 163 个国家标准机构是 ISO 的成员 / 82 个国家是 IEC 的正式成员, 81 个国家是 IEC 的接纳成员
特定行业标准制定组织		如, 美国材料实验协会 ASTM, 森林管理委员会 FSC, 泛欧森林认证体系 PEFC, 生物燃料可持续发展圆桌会议 RSB, 棕榈油可持续发展圆桌会议 RSPO, 专注于巴西甘蔗乙醇的标准组织 Bonsucro, 等

2.1 国际级标准制定机构

与可再生能源相关的国际级的标准制定机构是国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)和国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)。ISO 和 IEC 这样的国际级的标准化组织是成员驱动型的组织, 他们的成员是各个国家的 ISO 国家标准组织和 IEC 国家委员会, 每个国家设一个。

国际标准化组织 ISO 的宗旨是在世界范围内促进标准化工作的发展, 以利于国际物资交流和互助, 并扩

大知识、科学、技术和经济方面的合作,它是目前世界上最大、最有权威的国际标准化专门机构。截止 2013 年 5 月,ISO 共有 163 个成员国,分为正式成员、通讯成员和缔约成员 3 个类别。

国际电工委员会 IEC 的宗旨是促进电气、电子工程领域中标准化及有关问题的国际合作,增进国际间的相互了解。IEC 由 82 名正式成员和 81 个接纳国家组成,目前下设 95 个技术委员会(Technical Committee, TC),78 个分技术委员会(Subcommittee, SC)。

2.2 区域级标准制定机构

随着世界区域经济体的形成,区域标准化日趋发展。区域标准化是指世界某一地理区域内有关国家、团体共同参与开展的标准化活动。目前,国际上已经成立的区域标准化机构共有 13 个,它们分别是欧洲标准化委员会(CEN)、欧洲电工标准化委员会(CENELEC)、非洲地区标准化组织(ARSO)、太平洋地区标准大会(PASC)等。CEN 是区域性标准化组织中影响最大的,致力于制定服务标准,建立服务一体化市场;制定环境标准,保护生态环境;通过欧洲标准推动技术创新等。CENELEC 的宗旨是协调欧洲有关国家的标准机构所颁布的电工标准,消除贸易上的技术障碍。

2.3 国家级标准制定机构

国家级标准制定机构是指在国家范围内建立的标准化机构以及政府承认的标准化团体,或者接受政府标准化管理机构指导并具有权威性的民间标准化团体,如美国国家标准学会、英国标准学会、德国标准化学会、法国标准化学会、日本工业标准调查会等。所有的发达国家 and 大部分的发展中国家都有自己的国家标准化团体或机构,这些机构制定、实施或批准标准。国家标准化团体可以成为国际和区域标准组织的成员。

2.4 特定行业标准制定机构

其他还有以行业为基础的标准制定机构,制定发布特定行业标准。生物燃料可持续发展圆桌会议 RSB,棕榈油可持续发展圆桌会议 RSPO,专注于巴西甘蔗乙醇的标准组织 Bonsucro,就是这样的特定行业标准制定机构。为了支持航运和可再生能源,挪威船级社(DNV)制定了许多标准和文件。英国微型发电认证计划(MCS)支持可再生能源产品及安装认证。

3 可再生能源国际标准的进展情况

可再生能源有大量的设计、制造、测试、安装、调试标准。截止 2013 年 3 月,国际可再生能源组织 IRENA 整理出来的可再生能源标准有 573 个,主要是制造标准和产品标准,包括测试方法与性能评估,按地理区域可分类,如表 2 所示。

从表 2 中可看出国家级的标准比较少,是因为很

表 2 按地理区域对标准分类

地理范围	数量 / 个	占比 / %
国际级标准化	313	54.6
区域级标准化	150	26.2
国家级标准化	13	2.3
行业级标准化	97	16.9
总共	573	100

多国家都直接采用了国际级或者地区级的标准。目前,IEC 中直接涉及可再生能源的技术委员会有 5 个,他们分别是 IEC/TC117(太阳能热电厂),IEC/TC4(水轮机),IEC/TC82(太阳能光伏系统),IEC/TC88(风力发电机组),IEC/TC114(海洋能——波浪、潮汐及其他水能转换设备)。ISO 直接涉及可再生能源的技术委员会有 6 个,即 ISO/TC180(太阳能),ISO/TC86(制冷与空调),ISO/TC238(固体生物燃料),ISO/TC208(工业用热涡轮机),ISO/TC28/SC7(石油产品和润滑剂),ISO/PC248(生物能源的可持续发展准则)^[2]。

3.1 太阳能热能利用(ISO/TC180,IEC/TC117)

ISO 的太阳能技术委员会 TC180 目前正在讨论太阳能光热领域的问题,包括防风雨的屋顶结构一体化及其结构的防火性和耐久性。另外还在考虑太阳能热水系统的军团菌问题以及系统的碳足迹问题,还没有证据表明小规模太阳能光热系统对人体健康构成风险,碳足迹关注技术性很强,国际标准正在制定中。

集中式太阳能热力发电是一个相对较新的技术,目前还没有国际标准。国际电工委员会 IEC 最近成立了技术委员会 TC117——太阳能热电厂技术委员会,旨在研究制定太阳能热电相关的国际标准。由于太阳能热电厂结合了热能和电能的产生,因此 ISO/TC180 与 IEC/TC117 技术委员会之间开展了密切合作。

3.2 太阳能光伏利用(IEC/TC82)

IEC 的太阳能光伏技术委员会 TC82 负责制定太阳能转换为电能的国际标准。太阳能光伏发电已经成为最可商品化的可再生能源技术之一,总共有 121 项认定标准,是最先进的制造和测试标准之一,这些标准约 90% 涉及到光伏电池板组件。

在过去 20 余年时间里,离网型太阳光伏发电向并网型发展,晶硅太阳能发电装置向薄膜太阳能发电装置发展,IEC/TC82 国际标准化工作也表现出逐渐根据产业进行调整的态势,一方面,修订维护标准,引入薄膜太阳能发电装置技术要求,另一方面,针对并网型太阳光伏发电的市场要求开展新标准的制订工作。目前 IEC/TC82 已发布 46 项国际标准,包括对太阳能光伏装置及系统接口的设计制造要求、安全性能要求、试验验收要求,对小型可再生能源和混合系统的建议等。2009 年 5 月正式发布了 IEC 62446《并网型太阳能光

光伏发电系统系统文件、架设、试验和验收的基本要求》。不论在发展中国家还是发达国家,越来越多的建筑物安装了并网太阳能光伏发电系统,建筑光伏引起火灾的问题成为了一个全球性的问题,IEC/TC82 正在寻找切实可行的解决方案。

3.3 地热能利用(ISO/TC86)

地热能涵盖了地球深层含水层的发电以及地球浅层能量转移的地源热泵。ISO 的制冷与空调技术委员会 TC86 涵盖地源热泵,并有已发布的国际标准,但还没有地热发电的国际标准,IEC 也没有地热发电方面的国际标准。据联合国气候变化专业委员会的评估表明,地热发电,到 2015 年将发展到 122 亿 kW/h 电量和 224 亿 kW/h 热应用。传统国家也开始使用地热发电,使用地下深处的地热能加热蒸汽,再通过汽轮发电机发电。因此很有必要制定地热发电的国际标准。

3.4 风能利用(IEC/TC88)

IEC 的风力发电机技术委员会 TC88 已经出版 21 项大型和小型风力发电机的标准和技术规范,这些标准涵盖陆上和海上风力机应用,主要包括风力发电机组零部件的设计、制造要求、型式试验和特性评估等。IEC/TC88 于 2008 年 8 月发布的 IEC 61400-21《风力机组第 21 部分:并网型风力机组电能质量特性的测量和评估》以及于 2009 年 2 月发布的 IEC 61400-3《风力机组第 3 部分:海上风力机组设计要求》,都快速、准确地反映了风电领域的技术发展和市场需求。

3.5 水利发电(IEC/TC4)

IEC/TC4 负责水轮机及其辅机设备的国际标准化工作。水电是开发技术最成熟的可再生能源,约占全球供电总量的 20%,水轮机国际标准化工作也相对成熟,其基本技术原则没太多变化。目前 IEC/TC4 已出版了 14 项标准和 8 个技术报告。正在制订的国际标准包括现场验收试验,型式试验,控制系统试验,架设、运行和维护指南,空蚀评定,水轮机、蓄水泵和水泵水轮机技术规范等。由于水中的沙子以及矿物质对水轮机有腐蚀性,会使其寿命减短、效率降低,因此目前国际标准更多关注的是诸如流经水电系统的水的成分问题。

3.6 生物能源利用

生物能源涵盖固态、液态和气态的生物能,可用于加热、发电和运输。这些领域已经有了得到广泛应用的产品标准,生物能源的可持续发展标准也在编写中。

ISO/TC238 是固体生物燃料技术委员会,在未来几年将发布约 89 项标准,涉及固体生物燃料的化学、机械、物理特性的测定。固体生物燃料的抽样标准也同样适用于固体回收燃料。

ISO/TC208 是工业用热涡轮机(蒸汽涡轮机,气体膨胀式涡轮机)技术委员会。由于目前还没有具体针对

生物燃料的涡轮机标准,因此生物质发电厂采用 TC208 制定的 2 个涡轮机方面的标准。

ISO/TC28/SC7 是石油产品和润滑剂技术委员会,他们正在编写生物燃料的运输和液体生物燃料加热应用的 4 个标准。

ISO/PC248 是生物能源的可持续发展准则项目委员会,正在制定一个支持生物能源应用的标准,将研究生物能源的生产、供应和使用方面的社会、经济和环境问题,并确定准则来防止对环境或社会造成破坏。

3.7 海洋能源利用(IEC/TC114)

IEC/TC114 是潮汐、波浪和其他水流能源技术委员会,成立于 2007 年,主要负责海洋能转换的国际标准化工作。依据 IEC/TC114 的声明,全球海洋波浪能可达每年 8000 至 80 000 TW·h,海洋洋流能可达每年 800 TW·h,由于从海上向陆地输电成本和能耗都非常高,将海洋能发电作为常规发电手段尚不成熟,海洋能发电的实际应用仍处于研发阶段,但是海洋能发电具有重要的战略意义。目前 IEC/TC114 正在开展 9 项国际标准制订,主要涉及术语、设备设计、设备性能评价等,2 个技术规范已经在 2012 年出版。

4 中国参与国际可再生能源标准制定情况

在整个标准的制定流程中,要充分认识到标准对发展中国家的影响及支持。发展中国家对可再生能源的考虑与发达国家有比较大的差异,尽管技术是相同的,但往往需求不同的,将影响到标准的执行。发展中国家专家参与国际标准制定,有如下机制:(1) 获得资金援助参会。如由瑞典标准协会支持的国际发展计划,提供资金,支持可持续发展领域的发展中国家参与国际标准制定。(2) 通过互联网视频、免费通话软件和其他电信渠道远程参与国际标准制定。

近年来,我国也积极参与可再生能源领域国际标准的制定。2013 年初,由中国国家电网公司牵头发起的大容量可再生能源接入电网新技术委员会获得 IEC 通过,是中国参与国际标准化组织活动的又一重大突破。大容量可再生能源接入电网新技术规范涵盖发电(包括风电、太阳能等)并网的术语和定义、资源评价与功率预测、并网技术条件、规划与设计、并网测试与评估、运行与维护、系统级控制及安全防御、分析与评估等技术规范^[3]。

5 结束语

我国一直重视对可再生能源的开发利用,在其标准化工作上也取得了一定的成绩。结合可再生能源的国际标准化信息,提出以下建议:

(1) 积极采用可再生能源国际标准。应加大采标

力度,将国际标准的内容,经过分析研究和试验验证,等同或修改转化为我国标准(包括国家标准、行业标准、地方标准和企业标准),并按我国标准审批发布程序审批发布。

(2) 积极参与可再生能源国际标准制定。国际技术标准是一国在国际市场上争取主动权和话语权,反映本国要求和本国利益的重要工具。目前发达国家和发展中国家在新能源技术上基本处于相同起跑线,发展中国家在新能源技术标准的制定上有掌握先机的机会。我国应积极参与可再生能源国际标准化活动,与国外同行加强技术和标准方面的交流与合作,不仅应尽早参与,甚至为主提出国际标准,争取标准化至高点。

(3) 及时制定、补充、修改国内各种可再生能源标准。我国的可再生能源标准化工作已经滞后于可再生能源产业的发展,需要开展基础性的有关标准体系、标准发展规划等方面的研究,深入分析对新标准或者对已有标准的更新需求。

(4) 建立可再生能源标准及法规信息平台。对于标准的使用者而言,要做到了解具体技术需要用到哪套标准,并且找到、获取这些标准,并不是那么容易。探索建立协作互动数据库,以及搜索标准的交互式网站,从而实现可再生能源相关标准和法规信息的实时查询,促进各项标准的推广实施。

参考文献:

- [1] International Standardization in the Field of Renewable Energy [R].IRENA, 2013.
- [2] 张亮. 国际可再生能源标准化发展的启示[J]. 电器工业, 2009(9):74-76.
- [3] 李爱仙,赵跃进. 我国可再生能源标准化的发展与现状[J]. 中国标准化,2003(08):6-7,21.

作者简介:

江林(1974),女,四川自贡人,高级工程师,从事电力系统分析、新能源技术及政策研究、电力技术与经济情报分析工作。

International Standardization for Renewable Energy

JIANG Lin

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Standardization plays a decisive role for the development and promotion of renewable energy technologies. Some international, regional, national and industry-specific standard-setting organizations are introduced, and the progress of international standards for renewable energy is elaborated. At last, China's participation in international renewable energy standards forming is analyzed, and recommendations for China's standardization work in the renewable energy are provided.

Key words: international standard, renewable energy, standardization

(上接第 71 页)

[J]. 腐蚀科学与防护技术,2009,21(6):522-526.

- [6] 欧洲华. 变电站接地装置的腐蚀机理及防腐措施研究[J]. 中国西部科技,2009,08(19):4-6.

作者简介:

杨明(1980),男,江苏南京人,工程师,从事变电站设计研究工作;
程好(1975),男,江苏连云港人,工程师,从事变电站建设工作。

Research on Corrosion Characteristics of Substation Grounding Materials in Salinity Environment

YANG Ming¹, CHENG Hao²

(1. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China;

2. Lianyungang Electric Power Company, Lianyungang 222100, China)

Abstract: Through the tests of corrosion weight loss, corrosion potential and corrosion rate under laboratory environment, the corrosion characters and laws of three kinds of substation grounding material (Galvanized carbon steel, Copper and Conductive anti-corrosion coatings) in coastal saline soils (undisturbed soil and back-filling soil) are studied in this paper. The result indicates that the Zinc coating is with a high corrosion speed and cannot protect steel in saline soils. Also the conductive anti-corrosion coating is without significant protective effect. But the corrosion rate of Copper in the backfill is only about 1% of galvanized steel. The research results provide a specific basis to choose substation grounding materials.

Key words: grounding material; saline-alkali soil; corrosion rate

《江苏电机工程》2013 年总目次

专论与综述

电网广域监测系统的数据库集成方案	戴则梅,葛云鹏,张珂珩,等(1.1)
基于模块化多电平换流器结构的柔性直流控制策略	胡兆庆,董云龙,田杰,等(1.5)
日发电计划安全校核系统开发与应用	丁怡,王岗,唐然,等(1.9)
江继电保护装置运行失效特性分析与状态检修策略	管益斌,严国平,陈久林,等(2.1)
一种大规模智能电能表全自动检定系统设计	黄奇峰,蔡奇新,刘建(2.4)
全光纤电流互感器现场运行误差特性研究	秦冉,王倩倩,杨世海,等(2.7)
江苏省燃煤电厂脱硫石膏排放利用状况及综合利用对策	刘涛,朱林,薛建明,等(2.10)
江苏电网非晶合金变压器综合评估	吴鹏,陆云才,陈铭明,等(3.1)
基于改进天气发生器模型的风速与日照强度组合预测方法研究	霍雨翀,范子恺(3.6)
盐城地区风电及光电特性研究	吴兴泉,万秋兰(4.1)
大规模风电接入对江苏电网调频影响与对策研究	秦旭东(4.6)
基于柔性直流输电技术的分布式发电在城市电网中的应用	尹寿垚,翟毅,吴昊,等(4.9)
提升特高压电网输电能力的方法	董宸,周霞,李威,等(5.1)
全寿命周期成本在海上风电输电方式经济性评估中的应用	凌峰,汤昶烽,卫志农(5.5)
汽轮机中不同扰动源对共振机理低频振荡的影响	冯双,孔珍宝,徐钢,等(6.1)

面向多级调度管理的云搜索体系架构研究	孙大雁,丁杰,彭林,等(6.5)
变压器差动保护误动原因分析及对策综述	袁宇波,李鹏,黄浩声(6.8)

故障诊断与检修策略

一起 110 kV 主变差动保护误动作原因分析	陆志平(1.13)
一起 220 kV 主变跳闸事故分析与对策	孔军,郎燕娟(1.15)
500 kV 自耦变单相短路电流的限制效果分析	许彦,赵立飞,童伟(2.15)
通讯管理机与能量管理系统通信故障分析与处理	张青,刘涤尘(2.18)
大型电动机转子串轴故障分析与处理实例	丁平,王江,潘毅(2.21)
一起 220 kV 变压器局部放电试验异常情况分析	甘强,吉亚民,陈轩(3.10)
500 kV 变压器空载合闸重瓦斯误动事件分析及防范	梁文腾(3.13)
500 kV 线路单相永久性故障两侧重合闸动作不一致的分析	邓洁清,刘一丹,乔星金,等(4.13)
变电站事故跳闸信号的分析	刘静(4.16)
两起消弧线圈系统故障案例分析	徐青龙,吴炜(4.18)
交直流互串导致灭磁开关误动原因分析及防范措施	周国平,张炯,李辰龙,等(5.10)
10 kV 线路故障引起主变差动保护动作的分析	蒋佳(5.13)
一起不同电压等级同杆双回线纵联零序保护动作分析	孙文华,袁宇波,李鹏(6.12)

一起风电场主变低压开关异常的保护动作分析
..... 汪文东(6.15)

电网技术

基于改进牛顿法的 VSC-HVDC 潮流计算
..... 黄 曙,何 桦,卫志农,等(1.18)

SVC 电压稳定控制和抑制低频振荡交互影响研究
..... 王云洁,胡 弢(1.23)

智能变电站中合并单元设置与否的技术经济比较
..... 鲁东海,苏 麟,娄 悦(1.26)

电厂电动执行机构软启动器设计
..... 沈德明,袁 栋(1.30)

发电机注入式定子接地保护方案改造及现场应用
..... 梁少华,申建彬,张 杰,等(1.34)

银东直流西北侧电网稳定控制系统实现
..... 丁留宝,王 健(1.37)

负荷优化运行模型及其算法研究
..... 张志福,苏宜强,曹海猛(1.40)

单亲遗传算法在电力计量器具配送问题中的研究
..... 尹 飞,李新家,祝永晋(1.43)

远动程序化操作若干问题的分析
..... 汤震宇,梁 雯,代小翔,等(1.47)

直流站换流变压器带负荷测试方法
..... 张 剑,肖宇华,袁宇波,等(1.50)

智能继电保护装置的自动测试方法
..... 胡再超,姚 亮,张 尧(1.53)

一种集中监控模式下电网故障诊断算法
..... 蒋 宇,李 明,张 勇,等(1.56)

扩大外桥式接线改建工程相关问题分析
..... 王亚洲,官金兴(1.59)

综合停电检修计划系统中平衡模型设计与应用
..... 袁红梅,杨 军,刘志仁(1.61)

基于 IEC 61850 变电站辅助设备信息综合监管系统
..... 潘海萍,谢狄辉,储乾旭(1.65)

多功能电能表的无功计量
..... 高怀平(1.68)

换流变保护改造分析及试验技术研究
..... 张佳敏,蒋 琛,李 鹏,等(2.24)

换流变压器直流偏磁与饱和保护
..... 文继锋,张晓宇,程 骁,等(2.28)

变电站户外电气设备防火距离研究
..... 李海烽(2.31)

AGC/AVC 在光伏电站的应用
..... 魏世贵,刘 双(2.35)

基于串联补偿的间谐波抑制技术研究
..... 杨志新,杨世海(2.38)

地区电网运行方式辅助分析系统的研究和应用
..... 吴 强,殷 伟,姜学宝(2.43)

光学电流互感器实时误差分析系统的设计
..... 陈铭明,卢树峰,包玉树,等(2.47)

居住区配电房智能运行系统的研究与实践
..... 刘 忠,谢 亮(2.50)

继电保护装置自动化测试系统的设计与实现
..... 胡红兵,李丽君,韩民畴(2.54)

氧化锌避雷器带电测试方法应用分析
..... 王静君,李文书,杜积贵(2.57)

基于随机规划理论的含异步风机的配电网故障重构
..... 顾国华,秦永刚(2.60)

用电信息采集系统中数据比对功能的实现及应用
..... 钱立军,李新家(2.64)

基于同步发电机的分布式电源孤岛检测方法研究
..... 陆以军,候梅毅(2.66)

直流控制保护故障录波采集及远传研究与应用
..... 沈 刚,薛海平,吕 冰,等(3.16)

电网主接线图自动生成与校核系统
..... 杨 威,李 力,苏 勇,等(3.19)

励磁系统整流装置均流不佳问题解决方法
..... 余 振,万 泉(3.23)

电动汽车电池更换服务收费标准研究
..... 沈珑桓,宋国兵(3.26)

基于区域策略寻优的地区电网 AVC 系统
..... 栗杰鹏,陈天华,杜 磊,等(3.30)

中压配电站所智能防盗及防误联动新技术的研究 沈飞飞,吕培强(3.33)	基于综合自动化系统的断路器遥控操作分析 李 晔,朱 江,吴 玲(4.45)
地区电网经济调度辅助决策系统 侯广松,徐爱军,王朝明(3.36)	基于放松弧垂法的架空地线带电更换方案 杜志佳,宫衍平(4.49)
冷热电联供型微电网容量规划优化研究 崔恒志,黄奇峰,杨世海,等(3.39)	静止变频器系统变压器短路阻抗的算法研究 石祥建,司红建,闫 伟,等(4.53)
220/110 kV 混压四回路新型窄基四柱钢管塔优化设计 刘德标,钱统亚,张大长(3.42)	电网监控数据辅助分析系统的研发 叶 勇,陆 路,李 杰(4.56)
冶金企业集中接入配网的谐波影响及对策分析 孙文华,陈 龙,袁晓冬(3.46)	GIS 电磁式电压互感器的励磁特性试验 赵华鑫,吉亚民,邵新苍(4.60)
基于功率负荷自适应的备自投实现方法 赵家庆,霍雪松,钱科军,等(3.50)	基于感应电的线路工频参数测量方法研究 付 慧,陶风波,周志成,等(5.15)
基于无线通信技术的电缆温度实时监测系统 吴为国,茅 丰(3.54)	有源滤波器在 6 脉中频炉谐波治理中的应用 钱长远,汪良坤,赵 燕,等(5.19)
无后备灵敏度的 220 kV 变压器后备保护整定 陈永明,杨 茹,汤大海,等(3.57)	风电场接地方式与零序保护整定计算 向昌明,杨宏宇,范立新,等(5.23)
基于 G 语言的智能变电站五防规则生成方法 徐 勇,王成波,梅德冬,等(3.60)	大容量冲击发电机短路电流衰减特性研究 汪海波,万德春,洪 深(5.26)
变电站远动专线通道网络化改造方案分析 卓 倬,徐 义(3.63)	集控型智能配网终端的设计与实现 李宁峰,张 吉,宋 斌(5.30)
分布式光伏发电并网的国内外政策分析与启示 江 林(3.66)	静止无功发生器负序补偿时直流电容选择 黄 华,陈赤汉,刘 磊,等(5.34)
智能园区需求响应项目实施效益研究 李啸宇,谈金晶,王蓓蓓(4.20)	智能变电站二次系统双重化配置技术应用分析 彭志强,张小易,高 磊,等(5.38)
电力系统无功优化算法性能比较及分析 周文俊,吴 熙,施伟成(4.24)	高速铁路接触网故障类型和方向的判别方法 王 丹,范三龙,孙金华(5.42)
基于锂电池组的变电站直流系统接线方式及其运行 花 盛,潘晓明,阚建飞,等(4.28)	基于超级电容的变桨系统后备电源设计 鲁 斌,田 炜,刘 剑,等(5.46)
风电机组一次调频特性研究 郭 炜,孔维君,柳 伟(4.31)	110 kV 变电所单母线分段接线保护闭锁备自投分析 刘丛洲,黄 治,汤大海,等(5.49)
110 kV 三圈变变电站备自投过负荷闭锁逻辑分析及改进 叶 婷(4.35)	换流变压器励磁涌流特性及其对差动保护的影响 张晓宇,文继锋,程 骁,等(5.52)
一种基于 SoC 的三相智能电表设计 陶 军,吕新伟(4.38)	智能变电站小电流接地选线装置的研究与实现 许小兵,董丽金,袁 栋(5.55)
一种单相电路谐波及无功电流实时检测方法 车蓉蓉,徐 蓉(4.41)	II 型采集器接入电力系统对电能表的影响分析 金 萍,田正其,鲍 进(5.59)

地区变电所消防集中监控系统应用研究

..... 石 浩,孙文华,张 剑(5.62)

分布式光纤测温技术在电力电缆运维中的应用

..... 周 琦,胡慧萍(5.65)

基于物联网技术的智能变电站辅助系统工程应用

..... 林 敏(6.19)

基于变电站测控数字量的自适应备自投联切装置

..... 冯迎春,陆圣芝,袁 松(6.23)

基于感应电动机的暂态电压稳定判据的研究

..... 向昌明,谢晓清(6.25)

用电信息采集系统集抄用户采集成功率提升研究

..... 顾国栋,周 玉,钱立军,等(6.29)

基于 LabVIEW 的稳控装置测试系统设计

..... 周晓宁,袁 康,梁 晖,等(6.32)

STATCOM 接入泰州电网仿真分析

..... 叶 勇,陆 路,李 杰(6.35)

基于无线传感器网络的输电线路在线监测系统

..... 陈久林,徐陈成,吴在军,等(6.39)

扬州智能电网输变电状态监测系统应用研究

..... 吴晨曦(6.43)

利用泄漏电流递归分析法研究绝缘子雾淞闪络

..... 薛恒嵩(6.47)

江苏电网 500 kV 智能变电站建设技术综述

..... 吴 威,宋亮亮(6.51)

中压电力电缆状态检测技术及应用

..... 沈飞飞,张建梁,吕培强,等(6.55)

基于电力需求响应的负荷管理系统

..... 史湘谊,李 颖,王春宁,等(6.59)

基于波形特征量的变压器平衡绕组故障诊断方法

..... 王建明,李 鹏(6.62)

新型现场计量装置接线检查方法的研究

..... 陶 军,杨世海,金在东(6.66)

盐碱环境中变电站接地体材料的腐蚀行为研究

..... 杨 明,程 好(6.69)

发电技术

1025 t/h CFB 锅炉屏式过热器管失效分析

..... 杨庆旭,杨 超,孙 雄,等(1.71)

1000 MW 发电机组烟气余热换热器设计方案探讨

..... 吴 江(1.74)

某 660 MW 汽轮发电机组漏氢量超标原因分析及处理

..... 顾一明(1.78)

汽轮机通流部分结垢与热力参数变化的关系分析

..... 杨 涛,胥建群,周克毅,等(2.71)

煤炭采样精密度核对试验方法的应用

..... 吴锁贞(2.75)

锅炉炉渣的深加工利用

..... 刘富宏(2.79)

江苏省内在役 1000 MW 汽轮机的特点与运行问题

..... 姚永灵,徐 斌(3.69)

某发电机组压缩空气母管压力频繁波动问题分析与改造

..... 梁 梅(3.72)

HP 中速磨煤机旋转分离器改造

..... 李晓坚,韦 丹(3.74)

某 135 MW 火电机组启动中工质水质问题及解决方法

..... 周荣勤(3.78)

630 MW 机组 DCS 与 DEH 一体化升级改造

..... 朱又生(4.62)

2012 年江苏省电厂电气一次设备红外检测及分析

..... 张 钰,杨晓慧(4.66)

超临界 650 MW 汽轮机采用 DAS 汽封的技术改造

..... 徐传堂,姜 涛(4.70)

650 MW 燃煤机组引风机和增压风机合并节能分析

..... 严加发(4.74)

某超临界 600 MW 可调整式双抽供热机组供热经济性

分析 曾广斌(4.77)

某 660 MW 机组一次调频试验控制逻辑分析

..... 陈 刚,谢 军(5.68)

某 1025 t/h 锅炉引风机和增压风机合一技术改造

..... 田宏伟(5.71)

超短期供热负荷预测技术研究及应用 代家元,王 林,张友卫(5.74)	国内超超临界直流锅炉炉水处理方式原理及应用实例 厉富超(S1.15)
某 330 MW 机组发电机氢气干燥器改进 钱 毅(5.77)	百万机组启动过程中的主要节点及其控制要点 郁洪霜(S1.18)
仪用空压机喘振原因分析及解决方案 柳扣林,路景春(5.79)	电厂压缩空气供气方案和系统运行优化的探讨 王 斌(S1.24)
某 600 MW 超临界锅炉受热面热偏差特性研究 马新立,爰建军(6.72)	1000 MW 锅炉 NO _x 排放浓度的影响因素分析 李柏凯(S1.27)
江苏省燃煤机组脱硝装置运行现状分析 彭祖辉(6.77)	
科普园地	汽机
智电动汽车无线充电技术 李 斌,刘 畅,陈企楚,等(1.81)	东汽 330 MW 机组高压调节阀阀杆脱落的原因分析及 处理 韩有阳,陈思宁,王 然(S1.29)
无线输电技术发展及应用 张 翼(2.82)	1000 MW 机组对外抽汽供热技术改造 张宁生,陈思宁(S1.32)
PQDIF 和 IEC 61850 标准在电能质量数据传输中的应用 王 巍,金耘岭,李 忠(3.81)	1000 MW 机组高加解列过程分析及措施 张 虎,徐龙飞(S1.37)
物联网在智能电网中的应用 杜 威,潘 苗(4.81)	上汽西门子 1000 MW 汽轮机轴封系统及其存在问题 李忠明,李柏凯(S1.39)
合同能源管理模式在闭式水泵高效节能泵改造上的应 用 袁洪利(5.82)	1000 MW 超超临界机组小汽机汽源切换系统改进 厉富超(S1.43)
可再生能源国际标准的现状及发展 江 林(6.81)	
锅炉	电气
1000 MW 超超临界机组塔式锅炉启动调试 朱广忠(S1.1)	1000 MW 同步发电机的进相运行 岳 涛(S1.45)
超超临界 1000 MW 机组锅炉上水冲洗方式优化与探讨 李方利(S1.4)	线路单相重合闸运行方式对机组安全运行的影响 沈珏玮(S1.49)
1000 MW 锅炉燃煤掺配的基本原则 胡向东(S1.7)	
空气预热器漏风控制装置在 1 000 MW 机组上的应用 崔国华,何俊松(S1.10)	控制
基于燃用易结渣煤种对捞渣机排渣设备的改善 王怀远,何俊松(S1.13)	火力发电厂控制系统人性化分析 李艾祥,刘劲松(S1.52)
	DEH 系统常见故障及解决办法 李明舟,朱 红(S1.57)
	330 MW 锅炉汽包两端水位偏差大原因分析及对策 贺 兵(S1.59)
	金属
	超超临界机组 P92 钢用国产与进口焊条性能试验研究 邱爱武(S1.62)

珠光体钢与奥氏体不锈钢的焊接材料及工艺的探索
..... 邱爱武,赵 国(S1.66)

环保

330 MW机组干法脱硫控制差压偏高原因分析
..... 陈国华,林 革,何俊松(S1.70)

1000 MW 机组脱硫添加催化剂经济性分析
..... 林 革(S1.73)

330 MW 燃煤锅炉加装烟气脱销装置及建议
..... 崔国华(S1.76)

配电网规划与管理

基于主变互联的配电系统供电能力优化建模
..... 韩 俊,周洪伟,王海潜(S2.1)

配电网“三双”接线模式的应用评估
..... 周晨曦,张聂鹏,蒋 濛(S2.4)

基于可靠性成本效益分析的南京配电网规划研究
..... 李子韵,刘 伟(S2.10)

配电网规划后评估实用指标体系与方法
..... 陈 浩,顾明宏,吴志坚,等(S2.14)

不同短路故障下综合负荷模型参数的可辨识性研究
..... 王 婷(S2.20)

物联网技术在建设一流配电网中的应用
..... 袁海星,沈海平(S2.24)

配电网设备

架空绝缘导线雷击断线防护措施的分析比较
..... 孙秋芹,周志成,陶风波,等(S2.28)

20 kV 真空断路器开断并联电抗器过电压抑制方法研究
..... 谢天喜,周志成,陶风波,等(S2.31)

高压交联电缆阻尼振荡波检测装置试验验证研究
..... 周 立,赵欣宇,夏 荣,等(S2.36)

配电变压器绝缘故障分析
..... 朱孟周,王静君(S2.40)

一起弧光接地引起 35 kV 母线过电压仿真分析
..... 曹旭翀,施伟成,朱江渝(S2.43)

电缆温度实时监测系统的研制
..... 周同梅,范炜豪,薛 霜(S2.46)

基于零磁通原理的电动汽车充电桩直流电能表检定装
置设计 段梅梅,张 健(S2.49)

配电网自动化技术

配网自动化建设模式研究与应用分析
..... 张 剑,孙 健,朱卫平,等(S2.52)

配电网自治式故障隔离系统研究
..... 孙 健,袁晓冬,袁宇波,等(S2.56)

配电网智能调度模式及关键技术研究
..... 陈星莺,余 昆(S2.60)

ASON 技术在常州地区智能电网建设中的应用
..... 陆晓炫(S2.64)

配电网保护技术

并网光伏电站保护配置方案研究
..... 王 哲,黄俊辉,赵宏大(S2.68)

分布式光伏逆变器对配网继电保护的影响
..... 张 剑(S2.71)

一起备自投装置误动引起的思考
..... 孙东杰(S2.75)

新能源

国外分布式电源发展对我国新能源定价的启示
..... 袁亚云,王 磊,刘建坤,等(S2.78)

采用双馈风力发电机的风电场谐波和间谐波变化特性
分析 顾 文,范立新,蒋一泉(S2.84)

分布式电源并网对电网运行和管理制度的影响及思考
..... 胡海安,张纳川,陈兆骅(S2.87)

分布式电源对电压暂降的影响研究
..... 沈培锋,徐青山,许洪华(S2.91)

分布式光伏发电项目成本效益分析
..... 孙为兵(S2.94)

新能源与电动汽车充换储一体化站协调运行模式探讨
..... 薛钟兵,彭 程(S2.97)