

江苏电机工程

JIANGSU DIANJI GONGCHENG

第 33 卷 第 6 期(总第 158 期)

2014 年 11 月 28 日出版(卷终)



目 次

专论与综述

- 基于 EMD 去噪的 Prony 算法在电网事故分析中的应用
..... 胡昊明,江叶峰,葛亚明,等(1)
海上风电场 VSC-HVDC 并网不对称故障负序电流控制
..... 张广明,田 炜(7)

故障诊断与检修策略

- 基于智能理论的高压断路器机械故障诊断
..... 田 涛,陈 昊,张建忠,等(12)
一起变压器低压绕组介损及电容量异常分析
..... 赵 胤,李华丹,董典帅(16)

电网技术

- 500 kV 串联补偿装置自触发及主间隙放电分散性研究
..... 林 敏,李 杰,周志成(20)
 ± 500 kV 直流输电线路暂态故障监测装置的设计与应用
..... 魏 旭,谢天喜,陶风波,等(23)
一种快速估算运行状态母线短路容量的方法
..... 唐建清(26)
电磁式电压互感器误差矢量分析法
..... 穆小星(30)
分布式光伏逆变器并网侧短路暂态特性分析
..... 文 珊,陈 兵(34)
智能电能表小电量走字原因分析及抑制方法
..... 田正其,纪 峰,徐 晴,等(38)
江苏电网降损潜力和实现途径方法分析
..... 安海云,周 琪,周 前(42)

《江苏电机工程》 编辑委员会

- 顾 问 张凤祥 郑健超 严陆光
尹积军 黄其励 薛禹胜
张 龙 陈 刚
- 主任委员 沈国荣
- 副主任委员 鞠 平 王海林 李 群
蒯狄正
- 委 员 袁晓辉 黄学良 李晓慧
张兴华 吴军基 张官元
王作民 费益军 陈云仑
莫建益 薛一如 叶 辉
- 主 编 薛一如

江苏省一级期刊

中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

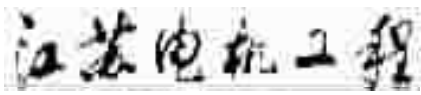
中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

中国期刊全文数据库全文收录期刊

中文科技期刊数据库收录期刊

《CAJ - CD 规范》执行优秀期刊

(双月刊)



主管单位:江苏省电力公司
主办单位:江苏省电力公司
江苏省电机工程学会
编辑出版:《江苏电机工程》编辑部
地址:南京市江宁区帕威尔路1号
邮政编码:211103
电话:(025)86558772(主编)
(025)86556860(编辑)
(025)86558020(编务)
(025)86558020(广告)
网内:954296903, 954296927
传真:(025)86558020
电子信箱:jsdj@chinajournal.net.cn(电网系统外)
jee@js.sgcc.com.cn(电网系统内)
创刊时间:1982年
发行范围:公开
国内发行:南京邮政局
邮发代号:28-305
国内定价:16.00元
订阅:全国各地邮政局(所)
印刷:南京电力印刷厂
广告经营许可证号:3200004000534
中国标准连续出版物号:ISSN 1009-0665
CN 32-1541/TM

500 kV 线路安装串联电抗器后断路器 TRV 分析	
..... 尹元明,谢天喜,周志成(45)	
有序用电用户负荷特性分析方法研究	
..... 颜庆国,陈 霄,易永仙,等(48)	
提高远程遥控安全性的 IEC 60870-5-104 规约扩展研究	
..... 朱海兵,吴 奕,陈 宁,等(51)	
基于同类划分的线损指标评价方法	
..... 孙志明,郑爱霞,周 前(55)	
带电更换 500 kV 直线转角塔绝缘子通用工具的研制	
..... 张 伟,张佰庆,邵长一,等(58)	
6 kV 高压变频调速系统恒压频比控制研究	
..... 翟学锋,徐 钢,李辰龙,等(61)	
温度对典型光学电压互感器误差特性影响的研究	
..... 陈 刚,陈铭明,徐敏锐,等(65)	
高频电源在 1000 MW 机组电除尘上的应用及优化分析	
..... 朱培峰(68)	
使用树莓派实现主机远程断电重启	
..... 刘佳诞,周 琦(70)	

发电技术

江苏电网 1000 MW 超超临界机组可靠性分析	
..... 蒯狄正(73)	
480 t/h 锅炉低氮燃烧器改造与运行优化调整	
..... 单锦宏(76)	
汽轮机疏水系统优化节能改造	
..... 万 跃,晏海能(79)	

科普园地

大数据可视化技术在电网企业的应用	
..... 王 栋(82)	

广告索引	(64)
------	------

封面简介:

南京南瑞继保电气有限公司(简称“南瑞继保”)主要从事电网、电厂和各类工矿企业的电力控制保护技术的研发和产业化,是国内该领域最大的科研和产业化基地,营销和技术服务网络覆盖全球 70 多个国家和地区。

中国工程院院士沈国荣担任公司董事长。

南瑞继保以“创造价值、服务社会”为宗旨,始终坚持自主创新,形成了以研发为核心,销售、设计、服务、生产融为一体的创新体系,实现了以技术创新带动产业发展、以产业化促进科技发展的良性循环。南瑞继保所有技术和产品均具有完全自主知识产权,主要技术达到国际先进水平,攻克±800 kV 特高压直流输电控制保护等一系列重大技术难题,核心产品广泛应用于国家电网特高压骨干网架、三峡输变电、“西电东送”等重点工程领域,为保障我国电力系统安全、稳定、经济运行,推进重大电力装备国产化作出了积极贡献。

CONTENTS

Thesis and Summary

- The Application of EMD-based Prony Algorithm in Power Grid Fault Analysis HU Haoming, JIANG Yefeng, GE Yaming, et al. (1)
- Negative Current Control of VSC-HVDC for Offshore Wind Farm Under Grid Asymmetrical Fault ZHANG Guangming, TIAN Wei (7)

Faults Diagnosis and Maintenance Strategy of Power Apparatus

- Mechanical Fault Diagnosis of High Voltage Circuit Breaker Based on Intelligent Theory TIAN Tao, CHEN Hao, ZHANG Jianzhong, et al. (12)
- Analysis on the Abnormal Condition of Transformer Low-voltage Winding Dielectric Loss and Electrical Capacity ZHAO Yin, LI Huadan, DING Dianshuai (16)

Electric Network Technology

- Research on Self-triggering and Spark Gap Discharge Dispersion of 500 kV Series Compensator LIN Min, LI Jie, ZHOU Zhicheng (20)
- Design and Application of Transient Fault Monitoring Device for ± 500 kV HVDC Transmission Lines WEI Xu, XIE Tianxi, WANG Mingmin, et al. (23)
- A Method for Fast Calculation of Operating Bus Short-circuit Capacity TANG Jianqing (26)
- Vector Algebraic Analysis Method for the Errors in Inductive Voltage Transformers MU Xiaoxing (30)
- Analysis on Transient Characteristics of the Distributed Photovoltaic Inverter in the Grid Side Short-circuit WEN Shan, CHEN Bing (34)
- Analysis and Suppression Method for Small Metering Error of Intelligent Electric Meter TIAN Zhengqi, JI Feng, XU Qing, et al. (38)
- Analysis on the Potential Loss Reduction and its Implementation of Jiangsu Power Grid AN Haiyun, ZHOU Qi, ZHOU Qian (42)
- Analysis on Breaker TRV for 500 kV Lines with Series Reactors YIN Yuanming, XIE Tianxi, ZHOU Zhicheng (45)
- Load Property Analysis Method for Demanders Participating Orderly Power Utilization YAN Qingguo, CHEN Xiao, YI Yongxian, et al. (48)
- Extension Research on IEC 60870-5-104 to Improve the Security of Remote Control ZHU Haibing, WU Yi, CHEN Ning, et al. (51)
- The Method for Line Loss Index Evaluation Based on Partitioning Similar Area SUN Zhiming, ZHENG Aixia, ZHOU Qian (55)
- Research on the General Tool for Live Work Insulator Replacement for 500 kV Suspension Angle Tower ZHANG Wei, ZHANG Baiqing, SHAO Changyi, et al. (58)
- Research on Constant U/F Control for 6 kV High-voltage and Variable Frequency Speed-regulating System ZHAI Xuefeng, XU Gang, LI Chenlong, et al. (61)
- Research on the Effect of Temperature on Typical Optical Voltage Transformer Error Characteristics CHEN Gang, CHEN Mingming, XU Minrui, et al. (65)
- The Application and Optimization Analysis on High Frequency Power Supply Technique in Dust Collection for 1000 MW Power Generating Unit ZHU Peifeng (68)
- To Realize Remote Host Power-off and Restart by Using Raspberry PI LIU Jiadan, ZHOU Qi (70)

Generation Technology

- Reliability Analysis on 1000 MW Ultra-supercritical Power Units in Jiangsu Power Grid KUAI Dizheng (73)
- Operation Optimization and Retrofit of Low NO_x Combustor of 480 t/h Coal-fired Boilers SHAN Jinhong (76)
- Energy Saving Transformation of Draining System of Steam Turbines WAN Yue, YAN Haineng (79)

Popular Science Field

- Application of Big Data Visualization Technique in Power Grid Enterprise WANG Dong (82)

Jiangsu Electrical Engineering (Bimonthly)

Competent Authorities Jiangsu Electric Power Company

Sponsor Jiangsu Electric Power Company

Jiangsu Society of Electrical Engineering

Editor and Publisher Editorial Department of Jiangsu Electrical Engineering

Address No.1 Power Road, Jiangning District, Nanjing, China

E-mail jsdj@chinajournal.net.cn (网外)

jee@js.sgcc.com.cn (网内)

Tel (025)86558772, 86558020

Fax (025)86558020

Publication Number ISSN 1009-0665

Post Code 211103

基于 EMD 去噪的 Prony 算法在电网事故分析中的应用

胡昊明¹, 江叶峰², 葛亚明², 尤伟², 张宁宇¹

(1.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2.江苏省电力调度控制中心, 江苏 南京 210024)

摘要:基于 DSA 系统, 江苏省电力调度控制中心开展了电网事故反演分析。在仿真曲线与 PMU 录波的比对分析过程中, 发现 PMU 信号在测量、传输过程中引入的随机噪声可能严重干扰 Prony 分析结果的精确性。文中提出应用基于噪声统计特性的 EMD 算法作为 Prony 分析的前置滤波环节, 通过随机重排循环, 对 EMD 分解得到的噪声分量进行抑制, 大幅降低噪声能量, 提高重构信号的信噪比, 从而改善 Prony 算法的分析精度。通过测试信号与江苏电网实际故障后分析算例, 验证了算法的有效性与实用性。

关键词:随机噪声; 统计特性; EMD 去噪; Prony 算法

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2014)06-0001-06

近年来, 在建设智能电网新形势的要求下, 电网状态估计技术得到了长足的发展; 不仅建立了更完整、更详细的电网模型, 而且可为高级应用程序提供更灵活的扩展接口, 从而为电力系统分析的在线化提供了有力的数据支撑^[1]。在此基础上, 江苏省电力调度控制中心于 2012 年 12 月部署了在线安全稳定分析(DSA)系统。DSA 系统基于状态估计提供的实时电网运行方式与量测数据, 对电网进行不间断的在线稳定分析, 内容包括静态安全分析、暂态安全分析等六大类计算。同时, 江苏电网已经全面部署了广域测量(WAMS)系统, 全网各节点装设的向量测量单元(PMU)以每秒 100 帧的采样率采集节点功率、电压、发电机相角等信息, 通过高速网络传输至位于调度中心的控制主站, 并存储于大型数据服务器^[2]。DSA 与 WAMS 系统的建立, 为电网事故的在线监测、辅助决策、回溯分析提供了极大便利^[3,4], 是建设智能电网的重要基础。

在应用 DSA 进行事故反演计算的过程中, 可能出现仿真曲线与实际 PMU 录波曲线在形态上极为相似, 但 Prony 分析结果差异较大的状况。原因在于 Prony 算法对于噪声较为敏感^[5], PMU 测量信号在测量、转换、传输过程中引入噪声干扰导致 Prony 分析结果明显偏离实际。经验模态分解(EMD)是一种滤波算法, 通过选择合适的本征模式函数(IMF)阶数, 可构成自适应的高通、低通、带通或带阻滤波器^[6]。然而, EMD 算法存在固有的不确定性及模态混叠问题, 对于信噪比较低的信号, 处理能力有限。

1 随机噪声特性分析

电力系统测量量在采集、转换、传输过程中, 往往存在各类随机扰动。因此, 研究随机噪声的数学特性, 寻找随机噪声的抑制措施是十分必要的。

1.1 随机噪声的数学表示

随机噪声是由多种复杂因素造成的, 包含着随机性与不可测性, 在数学上可以近似用高斯白噪声模型表示, 其定义如下:

(1) 信号的幅值满足高斯分布, 即其概率分布为正态函数;

(2) 信号的平均期望为 0;

(3) 信号的二阶矩不相关, 一阶矩为常数, 即前后信号无关联。

理论上高斯白噪声为一无限长序列。但在工程应用中, 在随机噪声信号序列足够长的情况下, 也认为其近似满足以上性质。

1.2 随机重排—累加平均对随机噪声功率的影响

信号的强度可以用其功率来描述。对于长度为 N 的离散信号序列 $n_0(i)$, 其功率定义:

$$P_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_0^2(i) \quad (1)$$

将序列 $n_0(i)$ 进行随机排序得到序列 $n'_0(i)$, 由于 $n'_0(i)$ 与 $n_0(i)$ 相比仅仅是各元素位置改变而幅值并未改变, 故序列 $n'_0(i)$ 的功率与原序列相同:

$$P'_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n'^2_0(i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_0^2(i) = P_0 \quad (2)$$

与原信号平均得到一次重构后的新信号 $n_1(i)$:

$$n_1(i) = \frac{n_0(i) + n'_0(i)}{2} \quad (3)$$

考察重构信号的功率变化情况, 则:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{n_0(i) + n'_0(i)}{2} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{n_0^2(i) + n'^2_0(i) + 2n_0(i)n'_0(i)}{4} \leq \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{n_0^2(i) + n'^2_0(i) + n_0^2(i) + n'^2_0(i)}{4} = \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (n_0^2(i) + n_0'^2(i)) = P_0 \quad (4)$$

即:

$$P_1 \leq P_0 \quad (5)$$

式(5)中等号成立的条件为:

$$n_0(i) = n_1(i) \quad i=1, 2, \dots, N$$

对于一般的随机噪声信号,上式成立的可能性是极小的。可见,通过随机排序—累加—取平均操作,可以降低噪声信号功率。

如果重复以上随机重排—累加平均操作,得到新信号 $n_2(i), n_3(i), \dots, n_L(i)$, 则重构信号的功率不断降低。当循环次数 L 趋近于无穷大时,信号 $n_L(i)$ 趋近于一常数序列。对于白噪声信号而言,由于 $E[n_L(i)] = 0$, 故信号 $n_L(i)$ 的功率趋近于 0。

构造随机噪声信号序列 $n_0(i)$ 如图 1 所示。信号采样频率为 100 Hz, 共 1001 个采样点。

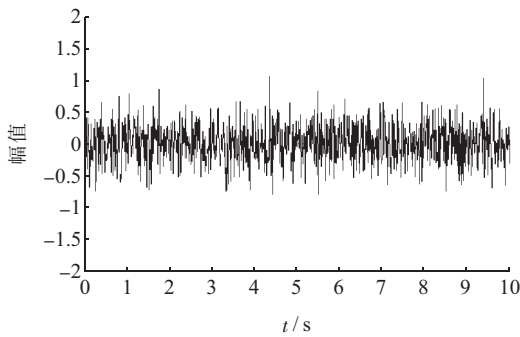


图 1 随机噪声信号

对噪声信号进行随机重排—累加平均操作,迭代次数为 10 次,计算每次迭代得到新信号的功率,信号功率 P 随迭代次数 n 的变化趋势如图 2 所示。

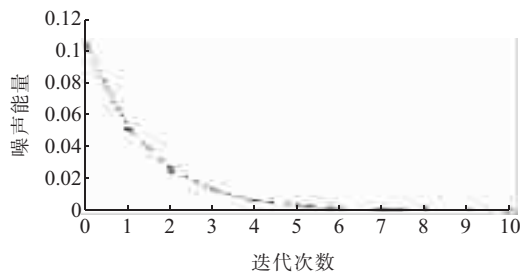


图 2 噪声功率与迭代次数关系

信号功率随迭代次数增加而减小。迭代 4 次之后,信号的功率已经降至原始信号的 10% 以下,随着迭代次数增大,随机噪声信号的功率趋近于 0。

2 Prony 算法与 EMD 算法性能比较分析

Prony 算法与 EMD 算法是 2 种常用的信号辨识算法。Prony 分析通过对信号进行拟合,得到信号中包含模式的频率、阻尼比等参数。EMD 具有时变、自适应

等特性^[7,8],在各领域得到了广泛的应用。本节基于测试信号,对 Prony 算法与 EMD 算法对于含噪信号的辨识能力进行对比分析。

2.1 测试信号

为了考察 2 种算法对于实际含噪信号的处理能力,构造以下测试信号:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} S_1 = 2e^{-0.0027t} \cos(2 \times 0.423\pi t + 110^\circ) \\ S_2 = 2e^{-0.0311t} \cos(2 \times 0.2473\pi t + 20^\circ) \\ S_3 = 2e^{-0.2652t} \cos(2 \times 0.42\pi t + 13^\circ) \\ S_4 = e^{-0.2936t} \cos(2 \times 1.0349\pi t + 60^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

测试信号的波形如图 3 所示。信号的分量参数如表 1 所示。

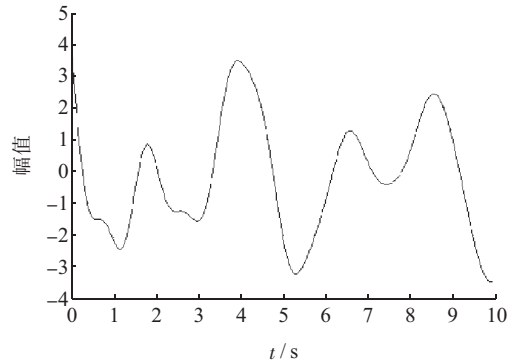


图 3 测试信号的波形

表 1 信号的分量参数

序号	幅值	频率 / Hz	阻尼比 / %
S_1	2.0	0.423	0.10
S_2	2.0	0.247	2.00
S_3	2.0	0.420	10.00
S_4	2.0	1.035	4.51

在原始信号上叠加 6.9 dB 白噪声干扰(信号信噪比为 2),如图 4 所示。

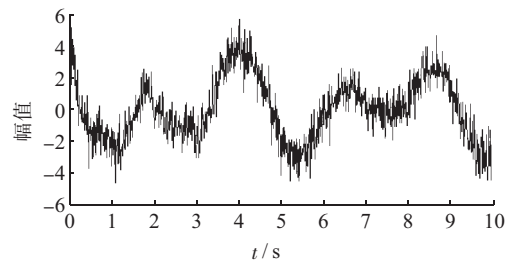


图 4 含随机噪声的信号波形

2.2 Prony 算法对于含噪信号的处理能力

Prony 算法要求输入信号 y 为等间距采样的时间序列,假设该数据序列由一组具有任意振幅、频率、初相位和衰减因子的指数函数线性组合而成:

$$y = \sum A e^{-\alpha t} \cos(2\pi f t + \theta) \quad (8)$$

式(8)中: A 为幅值; α 为衰减因子; f 为振荡频率; θ 为初始相角。

测量输入 $x(0), \dots, x(N-1)$ 的估计值可以表示为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^P b_m z_m^n \quad (9)$$

Prony 算法的计算步骤如下。

(1) 构造二阶矩样本矩阵。定义二阶矩样本函数如下:

$$r(i, j) = \sum_{n=p}^{N-1} x(n-j) x^*(n-i) \quad i, j = 0, 1, \dots, P \quad (10)$$

式(10)中: N 为数据采样点数; P 为样本矩阵阶数;采样数据为实数序列。

则二阶矩的样本矩阵形式:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r(1,0) & r(1,1) & \dots & r(1,L) \\ r(2,0) & r(2,1) & \dots & r(2,L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(L,0) & r(L,1) & \dots & r(L,L) \end{bmatrix} \quad (11)$$

为了使样本矩阵全面反映系统信息,维数 L 取其最大值 $N/2$ 。

(2) 确定计算阶数。通过一定的规则确定模型阶数 p ,通常采用奇异值分解方法(SVD)进行。

(3) 求解回归参数。求解以下方程组得回归(AR)参数,其中 ε_p 为最小误差能量:

$$\begin{bmatrix} r(0,0) & r(0,1) & \dots & r(0,P) \\ r(1,0) & r(1,1) & \dots & r(1,P) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(P,0) & r(P,1) & \dots & r(P,P) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

(4) 求解特征方程。特征方程形式为:

$$1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-p} = 0 \quad (13)$$

求解得到了特征根 $z_i (i=1, 2, \dots, P)$,称为 Prony 极点。

(5) 求解 $\mathbf{b}$ 向量。式(10)可以写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}(0) \\ \hat{x}(1) \\ \vdots \\ \hat{x}(N-1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, $[\hat{x}(0) \hat{x}(1) \dots \hat{x}(N-1)]^T$ 为原始信号估计值:

$$\hat{x}(n) = \begin{cases} x(n) & 0 \leq n \leq P \\ -\sum_{i=1}^P a_i \hat{x}(n-i) & P+1 \leq n \leq N-2 \end{cases} \quad (15)$$

(6) 求解各分量参数。通过求解线性方程组得到系数 b_m 和 z_m 之后,可以根据如下公式得到各振荡分

量的参数:

$$\begin{cases} A_m = |b_m| \\ \theta_m = \arctan[\operatorname{Im}(b_m)/\operatorname{Re}(b_m)] \\ \alpha_m = \operatorname{Ln}|z_m|/\Delta t \\ f_m = \arctan[\operatorname{Im}(z_m)/\operatorname{Re}(z_m)]/2\pi\Delta t \end{cases} \quad (16)$$

对无噪声扰动的原始信号进行 Prony 分析,结果如表 2 所示。

表 2 原始信号的 Prony 分析

分量	幅值	频率/Hz	阻尼比/%
1	2.000	0.423 0	0.102
2	2.000	0.247 3	2.001
3	2.000	0.42	9.991
4	1.000	1.034 9	4.511

在无噪声干扰时,Prony 算法可精确提取信号各分量的频率、幅值、阻尼比等参数,计算值与真值差异极小。对含噪声信号进行 Prony 分析,结果如表 3 所示。

表 3 含噪信号 Prony 分析

分量	幅值	频率/Hz	阻尼比/%
1	2.932 2	6.058	2.388
2	2.594 7	5.807	3.878
3	2.591 1	0.782	28.868
4	2.330 3	0.435	1.311
5	2.307 5	4.441	34.560
6	2.194 0	0.243	2.481
...	...	...	...

由表 3 可见,随机噪声对 Prony 分析影响较大,分析结果中出现幅值较大,而阻尼较弱的虚假模式,如模式 1、模式 2 等,真实分量淹没在噪声中。因此在对电力系统量测信号进行 Prony 分析之前,需加入前置滤波环节,以削弱或消除噪声的影响。

2.3 EMD 算法对于含噪信号的处理能力

EMD 算法将复杂信号分解为一系列简单基本的固有模态函数分量,以便于提取各个分量的幅值、相位等信息,具体过程为:

(1) 对于信号序列 $s(t)$,找到其极大值点和极小值点;

(2) 对极大值点序列和极小值点序列利用三次样条插值进行拟合,得到极大值点包络线 $v_1(t)$ 和极小值点包络线 $v_2(t)$,取 $m = \frac{1}{2} [v_1(t) + v_2(t)]$;

(3) 将 m 从 $s(t)$ 中减去, $h = s(t) - m$;

(4) 将 h 作为新的 $s(t)$,重复操作(1)至(3),直到极值点的包络线平均值 m 趋于 0,令 $c_1 = h$,则 c_1 为第一个 IMF 信号;

(5) 求余量 $r = s(t) - c_1$;

(6) 将 r 视为新的 $s(t)$ 重复以上过程, 求取第二个 IMF 信号 c_2 , 第三个信号 c_3 , 直到余量 r 因极值点过少而不能再进行分解。此时 r 为一个趋于平稳的量。

传统 EMD 滤波算法的过程为:

(1) 对原始信号进行 EMD 分解, 得到若干个 IMF 分量与一个趋势分量;

(2) 在噪声分量集中在信号的高频段, 且真实信号功率远大于噪声功率的前提下, 直接抛弃前 n 个 IMF 分量;

(3) 取其余 IMF 分量与趋势分量重构, 得到滤波后信号。

在实际操作中, 如何确定抛弃 IMF 分量的阶数 n 是值得研究的问题。通常采用的方式是计算各分量的功率, 找到功率发生突变的分量, 用该分量及其后的所有分量重构原信号。该方法的基础是认为信号中主导模式的功率远大于噪声分量的功率。在信号信噪比较高的情况下, 这种直接抛弃前面若干个功率较低 IMF 分量, 取余下 IMF 作为主导模式分量的方法, 可以较为精确地重构原始信号。但在信噪比较低的情况下, 噪声信号功率接近甚至超过主导模式分量, 功率判据失效, 因而舍弃 IMF 分量的个数通常难以确定。同时, 由于 EMD 算法存在固有的不确定性及模态混叠效应, 不能保证抛弃的 IMF 中不包含有用信息。因此, 在信噪比较低的情况下, 采用传统 EMD 算法往往不能很好地达到去噪目的。例如, 对第 1 节中的含噪信号进行 EMD 分解, 得到 7 个 IMF 分量与 1 个剩余趋势分量, 如图 5 所示。

从分解结果可以看到, 分解得到的前 3 个分量均为高频噪声分量, 但 IMF 4, IMF 5 的 2 个分量既包含噪声, 也包含原始信号中的信息。如果直接丢弃, 重构信号将会失去原始信号中的部分信息, 导致重构信号与原始信号之间有较大差异。

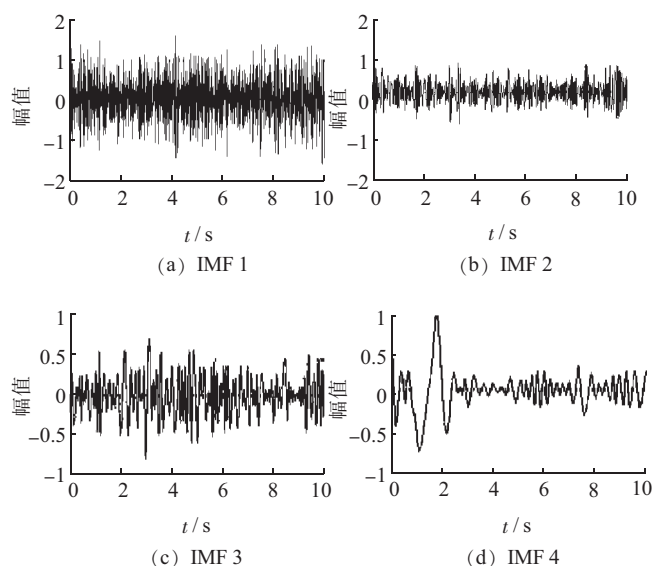


图 5 含噪声信号的 EMD 分解结果

3 基于 EMD 滤波的 Prony 算法

由上节分析可知, 对于信噪比较低的信号, 使用单一的 EMD 算法或 Prony 算法均难以达到理想效果, 因此, 利用 EMD 算法的去噪特性, 将其作为前置滤波环节, 对降噪后的信号进行 Prony 分析, 是可以考虑的方法。基于对噪声统计特性的分析, 可以考虑首先通过随机排序—叠加平均手段降低 EMD 分解所得噪声分量的功率, 再与其他分量进行重构, 达到提高信噪比的目的。算法过程为:

(1) 对原始信号 $y_0(i)$ 进行 EMD 分解, 并认为分解得到的第一个 IMF 分量为随机噪声信号 $n_0(i)$;

(2) 对 $n_0(i)$ 进行随机排序, 得到信号 $n'_0(i)$, 取 2 者平均值, $n_1(i) = \frac{n_0(i) + n'_0(i)}{2}$;

(3) 将 $n_1(i)$ 作为原始信号, 重复步骤(2)的操作, 得到功率降低的噪声信号 $n_L(i)$;

(4) 将 $n_L(i)$ 于 EMD 分解得到的除第一个 IMF 外的其余分量重构, 得到信噪比改善的信号 $y_1(i)$;

(5) 若需要进一步提高信噪比, 则重复步骤(1)至(4), 得到新信号 $y_2(i), y_3(i), \dots, y_M(i)$ 。

应用上述方法, 针对含噪信号 EMD 分解结果中第一个 IMF 分量, 采用随机重排—累加平均抑制其功率(迭代次数为 10), 与其他 7 个分量重构, 得到信噪比提高的信号序列, 如图 6 所示。与原始含噪信号(图 4)相比, 信号信噪比有所改善。为了进一步提高信号信噪比, 继续对信号进行降噪循环, 将历次循环得到结果与真实信号进行对比, 如图 7 所示。

由图 7 可看到, 经过 3 次降噪得到的信号已经与真实信号较为接近。对降噪后的信号进行 Prony 分析, 结果如表 4 所示。

经过 3 次降噪后的信号, Prony 分析结果与真实

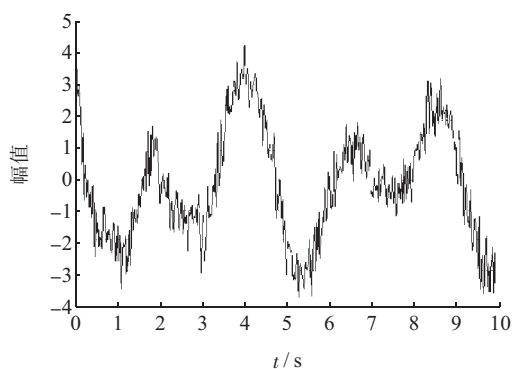
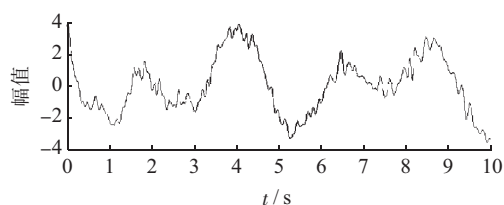
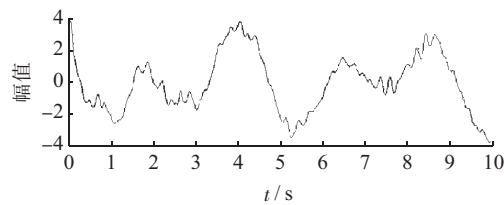


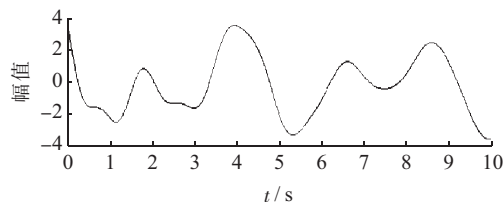
图6 第一次降噪结果



(a) 2次降噪后的信号



(b) 3次降噪后的信号



(c) 原始信号

图7 降噪信号与原始信号对比

表4 降噪信号的 Prony 分析结果

分量	幅值	频率/Hz	阻尼比/%
1	2.112 1	0.434	0.523
2	1.913 7	0.243	1.770
3	1.058 3	1.054	4.739
4	0.890 4	0.734	23.079
5	0.658 9	1.443	8.628
...	...	...	...

信号接近,其中分量 1,2,3 均为原信号中的主导模式,幅值、频率等参数计算误差均在工程可接受范围内。可见基于噪声统计特性的 EMD 算法可以有效抑制信号中随机噪声的功率,作为 Prony 算法的前置滤波环节,可以削弱噪声对 Prony 分析的影响,提高分析的精确程度。

4 江苏电网故障后分析

2014 年 4 月 4 日 15:33,江苏电网发生故障,溧车 5249 线 A 相单相短路,重合不成功跳三相。江苏省电

力调度控制中心应用 DSA 与 WAMS,开展了事故后分析工作。调阅事故时刻 PMU 录波曲线,线路三相跳开后,利港电厂 1 号机有功振荡情况如图 8 所示。

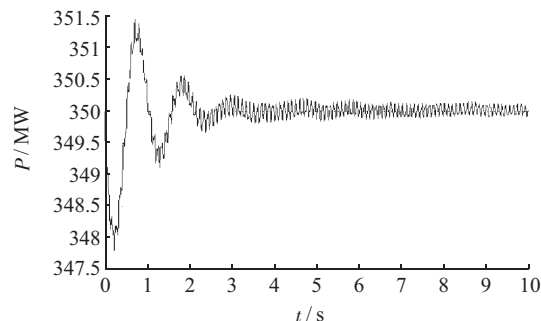


图8 利港 1 号机有功 PMU 录波曲线

利港厂 1 号机在故障后功率第一摆峰峰值在 3.2 MW 左右,5 s 后振荡趋于平息,显示系统阻尼特性良好。PMU 录波曲线中包含明显的随机噪声扰动。应用基于噪声统计特性的 EMD 算法对 PMU 录波信号进行 2 次滤波去噪,结果如图 9 所示。

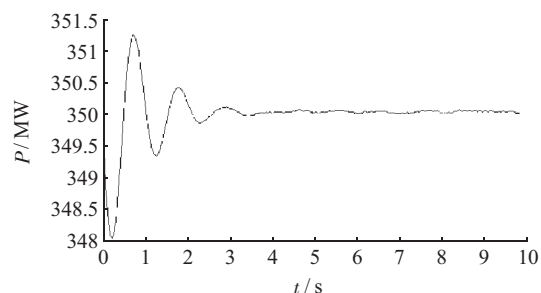


图9 滤波后的有功振荡曲线

从滤波结果可见,算法对于信号中的随机噪声扰动,有较好的抑制效果。对滤波后的信号进行 Prony 分析,结果如表 5 所示。

表5 PUM 曲线的 Prony 分析结果

分量	幅值	频率/Hz	阻尼比/%
1	350.158 0	0.000 0	100.00
2	0.522 6	0.949	15.416
3	0.518 0	7.341	34.953
4	0.006 1	0.861	11.403
5	0.178 7	11.520	27.809
...	...	...	...

计算结果中,模式 1 为直流分量,模式 2 为振荡的主导模式,其频率为 0.949 Hz,阻尼比为 15.416%。其余模式幅值较小或阻尼比较强。基于当时数据断面,应用 DSA 进行事故的反演仿真,事故后利港电厂 1 号机有功振荡情况如图 10 所示。

仿真结果曲线与 PMU 录波曲线在形态上比较接近。对曲线进行 Prony 分析,结果如表 6 所示。

Prony 分析表明,仿真曲线主导模式频率为 0.965 Hz,与 PMU 录波曲线相符;仿真曲线阻尼比为

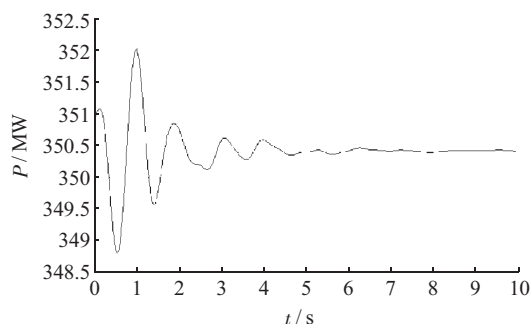


图 10 利港 1 号机有功振荡仿真曲线

表 6 仿真曲线的 Prony 分析结果

分量	幅值	频率 /Hz	阻尼比 /%
1	350.420 3	0.000 0	100.00
2	1.899 7	0.965	13.249
3	1.435 5	1.367	11.315
4	0.248 2	0.375	15.802
5	0.196 5	2.187	9.514
...	...	...	...

13.249%，与 PMU 录波曲线接近，但仍存在一定的差异，考虑到江苏 DSA 中，全网所有机组均未建立一次调频模型，仿真曲线阻尼比较实际略低是可以理解的。同时，曲线比对结果证明，建立电网详细、完整的模型，尤其是发电机动态模型，对于提高 DSA 的仿真精度是十分重要的。

5 结束语

在电网故障反演计算过程中，时常出现 PMU 量测信号中的随机噪声严重影响信号 Prony 分析精度，导致分析结果出现大量虚假模式，淹没主导模式的情况。噪声的统计特性研究表明，随机排序—累加平均操作可以降低随机噪声的功率，随着迭代次数的增加，噪声功率趋近于零。本文在此基础上，提出将基于噪声统计特性的改进 EMD 算法作为 Prony 算法的前置滤波环节，

对原始 PMU 录波曲线进行降噪，提高了 Prony 算法的精度。江苏电网 2014 年 4 月 4 日溧车 5249 线故障后仿真分析算例表明，该算法可以显著提高 PMU 测量信号的信噪比，滤波后信号中的噪声分量得到了明显抑制，其 Prony 分析结果与 DSA 仿真曲线可以取得较好的一致性。

参考文献：

- [1] 刘辉乐, 刘天琪. 电力系统动态状态估计的研究现状和展望[J]. 电力自动化设备. 2005, 24(12): 73-77.
- [2] 戴则梅, 葛云鹏, 张珂珩, 等. 电网广域监测系统的数据库集成方案[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(1): 1-4.
- [3] 李碧君, 许剑冰, 徐泰山, 等. 大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 32(6): 25-30.
- [4] 戴则梅, 陆进军, 闪鑫, 等. PMU 数据在控制中心的集成应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 8-11.
- [5] 王铁强, 贺仁睦, 徐东杰, 等. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究[J]. 中国电力, 2001, 34(11): 38-41.
- [6] 郭瑞. 微网短期负荷预测中的白噪声分离[D]. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2010.
- [7] 胡昊明, 郑伟, 徐伟, 等. Prony 和 HHT 算法在低频振荡在线辨识中的适用性比较[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 33-40.
- [8] 王婷. EMD 算法研究及其在信号去噪中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2010.

作者简介：

- 胡昊明(1987), 男, 江苏南京人, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制;
- 江叶峰(1976), 男, 江苏宜兴人, 高级工程师, 研究方向为电力调度运行管理;
- 葛亚明(1984), 男, 安徽宣城人, 工程师, 研究方向为电力调度运行管理;
- 尤伟(1983), 男, 江苏扬州人, 工程师, 研究方向为电力系统调度及其自动化;
- 张宁宇(1985), 男, 山西五台人, 工程师, 研究方向为电力系统规划与运行。

The Application of EMD-based Prony Algorithm in Power Grid Fault Analysis

HU Haoming¹, JIANG Yefeng², GE Yaming², YOU Wei², ZHANG Ningyu¹

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

2. Jiangsu Electric Power Dispatching and Control Center, Nanjing 210024, China)

Abstract: With the DSA system, Jiangsu Electric Power Dispatching and Control Center implemented an after-fault analysis. Compared PMU-recorded data with simulation curve, it is discovered that random noise in the PMU data, introduced during the process of measuring, transmission and conversion etc., may significantly affect the precision of Prony analysis. This paper proposes a noise characteristic based EMD which can be used as a pre-filter algorithm in Prony analysis. This algorithm reduces the power of noise through random sort iterations, and thus increases the signal-noise-ratio of the reconstructed signal. Therefore, the noise in the signal can be filtered effectively within several loops. The comparison between a test signal and a real fault in of Jiangsu power grid proved the effectiveness and practicability of the proposed algorithm.

Key words: random noise; statistical characteristic; EMD de-noising; prony algorithm

海上风电场 VSC-HVDC 并网不对称故障负序电流控制

张广明,田 炜
(南京南瑞集团公司,江苏 南京 211106)

摘 要:基于大型海上风电场通过柔性直流输电并网系统,分析研究了柔性直流输电系统的数学模型和控制策略。针对交流电网侧发生不对称故障时产生负序电流,采用延时法进行正负序分解,进而对正负序电流单独控制,提出了负序电流控制策略,抑制不对称故障时产生的负序分量。基于 PSCAD 平台搭建了仿真模型,仿真实验验证了所提策略可以很好地抑制负序电流。

关键词:海上风电场;柔性直流输电;不对称故障;负序电流

中图分类号:TM 614;TM 71

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)06-0007-05

我国风能资源丰富,尤其是海上风力发电资源,东部沿海适合营建大型海上风电场。长距离、大规模海上风电场的并网给电网稳定运行带来的巨大的挑战^[1]。由于海底电缆的充电功率、系统同步运行、潮流控制等带来的问题,大型的海上风电场更适合选用直流方式送电并网。直流送电又可分为自换相直流输电(LLC-HVDC)^[2]和柔性直流输电(VSC-HVDC)^[3]。基于电压源换流器的柔性直流输电方式具备有功和无功的独立控制、能向无源网络供电、控制灵活方便等等特点,很适合应用于海上风电等新能源的送电并网^[4]。目前,对于柔性直流输电系统的研究重点集中在交流系统电压平衡的理想情况下的建模和控制策略等方面。在实际运行中,风电场通过柔性直流输电并网的交流系统电压并不能保持完全平衡,交流电网故障中不对称故障占绝大多数。当电网电压不平衡或交流系统发生不对称故障时,换流站的交直流两侧会产生大量的负序分量和非特征谐波,这些谐波分量威胁换流电力电子器件的安全^[5]。同时,理想情况下设计的换流站控制系统在谐波的影响下将失去相位定向基准,并进一步影响控制系统的稳定性和准确性。因此,需要研究考虑电网交流系统发生不对称故障时的控制策略,满足整个输电系统运行时的安全要求。

交流电网压不平衡情况下,针对发生不对称故障的控制,主要是对故障电压电流进行正负序分离,对正

负序电流进行控制,抑制负序分量的影响^[6]。文献[7]采用单电流环,通过前馈补偿系统的谐波。文献[8]以功率无波动为目标计算得到正、负序 dq 轴 4 个电流给定值,但正负序电流的控制均基于正序 dq 坐标轴得到,控制精度不高。文献[9]根据建立的正负序系统模型,提出一种精确反馈线性化理论的正负序电流非线性控制策略。文献[10-12]使用基于输出有功无波动的正、负序双电流环控制器,将结构对称的电流双闭环控制和瞬时功率理论相结合应用于 VSC 的有功功率平衡控制,有效抑制交流系统电压不平衡引起的有功功率和直流电压的波动,但都未考虑抑制负序电流的问题。本文针对海上风电场通过柔性直流输电并网方式下交流电网发生不对称故障时,对正负序进行单独控制。从抑制负序电流的目的出发,参考换流站前馈解耦控制方法,提出带电压反馈补偿的负序电流控制策略。

1 风电场 VSC-HVDC 并网控制分析

1.1 海上风电场接入系统结构

海上风电场通过两端柔性直流输电系统接入并网,风电场的各台机组通过风电场汇流母线汇流,再经过风电场侧的升压变压器升压,海上和陆上的换流站整流逆变后并网,其拓扑结构如图 1 所示。

作为能量转换中枢的换流站有海上整流站(VSC1)和岸上逆变站(VSC2)。换流站设备包括换流

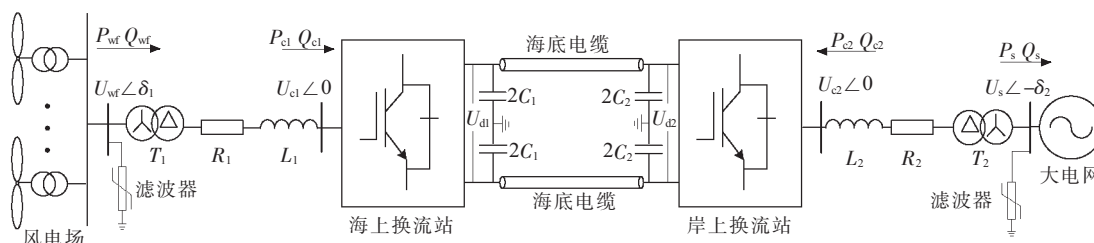


图 1 海上风电场柔性送电系统结构图

电抗器 L 、等效电阻 R 、直流稳压电容 C 、高通滤波器以及升降压变压器等。

1.2 电压源换流器模型

在 dq 旋转坐标系下,建立电压源换流器的暂态和稳态数学模型。暂态模型:

$$\begin{cases} u_{cd} = -L \frac{di_d}{dt} + Ri_d + \omega Li_q + u_d \\ u_{cq} = -L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (1)$$

稳态模型:

$$\begin{cases} u_{cd} = Ri_d + \omega Li_q + u_d \\ u_{cq} = Ri_q + \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (2)$$

式(1,2)中: u_{cd}, u_{cq} 分别为换流器控制的 d 轴、 q 轴电压; u_d, u_q 为电网 d 轴、 q 轴电压; i_d, i_q 分别为变流器控制的 d 轴、 q 轴电压; ω 为电网电压的角频率。

根据瞬时有功功率理论,换流器输送的有功、无功功率分别为:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2} (u_q i_d - u_d i_q) \end{cases} \quad (3)$$

根据能量守恒定理,交流侧与直流侧有功功率相等,则直流线路功率和电流分别为:

$$\begin{cases} P = u_{dc} i_{dc} \\ i_{dc} = \frac{3(u_d i_d + u_q i_q)}{2u_{dc}} \end{cases} \quad (4)$$

1.3 换流站控制策略

由于现在风电场主要应用双馈或者直驱风机,其控制相对成熟,频率等特性基本稳定。风电场侧换流器需要将整个风电场发出的功率整流后传递出去,不需要分别是有功还是无功,主要起到一个功率平衡节点的作用,只要稳定住风电场的交流电压,无需额外的频率控制或者功率控制环,本文对风电场换流器的控制借鉴柔性直流输电向无源网络输电控制策略,根据向无源网络供电控制策略,采用直接电压控制,参考换流器双闭环矢量控制系统,在直接电压控制的基础上加入了前馈补偿电压项,提高系统的动态响应速度、减小稳态误差,控制风电场汇流母线电压和频率稳定^[13]。网侧换流站采用双闭环结构的电网电压矢量控制,基于控制直流线路上电压的稳定,维持两端换流站功率流动的平衡,外环采用定直流电压控制策略,同时控制向系统注入的无功,以便对电网进行无功补偿。

2 电网不对称故障负序电流控制策略

换流器的正常控制策略是双闭环控制,内环是电流控制。不对称控制策略参考这种控制方法,在电压电

流正负序分解后,在反向同步旋转坐标系下进行正负序独立的控制。进而抑制负序电流。

2.1 正负序分量检测

输电系统换流站都是通过 Δ - Y_d 接线的变压器连接到交流电网,换流站侧三角形接线,交流电网侧星形接地,当发生不对称故障时零序电流不能通过变压器,则不用考虑零序分量对换流器的影响,只需要考虑正负序分量即可,将三相电压或电流分解为正序分量和负序分量。在两相静止坐标($\alpha\beta$)系下三相电量可分解为:

$$f_{\alpha\beta}(t) = f_{\alpha\beta+} e^{j\omega t} + f_{\alpha\beta-} e^{-j\omega t} \quad (5)$$

将正、负序分量分别转换到正、负旋转坐标系,如图2所示,那么正负序分量在正负序旋转坐标系下均体现为直流。

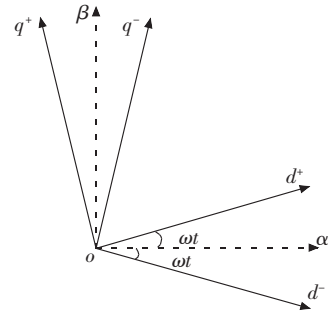


图2 坐标系与正负序旋转坐标系

目前,正负序分量检测有平均法和延时法2种。

(1)平均法也称滤波法,正序 dq 坐标系下正序分量为直流量,负序分量为两倍基波频率的交流量;负序 dq 坐标系下负序分量为直流量,正序分量为两倍基波频率的交流量;将三相量分别换算到正序 dq 轴上和负序 dq 轴上,分别用 100 Hz 带阻滤波器滤除二次量就得到正、负序 dq 轴分量。由于带阻滤波器的使用, dq 轴的电压电流共 8 个量都延时约半个周波。由于这些量都是直流量会在故障或者故障复归时有延时和相位滞后,会影响检测效果,降低正负序分离的精度。

(2)延时对称分量法即矢量法,利用电压或者电流的瞬时值以及上时刻瞬时值计算得到各相量的矢量,如图3所示。延时方法计算速度快,结构简单,本文采用这种方法。延时法是进行对称分量变换获得正序、负序分量,再分别 dq 变换得到所需要的正负序 dq 轴电压电流值。首先将三相信号经过克拉克变换,转移到两相静止坐标系下,再经过信号的延时和相位调整,得到一组新的信号,最后与原信号对消即可得到在两相静止坐标系下的正负序分量:

$$\begin{cases} u_{as} = u_{\alpha} \cdot e^{-T/4} \\ u_{\beta s} = u_{\beta} \cdot e^{-T/4} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_{\alpha p} = 0.5(u_{\alpha} - u_{\beta s}) \\ u_{\beta p} = 0.5(u_{\beta} - u_{\alpha s}) \\ u_{\alpha n} = 0.5(u_{\alpha} + u_{\beta s}) \\ u_{\beta n} = 0.5(u_{\beta} + u_{\alpha s}) \end{cases} \quad (7)$$

式(6,7)中: u_{α}, u_{β} 为三相电压经克拉克变换得到的两相静止坐标下的电压; T 为交流电网时间周期; $u_{\alpha p}, u_{\beta p}$ 为正序分量; $u_{\alpha n}, u_{\beta n}$ 为负序分量,在经过 dq 坐标变换即可得到在旋转坐标系下的正负序分量。

2.2 正序控制

在电网侧有不对称故障情况下,正序分量控制与稳态运行控制策略类似。电网电压参考方向取在 d 轴上,得到 d 轴电压等于电网矢量电压, q 轴电压为0,即 $u_d = u_s, u_q = 0$ 。对直流电压和无功的控制可根据公式(3,4)推导正序的 d 轴电流稳态值 i_d^+ 和 q 轴电流稳态值 i_q^+ 的公式:

$$\begin{cases} i_d^+ = \frac{2u_{dref}i_{dc}}{3u_d} \\ i_q^+ = -\frac{2Q_{ref}}{3u_d} \end{cases} \quad (8)$$

得到正负的 d 轴电流 i_d^+ 和 q 轴电流 i_q^- 后,再分别加上经过PI控制器的修正量 Δi_d^+ ,得到 d 轴参考电流 i_{dref}^+ 和修正量 Δi_q^+ ,得到参考值 i_{qref}^+ 。

根据换流器暂态方程(1),经过外环得到的参考电流与测量的 dq 轴电流比较后经过PI控制器得到电压一阶电压 v_d^+, v_q^+ (分别与电流 i_{dref}^+, i_{qref}^+ 具有一阶微分关系)。控制量 u_{cd}^+, u_{cq}^+ 除了分别受 i_d^+, i_q^- 控制外,还会有交叉耦合项。因此,对此控制器引入了前馈补偿项 $\Delta u_d^+ = \omega L i_q^+, \Delta u_q^+ = \omega L i_d^+$,实现 dq 轴的解耦控制,从而得到换流器正序 dq 轴分量控制电压 u_{cd}^+ 和 u_{cq}^+ ,即:

$$\begin{cases} u_{cd}^+ = v_d^+ + \Delta u_d^+ \\ u_{cq}^+ = v_q^+ + \Delta u_q^+ \end{cases} \quad (9)$$

再经过坐标变换,进而得到两相静止坐标系下的 $\alpha\beta$ 轴分量 u_{α}^+ 和 u_{β}^+ 。具体的控制框图如图3所示。

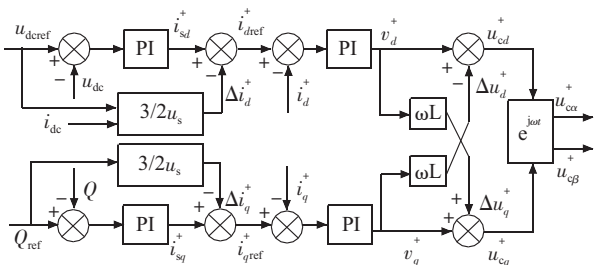


图3 正序电流控制控制器

2.3 负序控制

交流电网系统发生不对称故障时,产生的负序电流分量威胁着换流站的安全运行,不对称故障的控制策略也是抑制产生的负序电流。根据式(1)描述的换流站暂态模型,可以得到负序分量的暂态方程:

$$\begin{cases} \dot{u}_{cd}^- = -L \frac{di_d^-}{dt} + Ri_d^- + \omega Li_q^- + u_d^- \\ \dot{u}_{cq}^- = -L \frac{di_q^-}{dt} + Ri_q^- + \omega Li_d^- + u_q^- \end{cases} \quad (10)$$

进而得到负序控制器的表达式:

$$\begin{cases} u_{cd}^- = u_d^- (K_p + \frac{K_i}{s}) (i_{dref}^- - i_d^-) - \omega Li_q^- \\ u_{cq}^- = u_q^- (K_p + \frac{K_i}{s}) (i_{qref}^- - i_q^-) - \omega Li_d^- \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: i_{dref}^-, i_{qref}^- 分别为 d 轴、 q 轴上负序电流参考值。

根据式(11)得到负序电流控制器,最后得到的负序参考控制量再与正序控制量合成得到换流器的控制信号,控制策略如图4所示。

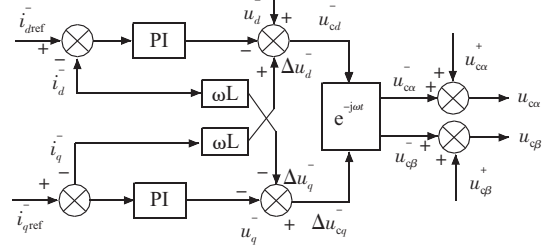


图4 负序电流控制控制器

为了抑制不对称故障引起的负序电流分量,通常是控制负序电流为0,即控制信号直接设置 $i_{dref}^- = i_{qref}^- = 0$ 。由图4可以看出,换流站的控制系统由相对独立的正序控制和负序控制组合而成,换流站的控制信号也是由正负序控制信号矢量叠加得到。因此,电网中发生不对称故障时,可以通过正负序分离后单独控制,抑制负序电流,保护换流器的安全。

3 仿真验证

基于以上建立的数学模型和提出的控制策略,用PSCAD/EMTDC仿真软件建立的海上风电场柔性直流输电系统仿真模型如图1所示。海上风电场有100台2 MW双馈风机组成,为了简化仿真模型,用一台额定电压13.8 kV、额定功率200 MW的双馈风机代替,经过13.8 kV/62.5 kV升压变压器与整流器相联,再经过100 km的海底电缆连接岸上换流站,换流器逆变后并入电网。柔性直流输电系统额定直流电压设定在 ± 60 kV,换流电抗器 $L_1 = L_2 = 12$ mH,等效电感 $R_1 = R_2 = 0.2 \Omega$,直流侧电容 $2C_1 = 2C_2 = 2000 \mu F$,SVPWM触发频率设定在5 kHz。

3.1 正常情况下送电并网控制

为了验证在风电场出力变化情况下的系统控制情况,在 0.5 s 后系统稳定后,设置 1 s 时风电场并网运行,此时风速 9 m/s,并在 4 s 时跃变到 12 m/s,仿真结果如图 5—7 所示。

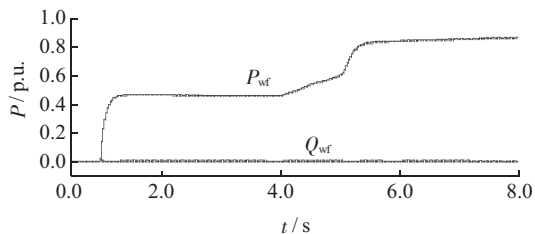


图 5 等效风电场的输出功率

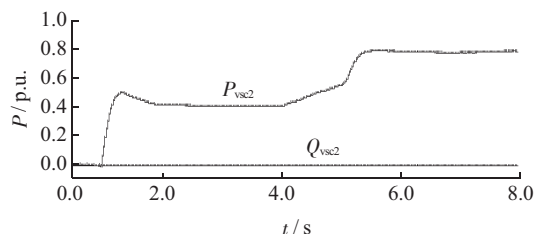


图 6 通过换流站并入电网功率

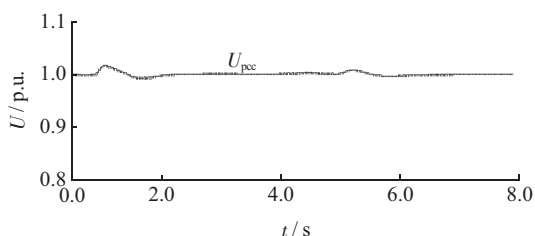


图 7 风电场汇流母线电压

从图 5—7 可以看出,整个柔性直流输电系统能保证整个系统的电压的稳定和功率平衡,将海上风电场发出的功率输送到电网中。

3.2 电网不对称故障负序电流控制

在发生在电网的故障中,单相接地故障占到绝大多数。当交流侧电网在 2 s 时发生单相短路,持续时间 0.1 s,仿真结果如图 8—11 所示。

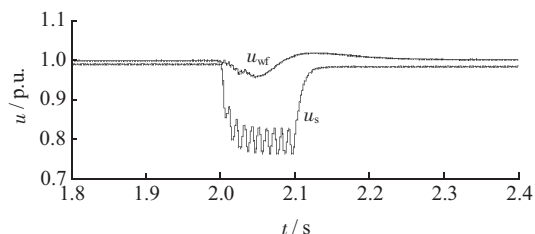


图 8 风电场/交流电网交流电压

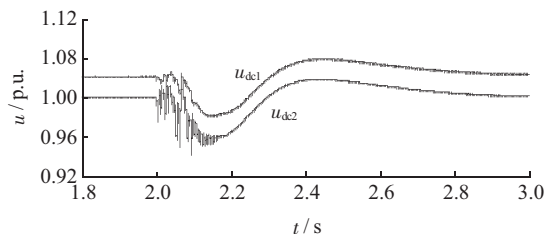


图 9 直流线路两端直流电压

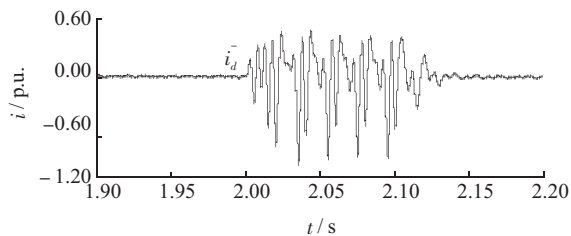


图 10 单相故障负序电流 d 轴分量

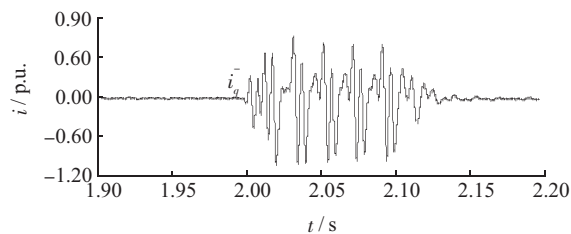


图 11 单相故障负序电流 q 轴分量

图 8—11 中, u_{wf} 为风电场母线电压, u_s 为交流侧电网电压 u_{dc1} 为风电场侧直流电压, u_{dc2} 为岸上换流站侧电流电压。从图 8—11 可以看出,交流电网中发生单相短路时,对岸上换流站的影响较大,而海上风电场汇流母线电压由于直流线路电压波动发生轻微的波动,可见整个柔性直流输电系统对风电场起到保护的作用,海上风电机组可以正常运行。故障期间的电网侧出现了负序电流,对换流站危害较大。采用本文提出的负序电流控制策略,抑制负序电流,仿真结果如图 12—16 所示。

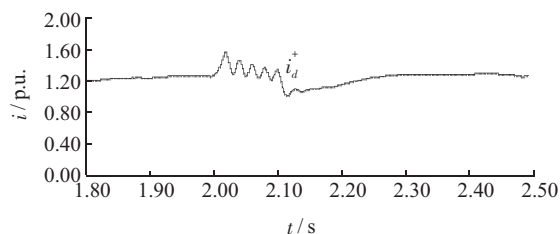


图 12 正序电流 d 轴分量

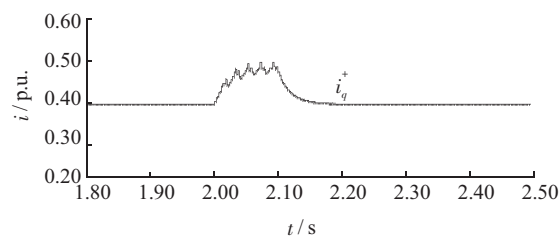


图 13 正序电流 q 轴分量

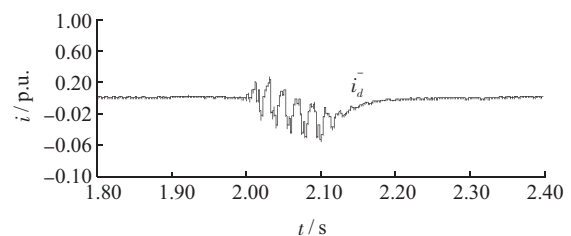


图 14 负序电流 d 轴分量

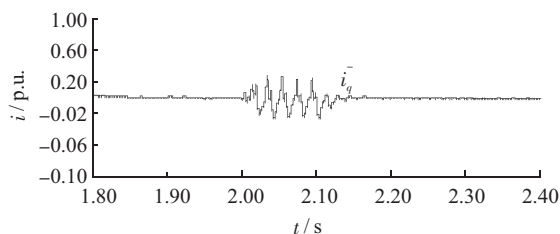
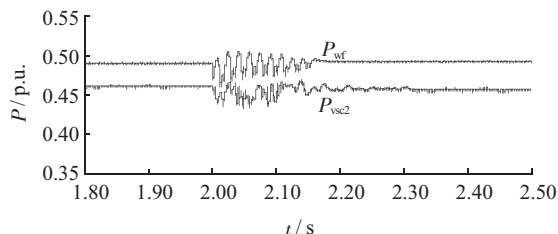
图 15 负序电流 q 轴分量

图 16 风电场发出与并入电网功率

从图 12—16 中可以看出,采用加入负序电流控制环的控制策略后,正序电流在短路故障期间有轻微的波动,负序电流故障期间控制在 0.02 p.u. 内波动,得到了很好地抑制,实现了控制负序电流控制目标。电网侧换流站功率波动也得到较好的平抑。

4 结束语

本文对大型海上风电场通过柔性直流输电系统并网控制进行了分析研究。针对电网侧发生不对称故障,采用延时法对正负序分量进行分解,提出了负序电流控制策略,抑制不对称故障时产生的负序分量。结果表明:柔性直流输电系统能将风电场发出功率输送到电网中,保持功率的平衡。在电网故障期间能很好的隔离故障,本文所提负序电流控制策略能较好地抑制产生的负序分量。

参考文献:

- [1] 张乐丰,王增平. 风电并网对电力系统的影响[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(2): 81-84.
- [2] MONTILLA-DJESUS M E, SANTOS-MARTIN D, AMALATES S, et al. Optimal Operation of Offshore Wind Farms with Line-

Commutated HVDC Link Connection [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 504-513.

- [3] 胡兆庆,毛承雄,陆继明,等. 一种新型的直流输电技术—HVDC Light [J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 12-16.
- [4] 陈 锋,刘连永,董余凡. 大规模海上风电场并网接入方式[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(3): 81-84.
- [5] 张 兴,季建强,张崇巍,等. 基于内模控制的三相电压型 PWM 整流器不平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 51-56.
- [6] 李 响,韩民晓. 海上风电串联多端 VSC-HVDC 协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 42-48.
- [7] ENJETI P N, CHOUDHURY S A. A new Control Strategy to Improve the Performance of a PWM AC to DC Converter Under Unbalanced Operating Conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 04(8): 493-500.
- [8] RIOUAL P, POULIQUEN H, LOUIS J. Regulation of a PWM Rectifier in the Unbalanced Network State Using a Generalized Model [J]. IEEE Transactions on Power Electronics. 1996, 11(3): 495-502.
- [9] XU L, CARTWRIGHT P. Control of VSC Transmission Systems Under Unbalance Network Conditions [C]. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 (2): 626-632.
- [10] 皇甫成,贺之渊,杨广福,等. 交流电网不平衡情况下电压源换相直流输电系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 144-151.
- [11] 任 亮,汤钰鹏,郑 丹,等. 基于网侧功率平衡的电网不对称时三相 VSR 控制方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(11): 86-87.
- [12] 刘 菁,顾黎强. 交流系统故障时柔性直流系统的控制策略[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 136-140.
- [13] 石 磊,李晨晨,田 炜,等. 海上风电场柔性送电并网控制研究[J]. 华东电力, 2014, 42(4): 674-679.

作者简介:

张广明(1963),男,江苏丰县人,高级工程师,从事电力系统及其自动化、海上风力发电相关技术研究工作;

田 炜(1978),男,湖北孝感人,高级工程师,从事海上风力发电控制、电机控制技术研究工作。

Negative Current Control of VSC-HVDC for Offshore Wind Farm Under Grid Asymmetrical Fault

ZHANG Guangming, TIAN Wei

(NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Offshore wind farms are always connected to the power grid through VSC-HVDC. In this paper, the mathematical model and control strategy of VSC-HVDC system are studied. For an asymmetric fault, delay method is used to obtain the positive and negative sequence currents. Hence, with the sequence currents, a control strategy for damping negative current is proposed. Simulations have been implemented in PSCAD, and the results show that the proposed strategy is effective in damping negative current.

Key words: offshore wind farms; VSC-HVDC; asymmetrical fault; negative current

基于智能理论的高压断路器机械故障诊断

田涛¹, 陈昊^{1,2}, 张建忠², 李子吉¹, 张明¹, 王斌¹, 杭俊²

(1. 江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:文中对高压断路器机械故障诊断方法进行了研究,通过监测高压断路器合闸操作振动信号,提出了一种基于小波分解和支持向量机(SVM)的机械故障智能诊断方法。首先利用小波分解对振动信号进行分解,然后提取出振动信号的低频和高频重构信号的能量并将其作为特征量,最后利用 SVM 实现高压断路器机械故障的分类。为了验证提出的方法,搭建了高压断路器机械故障诊断软硬件平台,并对现场的高压断路器进行了实验研究。实验结果表明,该方法能有效地完成高压断路器机械故障的诊断。

关键词:高压断路器;机械故障;故障诊断;小波分解;SVM

中图分类号:TM561

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0012-04

高压断路器是电力系统中重要的电力设备^[1-4],当电力系统出现短路等异常情况时,断路器的拒动、误动、慢动和三相不同期性等机械故障都可能造成恶性事故,甚至可以引起设备爆炸。国内外大量调查数据表明,机械故障是高压断路器的主要故障,因此对高压断路器运行中出现的机械故障及时进行诊断显得十分重要,进行高压断路器机械故障的诊断研究具有巨大的经济效益和社会效益^[5-14]。断路器操作时发出的机械振动信号是一个包含丰富信息的载体,它含有大量的设备状态信息^[6,7]。高压断路器是一种瞬动式的机械,在动作时,具有高强度冲击、高速的特点,这样强烈的冲击振动在传感器测量上比较容易实现,因此通过测量振动信号就可以进行断路器的故障诊断。目前,振动信号检测成为高压断路器机械状态监测和诊断最有前途的方法之一。

1 系统框架和配置

选用高压断路器的合闸振动信号作为监测对象,设计了高压断路器机械故障诊断系统,其结构框图如图1所示。采用加速度传感器获取断路器合闸动作过程中的振动信号,用 MP4221 数据采集卡对信号进行采集后再送入计算机进行信号处理和故障模式识别。

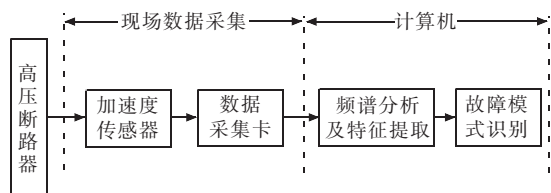


图1 系统结构框图

采用朗斯传感器技术研发有限公司的 LC0155T 加速度传感器。在传感器的安装过程中将传感器安装在关键部件(故障率高、重复性高)的振动源附近,满足

收稿日期:2014-05-19;修回日期:2014-07-24

故障反应清晰、所受干扰小、便于安装、信号传输可靠、稳定性好等要求。本文最终选择传感器的安装位置如图2所示,该构件位于连接液压操作机构和灭弧室支柱的支撑面上。采用的数据采集卡为北京双诺公司的 MP4221 数据采集卡。MP4221 是一款 USB2.0 总线多功能 12 位高速采集模块,具有 8 路模拟输入、开关量 16 路输入/16 路输出、二路 24 位减法计数器。



图2 加速度传感器的安装位置

2 故障诊断方法

通过对高压断路器的振动信号进行分析,可以提取出高压断路器的状态特征。小波分析是一种很好的时频分析方法,在时域和频率同时具有良好的局部化特性,它可以很好地展现信号的细节信息,并且利用小波分解可以很好地提取出故障特征量^[8]。在故障类型识别中,常用的智能方法是人工神经网络^[8,11,13]。此方法具有较强的自学习、非线性模式识别能力,但其本身存在着一些无法克服的缺点:如网络中的结构选择和权重的初值设定需要借助于经验、网络训练速度慢、易陷入局部极小值点、过学习等。支持向量机(SVM)是近年来出现的一种新型方法^[15]。它是建立在统计学习理论和结构风险最小原理的基础上,比起传统基于风险最小的人工神经网络,具有很多优点,能有效地克服人工神经网络的不足。其中很重要的一个优点就是小样本学习,特别适合高压断路器等样本少,不能反复操作以提取测试样本的设备诊断。

基于此,本文提出了一种基于小波分析和支持向量机的高压断路器机械故障的智能诊断方法,即利用离散小波分解来提取能量分布并作为故障特征量,然后利用支持向量机来完成机械故障的分类诊断。高压断路器机械故障诊断的流程如图3所示。其具体内容为:(1)建立样本断路器振动数据库,所述数据库包括无故障时的断路器振动数据和存在机械故障时候断路器振动数据;(2)采集目标断路器的振动信号,并对其进行如下处理:首先利用离散小波分解对振动信号分解提取故障特征,最后对故障特征进行归一化处理来提取故障特征向量;(3)将得到的故障特征向量输入到训练好的支持向量机进行故障识别,实现故障诊断。

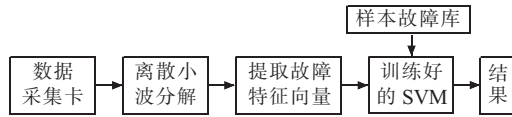


图3 故障诊断步骤

2.1 离散小波分解

小波变换属于一种多分辨率的时频分析方法,为非平稳信号的分析提供了一个有价值的工具。实际应用中常使用简单方便的二进离散小波变换。从多分辨率分析的角度上看,小波分解相当于一个高通滤波器和一个低通滤波器,每次分解总是把原信号分解成2个子信号,分别称为逼近信号和细节信号,如此分解 n 次即可得到第 n 层的小波分解结果,如图4所示。因此,一个信号 $x(t)$ 经过离散小波分解后可以表示为:

$$x(t) = a_n + d_n + \dots + d_1 \quad (1)$$

式(1)中: $d_1, d_2, \dots, d_n$ 分别为第1层到第 n 层共 n 个高频小波重构序列; a_n 为第 n 层低频小波重构序列。

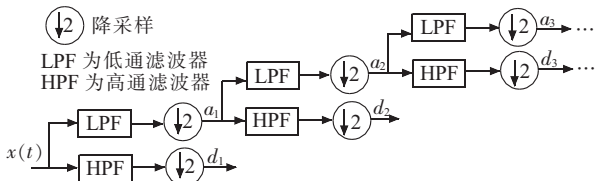


图4 离散小波分解

2.2 提取故障特征向量

当断路器出现故障时,会对各频带内的采样点能量有较大的影响,故以能量为元素构造特征向量。设 E_j^* 为小波重构序列的能量,其表示为:

$$E_j^* = \sum_{k=1}^N |d_j^k|^2 \quad j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

式(2)中: N 为信号点数; d_j^k 为第 j 层高频小波重构序列的第 k 个分量; n 为序列 d_j 中分量的个数。用 E_0^* 表示第 n 层低频小波重构序列 a_n 的能量,则:

$$E_0^* = \sum_{k=1}^N |a_n^k|^2 \quad (3)$$

式(3)中: a_n^k 为第 n 层低频小波重构序列的第 k 个分量。

设对样本进行 n 层小波分解的各频段的能量值为 $E^*=(E_0^*, E_1^*, E_2^*, \dots, E_n^*)$,将该向量进行归一化处理即可得到特征向量为:

$$E^* = (E_0^*/\sum, E_1^*/\sum, E_2^*/\sum, \dots, E_n^*/\sum) = (E_0, E_1, E_2, \dots, E_n) \quad (4)$$

式(4)中: $\sum = E_0^* + E_1^* + E_2^* + \dots + E_n^*$ 。

2.3 支持向量机

SVM是实现结构风险最小化原则的一种通用学习算法,比较适合于小样本数据的分类,其基本思想如图5所示。图中方点和圆点分别表示2类训练样本, H 为把2类样本完全无误分开的分类线, H_1, H_2 分别为通过样本中离分类线最近的样本且平行于分类线的直线,他们之间的间隔为分类间隔,线上的样本点就是支持向量。该最优面不但将2类样本无误地分开,而且要使分类间隔最大,前者保证经验风险最小,后者使问题的真实风险最小。

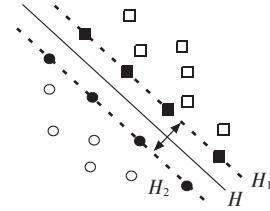


图5 SVM两类分类

假设训练样本集为:

$$(x_1, y_1) \dots (x_i, y_i) \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

式(5)中: $x_i \in R^l$ 为样本输入; l 为输入空间的维数; $y_i \in \{-1, 1\}$ 为样本输出。假设 φ 是将原始空间映射到高维特征空间的非线性映射。

在特征空间中利用结构风险最小化原理和分类间隔最大化思想,求最优分类超平面问题转化为下面的最优化问题:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } \varphi(\omega, \varepsilon) &= \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_i u_i \varepsilon_i \\ \text{Subject to } & y_i[(\omega \cdot x_i) + b] \geq 1 - \varepsilon_i \\ & \varepsilon_i \geq 0 \quad i=1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中: ω, b 分别为分类超平面的权值和偏置; ε_i 为非负松弛变量; $C>0$ 为惩罚系数,是为了保持分类最大间隔和分类误差之间的平衡。

为求解上述约束最优化问题,引入Lagrange函数:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \\ & \sum_{i=1}^n a_i [y_i(x_i \cdot \omega + b) - 1 + \varepsilon_i] - \beta_i \varepsilon_i \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中: $a_i \geq 0, \beta_i \geq 0$ 是 Lagrange 系数。

将 L 分别对 ω, b, ε_i 求偏微并令其等于 0, 就可以把最优化问题式(7)转化为等价的对偶规划问题:

Maximize

$$W(\alpha) = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j y_i y_j K(x_i, x_j)$$

Subject to $\sum_{i=1}^n a_i y_i = 0$

$$0 \leq a_i \leq C \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式(8)中: $K(x_i, x_j) = (\varphi(x_i), \varphi(x_j))$ 为核函数。

通过求解最优化问题, 得到最优决策函数为:

$$f(x) = \text{sgn}((\omega \cdot x) + b) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^n y_i a_i K(x_i, x) + b\right) \quad (9)$$

式(9)中: a_i, ω 和 b 为优化问题的最优解。

3 故障诊断平台

根据故障诊断流程, 开发了基于 LabVIEW 和 MATLAB 的合闸振动信号高压断路器机械故障诊断平台。将 LabVIEW 虚拟仪器开发平台良好的用户图形界面和 MATLAB 软件强大的数值分析功能相结合^[16,17], 利用 LabVIEW 调用 MATLAB 实现高压断路器机械故障分析的方法, 如图 6 所示。



(a) 正常情况下的操作界面



(b) 故障情况下的操作界面

图 6 操作界面

图 6(a) 中, 计算机操作界面上设置了“复位”按钮、“采集数据”按钮、“采样频率”输入量、“采样时间”输入控制量以及采样“量程”选择控制量。另外使用一个图表窗口来显示采集信号的波形, 同时使用输出文本框和弹出对话框来说明“故障类型”。“采样频率”输入控制量可以设置振动信号的采样频率, 这个量需要与 MATLAB 中的程序相对应, 本文中设置的采样频率为 50 kHz。“采样时间”输入控制量可以设置采集振

动信号的时间, 这个量与“采样频率”相结合, 可以得到采集信号的点数, 便于 MATLAB 程序的数据处理。采样“量程”选择控制量设置了 3 个选择量程, 根据不同的实验对象以及传感器的量程选择相应的采样量程, 这里默认量程选择为 $-5 \sim 5V$ 。实验过程中根据采集到的振动信号, 程序会自动判断是何种故障类型, 并文本输入同时弹出对话框。当测得的合闸信号是在断路器故障(底座松动)工作的情况下时, 则输出如图 6(b) 所示的界面。

4 实验研究

为验证本文提出的方法, 搭建了实验平台, 如图 7 所示。以高性能加速度传感器测量合闸过程中的振动信号, 在故障信号采集的实验中, 通过人为的设置故障类型, 来采集相应故障类型下的合闸振动信号。由于实验条件的限制, 主要研究了无故障和断路器底座松动故障 2 种情况。利用设计的数据采集系统采集合闸振动信号, 数据采集系统在断路器动作时以 50 kHz 的速率进行 150 ms 时长的数据采集。



(a) SF₆ 高压断路器



(b) 实验设备

图 7 实验平台

首先利用离散小波分解对采集数据进行分解, 然后得到重构信号, 并计算出重构信号的能量分布。最后将每种状态的 9 组数据, 6 组数据用于训练 SVM, 另外 3 组用于测试训练好的 SVM, 验证算法的诊断效果。其诊断结果如表 1 所示。

表 1 故障诊断结果

状态	训练样本		测试样本	
	训练数	正确分类数	测试数	正确分类数
无故障	6	6	3	3
底座松动	6	6	3	3

从表1可看出,利用本文提出的方法,可以有效地诊断出高压断路器的机械故障。

5 结束语

通过监测合闸振动信号,本文对高压断路器机械故障诊断展开了研究,提出了故障诊断系统的框架和配置,研究了故障诊断的算法并开发了基于Labview和MATLAB软件的故障诊断软件平台,最后完成了实验验证测试。通过本文工作,可以得到如下结论:(1)利用离散小波分解处理高压断路器合闸过程的振动信号,可提取出故障特征向量。(2)将SVM应用到高压断路器的故障诊断中,显现出SVM在小样本问题中强大的推广能力,适合于故障样本获得困难的高压断路器的故障诊断,能快速有效地识别出故障。

参考文献:

- [1] 吉亚明,周志成,马 勇,等.真空断路器投切并联电抗器过电压故障分析[J].江苏电机工程,2014,33(2):12-14.
- [2] 李 晔,朱 江,吴 玲.基于综合自动化系统的断路器遥控操作分析[J].江苏电机工程,2013,32(2):46-48,52.
- [3] 薛 峰,童勤毅,谢夏寅,等.断路器跳闸脉冲监测系统的研制与应用[J].江苏电机工程,2012,31(4):58-62.
- [4] 朱 江,董余凡,李 晔.“六统一”设计下的双母线方式断路器失灵保护运行分析[J].江苏电机工程,2012,31(6):71-74.
- [5] 陈 昊.隔离开关闭锁回路电子档案构建及应用[J].中国电力,2012,45(7):20-23.
- [6] 胡晓光,王建赟,刘桂芝,等.基于振动信号高压断路器故障诊断的仿真研究[J].哈尔滨工业大学学报,2001,33(4):530-533.
- [7] 赵 洋,刘汉宇,曾庆军.基于机械振动信号的高压真空断路器故障诊断的研究[J].高压电器,2010,46(2):46-51.
- [8] 陈伟根,范海炉,王有元,等.基于小波能量与神经网络的断路器振动信号识别方法[J].电力自动化设备,2008,28(2):29-32.
- [9] 王振浩,杜凌艳,李国庆,等.动态时间规整算法诊断高压断路器故障[J].高电压技术,2006,32(10):36-38.
- [10] 荣亚君,葛葆华,赵 杰,等.用粗糙集理论和贝叶斯网络诊断SF₆断路器故障[J].高电压技术,2009,35(12):2995-2999.
- [11] 徐建源,张 彬,林 莘,等.能谱熵向量法及粒子群优化的RBF神经网络在高压断路器机械故障诊断中的应用[J].高电压技术,2012,38(6):1299-1306.
- [12] 吴振升,王 玮,杨学昌,等.基于分形理论的高压断路器机械振动信号处理[J].高电压技术,2005,31(6):19-21.
- [13] 郭凤仪,马文龙,李 斌.RBF神经网络在断路器故障诊断中的应用[J].传感器与微系统,2010,29(9):128-130.
- [14] 关永刚,黄瑜琰,钱家骊.基于振动信号的高压断路器机械故障诊断[J].高电压技术,2000,26(3):66-68.
- [15] 克里斯特安尼.支持向量机导论[M].李国正,王 猛,曾华军,译.北京:电子工业出版社,2004:82-83.
- [16] 徐 明,于业明.LabVIEW中MATLAB的调用[J].山东理工大学学报(自然科学版),2005,19(4):92-95.
- [17] 徐 何,李 滔,李 勇.MATLAN与LabVIEW混合编程方法应用研究[J].科学技术与工程,2010,10(33):8267-8271.

作者简介:

田 涛(1972),男,江苏南京人,高级工程师,从事高压电网变电检修的工作;
陈 昊(1980),男,江苏南京人,高级工程师,从事高压电网变电检修的工作;
张建忠(1970),男,江苏张家港人,博士生导师,从事新能源发电与分布式电源、智能电力设备研究工作;
李子吉(1961),男,江苏南京人,高级技师,从事高压电网变电检修的工作;
张 明(1979),男,江苏南京人,工程师,从事高压电网变电检修的工作;
王 斌(1970),男,江苏南京人,助理工程师,从事高压电网变电检修的工作;
杭 俊(1987),男,安徽六安人,博士研究生,从事状态监测和故障诊断研究工作。

Mechanical Fault Diagnosis of High Voltage Circuit Breaker Based on Intelligent Theory

TIAN Tao¹, CHEN Hao^{1,2}, ZHANG Jianzhong², LI Zijl¹, ZHANG Ming¹, WANG Bin¹, HANG Jun²

(1. Jiangsu Electric Power Maintenance Brach Company, Nanjing 211102, China;

2. School of Electric Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Research on the mechanical fault diagnosis of high voltage breakers is carried out in this paper. By monitoring the vibration signal of high voltage circuit breakers at the instant of closing operation, an intelligent diagnosis method for mechanical faults with wavelet decomposition and support vector machine is proposed. Firstly, wavelet decomposition is used to decompose the vibration signal, and then the reconstruction signal energy of low frequency and high frequency signals is extracted from the vibration signal and selected as the fault indicator. Finally, the mechanical faults of high voltage breakers is classified by using support vector machine. In order to validate the proposed method, the hardware and software of mechanical fault diagnosis system for high voltage breakers has been built, and the experiments on high voltage circuit breaker have been implemented. The experimental results show that the proposed method can effectively diagnose mechanical failure of high voltage circuit breaker.

Key words: high voltage breaker; mechanical fault; fault diagnosis; wavelet decomposition; support vector machine

一起变压器低压绕组介损及电容量异常分析

赵 胤, 李华丹, 董典帅
(无锡供电公司, 江苏 无锡 214072)

摘 要:变压器试验中, 本体电容量及 $\tan\delta$ 为变压器状态判别的重要参考量。文中针对某 110 kV 主变由于铁心接地不良引起低压绕组电容量及 $\tan\delta$ 超标的案例, 通过建立变压器绝缘等效电容图, 计算分析了产生异常数据的原因。说明根据变压器绝缘等效电容图进行理论计算, 可以较准确地分析变压器线圈电容量超标原因, 为排查缺陷提供依据。最后对比了该变压器铁心接地良好与接地不良条件下频率响应曲线, 曲线差异明显, 该试验结果对判别铁心接地状况有一定的启发意义。

关键词: 变压器; 铁心; 电容量; 介质损耗; 频响曲线; 绝缘等效电容图

中图分类号: TM406

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)06-0016-04

变压器电容量与介质损耗正切角 $\tan\delta$ 的测试值可以灵敏地发现油浸式电力变压器整体是否受潮、油或纸绝缘是否劣化, 并可以作为判别变压器绕组是否变形的辅助手段。查找变压器电容量与介质损耗正切角数据超标原因, 需要依据变压器自身结构、试验历史数据、变压器等值电路参数、变压器油色谱等进行综合判断。依据变压器绝缘等效电容图进行理论计算, 可以较准确的查明缺陷的大致部位, 为排除隐患提供理论依据。本文针对某 110 kV 主变低压绕组电容量与 $\tan\delta$ 超标, 依据该变压器绝缘等效电容图进行理论计算、并结合现场试验, 成功查明数据超标原因为变压器铁心接地不良。

1 主变试验过程及试验数据

2013 年 10 月, 对某变电所 110 kV 主变进行例行性试验。型号 SFSZ8-50000/110, 额定电压 $110\pm 3\times 2.5\%/38.5\pm 5\%/10.5$ kV, 额定电流 264.2/749.8/2749 A, 连接组别 YN, yn0, d11。试验时环境温度 23℃, 环境湿度 70%, 主变上层油温 35℃, 有载调压开关在第一档位, 中压无载调压开关在第三档位, 拆除主变各侧连接导线后, 按照频响法测绕组变形、直流电阻、低电压短路阻抗、绝缘电阻、介损及电容量测试的项目顺序进行试验, 异常数据如表 1 所示。

表 1 某 110 kV 主变介损及电容量试验异常数据

测试部位	1993-09 交接数据		2013-10 例行试验数据		
	$\tan\delta/\%$	C_x/pF	$\tan\delta/\%$	C_x/pF	$\Delta C/\%$
高一中低地	0.3	11 466.5	0.32	11 680	1.86
中—高低地	0.3	17 816.6	0.28	18 180	2.04
低—高中地	0.4	18 211.3	5.04	17 160	-5.77

表 1 中, $\Delta C\%$ 为 2013 年 10 月与 1993 年 9 月电容量相比的偏差百分数。低—高中绕组及地电容量为 17 160 pF 与原始数据偏差为 -5.77%, 低—高中绕组

及地介质损耗为 5.04%, 根据江苏省电力公司《输变电设备交接与状态检修试验规程》等标准的要求, 低—高中地绕组介损和电容量数据不合格 (规程值电容量与初始值偏差警示值为 $\pm 5\%$, 介损警示值为 0.8%)。

2 试验现场故障查找过程

现场更换试验电桥, 重新测量, “低—高中绕组及地”介损和电容量测试值无明显变化, 由此可排除仪器影响因素。由于该主变“低—高中绕组及地”电容量与原始数据对比减小明显, 因此可知测试回路中有额外的电容串入。本试验“高一—中低地”、“中—高低地”的试验数据正常, 因此重点怀疑低压与铁心间的绝缘存在问题。

变压器中影响低压线圈介损及电容量的部位和部件, 主要是低压线圈与中压线圈及铁心间的绝缘结构, 由此在现场增加了“铁心—地”、“低压—中压绕组”、“低压绕组—铁心”的电容量与介质损耗测量, 其测试结果如表 2 所示。

表 2 铁心相关部位介损及电容量测试数据

试验部位	试验接线方法	$\tan\delta/\%$	C_x/pF
铁心—地	反接线, 铁心加压 500V, 高、中、低压线圈接屏蔽	5.3	24 720
低压绕组—中压绕组	正接线, 低压加压 10 kV, 中压接信号线, 高压、铁心接地	0.21	8036
低压绕组—铁心	正接线, 低压加压 10 kV, 铁芯接信号线, 高、中压接地	-0.76	7681

由表 2 可见“低压绕组—中压绕组”数据正常; “铁心—地”介质损耗数据偏大; “低压绕组—铁心”介质损耗数据异常, 这 2 个数据均与铁心有关。所以重点对铁心回路进行排查, 并最终发现了数据异常原因。试验人员分别使用万用表、2500 V 兆欧表对接地引下线与变压器外壳间进行测量, 发现万用表测试数据为 600

kΩ, 而用 2500 V 兆欧表测量其对外壳的绝缘电阻是 0.3 MΩ, 由于变压器外壳接地良好, 由此可知变压器铁心接地引下线接地不良。通过现场开挖, 发现该变压器接地引下线埋在鹅卵石下的部分已经锈断。

将该变压器铁心正确接地后, 重新进行变压器常规试验, 其全部试验数据合格, 其中整体电容量与介质损耗数据如表 3 所示。

表 3 铁心正确接地后的整体电容量与介质损耗测试数据

试验日期	1993-09(交接)	2013-10 例行试验数据			
测试参数	tg δ/%	C _x /pF	tg δ/%	C _x /pF	ΔC/%
高—中低地	0.3	11 466.5	0.32	11 680	1.86
中—高低地	0.3	17 816.6	0.28	18 140	1.82
低—高中地	0.4	18 211.3	0.44	18 580	2.02

表 3 中 ΔC% 为 2013 年 10 月与 1993 年 9 月电容量相比的偏差百分数。对比表 1 和表 3 可知, “低—高中绕组及地”的数据合格, “高—中低绕组及地”的数据无显著变化, “中—高低绕组及地”只有电容量小了 40 pF, 即说明在本例中, 在进行介损及电容量试验时铁心是否接地对低压线圈的影响是巨大的, 而对高中压线圈影响微小。

3 应用等效图分析数据异常原因

根据该主变结构, 进行绝缘试验时主变各主要部件间绝缘的等效电容图如图 1 所示^[1]。

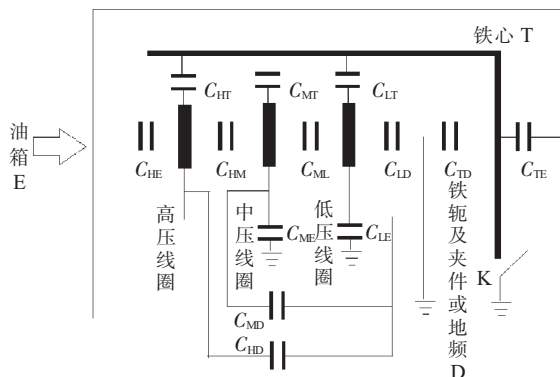


图 1 某 110 kV 变压器主绝缘等效电容图(忽略电阻)

图 1 中, C_{HE} 为高压绕组对箱体电容; C_{HT} 为高压绕组对铁心电容; C_{HM} 为高压绕组对低压绕组电容; C_{HD} 为高压绕组对铁轭及夹件或接地地屏 D 电容; 中、低压绕组相关部位电容量命名原则与此一致; C_{TE} 为铁心对箱体电容; C_{TD} 为铁心对铁轭等接地部件电容; K 为铁心接地引下线示意虚拟开关(K“合位”则铁心接地良好, K“分位”则铁心接地不良)。

图 1 中地屏 D 是某些变压器为了屏蔽铁心的棱角, 在其外用金属带将其包裹, 以达到均匀电场的目的, 该金属带应与铁心或夹件连接接地^[2]。本文中该 110 kV 变压器虽然没有地屏, 只有铁心引出接地, 说

明夹件与铁轭都是在变压器内接地, 因此三侧线圈和铁心对接地部件间均存在电容回路。当铁心接地时(开关 K 合位), C_{TD} 被短接; 当铁心失去接地时(开关 K 分开), 铁心处于悬浮电位, 同时 C_{TD} 有可能参与到测试回路中。根据图 1 将表 1、表 2、表 3 的有关数据进行整理, 如表 4 所示。

表 4 电容及介损试验实际测试回路表

序号	试验部位	tg δ/%	C _x /pF	等效电容组合
1	高—中低地	0.32	11 680	$C_{HM}+C_{HE}+C_{HD}+(C_{HT} \text{ 串 } (C_{TD}+C_{TE}))$
2	高—中低地	0.32	11 680	$C_{HM}+C_{HE}+C_{HD}+C_{HT}$
3	中—高低地	0.28	18 180	$C_{HM}+C_{ML}+C_{MD}+C_{ME}+(C_{MT} \text{ 串 } (C_{TD}+C_{TE}))$
4	中—高低地	0.28	18 140	$C_{HM}+C_{ML}+C_{MD}+C_{ME}+C_{MT}$
5	低—高中地	5.04	17 160	$C_{ML}+C_{LD}+C_{LE}+(C_{LT} \text{ 串 } (C_{TD}+C_{TE}))$
6	低—高中地	0.44	18 580	$C_{ML}+C_{LD}+C_{LT}+C_{LE}$
7	铁心—地	5.3	24 720	$C_{TD}+C_{TE}$ (一般 $C_{TD} \gg C_{TE}$)
8	低压—中压	0.21	8036	C_{ML}
9	低压—铁心	-0.76	7681	C_{LT}

表 4 中序号 1, 3, 5 为铁心未接地时(即开关 K 断开)的测试数据, 序号 2, 4, 6 为铁心接地时(即开关 K 合上)的测试数据。在 K 分、合 2 种情况下, 由表 4 中序号 7 的数据可知铁心对地电容量有 24 720 pF。将序号 1 和序号 2 对应的电容量及等效电容组合分别相减, 可得 $C_{HT} - [C_{HT} \text{ 串 } (C_{TD}+C_{TE})] = 0$, 即铁心对地电容量, ($C_{TD}+C_{TE}$)和 C_{HT} 串联后的电容量与 C_{HT} 本身的电容量接近, 所以 C_{HT} 的电容值很小, 可推算出甚至接近于 0; 同理 C_{MT} 的电容量也很小; 所以 C_{HT} , C_{MT} 对各自线圈的总电容量测试值影响较小可忽略。依据介质串、并联介损公式, 由表 4 序号 5 至 8 联列介损和电容量关系方程组, 可解得:

$$C_{LT} = 6677 \text{ pF}, \quad \text{tg } \delta\% = -28.5\%;$$

$$C_{LT} \text{ 串 } (C_{TD}+C_{TE}) = 5257 \text{ pF}, \quad \text{tg } \delta\% = -21.3\%;$$

$$C_{ML}+C_{LD}+C_{LE} = 11 903 \text{ pF}, \quad \text{tg } \delta\% = 16.7\%;$$

$$C_{LD}+C_{LE} = 3867 \text{ pF}, \quad \text{tg } \delta\% = 50.7\%;$$

上述数据与序号 9 一起构成矛盾的结果, 经过分析可由以下几个因素导致:

(1) 铁心接地状况对三侧线圈电容的影响不同。其中 C_{HT} , C_{MT} 很小而 C_{LT} 较大, 这是因为铁心由低压线圈包围, 铁心与低压线圈之间距离较近, 其电容量较大; 当铁心不接地时该支路串入铁心对地的电容, 致使总电容减小; 而高中压线圈在低压线圈外侧, 辐向与铁心没有直接的电容联系, 因此其与铁心之间的联系主要在端部, 等效极板面积较小, 且距离较远, 其电容量较小, 铁心与地之间电容对该支路的影响可以忽略。

(2) 铁心接地状况对介损测量的影响。铁心接地不良时, 铁心会产生悬浮放电带来测量的不确定性; 铁心硅钢片间的绝缘漆附加电阻, 使测试电流经过铁心

后含有大量阻性分量,导致介损增大^[3];当铁心不接地时,接地部件的存在对低压线圈和铁心间测量回路带来的复杂影响,即采用集中参数是无法准确模拟分布参数形成的网络,例如 T 型网络可能会对正接线测量造成负介损的结果所以在不同的接线方式下测得的介损分散性很大。同样由于低压线圈与铁心联系较紧密,故其所受影响较大。在不同的接线方式下这几个因素的影响是不一样的。例如在测量低压线圈对铁心的介损时,分布网络和铁心损耗会起作用。因此在铁心不接地的情况下,测得的这些数据是无效的。

(3) 当铁心接地后(开关 K 合上),铁心与地屏等电位,则它们间的分布影响及悬浮放电就不存在了,此时的数据才能反映绝缘的实际情况。

从以上几个试验项目可见当铁心不接地时,铁心与接地部件间电容及铁心悬浮放电将会影响到部分试验项目的准确性。

4 铁心接地状况对试验数据的影响

为保证试验结果的正确性,在变压器铁心接地良好后,对先前完成的频响、直流电阻、低电压短路阻抗和绝缘电阻试验按照顺序重做一遍,发现频响和绝缘电阻与先前的结果有差异,而直流电阻和低电压短路阻抗由于与主绝缘容量关系不大,因此没有变化。

4.1 频率响应曲线测试

铁心接地前后的频率响应图如图 2—10 所示。

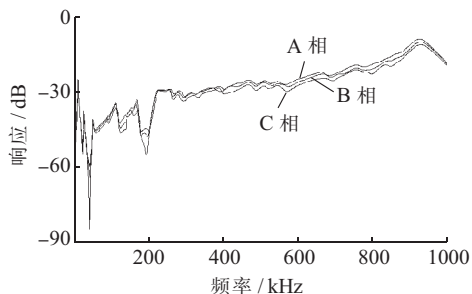


图 2 铁心未接地时高压三相频率响应图

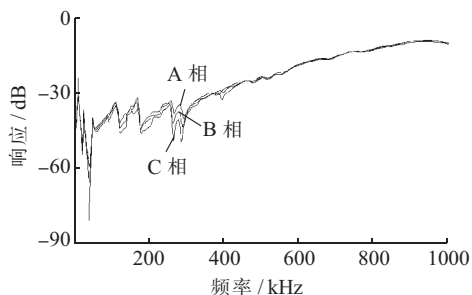


图 3 铁心接地时高压三相频率响应图

根据频响理论,在低频段主要反映感抗,在高频段主要反映容抗,而在中频段反映 2 者的综合作用,从 3 张对比图可清晰的在 200 kHz 以后当容抗作用逐渐增大时,铁心接地前后的频响曲线开始发生较大的分歧,

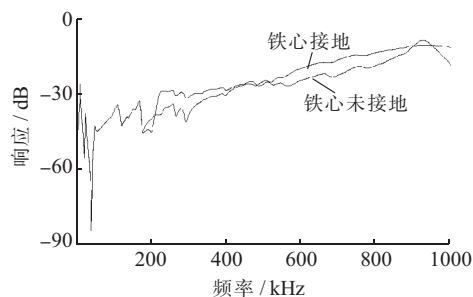


图 4 高压 A 相在铁心未接地及接地 2 种情况下频率响应对比图

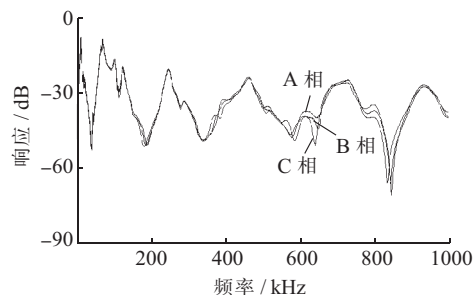


图 5 铁心未接地时中压三相频率响应图

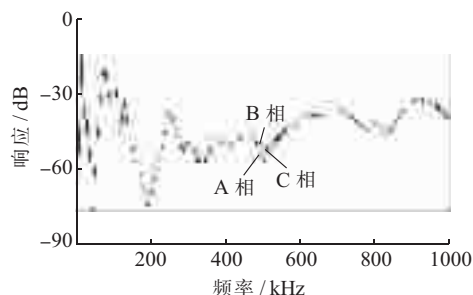


图 6 铁心接地时中压三相频率响应图

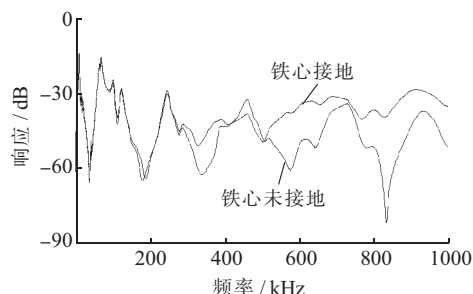


图 7 中压 A 相在铁心未接地及接地 2 种情况下频率响应图对比图

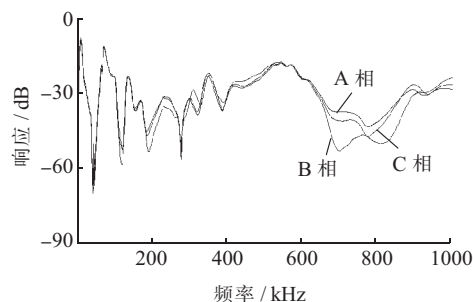


图 8 铁心未接地时低压三相频率响应图

即说明铁心接地是否可靠将通过电容效应的形式反映在频响曲线上。铁心接地状况对频率响应曲线的影响明显,通过本文的对比,可以给出如下启示:若同一台

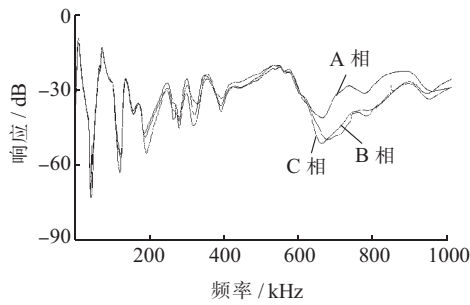


图9 铁心接地时低压三相频率响应图

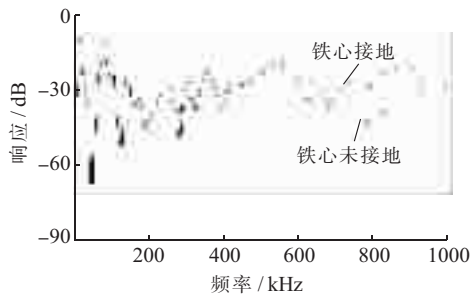


图10 低压ab相在铁心未接地及接地2种情况下频率响应对比图

主变三相频响曲线一致,而同历史数据相比有较大差别(排除试验仪器的影响),则可查找铁心的接地状况。

4.2 绝缘电阻

与介损及电容量试验类似,铁心接地情况主要是对“低—高中地”的绝缘电阻测试数据有影响,其原因为铁心不接地时低压线圈与铁心间的电容又串联了铁心对地的电容,使该支路的绝缘电阻增大,又由于铁心对接地部件支路较多,某些支路电容较小,导致吸收比减小^[4]。如表5所示。

5 结束语

从以上4个试验项目可见与电容量关系密切的所受影响较大,与电容量关系不大的则几乎不受影响。因此当铁心不接地时,铁心与接地部件间电容及铁心悬浮放电将会影响到部分试验项目的准确性。变压器电容量与介质损耗超标原因较为复杂,需要综合分析判

表5 绝缘电阻数据对比

铁心状态	未接地			接地		
	读取时间	$R_{15s}/M\Omega$	$R_{60s}/M\Omega$	吸收比	$R_{15s}/M\Omega$	$R_{60s}/M\Omega$
高一中 低地		14 000	21 000	1.50	14 000	21 000
中—高 低地		12 000	18 000	1.50	12 000	18 000
低—高 中地		12 000	16 000	1.33	6000	85 000
铁心—地		5000	5000	5000	5000	5000

断才能找出故障原因。通过变压器绝缘等效电容图模拟,并经过电容量与介质损耗理论计算,结合现场测试,查明某110 kV变压器“低—高中绕组及地”电容量与介质损耗数据超标原因为变压器铁心接地不良。

(1) 变压器等效电路理论计算法并结合现场测试,可以较准确地查找各种变压器电容量、介质损耗超标原因、缺陷部位,为电气试验提供理论依据;

(2) 测量了该变压器铁心接地良好与接地不良条件下频率响应曲线,曲线差异明显,该试验结果对判别变压器电容、介质损耗超标有一定的启发意义;

(3) 铁心接地不良影响电容量与介质损耗测试、频率响应测试、绝缘电阻,但对短路阻抗、直流电阻几乎无影响。

参考文献:

- [1] 丁伟,丁天祺. 变压器绕组电容量异常变化实例分析[J]. 变压器, 2012, 49(2): 71-74.
- [2] 杨星,朱建新. 变压器的等电位屏结构工艺特点及其故障特征分析[J]. 变压器, 2007, 44(1): 63-67.
- [3] 赵坚. 变压器绕组介损及电容异常分析[J]. 变压器, 2010, 33(1): 14-17.
- [4] 洪贞贤. 变压器铁心接地断线时绝缘水平的测量误差[J]. 广东输电与变电技术, 2006(2): 38-39.

作者简介:

赵胤(1977),男,江苏江阴人,工程师,从事电气试验工作;
李华丹(1976),男,江苏无锡人,技师,从事电气试验工作;
董典帅(1978),男,山东烟台人,工程师,从事电气试验工作。

Analysis on the Abnormal Condition of Transformer Low-voltage Winding Dielectric Loss and Electrical Capacity

ZHAO Yin, LI Huadan, DING Dianshuai

(Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214072, China)

Abstract: In transformer trials, the capacity and $\tan\delta$ are important references for determining the status of transformer. For studying the excessive low-voltage winding electrical capacity and $\tan\delta$ of a 10 kV transformer due to poor grounding, we established the transformer insulation equivalent capacitance map and analyzed the causes of abnormal data. The study shows that the calculation based on the transformer insulation equivalent capacitance map is accurate for analyzing the causes of excessive capacity, which provides the basis for the investigation of defects. Finally, the paper compared the transformer frequency response curves in the conditions of transformer well-grounded and poor-grounded and found that the two curves are significantly different. The test has some instructive meanings for future transformer grounding fault detection.

Key words: transformer; core; capacity; dielectric loss; frequency response curve; insulation equivalent capacitance map

500 kV 串联补偿装置自触发及主间隙放电分散性研究

林 敏¹, 李 杰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:500 kV 串联补偿装置火花间隙因干扰因素影响在低于整定值时会发生自触发,引起串补旁路。文中采用 ANSYS 软件建立了串联补偿装置主间隙三维空间模型,计算分析了不同间距下主间隙空间电场及场强分布,搭建了主间隙工频放电特性模拟试验平台,开展了主间隙的放电分散性试验。仿真结果表明主间隙电场为稍不均匀电场,不均匀度很小。试验结果表明主间隙间距在[55 mm,70 mm]之间放电分散性较小,放电间隙的放电电压平均值与整定值相当,且远大于历次自触发的放电电压最大值,放电分散性自击穿的可能性较小。

关键词:串联补偿;主间隙;稍不均匀电场;放电分散性;自触发

中图分类号:TM863

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)06-0020-03

超高压远距离输电工程中采用串联电容补偿技术可有效补偿输电线路电抗,缩短线路等值电气距离,提高系统输送容量,增强系统的稳定性,同时对输电线路的潮流分布具有一定的调节作用^[1]。500 kV 输电线路固定式串联补偿装置投运后,受环境温湿度、电磁干扰等多种因素影响,火花间隙在低于自点火花电压定值下易产生自触发,造成串补旁路退出,甚至联跳线路,严重影响电网稳定运行,国内多台固定式串联补偿装置发生过此类故障^[2-7]。

国内外研究学者通过对串联补偿装置的检测与分析,认为受现场温度、气压、湿度等因素影响,火花间隙击穿电压存在一定的分散性,间隙间距整定较难控制,易在无触发情况下发生击穿^[6-8]。

1 串联补偿装置结构及间隙动作情况

某 500 kV 固定式串联补偿装置结构如图 1 所示,参数如表 1、表 2 所示。串联补偿装置由串联电容器、金属氧化物限压器(MOV)、放电间隙、旁路断路器、阻尼元件、触发装置及控保系统组成。其中金属氧化物限制器为电容器主保护,放电间隙为 MOV 和电容器后备保护,旁路断路器用于投入和退出串联电容器,阻尼元件用于限制电容器放电电流。

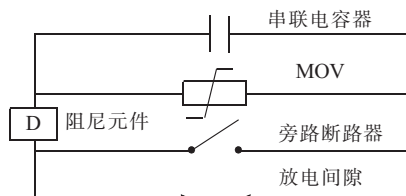


图 1 串联补偿装置结构示意图

据统计,该串联补偿装置 5 年内放电间隙发生了 14 次自触发行为,放电电压最小值为 148 kV,最大值为 218 kV,远远小于间隙放电电压设定值 321 kV,如

表 1 串联补偿装置电容器参数

电容值 / uF	串联补 偿度	额定容量 / Mvar	额定电 压 / kV	保护水 平 / p.u.
106.4	0.40	500	100	2.3

表 2 串联补偿装置 MOV 参数

额定电压 / kV	持续运行 电压 / kV	最大吸能 / MJ	保护水平 / p.u.
113	94	50	2.3

图 2 所示。串联补偿装置发生自触发行为条件有 2 个:间隙因放电分散性自击穿或触发装置产生触发脉冲。为甄别自触发行为的原因,开展间隙放电分散性研究。

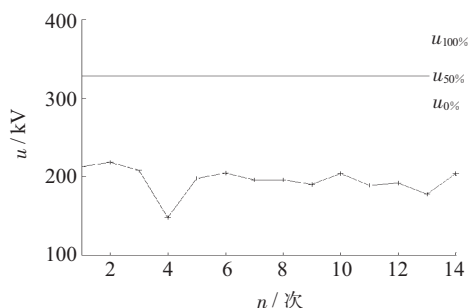


图 2 放电间隙放电电压情况

2 放电间隙电场不均匀度分析

由于放电间隙为空气间隙,其放电特性与电场的均匀程度密切相关,通过分析空气间隙的电场不均匀度,可为放电特性试验提供参考。

2.1 放电间隙击穿原理

放电间隙是串联补偿装置的核心部分之一,由主间隙 G_1 、 G_2 组成,其结构如图 3 所示。

正常条件下,2 个串联的主间隙 G_1 、 G_2 参数一致,分别承担串联补偿电容器组两端电压的 1/2。线路发生故障时,电容器两端出现较大的暂态过电压,触发控制系统向脉冲变压器 T_1 和 T_2 发出点火脉冲,经升压后

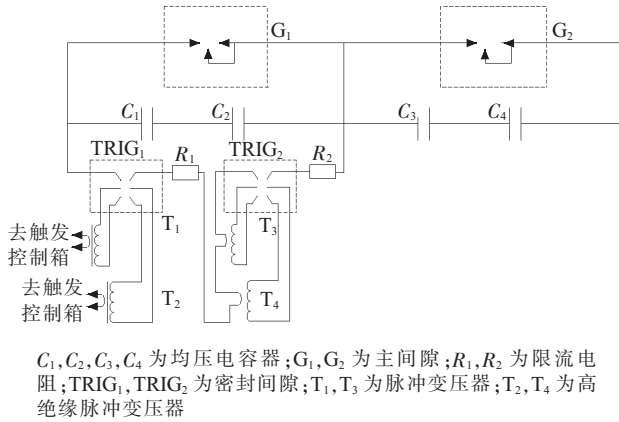


图3 间隙及触发装置工作原理图

使密封间隙 $TRIG_1, TRIG_2$ 火花塞对球面放电。 C_1, C_2 两端的电压迅速降低, 主间隙 G_2 上的电压快速升高, 主间隙 G_2 发生击穿, 电容器组两端电压迅速击穿间隙 G_1 , 使得串补电容器组被旁路^[9], 因此, 放电间隙 G_1, G_2 的放电分散性非常关键。

串联补偿装置主间隙 G_1 的结构如图4所示, 包括球形电极 g_1 、球形电极 g_2 、球形电极 g_3 、球形电极 g_4 , 其半径分别为 r_1, r_2, r_3, r_4 。其中, 球形电极 g_1 、球形电极 g_4 通过外层铝屏蔽相连; 球形电极 g_2 、球形电极 g_3 通过钢管相连。球形电极 g_1 、球形电极 g_2 的间距 d_1 很近, 构成主放电通道, 球形电极 g_2 、球形电极 g_4 构成引弧通道。球形电极 g_2 、球形电极 g_3 通过穿墙套管与主间隙 G_2 相连。

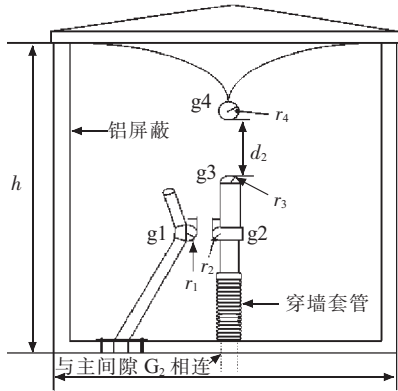


图4 主间隙结构图

2.2 主间隙电场计算

以图1所示的500 kV固定式串联补偿装置间隙为例, 其主间隙的各参数如表3所示, 采用ANSYS对间隙的电场分布进行计算^[10], 分析其电场不均匀度。假设在球形电极 g_1 上施加100 kV工频交流电压, 球形电极 g_2 设置为零电位, 间隙电场分布如图5所示, 电极 g_1 和 g_2 之间场强分布曲线如图6所示。

表3 串联补偿装置主间隙参数 mm

参数	r_1	r_2	r_3	r_4	d_1	d_2	l	h
间距	210	200	210	215	62	260	2500	2300

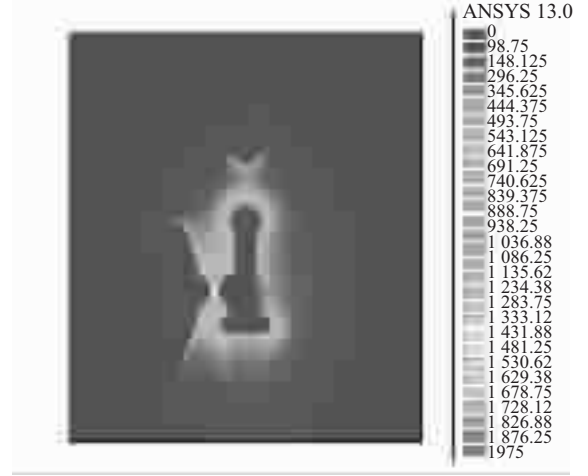


图5 主间隙电场分布图

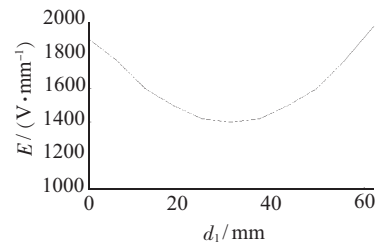


图6 主间隙空间电场分布曲线图

由图6可知, 两侧球电极表面最大场强基本相当, 中部空间场强最低。当 $d_1=62$ mm 时, 主间隙最大场强为1975 V/mm, 最小场强为1400 V/mm, 平均场强为1688 V/mm, 间隙电场不均匀系数 $f=1.17$, 空间电场不均匀度很小, 为稍不均匀电场。调整间隙间距 d_1 值, 获得不同间距下的间隙空间电场强度最大值, 如图7所示。

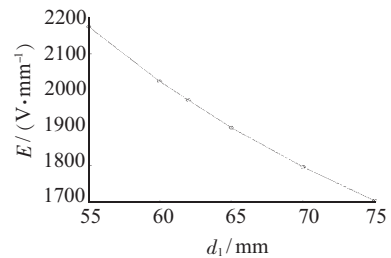


图7 不同间距下主间隙空间电场场强最大值

由图7可知, 间隙间距 d_1 在[55 mm, 70 mm]之间与空间电场强度基本呈反比线性关系, 且均匀度较好。

3 主间隙放电特性试验研究

以主间隙 G_1 为例, 搭建主间隙工频放电特性模拟试验平台, 如图8所示。其中, 电源采用工频电压发生器^[11], 输出电压幅值最高可达600 kV; 阻尼电阻值为100 kΩ; 高压电极与试品间加装电容分压器, 分压器低压侧安装峰值电压表, 测量放电电压峰值; 主间隙由支柱绝缘子固定。不同间距下主间隙 G_1 放电电压值如图9所示。环境相对湿度78%, 温度26℃。

由图9试验结果可知: (1) 主间隙放电电压值随着间隙间距的增加而增大, 当间隙间距增加1 mm 时,

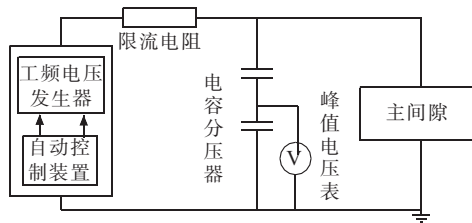


图8 试验回路示意图

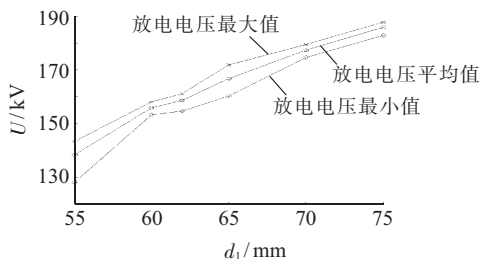


图9 不同间距下主间隙放电电压值

放电电压平均增大约 2 kV。(2) 主间隙中 d_1 在 [55 mm, 70 mm] 之间放电电压分散性较小, 当间隙间距为 55 mm, 60 mm, 62 mm, 65 mm, 70 mm, 75 mm 时, 放电电压偏差分别为 7.5%, 1.7%, 2.5%, 3.9%, 1.6%, 1.6%, 与仿真结果较为接近。针对图 1 所示的串联补偿装置, 取间距 $d_1=62$ mm 时, 主间隙 G1 和 2 个间隙 G1 串联后的放电电压值如表 4 所示。

表4 间隙放电电压值 kV

间隙	最大值	最小值	平均值
G1	161.1	154.6	158.6
G1+G1	329.8	301.6	315.7

由表 4 可知: (1) 主间隙 G1+ G1 串联后放电电压值约为单个间隙 G1 的 2 倍, 放电电压基本为线性增长关系。(2) 当 $d_1=62$ mm 时, 两间隙串联后放电电压平均值为 315.7 kV, 与串联补偿装置的整定值相差 1.8%, 说明间隙击穿整定值是基于实际放电值设定。

4 结束语

(1) 串联补偿装置主间隙三维立体仿真表明, 主间隙电场不均匀系数 $f=1.17$, 为稍不均匀电场, 电场不

均匀度很小。

(2) 主间隙 G1 试验结果表明在 [55 mm, 70 mm] 之间时, 间隙的放电分散性较小, 放电电压较为稳定, 与仿真结果一致。

(3) 两间隙串联后的试验结果表明当 $d_1=62$ mm 时, 串联补偿装置放电间隙的放电电压平均值与整定值相当, 且远大于历次自触发过程中的放电电压最大值, 故放电间隙因放电分散性自击穿的可能性较小。

参考文献:

- [1] 蒋卫平, 李新年, 吕鹏飞, 等. 500 kV 固定串补人工单相接地故障试验现场实测结果分析与仿真计算[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 17-21.
- [2] 周启文, 潘勇斌, 王德昌, 等. 500 kV 串补系统中火花间隙系统研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 40-44.
- [3] 吴 熙, 蒋 平. 可控串联补偿抑制次同步谐振的研究[J]. 江苏电机工程, 2009, 28(2): 21-25.
- [4] 汤广福, 李功新. 先进电力电子技术在超高压输电网中的应用[J]. 变流技术与电力牵引, 2006(2): 28-34.
- [5] 王维洲, 彭夕岚, 何世恩. 成碧 220 kV 可控串补装置的运行与维护[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 50-55.
- [6] 李 晔, 井 伟. 超高压输电线路串联补偿电容器的运行分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2006(4): 8-12.
- [7] 曹继丰. 平果可控串补工程及其在南方电网中的作用[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 6-9.
- [8] 郭剑波, 武守远, 李国富, 等. 甘肃成碧 220 kV 可控串补国产化示范工程研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 12-17.
- [9] 祝 谦, 刘相枪. 平果可控串补本体保护介绍[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 73-77.
- [10] 王泽忠. 工程电磁场[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 35.
- [11] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔. 高电压工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 86.

作者简介:

林 敏(1956), 男, 福建福州人, 高级工程师, 从事电力系统分析、工程设计、电网设备运行维护技术研究及管理工作;

李 杰(1963), 男, 江苏扬州人, 高级工程师, 从事高电压、输电技术研究及管理工作。

Research on Self-triggering and Spark Gap Discharge Dispersion of 500 kV Series Compensator

LIN Min¹, LI Jie²

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

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

Abstract: During the operation of the fixed series compensator of Shanbao-to-Dongming extra high voltage transmission lines of East China, the spark gap would trigger itself unexpectedly, which may result in bypass of the series compensator, in some cases even cause the trip-out of the transmission lines. In this paper, the structure of the fixed series compensator is firstly illustrated. Then a statistics analysis of the actions of the spark gap in the last 6 years is carried out. Afterwards, a three-dimensional model of the main gap is established in the ANSYS. The dispersion of the discharge with various spark gap is investigated. The experimental system for the discharge is build up with the main gap scale as same as the real one. The test results show that the dispersion of the discharge voltage is small, which is in agreement with the experimental date afforded by the supplier.

Key words: series compensator; main gap; overvoltage; finite element; discharge dispersion

±500 kV 直流输电线路暂态故障监测装置的设计与应用

魏 旭¹, 谢天喜², 陶风波², 王铭民¹, 周志成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: 高压直流输电系统因暂态过程导致故障或停运时, 目前所采用的录波仪只能记录极线电压和电流, 无法提供相关的高频故障波形信息以实现故障的快速识别, 不利于迅速排除故障和恢复送电。为了监测直流输电线路上的高频暂态故障行波和雷电侵入波, 文中研制了可直接安装于±500 kV 直流导线上的暂态故障监测装置, 设计了适用于直流线路的新型供电系统、高频传感器、数据采集与传输单元等, 并进行了现场应用, 监测到的雷电波形数据与雷电定位系统进行对比后验证了装置的有效性和可靠性, 可为直流输电系统暂态故障的监测、识别和复现提供技术手段。

关键词: 高压直流; 线路; 暂态故障监测; 行波; 罗氏线圈

中图分类号: TM866

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2014)06-0023-03

高压直流输电系统具有输送距离远、容量大、损耗低、控制灵活迅速等优点, 担负着电能传输的繁重任务。由于高压直流输电系统换流站设备种类繁多、主回路和控制保护系统结构复杂, 易因设备绝缘承受暂态过电压的威胁而导致直流系统故障或停运, 严重威胁区域电网的安全运行。近几年, 全国直流输电工程运行中, 因暂态过程引起的单极故障及双极闭锁每年都有发生, 造成了巨大的社会经济损失^[1-3]。

目前, 高压直流输电系统发生故障后, 录波仪所监测到的极线电压和电流波形是进行故障判断的重要依据, 但录波仪无法监测故障过程中的高频电流信息, 导致重要故障信息的遗漏, 不利于快速排除分析故障原因及恢复送电。

1 监测装置结构及功能模块设计

监测装置构成如图 1 所示。其主要功能模块包括供电系统、高频传感器、数据采集系统、数据处理与传输系统。监测装置工作流程如图 2 所示。当变电站正常运行时, 为了最大程度减少电能的损耗, 监测装置处于休眠状态; 一旦有暂态电流经过或雷电波入侵变电站时, 监测装置就会启动, 采集相应的数据, 将采集的数据储存在采集单元, 随后通过 GPRS 移动网络传送到后台数据处理中心进行处理和显示。

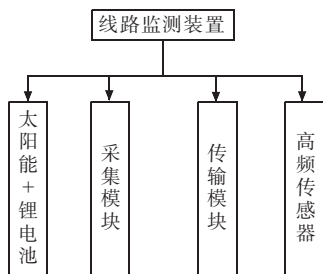


图 1 直流线路监测装置结构框架示意图

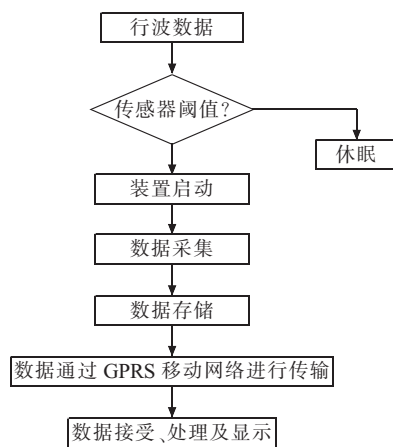


图 2 监测装置工作流程

1.1 电源系统设计

目前, 交流输电线路监测装置主要采用电磁耦合取电技术, 然而高压直流输电线路导线中流过的直流电不产生交变的电磁场, 因而该技术无法应用于直流输电线路在线监测设备^[4]。

本文所设计的直流线路监测装置采用太阳能电池板加锂电池供电的设计方案, 其设计目标: 在白天太阳能电池板直接给装置供电, 而且在阳光最充足的时候给储能电池充电; 在夜间或阳光不充足的情况下, 当电池板输出功率接近 0 时, 电池就可以给系统供电。供电系统功能模块结构框图如图 3 所示。

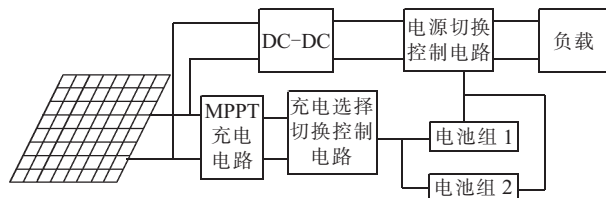


图 3 太阳能供电系统结构框图

(1) 太阳能电池板。根据太阳光的强度, 太阳能电池板的供电策略分为 3 种方式: ① 阳光非常充足, 太

太阳能电池板输出能量可以满足对负载供电及对其中一块电池充电(充电电流可调),此时电源板选择给能量少的锂电池充电及 DC-DC 给负载供电;② 阳光不是很充足,太阳能电池板输出能量只能对负载供电,不能满足同时为电池充电,此时电源板选择 DC-DC 对负载供电;③ 阳光很弱,太阳能电池板输出电流很微弱,不能带载,此时电源板为能量少的锂电池充电,能量多的电池为负载供电,关闭 DC-DC。

(2) 最大峰值功率跟踪(MPPT)模块。本系统方案采用 Linear Technology 公司生产的锂电池充电芯片,具有太阳能电源跟踪功能的单片压降型电池充电器,该器件运用了输入电压调节环路,负责控制充电电流以将输入电压保持在编程设定的电平上。当由单块太阳能电池板供电时,输入调节环路强制电池板以峰值输出功率运行。

(3) DC-DC 转换模块。该模块能使太阳能电池板工作时输出电压 18 V 转换为负载工作时的电压 5 V。本系统设计方案采用的 DC-DC 模块内含固定频率振荡器(52 kHz)和基准稳压器(1.23 V),并具有完善的保护电路,包括电流限制及热关断电路等,利用该器件只需极少的外围器件便可以构成高效稳压的电路。

(4) 充电选择切换控制电路。该电路所实现的功能为根据锂电池组电量不同选择电量较低的电池组为其充电。本系统设计方案采用 MCU 驱动继电器来实现,充电时由充电电路根据太阳能电池板输出功率大小自动设定电流值。

(5) 电源切换控制电路。该电路所实现的功能为根据 DC-DC、电池组 1 和电池组 2 的电压大小选择哪一路为负载供电。在本系统应用中,DC-DC 的电压值设定为 5 V,电池组电压为 3.6~4.2V,由于 DC-DC 电压值高于电池组电压,因此在工作时优先选用 DC-DC 为负载供电,当太阳能电池板输出功率较弱时(例如阴天或夜晚)DC-DC 输出电压趋近于 0 V,此时切换至能量较高的电池组为负载供电,能量的高低由电池电压来判定。

1.2 高频传感器设计

当前用于暂态电流行波监测的传感器大多基于罗氏线圈,如空心电流互感器、PCB 式行波传感器等。罗氏线圈是一个均匀缠绕在非铁磁性材料上的环形线圈,直接套在被测量的导体上来测量电流,输出信号是电流对时间的微分。通过一个对输出的电压信号进行积分的电路,就可以真实还原输入电流。该线圈具有电流可实时测量、响应速度快、不会饱和、几乎没有相位误差的特点,故其可应用于雷电信号采集、继电保护、可控硅整流、变频调速等大电流的场合^[5]。当电流通过线圈轴线时,根据电磁感应定律,在线圈包围的轴线空

间出现变化的磁场,由安培环路定律可得^[6]:

$$\oint H \cdot dl = I \quad (1)$$

根据磁场强度 $B = \mu H$,感应电压 $E = N \frac{d\Phi}{dt}$,磁通 $\Phi = B \cdot S$,得:

$$E(t) = N \frac{d(BS)}{dt} = \frac{M dI(t)}{dt} \quad (2)$$

当检测线圈为环形时,互感系数 M 的值为 $M = n\mu S$,线圈的自感 $L = n^2 \mu SL$ 。

式(1,2)中: H 为线圈内部的磁场强度; l 为线圈的闭合回线; I 为穿过线圈的闭合面积的电流; μ 为磁导率; N 为线圈匝数; n 为线圈单位长度的匝数; S 为垂直于线圈的面积。

绕制线圈时采用回线以便消除外界磁场的干扰,将细的漆包线均匀密绕在环型绝缘骨架上,以减少匝间电容对测量的影响。罗氏线圈由于采用非磁性的线圈芯,没有非线性饱和效应,因而测量范围从数安培到数百千安的电流,最小值和最大值主要取决于测量的电子元件。其允许隔离的电流测量,并具有较宽的带宽,最大可达 10 MHz,具有良好的线性特性,可认为是理想的电流传感器。

1.3 数据采集与传输系统设计

数据采集系统由多路开关、积分电路、A/D 转换器、先进先出(FIFO)存储器和 DSP 控制器顺次连接,如图 4 所示。其中比较电路同时接收 A/D 转换和控制器的输出,并将结果输给控制器,多路开关、A/D 转换器、FIFO 存储器都由控制器协调工作。

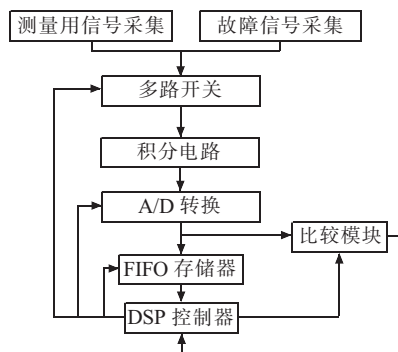


图 4 数据采集单元框图

为了保证通讯的可靠性,本监测系统采用的 GPRS 公共网络进行数据传输。数据通讯单元具备双向数据通讯功能,当现场监测装置监测到输电线路或者变电站母线出现幅值较大的行波电流时,可以将记录的数据通过通讯模块上传至上位机数据库,同时上位机也可以下传命令,实现参数设置功能。

2 监测装置的试验测试

据上述设计思想,并将其与 ±500 kV 线路间隔棒进行一体化融合设计,制作样机后进行行波电流监测

试验。测试过程中模拟发生行波电流,采用样机进行监测,通过分析监测到的波形和幅值评价监测装置的准确度。其测试环境如图 5 所示,利用升压器、整流硅、储能电容、球隙、分流器组成冲击电流发生器,产生峰值为 5000 A 的 2.6/40 μs 波形进行冲击电流试验,分流器作为标准测量单元。

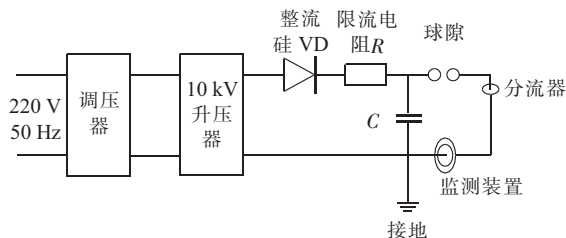


图 5 试验回路原理图

监测装置采样频率为 2 MHz,采样时长为 800 μs ,监测结果如图 6 所示。监测到的波形峰值为 4961 A,波头时间为 2.6 μs ,波尾时间为 40 μs ,可见该监测装置测量准确度较高。

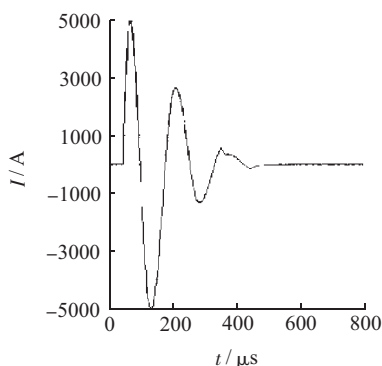


图 6 冲击电流监测结果

3 监测装置的现场应用

将样机安装于某 ± 500 kV 换流站附近 2 km 的输电线路,如图 7 所示。其中高频传感器安装于分裂子导线上,太阳能板安装于间隔棒框架上并展开,数据采集、处理、传输单元安装于密封金属盒内并嵌入间隔棒框架中。该装置运行半年后,共监测到了 17 次雷电侵入波,其典型波形如图 8 所示,脉冲宽度范围分布在 10~25 μs ,行波电流幅值位于 150~1000 A。波形记录时间与雷电定位系统所记录的时间吻合。

5 结束语

(1) 设计的太阳能加锂电池的供电系统控制策略合理,参数选取适用,可以长期可靠地为暂态故障监测装置供应电能。

(2) 监测装置试验测试结果准确度高,运行性能稳定,所监测到的雷电行波数据与雷电定位系统记录

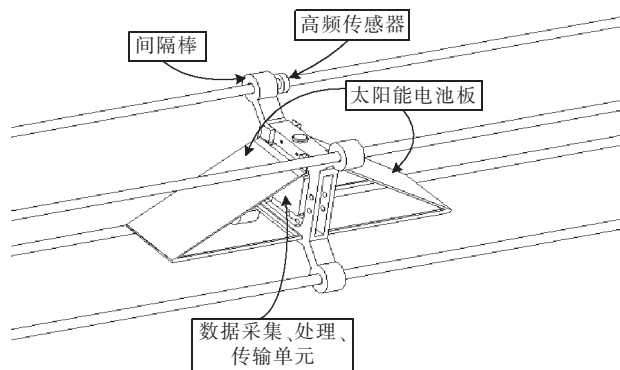


图 7 测装置安装示意图

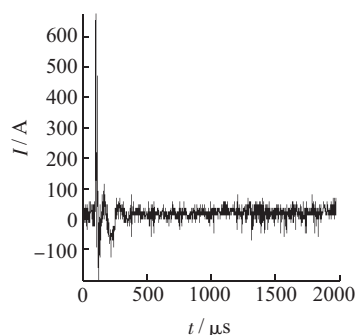


图 8 型雷电侵入波波形

的时间、雷击杆塔位置吻合,验证了监测装置的有效性和可靠性。

参考文献:

- [1] 黎小林,许树楷.中海油文昌柔性直流输电系统暂态故障仿真分析[J].南方电网技术,2011,05(4):10-14.
- [2] 吕鹏飞,王明新,徐海军.三广直流鹅城换流站换相失败原因分析[J].继电器,2005,33(18):75-78.
- [3] 刘臣宾,卢宇,邵震霞,等. ± 500 kV 葛南与荆沪同塔双回直流系统特性仿真研究[J].江苏电机工程,2011,30(4):1-4.
- [4] 韩冰,赵飏,张凯,等.电力系统暂态过电压在线监测装置的应用分析[J].黑龙江电力,2009,31(3):197-199.
- [5] 楚湘辉.新型行波传感器及其在电网故障行波定位中应用[D].长沙:长沙理工大学,2009.
- [6] 司小平,乐丽琴,赵国生.罗氏线圈电子式电流互感器的设计[J].电子设计工程,2014,21(21):144-147.

作者简介:

魏旭(1974),男,江苏连云港人,高级工程师,从事高电压技术研究、输变电设备运行维护管理工作;

谢天喜(1983),男,湖北天门人,博士,从事电力设备结构优化及电力系统过电压研究工作;

王铭民(1974),男,江苏扬州人,高级工程师,从事电网运行维护检修技术研究及管理工作;

陶风波(1982),男,江苏常州人,博士,从事电力系统过电压及脉冲功率研究工作;

周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事电力系统过电压及输电线路运行维护方面研究工作。

(下转第 29 页)

一种快速估算运行状态母线短路容量的方法

唐建清

(徐州供电公司, 江苏 徐州 221005)

摘要:实时估算运行状态下的母线短路容量,对于评估系统在各种扰动工况下的稳定水平以及继电保护整定计算具有十分重要的实践价值。针对不同运行方式下母线的实时短路容量不易获取的问题,运用戴维南定理对母线的系统侧进行端口等效,并依据负荷工况的变化对母线电压功角影响的条件,推导出功率变化量、电压变化率与母线短路容量之间关系。由于功率变化量和电压变化率便于直接测量,依据上述三者之间的关系,就能方便地估算出母线短路容量。

关键词:戴维南等效;负荷工况;功角差;短路容量;在线估计

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)06-0026-04

母线短路容量是表征电力系统运行特征的一个重要参数,短路容量的大小反映了该母线与系统之间联系的紧密程度;母线短路容量越大,表示母线与系统之间的联系越紧密,母线电压受负荷波动的影响就越小,同时,若系统发生短路,则短路电流也越大;相反,若母线短路容量越小,则表示母线与系统的联系越弱,母线电压随着负荷变化而产生的波动也越明显,母线及负荷侧发生短路时的短路电流也就越小。

基于短路容量,可以评估系统的状态脆弱性^[1]和电压稳定水平^[2,3]。文献[4]指出,电网结构是影响系统短路容量的重要因素,但系统运行方式对短路容量的影响更为频繁和直接。在生产实际中,对母线短路容量大多采取一种相对静态的估算方法,即由上级电力调度部门根据年度运行方式和假定的若干种边界条件,给出本级电网的各条母线在大、小两种方式下的系统阻抗,下一级电力调度部门再据此计算本级电网各条母线在不同运行方式下的系统阻抗。这种系统阻抗一般在每年的年初以文件的形式下达,供继电保护整定计算、电网方式安排使用。当电网发生机组并网或检修、主变或线路停役等工况时,系统阻抗的取值将在大方式和小方式之间变化。即可供参考的系统阻抗一年只下达一次,是静态的,而电网方式是随时会发生变化的,实际系统阻抗是动态的,这种动静之间的差异将对阻抗型和电流型保护的保护范围产生影响,也会对母线电压水平的抗扰动能力产生影响。如果能在误差可接受的范围内快速估算出母线的短路容量或系统阻抗,无疑将有利于改善上下级配电网之间的保护配合特性,也便于采取更主动、更精确的方式调控母线的运行电压,保证电能质量。文献[5]提出了在典型潮流下通过灵敏度计算确定主要的发电机和负荷组,并以此为训练样本建立广义回归神经网络,然后再对运行态的母线短路容量进行辨识,文

献[6]甚至利用类似的人工神经网络对短路容量进行短期的预测,此类方法计算量较大、训练过程不易把握;文献[7]利用大负荷扰动法对母线短路容量进行模拟实测,但该方法难以实现常规运行状态下的实时监测。

1 快速估算系统阻抗的方法

从待估算的母线向系统侧看过去,系统阻抗 Z_{xt} 大致包括 3 个部分:发电机暂态电抗 X_d' 、输电线路阻抗 Z_L 和上级电网的变压器阻抗 Z_B 。考虑到系统侧复杂的环网结构,且上级电网的发电机、线路、变压器这三类参数对于下级电网的技术人员不方便获取,因此直接计算法不能奏效,等效戴维南定理(Thevenin's theorem)有助于解决这个问题。根据戴维南定理,对于变电站的任一段母线,其电源侧可以等效为一个含内阻的电压源两端口网络,母线的负荷侧就相当于这个两端口网络的外部负载,如图 1 所示。

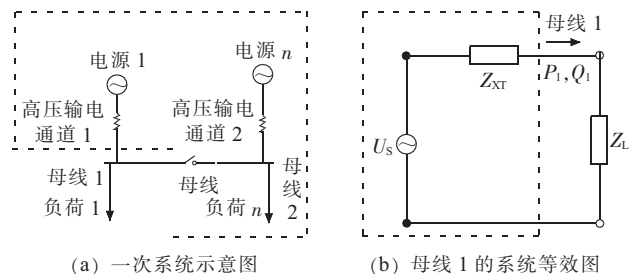


图 1 系统阻抗的两端口等效网络

图 1(a)中,高压输电通道是指本段母线电源侧的综合通道,可能包括不同电压等级的变压器和输电线路的各种组合。图 1(b)中, U_s 就是某段母线向电源侧看过去的等效电源。若图 1(a)中母联开关处于断开状态,则图 1(b)中等效 U_s 就是“电源 1”、等效内阻 Z_{xt} 就是“高压输电通道 1”的阻抗;若母联开关处于合闸状态,则 U_s 就是该段母线在“电源 1”和“电源 2”共同作用下的空载电压, Z_{xt} 就是“高压输电通道 1”的阻抗与“高压输电通道 2”的阻抗的并联。

假定等效电源在一定的时间区间内保持恒定, 则估算母线短路容量 S_d 就等价于估算该母线电源侧的系统阻抗 Z_{XT} 。由于实际的系统不能用短路去测得 S_d , 可行途径只有从常规的负载工况下获取。即, 利用不同的负载工况下电路特征参数的变化提取系统的短路容量信息。实际上, 文献[8]和文献[9]提出以相邻时刻的发电机节点无功变化量和负荷节点电压变化量作为评价系统薄弱节点的方法就是一种估算系统短路容量的过程。从图1(b)中容易得到:

$$\dot{U}_s = \dot{U}_1 + \frac{\dot{U}_s}{\dot{Z}_{YT} + \dot{Z}_1} \times \dot{Z}_{XT} \quad (1)$$

式(1)中: $\dot{U}_1$ 是 Z_1 的端电压。

假设在不同的负载工况下, U_s 保持恒定, 则负载阻抗从 Z_1 变化到 $Z_2 = Z_1 + \Delta Z$ 时, 则有:

$$\dot{U}_s = \dot{U}_2 + \frac{\dot{U}_s}{\dot{Z}_{XT} + \dot{Z}_2} \times \dot{Z}_{XT} \quad (2)$$

同样, $\dot{U}_2$ 是变化后负载 Z_2 的端电压。考虑到

$$\frac{\dot{U}_s}{\dot{Z}_{XT} + \dot{Z}_1} = \frac{S_1}{\dot{U}_1} = \frac{P_1 + jQ_2}{\dot{U}_1} \text{ 和 } \frac{\dot{U}_s}{\dot{Z}_{XT} + \dot{Z}_2} = \frac{S_2}{\dot{U}_2} = \frac{P_2 + jQ_2}{\dot{U}_2}, \text{ 综合式}$$

$$\dot{U}_1 + \frac{S_1}{\dot{U}_1} \times \dot{Z}_{XT} = \dot{U}_2 + \frac{S_2}{\dot{U}_2} \times \dot{Z}_{XT} \quad (3)$$

移项,得:

$$(\frac{S_1}{\dot{U}_1}-\frac{S_2}{\dot{U}_1})\times\dot{Z}_{XT}=\dot{U}_2-\dot{U}_1 \quad (4)$$

等式左边通分,得:

$$\frac{S_1 \dot{U}_2 - S_2 \dot{U}_1}{\dot{U}_1 \dot{U}_2} \times \dot{Z}_{\text{XT}} = \dot{U}_2 - \dot{U}_1 \quad (5)$$

等式两边同除以 $\dot{U}_1$,得:

$$\frac{S_1 \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} - S_2}{\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_1 \dot{U}_2}} \times \dot{Z}_{\text{XT}} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\dot{U}_1} = \Delta \dot{U}_r \quad (6)$$

当 $\dot{U}_1 \approx \dot{U}_2$ 时, 上式可简化为:

$$\frac{S_1 - S_2}{\dot{U}_1} \times \dot{Z}_{\text{XT}} = \frac{\Delta S}{\dot{U}_1^2 / \dot{Z}_{\text{XT}}} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\dot{U}_1} = \Delta \dot{U}_r \quad (7)$$

即：

$$\frac{\Delta S}{\Delta \dot{U}_r} = \frac{\dot{U}_1^2}{\dot{Z}_{VT}} = S_d \quad (8)$$

另外根据文献[10],并联电容器投入电网后引起的电压波动可按下式计算:

$$\Delta U = U_{s0} \frac{Q_c}{S_d} \quad (9)$$

式(9)中: U_{s0} 为电容器投入前的电网电压,kV; Q_c 为投入的电容器容量,Mvar; S_d 为母线的短路容量,MV·A; ΔU 为投入并联电容器前后的电压变化值,kV。

即：

$$\Delta U = U_{s1} - U_{s0} \quad (10)$$

式(10)中: U_{S1} 为电容器投入后的电网电压,kV。显然,式(8)和式(9)在本质上是等价的。

在实际工作中, ΔU , U_{s0} 和 Q 往往更便于测量, 则估算母线的短路容量可通过上述 3 个参量间接求得。综合式(9)和式(10), 母线的短路容量可由下式估算:

$$S_d = U_{s0} \frac{Q_c}{U_{s1} - U_{s0}} \quad (11)$$

值得注意的是,为了保持切除电容器和投入电容器 2 种运行工况在利用式(11)估算短路容量的逻辑一致性,采取切除电容器方式时,式(11)中的 U_{s0} 和 U_{s1} 分别为电容器切除后和切除前的电网电压。即认为电容器切除过程是电容器投入过程的逆过程。

2 某变电站模拟计算示例

以苏北地区某 110 kV 变电站为例,其系统接线如图 2 所示。

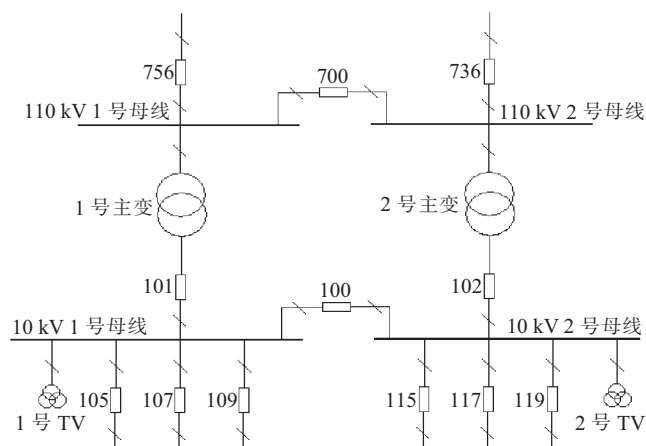


图 2 某 110 kV 变电站一次系统接线图

根据该公司 2014 年 2 月份下达的《年度地区电网继电保护整定方案及调度运行说明》, 该 110 kV 变电站的 10 kV 2 号母线在最大和最小运行方式下的系统阻抗有名值分别为 $0.26/0.47 \Omega$, 若取 S_B 为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, U_B 为 10.5 kV , 则单位阻抗的标幺值 Z^* 与有名值之间的关系为:

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_n} = \frac{10.5^2}{100} = 1.1025 \Omega$$

于是,该 10 kV 母线在最大/最小方式下的系统阻抗标幺值分别为:

$$Z_{\max}^* = \frac{Z_{\max}}{Z_B} = \frac{0.26}{1.1025} = 0.23583 \text{ p.u.}$$

$$Z_{\min}^* = \frac{Z_{\min}}{Z_B} = \frac{0.47}{1.1025} = 0.42630 \text{ p.u.}$$

以某日该 110 kV 变电站的电容器投切所引起的母线电压波动曲线如图 3 所示。

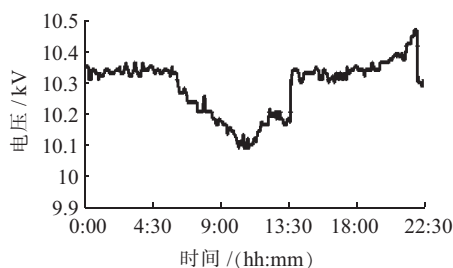


图 3 电容器投切前后的母线电压变化曲线

从图 3 可看出,电容器组于 13:45 投入后,该 110 kV 变电站的 10 kV 2 号母线电压从 10.17 kV 升至 10.30 kV;该电容器于当日 22:15 退出后,母线电压从 10.45 kV 降至 10.29 kV。已知该变电站 10 kV 2 号母线所属电容器组的额定容量为 4500 kvar,若取电容器投入方式下的电网参数变化情况为计算依据,则由式(11)可估算该变电站 10 kV 2 号母线的短路容量为:

$$S_{d,T}' = 10.17 \times \frac{4500/1000}{10.30-10.17} = 352 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

对应当时运行方式下的系统阻抗标幺值^[11]为:

$$Z_{XT1}^* = \frac{S_B}{S_d} = \frac{100}{352} = 0.28406 \text{ p.u.}$$

显然, $Z_{XT1}^* \in [0.23583, 0.42630]$, 即此时的运行方式处在《年度地区电网继电保护整定方案及调度运行说明》确定的运行方式之内,符合运行的实际情况。如果以电容器切除方式下的电网参数变化情况为计算依据,则该变电站 10 kV 2 号母线的短路容量为:

$$S_{d,Q}' = 10.29 \times \frac{4500/1000}{10.45-10.29} = 289 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

对应当时运行方式下的系统阻抗标幺值为:

$$Z_{XT2}^* = \frac{S_B}{S_d} = \frac{100}{289} = 0.345535 \text{ p.u.}$$

显然 Z_{XT2}^* 数值也落在 $[0.23583, 0.42630]$ 确定的运行方式之内。不难看出,夜间运行方式偏小,而白天运行方式偏大,这与实际电网的运行情况也是吻合的。

3 算法的误差分析

仍然以上述案例为背景,该变电站的 10 kV 2 号母线电容器的实测电流曲线如图 4 所示。

因母线电压对电容器的实际输出容量有一定程度的影响,如果需要更为精确的计算,可以根据实测的电

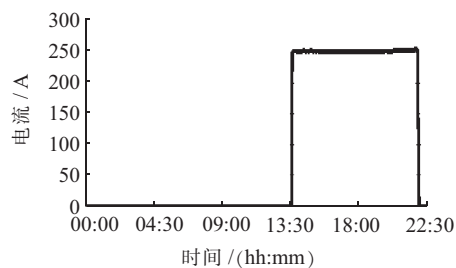


图 4 电容器投切前后的电容器电流变化曲线

容器电压和电流数据作为计算电容器实际输出容量的依据。图 4 中,电容器组于 13:45 投入后,电容器的相电流为 251.46 A,电容器组于 22:15 切除前,电容器的相电流为 254.53 A,则投入电容器方式的母线短路容量为:

$$S_{d,T}^* = 10.17 \times \frac{\sqrt{3} \times 10.30 \times 251.46 / 1000}{10.30-10.17} = 351 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

切除电容器方式下的母线短路容量为:

$$S_{d,Q}^* = 10.17 \times \frac{\sqrt{3} \times 10.45 \times \frac{254.53}{1000}}{10.30-10.17} = 296 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

比较 $S_{d,T}'$, $S_{d,Q}'$ 和 $S_{d,T}^*$, $S_{d,Q}^*$ 的计算结果,可见由母线电压导致电容器输出容量变化所产生的影响较小,可忽略不计。在工程计算中,电容器容量直接取其额定容量能够满足实际应用的需求。另外,式(11)中的 U_{s0} 和 U_{s1} 均应为矢量,但是在工程运用中,矢量计算比较繁杂,所以文中的示例均采用标量的计算方法,其间的误差是否会对计算结果产生严重的影响,理论分析和实际运行情况均表明,在正常的负荷变动情况下,母线电压的功角差一般不大于 5° ,仍以上述示例为背景,在投入电容器方式下,按照标量法计算,电压变动值为:

$$\Delta U = U_{s1} - U_{s0} = 10.30 - 10.17 = 0.13 \text{ kV}$$

如果采取矢量法,则:

$$\Delta \vec{U} = \vec{U}_{s1} - \vec{U}_{s0} \quad (12)$$

假设 Φ_1, Φ_0 分别为 $\vec{U}_{s0}$ 和 $\vec{U}_{s1}$ 的功角,则 2 个电压之间的实际矢量差随着它们的功角差的变化,如图 5 所示。

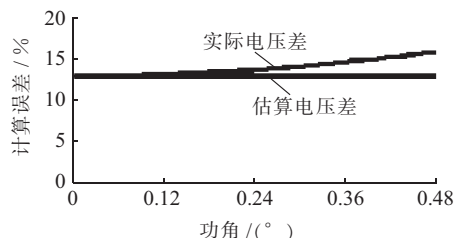


图 5 矢量法与标量法计算电压差的误差示意图

从图 5 可看出,当 $\vec{U}_{s0}$ 和 $\vec{U}_{s1}$ 之间的夹角小于 0.2° 时,2 种算法的计算结果误差很小,但随着夹角的增大,误差也显著增大。当夹角为 0.5° 时,计算误差达到

18%;当夹角为 1° 时,计算误差达到 41%。可见要想取得满意的计算精度,其前提是工况变化前后电压的相角差要尽可能的小。由电力系统分析的理论可知,上述不同工况下电压间的夹角大小与母线馈出的有功功率变化量成正比、与母线电压成反比。

在上述示例中,电容器投入前后,母线馈出的有功功率分别为 15.22 MW 和 15 MW,变化率仅为 1.445%;同样电容器切除前后,母线馈出的有功功率分别均为 17.75 MW,几乎没有变化,故结果具有良好的计算精度,符合工程实际。

4 结束语

利用端口等效原理对母线的系统侧进行等价处理,在系统阻抗 $Z_{XT} \ll$ 负载阻抗 Z_L 的条件下,对不同负载工况引起的母线电压变化做了近似计算,并给出了母线馈出的功率变化量、母线电压变化率以及母线的短路容量这三者之间的关系。结合实际的运行数据,并对照正式发布的电网年度运行方式文件,验证了算法的正确性和有效性,最后分析了可能影响算法精度的 2 个因素,并给出了相关结论。实时掌握母线的短路容量信息可以为实现变电站母线电压质量的精细化控制、配电网的无功优化配置以及继电保护整定计算提供了可靠的依据,且具有十分重要的实践价值。

参考文献:

- [1] 夏刚. 基于母线短路容量的状态脆弱性评估建模与仿真分析[J]. 陕西电力, 2013(2): 18-22, 27.
- [2] 覃芸, 王延伟, 徐箭. 基于短路容量的电压稳定裕度指标在湖北电网中的应用分析[J]. 广东电力, 2013, 26(2): 10-15.
- [3] 邓佳平, 孙元章, 徐箭. 一种考虑母线短路容量的电压稳定解析方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 15-19, 38.
- [4] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 电网结构对短路电流水平及受电能力的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 62-67.
- [5] 潘睿, 刘俊勇, 郭晓鸣, 等. 基于灵敏度特征决策的 GRNN 短路容量智能辨识[J]. 四川电力技术, 2010, 33(6): 1-5, 13.
- [6] 潘睿, 刘俊勇, 倪雅琦, 等. 基于负荷预测及广义回归神经网络的短路电流超短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 94-99.
- [7] 武云生, 胡波, 朱敏. 利用负荷干扰测算铜川、耀县变电所母线短路容量的试验研究[J]. 西北电力技术, 1996(2): 1-10.
- [8] 万秋兰, 丁涛, 王莹, 等. 薄弱电压节点的在线辨识[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 156-161.
- [9] 王漪, 柳焯. 基于戴维南等值的系统参数跟踪估计[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 16-24.
- [10] 中国电力企业联合会. GB 50227—2008 并联电容器装置设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009: 59.
- [11] GB/T 14285—2006, 继电保护和安全自动装置技术标准[S].

作者简介:

唐建清(1966), 男, 江苏常熟人, 高级工程师, 从事电力系统规划及管理工作。

A Method for Fast Calculation of Operating Bus Short-circuit Capacity

TANG Jianqing

(Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221005, China)

Abstract: Estimating short circuit capacity of bus is important for evaluating system robustness and is essence to setting and coordinating relaying protections. The short circuit capacity calculation for operating bus is not convenient. In this paper, the Thevenin's theory is applied to construct a two-port network for operating bus with different loading conditions. Then, the relationships among power increment, voltage regulation and short circuit capacity is obtained. Considering power increment and voltage change rate are easy to measure, the short circuit capacity calculation for operating bus can be obtained.

Key words: thevenin's equivalent; loading operation; power angle difference; short circuit capacity; estimated on line

(上接第 25 页)

Design and Application of Transient Fault Monitoring Device for ± 500 kV HVDC Transimission Lines

WEI Xu¹, XIE Tianxi², WANG Mingmin¹, TAO Fengbo², ZHOU Zhicheng²

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

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

Abstract: When HVDC transmission system has a system failure or outage because of equipment insulation withstand transient overvoltage threat, the recorder in nowadays can only record the pole line voltage and current, it can't provide the high frequency fault waveform information related to identify the fault in a short time, so the time of trouble shooting and restoring power supply will be delayed. In order to monitor the transient traveling wave and lighting invasion wave through the HVDC transmission line, this paper designed a transient fault monitoring device for ± 500 kV DC transmission line, including suitable new power supply system, the high frequency sensor, data collecting and transmission unit. Based on the design, the prototype of the device is used and the lighting waveform data is monitored and showed its validity and reliability. This paper provides technical means to monitor, identify and reproduce a transient fault of HVDC transmission system.

Key words: HVDC; transimission line; transient fault monitoring; traveling wave; rogowski coil

电磁式电压互感器误差矢量分析法

穆小星

(江苏省电力公司电力科学研究院 国家电网公司电能计量重点实验室, 江苏 南京 211103)

摘要:针对目前电压互感器(TV)相关参考书中电磁式 TV 误差模型向量几何图建模方法存在的缺陷问题,文中提出了一种基于矢量代数的误差建模方法,并对电磁式 TV 误差进行了系统、全面的分析,对电磁式 TV 误差的计算及电能计量影响进行了阐述,从而使广大电能计量技术人员对电磁式 TV 误差理论有了更清晰地了解。

关键词:TV; 比差; 角差; 阻抗角; 空载误差; 负载误差; 矢量分析

中图分类号:TM 744

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)06-0030-04

电磁式电压互感器 (TV)^[1] 有其经典的电路模型、误差数学模型,但在其相关参考书中,相应误差的数学建模、分析都是借助于参数向量图通过几何分析法进行的。但通过分析后,我们认为向量图几何分析法在理论上有一定缺陷,误差建模不清晰,计算公式推导非常牵强,严谨性、逻辑性不强。这是因为几何分析法很难处理代数符号及数学四则运算问题,不能形成逻辑上的推理、演绎,存在先天不足。此外这些文献中对误差的分析不够深入、全面,结合电能计量实际进行应用分析的内容则更少,甚至还有错误内容。本文通过矢量数学分析方法建立电磁式 TV 误差数学模型,并进行相应理论、应用分析。

1 电磁式 TV 电路模型

经典的电磁式电压互感器 / 变压器电路模型图(将 TV 二次回路折算到一次回路)如图 1 所示。

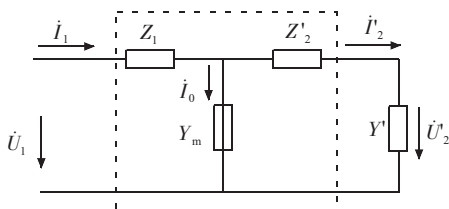


图 1 TV 等效电路图

图 1 中, Z_1, Z_2 分别为一次、二次线圈阻抗, $Z_1 = R_1 + jX_1, Z_2 = R_2 + jX_2; Z'_1$ 为 Z_1 折算到二次的等效阻抗, $Z'_1 = Z_1 / K_n^2; Z'_2$ 为 Z_2 折算到一次的等效线圈阻抗, $Z'_2 = K_n^2 Z_2; Y, Y'$ 为二次负载导纳及折算到一次导纳, $Y' = Y / K_n^2; Y_m$ 为励磁导纳。

2 电磁式 TV 误差数学模型

按减极性原则,电压、电流参考方向定义按图 1 所示,依据电路理论^[2]及矢量数学表示方法,则有:

$$\Delta U = U'_2 - U_1 = -I_1 Z_1 - I'_2 Z'_2 = -(I_0 + I'_2) Z_1 - I'_2 Z'_2 = -I_0 Z_1 - I'_2 (Z_1 + Z'_2) \quad (1)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\Delta U}{\dot{U}_1} = -\frac{I_0 Z_1}{\dot{U}_1} - \frac{I'_2 (Z_1 + Z'_2)}{\dot{U}_1} = -Y_m Z_1 - Y' (Z_1 + Z'_2) = -Y_m Z_1 - Y (Z'_1 + Z'_2) = \tilde{\varepsilon}_0 + \tilde{\varepsilon}_f \quad (2)$$

$$\tilde{\varepsilon}_0 = -Y_m Z_1 = -|Y_m| \angle -(90^\circ - \Psi) \cdot |Z_1| \angle \Phi_1 = -|Y_m| \cdot |Z_1| \angle (\Phi_1 + \Psi - 90^\circ) = -|Y_m| \cdot |Z_1| [\sin(\Psi + \Phi_1) - j \cos(\Psi + \Phi_1)] = -|Y_m| \cdot |Z_1| \sin(\Psi + \Phi_1) + j |Y_m| \cdot |Z_1| \cos(\Psi + \Phi_1) = f_0 + j \delta_0 \quad (3)$$

$$f_0 = -|Y_m| \cdot |Z_1| \sin(\Psi + \Phi_1) = -|Y_m| [R_1 \sin \Psi - x_1 \cos \Psi] \quad (4)$$

$$\delta_0 = |Y_m| \cdot |Z_1| \cos(\Psi + \Phi_1) = |Y_m| [R_1 \cos \Psi - x_1 \sin \Psi] \quad (5)$$

$$\tilde{\varepsilon}_f = -Y (Z'_1 + Z'_2) = -|Y| \cdot |Z'_1 + Z'_2| \angle (-\Phi + \Phi_2) = -|Y| \cdot |Z'_1 + Z'_2| \cos(\Phi - \Phi_2) + j |Y| \cdot |Z'_1 + Z'_2| \sin(\Phi - \Phi_2) = f_f + j \delta_f \quad (6)$$

$$f_f = -|Y| \cdot |Z'_1 + Z'_2| \cos(\Phi - \Phi_2) = -|Y| [(R'_1 + R_2) \cos \Phi + (x'_1 + x_2) \sin \Phi] \quad (7)$$

$$\delta_f = |Y| \cdot |Z'_1 + Z'_2| \sin(\Phi - \Phi_2) = |Y| [(R'_1 + R_2) \sin \Phi + (x'_1 + x_2) \cos \Phi] \quad (8)$$

$$f = f_0 + f_f \quad (9)$$

$$\delta = \delta_0 + \delta_f \quad (10)$$

式(1—10)中: $\tilde{\varepsilon}_0, \tilde{\varepsilon}_f$ 分别为 TV(复)误差; Φ_1, Φ_2 分别为一次绕组、二次端折算绕组阻抗角(感性, >0),

$\Phi_1 = \arctan \frac{x_1}{R_1}, \Phi_2 = \arctan \frac{x'_1 / K_n^2 + x_2}{R'_1 / K_n^2 + R_2}; \Psi$ 为 TV 铁心磁

滞角(感性, >0); Φ 为 TV 二次负载阻抗角(感性或容性); f_0, δ_0 分别为 TV 空载比差、角差; f_f, δ_f 分别为 TV 负载比差、角差。

以上即 TV 误差的矢量(代数)分析法,其结论与几何分析法等同。但它没有传统分析法中复杂的(向量)几

何图;公式中代数符号依据电工理论和数学推理自然生成,而非几何分析法中靠“人工”处理(在一个等式前莫名加一个“-”);公式推导完全依据矢量代数运算法则,而非几何分析法中牵强地制造相等式。

3 电磁式 TV 误差特性分析

(1) 电磁式 TV 误差由两部分组成 $\tilde{\varepsilon}_0, \tilde{\varepsilon}_f$; $\tilde{\varepsilon}_0$ 为空载时误差(零负载误差),与二次负载无关,仅与一次电压(励磁导纳)有关; $\tilde{\varepsilon}_f$ 为负载误差,仅与二次负载有关,与一次工作电压无关。

(2) 空载误差、负载误差都是复数(矢量)误差,其实部即复数误差的同相分量,称比差;虚部即复数误差的正交分量,称角差。

(3) 式(3)表明,所有阻抗角不影响误差(误差矢量模)的大小,只影响矢量误差的角度,通过改变二次负载阻抗(功率因数)角的大小即可改变误差的比差(同相分量)、角差(正交分量)分配比例。阻抗角大,比差小,角差大;阻抗角小,比差大,角差小。

(4) 空载误差为固有误差,由于 Y_m 不是常数,且是一次电压的函数,故空载误差也是一次电压的函数;此外,由于 Y_m 非线性,故空载误差随一次电压的变化也为非线性,呈现为双曲线型,如图2所示。

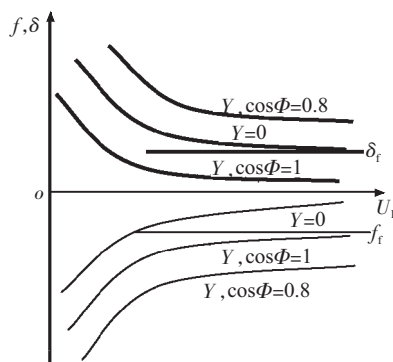


图2 电磁式 TV 误差—电压曲线(非补偿)

(5) 电磁式 TV 误差是一次电压、二次负载及功率因数角的函数,但由于 TV 一般只工作在额定电压这一点,可认为实际误差与电压无关,仅是二次绕组外接负载的函数。

(6) 按匝数比等于额定电压比设计的电磁式 TV 的空载比差值永远为负,空载角差一般为正。

(7) 对任一电压、固定阻抗角,其比差、角差分别是二次负载阻抗值的一次线性函数:

$$\begin{cases} f = f_0 + k_1 |Y| \\ \delta = \delta_0 + k_2 |Y| \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $k_1 = -|Z'_1 + Z_2| \cos(\Phi - \Phi_2)$; $k_2 = |Z'_1 + Z_2| \sin(\Phi - \Phi_2)$ 。

(8) 对任一电压、阻抗(值),仅二次负载阻抗角(功率因数)变化时,比差、角差分别是二次负载阻抗角的正余弦函数:

$$\begin{cases} f_f = -A \cos(\Phi - \Phi_2) \\ \delta_f = A \cos(\Phi - \Phi_2) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: $A = |Y| \cdot |Z'_1 + Z_2|$ 。

4 电磁式 TV 误差影响量分析

对于现场应用的电磁式 TV,其本身参数、性能在出厂时,已经固定,其现场运行又只工作在额定电压附近,在忽略环境影响条件下,可以认为 TV 误差仅是二次绕组外接负载的函数。对其应用误差的分析,具有一定的实际意义。

4.1 阻抗大小对误差影响(阻抗角不变)

由式(11)可知,比差、角差都是导纳值的一次线性函数,误差图形均为直线,如图3所示。图中粗曲线为角差,细的曲线为比差。

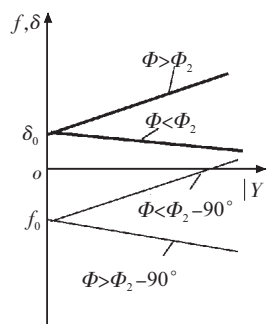


图3 电磁式 TV 误差—负载曲线(非补偿)

从图3可见,依二次负载阻抗角的不同,误差直线向不同方向发散。阻抗角决定了斜率的正负(直线的辐射方向)及大小,空载误差值决定了直线的起点。当二次负载为感性时,比差随导纳值增大(阻抗值减小)而增大,角差则可能增大($\Phi > \Phi_2$),也可能不变($\Phi = \Phi_2$)或减小($\Phi < \Phi_2$);当二次负载为容性时,其情况可能与感性负载正好相反。

4.2 二次负载阻抗(功率因数)角对负载误差影响

由式(12)可知,比差、角差是二次负载阻抗角的正余弦函数,误差曲线为正弦曲线,如图4所示。图中粗曲线为角差,细曲线为比差。

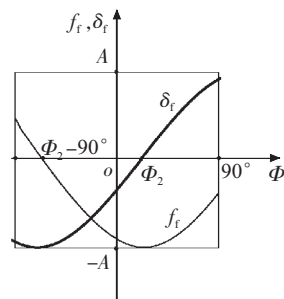


图4 TV 误差阻抗角曲线图

由图 4 可见,阻抗角有 2 个重要分界点:角差分界点“ Φ_2 ”,比差分界点“ Φ_2-90° ”。

(1) 对于角差:① $\Phi=\Phi_2$ 时, $\delta_f=0$, 角差分量最小;② $\Phi<\Phi_2$ 时, $\delta_f<0$, 当 $\Phi=\Phi_2-90^\circ$ 时为负最大值 ($-A$);③ $\Phi>\Phi_2$ 时, $\delta_f>0$, 当 $\Phi=90^\circ$ 时(纯电感)为正最大值 ($A\cos\Phi_2$)。

(2) 对于比差:① $\Phi=\Phi_2-90^\circ$ 时, $f_f=0$, 比差分量最小;② $\Phi<\Phi_2-90^\circ$ 时, $f_f>0$, 当 $\Phi=-90^\circ$ 时(纯电容), 为正的极大值 ($A\sin\Phi_2$);③ $\Phi>\Phi_2-90^\circ$ 时, $f_f<0$, 当 $\Phi=\Phi_2$ 时为负的极大值 ($-A$)。

以上是负载误差的特性,最终比差、角差的正负决定于与空载比差、角差合成的结果。电磁式 TV 二次端应工作在额定负载及相应范围功率因数内,否则整个 TV 精度难以保证。合理选择、配置二次工作负载,使电磁式 TV 工作在最小误差状态。通过上述曲线及模型,对各种影响量都可以直观地进行分析,

5 电磁式 TV 误差的计算

5.1 实际负载误差的计算

电磁式 TV 线圈、铁心参数一般在其参数中都不会给出,如用上述公式计算某实际负载下误差,则不可能,也不客观。误差一般要通过仪器来测量,但是测量仪器通常只能在离线状态下测量模拟(虚)负荷误差,由于实际负载都在运行状态下才能呈现出二次电气系统复杂性,通常无法在实际负载下测量互感器误差。然而测量实际负载误差又很必要,为此可先测量出任两虚负荷点在某电压下误差及现场运行时实际二次负载导纳值及其阻抗角,再据误差公式可算出 TV 在此电压下的实际负载误差。选空载及功率因数为 1 的额定负载这 2 个特殊负载点,对任意负载误差计算最为方便。其误差计算公式为:

$$\begin{cases} f=f_0-\frac{|Y|}{Y_n}[(f_0-f_n)\cos\Phi+0.029(\delta_0-\delta_n)\sin\Phi]\times 100 \\ \delta=\delta_0-\frac{|Y|}{Y_n}[(\delta_0-\delta_n)\cos\Phi-34.38(f_0-f_n)\sin\Phi] \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: f_0, δ_0 分别为待测电压下空载比差、角差测量值; f_n, δ_n 分别为待测电压下功率因数为 1 的额定负载下的比差、角差测量值; $|Y|$ 为实际负载导纳值, $|Y|=\frac{I_2}{U_2}$, I_2, U_2 分别为 TV 二次端的电流、电压测量值,通过相应仪表测出; Φ 为实际负载阻抗角,可通过相位表或专用测试仪测出; Y_n 为功率因数为 1 时,额定容量对应的额定导纳值, $Y_n=\frac{S_n}{U_n^2}$; S_n, U_n 分别为额定电压、额定容量, $V \cdot A$ 。

5.2 三相线路中 TV 二次导纳的计算

三相线路中 TV 误差计算,关键要知道每相(每只)TV 二次等效负荷。对于三相四线制电气系统,与单相线路等效,每相或每只 TV 二次负荷就是其二次绕组外接二次回路所有导纳之和,测量相应导纳并用此代入上述公式即可算出相应 TV 负载误差值;而在三相三线制电气系统中,每相或每只 TV 等效导纳往往不能直接测量,通常只能测量出“线导纳” Y_{AB}, Y'_{AB}, Y_{CB} , 从而无法直接计算相应相 TV 误差。因此,还必须依据电工理论,换算出每相等效导纳,或通过伏安相位表测量相应电工参数计算出“相导纳”。

(1)对三相对称电路,导纳的变换公式为 Y—V 型线路系统(TV Y 型接法,负载 V 型接法):

$$\begin{cases} Y_a = \frac{I_A}{\dot{U}_{AB}/\sqrt{3}} \angle 30^\circ = \sqrt{3} Y_{ab} \angle 30^\circ = \\ \frac{I_A}{U_1/\sqrt{3}} \angle (-\Phi_{ab}+30^\circ) = \frac{I_A}{U_1/\sqrt{3}} \angle \Phi_a \\ Y_c = \frac{I_C}{\dot{U}_{CB}/\sqrt{3}} \angle -30^\circ = \sqrt{3} Y_{cb} \angle -30^\circ = \\ \frac{I_C}{U_1/\sqrt{3}} \angle (-\Phi_{cb}-30^\circ) = \frac{I_C}{U_1/\sqrt{3}} \angle \Phi_c \\ Y_b = \frac{I_B}{\dot{U}_{ab}/\sqrt{3}} \angle 150^\circ = \sqrt{3} Y'_{ab} \angle 150^\circ = \\ \frac{I_B}{U_1/\sqrt{3}} \angle (-\Phi_{ab}+150^\circ) = \frac{I_B}{U_1/\sqrt{3}} \angle \Phi_b \end{cases} \quad (14)$$

即等效导纳值等于每相电流与其相电压比值,等效阻抗角等于对应线电压阻抗角再加一个修正值。如果不测量 B 相电流及其与线电压夹角,则 Y_b 用 A 相、C 相测量数据按下式导出:

$$\begin{aligned} Y_b &= \frac{I_A}{\dot{U}_{AB}/\sqrt{3}} \angle 30^\circ + \frac{I_C}{\dot{U}_{AB}/\sqrt{3}} \angle 30^\circ = \\ &= \frac{I_A}{U_1/\sqrt{3}} \angle (-\Phi_{ab}-30^\circ) + \frac{I_C}{U_1/\sqrt{3}} \angle (-\Phi_{cb}-30^\circ) = \\ &= \left[\frac{I_A}{U_1/\sqrt{3}} \cos(-\Phi_{ab}-30^\circ) + \frac{I_C}{U_1/\sqrt{3}} \cos(-\Phi_{cb}+30^\circ) \right] + \\ &\quad j \left[\frac{I_A}{U_1/\sqrt{3}} \sin(-\Phi_{ab}-30^\circ) + \right. \\ &\quad \left. \frac{I_C}{U_1/\sqrt{3}} \sin(-\Phi_{cb}+30^\circ) \right] = \frac{I_B}{U_1/\sqrt{3}} \angle \Phi_b = \\ &= \frac{\sqrt{I_A^2 + I_C^2 + 2I_A I_C \cos(\Phi_{ab} - \Phi_{cb} + 60^\circ)}}{U_1/\sqrt{3}} \angle \Phi_b \quad (15) \end{aligned}$$

$$\Phi_b = \arctan \left[\frac{I_A \sin(-\Phi_{ab}-30^\circ) + I_C \sin(-\Phi_{cb}+30^\circ)}{I_A \cos(-\Phi_{ab}-30^\circ) + I_C \cos(-\Phi_{cb}+30^\circ)} \right] \quad (16)$$

二次导纳计算相当复杂,且还易出错。因此除非特殊情况,TV二次导纳尽量用仪器直接测量,避免间接测量与计算。需说明的是,以上公式的相角按阻抗角定义,即电压相对电流夹角(电压超前电流相位角)。

(2) 对三相对称电路,导纳的变换公式为Y— Δ 型线路系统(TV Y型接法,负载 Δ 型接法):

$$\begin{cases} Y_a = \sqrt{3} Y_{ab} \angle 30^\circ + \sqrt{3} Y_{ca} \angle -30^\circ = \\ Y_{ab} \left(\frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + Y_{ca} \left(\frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ Y_b = \sqrt{3} Y_{bc} \angle 30^\circ + \sqrt{3} Y_{ab} \angle -30^\circ = \\ Y_{bc} \left(\frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + Y_{ab} \left(\frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ Y_c = \sqrt{3} Y_{ca} \angle 30^\circ + \sqrt{3} Y_{cb} \angle -30^\circ = \\ Y_{ca} \left(\frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + Y_{cb} \left(\frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \end{cases} \quad (17)$$

对于电能计量系统,此种负载接法可能不存在。

5.3 TV线电压比差和角差计算

三相三线制电能计量误差分析中,往往需要配置互感器组的线电压比差、角差,因此还需要由单相TV误差求出线电压TV(合成)误差。对V—V型一次接线系统,线电压比差、角差即对应单相TV比差、角差;而对Y—V型接线系统,则有:

$$\begin{cases} f_{ab} = \frac{1}{2} (f_A + f_B) + 0.0084 (\delta_A + \delta_B) \\ f_{cb} = \frac{1}{2} (f_C + f_B) + 0.0084 (\delta_C - \delta_B) \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \delta_{ab} = \frac{1}{2} (\delta_A + \delta_B) + 9.924 (f_B - f_A) \\ \delta_{cb} = \frac{1}{2} (\delta_C + \delta_B) + 9.924 (f_B - f_C) \end{cases} \quad (19)$$

上述公式可通过余弦定理导出。

6 TV误差附加电能计量误差计算

(1) 单相电气系统:

$$\varepsilon_p = f - 0.0291 \delta \tan \Phi \quad (20)$$

(2) 三相四线制电气系统:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{3} [(f_A + f_B + f_C) - 0.0291 (\delta_A + \delta_B + \delta_C) \tan \Phi] \quad (21)$$

(3) 三相三线制电气系统:

$$\varepsilon_p = \frac{f_{ab} + f_{cb}}{2} + \frac{\delta_{cb} - \delta_{ab}}{119.1} + \left(\frac{f_{cb} - f_{ab}}{3.464} - \frac{\delta_{ab} + \delta_{cb}}{68.76} \right) \tan \Phi \quad (22)$$

以上公式依据功率及误差公式可以得出。需说明的是,这里的 Φ 是一次线路的功率因数角,非二次负载阻抗角。可以看出,当线路功率因数为1时(一般都接近), $\tan \Phi = 0$,对单相及三相四线制电气系统,电能误差仅与比差有关,如果在此工作状态下合理调整二次负载阻抗角,使比差小、角差大,则此时电能计量装置误差就会减小。而对三相三线制电气系统,不仅误差、二次导纳计算烦琐,而且其电能误差分析也烦琐。因此对于电能计量方式,采用三相四线制计量方式,无论是对电能计量影响还是误差计算、分析都有突出优点。

7 结束语

依据电磁式TV电路模型通过矢量数学分析方法,提出了一种电磁式TV误差新的建模方法,较之传统复杂的误差建模方法简单、严谨,逻辑性强,是对电磁式TV误差理论的一种完善,并由此对电磁式TV误差的认知会更加清晰。电磁式TV误差各种计算方法是电能计量综合误差分析的基础;测量(计算)二次导纳及空载、额定负载下误差,再计算实际负载误差、合成误差(线电压误差),最终计算、评估互感器产生的附加电能误差。

参考文献:

- [1] GB 1207—2006, 电磁式电压互感器[S]. 北京:中国标准出版社,2006:1-5.
- [2] GB 2900.74—2008, 电工术语 电路理论[S]. 北京:中国标准出版社,2008:1-20.

作者简介:

穆小星(1963),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力计量测试及技术研究工作。

Vector Algebraic Analysis Method for the Errors in Inductive Voltage Transformers

MU Xiaoxing

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute

State Grid Laboratory of Electric Energy Measurement, Nanjing 211103, China)

Abstract: Targeting at the disadvantages of current modelling methods, a vector diagram is adopted to construct and analyze TV error mathematical model in this paper. With the model established using vector diagram, the errors of TV are analyzed systematically and comprehensively. Also, the influence of the TV error on the electric power energy metering is elaborated. It helps technicians of the electric energy metering to know more about TV error theory.

Key words: voltage transformer; ratio error; phase error; impedance phase angle; no-load error; load error; vector algebraic analysis

分布式光伏逆变器并网侧短路暂态特性分析

文 珊¹, 陈 兵²

(1.南京供电公司,江苏 南京 210008;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

摘 要:随着光伏发电的成本降低,越来越多的户用光伏发电系统分散接入配电网,给电网的运行管理带来了一定的风险。文中从分布式光伏并网逆变器的电路拓扑和控制策略出发,对逆变器在不同开关模式下的短路故障的暂态特征进行了分析,研究了不同导通逻辑下短路电流的变化趋势,并对逆变器在不同输出功率、跌落深度和跌落相位角等工况条件下进行了短路试验。试验结果表明,逆变器网侧短路时由于电感两端的磁势失衡,会引起电感电流的瞬时上升,在经过逆变器固有的惯性延迟后,内部的控制环路通过对开关管占空比的调节能够抑制电流的上升,最后由逆变器本体保护动作封锁驱动,不会引起越级跳闸事故。

关键词:光伏发电;逆变器;短路故障;暂态特性

中图分类号: TM615

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)06-0034-04

在能源枯竭、环境污染日益严重的今天,太阳能被认为是一种清洁能源,光伏发电作为替代能源的来源而广泛地被接受,逐渐成为重要的电源形式。光伏发电大规模集中接入和分布式分散接入并举是一种有效利用太阳能的方式。目前,对光伏发电对电网影响的研究主要集中在间歇性出力对大系统运行、同步、稳定的影响^[1-3],以及中小容量并入低压配电网对继电保护、电压稳定性影响等方面^[4-6]。与同步发电机的故障电流不同,光伏电源提供故障电流与逆变器电路结构、控制策略以及闭环调节参数密切相关,光伏电源短路对电网的影响主要取决于光伏逆变器的最大电流和持续时间。对逆变器而言,短路故障会引起端口电压的跌落,从而导致逆变器注入电网电流激增^[7]。这一问题是否对继电保护产生影响,目前尚无定论。

1 逆变器网侧短路过程暂态分析

1.1 单相逆变器网侧短路过程暂态分析

以简单的单相光伏逆变器为例进行分析。在任一开关时刻,逆变器的开关逻辑状态处于双管导通和单管续流2种状态之一,如图1、图2所示。

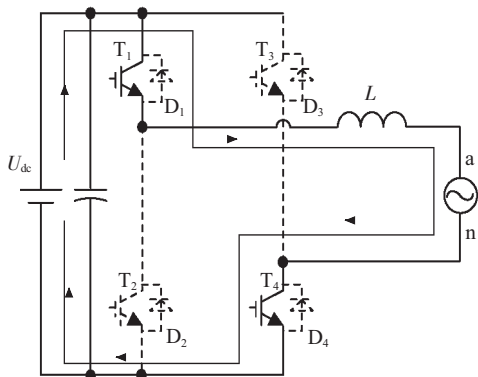


图1 单相逆变器双管导通运行状态

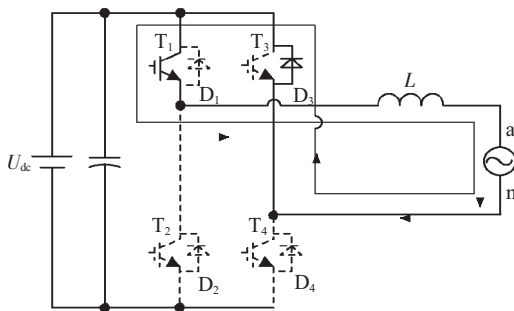


图2 单相逆变器单管续流运行状态

图1所示的双管导通状态的电路状态方程:

$$i_a = i_{a(0)} + \frac{1}{L} \int_t^{t+\Delta t(\text{on})} (U_{dc} - u_{an}) dt \quad (1)$$

从式(1)可看出,在双管导通状态下,故障电流与短路瞬间的初始电流大小、功率管的导通时间长短有关。由于逆变器直流侧电压高于交流侧电压,故障的短路电流呈现增长趋势。

图2所示的单管续流状态的电路状态方程:

$$i_a = i_{a(0)} - \frac{1}{L} \int_t^{t+\Delta t(\text{off})} u_{an} dt \quad (2)$$

从式(2)可看出,在单管续流状态下,故障电流与短路瞬间初始电流大小、续流时间长短以及电网续流两相的相位有关,故障的短路电流初始时刻可增可减。

综上所述,在故障电流产生的第一个开关周期内,故障电流的大小与逆变器开关状态密切相关。尤其是当逆变器为双管导通状态时,开关管导通时间的长短直接影响到故障电流的峰值大小。因此,在故障状态下,逆变器闭环控制系统是否能够及时响应并修正开关管的导通时间,对抑制故障电流峰值与持续时间极为关键。

1.2 三相逆变器网侧短路过程暂态分析

对于三相逆变器,为分析结论的通用性,以常见的采用空间电压矢量调制策略的三相光伏逆变器为例进

行分析。在任意时刻,逆变器的3个桥臂均有一个开关处于导通状态,以图3所示的开关状态为例($u_b < u_a$, $u_b < u_c$),空间电压矢量调制策略可分为5段区间来考虑,如图4中所示的A,B,C,D,E。

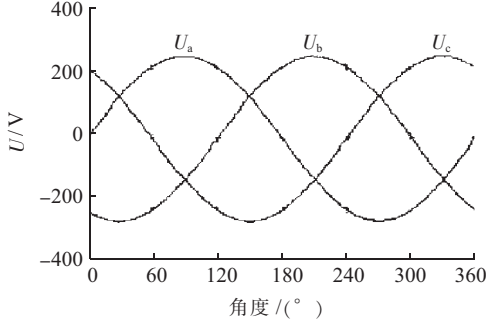


图3 空间矢量调制策略扇区划分示意图

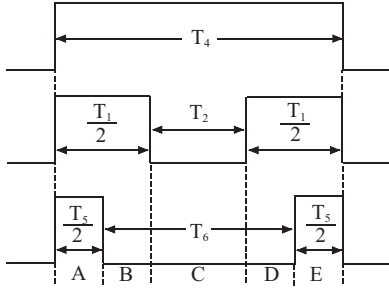


图4 空间矢量调制策略开关导通逻辑示意图

在A,E区间内,逆变器的开关状态相同,电流的流向如图5所示,故障后电流的表达式为:

$$i_a = i_{a(0)} + \int_t^{t+\Delta t} \frac{(U_{dc} + u_b - u_a)}{(L_a + L_b)} dt > i_{a(0)} \quad (3)$$

$$i_c = i_{c(0)} + \int_t^{t+\Delta t} \frac{(U_{dc} + u_b - u_c)}{(L_b + L_c)} dt > i_{c(0)} \quad (4)$$

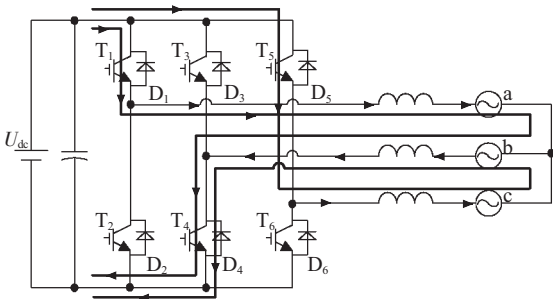


图5 三相逆变器双管导通示意图

从式3、式4可看出,在图5所示的开关状态下短路发生后,故障电流 i_a, i_c 的幅值呈增大趋势。

在B,D区间内,逆变器的开关状态相同,电流的流向如图6所示,故障后电流的表达式为:

$$i_a = i_{a(0)} + \int_t^{t+\Delta t} \frac{(U_{dc} + u_b - u_a)}{(L_a + L_b)} dt > i_{a(0)} \quad (5)$$

$$i_c = i_{c(0)} + \int_t^{t+\Delta t} \frac{(u_b - u_c)}{(L_b + L_c)} dt < i_{c(0)} \quad (6)$$

从式5、式6可看出,在图6所示的开关状态下短

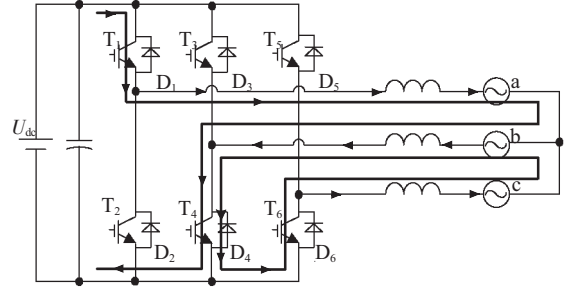


图6 三相逆变器单管续流示意图

路发生后,故障电流 i_a 的幅值呈增大趋势,故障电流 i_c 的幅值呈减小趋势。

在C区间内,逆变器的开关状态相同,电流的流向如图7所示,故障后电流的表达式为:

$$i_a = i_{a(0)} + \int_t^{t+\Delta t} \frac{(u_b - u_a)}{(L_a + L_b)} dt < i_{a(0)} \quad (7)$$

$$i_c = i_{c(0)} + \int_t^{t+\Delta t} \frac{(u_b - u_c)}{(L_b + L_c)} dt < i_{c(0)} \quad (8)$$

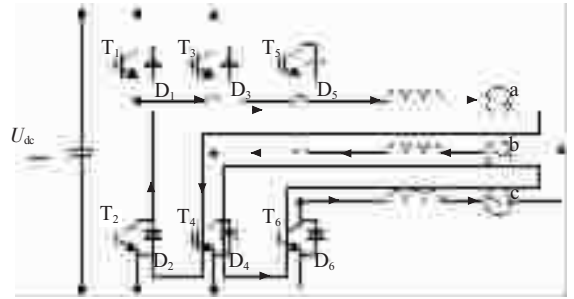


图7 三相逆变器双管续流示意图

从式7、式8可看出,在图7所示的开关状态下短路发生后,故障电流 i_a, i_c 的幅值呈减小趋势。

从上分析可知,三相逆变器的开关状态可视为2个单相逆变器的叠加,在不同的开关状态下,三相逆变器可理解为双管导通和单管续流状态的组合。逆变器出口短路故障发生在不同的时刻,其导通状态也是不一样的,对故障电流的影响也有区别。

2 逆变器电流闭环对暂态冲击电流的影响

三相逆变器中采用最多的就是基于电网定向的矢量控制方法,该方法可实现并网电流的直轴分量与交轴分量的解耦控制,以此控制方法为例展开分析。基于电网定向的矢量控制方法其交直轴电流环结构一致,如图8所示。

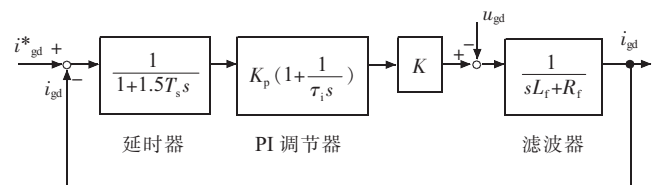


图8 逆变器闭环控制框图

图8中 K 为变换器的等效增益, L_f 为滤波电感; R_f 为滤波电感内阻; 电网电压 u_{gd} 相当于输入扰动信号; 图8中一阶延时环节用于等效电流环信号采样的延迟和 PWM 控制的小惯性特性; T_s 为 PWM 开关周期; K_p, τ_i 分别为电流环 PI 调节器的参数。其开环传递函数为:

$$G_o(s) = \frac{KK_p(1+\tau_i s)}{\tau_i s(L_f s + R_f)(1.5T_s s + 1)} \quad (9)$$

通常, 为保证电流环需要具有良好的电流跟踪性能, 电流环采用典型 I 型系统的设计方法, 按照理想的二阶系统的最佳整定方法对 PI 参数进行计算, 各参数取值为:

$$\tau_i = \frac{L_f}{R_f} \quad (10)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{L_f}{6T_s K K_p}} = 0.707 \quad (11)$$

根据上述计算公式可得图8所示的闭环传递函数:

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{4.5T_s^2 s^2 + 3T_s s + 1} \quad (12)$$

当开关频率足够高时, 可忽略 s 二阶量, 电流内环可近似为惯性环节, 即:

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{3T_s s + 1} \quad (13)$$

式(13)表明, 逆变器的电流环可近似为惯性环节, 其时间常数为 $3T_s$ 。通常分布式光伏发电逆变器的开关频率在 10 kHz 左右, T_s 为 0.1 ms。

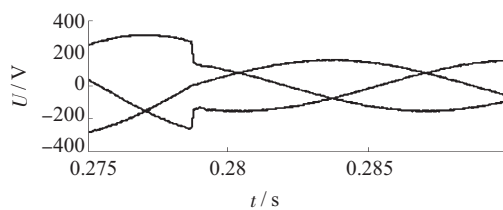
从物理意义上来看, 在逆变器并网侧发生短路时, 电感两端电压突变引起磁势失衡, 并网电流突然增加, 逆变器的控制环节检测到电流突增后, 闭环控制系统会迅速降低占空比, 从而抑制并网电流增加。

3 试验研究与分析

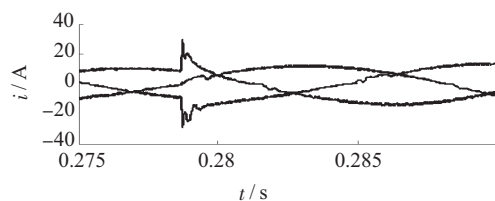
为进一步验证上文的分析, 利用程控交流源作为模拟电网, 交流源输出电压的突变模拟逆变器网侧的短路故障。为便于分析, 将交流源突降的初始相位角设置为 0° 时(相对于 A 相)发生三相对称跌落, 光伏出力为 5 kW, 4 kW, 2.5 kW, 1 kW 不同工况下进行了试验, 试验数据如表 1 所示。光伏逆变器 5 kW 出力时 20% 跌落的试验波形如图 9 所示。

表 1 不同输出功率在 20% 跌落深度的试验数据 A

实验组别	冲击电流峰值
逆变器功率 5 kW	29.77
逆变器功率 4 kW	27.37
逆变器功率 2.5 kW	25.91
逆变器功率 1 kW	22.81



(a) 三相电网电压



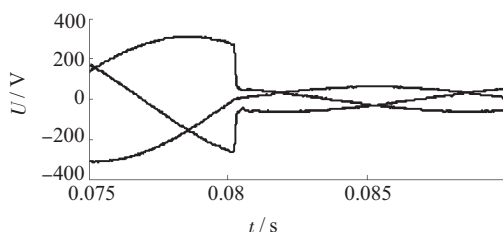
(b) 逆变器输出电流

图 9 逆变器 5 kW 输出 20% 跌落的试验波形

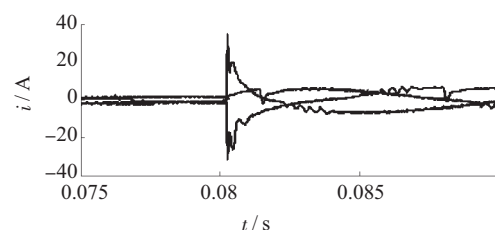
从试验结果可看出, 逆变器在不同工况下的短路冲击电流大小不同。由于短路时刻的初始电流由逆变器输出功率决定, 因此输出功率越大冲击电流也越大。受内部控制参数的影响, 试验的冲击电流峰值出现的时刻均在短路故障发生 0.2 s 后, 且持续的时间几乎都是相同的。短路冲击电流的大小与电压跌落深度也密切相关。在光伏输出功率 1 kW 的条件下, 分别进行电压跌落深度为 80%, 60%, 40% 和 20% 的试验, 冲击电流大小与跌落深度之间的关系如表 2 所示。跌落深度为 20% 的试验波形如图 10 所示。

表 2 相同输出功率不同跌落深度的试验数据 A

实验组别	冲击电流峰值
跌落至 80%	13.43
跌落至 60%	17.55
跌落至 40%	21.93
跌落至 20%	22.59



(a) 三相电网电压



(b) 逆变器输出电流

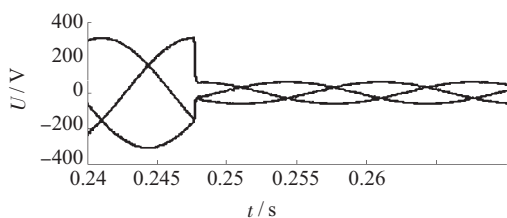
图 10 逆变器 1 kW 输出 20% 跌落的试验波形

从试验结果可以看出, 逆变器跌落深度不同短路冲击电流大小也不同。逆变器短路冲击电流大小与网

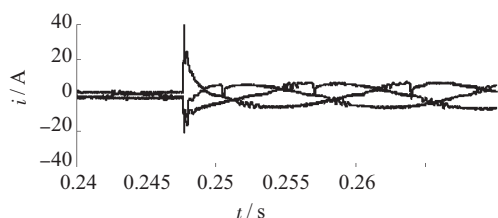
侧故障点的距离密切相关,故障点越远,冲击电流小。受内部控制参数的影响,试验的冲击电流峰值同样出现的时刻均在短路故障发生 0.2 s 后,且持续的时间几乎都是相同的。根据对逆变器开关管导通逻辑的分析可以得出短路时刻相位角与短路电流大小也密切相关。在光伏输出功率 1 kW 的条件下,分别进行了 A 相电压相位角在 0° , 18° , 36° , 54° , 72° , 90° 的条件下进行跌落深度为 20% 的试验, A 相冲击电流大小与跌落深度之间的关系如表 3 所示。跌落深度为 20% 的试验波形如图 11 所示。

表 3 不同相位角下跌落试验数据 A

实验组别	冲击电流峰值
0°	0
18°	26.75
36°	23.72
54°	32.44
72°	37.49
90°	38.87



(a) 三相电网电压



(b) 逆变器输出电流

图 11 逆变器在 90° 时电压跌落 20% 的试验波形

从试验结果可看出,逆变器短路故障发生时刻的相位角与电流的大小也有影响。对于三相对称短路故

障而言,冲击电流的最大值发生在 90° 相角处,偏离 90° 相角越远,冲击电流越小。受内部控制参数的影响,试验的冲击电流峰值同样出现的时刻均在短路故障发生 0.2 s 后,且持续的时间几乎都是相同的。

4 结束语

(1) 逆变器的冲击电流的大小与输出功率、电压跌落深度与跌落相位角密切相关;

(2) 针对逆变器网侧不同短路故障,冲击电流峰值出现的时刻与持续的时间几乎都是相同的,主要受内部控制参数的影响;

(3) 单一逆变器网侧短路电流尖峰持续的时间很短,对继电保护没有影响。多台逆变器同时发生短路故障时,由于内部控制参数的一致性,其暂态特征需更进一步分析。

参考文献:

- [1] 李卫良,黄 堃,陈 璐,等.采用可控负荷平滑光伏发电功率波动的需求响应策略[J].江苏电机工程,2014,33(2):40-43.
- [2] 王 晓,罗 安,邓才波,等.基于光伏并网的电能质量控制系统[J].电网技术,2012,36(4):68-73.
- [3] 刘东冉,陈树勇,马 敏,等.光伏发电系统模型综述[J].电网技术,2011,35(8):47-52.
- [4] 李宁峰,于国才.屋顶太阳能光伏发电系统的设计[J].江苏电机工程,2012,31(3):43-45.
- [5] 王立娜,周克亮,卢闻州,等.离网型组合蓄能光伏发电系统[J].江苏电机工程,2009,28(S1):53-57.
- [6] 刘 伟,彭 冬,卜广全,等.光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J].电网技术,2009,33(19):1-6.
- [7] 刘 健,林 涛,同向前,等.分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析[J].中国电机工程学报,2013,37(8):1-6.

作者简介:

文 珊(1987),女,江西萍乡人,助理工程师,从事电力市场及大客户

陈 兵(1977),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力电子技术、

新能源发电技术、电能质量技术等方面的研究工作。

Analysis on Transient Characteristics of the Distributed Photovoltaic Inverter in the Grid Side Short-circuit

WEN Shan¹, CHEN Bing²

(1.Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008,China;

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

Abstract: Photovoltaic (PV) generation is widely accepted as an alternative energy for its gradually reducing cost. The increasing number of PV stations integrated into distribution grid brings a challenge to the grid operation. In this paper, based on the control strategy and the circuit topology of PV inverter, electromagnetic transient characteristic of the PV inverter short-circuit was studied theoretically. The short current changing trend under different switching states was studied. Besides, three short current experiments have been done under different output power, voltage drop depth and voltage angel. The experimental results show that the inverter inner closed loop controls can inhibit rush current. Moreover, the inverter self-protection action would block driving signal so as the bypassing trip accident wouldn't be caused.

Key words: PV generation; inverter; short -circuit accident; transient characteristic

智能电能表小电量走字原因分析及抑制方法

田正其,纪 峰,徐 晴,金 萍
(江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

摘 要:随着工业技术水平的不断提高,智能电能表现场运行环境日益复杂,其准确可靠运行受到了越来越大的挑战,少数智能电能表现场运行时出现小电量走字的情况,文中对此现象进行了原因分析,并从硬件、软件及现场安装等多个方面提出了抑制方法,试验结果证明抑制方法有效可行。

关键词:智能电能表;小电量;空载;防潜

中图分类号:TM933.4

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0038-04

智能电能表作为电能交易系统中的终端计费装置,以其计量精度高、数据实时查询、电能量存储、抄表时间冻结、开表盖等窃电事件记录、信息远程传送等先进功能特性正在逐步代替传统老式电能表。智能电能表的计量准确度直接关系到广大用户与供电公司的切身利益。智能电能表推广试点应用期间,极少部分用户反应现场新安装的表计,偶尔会出现小电量走字现象。通过用电信息系统对用户的电量进行统计分析^[1],可及时发现并排除空载小电量走字的现象。

1 智能电能表计量原理分析

智能电能表通过准确地提取用户侧的电压、电流信号,经中央处理器的运算完成电能计量。电压信号普遍采用精密电阻分压的方式实现信号的变换,电流信号常常采用锰铜分流式电流传感器的方式实现信号变化。单相智能电能表原理框图如图 1 所示。锰铜分流器其本质为一种阻抗很小的精密电阻,串接在待测电流信号回路中,当锰铜分流器上有电流信号通过时,利用欧姆定律:

$$u_i(t) = i(t) \times R \quad (1)$$

通过测量分流器两端上的电压降 $u_i(t)$,则电能表在 $u(t)$ 工作电压下,电能计量公式为:

$$W = \int_0^T u(t) \frac{u_i(t)}{R} dt \quad (2)$$

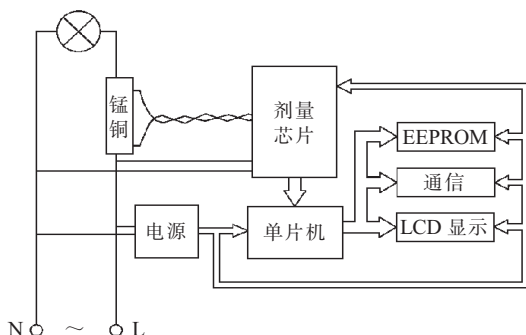


图 1 单相智能电能表原理框图

2 智能电能表小电量走字原因分析

现场安装的智能电能表出现小电量走字,其可能性为现场存在某些隐蔽的用电装置导致小电量走字、电能表被某些干扰信号干扰从而导致小电量走字或其他某些原因。

2.1 某些隐蔽用电导致小电量走字

(1) 电能表是否真的处于“空载”状态,日常生活中用户对节能知识缺乏系统了解,对很多用电细节不够关注。比如关闭电视不关闭电源、关闭电脑不关闭显示器等不注意的细节,导致“空载”时有小电量走字。且对一些常用办公及家用电器,做外部电源接入情况下待机功耗的测试,测试数据如表 1 所示。

表 1 常用办公及家用电器待机功耗 W

序号	电器名称	设备待机功率 P
1	某品牌投影仪	4.4
2	某品牌传真机	1.9
3	某品牌洗衣机	0.8
4	某品牌微波炉	1.6
5	某品牌电磁炉	0.6
6	某品牌热水器	2.2

从表 1 实际测量数据可得,所测试的电器在外部电源接入,电器电源开关关闭工况下仍均处于微功耗的状态下。以某品牌微波炉举例,在电源接入,微波炉电源关闭的情况下,根据电能计量公式:

$$W = P \times t \quad (3)$$

可以算出每个月产生的电量为:1.152 kW·h。智能电能表计量的高灵敏度有利于引导用户的节能意识,对于长期不使用的电器应尽量拔掉其电源线,使电器处于真正的关闭状态。

(2) 传统的楼道公共用电设备如每层的楼道灯、应急灯、可视对讲门铃等,均采用加装一个公共用电电能表来计量,所产生的电费按月或年平均分到每个住户中,定时由物业管理人到用户家中收取。但常常出

现收取困难的现象,为避免这类现象发生,很多小区开始安装使用公用电均分器来平均分配公用电能。公用电均分器通过复杂的功率计算程序,无须单独装设公共用电能表,即可将楼道公共设备用电的电量,按功率自动地平均分配到每一个住户的电能表中,由供电局直接收取,从而避免了物业管理人员挨户上门收取电费的繁琐之事,减少物业管理公司与住户之间的矛盾。一种公用电均分器工作原理图如图2所示。公用电均分器通过多路继电器开关并连接到楼道每个用户的智能电能表的出线端,可根据公共用电的情况,智能切换计费所用的电能表,保证每只电能表所计电量均等。

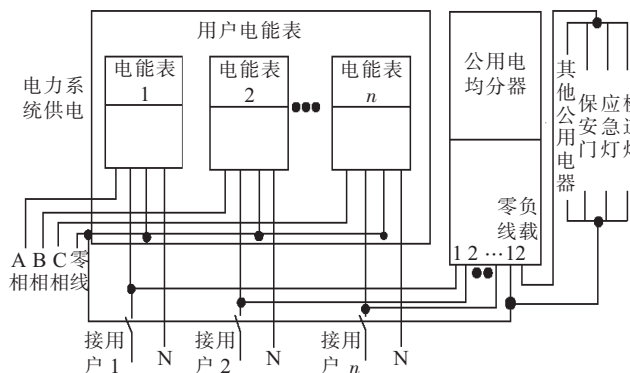


图2 公用电均分器接线

因此,如图2中所示的楼道灯、应急灯、保安门等公共用电设备的电能会平均分配到每一个用户,使得用户的电能表每天或每周会出现小电量走字的现象,属于正常现象。

2.2 绝缘引起

有些用户,电线老化、破损,相互绝缘不好,或是家里某个线路通过的地方很潮湿,在这种情况下,可能会出现线路漏电引起电能表的空载小电量走字。家用电器、电能表组成回路的等效示意图如图3所示。

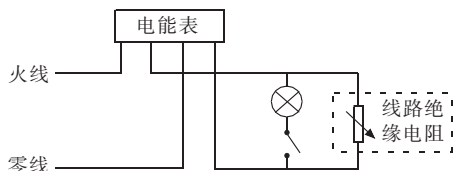


图3 漏电计量等效电路

图3中线路绝缘电阻 R 正常情况下为无穷大,根据公式:

$$E = \int_0^T \frac{u^2(t)}{R} dt \quad (4)$$

可以知道, R 为无穷大时 E 没有能量累计;一旦线路绝缘出现问题,即等效电阻 R 不是无穷大, E 就有微弱电量累积,进而反映在电能表上造成空载时小电量走字。此种情况下,应把整个线路或故障部分线路进行更新,避免微弱漏电导致小电量走字,并提高用电的安全性。

2.3 外部干扰导致

随着社会经济的发展,使用电能作为动力的设备越来越多,特别是各种大功率非阻性设备的投入使用,导致电能表现场运行的环境越来越恶劣,部分地区谐波干扰很严重、部分地区工频磁场干扰严重等等,这些干扰可能造成智能电能表空载小电量走字。

2.3.1 工频磁场干扰

如前所述,国内单相智能电能表通常使用锰铜分流器做电流信号传感器^[2],锰铜分流器的连接方式如图4所示。

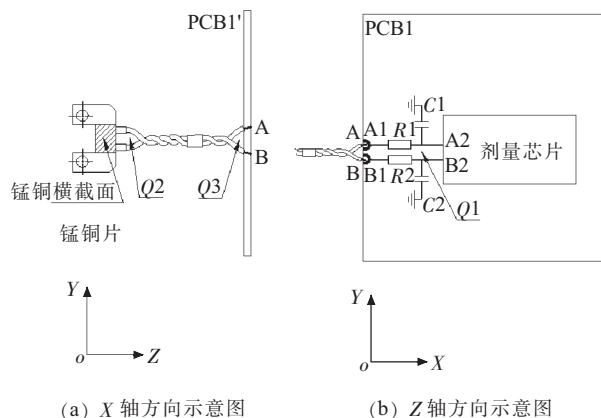


图4 现有锰铜分流器的设计及连接方式

从图4可以看出,该连接方式在 X 轴方向形成围合区域 $Q2$ 和 $Q3$,在 Z 轴方向形成围合区域 $Q1$ 。根据法拉第电磁感应定律可知,当 X 轴方向存在交变磁场,围合区域 $Q3$, $Q2$ 及锰铜横截面均会产生感应电动势,当 Z 轴方向存在交变磁场,围合区域 $Q1$ 会产生感应电动势,从而产生感应电流,在该感应电流的作用下电能表会出现微弱电量。此感应电流的大小取决于交变磁场的大小与围合区域的面积^[3]。

变压器漏磁通在锰铜分流器两端感应的电压,可用如下函数表达式描述^[3]:

$$\Delta u = f(S, L_g, i_{rms}, C) \quad (5)$$

式(5)中: S 为闭合线圈包围的面积, m^2 ; L_g 为空气气隙长度; i_{rms} 为变压器线圈电流有效值; C 为锰铜离变压器的距离。

当变压器靠近锰铜时(即 C 变小),感应电压就会变大。当某用户未用电时,由于电能表中的电流采样回路受到自身变压器漏磁或其他工频磁场的影响,电能表中产生的能量根据式(2)和式(5)可得:

$$E = \int_0^T u(t) \frac{f(S, L_g, i_{rms}, C)}{R} dt \quad (6)$$

随着时间的增加,即 T 变大,电能 E 逐渐累积,当累积到一定程度时电能表就会产生小电量走字。

2.3.2 干扰来源分析

(1) 自身变压器漏磁。智能电能表的电源部分常

采用以硅钢片为铁心的变压器,由于制造工艺及成本原因,这种变压器在工作时不可避免的会产生漏磁。若在设计电能表时变压器与电流采样回路处理不当,会造成电能表出现微弱的电量递增。

(2) 临近电能表或Ⅱ型采集器的漏磁。变压器漏磁除了对电能表自身有影响外,一旦电能表之间的距离太近,当距离小于2 cm时,就会对附近的电能表产生影响,导致小电量走字。旁侧表漏磁影响示意图如图5所示。

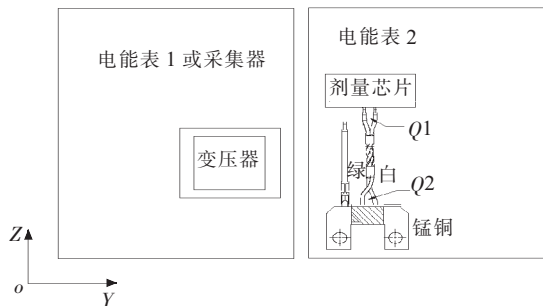


图5 旁侧表漏磁影响示意图

从图5可以看出电能表的变压器的漏磁会对电能表2的计量产生影响。另外,随着用电信息采集系统的普及,Ⅱ型采集器被大量使用,Ⅱ型采集器紧贴着电能表安装于右侧,Ⅱ型采集器漏磁同样会导致电能表出现小电量走字^[4]。

(3) 现场布线不合理。电能表安装中,现场走线不合理,当其他用户的大电流导线或表箱的进线经过某无负载用户电能表时,因大电流感应出的工频交变磁场会导致无负载用户电能表出现小电量走字。如图6所示中,电能表左侧有大电流导线通过,可以看出大电流感应出的工频磁场会导致电能表锰铜采样电路产生感应电流,导致小电量走字。

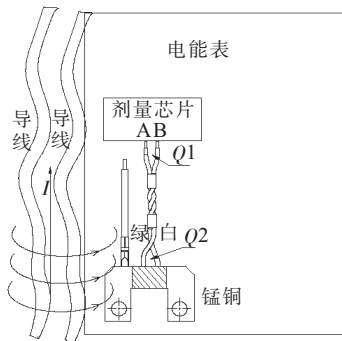


图6 布线不合理影响计量示意图

2.3.3 试验验证

(1) 实验室项目测试。为验证工频磁场导致智能电能表出现小电量走字的这一原因,本文选取了6个不同厂家的智能电能表分别按照技术规范完成了工频磁场试验,试验结果如表2所示。

由以上试验可以看出,所选择的电能表正面0.5 mT工频磁场影响试验符合技术规范要求,而技术规

表2 工频磁场影响试验 (imp·h⁻¹)

项目 \ 厂家	厂家1	厂家2	厂家3	厂家4	厂家5	厂家6
正面 0.5 mT	0	0	0	0	0	0
侧面 0.5 mT	5	1	0	8	1	2
侧面 0.4 mT	5	0	0	4	0	1
侧面 0.3 mT	5	0	0	4	0	2

范未规定的侧面在工频磁场作用下受到一定的影响。这一试验可以看出,漏磁、布线不合理导致的工频磁场干扰,会对极少部分电能表造成小电量走字。

(2) 电能表安装现场测试。为进一步验证前面的理论分析及实验室的试验,且到电能表安装现场对实验室试验过程中影响较大的厂家4的表计进行了相关测试分析。该电能表与本楼其他电能表安装在一起,该电能表左侧紧贴供电母线,通过高斯计测得电能表左侧磁场最小值为0.15 mT,但磁场变化较大,5 min内磁场峰值多次达到0.5 mT以上(约2次/min),每次维持3 s左右,即每天0.5 mT磁场出现的时间有144 min(2.4 h),结合实验室试验结果,电能表侧面在0.5 mT工频磁场影响下脉冲频率约为8 imp/h,则144 min的0.5 mT工频磁场影响可使电表走字为:

$$W = \frac{n}{C_0} = \frac{8 \times 2.4}{1200} = 0.016 \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (7)$$

计算结果与用电信息采集系统数据基本一致。用电信息采集系统中查询到每日用电量均在0.01 kW·h左右。所以这只电能表的小电量走字现象是由于周围供电母线线路产生的磁场引起的。

3 解决措施

通过以上分析可知,智能电能表出现小电量走字主要由隐蔽用电、现场磁干扰造成。解决隐蔽用电一方面需要养成良好的用电习惯,另外一方面需要根据现场具体情况进行排查,对症下药。现场磁干扰可以通过如下改进措施,来避免现场运行的智能电能表出现小电量走字。

3.1 提高智能电能表抗扰能力

3.1.1 智能电能表硬件设计方面的优化

(1) 根据变压器的设计原理以及漏磁产生的机理,变压器的设计可以从变压器的铁心选材、线圈绕制方式、屏蔽等方面来优化变压器的设计,减小变压器的漏磁通^[5]。

① 选用导磁性能更好的铁心材料,增加铁心对磁力线的束缚;通过改变变压器的铁心材料,变压器的漏磁会得到明显的改善。

② 非晶态合金作为在性能上优于传统材料的新材料主要是利用磁旁路原理来引导场源所产生的电

磁能流使它不进入空间防护区。可以采用非晶态合金完成变压器的屏蔽^[6]。

(2) 若要控制此类交变磁场干扰信号的等级在电能表安装布线及电能表设计时可以从以下方面进行优化:改进锰铜分流器设计、安装工艺、PCB 布线可有效抑制该类干扰,主要的原则是尽量缩小 $Q1, Q2, Q3$ 的围和面积,对于 $Q1$ 可通过 PCB 板布线设计尽量缩小其有效面积,对于 $Q3$ 可要求安装工艺绕紧电流信号采样线尽量缩小其有效面积,对于 $Q2$ 及锰铜横截面可通过采用新型的穿孔型锰铜分流器使得 $Q2$ 和锰铜横截面在交变磁场下产生的感应电动势相互抵消。新型锰铜分流器的设计如图 7 所示。

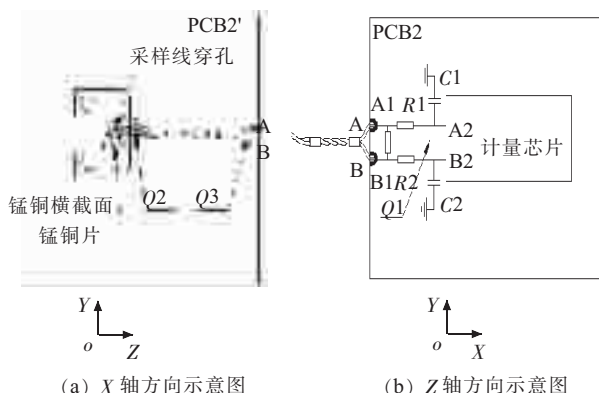


图 7 新型穿孔型锰铜分流器的设计及连接方式

3.1.2 提高智能电能表软件抗扰能力

(1) 电能表性能规范中对电能表的起动和潜动性能有明确要求,即要求在 $0.004I_b$ 起动电流条件下,仪表应能起动并连续记录电量;当电能表只加电压,电流线路无电流时,其测试输出不应产生多于一个的脉冲。电能表起动、潜动性能的考核主要在于功率阈值的合理设置,一般情况下设置为起动功率的 50%,当实际功率大于功率阈值时,电能表开始计量,但在工况下时常存在各干扰源的干扰,这些干扰一旦大于功率阈值(如图 8 所示),电能表亦会进行计量,长时间积累也会出现微小电能,从而产生电量脉冲。因此功率阈值的合理设置,需考虑电能表内部存在固有的干扰信号,其主要来源于变压器的漏磁,DC/DC,AC/DC 电源对外辐射对信号传感器的影响,实际的功率阈值设置值应为理论功率阈值设置值与固有干扰等级的总和。固有干扰等级因变压器等器件的一致性因素存在一定的差异,因此在设置功率阈值时应对电能表逐只设置,切勿按统一数据设置。功率阈值的合理设置如图 9 所示。

(2) 通常情况下,在受到工频磁场干扰时,电能表功率因数会不断变化,因此可以通过软件进行自动判断剔除;当电能表采样电流小于一定值(起动阈值)且功率因数在反复变化,则认为电能表此时处于工频干扰状态,电能表起动相应的防潜措施。

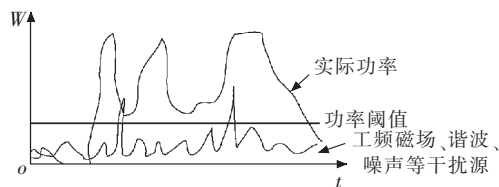


图 8 功率阈值的设置

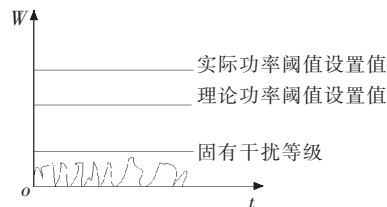


图 9 功率阈值的合理设置

3.2 优化智能电表现场安装环境

根据试验,表与表之间的距离达到 5 cm 以上,漏磁对附近电能表的影响将微乎其微^[3],因此现场安装时应保证电能表与电能表、电能表与采集器之间的安装距离大于 5 cm,电能表附近不要有其他用户大电流的走线经过。另外,还可以选择防工频磁场干扰的多用户电表箱,如专利为 CN2708321 Y 的表箱,采用屏蔽结构,能有效地防强电磁干扰,避免用户间电能表采集的相互影响,保证了智能电能表计量的准确性。

4 结束语

本文从智能电能表的计量原理出发,分析了各种可能导致表计小电量走字的原因,并给出了几种解决措施。通过试验证明,优化设计电能表、优化现场安装方式等对应的改进措施可以避免出现小电量走字。

参考文献:

- [1] 钱立军,李新家.用电信息采集系统中数据比对功能的实现及应用[J].江苏电机工程,2013,32(2):64-65.
- [2] 肖 迁.基于分流式电流传感器的三相智能电能表设计[D].长沙:湖南大学,2011:5-6.
- [3] 徐 晴,纪 峰,黄奇峰,等.变压器漏磁对锰铜采样电能表计量误差影响的研究[J].电测与仪表,2012,49(8):66-70.
- [4] 金 萍,田正其,鲍 进,等.Ⅱ型采集器接入电力系统对电能表的影响分析[J].江苏电机工程,2013,32(5):59-61.
- [5] 陈邓伟,韩金华.基于磁屏蔽原理的变压器漏磁研究与分析[J].技术与应用,2012(6):69-72.
- [6] 冯 猛,张羊换.非晶态合金在电磁屏蔽领域中的应用现状[J].金属功能材料,2005,12(3):26-30.

作者简介:

田正其(1987),男,江苏南通人,工程师,从事计量检测工作;
纪 峰(1981),男,江苏淮安人,高级工程师,从事计量检测工作;
徐 晴(1973),女,江苏南通人,研究员级高工,从事电磁测量与仪表工作;
金 萍(1969),女,江苏南京人,工程师,从事电能计量工作。

(下转第 44 页)

江苏电网降损潜力和实现途径方法分析

安海云¹, 周前¹, 周琪²

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

摘要:线损率是电力企业的一项重要综合性技术经济指标,它反映了一个电力网的规划设计、生产技术和运营管理水平。为纵深推进线损精益化管理工作,需要开展降损潜力和实现途径方法的研究工作。文中通过对电网结构、线损现状、线损存在问题、降损因素以及重损线路高损原因等方面的分析,结合目前开展的线损理论计算分析工作提出了江苏电网降损目标、措施和建议,为线损管理提供强有力的理论支持。

关键词:线损率;管理线损;技术线损;降损;重损

中图分类号:TM721

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0042-03

线损率指标是电力企业的一项重要综合性技术经济指标,它反映了一个电力网的规划设计、生产技术和运营管理水平,线损管理的范围贯穿了电网规划设计、设备选型、调度运行、技术改造、计量管理、营销管理等全方面^[1,2]。

1 线损基本理论

线损是电能传输过程中所产生的电能损耗。电力系统电能损失率的构成示意图^[3]如图 1 所示。

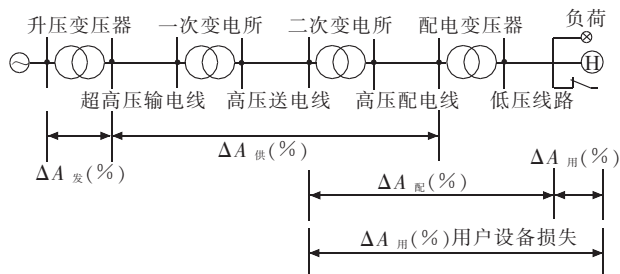


图 1 电力系统电能损失率的构成示意图

广义电力系统的总损失率为:

$$\Delta A_{\text{总}}(\%) = \Delta A_{\text{发}}(\%) + \Delta A_{\text{供}}(\%) + \Delta A_{\text{用}}(\%) \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta A_{\text{发}}(\%)$ 为发电机、升压变压器、厂用电变压器及其他电气设备的电能损失和厂用电消耗; $\Delta A_{\text{供}}(\%)$ 为超高压输电线路、一次变电所、高压送电线路、二次变电所及高压配电线路等的电能损失; $\Delta A_{\text{用}}(\%)$ 为用户变电所、配电线路、配电变压器及用电设备等的电能损失。

线损按照损耗特点分为不变损耗(或固定损耗)和可变损耗。不变损耗(或固定损耗)大小与负荷电流的变化无关,与电压变化有关。如变压器、互感器、电动机、电能表铁心的电能损耗,以及高压线路的电晕损耗、绝缘子损耗等。可变损耗是电网各元件中的电阻在通过电流时产生,大小与电流的平方成正比。如电力线路损耗、变压器线圈中的损耗。

1.1 输电线路的损耗

当负荷电流通过线路时,在线路电阻上会产生功率损耗。单一线路有功功率损耗:

$$\Delta P = I^2 R \quad (2)$$

式(2)中: ΔP 为损失功率,W; I 为负荷电流,A; R 为导线电阻, Ω 。

三相电力线路如图 2 所示。

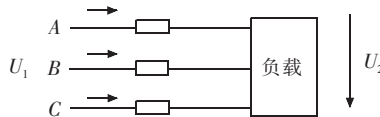


图 2 三相电力线路图

图 2 中三相线路的有功损耗为:

$$\Delta P = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C \quad (3)$$

式(3)中: ΔP_A , ΔP_B , ΔP_C 分别为 A, B, C 三相的有功功率损耗,对于每相来说,情况同单一线路的有功损耗。

1.2 变压器损耗

变压器损耗分为铁损(空载损耗)和铜损(负载损耗)两部分。铁损是固定的,与负载电流无关。铜损与变压器负载率的平方成正比。变压器损耗为:

$$\Delta P_B = P_0 + \left(\frac{I}{I_e}\right)^2 P_T \quad (4)$$

式(4)中: P_0 为变压器空载损耗,kW; P_T 为变压器短路损耗功率,kW; I_e , I 分别为变压器的额定电流和负载电流,A。

2 江苏电网基本情况

截止 2013 年底江苏全省装机总容量为 7532 万 kW,年均增长 8.44%。35 kV 以上变电总容量为 32 147 万 kV·A,输电线路总长度 63 142 km;10 kV 配变容量 7172 万 kV·A,配电线路总长度 135 536 km。从分压售电量比重来看,2013 年度江苏 10 kV 及以下到户售电量占总售电量的 49.15%,同比上升 5.72 个百分点;35 kV 售电量比重为 7.62%,同比下降 1.61 个百分点;

110 kV 售电量比重为 13.43%, 同比下降 1.73 个百分点; 220 kV 售电量比重为 29.8%, 同比下降 2.38 个百分点。

3 线损现状分析

3.1 管理线损现状

(1) 近年来江苏电网综合线损率逐年稳步下降, 但分月线损率波动较大。线损波动主要集中在季节交替或逢长假的月份。按季分月下达线损率计划, 并严格执行抄表制度的做法, 可提高月末零点的抄见率, 避免出现线损率异常波动现象^[4]。

(2) “十一五”以来, 220 kV 等级的线损率呈下降趋势, 110 kV 和 35 kV 等级线损率基本持平, 10 kV 等级线损率呈上升趋势; 损失电量方面, 220 kV 等级损失电量占比呈下降趋势, 这主要是因为江苏省电网 220 kV 分区增加, 供电半径减小, 再加上调度经济运行, 220 kV 等级损失电量占比不断下降。

3.2 技术线损现状

(1) 自 2006 年以来, 为全面掌握公司各级电网的运行和损耗情况, 进一步加强技术线损分析与控制, 提高电网经济运行管理水平, 每年选取一至三个典型负荷代表日进行线损理论分析计算。通过对重损线路、三相负荷不平衡率、无功补偿等对线损影响方面的重点分析, 找出存在的问题并且针对问题提出降损措施及建议, 给降损工作提供理论支持。

(2) 中低压重损线路的长期存在必将导致电网的高损耗率^[5], 截止 2013 年底 110 kV 重损线路 22 条, 35 kV 重损线路 92 条, 10 kV 重损线路 504 条。

(3) 在低压三相四线制的供电系统中, 用户多为单相负荷或单、三相负荷混用, 三相间的不平衡电流导致了低压供电系统三相负载的长期性不平衡。当中性线电流超过一定值, 中性点偏移必然导致一相或两相电压超标^[6]。

(4) 当电力网中某一点增加无功补偿容量后, 则从该点至电源点所有串接的线路及变压器中的无功潮流都将减少, 从而使该点以前串接元件中的电能损耗减少, 达到降损节电和改善电能质量的目的。目前全省 220 kV 变电站并联电抗器配置容量为 1 832.8 Mvar, 感性配置系数仅为 1.56%, 80% 以上的 220 kV 变电站未配置感性补偿装置。220 kV 变电站感性无功补偿容量不足, 部分地区倒送无功现象时有发生。

4 降损潜力分析

4.1 电力发展预测

根据目前江苏省经济社会发展的态势, 预计“十二五”期间江苏省的 GDP 增长率比“十一五”期间有所降

低, 预计 2014 年、2015 年江苏省全社会最大用电负荷同期增长率分别为 9.61%, 6.98%; 售电量增长率分别为 6.70%, 4.93%; 线损率相对较低的大工业和非、普工业售电量增长幅度低于总售电量增长的幅度, 而居民及商业用电等线损率相对较高的售电量增长幅度高于总售电量增长的幅度。

4.2 降损潜力分析

(1) 江苏电网规划目标追求的是以总体最少的资源代价谋求远景发展及其发展途径的最优。“十二五”期间, 苏北 500 kV 电网结合电源建设, “分阶段推进”, 形成结构合理、利于区外电源接入、送出的“送端系统”; 苏南 500 kV 电网“分层次优化”, 结合江苏北电南送、华东电力交换、区外交直流及特高压落点等因素, 充分优化电网结构, 提高输电能力和安全可靠。初步估算, 通过电网网架建设和完善, 潮流优化后可降低网损约 0.05 个百分点。

(2) 在输送负荷不变的情况下, 进行线路的扩径改造, 减少线路电阻可以达到降损节电效果。线路改造后的节电量 $\Delta(\Delta E_L)$ 为:

$$\Delta(\Delta E_L) = \Delta E_L - \Delta E'_L = \Delta E'_L \left(\frac{R'}{R''} - 1 \right) \quad (5)$$

式(5)中: $\Delta E'_L$ 为线路电能损耗, kW·h; R' 为改造前导线电阻, Ω ; R'' 为改造后导线电阻, Ω 。

根据式(5)初步测算, 中低压电网改造将可使公司线损率每年下降 0.1~0.15 个百分点。

(3) 当电力网中某一点增加无功补偿容量后, 则从该点至电源点所有串接的线路及变压器中的无功潮流都将减少, 从而使该点以前串接元件中的电能损耗减少, 从而达到降损节电和改善电能质量的目的^[7]。补偿后电网的节电量为:

$$\Delta(\Delta A) = \sum_{i=1}^m [\Delta A_i (1 - \frac{\cos^2 \Phi_{i1}}{\cos^2 \Phi_{i2}})] - t Q_c \lg \delta \quad (6)$$

式(6)中: ΔA_i 为各串接元件补偿前的损耗电量, kW·h; $\cos \Phi_{i1}$ 为补偿前各串接元件负荷的功率因数; $\cos \Phi_{i2}$ 为补偿后各串接元件负荷的功率因数; t 为无功补偿设备的投运时间, h; Q_c 为无功补偿容量, kvar; $\lg \delta$ 为电容器的介质损耗角正切值, 以出厂值为准。

根据式(6)初步测算, 优化电网无功电压运行水平将可使公司线损率每年下降 0.1 个百分点。

(4) 按照不同台区月均配电量的台数和容量确定配变的平均容量, 依据三相不平衡率的分段(取分段的中值), 依次计算出不同不平衡率的损耗系数, 按照调整负荷后三相不平衡率小于 15% (进入合理区间) 的损耗系数, 可得三相负荷调整后的节电量为:

$$\Delta(\Delta A) = (K_1 - K_2) \Delta A_{av} \quad (7)$$

式(7)中: K_1 为不同不平衡率的损耗系数; K_2 为按照调整负荷后三相不平衡率小于15%(进入合理区间)的损耗系数; ΔA_{av} 为不同台区月均配电量计算的平均配变容量和负载率下的平均年损失电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

根据式(7)初步测算,中低压电网改造将可使公司线损率每年下降0.05个百分点。

(5) 营销降损技术包括强化电能计量工作管理;加大计量技术改造投资力度,提高计量准确性;加大营销稽查工作力度;加强反窃电管理工作;加强对电力客户用电负荷需求的预测等。预计线损率可每年降低0.05个百分点。

初步估算,上述各降损因素可使公司线损率每年下降约0.4个百分点。

6 结束语

基于对江苏电网结构、线损现状、重损线路、三相负荷不平衡等方面的分析,分别从加强电网结构、线路扩径改造、增加无功补偿配置、调整三相负荷不平衡、加强营销手段等5个方面进行降损潜力分析,初步测算出公司线损的最大降损空间,为线损管理提供强有力的理论支持。

参考文献:

- [1] 袁建梅. 电力企业线损管理现状及改进对策[J]. 电源技术应用, 2013, 02(6): 31-34.
- [2] 王琳琳, 李 钧. 供电企业线损管理存在的问题及对策分析[J]. 科技创新与应用, 2012, 12(8): 132-134.
- [3] 贵州电力试验研究院, 华北电力科学研究院有限责任公司. ISBN 7-5083-3204-0 电力降损节能手册[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 94.
- [4] 吴雪花. 应用于月度用电量预测的小波分析法[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(2): 8-11.
- [5] 刘 健, 段璟靓. 配电网极限线损分析及降损措施优化, 电力系统保护与控制[J]. 2013, 12(41): 27-35.
- [6] 李 萍. 配电变压器三相负荷不平衡对低压线损率的影响[J]. 黑龙江科技信息, 2009, 29(2): 62-63.
- [7] 周文俊, 吴 熙, 施伟成. 电力系统无功优化算法性能比较及分析[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(4): 24-27.

作者简介:

安海云(1981), 女, 河北石家庄人, 博士, 从事电力系统仿真及技术线损研究工作;
周 前(1978), 男, 江苏宜兴人, 高级工程师, 从事电力系统分析及技术线损研究工作;
周 琪(1968), 女, 江苏南通人, 高级工程师, 从事线损管理的研究工作。

Analysis on the Potential Loss Reduction and its Implementation of Jiangsu Power Grid

AN Haiyun¹, ZHOU Qian¹, ZHOU Qi²

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

Abstract: Line loss rate is an important synthetic indicator for power enterprise, which reflects the level of network planning and design, production technology and operation management. In order to promote the management of loss, Jiangsu electric power company has carried out the research on the potential loss reduction and its realization method from 2013 to 2015. This paper analyzed the grid structure, loss management level, technology line loss, problems in loss management, factors for line loss reduction, factors of power losses, and causes for large line loss and so on. At the same time, based on the theoretical calculation and analysis of line loss, a three-year loss reduction target, along with its implementation method and some suggestions are proposed.

Key words: loss rate; line loss management; technology line loss; loss reduction; large line loss

(上接第41页)

Analysis and Suppression Method for Small Metering Error of Intelligent Electric Meter

TIAN Zhengqi, JI Feng, XU Qing, JIN Ping

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

Abstract: With the continuous improvement of industrial technology, intelligent electric meter is running in an increasingly complex environment. The reliability and accuracy of meter is facing more and more challenges. Small metering error has been observed in some meters in practice. In this paper, we analyzed the causes of small metering error, and provided a suppression method from the point of view of hardware, software and field installation. Test results show that the suppression method is effective and feasible.

Key words: intelligent electric meter; small accumulation; no-load; creeping

500 kV 线路安装串联电抗器后断路器 TRV 分析

尹元明¹, 谢天喜², 周志成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:500 kV 输电线路安装串联电抗器后, 断路器开断短路电流时产生的暂态恢复电压(TRV)较高, 可能会导致断路器重燃而无法正常工作。文中以江苏 500 kV 电网为对象, 建立了断路器 TRV 仿真计算模型, 研究石牌—常熟南线安装串抗后, 出现单相接地故障时断路器的 TRV, 分析断路器断口两端的 TRV 是否满足超出了其绝缘水平, 提出了相应的抑制措施, 并通过仿真计算验证了措施的有效性。计算结果表明, 石牌侧安装串抗后, 其断路器 TRV 不符合标准要求, 可在串抗两端并联 35 nF 以上的电容器有效抑制 TRV 的上升率。文中成果可为串抗及 TRV 防护措施在工程中的实际应用提供理论参考。

关键词: 串联电抗器; 并联电容器; TRV; 断路器

中图分类号: TM741.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)06-0045-03

随着电力系统规模的不断扩大, 电网的短路电流水平日益提高, 已经成为制约电网发展的重要因素之一^[1]。根据“2015~2020 年江苏 500 kV 电网发展规划研究报告”的规划网架和短路电流计算, “十二五”末至“十三五”期间, 江苏电网在采取目前已有的控制方式后, 500 kV 石牌—常熟南线路的短路电流将超过断路器的额定短路电流开断水平, 需要采取适当的措施限制短路电流。限制电网短路电流主要是优化网络结构和提高电网设备容量两个方面, 包括提高电网电压等级、优化电网接线方式、采用串联电抗器、高阻抗变压器等。上述方法各有特点, 其中采用串联电抗器是一种技术较为成熟、工程实施可行性高且经济成本相对较低的措施^[2]。目前国外已有巴西、美国、加拿大等多国应用了这项技术。在国内, 华东电网也于 2008 年在 500 kV 泗泾—黄渡线上安装了串联电抗器, 限制了电网短路电流水平, 是 500 kV 串联电抗器在国内的首次应用^[3]。

为抑制石牌变电站的短路电流, 江苏电网拟在线路的石牌变电站侧安装串联电抗器。然而, 由于串联电抗器的存在, 断路器开断线路短路电流时, 电抗器和设备杂散电容、线路分布电容间将出现振荡, 从而在断路器断口产生高频、高幅的暂态恢复电压(TRV), 导致断路器重燃而无法正常工作, 危及线路和设备的安全运行^[4,5]。为防止该线路加入串抗后断路器 TRV 超过其绝缘水平, 需要对不同故障下的 TRV 进行研究, 以便采取相应的措施抑制 TRV。

1 网架结构及模型

江苏电网 500 kV 石牌—常熟南线路为双回线, 总长约 30 km, 导线采用四分裂 LGJ-400/35 型钢芯铝绞

线, 分裂间距为 45 cm, 地线采用 LLBJ-95/55 型, 该线路相关网架结构如图 1 所示。串联电抗器采用干式空心结构, 阻抗为 28 Ω , 安装于石牌变出线端。以实际网架结构、电站及线路参数为基础, 将与石牌站、常熟南站相连的变电站均等值为电源, 石牌—常熟南双回线路采用分布阻抗模型, 其他站与站之间的线路等值为集中参数阻抗, 运用电力系统电磁暂态仿真计算软件 ATP/EMTP 建立模型对断路器 TRV 进行仿真计算。

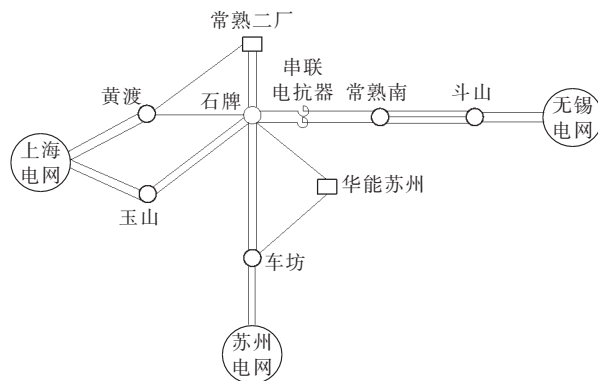


图 1 江苏电网 500 kV 网架结构示意图

2 断路器 TRV 分析

断路器 TRV 是指断路器电弧熄灭后, 在断路器触头上出现的具有显著瞬变特性的恢复电压。该电压取决于回路和断路器的特性, 由工频分量和暂态分量叠加而成。TRV 的波形随着实际回路的布置变化而不同。在某些情况下, 特别是在电压 110 kV 及以上的系统, 且短路电流相对于所考虑地点的最大短路电流而言是比较大的, TRV 包括一个高上升率的起始阶段, 随之而来的较低上升率的阶段。这种波形一般可以用四参数法确定的 3 条线段组成的包络线充分地表示, 如图 2 所示^[6]。图中曲线拐点处参数如表 1 所示。

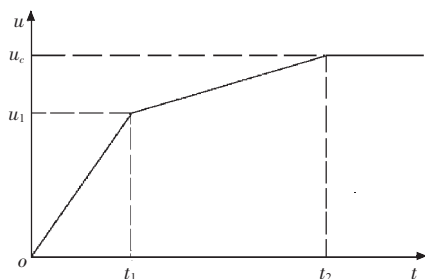


图2 用四参数参考线对规定的 TRV 波形的表示

表1 用四参数法表示的额定电压 550 kV 预期 TRV 的标准值

开断短路电流	第一参考电压 u_1 /kV	t_1 / μ s	TRV u_c /kV	t_2 / μ s	上升率 / ($\text{kV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)
T100	438	219	817	876	2.0
T60	438	146	876	878	3.0

在系统电压高于 110 kV 而短路电流相对于最大短路电流较小且经过变压器供电的条件下,TRV 近似于一种阻尼的单频振荡。这种波形一般可以用两参数法确定的 2 条线段组成的包络线充分地表示,如图 3 所示。图中曲线拐点处参数如表 2 所示。

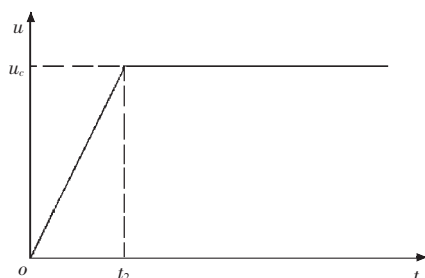


图3 用两参数参考线对规定的 TRV 波形的表示

表2 用两参数法表示的额定电压 550 kV 预期 TRV 的标准值

开断短路电流	TRV 峰值 u_c /kV	时间 t_2 / μ s	上升率 / ($\text{kV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)
T30	893	179	5.0
T10	893	128	7.0

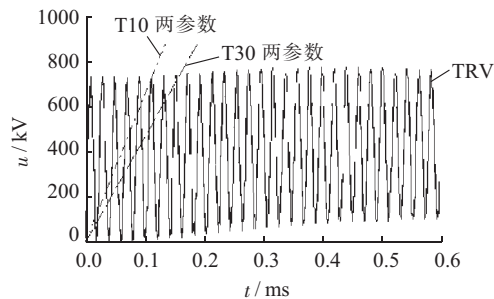
计算结果表明,石碑侧安装串联电抗器后,线路单相接地故障下,石碑侧最大短路电流为 9.26 kA;三相接地故障下,石碑侧最大短路电流为 13.35 kA。可见,石碑—常熟线路接地故障电流约为断路器额定开断短路电流 63 kA 的 21%,相对较小,因而本文计算参照两参数表示法标准,即断路器 TRV 波形在两参数表示法包络线之内时满足要求。

2.1 单相接地故障下 TRV 分析

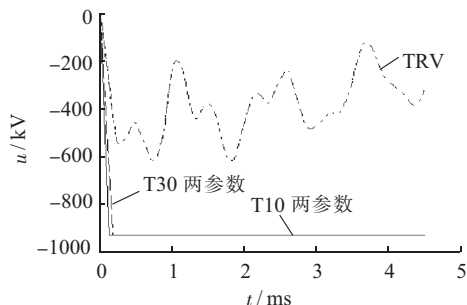
统计数据表明,超高压输电线路发生故障的时候,60%~70%为单相接地故障,因而有必要针对单相接地故障下断路器的 TRV 进行研究。当单相接地故障发生在不同位置时,因线路阻抗变化,会导致 TRV 有所区别。针对石碑侧串抗出线端、石碑侧近区(3 km)、线

路中点和常熟侧出线端 4 个位置发生故障进行计算。

当单相接地故障发生在串抗出线端时,石碑侧断路器 TRV 如图 4(a)所示,此时 TRV 较为严重,幅值达到约为 775 kV,振荡频率约 50 kHz,上升率为 12 kV/ μ s;常熟侧断路器 TRV 如图 4(b)所示,该侧电压幅值约 600 kV,上升率约为 2.5 kV/ μ s,可见常熟侧 TRV 满足两参数标准要求。



(a) 石碑侧断路器 TRV



(b) 常熟侧断路器 TRV

图4 串抗出线端发生单相接地故障时 TRV

单相接地故障发生在不同位置时石碑侧断路器 TRV 情况如表 3 所示。由表 3 可知,当石碑侧串抗出线端发生接地故障时,因没有线路阻抗限制其振荡电压,石碑侧断路器 TRV 最为严重;随着故障位置向常熟侧移动,石碑侧 TRV 幅值逐渐降低,但始终不满足两参数标准要求,在实际运行过程中可导致断路器重燃,无法正常开断,因而需要采取措施对其进行抑制。

表3 单相接地故障发生在不同位置时石碑侧断路器 TRV

单相接地故障	石碑侧 TRV 峰值 /kV	上升率 / ($\text{kV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	是否满足两参数
石碑侧出线端	775	12	否
石碑侧近区	737	11.5	否
线路中点	654	11	否
常熟侧	592	10	否

2.2 TRV 抑制措施分析

由于 TRV 是由串抗与线路电容互相充放电产生振荡,根据 LC 振荡回路基本原理可知,增大电容可以降低振荡频率,因而可以在串抗上并联电容器以降低恢复电压上升率,抑制断路器 TRV,安装方式如图 5 所示。

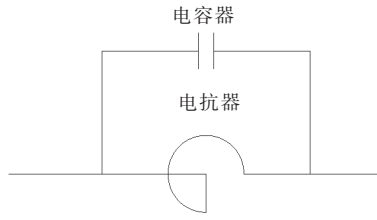


图5 串抗两端并联电容器接线示意图

当电容值为 $10 \sim 50 \text{ nF}$ 时,断路器 TRV 如表 4 所示,串抗上并联电容后,由于电容器的储能作用,振荡回路内能量增加,使断路器 TRV 幅值略有增大。当电容值大于或等于 35 nF 时,断路器 TRV 可满足两参数标准要求,如图 6 所示。

表 4 单相接地故障下串抗并联不同电容时石牌侧断路器 TRV

电容值 /nF	石牌侧 TRV 峰值 /kV	上升率 / ($\text{kV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	是否满足 两参数
10	813	7.2	否
30	814	5.1	否
35	814	4.9	是
40	814	4.6	是
50	816	4.2	是

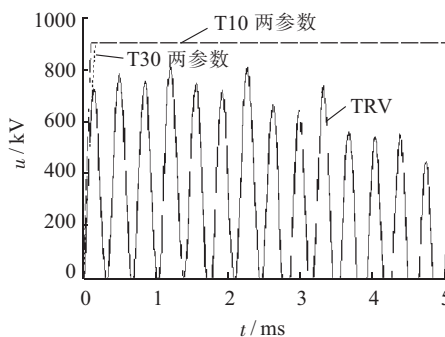


图6 串抗两端并联 35 nF 电容器时石牌侧断路器 TRV

3 结束语

基于江苏 500 kV 网架实际参数建立仿真模型,计算线路安装串联电抗器后断路器的 TRV,提出相应的抑制措施并进行了计算验证,得出以下结论:

(1) 石牌侧安装串联电抗器后,该侧断路器 TRV 幅值和上升率较高,且随故障位置不同有所差异,串抗出线端故障时最为严重,此时 TRV 恢复电压幅值为 775 kV ,上升率为 $12 \text{ kV}/\mu\text{s}$,不满足标准要求,需要采取措施加以抑制。

(2) 在串联电抗器上并联 35 nF 以上的电容器可有效抑制石牌侧 TRV,使恢复电压上升率降低至 $5 \text{ kV}/\mu\text{s}$,满足标准要求。

参考文献:

- [1] 齐晓曼,宋平. 日本短路电流限制技术的研究和应用对华东电网的借鉴[J]. 华东电力,2010(10):1640-1644.
- [2] 叶琳,戴彦. 短路电流限制技术在浙江电网的应用[J]. 华东电力,2005(5):23-26.
- [3] 赫涛,周敏,周圣. 多断口断路器在我国及越南长距离输电线路的适用性[J]. 科技信息,2010(23):1022-1900.
- [4] 刘伟,孟庆刚,商姣,等. 一种新型级联多电平动态电压恢复器的研究[J]. 江苏电机工程,2012,31(5):27-31.
- [5] 吉亚民,周志成,马勇,等. 真空断路器投切并联电抗器过电压故障分析[J]. 江苏电机工程,2014,33(2):12-14.
- [6] GB 1984—2003, 高压交流断路器[S].

作者简介:

尹元明(1964),男,上海人,高级工程师,从事电力系统过电压方面的研究工作;

谢天喜(1983),男,湖北天门人,博士,从事电力设备结构优化及电力系统过电压方面的研究工作;

周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事电力系统过电压及输电线路运行及维护等方面的工作。

Analysis on Breaker TRV for 500 kV Lines with Series Reactors

YIN Yuanming¹, XIE Tianxi², ZHOU Zhicheng²

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

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

Abstract: For the 500 kV transmission lines with series reactors, high transient recovery voltages (TRVs) may be caused between the contacts of the breakers when they are dropping out short circuit currents. A serious TRV may result in a restrike, which makes cutting short circuit current off different. In his paper, a TRV simulation model for the 500 kV grid in Jiangsu province is constructed. There are two series reactors installed on the line between Shipai substation and Changshu South substation in the model. The TRVs are calculated when a single-phase earth fault occurred at different positions in the line. A protection scheme is proposed and verified by calculations. The results show that the TRVs are too high to meet the requirements in the standard when there are series reactors on the line without protections. The TRVs can be suppressed effectively by installing a parallel capacitor with reactor. The capacitance should be greater than 35 nF . This work provides a reference for the practical application of series reactor and protections against TRV in projects.

Key words: series reactor; shunt capacitor; TRV; breaker

有序用电用户负荷特性分析方法研究

颜庆国¹, 薛溟枫¹, 范洁², 陈霄², 周玉², 易永仙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 国家电网公司电能计量重点实验室, 江苏 南京 211103)

摘要:我国长期面临区域性、季节性、时段性、结构性的缺电现象,而有序用电工作可促进电力供需平衡,保障居民生活和重要用户的用电。但目前编制有序用电方案时,参与有序用电的用户选择主观性强,缺乏科学依据,有失合理与公正。本文提出了有序用电用户可中断负荷分析方法,通过对用户的历史负荷进行聚类,得到用户的几类典型日负荷曲线,并对典型负荷曲线按采样点进行聚类,综合分析得到用户的用电规律和用电时段等负荷信息,进一步可计算出用户的错峰、错时、轮休、检修价值,在此基础上制定用户参与有序用电的准则和策略,并可向社会公开,使得编制方案和有序用电的执行有标准可依,更加有序。

关键词:有序用电;负荷特性;用电规律;用电时段

中图分类号: TM73

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)06-0048-03

有序用电是需求侧管理的重要组成部分,指在电力供应不足、突发事件等情况下,通过行政措施、经济手段、技术方法,依法控制部分用电需求,维护供用电秩序平稳的管理工作。有序用电工作主要采取错峰、避峰、轮休、负控限电等一系列措施,避免无计划拉闸限电,在确保电网安全基础上,优化有序用电方案,确保居民生活、农业生产、重要用户、重要场所用电。改革开放以后,国家经济加快发展,电力供需紧张,有序用电发挥了重要作用。在经济转型期,电力设施的投资和建设使得电力供需总体平衡,但随着居民生活水平的提高,空调负荷急剧增长^[1],我国部分地区出现了季节性、时段性、结构性的缺电现象。有序用电重点限制高耗能行业用电,优先了保障居民生活和重要电力用户用电,确保电网安全运行。同时大容量远距离输电网络故障,大容量机组的单机故障,大型风电厂的不稳定性、都会对电网形成强烈冲击,有序用电也是应对电网突发事件的有效应急手段,一旦遇到紧急突发情况,利用有序用电可最快恢复重要用户和居民的用电,使事故影响降到最低。目前电网峰谷差越来越大,有序用电也是削峰填谷、提高负荷率、负荷曲线整形的手段。因此,有序用电将长期存在并发挥积极作用^[2-4]。

目前编制有序用电方案时,电网在编制有序用电方案时,对用户的选择存在主观性,缺乏科学依据,有失合理与公正^[5,6]。已有不少文献对有序用电工作开展研究。文献[7]介绍了错峰预警信号系统模型及其实现,从技术上为有序用电管理工作提供了支撑。文献[8,9]讨论了有序用电指标在各地区的分配问题,但未给出精确到用户的有序用电方案编排方法。文献[10-12]以用户为出发点,分析了各种约束条件下安排

用户参与有序用电的方法,以将有序用电对用户的影响减少到最小。文献[13]研究了用户负荷特性的分析方法,但未结合有序用电的错峰、错峰等实现方式,不能有效指导有序用电。

1 基于精益化管理的用户负荷特性分析

电力系统负荷特性就是指用电负荷的特点和性质,不同类型的用户负荷表现出不同的负荷特性,他的负荷变化规律反映在负荷曲线上。对用户历史负荷曲线进行聚类,得到用户典型负荷曲线,根据典型负荷曲线间的差异,寻找负荷变化规律,分析用户的用电规律和用电特性,找出用户可以转移高峰电力的资源。选取用户一年中不同季度的历史负荷曲线进行聚类分析,可得用户的不同季节以及不同生产方式下的典型负荷曲线,分析季间典型负荷曲线差异,可得用户的空调负荷,分析日间典型负荷曲线差异,可得用户工作日、休息日、停产日负荷。分析用户的典型负荷曲线日内负荷差异,可得用户的峰、平、谷时段负荷。综合分析所得负荷信息,可得用户可中断、可削减的负荷及持续的时间跨度。

1.1 历史负荷曲线聚类

通过对历史负荷曲线进行聚类,分析聚类后的用户典型负荷曲线间的差异,识别用户的用电规律和用电特性。首先采用层次聚类法,分别形成日间负荷曲线之间以及日内负荷曲线之间的亲疏关系图谱,从关系图谱上判断曲线类型的数量,以此决定负荷曲线的类数。然后以此数量作为K均值聚类的聚类中心数量,对用户历史负荷曲线进行K均值聚类。

1.1.1 层次聚类

设 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 为 n 个标准化后的采样点用户负

荷,初始时每个采样点负荷分为一类,即 $G_i(0)=\{P_i\}$, $i=1,2,\dots,n$ 。计算各类间的距离 D_{ij} ,由此生成一个对称的距离矩阵 $D^{(k)}=[D_{ij}]_{m \times m}$,其中 m 为类的个数(初始时, $m=n$), k 为聚类次数, k 与 m 之间的关系为 $k=n-m$ 。找出前一步求得的矩阵 $D^{(k)}$ 中最小元素,设它是 $G_i^{(k)}$ 和 $G_j^{(k)}$ 间的距离,将 $G_i^{(k)}$ 和 $G_j^{(k)}$ 两类合并成一类,于是产生新的聚类 $G_1^{(k+1)}, G_2^{(k+1)}, \dots, G_{m-1}^{(k+1)}$ 。令 $k=k+1$, $m=m-1$ 。如此迭代聚类,直至所有采样点用户负荷聚为一类为止。聚类过程中,新类 G_r 与任一类 G_m 之间计算距离的递推公式:

$$D_{mr}^2 = \frac{n_m+n_p}{n_r+n_m} D_{mp}^2 + \frac{n_m+n_q}{n_r+n_m} D_{mq}^2 - \frac{n_m}{n_r+n_m} D_{pq}^2 \quad (1)$$

式(1)中: n_p, n_q, n_r, n_m 分别为类 G_p, G_q, G_r, G_k 中所含的样品(子类)个数, $n_r = n_p + n_q$ 。

初始时刻类之间的距离为各采样点用户负荷之差的绝对值:

$$D_{ij} = |P_i - P_j| \quad (2)$$

1.1.2 K 均值聚类

由 1.1.1 所得到的聚类结果选取 K 个初始质心,然后通过计算每个采样点负荷到质心的误差将采样点指派最近的质心,使目标函数最小,接着重新计算每一类的质心,如此反复直到仅有 0.5% 的点改变类。使用欧几里德距离作为误差,并使用误差的平方和 E 作为度量聚类质量的目标函数:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^K \sum_{P \in G_i} (c_i - P)^2} \quad (3)$$

其中 $G_i(1, 2, \dots, K)$ 为 K 均值聚类中的一个类, P 为 G_i 中的采样点负荷, c_i 为 G_i 的均值。即:

$$c_i = \frac{1}{m_i} \sum_{P \in G_i} P \quad (4)$$

1.2 用户负荷特性分析

(1) 用户生产日、休息日判别。对一个月(非有序用电执行月)内的用户历史负荷曲线进行聚类,对于可以分出两类情况的用户,分别计算每一类的最大负荷平均值,若两类最大负荷平均值相差很大(大于 20%),则可确定一类为生产日负荷曲线,另一类为停产日负荷曲线。根据上面分析出来的生产日和停产日分别计算生产日最大负荷平均值、停产日最大负荷平均值。

进一步可分析停产日规律:若一个月的停产日小于 3 天,则无休息日;若一个月中相同周几至少 3 天停产,则判为周几休息;若依次循环工作几天休息几天,则轮班休息;政府规定的节假日为国家法定节假日;其

他为无规律。

(2) 气候敏感负荷判别。选取春季和夏季各一个月的历史负荷曲线进行聚类,提取生产日负荷的典型曲线。夏季生产日负荷典型曲线与春季生产日负荷典型曲线之差便可作为该企业的气候敏感负荷可中断容量。同理可判断用户冬季的气候敏感负荷可中断容量:

$$P_{\text{summer}} = P_{\text{Tsummer}} - P_{\text{Tspring}} \quad (5)$$

$$P_{\text{winter}} = P_{\text{Twinter}} - P_{\text{Tspring}} \quad (6)$$

式(5,6)中: P_{summer} 为夏季敏感负荷; P_{Tsummer} 为夏季典型日负荷曲线; P_{Tspring} 为春季典型日负荷曲线; P_{winter} 为冬季敏感负荷; P_{Twinter} 为冬季典型日负荷曲线。

(3) 用户用电时段判别。计算用户典型日负荷曲线 3 个时段的最大负荷和平均负荷。根据用户 3 个时段的平均负荷大小分析用户主要的用电时段。

(4) 用户负荷计算。

① 安全保障负荷为保障用电场所人身与财产安全所需的电力负荷。作为衡量用户最低保障安全负荷,体现了对用户限电的限制。计算方法:

$$P_{sl} = \frac{\sum_{k=1}^X P_{\min_k}}{X} \quad (7)$$

$$X = \text{Int}\left(\frac{200M}{3}\right) \quad (8)$$

式(7,8)中: $p_{\min_k}$ 为第 k 个样本负荷日最小负荷; M 为月份; X 为样本数; $\text{Int}\left(\frac{200M}{3}\right)$ 为对 $\frac{200M}{3}$ 进行取整(直接去除小数部分)。

② 经济生产保障负荷是保障用电场所人身与财产安全之外,满足一部分生产能力所需的电力负荷。可统计用户典型负荷曲线内 08:00~22:00 内负荷最小值,作为该客户经济生产保障负荷。其计算方法:

$$p_{\text{est}} = \text{Min}(p_{i-T_{10}}, \dots, p_{i-T_{44}}) \quad (9)$$

式(9)中: 1 天 24 小时内的时间轴(00:00~24:00)划分为 48 个时间段,分别为 $T_1, T_2, \dots, T_{48}$; $\text{Min}(x_1, \dots, x_n)$ 表示对集合 X 计算最小值。

③ 最大可限负荷表示在高峰时段时,用户仅保留保障负荷,关停设备“降低了”的负荷。选取离全省早、中、晚高峰时刻最近的 2 个时刻点。分别计算该时刻点的负荷平均值,作为客户该日早、腰、晚高峰负荷(当全省高峰时刻正好为半个小时整点时刻时,客户高峰负荷不需选取最近的 2 个时刻)。其计算方法:

$$P_{11-\text{mor}} = (P_{\text{pl-mor}} - P_{sl}) \times \delta_p \quad (10)$$

$$P_{11-\text{mid}} = (P_{\text{pl-mid}} - P_{sl}) \times \delta_p \quad (11)$$

$$P_{11-\text{eve}} = (P_{\text{pl-eve}} - P_{sl}) \times \delta_p \quad (12)$$

式(10—12)中: $P_{11-\text{mor}}, P_{11-\text{mid}}, P_{11-\text{eve}}$ 分别为早峰、腰峰、

晚峰时段的可限负荷; P_{sl} 为安全保障负荷; P_{pl-mor} , P_{pl-mid} , P_{pl-eve} 分别为早峰、腰峰、晚峰时段的高峰负荷; δ_p 为同时率,一般取 0.8。

2 算例

选取扬州市某电器生产企业 2009 年 1 月、4 月及 6 至 9 月的每日 48 点负荷数据作为聚类的特征向量,一共 183 组数据,剔除非正常数据后剩余 174 组,经层次聚类分析可将 174 组正常数据分为四类,再经 K 均值聚类后可得四类负荷曲线,且可提取出一组特殊数据。分类结果如图 1 所示。

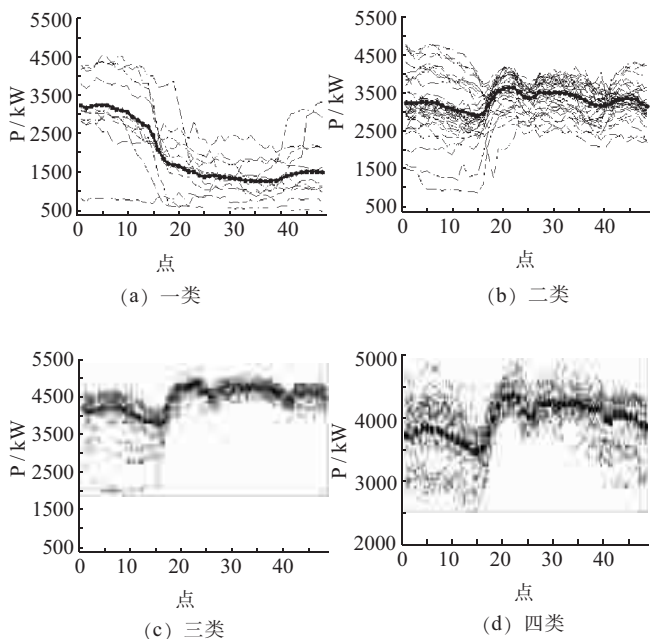


图 1 某电器生产企业负荷聚类

综合各类的负荷情况可以看出,该电器生产企业为三班制连续生产企业,但尤其是 00:00 到 07:00 的用电负荷一般都比白天低,说明安排在这段时间的生产量小,且 00:00 到 07:00 的负荷动荡比较大,从 1000 ~ 4800 kW 波动,除了与企业的生产安排有关,还与夜间温度适不适宜生产有关。但每日 09:00 至 20:00 的用电负荷比较平稳,为迎峰负荷。分析各分类负荷情况可以看出,第一类比较特殊,属于白天几乎停工类型,从所属的日期来看,可能是由于夏季高温限电造成,也可能是由于企业内部设备的停运检修等。其余各类表现出一定的季节性,由图 1 可得,三类属于夏季,负荷最高在 5400 kW 左右,最低在 3500 kW 左右;二类属于冬季,负荷最高在 4700 kW 左右,最低在 2000 kW 左右;四类属于春秋季节,负荷最高在 4800 kW 左右,最低在 3000 kW 左右,则夏季敏感负荷至少有 500 kW。而且通过安排生产流程,转移迎峰负荷,减产避峰等措施,至少可以转移高峰负荷 1500~2000 kW,负荷的特性分析结果如表 1 所示。

表 1 某电器生产企业精细用电特征挖掘分析 kW

企业类型	负荷特征	峰值时刻	气候敏感	生产负荷的中断容量	
			负荷中断容量	保障经济生产可限负荷	最大可限负荷
某电器生产企业	00:00~07:00 的用电负荷一般都比白天低,且纵向比较动荡大	09:00~20:00	500	200~300	1500~2000

3 结束语

本文提出的基于精益化管理的有序用电用户负荷特性分析方法实现了对用户负荷特性的深入挖掘,从大量历史负荷曲线之中分析提取出了用户的气候敏感负荷、安全保障负荷、经济生产保障负荷、最大可限负荷,为有序用电工作中制定科学合理的分级避峰方案提供了数据支撑。在此基础上制定用户参与有序用电的准则和策略,在电力紧缺时,合理安排用户进有序用电,使有序用电对用户的影响最小。并可向社会公开,使得编制方案和有序用电的执行有标准可依,更加有序。算例的结果表明,该方法是可靠有效的。

参考文献:

[1] 中国江苏网. 江苏居民用电保持高速增长,今夏空调用电将突破 2400 万 kW [EB/OL]. [2012-07-03]. <http://news.jxgdw.com/gnxw/1806213.html>.

[2] 曾 鸣. 电力需求侧管理的激励机制理论及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2002:37-38.

[3] 李啸宇,谈金晶,王蓓蓓. 智能园区需求响应项目实施效益研究[J]. 江苏电机工程,2013,32(4):20-23.

[4] 史湘谊,李 颖,王春宁,等. 基于电力需求响应的负荷管理系统[J]. 江苏电机工程,2013,32(6):59-65.

[5] 陈海燕,刘新才. 有序用电工作的精细化管理过程[J]. 电力需求侧管理,2010,12(3):30-33.

[6] 李敬如,胡兆光,纪 洪,等. 北京地区用电需求侧管理及分析[J]. 电网技术,1999,23(2):21-23.

[7] 刘 佳,施毅斌,李 扬,等. 错峰控制中多目标多地区限电分配的模糊群决策模型[J]. 西安电子科技大学学报,2007,34(S):124-127.

[8] 徐志勇,曾 鸣. 有序用电的经济学分析及实施建议[J]. 电力需求侧管理,2009,11(1):35-37.

[9] 区镜垣. 电力企业在错峰用电管理中负荷分配的探讨[J]. 工业技术,2006(25):16-20.

[10] 沈 协,屠前萍. 有序用电管理到户的探索与实践[J]. 电力需求侧管理,2012,14(5):39-41.

[11] 陆婷婷,高赐威,苏卫华,等. 有序用电管理下的最优错峰计划[J]. 电力需求侧管理,2013,15(6):15-22.

[12] 刘 健,王双虎,明正峰. 需求侧负荷管理中最优错峰计划的生成[J]. 电力系统自动化,2006,30(8):15-22.

[13] 吴 佳,张凯俊,王金跃,等. 基于精细化管理的有序用电辅助决策[J]. 浙江电力,2013(4):59-63.

提高远程遥控安全性的 IEC 60870-5-104 规约扩展研究

朱海兵¹, 吴奕¹, 陈宁², 朱志华², 刘翌¹, 熊浩¹

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

摘要:国家电网公司新的运行模式要求调控中心监控人员对变电站设备开展远程遥控。现有调度技术支持系统采用的 IEC 60870-5-104 规约在遥控命令传输和校验过程只校验点号信息, 存在因点号对应关系错误导致误遥控的可能性。通过扩展 IEC 60870-5-104 规约, 实现设备编号和点号的双重校验, 以及测控装置 IP 校验, 可以大幅降低因主站和变电站综自系统监控信息表点号不对应带来误遥控的可能性。

关键词:遥控; IEC 60870-5-104; 规约; 数据采集与监视控制系统

中图分类号: TM764.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)06-0051-04

目前, 调度控制中心主站系统与变电站综自系统的远动规约主要采用 IEC 60870-5-104 规约^[1], 它们传送的遥控命令中只包含遥控信息点号和遥控值, 变电站综自系统接收到遥控命令后, 只对遥控命令的遥控点号进行检验, 只要判断到该点号存在, 就进行遥控, 一旦主站系统遥控点关联出错或站端系统遥控点出现与主站端系统发生不对应, 就有可能发生误遥控, 这给自动化人员和调度监控人员都带来了极大的压力, 也会给电网的安全运行带来威胁。《国家电网公司电力安全工作规程》对于现场操作防止误操作有完备的技术和管理措施, 但远程遥控与现场操作和变电站后台操作具有很大的差异性, 许多现场操作的防止误操作技术措施无法直接应用到远程遥控中, 因此对于“大运行”模式下调度控制中心开展远程遥控需要因地制宜的研究防误技术和管理手段。

1 双重校验设计思路

目前调度控制中心对变电站断路器、刀闸等开合设备的远程遥控通过调度技术支持系统的数据采集与监视控制(SCADA)^[2]应用来实现, 整个过程包括“选择”、“返校”和“执行”。“选择”过程监控人员在 SCADA 客户端上输入遥控命令后, SCADA 应用根据遥控命令找到遥控对象对应的设备 ID, 发至前置应用, 前置应用服务根据设备 ID 和监控信息表找到相应的信息点号, 然后使用 IEC 60870-5-104 规约将该信息点的遥控值(“0”和“1”)发至变电站综自系统的总控, 传输过程只传输信息点号和遥控值, “返校”和“执行”过程同样只检验主站系统和变电站端综自系统信息表点号是否存在和是否可执行, 并没有电气防止误操作逻辑。尽管主站系统和站端综自系统的信息表对应关系都经过运行维护人员的验收校对, 但涉及到变电站局部改造时, 并不对全站信息表进行核对, 不能排

除人为因素导致主站系统和站端综自系统信息表不对应的情况。如果出现这种情况, 现有 IEC 60870-5-104 规约无法校验此种错误, 可能会导致误遥控的发生。因此, 有必要对现有 IEC 60870-5-104 规约传输校验机制进行改进研究, 提高远程遥控的安全性。

为了避免上述远程遥控过程潜在的安全隐患, 本文从遥控校验机理和 IEC 60870-5-104 规约扩展性方面开展研究, 提出建立遥控命令传输过程的双重校验机制。在现有 IEC 60870-5-104 规约仅传输和校验点号的基础上, 对规约进行扩展, 在遥控命令中增加设备编号或名称, 同时对调控中心主站系统的 SCADA 和前置应用进行适当改造, 对变电站综合自动化系统进行改造, 扩充监控信息表, 增加设备编号或名称, 遥控命令传输和执行时, 同时传输遥控点号和设备编号, 校验时同时判断遥控点号和设备编号对应关系, 同时校验测控装置的 IP 地址。

采用“宁可拒绝执行而减少误操作可能性”的原则, 在命令传输和校验过程增加判断量, 实现双重化校验, 从而保证遥控命令的准确、可靠执行, 大幅降低因主站和变电站综合自动化系统监控信息表点号不对应带来误遥控的可能性。

2 规约扩展实现方法

在现有 IEC 60870-5-104 规约基础上扩展遥控预置与执行报文结构, 应用层引用 DL/T 634.5101—2002^[3], 主站系统下发点号时, 能够将设备编号或名称一起下发。同时, 返回错误码能够明确错误原因(点号与名称不一致、存在重复点号、无法校验等), 并将原因返回给主站系统 SCADA 的遥控界面显示并告警。遥控的预置、执行都增加此校验环节, 保证遥控命令的安全可靠执行。带名称校验的单命令类型标识^[4]为 54, 如图 1 所示。

校验信息为字符串, 包含结束符。传输时校验信息

0	0	1	1	0	1	1	0	类型标识 (TYP)	数据单元 标识符在 DL/T 634.5101— 2002 的 7.1 中定义
0	0	0	0	0	0	0	1	可变结构限定词 (VSQ)	
在 DL/T 634.5101—2002 的 7.2.3 中定义								传送原因 (COT)	
在 DL/T 634.5101—2002 的 7.2.4 中定义								应用服务数据单元公 共地址	信息对象
在 DL/T 634.5101—2002 的 7.2.5 中定义								信息对象地址	
S/E	QU		0	SCS		SCO=单命令(在 DL/T 634.5101—2002 的 7.2.6.15 中定义)			
校验信息 n byte								校验信息(n 可利用报 文长度计算得出)	

图 1 带名称校验的单命令数据单元

按照实际的长度发送，校验信息字符串长度可由报文长度计算得出。IEC 60870-5-104 规约中一帧报文的最大长度为 255 字节（包括起始字节和报文长度字节），去除报文的其他部分后，校验信息的最大长度 239 字节,119 个汉字。校验信息一般可采用调度编号或调度命名。“选择”、“返校”、“执行”等遥控命令的 ASDU 信息格式^[5,6]具体规定如图 2—7 所示。

36 H(TYPE)
01 H(VSQ)
06 H(COT) 源发站地址
公共地址低字节 公共地址高字节
信息体地址低位 信息体地址中位 信息体地址高位
单命令选择
校验信息(<i>n</i> 个字节 ASCII 码)

图 2 遥控选择

36 H(TYPE)
01 H(VSQ)
07 H(COT) 源发站地址
公共地址低字节 公共地址高字节
信息体地址低位 信息体地址中位 信息体地址高位
单命令选择
返校出错信息(<i>n</i> 个字节 ASCII 码,返校成功时 <i>n</i> 为 0)

图 3 遥控选择返校

遥控开关编号可以是开关刀闸等设备编号，远动装置对遥控点号和开关编号进行一致性检验。遥控出口编码为遥控对象的相应变电站间隔装置的出口继电器编码,给远动和主站系统进行遥控真实出口校验,内

36 H(TYPE)
01 H(VSQ)
06 H(COT) 源发站地址
公共地址低字节 公共地址高字节
信息体地址低位 信息体地址中位 信息体地址高位
单命令选择
校验信息(<i>n</i> 个字节 ASCII 码)

图 4 遥控执行

36 H(TYPE)
01 H(VSQ)
07 H(COT) 源发站地址
公共地址低字节 公共地址高字节
信息体地址低位 信息体地址中位 信息体地址高位
单命令选择
出错信息(<i>n</i> 个字节 ASCII 码, 执行成功时 <i>n</i> 为 0)

图 5 遥控执行返校

36 H(TYPE)
01 H(VSQ)
08 H(COT) 源发站地址
公共地址低字节 公共地址高字节
信息体地址低位 信息体地址中位 信息体地址高位
单命令选择
校验信息(<i>n</i> 个字节 ASCII 码)

图 6 遥控撤销

36H(TYPE)
01H(VSQ)
09H(COT) 源发站地址
公共地址低字节 公共地址高字节
信息体地址低位 信息体地址中位 信息体地址高位
单命令选择
出错信息(<i>n</i> 个字节 ASCII 码, 执行成功时 <i>n</i> 为 0)

图 7 遥控撤销返校

容包含间隔装置地址和遥控对象序号，全站编码不重复，其中返校遥控出口编码必须由间隔装置返校信息自动生成,上送给调度再次进行核对。
间隔装置如果是网络通讯方式的，则遥控出口编

码方式为“[网络介质号:] IP 地址:遥控序号”,其中网络介质号可选。例如对接在远动网口“1”的 IP 地址为“192.168.1.2”测控装置上遥控对象“2”进行遥控,则遥控出口编码为“NET1;192.168.1.2;2”。

间隔装置如果是通过串口、CAN 网等非网络方式通讯的,则编码为“[通讯介质号:]装置地址:遥控序号”,其中通讯介质号可选。例如对接在远动串口“1”的装置地址为“2”测控装置上遥控对象“1”进行遥控,则遥控出口编码为“COM1;2;1”。

遥控返校出错码定义如下:

“0”为返校正确;

“1”为调度下发选择命令遥控点号和遥控对象编码不一致,可能是调度遥控数据库出错;

“2”为远动对调度下发遥控出口编码校核出错,可能是远动装置遥控数据库出错;

“3”为间隔装置超时未返校,可能是远动和间隔装置通讯故障;

“4”为间隔装置返校出错(就地/检修/闭锁/硬件出错等)。

3 主站系统和站端系统处理流程

3.1 主站系统处理流程

主站系统在遥控操作时,监控人员在厂站接线图上通过右键对设备进行遥控操作,在弹出的遥控操作界面上,监控人员需要再次输入所遥控设备的设备编号(以设备编号为例),程序会判断所输入的设备编号与所操作的设备的编号是否相同,如相同才允许继续进行遥控预置操作。主站系统的画面、SCADA 应用、前置应用间传输遥控命令时使用的是系统内部的设备 ID,前置应用在下发遥控命令时通过设备 ID 从数据库中取出设备遥控点号组装到遥控命令中,站端系统收到遥控命令后,根据命令中的遥控点号和站端预设的点号和设备对应关系找到所要操作的设备,并对其进行控制操作。

主站系统在判断监控人员输入的设备编号正确后,需要将此编号与原有的 ID、状态等信息一并通过 SCADA 应用发给前置应用,前置应用在下发到站端的遥控命令时,需要再通过设备 ID 从数据库中取出设备所在测控装置的 IP 地址和遥控点号,并与遥控状态和设备编号信息按照新的遥控命令格式组装报文。站端系统在收到遥控命令后,先判断命令中的遥控点号、设备编号和测控装置 IP 地址与站端系统设置的是否一致。对应关系一致则继续,否则就返回出错信息给主站系统。主站系统在接收处理站端系统上送的遥控返校报文时,需要将站端系统上送的校核结果文本信息返还给画面,显示在主站系统的遥控操作界面上。

3.2 站端系统处理流程

传统遥控过程由站端系统前置通讯软件接到遥控命令,根据遥控点号从转发信息表中检索出相应的数据库遥控记录索引号(OID),然后通过 OID 检索出遥控设备对象的记录信息,根据该设备对象的记录信息属性,对测控装置进行相应的控制操作。在变电站一体化监控系统体系下,所有控制操作都是依据遥控设备对象数据库数据属性统一进行相应操作^[7],因此在传统常规变电站,只要可靠地验证了该对象库正确性,基本就能保证站端系统对装置操作的正确性。在新型智能变电站,站控层网络是基于 IEC 61850 协议体系,由于强大的互操作性及丰富的扩展性能,让装置实现对带编号校核属性的遥控功能支持是能够实现的,这样就在整个遥控过程上的所有环节实现双重化校验,从而保证遥控操作的可靠性和惟一性。对于变电站一体化监控系统,可分别由总控对带编号遥控操作的校核和由总控和装置对带编号遥控操作的校核 2 种方案。

(1) 方案 1 实现流程:站端系统从主站系统下发的遥控命令信息中,在获取遥控点号的同时,也获取该遥控的校核信息,并将校核信息与该遥控的设备记录信息终端遥控别名域匹配和装置 IP 地址匹配,如果匹配不成功,返回主站遥控校核错误信息,若校核匹配成功即转为传统遥控流程操作。

(2) 方案 2 实现流程:监控系统从主站下发的遥控命令信息中,在获取遥控号的同时,也获取该遥控的校核信息,并将校核信息与该遥控的开关记录信息终端遥控别名域匹配和装置 IP 地址匹配,如果匹配不成功,返回主站遥控校核错误信息,校核匹配成功,再根据遥控开关对象将校核信息发送给对应装置,由装置根据本设备配置再次校核遥控编号信息是否正确,校核成功进行常规控制操作,否则就取消该控制操作,并将错误信息返回给一体化监控系统,再由一体化监控系统返回给主站。

4 结束语

现有 IEC 60870-5-104 规约传输遥控命令仅仅依据点号,主站系统和站端系统信息表一旦出现点号错位等不对应情况,很容易导致误遥控。通过规约扩展,实现点号和设备编号的双重校验,同时校验测控装置的 IP 地址,彻底消除了主站系统和站端系统的点号对应关系错误带来的误遥控可能性,是一种非常安全可靠的防误遥控改进技术,对于提高电网安全可靠运行水平具有重要意义。

参考文献:

- [1] IEC 60870-5-104 规约(2000 版),采用标准传输协议子集 IEC 60870-5-101 网络访问[S]:50-60.

- [2] 刘革辉,李 向,秦力军. IEC 60870-5-104 远动规约在 SCADA 系统中的应用[C]. 北京:2002 年全国电力系统自动化学术研讨会,2002;2-4.
- [3] DL/T 634.5101—2002,基本远动任务配套标准[S];30-32.
- [4] 徐立子. 变电站自动化系统 IEC 60870-5-103 和 IEC 60870-5-104 协议的分析和实施[J]. 电网技术,2002,26(4):1-3.
- [5] 黄云龙,郑 翔. IEC 60870-5-104 在调度自动化系统中的应用[J].上海电力学院学报,2005,21(4):326-328.
- [6] 何 松,李育林. IEC 60870-5-104 规约应用分析[J]. 山西电力,2007(4):18-21.
- [7] 李 晔,朱 江,吴 玲. 基于综合自动化系统的断路器遥控操作分析[J]. 江苏电机工程,2013,32(4):45-52.

作者简介:

朱海兵(1978),男,江苏张家港人,高级工程师,从事调度监控运行管理工作;

吴 奕(1968),男,重庆人,高级工程师,从事调度监控运行管理工作;

陈 宁(1973),男,广东大埔人,高级工程师,从事电网调度自动化系统研发工作;

朱志华(1971),男,江苏南通人,高级工程师,从事变电站自动化的工作;

刘 翌(1971),男,广东兴宁人,高级工程师,从事调度监控运行管理工作;

熊 浩(1982),男,江苏南京人,工程师,从事调度监控运行管理工作。

Extension Research on IEC 60870-5-104 to Improve the Security of Remote Control

ZHU Haibing¹, WU Yi¹, CHEN Ning², ZHU Zhihua², LIU Yi¹, XIONG Hao¹

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

2.NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: The new operation mode in the State Grid requires the operator to control substation equipment remotely. In the current dispatching support system, the IEC 60870-5-104 protocol only checks control point number during remote control command transmission and verification process. This may result in mal-operation of remote control because wrong corresponding relation between control point number and device. By extending the IEC 60870-5-104 protocol, double check among device ID, control point number, and device IP is achieved. It greatly reduce the possibility of mal-operation of remote control caused by wrong corresponding relation between control point number and device.

Key words: remote control; IEC 60870-5-104; protocol; SCADA

(上接第 50 页)

作者简介:

颜庆国(1968),男,江苏扬州人,高级工程师,从事电力营销的管理工作;

薛溟枫(1976),男,江苏无锡人,助理工程师,从事有序用电的管理

工作;

范 洁(1977),女,江苏南通人,高级工程师,从事电力计量工作;

陈 霄(1985),男,江苏连云港人,工程师,从事电力计量工作;

周 玉(1982),男,江苏镇江人,工程师,从事电力计量工作;

易永仙(1988),男,浙江苍南人,工程师,从事电力计量工作。

Load Property Analysis Method for Demanders Participating Orderly Power Utilization

YAN Qingguo¹, XUE Mingfeng¹, FAN Jie², CHEN Xiao², ZHOU Yu², YI Yongxian²,

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

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute

State Grid Laboratory of Electric Energy Measurement, Nanjing 211103, China)

Abstract: Our country has been long-term facing the regional, seasonal, periodical and structural shortage of power. Orderly power utilization is a tool to keep balance in supply and demand of power and so as to ensure the power supply to residential and important demanders. However, currently choosing demanders to participate into orderly power utilization program is mostly subjectively decided by the operator, which is lacking of scientific basis, unreasonable and injustice. This paper proposes a load characteristic analysis method for orderly power utilization demanders based on fine management object. Through clustering the historical load of the demanders, typical daily load curve of demanders are figured out. Then through combining the sampling points clusters of typical daily load curve, power utilization pattern and power utilization interval of demanders are obtained. The peak load shifting and holiday staggering plan value of the demanders are calculated. Rules and strategies for orderly power utilization demander selection are constituted based on the analysis of load property, which, is public to the community, makes the orderly power utilization work more scientifically and orderly.

Key words: orderly power utilization; load property; power utilization pattern; power utilization interval

基于同类划分的线损指标评价方法

孙志明¹, 郑爱霞², 周 前¹

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

摘 要:分析了影响电网线损的各类影响因子,建立了电网技术线损评价模型,提出了基于同类划分的线损指标评价方法,电网技术线损的评价值与其真实线损水平正相关,评价值相近的电网即为线损同类电网。

关键词:线损;影响因子;指标评价;同类划分

中图分类号:TM714.3;TM744

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0055-03

线损率是电网企业一项重要技术经济指标,综合反映电网规划设计、生产运行管理水平,线损率指标的准确评价是线损管理考核工作的核心内容。线损包括技术线损和管理线损,其中技术线损受电网结构、设备状况、用电结构等诸多因素影响,不同区域电网差异较大,因此不能简单从线损率指标数值评价线损管理水平,应综合考虑线损率指标和其中技术线损的占比情况。由于受中低压配电网网络拓扑、设备台帐、电量参数等因素限制,对技术线损水平现状进行直接统计计算存在较大难度,必须研究制定有效可行的线损指标评价方法^[1]。

1 技术线损影响因子

1.1 因子种类

技术线损是电网内部所有电气设备电能损耗的总和,主要由 2 部分构成:一是固定损耗,固定损耗与负荷电流变化无关,与电压变化有关;二是可变损耗,可变损耗与电流的平方成正比。有多种因素通过影响电网的电阻、电抗、电压、电流等从而对电网技术线损。技术线损影响因子(以下简称为影响因子)可分成电网结构特征、设备物理参数属性、电网运行特征、用电结构特征、自然状况等五大类。

电网结构特征从网络角度评估技术线损,该类影响因子包括变电层次结构、各电压等级电网线路平均长度、电源(上网电厂、上级电网供电变电站)分布状况、变电站(尤其是配变)布点密度。设备物理参数属性从设备角度评估技术线损,该类影响因子包括各类导线(不同类型、不同截面)条数及长度占比情况、各类变压器(能耗系列)台数及容量占比情况、各类计量表计(尤其是低压用户表计)台数占比情况、无功设备配置。电网运行特征从系统运行角度评估技术线损,该类影响因子包括负荷时空分布(负荷空间分布、平均负荷率、负荷曲线形状系数、最大负荷、最小负荷)。用电结构特征从用电量结构角度评估技术线损,该类影响因

子包括各电压等级售电量及占比数据,分类售电量及占比数据。自然状况从电网以外角度侧面评价技术线损,该类影响因子主要包括冬夏季天气及温度情况。

1.2 影响特性

假设其余条件相同,仅考虑单一影响因子的变化情况,各类影响因子的线损影响特性:

- (1) 变电层次结构越多,技术线损越高;
- (2) 线路平均长度越长,技术线损越高;
- (3) 电源(上网电厂、上级电网供电变电站)分布状况与用电负荷分布状况存在偏差越大,技术线损越高;
- (4) 变电站尤其是配变布点密度越低,技术线损越高;
- (5) 细截面(高电阻率)导线占比越高,技术线损越高;
- (6) 老旧高损耗变压器占比越高,技术线损越高;
- (7) 机械电能表占比越高,技术线损越高;
- (8) 无功配置比例越低,技术线损越高;
- (9) 负荷空间分布上越不均匀,技术线损越高,对于分线线损,线路中后端负荷占比越高,技术线损越高;
- (10) 负荷时间分布上越不均匀,技术线损越高;
- (11) 低电压等级的售电量的占比越高,技术线损越高^[2];
- (12) 大工业、非、普工业等售电量占比越低,技术线损越高;
- (13) 冬夏季节极端气候频繁,空调负荷增加就越多^[3],技术线损越高。

1.3 相关性影响程度

部分影响因子之间存在相关性,如变电层次影响因子与各电压等级线损率及供电量相关,也就与分压售电量影响因子相关,同理,变电站布点密度影响因子与线路平均长度影响因子相关,分压售电量影响因子与分类售电量影响因子相关。各类影响因子对线损影响程度也不同。如用电结构特征对综合线损率的影响程度相对比较大,而电能表类型因素对线损的影响程度相对较小。

1.4 适用范围

若评价对象是市县区域电网,则上述影响因子都适用,若用于评价低压台区线损,则显然不需要考虑变电结构层次等因子的影响,具体如表1所示。

表1 影响因子适用范围

影响因子	区域电网	10 kV 线路	低压台区
变电层次	√	×	×
线路平均长度	√	√	√
电源分布	√	×	×
变电站密度	√	×	×
导线截面积	√	√	√
变压器状况	√	√	×
低压电能表	√	×	√
无功配置	√	√	√
负荷空间分布	√	√	√
负荷时间分布	√	√	√
分压售电量	√	×	×
分类售电量	√	×	×
自然状况	√	×	×

2 线损同类划分

2.1 影响因子数学模型

根据上述影响特性,建立影响因子数学模型。

(1) 变电层次:

$$y_{BDj} = \sum \frac{P_i A_{ij}}{A_j} \quad (1)$$

式(1)中: i 为电网电压等级; j 为待评估电网序号; P_i 为*i*电压等级平均线损率常数; A_{ij} 为电网*j*的*i*电压等级供电量; A_j 为电网*j*的总供电量。

(2) 线路平均长度:

$$y_{XLj} = \sum q_{xli} \frac{L_{ij} - L_{imin}}{L_{imax} - L_{imin}} \quad (2)$$

式(2)中: q_{xli} 为*i*电压等级线路权重常数; L_{ij} 为电网*j*的*i*电压等级线路平均长度; L_{imax} , L_{imin} 分别为各待评估电网*i*电压等级线路平均长度中的最大值、最小值。

(3) 电源分布:

$$y_{DYi} = \sum \frac{l_{mj} S_{mj}}{n S_j} \quad (3)$$

式(3)中: m 为电源(上网电厂、上级电网降压变)序号; l_{mj} 为电网*j*的电源*m*至其各所接变电站最远线路的距离; S_{mj} 为电网*j*的电源*m*的容量; S_j 为电网*j*的参与计算的电源容量之和。

(4) 变电站密度:

$$y_{MDj} = \sum q_{mdi} \frac{M_{imax} - M_{ij}}{M_{imax} - M_{imin}} \quad (4)$$

式(4)中: q_{mdi} 为*i*电压等级变电站布点密度权重常数; M_{ij} 为电网*j*的*i*电压等级变电站布点密度; M_{imax} , M_{imin} 分别为各待评估电网的*i*电压等级变电站布点密度中的最大值、最小值。

(5) 导线截面积:

$$y_{JMj} = \sum q_{jmi} [q_{kd} (5L_{ijka} + 3L_{ijkb} + L_{ijkc})] \quad (5)$$

式(5)中: k 为导线类型序号,1为架空线,2为电缆; q_{kd} 为导线类型权重常数; q_{jmi} 为*i*电压等级线路截面权重常数; L_{ijka} , L_{ijkb} , L_{ijkc} 分别为电网*j*的*i*电压等级*k*类型线路中细截面、中间截面、粗截面类型线路长度占该电网该电压等级该类线路长度的比例。

(6) 变压器状况:

$$y_{BYQj} = \sum q_{byqi} (5T_{ija} + 3T_{ijb} + T_{ijc}) \quad (6)$$

式(6)中: q_{byqi} 为*i*电压等级变压器分类权重常数; T_{ija} , T_{ijb} , T_{ijc} 分别为电网*j*的*i*电压变压器中高耗、普通、节能型号容量占该电网该电压等级变压器容量的比例。

(7) 低压电能表:

$$y_{DNBJ} = D_{lj} + \frac{1}{2} D_{2j} \quad (7)$$

式(7)中: D_{lj} , D_{2j} 分别为电网*j*的单相机械表、三相机械表占有电能表的比例。

(8) 无功配置:

$$y_{WGj} = \sum q_{wgi} (1 - W_{ij} K_{lij} K_{2ij}) \quad (8)$$

式(8)中: q_{wgi} 为*i*电压等级无功设备权重常数; W_{ij} 为电网*j*的*i*电压等级电容器总容量与该电压等级变压器总容量之比值; K_{lij} , K_{2ij} 分别为电网*j*的*i*电压等级电容器投切方式、分组方式修正系数。

(9) 负荷空间分布:

$$y_{FKj} = \sum q_{fki} (5F_{ija} + 3F_{ijb} + F_{ijc}) \quad (9)$$

式(9)中: q_{fki} 为*i*电压等级负荷空间分布权重常数; F_{ija} , F_{ijb} , F_{ijc} 分别为电网*j*的*i*电压等级负荷在线路上对应于自线路首端起2/3~1,1/3~2/3,0~1/3长度的负荷的占比。

(10) 负荷时间分布:

$$y_{FSj} = 0.4 \frac{(F_j - 40\%)^2}{0.04} + 0.4 \frac{K_j - 1}{0.5} + 0.2 C_j \quad (10)$$

式(10)中: F_j 为电网*j*的年配变平均负载率; K_j 为电网*j*的年负荷曲线形状系数; C_j 为电网*j*的年最大峰谷差率,即峰谷差与峰荷之比值。

(11) 分压售电量:

$$y_{FYj} = 1 - \frac{\sum q_{fyi} B_{ij}}{B_j} \quad (11)$$

式(11)中: q_{fyi} 为*i*电压等级售电量权重常数; B_{ij} 为电

网 j 的 i 电压等级售电量; B_j 为电网 j 的总售电量。

(12) 分类售电量:

$$y_{FLj} = 1 - \frac{\sum q_t B_{ij}}{B_j} \quad (12)$$

式(12)中: t 为售电量分类序号; q_t 为各分类售电量权重常数; B_{ij} 为电网 j 的 t 分类售电量。

(13) 自然状况:

$$y_{ZRj} = \sum (T_h + T_l) \quad (13)$$

式(13)中: T_h , T_l 分别为一年之中最高气温超过 35°C , 最低气温低于 -10°C 的天数。

2.2 技术线损评估计算

对于上述变电层次模型,令:

$$Y_{BDj} = \frac{1}{y_{BD\max} - y_{BD\min}} (y_{BDj} - y_{BD\min}) \quad (14)$$

式(14)中: $y_{BD\max}$, $y_{BD\min}$ 分别为所有待评估电网通过式(1)计算得出的最大值、最小值,则 Y_{BDj} 的值域为 $[0, 1]$ 。

其余各影响因子参照该方法,均可将其值域限定在 $[0, 1]$ 。在实际工作中,式(1)至式(13)的数学模型所需基础参数的获取难易程度不一,因此需根据待评估电网的类型,以及当前各类基础参数的完备程度,合理确定参与技术线损评估的影响因子及计算权重系数。由此得到技术线损评估公式:

$$Y_j = \sum (Q_1 Y_{BDj} + Q_2 Y_{XLj} + \dots + Q_{13} Y_{ZRj}) \quad (15)$$

式(15)中: $Q_1, Q_2, \dots, Q_{13}$ 为权重系数,不参与计算则权值为 0。

由式(15)得出技术线损评估值,值域为 $[0, 1]$, 计算结果数值越大则表明真实技术线损率越高, 计算结果数值接近的评估电网即为线损同类电网。

3 线损指标评价

以某省级电力公司评价所辖各县级供电公司综合线损率指标为例,根据上述线损同类划分方法,得到各县级供电公司技术线损评估结果及排序顺序,如表 2 所示。将该排序结果与其线损率实际完成值排序进行比较。

表 2 数据表明 D, E, F 其 3 个单位技术线损评估

表 2 县供电公司线损指标评价

单位	评估结果	评估排序	实绩排序
A	0.323	1	1
B	0.365	2	2
C	0.387	3	4
D	0.420	4	3
E	0.421	5	9
F	0.424	6	5
G	0.48	7	6
H	0.543	8	7
I	0.549	9	8
J	0.573	10	10

结果比较接近,可作为线损同类电网,3 个单位线损实际完成值也应基本相同,而目前 E 的线损实绩排序异常,意味着该单位管理线损所占比重较大,降损空间也较大。由此可对各单位的线损指标情况进行合理评价。

4 结束语

基于线损同类划分的线损评价方法适合于对县级及以下供电企业开展线损指标评估。随着线损同类划分评估对象缩小,可分别开展不同供电所(营业部)、10 kV 配电线路、低压台区技术线损现状的评估,为各级线损指标管理提供评价依据。

参考文献:

- [1] 王涛,张坚敏,李小平. 计划线损率的计算及其评价[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 40-42, 55.
- [2] 孙志明. 电网统计线损率波动原因分析[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(4): 58-60.
- [3] 许琦,曾凌. 南京电网负荷与气温敏感性分析[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(5): 55-57.

作者简介:

孙志明(1978),男,江苏江阴人,高级工程师,从事无功、线损分析工作;

郑爱霞(1968),女,河南温县人,高级工程师,从事变电运行及无功、线损、电能质量管理工作;

周前(1978),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事电力系统分析及技术线损研究工作。

The Method for Line Loss Index Evaluation Based on Partitioning Similar Area

SUN Zhiming¹, ZHENG Aixia², ZHOU Qian¹

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

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

Abstract: In this paper, some kinds of factors affecting line losses are analyzed, and some indexes for line losses evaluation are proposed. A method for line losses index evaluation based on partition similar area is proposed. It shows that there is a positive correlation between index evaluation result and real line losses. Therefore, the grids which have similar index evaluation results can be defined as similar grids in terms of line losses.

Key words: line losses; impact factor; index evaluation; partitioning similar area

带电更换 500 kV 直线转角塔绝缘子通用工具的研制

张 伟,张佰庆,邵长一,褚洪雷

(江苏省电力公司徐州检修分公司,江苏 徐州 221000)

摘 要:针对江苏省内多种塔型多种挂点结构,研制出一种带电更换 500 kV 直线转角塔绝缘子通用工具,并对其力学特性进行了分析。再利用有限单元法建立工具的精确受力模型,计算了其各部件的应力分布,计算结果表明整套承力工具能够满足机械强度的要求。

关键词:500 kV 直线转角塔;带电作业;绝缘子;力学特性

中图分类号:TM75

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0058-03

随着电力系统电压等级的提高,500 kV 电压等级的输电线路不断增加,电力线路在路径选择上愈发困难。直线转角塔(suspension angel tower)是主要以小或中等角度改变线路方向的杆塔,它的导线用悬垂绝缘子串进行悬挂。由于直线转角塔较耐张塔造价低,节省电力走廊,可以达到节约投资的目的,因此直线转角塔运用广泛。目前,在日常巡视中所发现的严重影响线路安全稳定运行的重大缺陷,如绝缘子破损,受技术条件的限制,均是在停电条件下进行处理。国内一些单位曾对 500 kV 带电更换直线转角塔绝缘子工具有一定研究^[1],但是这些工具均针对特定塔形或特定几种塔形展开研究,不能满足江苏区域内所有塔型挂点的要求。本文提出一种通用工具,适用于江苏省内不同塔型不同联接方式的直线转角塔绝缘子更换作业,并利用数值仿真计算对不同转角情况下的工具的力学特性进行仿真分析,优化设计方案。

1 通用工具的研制

1.1 技术难点

江苏区域内所运行维护的 500 kV 直线转角塔类型约十余种,其最大转角度数达到 20°,对工具的通用性和机械强度提出较高要求。正在运行的直线转角塔横担侧挂点结构各不相同,横担侧宽度较小,无操作孔,上端工器具的安装较困难。导线侧采用上扛式和下垂式挂点,且绝缘子串有一定倾斜角度,当提升导线时绝缘子串受自身重力,使整串绝缘子产生弓形无法脱离上下挂点。

1.2 创新的作业工具研制

通过对江苏区域内 500 kV 输电线路直线转角塔各种塔型、绝缘子串结构、导线型号及金具组装形式和带电作业所需条件的分析,结合以往带电作业经验,针对以上技术难点,提出解决方案。

挂点侧设计采用高强度铝合金多用途卡具,使其

能满足不同挂点的应用要求。上部卡具采用扁担卡安装在横担角铁上,利用锁销固定,无需操纵孔。在满足强度要求的前提下采用镂空结构减轻工具重量,提高工作效率。采用安装托瓶架^[2],使绝缘子串在托瓶架下成为整体,使绝缘子串下挂点得以顺利摘脱。

整体作业方案:采用扁担卡(前卡)、可调绝缘拉板、斜卡(后卡)、起重丝杠配合组成成套承力工具。斜卡从直角挂板两边穿过,用锁销固定在直角挂板上,卡具首端上连可调绝缘拉板;扁担卡利用横担处的角铁固定,通过螺栓卡死,将起重丝杠倒装在前卡上。安装好托瓶架,收紧丝杠,将绝缘子串承受的拉力转移到成套承力工具上,将受损绝缘子串解脱,更换新绝缘子串,从而消除线路缺陷,保证输电线路通畅^[3]。

2 力学分析

由于直线转角塔所承担的导线会偏转一定的角度,导致绝缘子串倾斜,同时相应工具承受的水平荷载较一般的直线塔大。因此更换绝缘子的工具所受应力不均匀,其形变与传统工具也不相同。如果仅以解析的形式给出工具的受力特性,与实际情况有很大差异,因而其结果只能定性或粗略定量,不能准确地反映工具在复杂受力条件下的状态。而有限单元法(FEM)是一种用于连续场分析的数值模拟技术,它可以对机械、建筑结构的位移场和应力场进行分析,解决工程实践中用解析法难以或无法解决的各种复杂问题,诸如复杂边界条件、复杂物体形状、非线性等等,且可以得到满意的结果^[4]。

(1) 计算采用的软件版本为 Ansys10.0 版本,通过该软件强大的前处理功能对导线及金属卡具进行有限元建模;通过计算模块对结构进行求解;最后通过 Ansys 软件强大的后处理功能对结算结果进行可视化显示及分析。

线路基本参数:导线规格 LGJ-400/35,计算截面积 425 mm²,水平档距 450 m,垂直档距 800 m,风速

30 m/s,线路最大转角 20° 。

(2) 考虑的荷载主要包括导线自重荷载,导线风压荷载以及绝缘串子的自重及风压荷载,其中风荷载取不利情况进行计算,即风荷载以水平方向为计算方向。此外,由于金属卡具、拉杆等结构的自重相对于导线自重及风荷载而言相对较小,因而计算中并不考虑卡具及拉杆的自重。根据 DL 5154—2002 架空送电线路杆塔结构设计技术规程,导线风荷载的标准值为:

$$W_x = \alpha W_0 \mu_z \mu_{sc} \beta_c d L_p \sin^2 \theta \quad (1)$$

式(1)中:基准风压标准值 $W_0 = V^2 / 1600$; W_x 为垂直于导线方向的水平风荷载标准值; α 为风压不均匀系数; β_c 为 500 kV 线路导线荷载调整系数; μ_z 为风压高度变化系数; μ_{sc} 为导线体型系数; d 为导线计算外径; L_p 为杆塔的水平档距; θ 为风向与导线之间的夹角; V 为基准高度的风速。

上述系数可根据具体情况按规范取值。绝缘子串风荷载的计算标准值为:

$$W_1 = W_0 \mu_z A_1 \quad (2)$$

式(2)中: A_1 为绝缘子串承受风压面积计算值。

根据规范规定,对构件进行承载能力极限状态的验算时需满足:

$$\gamma_0 (\gamma_G \cdot C_G \cdot G_k + \psi \sum \gamma_{Qi} \cdot C_{Qi} \cdot Q_{ik}) \leq R \quad (3)$$

式(3)中: γ_0 为结构重要性系数; γ_G 为永久荷载分项系数; G_k 为永久荷载标准值; ψ 为可变荷载组合系数; γ_{Qi} 为第 i 项可变荷载分项系数; Q_{ik} 为第 i 项可变荷载标准值; C_G, C_{Qi} 分别为永久荷载和可变荷载的荷载效应系数; R 为结构构件抗力值。上述系数根据实际情况按规范取值^[5]。

3 工作方案及工器具组合

(1) 500 kV 直线转角塔 SZJ16 转角度数较大,导线施加在绝缘子串的水平荷载也较大,因此采用如图 1 所示的直线双串卡作为更换工具,其采用高强度铝合金加工而成,上卡具为扁担卡,下卡具为斜卡,都牢固可靠。此套工具能够同时更换双串绝缘子,工作负荷为 100 kN,安全系数 2.5,试验负荷 200 kN。

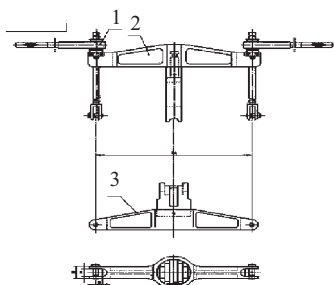


图 1 直线双串卡

(2) 500 kV 直线转角塔 SZJ2 转角度数较大,导线施加在绝缘子串的水平荷载也较大。因此采用如图 2 所示的大刀卡,可以更换单串绝缘子,其采用两个绝缘拉棒进行导线荷载的转移,有效地承载水平负荷。它的工作负荷为 50 kN,试验负荷为 100 kN。

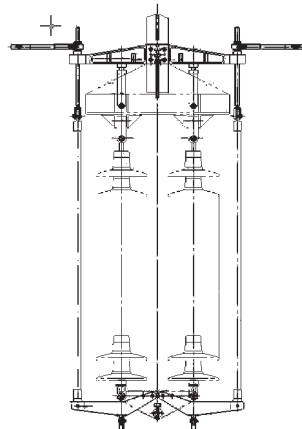


图 2 大刀卡

4 有限元计算模型验证卡具应力

4.1 建立受力模型

为引入工具的精确受力模型,首先做如下假设:

(1) 认为工具所用材料处处匀质;(2) 绝缘拉板仅承受重力分布载荷及其两端的力和弯矩;(3) 同一截面上,弹性模量均匀分布,处处相等;(4) 仅考虑正应力和正应变,不考虑剪切应力和剪切应变对正应力和正应变的影响^[6]。

有限元计算模型包括前、后卡具部分以及绝缘拉杆。直线双串卡具整体模型图及局部模型图如图 3、图 4 所示。卡具有限元模型采用 8 节点六面体等三单元划分,直线双串卡具节点总数为 25 764 个,单元总数为 19 984 个。



图 3 直线双串卡具整体有限元模型



图 4 直线双串前、后卡具局部有限元模型

4.2 有限元计算及结果分析

为了观察卡具各部位的应力分布情况,对卡具的前卡部分和后卡部分分别显示,并且每个部分用了多个视角,从而能更全面地了解卡具应力分布。前卡和后卡^[7]的应力分布云图如图5、图6所示。从图中可以看出前卡和后卡上的最大应力为350 MPa,未超出铝合金的屈服应力,整个工具安全可靠。但是2种卡具的受力特点并不一样。

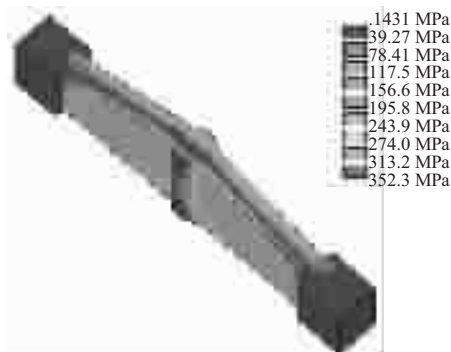


图5 前卡 Mises 应力分布云图



图6 后卡 Mises 应力分布云图

从图5中可看出,前卡的受力不均匀,2个侧面受力不同,在卡块和扁担卡的连接处和卡具转角处受力较大,最大应力接近350 MPa,且远大于最小应力40 MPa。这是因为前卡是通过螺栓固定在横担的角铁上,其主要承受了导线传导上来的垂直荷载和水平荷载,且不能位移。因此在前卡的设计时应当考虑增加薄弱处的机械强度,提高安全性。

而根据图6的应力分布图可知道,后卡所受应力较为均匀,最大应力为100 MPa左右。这是因为后卡是直接和导线上的联板相连,在导线的荷载作用下,其会和导线一样发生位移,使其主要受力仍保持在拉板的轴向。因此在后卡的设计方案中可以考虑在保持足够机械强度的前提下,采用镂空或减下尺寸的方式减轻卡具重量提高工作效率。

对于拉杆,由于拉杆主要承受拉应力作用,并且从计算结果可以发现,拉杆的拉应力大致分布在20~50 MPa,如图7所示,远远小于其抗拉强度350 MPa,且应力分布均匀,能够满足作业的需要。



图7 绝缘拉板 Mises 应力分布云图

5 现场实施

(1) 为了验证工器具的有效性,2013年10月24日在徐州500 kV 堡任5231线4号直线转角塔上使用了研制的I型通用工具进行停电状态下的绝缘子更换作业。

(2) 为了验证II型通用工具的有效性,2013年10月30日在南京500 kV 东峰5256线7号杆塔进行现场试验。现场作业成功换下了整串绝缘子。

经过现场实际应用,该套工具组合可以满足江苏省内95%以上直线转角塔形的绝缘子更换作业需求。

6 结束语

(1) 采用高强度铝合金多用途卡具的成套承力工具可以适应多种塔型多种挂点结构的直线转角塔带电更换绝缘子作业,其具有通用性强,安装简便的特点。

(2) 运用有限单元法数值模拟技术对工具受力分析表明整套工具的机械强度满足使用要求,安全可靠。

(3) 根据计算结果对工具的设计方案提出了合理建议,工具的前卡受力不均匀,应当在连接处增强其机械强度,而后卡受力均匀,可以适当减轻重量。

参考文献:

- [1] 郝旭东,纪建民,智润仓,等.带电更换500 kV 直线转角塔绝缘子串通用工具的研制[J].华北电力技术,2008(2):8-11.
- [2] 邢军,童维占.带电更换500 kV 直线V型绝缘子串工具及应用[J].江苏电机工程,2008,27(4):51-54.
- [3] GB/T 18037—2000,带电作业工具技术要求与设计导则[S].
- [4] 侯镭.架空输电线路导线非线性动力特性研究[D].北京:清华大学,2008.
- [5] 王黎明,孙保强,张楚岩,等.750 kV 紧凑型线路相间间隔棒力学分析与计算[J].高电压技术,2009,35(10):2551-2556.
- [6] DL 5154—2002,架空送电线路杆塔结构设计技术规程[S].
- [7] 张云飞,邢军,杜蕴莹,等.带电更换悬垂串绝缘子遥控机器臂研制开发[J].江苏电机工程,2009,28(2):51-56.

6 kV 高压变频调速系统恒压频比控制研究

翟学锋,徐 钢,李辰龙,杨宏宇
(江苏方天电力技术有限公司,江苏 南京 211102)

摘 要:以 6 kV 级联型载波移相高压变频器作为研究对象,介绍了其结构与工作原理,进行了仿真试验研究,证明了此种变频器的优越性能。在此基础上,采用恒压频比的控制方法,对 6 kV 高压变频调速系统进行控制。仿真试验结果表明,文中所用控制策略效果优良,完全可以在工业控制中应用。

关键词:高压变频器;载波移相;恒压频比控制

中图分类号:TM921

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0061-04

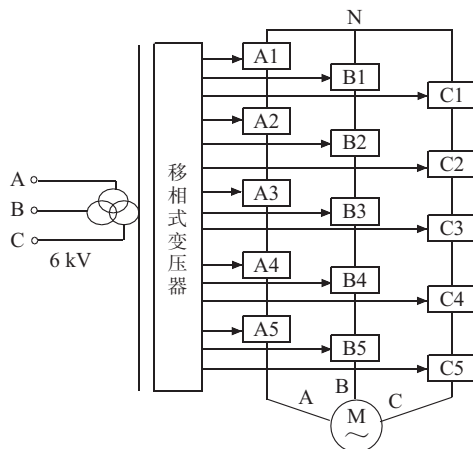
面对可再生资源消耗过大、能源短缺的局面,我国提出要建立资源节约型、环境友好型社会。高压变频调速系统中由于使用了高压变频器,较之于不使用变频器调速的场合,平均可节约 30%,因而在电力、石化、钢铁等工业领域得到广泛的应用^[1]。

目前对高压变频调速系统研究,主要集中在高压变频器(通常为 6 kV、10 kV)自身的研究,而对于高压变频器与电机之间如何协调控制研究得不多^[2,3]。高压变频器通常由若干个低压变频器串联而成,因此对其控制比较复杂。交流电机调速的方法通常有恒压频比控制、矢量控制等。恒压频比控制结构简单、成本低、控制方便,广泛应用于各种生产场合。矢量控制虽然调速性能高,但结构复杂、成本高、控制复杂。考虑到高压变频调速系统绝大部分用于风机和水泵,而风机、水泵对调速性能的要求不是太高,因此本文采用恒压频比控制方法^[4,5]。在所有高压变频器种类当中,级联型移相式高压变频器由于串联了若干个低压功率单元来实现高压输出,对电网谐波污染较小,输出电压和电流的谐波含量低,输入功率因数较高,且不必采用谐波滤波器和功率因数变换器,在实际中应用广泛^[6-9]。

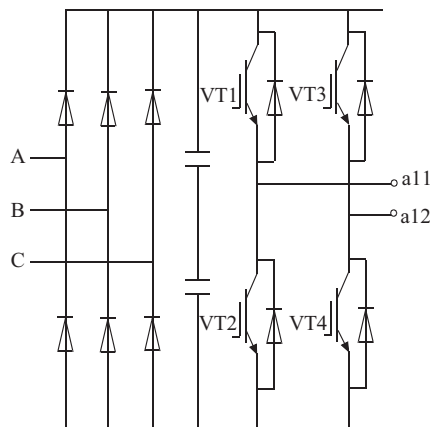
1 级联型多电平高压变频器结构

级联型多电平高压变频器是将若干个模块化低压功率单元串联,以实现高电压输出。5 级功率单元串联的变频器拓扑结构如图 1(a)所示。系统由多重化移相式变压器、级联型功率单元以及高压电动机 3 个部分组成。其中多重化移相式变压器可以提高系统整流的脉动次数,减少电网的谐波污染。以 5 级功率单元串联为例,多重化移相变压器的一次侧直接与 6 kV 电网相连,其二次侧共有 5 组 15 路,其中 A1、B1、C1 为一组三相绕组,每组的 A、B、C 三相之间保持 120° 的相角关系,而组与组之间相位角不同,以(+24°, +12°, 0°, -12°, -24°)的移相角构成了五重移相变压器,

这样整个变频器系统就相当于 30 脉波整流,理论上电网侧的输入电流中不含有 29 次以下谐波,这样对电网的谐波污染非常小,不必另外设置输入滤波器进行滤波。单个功率单元拓扑结构如图 1(b)所示。它由三相整流桥、滤波电容和 H 逆变桥 3 部分构成。多个功率单元输出电压叠加形成每相输出相电压。以 6 kV 线电压输出为例,相电压的大小为 3450 V,5 级单元串联时每个功率单元输出电压为 690 V,可以采用普通的低压 IGBT 器件。



(a) 级联型变频器拓扑结构



(b) 功率单元拓扑结构

图 1 级联型变频器及功率单元拓扑结构

2 异步电机的恒压频比控制

假设三相异步电动机三相绕组对称,空间互差电角度,所产生的磁动势沿气隙圆周正弦分布,绕组的自感和互感都是线性的,那么异步电动机的三相定子电压方程为:

$$\dot{U} = j\omega_1 \dot{\Psi} + iR_1 \quad (1)$$

当电机转速较大时,定子绕组压降可以忽略,则式(1)近似为:

$$\dot{U} \approx j\omega_1 \dot{\Psi} \quad (2)$$

即:

$$U \approx \omega_1 \Psi \quad (3)$$

式(1—3)中: U 、 Ψ 分别为 $\dot{U}$ 和 $\dot{\Psi}$ 的模,则:

$$\Psi \approx \frac{U}{\omega} = \frac{U}{2\pi f} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{U}{f} \quad (4)$$

恒压频比控制就是保持 U/f 为常数,那么磁链 Ψ 也为一常数,从而使交流电机得到类似于直流电机的性能。异步电动机恒压频比变频调速系统原理结构如图 2 所示,系统由升降速时间设定、 U/f 曲线、正弦波脉冲宽度(SPWM)调制和驱动等环节组成。其中升降速时间设定用来限制电动机的升频速度,避免转速上升过快而造成电流和转矩的冲击,相当于软起动控制的作用。 U/f 曲线用于根据频率确定相应的电压,以保持压频比不变($U/f=\text{常数}$),并在低频时进行适当的电压补偿。SPWM 和驱动环节将根据频率和电压要求产生按正弦脉宽调制的驱动信号,并控制逆变器,以实现电动机的变压变频调速。

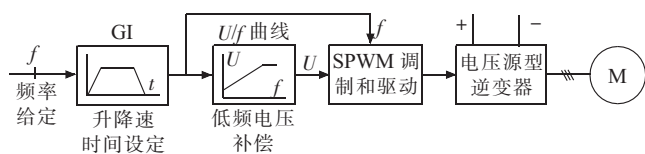


图 2 恒压频比变频调速系统原理图

3 仿真结果及分析

3.1 6 kV 高压变频器仿真

基于 Matlab/Simulink 对 6 kV 高压变频器进行仿真研究。首先对单个功率单元进行建模与仿真,如图 3 所示。图 3 中有三相交流电源、整流桥、直流滤波环节、逆变器和脉冲信号等模块。其中脉冲信号采用载波移相 SPWM 技术,由 2 个反相的正弦波与同一个三角载波比较产生。仿真参数:电源线电压 690 V,频率 50 Hz,电源内阻 $R_s=0.91 \Omega$,电感 $L_s=0.0029 \text{ H}$,直流滤波电容 $C=3000 \mu\text{F}$ 。

在对单个功率单元进行仿真后,由 5 个功率单元级联形成高压变频器的相(如 A 相),同理可得到 B

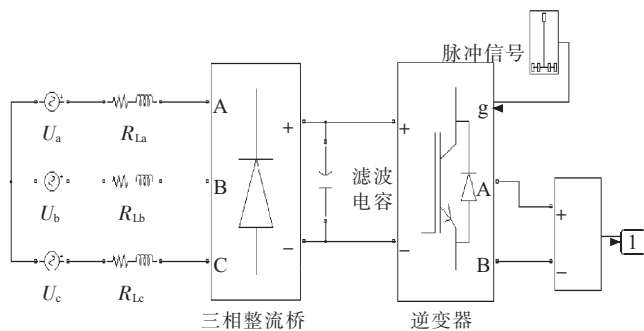


图 3 单个功率单元仿真模型

相、C 相。高压变频器不带负载时输出的相电压和三相线电压波形如图 4、图 5 所示。

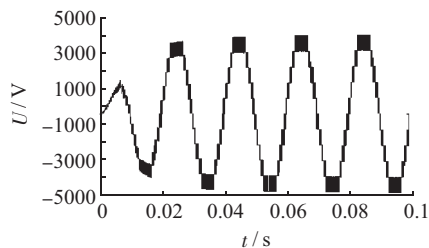


图 4 高压变频器一相电压波形

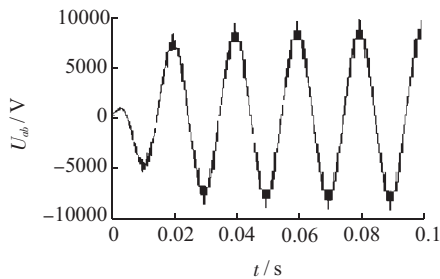


图 5 三相变频器线电压波形图

由图 4、图 5 可以看出,高压变频器一相输出电压有 11 个阶梯波,波形接近正弦波;而三相变频器线电压有 21 个阶梯波,比相电压的波形更接近于正弦波,因此谐波分量非常低。

3.2 控制系统仿真及分析

对 6 kV 载波移相高压变频调速控制系统进行仿真试验研究。变频器参数同上。电机参数:额定功率 $P_e=500 \text{ kW}$,额定转速 $n=1450 \text{ r/min}$,额定电压 $U_e=6000 \text{ V}$,定子电阻 $R_s=2 \Omega$,定子漏抗 $L_{ls}=0.02229 \text{ H}$,转子电阻 $R_r=1.9 \Omega$,转子漏抗 $L_{lr}=0.01592 \text{ H}$,定、转子互感 $L_m=0.7484 \text{ H}$,转动惯量 $J=48 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,极对数 $p=2$ 。

高压变频调速系统恒压频比控制系统 Matlab 仿真图如图 6 所示。其中 SPWM 为正弦波脉冲宽度调制,三相共 15 路脉冲波形,作为逆变器的输入信号。让电机带负载($1000 \text{ N}\cdot\text{m}$)运行,电压变化上升、定子电流和电磁转矩波形如图 7—9 所示。

从图 7—9 可以看出,在启动过程中,变频器的输出电压随频率的升高而上升,到 3 s 左右达到稳定。启动定子电流大小约为 140 A,启动转矩比较大。

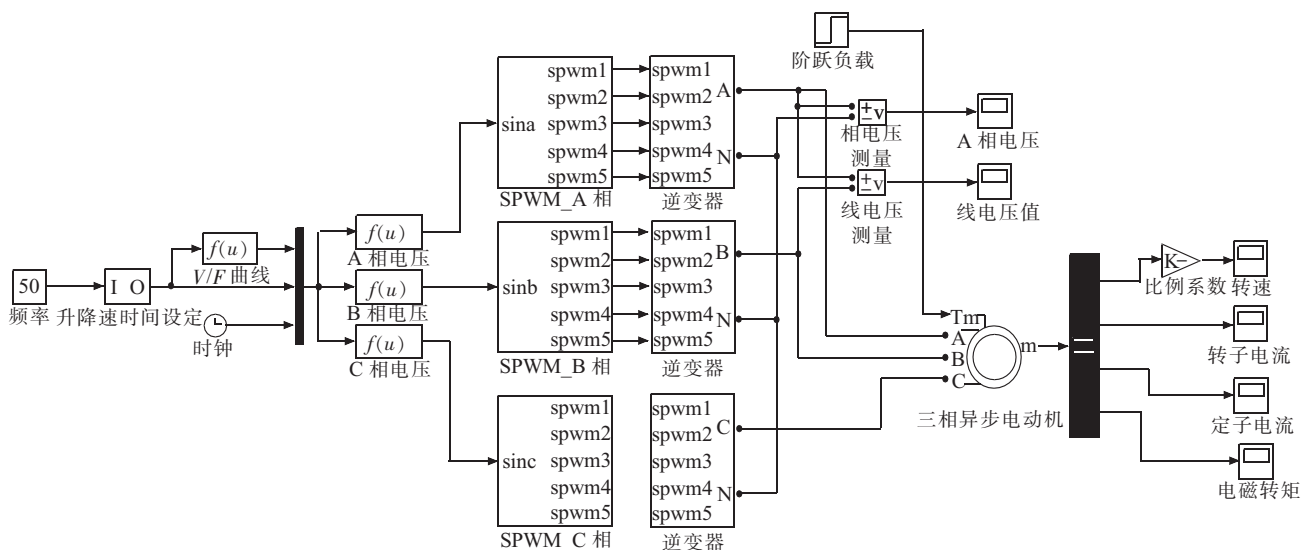


图6 高压变频调速系统恒压频比控制系统 Matlab 仿真图

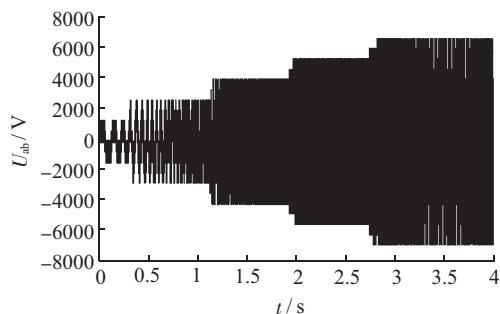


图7 变频器电压变化过程波形图

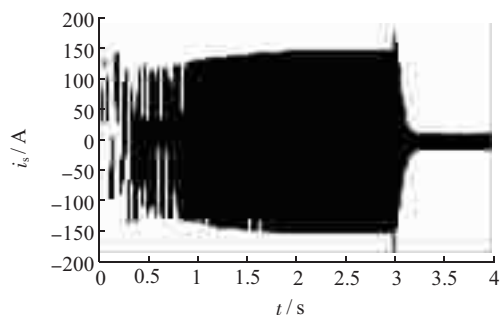


图8 定子电流波形

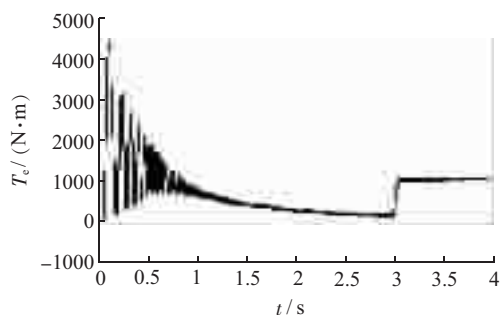


图9 电机带负载时转矩波形

为了验证高压电机带变频器运行的优越性,将带变频器的恒压频比高压电机控制系统与高压异步电机直接启动控制系统作对比。高压电机直接启动时的定子电流和转矩波形如图10、图11所示。

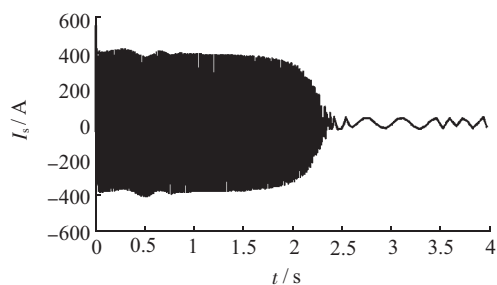


图10 电机直接启动定子电流波形

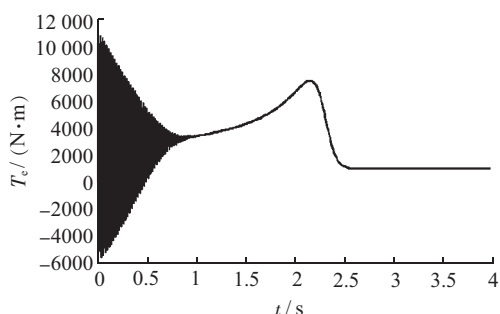


图11 电机直接启动转矩波形

比较图10、图11可以看出,无论是定子电流还是电磁转矩,直接启动时都远远大于带变频器启动。变频启动过程平稳,对电网的冲击小。因此本文针对6 kV高压变频器所采用恒压频比控制方法完全可行,具有很好的控制效果。

4 结束语

通过对6 kV载波移相式SPWM调制高压变频器基本结构、原理的分析进行仿真研究,得到近似为正弦波的输出电压波形,谐波分量低。在此基础上,基于异步电机恒压频比控制的理论,对6 kV载波移相高压变频系统进行控制。研究表明:与高压异步电机直接启动相比,基于恒压频比控制的级联型高压变频系统启动电流小、转矩脉动小、对电网冲击小,则启动性能更好。

参考文献:

- [1] 罗德荣,王耀南,葛照强,等. 级联型高压变频器控制算法的研究及实现[J]. 电工技术学报,2010,25(1):104-110.
- [2] 竺伟,陈伯时. 高压变频调速技术[J]. 电工技术杂志,1999(3):26-28.
- [3] 徐甫荣,陈辉明. 高压变频调速技术应用现状与发展趋势[J]. 变频器世界,2007(4):61-67.
- [4] 戴先中,刘国海. 恒压频比变频调速系统的神经网络逆控制[J]. 中国电机工程学报,2005,25(7):109-114.
- [5] 张兴华. 空间矢量脉宽调制恒压频比控制的数字实现[J]. 电气传动,2004(2):12-15,29.
- [6] HOLMES D G, MCGRATH B P. Opportunities for Harmonic Cancellation with Carrier-based PWM for Two-level and Multilevel Cascaded Inverter[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, 37(2):574-582.
- [7] TOLBERT L M, HABETLER T G. Novel Multilevel Inverter Carrier-based PWM Method[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1999, 35(5):1098-1107.
- [8] 罗德荣,陈琼,秦卓欣,等. 单元级联型变频器 SPWM 控制算法研究及实现[J]. 电力电子技术,2010,44(7):81-83.
- [9] 朱丽媛,王英. 基于 MATLAB 的级联型高压变频器的建模与仿真[J]. 电机与控制应用,2012,39(4):51-56.

作者简介:

翟学锋(1967),男,江苏南京人,高级工程师,从事智能电网、电力系统运行与检修方面工作;

徐钢(1967),男,江苏仪征人,高级工程师,从事继电保护工作;

李辰龙(1980),男,辽宁朝阳人,工程师,从事继电保护工作;

杨宏宇(1979),男,河南驻马店人,工程师,从事继电保护工作。

Research on Constant U/F Control for 6 kV High-voltage and Variable Frequency Speed-regulating System

ZHAI Xuefeng, XU Gang, LI Chenlong, YANG Hongyu

(Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co.Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In this paper, the structure and the operational principle of cascaded high voltage inverter based on different carrier phase-shifted angle are first introduced. Simulations on the inverter verified its superiority. Based on this, the constant U/F control method is applied to the 6 kV high-voltage and variable frequency speed-regulating system. The simulation results show that the control strategy in this paper performs well and can be used in industrial control.

Key words: high voltage converter; carrier phase-shifted; constant U/F control

(上接第 60 页)

作者简介:

张伟(1971),男,江苏沛县人,高级工程师,从事输电线路及高压工作;

张佰庆(1978),男,江苏沛县人,高级工程师,从事输电线路及带电作业工作;

邵长一(1984),男,江苏徐州人,工程师,从事输电线路工作;

褚洪雷(1977),男,山东微山人,助理工程师,从事输电线路工作。

Research on the General Tool for Live Work Insulator Replacement for 500 kV Suspension Angle Tower

ZHANG Wei, ZHANG Baiqing, SHAO Changyi, CHU Honglei

(Xuzhou Division of Jiangsu Provincial Power Company Maintenance Branch, Xuzhou 221000, China)

Abstract: This paper introduces a kind of general tool for live work insulator replacement for 500 kV suspension angle tower considering the character of multiple hanging points of towers in Jiangsu province. Also, the analysis on the mechanical property of this general tool is provided. Then using the finite element method the precise force model of the general tool is build, and the stress distribution of its each part is investigated. Calculation results show that the general tool meets mechanical strength requirement.

Key words: 500 kV suspension angle tower; live work; insulator; mechanical property

广 告 索 引

南京南瑞继保电气有限公司	封一	《江苏电机工程》协办单位	前插 4
远东电缆有限公司	封二	南京苏逸实业有限公司	(黑白) 文前
南瑞科技股份有限公司	前插 1	江苏南瑞帕威尔电气有限公司	封三
《江苏电机工程》协办单位	前插 2,3	江苏省电力设计院	封四

温度对典型光学电压互感器误差特性影响的研究

陈 刚,陈铭明,徐敏锐,赵双双

(江苏省电力公司电力科学研究院 国家电网公司电能计量重点实验室,江苏 南京 211103)

摘 要:光学电压互感器容易受到温度影响,其误差特性是实际工程应用关注的焦点。文中首先介绍了几种典型原理的光学电压互感器,建立了光学电压互感器试验平台及试验方案,并针对已经实用化的 2 种原理的光学电压互感器开展了温度影响试验,提出了电容分压原理的光学电压互感器温度性能较好的观点。

关键词:光学电压互感器;误差特性;温度

中图分类号:TM451

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0065-03

随着国网公司智能变电站建设工作的展开^[1],光学电压互感器已在智能变电站逐步得到应用,如 2011 年 4 月 18 日安徽桓谭 110 kV 智能变电站投运在世界首次应用 110 kV 全光学电压互感器,我省已经投运的常熟南智能变电站也采用了光学电压互感器。光学电压互感器误差特性和传统的电磁或电容式电压互感器有很大区别,同时目前光学电压互感器的实现原理上有多种,其误差特性易受温度影响,而目前对于光学电压互感器的测量性能研究分析工作大都停留在理论分析和试验室测试上,其在工程应用中的试验与分析评价方法还很缺乏,迫切需要进行试验检测分析来论证研究分析的结果,并解决光学电压互感器运行中的技术指标稳定性等问题。

1 光学电压互感器原理研究

光学电压互感器按照原理不同可分为电容分压原理、Pockels 电光效应、Kerr 效应等。

1.1 电容分压原理

基于电容分压原理的光学电压互感器主要由电容分压器、电子处理电路和光纤等组成,原理框图如图 1 所示。其测量过程如下:被测高压信号由电容分压器从电网取出,信号经放大、滤波、A/D 转换及电光转换,以数字光信号的形式送至合并单元,合并单元首先由电光转换器 PIN 将光信号转换成电信号,将串行信号变成并行信号,并按 IEC 61850 标准打包将测量结果输出给计量和微机保护设备。

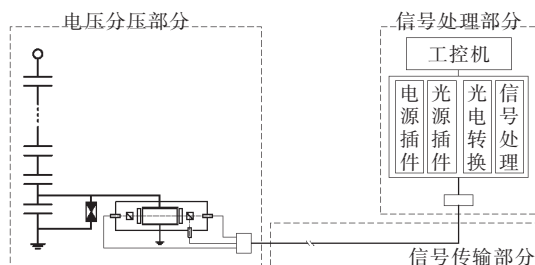


图 1 电容分压原理的光学电压互感器

光学电压互感器置于室外运行,当环境温度变化时,其电容器的电容量也会发生变化,从而会对分压比产生影响^[2]。

1.2 Pockels 效应

1893 年德国物理学家 F.Pockels 首先发现电光效应。所谓 Pockels 电光效应是指某些透明的光学介质在外电场作用下,其折射率线性地随外加电场而变化。Pockels 效应又称线性电光效应。其原理如图 2 所示。

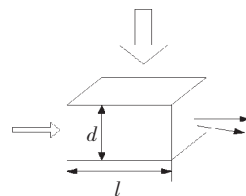


图 2 Pockels 电光效应原理

若晶体在通光方向长为 l ,则出射的两束光之间的相位差为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{x_1} - n_{x_2})l = \frac{\pi}{\lambda} \cdot n_0^3 \gamma_{41} El \quad (1)$$

或用电压表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_0^3 \gamma_{41} \cdot \frac{l}{d} V = \pi \frac{V}{V_\pi} \quad (2)$$

其中:

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^3 \gamma_{41}} \cdot \left(\frac{d}{l}\right) \quad (3)$$

式(1—3)中: V_π 为使二束光产生 π 相差所需的外加电压,称半波电压; V 为外加电压; V 为施加电压方向的晶体厚度。

由 BGO 电光晶体构成的光纤电压传感器如图 3 所示。它由光纤、准直透镜、起偏器、检偏器、1/4 玻片、电光晶体和耦合透镜通过光学胶(如紫外光学胶或 A+B 光学胶)黏接而成,因不同材料具有不同温度系数,当温度在较大范围($-40 \sim +70^\circ\text{C}$)变化时,各元件的收缩或膨胀变形不一致,从而引起光路系统中光的耦合效率发生变化,导致输出光功率的波动,则导致测量误差^[3]。

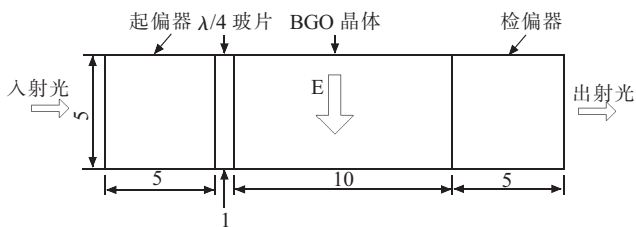


图3 光纤电压传感器结构示意图

1.3 Kerr 效应

1875年苏格兰物理学家 J.Kerr 发现某些本来是各向同性的介质在外加电场的作用下变成各向异性的介质,从而产生双折射,这种效应就是 Kerr 效应。实验表明,Kerr 效应中外电场的方向相当于介质在外电场作用下所转变成的各向异性晶体的光轴。当光的振动方向与外电场方向一致时,介质的折射率为 n_e ,相互垂直时,射率为 n_o ,外加电场强度为 E ,则:

$$n_o - n_e = K\lambda E^2 \quad (4)$$

式(4)中: λ 为光在真空中的波长; K 为一个常数,称为克尔常数。

通过对折射率引起的相位差的测量来间接测量外加电压。由于折射率之差与外加电场强度的平方成正比,Kerr 效应又称为二次电光效应。Kerr 效应较 Pockels 效应相比要微弱得多,且具有非线性性,因此在实际传感器中应用不多。

2 误差特性试验研究

2.1 试验系统搭建

因为针对各种光学电压互感器的误差特性,需要构建一套能够对光学电压互感器提供一次大电压和二次输出接收与检测的设备系统^[4]。试验系统如图4所示。系统接入工频单相 220 V 电源给升压系统,通过升压系统产生的一次电压 U_1 同时作用于标准电压互感器和光学电压互感器,由标准互感器差生二次电压 U_2 ,输出到高精度模拟量采集板卡(采样频率不低于 50 kHz),ADC 在同步模块 1pps 的控制下,每秒触发一次采集,得到标准源电压值 U_{ref} ; U_1 作用于 OVT 上,由 OVT 感应采集实时电压数据,通过光纤传输到 MU,由 MU 整理后将采集量通过 IEC 61850-9-1, IEC 61850-9-2 或 FT3 传输到光纤收发器,再由 FPGA 数字量接收装置接收。

2.2 试验方案

数字量输出光学电压互感器采用外部同步校验时的接线如图5所示。当采用外部同步方式校验数字量输出光学电压互感器时,如果光学电压互感器校验仪没有同步信号输出功能时,可采用外部同步信号来同步。测量误差时,标准互感器和光学互感器一次极性应同方向,标准互感器二次正极性接入。

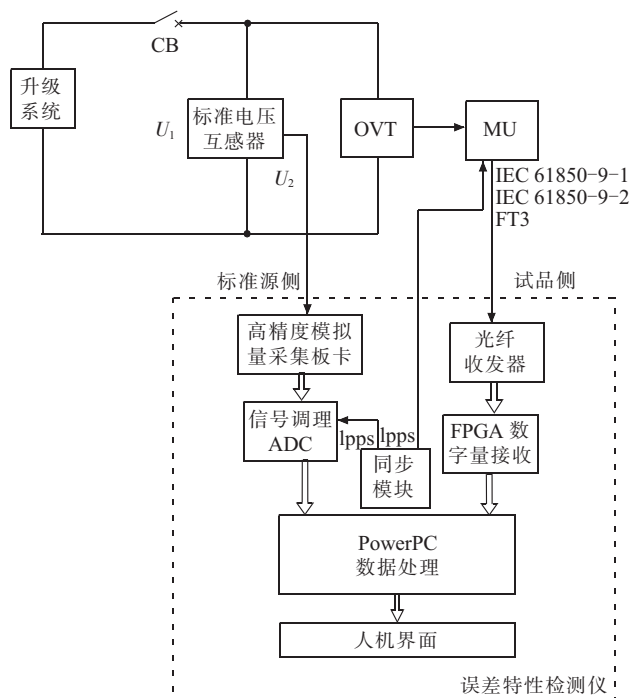
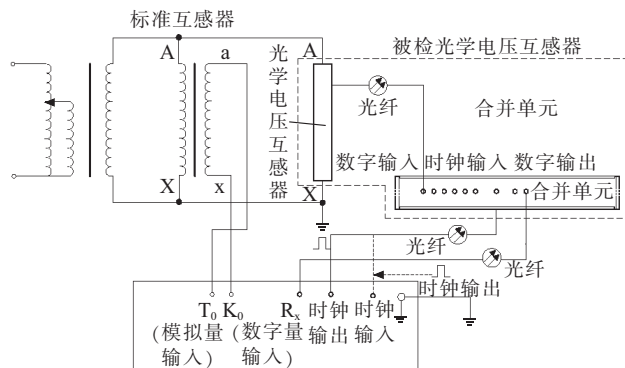


图4 光学电压互感器误差试验系统



A, X 为电压互感器一次的对应端子;
B, a, x 为电压互感器二次的对应端子;
C, T₀, K₀ 为电子式互感器校验仪上的标准器接口;
D, T₁, K₁ 为电子式互感器校验仪上的被试品模拟量接口

图5 数字量输出光学电压互感器校验接线图
(外部同步方式)

3 试验过程及结果分析

3.1 电容分压原理光学电压互感器温度影响试验

电容分压原理的光学电压互感器比差随温度变化曲线如图6所示。电容分压原理的光学电压互感器角差随温度变化曲线如图7所示。

在图6、图7中,左坐标轴表示温度,右坐标轴表示比差或角差,横坐标表示测量时刻。从图6、图7可看出,当温度从 -40 °C 变化至 70 °C 时,该互感器比差从 -0.12% 变化至 -0.06%, 角差从 6' 变化至 1', 符合 0.2 级互感器误差要求。

3.2 Pockel 效应原理的光学电压互感器试验

对 Pockel 效应原理的光学电压互感器试验结果如图8、图9所示。当温度从 -40 °C 变化到 70 °C, 光学

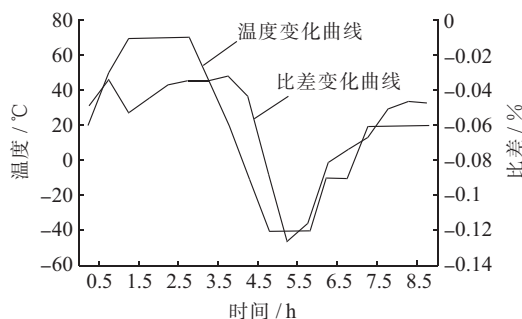


图6 电容分压原理的光学电压互感器比差随温度变化曲线

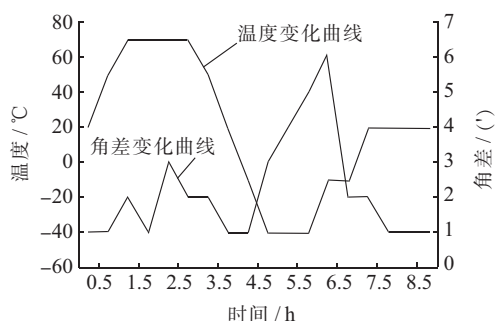


图7 电容分压原理的光学电压互感器角差随温度变化曲线

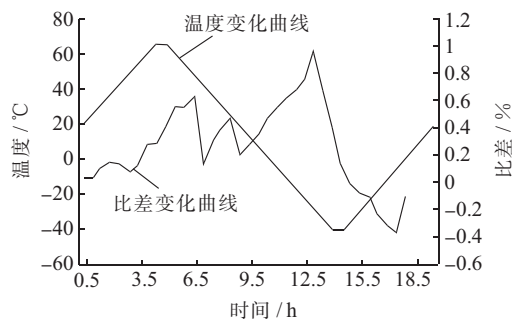


图8 Pockels 效应光学电压互感器比差随温度变化曲线

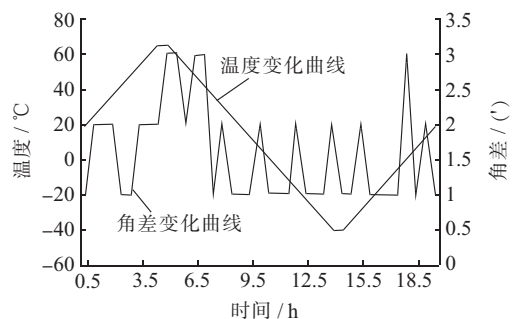


图9 Pockels 效应光学电压互感器角差随温度变化曲线

电压互感器比差从 0.95% 变化到 0.08%, 角差在 3' 至 1' 之间变动, 按照 0.2 级互感器误差要求, 比差已经严重超差。为评估 Pockel 效应原理的光学电压互感器温度性能, 在 -40 °C 变化到 70 °C 同时测试了另外 2 台相同原理同一厂家的光学电压互感器, 3 台光学电压互感器平均比差变化 1.4%, 角差变化 3', 难以满足要求。

4 结束语

分析了光学电压互感器原理, 建立了光学电压互感器误差试验系统并对 2 种实用化的光学电压互感器开展了温度影响下的误差对比试验。实验结果表明, 温度对 Pockels 光学电压误差影响较大, 而电容分压原理的电子式电压互感器温度特性较好。

参考文献:

[1] 陈铭明, 卢树峰, 包玉树, 等. 光学电压互感器实时误差分析系

统的设计[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 47-48.

[2] 王红星. 电容分压型光学电压互感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电气工程及其自动化学院, 2010.

[3] 李开成, 孙 健, 何 昊. 光学电压互感器的误差及误差抑制方法研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(11): 1-3.

[4] 李开成, 李振兴, 易 杨. 电子式互感器校验系统的研究[J]. 电测与仪表, 2009, 46(12): 43-47.

作者简介:

陈 刚(1984), 男, 湖北黄梅人, 工程师, 从事电能计量方面的研究工作;

陈铭明(1986), 男, 江苏南通人, 工程师, 从事电能计量方面的研究工作;

徐敏锐(1976), 男, 江苏涟水人, 高级工程师, 从事电能计量方面的研究工作;

赵双双(1986), 女, 江苏徐州人, 工程师, 从事电能计量方面的研究工作。

Research on the Effect of Temperature on Typical Optical Voltage Transformer Error Characteristics

CHEN Gang, CHEN Mingming, XU Minrui, ZHAO Shuangshuang
(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute

State Grid Laboratory of Electric Energy Measurement, Nanjing 211103, China)

Abstract: Optical voltage transformer is susceptible to temperature. Therefore, the error characteristic of optical voltage transformer has been attracting many attentions. This paper introduced several typical optical voltage transformer, established the test platform and programs for optical voltage transformers. Temperature impact tests have been carried out for two kinds of optical voltage transformers which are used in practice. Based on the tests, we found that optical voltage transformer based on capacitive voltage divider principle performances better in terms of temperature impacts.

Key words: optical voltage transformer; error characteristics; temperature

高频电源在 1000 MW 机组电除尘上的应用及优化分析

朱培峰

(国电泰州发电有限公司,江苏 泰州 225327)

摘 要:介绍了高频电源技术在国电泰州发电有限公司 1 号机组电除尘器的应用,对高频电源的节能减排技术特点进行了阐述。通过高频电源技术改造和大量现场试验,提升了电除尘器的除尘效率,带来了良好的经济效益和社会效益,为电除尘器高频电源节能减排技术的推广应用提供了实践经验。

关键词:电除尘器;高频电源;参数优化;除尘效率;节能减排

中图分类号:TM621

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0068-02

随着国民经济的发展,我国对环境污染控制水平的要求不断提高,新的环保法规中粉尘排放标准日趋严格。为保护环境,实现经济可持续发展,我国火电企业以节能减排为中心任务,大力发展和推广节能减排新技术。电除尘器作为我国燃煤锅炉烟尘排放治理的主要设备,电除尘器电源是其核心装置,它能产生除尘所需的高压,对除尘效率有着至关重要的影响^[1]。为了降低粉尘排放浓度,落实国家节能减排政策,国电泰州发电有限公司经广泛调研^[2-4],决定采用电除尘器高频电源技术对 1 号机组电除尘器实施升级改造,通过不同工况的现场试验和分析,对电除尘器高频电源的运行方式进行优化调整,使其达到良好的除尘性能。

1 高频电源技术特点

1.1 高频电源工作原理

高频电源能够在电除尘器火花放电或短路时快速关断,封锁电源输出,使电源具有快速动态响应特性。该特性也使得高频电源实现了接近纯直流的输出,提高了供电电压,从而提高了电除尘器的电场强度和粉尘荷电量,增加了电除尘器内粉尘所受电场力,加快了粉尘迁移速度,提高除尘效率,减少烟尘排放^[5]。在投入工程应用以来,高频电源以除尘效率高、系统节能效果好,减少电除尘器的运行费用等稳步成为电除尘器产业领域的重要标志和电除尘器技术改造的首选供电设备^[6,7]。

1.2 高频电源运行方式

高频电源的脉冲宽度、脉冲幅度、供电频率均可以快速调整,控制非常灵活,可根据电除尘器电场的实际运行工况,实时提供最适合的电压、电流波形,工况适应能力强^[5]。以南京国电环保科技有限公司的 HF-02 型高频电源为例,该型号高频电源提供了恒定周期供电和脉冲供电 2 种方式。

(1) 恒定周期供电方式。高频电源按照预先设定

的频率进行工作,输出电压和输出电流均由工作频率决定。这种工作方式下,为满足电除尘器出口排放要求,必须保持设备运行在较高功率点,电能消耗较大,对运行人员的操作要求较高,难以满足煤质、负荷、烟气等变化较大时的运行要求。

(2) 脉冲供电方式。脉冲供电方式下,高频电源的供电输出由一系列高能脉冲和低能脉冲组成,输出电流波形类似于正弦波。实践证明,与常规的高压供电方式相比,脉冲供电可以为电除尘器提供较高的峰值电压,克服高比电阻引起的反电晕,提高除尘效率,同时减少了电场中的无效和反效电能,从而实现了大幅度的节能。在电除尘器的日常运行中,在满足除尘效率和排放达标的前提下,一般采用脉冲供电方式。

2 高频电源应用及优化分析

2.1 高频电源应用情况

国电泰州发电有限公司 1 号机组为 1000 MW 超超临界燃煤发电机组,除尘系统采用浙江菲达科技股份有限公司生产的三室五电场电除尘器,设计除尘效率 99.7%。电气部分配套使用南京国电环保科技有限公司生产的 HF-02 型高频电源。在调试期间,高频电源均采用脉冲供电方式运行,且 5 个电场的运行参数基本一致,输出功率较为接近,主要技术参数如表 1 所示。在所有电场高频电源均正常工作情况下,电除尘器所有通道出口的烟尘排放浓度平均值为 44.9 mg/m³,小于 50 mg/m³。

2.2 高频电源优化调整及分析

2.2.1 高频电源参数调整内容

为进一步提高除尘效率,国电泰州发电有限公司结合 1 号机组电除尘器的运行实际情况,在燃煤煤种和负荷等运行工况不变的情况下,不断优化调整供电电源参数并分析现有高频电源的工作方式,以充分发挥电除尘器供电电源的除尘作用。

高频电源参数调整方法。在多数情况下,燃煤电厂

表 1 高频电源运行优化前主要技术参数

电场	一电场	二电场	三电场	四电场	五电场
一次电流 平均值 /A	14.0	15.5	19.7	14.0	12.3
二次电压 平均值 /kV	35.3	36.8	44.2	38.3	27.2
二次电流 平均值 /mA	134.7	159.5	181.8	144.3	164.3
二次电压 峰值 /kV	56.7	51.3	57.7	54.7	43.5
二次电流 峰值 /mA	1 096.7	1 028.7	1 028.5	1 018.8	1 099.3
输出功率 平均值 /kW	6.8	6.0	8.4	5.5	6.5
总出口烟尘浓度 /[mg·(m ³) ⁻¹]	44.9				

电除尘器一、二电场烟气量大,粉尘含量高,往往需要较大的荷电能量,因此在优化调整时增大了电除尘器一、二电场的高频电源输出峰值电压;由于三、四、五电场的粉尘含量较少,所以在保证电除尘器出口烟尘浓度的前提下,适当降低三、四、五电场的高频电源输出功率。高频电源运行优化后主要技术参数如表 2 所示。

表 2 高频电源运行优化后主要技术参数

电场	一电场	二电场	三电场	四电场	五电场
一次电流 平均值 /A	25.5	26.8	19.6	13.5	11.6
二次电压 平均值 /kV	32.3	33.0	28.8	30.2	26.0
二次电流 平均值 /mA	310.0	296.2	129.0	135.5	137.3
二次电压 峰值 /kV	66.3	57.5	57.7	54.7	43.5
二次电流 峰值 /mA	1 340.3	1 384.3	1 018.5	1 018.5	1 099.3
输出功率 平均值 /kW	10.0	9.8	4.1	4.1	3.6
总出口烟尘浓度 /[mg·(m ³) ⁻¹]	34.2				

2.2.2 高频电源优化结果及分析

在燃煤煤种不变,且与优化调整前锅炉负荷基本一致的情况下,1 号机组通过提升电除尘器一、二电场高频电源的输出功率,电除尘器出口烟尘浓度降低明显,如图 1 所示。烟尘排放浓度由 44.9 mg/m³ 降低至 34.2 mg/m³,除尘效率提高了 23.8%。此外,通过适当降低三、四、五电场的输出功率,电除尘器总能耗变为每小时 156 kW·h,较优化前减少了 10 kW·h 左右,如图 2 所示。实现了在保证烟尘浓度的前提下,降低电除尘器耗能 6%。需要说明的是,高频电源在供电参数调整过程中,需特别关注一、二电场灰斗的落灰情况是否通畅,及有无出现高料位等情况,若产生类似情况,应停止降低功率。

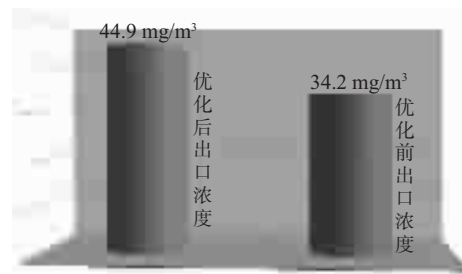


图 1 参数优化前后出口烟尘浓度对比

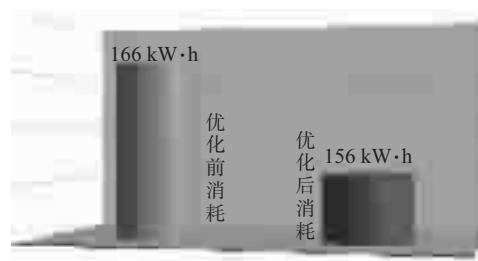


图 2 参数优化前后总能耗对比

3 结束语

国电泰州发电有限公司为建设绿色化燃煤机组,采用了南京国电环保科技有限公司自主研发的 HF-02 型高频电源为电除尘器供电。通过电除尘器高压控制技术优化,进一步提高电除尘器性能和高频电源运行效率。结合电除尘器技术理论及高频电源运行实际现状,增加电除尘一、二电场的运行功率、运行电压尤其是峰值电压,优化二次电压波形和脉冲供电频率,显著减少电除尘器出口烟尘排放。同时降低三、四、五电场的输出功率,在一定程度上降低了除尘器能耗,充分挖掘了电除尘器高频电源技术的节能减排潜力,为火电企业节能减排提供了良好的经验借鉴。

参考文献:

- [1] 朱法华,李辉,王强. 高频电源在我国电除尘器上的应用及节能减排潜力分析[J]. 环境工程技术学报, 2011, 01(1): 26-32.
- [2] 李辰龙,单华,杨宏宇,等. 1000 MW 机组电气技术特点研究[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(6): 55-57.
- [3] 姚永灵,徐斌. 江苏省内役 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.
- [4] 王双童. 低碳经济形势下提升燃煤发电企业节能降耗对策[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(2): 66-69.
- [5] 高维英,傅启文,卢泽锋. 电除尘器高频电源提效节能探讨[J]. 华电技术, 2008, 30(6): 1-4.
- [6] 孙广鹏,张传成,孙更生. 电除尘节能技术探讨与研究[J]. 电力通用机械, 2009, 01(1): 77-79.
- [7] 高维英,傅启文,卢泽锋. 电除尘器高压供电提效节能潜力探讨[J]. 华电技术, 2008, 30(6): 32-35.

作者简介:

朱培峰(1987),男,江苏镇江人,助理工程师,从事火电厂电气设备管理工作。

(下转第 72 页)

使用树莓派实现主机远程断电重启

刘佳诞, 周 琦

(无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

摘 要:针对运行维护中出现的一些嵌入设备因系统故障无法远程维护的情况,文中提出了采用树莓派 GPIO 和 web 编程方式控制设备电源的解决方案,实现设备远程断电重启;详细介绍了树莓派 web 服务器的配置方法、利用 python 编程语言进行 GPIO 和 web 编程的要点。该方案与采用智能 PDU 的方案相比具有成本低、后续扩展能力强的特点。

关键词:树莓派; GPIO; web; 远程断电重启

中图分类号: TM769

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)06-0070-03

在实际运行维护中,遇到变电站远程录音终端(嵌入式系统)死机,经常采用的方法是通过远程桌面或远程 TELNET、或者远程多电脑切换器(KVM)等方式进行服务重启。但在操作系统宕机情况下,远程登陆和远程 KVM 方式就无法进行,此时常用的解决方法就是人员赶往现场进行设备的断电重启,费时费力;或者通过采用安装智能电源分配单元(PDU)的技术解决方案,实现远程设备的断电重启。但是,PDU 的方案也存在一些不足,一是价格昂贵,一般在 3 千元至五千元;二是扩展性不够,功能较单一,无法根据客户的需求进行功能扩展。

Raspberry Pi (树莓派)是一款迷你电脑,预装 Linux 系统,体积仅信用卡大小,搭载 ARM 架构处理器,运算性能和智能手机相仿。它最大的特点就是成本低廉,仅 35 美元,接口较丰富。除具备 HDMI,USB,ETHERNET 接口外,同时具备 8 路 GPIO(通用输入输出)接口,非常适合进行一些简单的自动化设备控制,也方便进行功能的扩展。树莓派官方在软件编程方面推荐使用 Python 语言,其提供了 GPIO 库,可以帮助用户非常方便的完成相关 IO 口的操作。同时,Python 作为脚本语言^[1],在 web 编程方面具有天然的优势,其包含的 webpy 库能够帮助用户以很少量的代码轻松的完成轻量级的 web 框架的搭建。因此,基于树莓派的上述优势,考虑采用它来控制远程录音终端的电源并通过远程访问实现断电重启。

1 方案设计

1.1 方案原理

解决方案如图 1 所示。首先在树莓派上搭建 web 服务器,采用 webpy 搭建 Python Web 框架,并根据控制终端的请求实现 GPIO 控制。控制终端首先通过 web 方式远程访问树莓派 web 主文件(在本网站配置中定义为 index.py),经过用户名密码认证后,进入设

备断电重启网页对远端录音终端进行重启操作。树莓派 web 主文件根据重启请求,调用 GPIO 操作函数,控制 GPIO 的输出电平,从而控制继电器触点动作,实现录音终端断电重启。

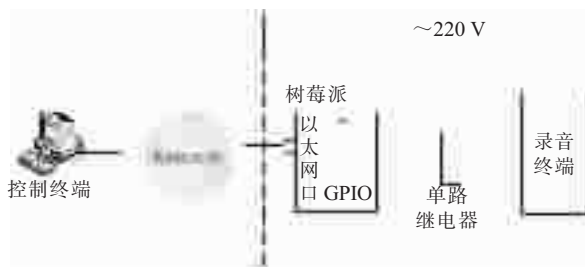


图 1 方案原理图

1.2 硬件连接与配置

树莓派 GPIO 针脚定义如表 1 所示。

表 1 树莓派 GPIO 针脚定义

针脚编号	针脚定义	针脚编号	针脚定义
1	3.3 V	2	5 V
3	SDA0	4	DNC
5	SCL0	6	0 V
7	GPIO 7	8	TX
9	DNC	10	RX
11	GPIO 0	12	GPIO 1
13	GPIO 2	14	DNC
15	GPIO 3	16	GPIO 4
17	DNC	18	GPIO 5
19	SPI MOSI	20	DNC
21	SPI MISO	22	GPIO 6
23	SPI SCLK	24	SP10 CEO N
25	DNC	26	SP10 CE1 N

根据表 1 的针脚定义,选用 GPIO 0 作为输出。因此使用 2,6,11 号针脚与继电器(驱动电压为直流 5 V)连接。其中 2 号针脚提供 5 V 电压输出,与继电器 Vcc 针脚相连;6 号针脚为信号地,与继电器 GND 针脚相连;7 号针脚为 GPIO 0 输出,与继电器 IN 针脚相连,如图 2 所示。

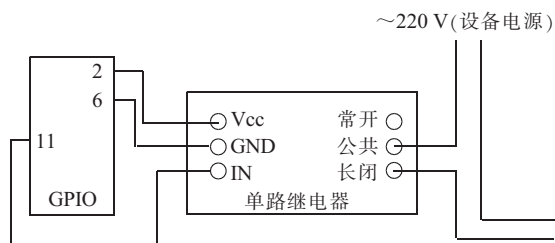


图2 GPIO 连接示意图

2 软件实现

2.1 Web 服务器搭建

选用 nginx+webpy+fastcgi+flup 的组合。

2.1.1 安装上述应用程序

使用如下命令行:

```
Sudo apt-get install python-webpy nginx spawn-fcgi
python-flup[1]
```

2.1.2 修改 Nginx 配置文件

Nginx (1.2.1 版本) 的配置文件 nginx.conf (在 /etc/nginx/ 目录下) 包含了 default 文件 (在 /etc/nginx/sites-available/ 目录下), 关于 server, location 等配置都在 default 文件中, 这与以往版本不同。对 default 文件进行如下修改:

```
server {
    listen 8080; 此处设置 web 服务端口
    root /home/pi/www; 此处设置 web 访问根目录
    index index.html index.htm index.py; 增加 web 主
    文件 index.py
    .....
    增加下述配置行
    location / {
        include fastcgi_params;
        fastcgi_param SCRIPT_FILENAME
        $fastcgi_script_name;
        fastcgi_param PATH_INFO $fastcgi_script_name;
        fastcgi_pass 127.0.0.1:9002;
    }
    对于静态文件可以添加如下配置:
    location /static/ {
        if (-f $request_filename) {
            rewrite ^/static/(.*)$ /static/$1 break;
        }
    }
}
```

2.1.3 修改 web 主文件属性

在启动 spawn-fcgi 前将 index.py 改为可执行, 使用以下命令行:

```
Sudo chmod +x index.py
```

2.1.4 启动 spawn-fcgi

在树莓派 9002 端口启动 webpy 应用, webpy 主文件路径为 /home/pi/www/index.py, webpy 的程序主目录为 /home/pi/www/, 总共启动 10 个 spawn 进程。起用如下命令行:

```
spawn-fcgi -F 10 -d /home/pi/www -f /home/pi/
www/index.py -a 127.0.0.1 -p 9002
```

2.1.5 启动 nginx

命令行: Sudo nginx

2.1.6 增加自启动功能

为了能让树莓派在系统启动后自动加载 fcgi, 首先对 /etc 目录下 rc.local 文件增加可执行权限。

命令行: sudo chmod +x rc.local^[2]

编辑 rc.local, 在 exit 0 行的前面增加 2.1.4 中的命令行。

2.2 GPIO 编程要点

GPIO 控制程序为 control.py, 作为模块导入 web 主文件中。其具备初始化 GPIO 和断电重启功能。

2.2.1 初始化 GPIO

通过 initGPIO() 函数, 选用 GPIO 0, 设置 GPIO 的使用方式为 BOARD (该方式参考 Raspberry Pi 主板上 P1 接线柱的针脚编号)。使用该方式的优点是无需考虑主板的修订版本, 硬件始终都是可用的状态, 无需从新连接线路和更改代码, 设置 GPIO 0 为输出通道, 并输出低电平 (因为选用的继电器模式在高电平下为释放, 低电平下吸合), 使继电器触点处于常闭状态, 录音设备保持有电状态。

2.2.2 断电重启

通过调用 powerreboot() 函数, 将 GPIO 0 通道输出设置为高电平, 释放继电器触点, 断开设备电源断开设备电源, 保持断电 3 s, 将 GPIO 0 通道输出设置为低电平, 接通设备电源, 进行设备重启。

其中 powerreboot() 函数中主要调用了 GPIO 模块的以下几个主要函数:

(1) 调用 GPIO.setup(0, GPIO.OUT), 将 GPIO 0 通道设置为输出模式。

(2) 调用 GPIO.output(0, true), 将 GPIO 0 通道输出设置为高电平, 断开设备电源。

(3) 调用 time.sleep(3), 让断电保持 3 s。

(4) 调用 GPIO.output(0, false), 将 GPIO 0 通道输出设置为低电平, 接通设备电源。

2.3 Web 主文件编程要点

编写 web 主文件 index.py, 将改文件放置于 web 服务器根目录下 (即在 2.1.2 配置文件设置的 web 根目录)。

2.3.1 功能

Index.py 文件实现以下几项主要功能:

(1) 导入模块 control.py; (2) 用户登录校验; (3) 根据用户 GET 请求, 控制 GPIO 电平输出, 进行断电重启操作。

2.3.2 处理流程

Inder.py 处理流程如图 3 所示。用户通过访问 web 主文件 index.py 进入登陆界面, 通过密码认证后, 树莓派开始对 GPIO 0 端口进行初始化, 并向用户返回电源重启操作网页。当 index.py 接收到用户断电重启请求后, 调用 powerreboot() 函数, 控制 GPIO 端口的输出电瓶, 完成对控制设备的断电重启操作。

3 结束语

在生产实际运行维护过程中, 已多次通过使用树莓派, 对远程出现死机故障的主机进行断电重启, 避免了人员赶往变电站现场人工复位的问题, 节约了故障处理时间和人力资源。与采用智能 PDU 的技术方案相比, 成本约为前者的 1/20, 价格优势明显。缺点是与设备电源接线稍显麻烦, 且没有进行工业化封装, 布线和设备美观性上明显不足。

树莓派功能强大, 设备运行稳定, 后续可进一步进行开发。比如外接摄像头, 实现对站内设备的图像监控; 外接温湿度传感器实现温湿度采集; 通过串口对其他运行设备进行运行工况监测和维护等。合理应用树莓派, 能给电力通信信息运行维护工作带来很大便利。

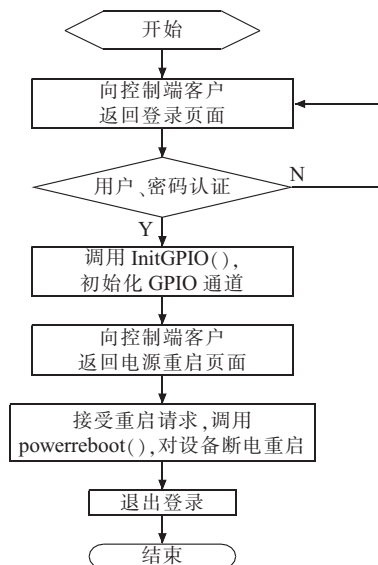


图 3 index.py 处理流程

参考文献:

- [1] MAGNUS L H. Python 基础教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 1-3.
- [2] SARWAR S M. UNIX 教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 179-180.

作者简介:

刘佳诞(1975), 男, 江苏无锡人, 高级工程师, 从事通信自动化研究工作;

周 琦(1963), 男, 江苏无锡人, 工程师, 从事通信研究工作。

To Realize Remote Host Power-off and Restart by Using Raspberry PI

LIU Jiadan, ZHOU Qi

(Wuxi Electric Power Company, Wuxi 214061, China)

Abstract: In order to solve the problem of some embedded devices cannot be maintained remotely due to system trouble during the process of operation and maintenance, this paper proposes a solution to control equipment's power supply by adopting Raspberry Pi programming, which can realize remote power-off and restart. A detailed introduction to the configuration method of Raspberry Pi web server and the key points on GPIO and Web programming by using python programming language is provided. Compared to the method using Intelligent PDU, the proposed method has advantages of low cost and strong expansion ability.

Key words: raspberry pi; GPIO; web; remote power-off and restart

(上接第 69 页)

The Application and Optimization Analysis on High Frequency Power Supply Technique in Dust Collection for 1000 MW Power Generating Unit

ZHU Peifeng

(Guodian Taizhou Power Generation Co.Ltd., Taizhou 225327, China)

Abstract: This paper introduces the application experience of applying high frequency power supplies (HFPS) technique into the optimization of the operation of electrostatic precipitator (ESP) in No.1 power generating unit in the Guodian Taizhou Power Generation Co.Ltd., and also addresses the characteristic of HFPS in energy saving. Through improving high frequency power supplies (HFPS) technique, along with numerous practical field tests, the HFPS significantly increases dust collection efficiency in Taizhou Power Generation Co.Ltd., which brings remarkable economic benefits as well as social benefits. The successful application provides a practical experience for prompting HFPS-based energy saving and emission reduction techniques for ESP.

Key words: electrostatic precipitator; high frequency power supply; parameter optimization; dust collection efficiency; energy saving and emission reduction

江苏电网 1000 MW 超超临界机组可靠性分析

蒯狄正

(江苏省电力公司电机工程学会, 江苏 南京 210024)

摘 要:1000 MW 燃煤发电机组的稳定可靠运行不仅是对机组自身稳定性的一种保障,也是对电网安全稳定运行的可靠保障。文中对江苏电网 1000 MW 机组异常停运情况进行了统计,分析了异常停运原因的影响因素,提出减少机组异常停运的技术和管理措施,从而提高 1000 MW 机组的可靠性,保障电力系统的安全稳定运行。

关键词:1000 MW 机组;可靠性;异常;停运;分析

中图分类号:TK229.2

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)06-0073-03

自 2007 年 12 月 6 日国电泰州发电厂 1 号 1000 MW 机组正式投产以来,到 2013 年 12 月 31 日,江苏电网共有 15 台百万千瓦等级超超临界燃煤发电机组投入运行。

1 1000 MW 机组装机情况

江苏 1000 MW 燃煤发电机组主机配置如表 1 所示。百万千瓦级的燃煤发电机组在电网总装机容量中所占的比重越来越大,截至 2013 年底,江苏全省统调装机容量为 7 833.26 万 kW,其中火电机组为 7 266.04 万 kW,百万千瓦级燃煤机组的装机容量占总装机容量的 19.15%,占火电装机容量的 20.64%,其运行可靠性的高低直接影响到江苏电网的安全稳定运行。

表 1 江苏 1000 MW 燃煤发电机组主机配置

机组编号	锅炉	汽轮机	发电机	投产年月
国电泰州 1 号	哈锅	哈汽	哈电	2007-12
国电泰州 2 号	哈锅	哈汽	哈电	2008-03
华能金陵 1 号	哈锅	上汽	上电	2009-12
华润铜山 5 号	上锅	上汽	上电	2010-06
华润铜山 6 号	上锅	上汽	上电	2010-07
华能金陵 2 号	哈锅	上汽	上电	2010-12
国电谏壁 13 号	上锅	上汽	上电	2011-05
国华徐州 1 号	上锅	上汽	上电	2011-12
国华徐州 2 号	上锅	上汽	上电	2011-12
国电谏壁 14 号	上锅	上汽	上电	2012-06
新海电厂 1 号	上锅	上汽	上电	2012-11
常熟电厂 5 号	上锅	上汽	上电	2012-12
华电句容 1 号	东锅	上汽	上电	2013-08
华电句容 2 号	东锅	上汽	上电	2013-10
常熟电厂 6 号	上锅	上汽	上电	2013-12

2 机组异常停运统计

2013 年全年,江苏 1000 MW 等级超超临界燃煤发电机组共发生非正常停运 25 次,平均每台机组 1.67 次。引发异常停运的原因按专业划分如表 2 所示。其中锅炉原因引起的异常停运 10 次,占异常停运总数的 40%,因热控原因引起的异常停运 9 次,占总数的 36%;汽机原因引起的异常停运 6 次,占总数的 24%,但未发生电气原因引起的异常停运。

表 2 1000 MW 级燃煤机组异常停运原因统计

停运原因	停运次数 / 次	所占比例 / %
锅炉	10	40
汽机	6	24
热控	9	36
电气	0	0

按百万千瓦级机组异常停运发生的季节统计,异常停运主要发生在第二季度和第三季度,分别为 7 次和 8 次,2013 年第四季度发生异常停运 7 次,主要是因为当年新投产机组在第四季度发生了 4 次非停。

表 3 1000 MW 机组异常停运按发生季节统计

季度	1	2	3	4
次数 / 次	3	7	8	7

按照单台机组 2013 年全年发生异常停运次数统计,1 台机组发生 6 次异常停运,1 台机组发生 5 次异常停运,2 台机组发生 3 次异常停运,1 台机组发生 2 次异常停运,6 台机组发生 1 次异常停运。另外 4 台机组未发生异常停运。发生异常停运次数最多的 4 台机组全年累计异常停运 14 次,占 15 台百万千瓦级机组 2013 年异常停运总数的 56%。按照单台机组发生异常停运次数的统计如表 4 所示。

表 4 按照单台机组发生异常停运次数的统计

发生次数 / 次	6	5	3	2	1	0
机组台数 / 台	1	1	2	1	6	4

3 异常停运分析

3.1 锅炉原因引起的停运分析

(1) 炉管泄漏引起 6 次异常停运中,有 2 次是因水冷壁磨损引起的泄漏,3 次是因水冷壁焊缝缺陷引起的泄漏,1 次是因低温过热器焊缝缺陷引起的泄漏。可见锅炉四管爆漏仍是导致百万千瓦级机组异常停运的主要因素^[1],进一步抓好锅炉四管的防磨防爆工作仍然是减少百万千瓦级燃煤发电机组异常停运和提高设备可靠性的工作重点。

(2) 设备故障引起的 3 次异常停运中,1 次是因送风机动叶调节系统故障引起,2 次是因捞渣机故障,锅炉无法排渣引起。其中 1 次是因捞渣机链条连接销断裂,1 次是因捞渣机被炉膛掉落的大焦块卡死。

送风机动叶调节系统出现问题的主要原因是目前动调风机转子与动调系统无法进行现场检修,通常都采取返厂检修;检修单位少、部分检修单位检修质量控制体系运行不正常,存在漏检漏修的问题。今后应加强动叶可调轴流风机检修过程控制与检修质量验收,防止出现漏检漏修状况。捞渣机链条连接销断裂,原因为链条连接销材质抗疲劳性能较差,存在质量缺陷。捞渣机卡涩,主要是炉膛结焦引起。由于降低发电燃料成本的需要,大部分电厂都采取了掺烧劣质煤的方法,导致大量易结焦煤种进入炉膛燃烧,结焦现象较为普遍;此外,结焦还与燃烧设备及系统设计布置不当和运行调整和巡检看火不及时有一定关系。今后一方面要严控锅炉辅助设备质量,另一方面要结合锅炉特点进行配煤,从源头上减少结焦,此外还要加强运行调整和监视,发现结焦及时予以清除。

(3) 运行操作原因引起的异常停运 1 次。机组运行时锅炉出口主蒸汽温度偏低,运行人员拟通过调整分离器出口蒸汽温度来提高主蒸汽温度,调整操作过程不当导致水冷壁出口温度超过高二值,机组跳闸。今后需加强运行人员技能培训,增强参数监控的责任心,熟悉事故处理的方法,杜绝相反方向地调节。

3.2 汽机原因引起的停运分析

3.2.1 轴承振动

在 4 次振动大引起的异常停运中,1 次是因为机组大修期间汽封间隙调整偏小导致机组启动时发生碰摩引起的轴承振动大跳闸。今后机组大修进行汽封间隙调整时,不应片面追求经济性,将间隙调得过小,还应兼顾安全性。另外 3 次停运均是机组的 1 号轴瓦振动大引起。第一次停运后,经测试分析,发现振动存在低频分量,振动原因诊断为轴瓦油膜失稳,因该地区负荷偏紧一直未能处理,此后又重复发生 2 次因同样原因的异常停运事件。在异常停运原因查明后,要尽可能

及时安排停机处理,不能心存侥幸,带病运行,以免重复发生此类情况,造成更大的损失。

3.2.2 蒸汽泄漏

某 1000 MW 超超临界机组因中压调门螺栓断裂,引发中压调门严重漏气,机组紧急停运。中压调门螺栓材质为 IN783 低膨胀高温合金,失效的 6 只螺栓均断裂在螺栓腰部,而非螺纹齿根部,且在失效螺栓的断口附近均发现从螺栓加热孔内壁向外表面存在扩展的沿晶裂纹,说明螺栓断裂与螺栓装配或拆卸时螺栓孔内壁不当加热有关。今后应加强检修人员的资质审核和检修工艺的控制。

3.2.3 油路故障

油路故障 1 次则是中调门因控制油路故障自行关闭导致负荷指令和实际值偏差过大,触发机组甩负荷。

3.3 热控原因引起的停运分析

3.3.1 热工设备故障

热工设备故障引起的 3 次异常停运中,1 次是因一次风机反馈齿条与反馈连杆之间的连接轴承损坏,造成动叶开度反馈异常,动叶迅速全开,电机超电流跳闸,另一台风机出力未能及时增大,锅炉主燃料中断保护动作。今后在设备巡检时除了对主设备进行检查外,还要加强对相关的附属设备进行检查,以便发现问题能及时处理。而 2 次是因热控卡件异常引起。某厂汽轮机 1 号中压主汽门、2 号高压主汽门、2 号中压主汽门、1 号高压主汽门先后从 100% 开度缓慢下降至 70% 左右后快速关闭,机组负荷从 700 MW 开始下降,由于主汽压力升高,锅炉给水泵出力下降,给水流量下降至跳闸值,锅炉 MFT 保护动作。某厂西门子 DEH 系统在机组降负荷过程中因汽轮机进汽压力 3 个测点间偏差大,在进入 DEH 卡件进行坏点剔除时运算异常,导致汽机调门关闭机组跳闸。经过更换卡件以及对 DEH 坏点剔除运算逻辑优化后,未再发生此类情况。

3.3.2 设计不合理

某厂 ETS 系统中,汽轮机 3 个遮断信号集中设计在一块 FDO 卡件上,该卡件故障后 3 个遮断信号同时消失,导致机组跳闸。设计时应先将信号引至不同的卡件上,再辅之以三取二逻辑计算,避免出现保护误动或拒动。

3.3.3 定值设置不当

因定值设置不当引发自足异常停运 1 次。某厂机组负荷 400 MW 时,给水流量约 1090 t/h,低于干湿态转换设定值 1100 t/h,锅炉给水控制未能转换为干态控制,由于煤水比失调,导致水冷壁出口温度高,锅炉 MFT。将干湿转换定值按机组实际情况调低后此问题解决。热工定值设定时不能完全一味照搬照抄厂家设计说明,部分定值应结合机组的实际进行相应调整。

3.3.4 快速减负荷功能不完善

因为机组快速减负荷(RB)功能缺陷引起的异常停运 2 次。某厂 1 台汽动给水泵跳闸,引起给水流量降低,锅炉减煤跟不上给水流量降低的速度,煤水比失调,造成汽水分离器出口温度高,锅炉 MFT 动作。某厂锅炉给煤机煤块将皮带卡塞,手动停 C 磨煤机,导致 B 磨煤机点火能量不足跳闸,燃料 RB 动作。燃料控制指令大幅下降,D 磨煤机的煤量低于 40 t/h,造成 C 磨煤机,E 磨煤机点火能量不足跳闸,锅炉全炉膛灭火保护动作。今后应对快速减负荷的自动控制逻辑进行优化,并开展 RB 试验,在设备故障时能自动完成快速减负荷运行,减少快速减负荷过程中的人为干预,避免出现异常停运。

3.3.5 检修维护

检修维护中 2 次是因热工人员检修维护不当引起,其中 1 次发生在软件下装时,某厂 DCS 系统中涉及 EH 油泵和润滑油泵控制的控制器冗余功能退出,处于单 DPU 运行状态。在对该控制器进行软件增量下装过程中,导致运行 DPU 通信故障并重新启动。在此过程中,EH 油箱油位信号质量判坏,导致 EH 油泵跳闸,引起 EH 油母管压力低跳闸汽轮机。另外 1 次发生在强置信号时,某厂一台一次风机润滑油接头密封垫为橡胶垫,老化渗漏,停该一次风机将处理润滑油接头垫片更换为纸板垫。在停一次风机时停机状态显示错误,热控人员在做强置信号时失误,误置另一台正常运行的一次风机,引起一次风机跳闸,2 台一次风机全停后,锅炉 MFT 保护动作,机组跳闸。今后应加强检修维护的过程监护,杜绝因人为失误引起的机组停运。

4 减少机组异常停运的管理措施

(1) 重视基建,消除萌芽。从源头做起,把好发电设备的设计、制造、施工、调试各环节的质量检验和生产准备工作,根据同类型机组异常停运的原因统计和分析,提早采取相应的防范措施,提高设备的制造质量、安装质量和调试质量,并加强生产人员的技能培训,提高日常运行水平和事故处理能力,从而提高新投产机组可用系数。

(2) 吸取教训,举一反三。认真对待机组每次异常停运事件,重点是要查清诱发原因,从技术上、管理上查找漏洞,采取对策,确保不重复发生同类型的异常停运事件。有针对性地认真开展好专项安全检查工作,特别是对易发生重大事故的部位进行全面排查,杜绝因人为责任而造成的机组异常停运。

(3) 重视预防,加强监督。加强锅炉“四管”管理,周密部署,措施到位,严防“四管”爆漏导致停运的发生,四管泄漏是锅炉故障停运的主要因素,因此,各电厂要进一步健全各级锅炉运行安全监督管理和金属监督体系。形成“横向到边、纵向到底”的监督网络,以适应大容量机组新的管理体制的要求。从而提高设备安全可靠。

(4) 加强检修,修必修好。相关发电企业应结合百万千瓦级机组的特点,合理安排好检修计划,严格计划检修周期管理,认真执行规范,保证机组检修质量。进一步加强发电设备日常维修消缺工作,及时消除各类缺陷,如设备缺陷、隐患能在低谷期间消缺处理的,在电网允许的前提下,及时联系调控中心予以安排消缺,以提高机组健康水平。

5 结束语

百万千瓦级燃煤发电机组的异常停运不仅会危及电厂和电网的安全稳定运行,异常停运带来的电量损失、设备修复费用、启动燃油消耗、设备使用寿命损耗等也会给发电企业造成经济上的损失。异常停运次数的多寡直接反映了发电企业的技术水平和管理水平。统计分析大机组异常停运的原因和规律,落实有效措施,总结经验教训,超前管理和防范,对降低百万千瓦级机组的异常停运次数,保证电网和电厂的安全稳定运行有着重要的作用。

参考文献:

- [1] 伍健伟,吕杰,金光亮,等. 1000 MW 机组锅炉受热面超温应用分析及对策[J]. 东北电力技术,2012,33(9):18-20.

作者简介:

蒯狄正(1963),男,江苏丹阳人,研究员级高级工程师,从事电力生产管理和电力科学研究工作。

Reliability Analysis on 1000 MW Ultra-supercritical Power Units in Jiangsu Power Grid

KUAI Dizheng

(Society of Electrical Engineering of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: Reliable and stable operation of 1000 MW coal-fired power units is especially important for not only themselves but also the whole electric power grid. Based on the statistical data of the unscheduled shut-down accidents encountered in the 1000 MW power units of Jiangsu power grid, this paper analyzed the main factors influencing the operation of the units and subsequently proposed several solution measures to improve the reliability of the 1000 MW power units.

Key words: 1000 MW power unit; reliability; unscheduled; shut-down; analysis

480 t/h 锅炉低氮燃烧器改造与运行优化调整

单锦宏

(盐城发电有限公司,江苏 盐城 224003)

摘 要:介绍了盐城发电有限公司 10 号锅炉 480 t/h 四角切圆低氮燃烧器改造情况,改造后锅炉氮氧化物、飞灰含碳量、排烟温度、锅炉效率等指标都达到了设计要求,投产初期负荷变化过程中汽温波动幅度较大,通过运行优化调整,汽温变化满足负荷变化要求,对同类型机组低氮燃烧器改造与运行优化调整具有较好的参考价值。

关键词:锅炉;低氮燃烧器;改造;运行优化

中图分类号:TK224.1

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0076-03

随着世界范围内环保压力的与日俱增,燃煤电厂的 NO_x 排放越来越受到重视,在降低 NO_x 的排放方面,使用低氮燃烧器是一个重要的选择,且具有应用广泛、结构简单、经济等优点,是燃煤电厂 NO_x 控制的首选技术^[1,2]。

1 改造前锅炉概况

盐城发电有限公司 10 号锅炉为上海锅炉厂 2004 年制造,2005 年 7 月投产,锅炉型号为 SG-480/13.7-M775 型,480 t/h 锅炉超高压自然循环锅炉,锅炉本体呈 II 型露天布置,采用全钢双排柱构架悬挂结构方式。燃烧器采用四角布置切向燃烧方式,在炉膛中心形成 D700 mm 的假想切圆,逆时针旋转,燃烧器的箱体固定于水冷壁上,随水冷壁一起向下膨胀;炉膛截面深×宽=9.6 m×9.6 m,宽深比为 1:1,炉膛容积为 2761 m³;燃烧器共设置四层一次风喷嘴,“下下”、“下上”一次风集中布置,采用水平浓淡分离燃烧技术;一次风设计风速为 24 m/s,二次风设计风速为 45 m/s,每组燃烧器各有二次风挡板四组,均由电动执行机构单独操作,燃烧器一次风喷嘴除下一次风不摆动,其余喷嘴均可手动上下摆动。制粉系统采用钢球磨中间储仓式乏气送粉系统,每台锅炉共配置 2 台 TDM350/600 型磨煤机。燃煤设计煤种为烟煤,目前正常为掺配煤入炉。

2 低氮燃烧器改造技术方案

更换现有燃烧器组件,包括四角风箱、风门挡板、燃烧器喷嘴体、角区水冷壁弯管等。对燃烧器进行重新布置,主燃烧器整体下移,改变假想切圆直径,调整各层煤粉喷嘴的标高和间距,增加新的燃尽风组件以增加高位燃尽风量。更换 A 层微油燃烧器和其他 3 层一次风喷口、喷嘴体及弯头,一次风全部采用上下浓淡中间带稳燃钝体的燃烧器;采用新的二次风室,适当减小端部风室、油风室及中间空气风室的面积;主燃烧器

区域下端部 AA 及燃尽风(OFA)、高位燃尽风(SOFA)二次风及一次风为逆时针方向旋转,切圆直径 D831 mm,其他的二次风改为与一次风形成 5° 角偏置,顺时针反向切入,形成横向空气分级;在燃尽风室两侧和 BC 两层一次风喷口之间加装贴壁风,风量重新合理分配,并调整主燃烧器区一二次风喷口面积,使一次风速满足入炉煤种的燃烧特性要求,主燃烧器区的二次风量适当减小,形成纵向空气分级,改造后燃烧器主要设计参数如表 1 所示。

表 1 改造后燃烧器主要设计参数

项目	数值
二次风速/(m·s ⁻¹)	45
二次风温/℃	308
二次风率/%	71
二次风中周界风份额/%	14
二次风中辅助风份额/%	56
二次风中燃尽风份额/%	30
一次风速度/(m·s ⁻¹)	24
一次风温度/℃	60
一次风率/%	25
燃烧器一次风阻力/kPa	1
燃烧器二次风阻力/kPa	0.8
相邻煤粉喷嘴中心距离/mm	1050/1150

在原主燃烧器上方增加 3 层 SOFA 分离燃尽风喷口,在主燃烧器上部两侧墙大风箱上盖开孔,向上衔接 SOFA 燃尽风道,与原来大风箱结构相似,保持较大的流通面积,形成统一的等压大风箱,阻力小,供风量能得到满足,分配足量的 SOFA 燃尽风量,SOFA 喷口可同时做上下左右摆动。改造后燃烧器由下至上依次为:AA 二次风、A 一次风(微油燃烧器)、AB 二次风、B 一次风、BC 二次风(带贴壁风)、C 一次风、CD 二次风(油)、D 一次风、OFA 二次风(带贴壁风)、SOFA1、SOFA2、SOFA3,改造后燃烧器分布方式如图 1 所示。

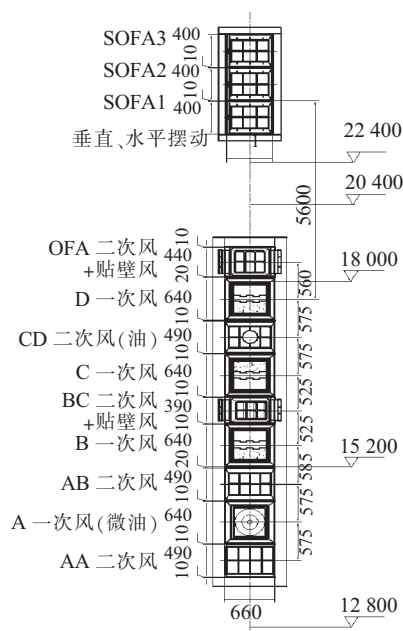


图1 改造后燃烧器分布方式

3 改造后运行调试

(1) 试验中选取 OFA, CD, BC, AB 二次风门, 在 130 MW 左右负荷下保持不同的开度燃烧所得到的飞灰含碳量, 以检验主燃区二次风量大小对飞灰含碳量的影响。试验过程中二次风门开度从 30% 到 100%, 飞灰含碳量从 3.6% 降至 1.6%, 氮氧化物排放从 250 mg/m³ 左右升至 340 mg/m³ 左右。试验结果表明二次风门开度越大, 飞灰含碳量越小, 说明燃烧越充分, 但是氮氧化物排放也随之升高, 而且主燃区局部热负荷也增大, 增加了主燃区结焦的可能性, 因此运行中保持合适的二次风门开度。

(2) 在 130 MW 负荷下测定, 不同氧量对应不同的 NO_x 排放及 CO 排放水平, 试验结果表明, 当实测氧量降低至 2.0% 以下时, 会使 CO 排放显著激增, 达到 25 μL/L, 尤其是尾部烟道的两侧达到 35 μL/L 左右; 增加氧量至 3.0% 时, CO 就会明显降低, 降至 10 μL/L 以下, 但是 NO_x 的排放也相应会升高, 因此在运行中应尽量控制氧量在合理范围内。

(3) 本次改造新增加了三层 SOFA 燃尽风, 试验为了检验 SOFA 风门开关对汽温和氮氧化物的影响, 为以后运行确定最佳开度, 试验选取 SOFA3 进行开关试验。试验结果表明, 当 SOFA 高位燃尽风开启后, 主汽温有小幅上升 3℃ 左右, 再热汽温则变化不明显, 而氮氧化物从 270 mg/m³ 左右降至 240 mg/m³ 左右, 下降 30 mg/m³ 左右, 降氮效果明显。

(4) SOFA 燃尽风摆角试验在 130 MW 负荷下进行, 投入主、再热汽温调节自动, 将摆角由水平位 (50%) 逐渐向下摆动至 20% 后, 观察主蒸汽温度出现小幅降低, 而再热汽温则变化不明显, 同时随着摆角向

下, 还原空间相对减小, 氮氧化物会略有升高, 而后再将摆角逐渐向上摆动, 由 20% 逐渐摆至 70%, 主、再热汽温随之升高 5℃, 减温水量也随之逐渐增大, 而氮氧化物从约 270 mg/m³ 降至约 230 mg/m³, 下降 40 mg/m³。

4 改造后运行优化调整

10 号炉调试期间, 按厂家提供的配风方式进行配风, 即加减负荷时, 调整燃尽风门开度, 二次风门基本不作调整, 加减负荷过程中, 主、再热汽温波动幅度较大, 在运行人员有准备的超前调节、提前干预情况下, 在 120 MW 加至 135 MW 负荷时, 主汽温度最高升至 577℃; 在 110 MW 减至 90 MW 负荷时, 主汽温度最低降至 497℃。加、减 20 MW 负荷时汽温变化幅度达 34℃, 机组负荷自动控制 (AGC) 达不到调度要求, 不能投入运行, 厂家初期提供配风方式如表 2 所示。

表2 厂家初期提供配风指导 %

机组负荷	氧量	SO-FA3	SO-FA2	SO-FA1	OFA	CD	BC	AB	AA
点火启动	5.0% 以上	0	0	0	0	50	50	50	50
70 MW	3.5%~4.0%	0	50	100	30	15	30	15	70
100 MW	3.0%~3.5%	0	100	100	30	30	30	32	80
135 MW	2.5%~3.0%	0	100	100	30	30	30	30	80

经厂家和公司专业技术人员多次试验分析, 认为主燃烧器区的二次风量减小过大, 阻力较大, 送风机出口风压较改造前增加, 二次风和燃尽风配比与设计存在偏差是汽温波动大主要原因。为减少汽温波动, 通过优化运行, 改变配风方式和调整锅炉燃烧方式, 机组 AGC 达到调度要求, 投入运行。

(1) 在加负荷时, 为了防止主燃区过度贫氧, 火焰中心上升, 造成汽温急剧升高, 应提前开启二次风门, 给主燃区加氧, 这样可以阻止火焰中心上升, 如果汽温上升过快, 可以将 SOFA3 关闭, 摆角下摆 (百分比调小), 待汽温稳定后再恢复, 避免汽温急剧升高。减负荷时, 为了防止火焰中心迅速下移, 应提前将二次风门关小, 同时要保证氧量及时跟进, 避免出现大幅波动, 减负荷时如果汽温下降过快, 将 SOFA3 全开 100%, 摆角上摆 (百分比调大), 优化后配风方式如表 3 所示。

(2) 低氮改造前, 锅炉燃烧调整方式是保持 A 层给粉机转速并切换成手动, B, C, D 层给粉机投入燃烧自动控制, 高低负荷时投停 D 层给粉机。为控制加减负荷时汽温波动, 保持 B 层给粉机稳定转速并切换成手动, C 层、D 层给粉机投入燃烧自动控制, 高低负荷时投停 A 层给粉机, 正常运行时, 在低负荷下尽量保持甲磨运行, 增加上层一次风的带粉量。通过配风和燃

表 3 优化运行后配风方式

负荷 /MW	氧量 /%	SO-FA3/ %	SO-FA2/ %	SO-FA1/ %	OFA /%	CD /%	BC /%	AB /%	AA /%	周界风 /%
100	4.0	50	100	100	20	20	20	20	80	40
105	4.0	50	100	100	25	25	25	25	80	45
110	3.5	50	100	100	30	30	30	30	80	50
115	3.5	50	100	100	35	35	35	35	80	60
120	3.5	50	100	100	40	40	40	40	80	70
125	3.5	50	100	100	50	50	50	50	100	80
130	3.0	50	100	100	70	70	70	70	100	90
135	3.0	50	100	100	80	80	80	80	100	90

烧方式调整,10 号机组加减负荷对锅炉蒸汽参数汽温的影响减少约 10℃,投入机组 AGC,达到调度要求。AGC 投入后,锅炉排烟温度和飞灰可燃物有一定上升。

5 改造后性能试验

锅炉燃烧系统改造后,经过燃烧系统调试,锅炉原有特点及燃煤适应性不变,锅炉出力及主要运行参数达到基准设计值,炉膛未发生严重结焦及高温腐蚀。改造前后性能考核试验部分数据如表 4 所示。从表 4 可看出,低氮燃烧器改造后,氮氧化物及一氧化碳排放浓度、飞灰含炭量、排烟温度、锅炉效率等指标均较改造前好转,低负荷段主、再热汽温较改造前偏低,高负荷段减温水量较改造前增加,锅炉耗氧量较改造前增加,主要原因是燃烧器整体下移后,二次风与燃尽风配比与设计存在一定偏差,低负荷段火焰中心下移,主、再热汽温偏低;高负荷段,二次风量供应不足,燃尽风过量,拉长燃烧区域,火焰中心上移,主、再热汽温上升,减温水量上升。低氮燃烧器改造后机组性能试验在稳定工况下进行,在实际机组运行中,为保证主、再热汽温满足负荷调节性能要求,飞灰含炭量、排烟温度、锅炉效率等指标和性能试验工况存在一定偏差。

6 结束语

480 t/h 锅炉因锅炉炉膛空间较小,实施低氮燃烧器技术改造难度相对较大。本次 10 号炉采用空气分级和煤粉再燃烧技术方案进行改造后,氮氧化物及一氧

表 4 改造前后性能考核试验部分数据

工况指标	135 MW		110 MW		90 MW	
	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后
主汽温度 /℃	536	534	535	536	535	536
再热温度 /℃	540	538	537	537	531	526
过热减温水 / (t·h ⁻¹)	1.9	9.1	1.9	6.5	3.6	2.8
再热减温水 / (t·h ⁻¹)	0	1.8	0.2	0	1.4	0
排烟温度 /℃	152.9	131.7	151.5	127.5	145.1	118.6
运行氧量 /%	3.87	4.30	3.57	5.02	4.35	6.47
飞灰可燃物 /%	3.9	1.58	4.0	1.42	5.3	1.32
炉渣可燃物 /%	0.7	1.06	0.3	0.93	0.4	3.04
排烟热损失 /%	6.02	5.33	5.84	5.33	5.72	5.32
未完全燃烧 /%	1.47	0.62	1.52	0.56	2.02	0.60
锅炉效率 /%	90.97	92.84	90.58	92.57	90.48	92.70
修后炉效 /%	91.75	93.28	91.71	93.21	91.21	93.15
NO _x (6%O ₂)/ [mg·(m ³) ⁻¹]	560	255	452	263	440	240
CO/(μL·L ⁻¹)	19	15	19	10	5	7

化碳排放浓度、飞灰含炭量、排烟温度、锅炉效率等指标均达到了设计要求,其中氮氧化物排放浓度从 450~550 mg/Nm³ 降到 260 mg/Nm³ 左右,达到国内同类机组先进水平,年减排氮氧化物 800 t 左右。低氮燃烧器改造后,机组加减负荷过程中,主、再热汽温波动幅度较大,在优化调整后虽基本达到调节要求,但牺牲了飞灰可燃物和排烟温度和炉效一些指标,在后续改造中应对二次风门风道进行调整,合理分配二次风与燃尽风分配比,减少送风阻力,后续改造后应重新进行配风优化调整,并将二次风门投入自动,以减轻运行人员操作强度。

参考文献:

- [1] 吴碧君,刘晓勤. 燃煤锅炉低 NO_x 燃烧器的类型及其发展[J]. 电力环境保护,2004,20(3):24-27.
- [2] 周俊虎,赵玉晓,刘建忠,等. 低 NO_x 煤粉燃烧器技术的研究进展与前景展望[J]. 热力发电,2005(8):1-7.

作者简介:

单锦宏(1958),男,江苏盐城人,高级工程师,研究方向为电力工程管理。

Operation Optimization and Retrofit of Low NO_x Combustor of 480 t/h Coal-fired Boilers

SHAN Jinhong

(Yancheng Power Generation Co. Ltd., Yancheng 224003, China)

Abstract: This paper introduces the retrofit of the four corner tangential low NO_x 480 t/h combustor of #10 boiler in Yancheng Power Generation Company. After transformation, all the key parameters including the content of NO_x, carbon content in the fly ash, the temperature of the exhaust gas and the boiler efficiency can meet the design requirements. For the significant steam temperature fluctuations encountered during initial stages after putting the unit into operation, optimization adjustments were implemented and satisfactory effects were finally obtained. This work can provide valuable reference for similar power units performing combustor retrofit and operation optimization.

Key words: boiler; lower NO_x combustor; retrofit; operation optimization

汽轮机疏水系统优化节能改造

万 跃,晏海能

(江苏淮阴发电有限责任公司,江苏 淮安 223002)

摘 要:随着煤炭价格的上涨,火力发电企业对节能工作越来越重视,汽轮机疏水系统阀门较多,阀门前后压差较大,机组启停时疏水冲刷易造成阀门泄漏,汽轮机疏水系统内漏是较为普遍的现象。通过分析每一道疏水阀门的作用,取消多余的疏水管道;将压力等级相同的疏水管道合并成一路,以有效减小泄漏量,文中通过 330 MW 汽轮机疏水系统优化的实例,论述了疏水系统优化对经济性的影响,可供同类型电厂参考。

关键词:汽轮机;疏水系统;优化

中图分类号:TK264.9

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0079-03

江苏淮阴发电有限公司 3 号汽轮机为哈汽 C300/N330-16.7/538/538 产品,型式为亚临界一次中间再热、单轴、高中压合缸、双缸双排汽、抽汽凝汽式汽轮机。3 号汽轮发电机组于 2008 年 4 月 15 日投产,适逢煤炭价格快速上涨,发电的燃料成本已超出上网电价,因此江苏淮阴发电有限公司加大了节能降耗的措施。加强燃料管理,积极争取计划煤,加强入厂煤的采、制、化管理,减少煤炭损耗;积极发展供热,对 300 MW 机组,每供 10 t/h 汽,煤耗能降低约 1 g/(kW·h)以上。3 号机从设计时就选用供热机组,在四抽压力偏低不能满足用户要求时,积极增加蒸汽流量,经减温减压后供热,以提高供热量。深入挖潜,节能降耗,提高机组的运行经济性^[1]。

1 疏水系统

1.1 疏水系统阀门内漏的原因

汽轮机缸体上及蒸汽管道上配备有疏水管道及气动阀门,按疏水管道内的压力等将疏水管道分别连接到高压、次高压、中压和低压疏水集管,各疏水集管经疏水扩容器与凝汽器相连。在机组启、停过程中,气动阀门打开,以及时排放汽轮机及管道内蒸汽凝结成的水,确保机组安全运行,机组正常运行期间,气动阀门关闭。由于在启、停过程中,疏水气动阀门的密封面一直被汽、水混合物冲刷,使阀门密封面受损,同时在正常运行过程中,疏水气动阀门承受着极大的差压,如汽机主蒸汽管道上的疏水气动阀门,差压达 16.8 MPa 左右(阀前蒸汽压力可达 16.7 MPa,阀后与真空状态的凝汽器相连),因而气动阀门稍有不严,蒸汽就会泄漏。

3 号机投产之初就发现汽轮机一些疏水系统存在内漏现象。据统计,3 号汽轮机各疏水集管温度都较高,内漏严重的温度高达 356℃。通过疏水系统内漏的蒸汽不经汽轮机做功,而且直接排入凝汽器,增加了凝

汽器的热负荷,降低了机组运行的经济性。经试验,机组纯凝状况下供电煤耗达 345 g/(kW·h)左右。因此解决这些阀门的内漏非常必要。

1.2 疏水系统优化的指导原则

(1) 疏水系统设置的目的是及时排走系统内部的积水,提高机组安全性,因此疏水系统优化不得影响机组的安全性。

(2) 在充分考虑安全的前提下,部分疏水能取消的则取消。

(3) 将压力等级相同的两路或两路以上的疏水合并成一路,共用一只气动阀门,此时即使气动阀门仍然内漏,但与两路相比,漏量可明显减少,达到了提高经济性的目的。

(4) 在疏水气动阀门前加装手动阀。为防止在运行过程中,气动阀门内漏严重,可关闭手动阀,减少漏汽量,提高经济性。

1.3 疏水优化主要项目

(1) 疏水管道合并,在母管上增加了疏水电动阀和手动阀。主要有一抽、二抽及三抽、四抽至除氧器及小机五抽、六抽电逆止阀后疏水与电动阀前疏水合并成一路,排本体疏水扩容器,疏水电动阀前加装手动阀门。

(2) 取消多余的疏水阀及管道系统。主要有 1 号、2 号、3 号高加危急疏水管、5 号、6 号、7 号、8 号低加危急疏水管上的所有排地沟放水阀。6 号低加至 7 号低加疏水管上的放空气阀及排地沟放水阀。7 号低加至 8 号低加疏水管上的放空气阀及排地沟放水阀。

(3) 将轴封溢流气动阀前增加一路排汽管到 8 号低,将轴封溢流汽引到 8 号低加,以进一步提高经济。

2 优化效果

疏水系统优化后,汽轮机疏水系统的内漏现象有明显好转,各疏水集管的温度均不超过 80℃。因无法

测得疏水阀门泄漏量,也就不能按泄漏量直接计算其对机组经济性的影响。因此利用比较疏水系统优化前后的汽耗和热耗来进行比较。

优化前、优化后的部分参数如表 1、表 2 所示。通过比较,可发现优化后机组的经济性有明显提高。

2.1 汽耗比较

虽然汽耗比较不能作为定量计算的依据,但定性比较则简洁明了,适合生产现场进行初步的比较。为了简单地对疏水系统优化的效果进行比较,可以计算优化前后的汽耗率进行比较。比较时选取表 1、表 2 中的平均值。

优化前的汽耗率:

$$1\,033.15/299.91 = 3.445 \text{ kg/kW}$$

优化后的汽耗率:

$$921.33/275.66 = 3.342 \text{ kg/kW}$$

汽耗率下降了:

$$3.445 - 3.342 = 0.103 \text{ kg/kW}$$

优化后汽机的效率提高:

$$0.103/3.445 = 2.99\%$$

扣除真空对汽耗的影响。小修后因循环水温度下降,排汽温度下降了 3.17℃,排汽温度 37.21℃对应的排汽压力为 6.35 kPa,34.04℃对应的排汽压力为 5.33 kPa,按哈汽厂提供的修正曲线,可将机组效率提高 1%。因此扣除真空对汽耗的影响,疏水系统优化可使汽轮机的效率提高值为 2.99% - 1% = 1.99%

由上可见,虽然优化后四抽供热及热再供热的流量上升了 4.75 t/h,但汽轮机汽耗明显降低,机组的经济性有了明显的提高。

2.2 热耗比较

2.2.1 计算及修正方法

以实测省煤器入口主给水流量为依据,再计入减温水、不明泄漏量等辅助流量,求得主蒸汽流量、再热蒸汽流量等。

轴封各段漏汽流量、高压门杆各段漏汽流量以设计值为基础,按照试验主蒸汽流量和设计主蒸汽流量的比例进行折算。

1 号高加热平衡:

$$G_{gs} \cdot (h_{cs1} - h_{cs1}) = G_{jq1} \cdot (h_{jq1} - h_{ss1}) \quad (1)$$

2 号高加热平衡:

$$G_{gs} \cdot (h_{cs2} - h_{js2}) = G_{jq2} \cdot (h_{jq2} - h_{ss2}) + G_{jq1} \cdot (h_{ss1} - h_{ss2}) \quad (2)$$

3 号高加热平衡:

$$G_{gs} \cdot (h_{cs3} - h_{js3}) = G_{jq3} \cdot (h_{jq3} - h_{ss3}) + (G_{jq1} + G_{jq2}) \cdot (h_{ss2} - h_{ss3}) \quad (3)$$

除氧器热平衡:

$$G_{cs4} \cdot h_{cs4} = G_{jq4} \cdot h_{jq4} + G_{ns} \cdot h_{js4} + (G_{jq1} + G_{jq2} + G_{jq3}) \cdot h_{ss} + G_{cd} \cdot h_{cs4} - G_{fq} \cdot h_{fq} \quad (4)$$

除氧器流量平衡:

$$G_{cs4} = G_{jq1} + G_{jq2} + G_{jq3} + G_{jq4} + G_{ns} + G_{cdl} - G_{fq} \quad (5)$$

给水流量:

$$G_{gs} = G_{cs4} - G_{gl} - G_{zj} + G_{bm} \quad (6)$$

式(1—6)中: G_{gs} 为通过高压加热器的给水流量,t/h; G_{jq} 为加热器进汽流量,t/h; G_{js} , G_{cs} 为加热器进、出口水流量,t/h; h_{js} , h_{cs} 为加热器进、出口水焓,kJ/kg; h_{jq} , h_{ss} 为加热器进汽、疏水焓,kJ/kg;下标中 1,2,3,4 分别为

表 1 疏水系统优化前参数

工况	发电量 /MW	主汽流量 / (t·h ⁻¹)	过热汽温 /℃	过热汽压 /MPa	再热汽温 /℃	再热汽压 /MPa	四抽供热流量 / (t·h ⁻¹)	再热喷水量 1/(t·h ⁻¹)	再热喷水量 2/(t·h ⁻¹)	排汽温度 /℃	真空 /kPa	热再供热流量 / (t·h ⁻¹)
1	299.54	1 049.53	534.38	16.82	531.63	3.23	17.9	0.65	6.71	37.37	-96.2	45.13
2	297.22	1 025.33	538.27	16.68	537.04	3.2	16.3	2.52	10.93	36.98	-96.2	45.52
3	300.68	1 031.26	540.82	16.84	538.01	3.22	16.49	4.46	9.75	37.09	-96.1	45.64
4	298.57	1 017.43	541.49	16.71	540.57	3.19	16.81	5.31	11.76	37.02	-96.1	41.97
5	298.86	1 029.48	540.67	16.8	536.26	3.2	16.53	2.51	8.19	37.19	-96.2	43.49
6	304.61	1 045.91	538.56	16.87	534.5	3.27	17.41	7.11	12.57	37.61	-96.1	41.69
平均值	299.91	1 033.15	539.0	16.78	536.3	3.21	16.90	3.76	9.98	37.21	-96.1	43.91

表 2 疏水系统优化后参数

工况	发电量 /MW	主汽流量 / (t·h ⁻¹)	过热汽温 /℃	过热汽压 /MPa	再热汽温 /℃	再热汽压 /MPa	四抽供热流量 / (t·h ⁻¹)	再热喷水量 1/(t·h ⁻¹)	再热喷水量 2/(t·h ⁻¹)	排汽温度 /℃	真空 /kPa	热再供热流量 / (t·h ⁻¹)
1	269.52	900.68	540.81	16.21	537	2.9	18.12	2.61	10.44	34.33	-96.7	46.37
2	269.3	898.65	540.92	16.12	536.01	2.9	19.12	1.68	9.76	33.77	-96.5	43.93
3	267.97	899.18	540.42	16.35	536.38	2.89	18.84	2.39	11.25	33.65	-96.6	48.33
4	282.64	944.75	540.32	16.58	537.15	3.04	20.89	3.98	12.96	34.2	-96.6	47.98
5	288.87	963.39	539.53	16.85	536.78	3.09	19.21	5.08	9.68	34.26	-96.6	44.99
平均值	275.66	921.33	540.4	16.422	536.66	2.964	19.236	3.148	10.818	34.042	-96.6	46.32

1~3号高加及除氧器; G_{cd} 为除氧器水位变化当量流量,t/h,水位下降为正; G_{iq} 为除氧器放汽量,t/h; h_{iq} 为除氧器放汽量的焓值,kJ/kg; G_{gj} , G_{zj} 为过热减温水及再热减温水流量,t/h; G_{bm} 为漏入给水泵的密封水量,t/h。

式(1—6)中有 G_{gs} , G_{jp1} , G_{jp2} , G_{jp3} , G_{jp4} , G_{cs4} 共6个未知数,可以联立求解得到给水流量与各加热器进汽流量。

主蒸汽流量:

$$G_{zq} = G_{gs} + G_{gj} + G_{qbd} - G_{lm} - G_{bm} \quad (7)$$

式(7)中: G_{zq} 为主蒸汽流量,t/h; G_{qbd} 为汽包水位变化当量流量,t/h,水位下降为正; G_{lm} 为锅炉侧明漏量,t/h; G_{bm} 为系统不明漏量计入锅炉的部分,t/h。

冷再流量:

$$G_{lz} = G_{zq} - G_{jq1} - G_{jq2} - G_B - G_E - G_N - G_M - G_L - G_{A2} \quad (8)$$

式(8)中: G_{lz} 为高压缸排汽流量,t/h; G_{A2} 为高压门杆一档漏汽至再热管道流量,t/h; G_B 为高压门杆二档漏汽流量,t/h; G_E 为高压缸轴封漏入中压缸流量,t/h; G_N , G_M 为高压缸后轴封及平衡盘漏汽量,t/h。

再热蒸汽流量:

$$G_{zr} = G_{lz} + G_{zj} + G_{A2} \quad (9)$$

式(9)中: G_{zr} 为热再热蒸汽流量,t/h。

热耗率:

$$H_R = (G_{zq} \cdot h_{zq} + G_{zr} \cdot h_{zr} - G_{lz} \cdot h_{lz} - G_{A2} \cdot (h_{zr} - h_{zq}) - G_{gs} \cdot h_{gs} - G_{gj} \cdot h_{gj} - G_{zj} \cdot h_{zj}) / P \quad (10)$$

式(10)中: H_R 为热耗率,kJ/(kW·h); h_x 为对应各流量的焓值,kJ/kg; P 为发电机功率,MW。

2.2.2 计算结果

以优化前工况6热耗计算为例,经过计算,热耗为8 623.8 kJ/(kW·h)。疏水系统优化后,以优化后工况2热耗计算为例,经过计算,热耗为8 394.2 kJ/(kW·h)。

疏水系统优化后,汽机效率提高(8 623.8-8 394.2)/8 623.8=2.66%。

如前所述,真空对热耗的影响,按哈汽厂提供的修正曲线,可将机组效率提高1%。因此3号机疏水系统优化使机组的效率提高了2.66%-1%=1.66%。按检修前机组的供电煤耗332.4 g/(kW·h)计算,疏水系统优化使机组的供电煤耗下降值为332.4×1.66%=5.5 g/(kW·h)。按330 MW机组年发电20亿kW·h电计算,可节标煤1.1万t,按标煤价1150元计算,全年节约1265万元。

2.2.3 环境效益

由上所述,该项目年节约标煤1.1万t,按全年平均原煤热值19 254 kJ/kg、平均收到基硫份0.8%计算,全年可减排SO₂为1.1×7000/4600×0.8%×64/32×10 000=267 t,环境效益显著^[2,3]。

3 结束语

汽轮机疏水系统内漏是运行中普遍存在的现象,由于疏水阀前后差压较大,对阀门冲刷较严重,而且现代大型机组启停费用较高,难以因疏水阀门内漏而立即停机检修,因而造成疏水系统内漏现象比较普遍,通过疏水系统优化可显著减少漏量,以达到节能的效果。

参考文献:

- [1] ASMEPTC6—2004,汽轮机热力性能考核试验规程[S].
- [2] 刘凯. 汽轮机性能试验不确定度分析方法的探讨[J]. 江苏电机工程,2007,26(4):1-5.
- [3] 钱宇峰. 某600 MW机组低压加热器疏水不畅原因分析及处理[J]. 江苏电机工程,2012,31(1):72-74.

作者简介:

万跃(1958),男,江苏淮安人,从事电力生产管理工作;
晏海能(1973),男,江苏淮安人,高级工程师,从事火力发电技术管理工作。

Energy Saving Transformation of Draining System of Steam Turbines

WAN Yue, YAN Haineng

(Jiangsu Huaiyin Power Generation Co. Ltd., Huaian 223002, China)

Abstract: With the increasing coal price, in coal-fired power plants, more and more attention is currently put on energy saving. Due to the high pressure difference across the valves of draining system, leakage accidents induced by high-speed flushing during the shut-down and restart processes were frequently encountered. Through analyzing the function of each valve, solution measures, such as removing redundant valves and merging pipes transporting waters with similar pressures into one single pipe, were adopted to reduce leakage. Taking the draining system of one 330 MW steam turbine as an example, the influence of draining system on economy was analyzed. The results can provide valuable reference for other similar power units.

Key words: steam turbine; draining system; optimization

大数据可视化技术在电网企业的应用

王 栋^{1,2}

(1.南通供电公司,江苏 南通 226006;2.复旦大学管理学院,上海 200433)

摘 要:随着大数据挖掘研究的不断深入,可视化技术越来越成为大数据挖掘分析的重要推动工具。文中概述了大数据挖掘可视化技术的基本含义及其应用。针对电网企业三类大数据:电网运行数据、电力客户数据、电网企业管理数据,提出了大数据挖掘可视化的分析思路,并对电网企业可视化技术运用平台的构建提出了建议。

关键词:智能电网;大数据;可视化

中图分类号:TM71

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0082-03

近年来,随着智能电网建设不断推进,电网企业积累了大量的电网业务数据,这部分电网业务数据主要分为三类:电网调控运行及设备状态数据;电网客户供电数据;电网企业内部管理流程数据等。这些海量的电网业务数据给电网企业的大数据挖掘工作带来了机遇与挑战。目前电网企业大数据挖掘工作蓬勃发展,并在一些数据处理与分析的领域取得了一定的突破。但如何快速从海量的电网业务数据中挖掘出企业需要的信息,并直接指导于企业业务的发展,显得尤为迫切。大数据可视化技术作为数据挖掘工作的一个发展方向,已经被证明是一种解决大规模数据分析的有效方法,并在实践中得到了多个行业的广泛应用^[1]。

在电网企业中,运用大数据可视化技术可以将海量的电网业务数据在有限的大屏幕上予以直观的展现,高效地进行大规模的数据分析,进而提高了电网管理的各项业务水平。目前,电网企业中的大数据可视化技术处于初步的发展阶段,相关技术难点如高维、时变数据的特征追踪、图像合成算法研究等仍有待进一步解决^[2]。

1 大数据挖掘可视化技术概要

1.1 数据可视化技术的发展

数据可视化技术的发展按照时间顺序大致有如下几个阶段:多维信息的可视编码(1950~1974年),该阶段主要确定了构成图形的基本要素;多维统计图形阶段(1975~1987年),该阶段主要建立起数据分析的基本框架,将可视化引入统计分析,将信息可视化发展为一门学科;交互可视化阶段(1987~2004年),该阶段主要将计算机图形学和图像方法推广应用于计算科学,并正式定义了科学可视化(scientific visualization);可视分析学阶段(2004年至今),作为一门新兴的学科,可视分析学的主要研究对象是海量、高维、多源和动态数据分析与挖掘,辅助用户做出有用的决策^[3]。

1.2 数据可视化的主要分类

数据可视化的主要处理对象包括科学数据以及抽象的非结构化信息,结合数据分析的重要性与可视化技术的发展历程,数据可视化相应的可以分成3个分支:科学可视化、信息可视化和可视分析^[1]。

(1) 科学可视化主要面向的领域是物理、化学、气象、医学、生物等学科,对数据和模型进行测量、解释、模拟和交互分析。其数据通常表达的是三维或二维空间量,可以粗略地分为标量场可视化、向量场可视化、张量场可视化三类。由于电网企业大数据绝大多数不属于科学可视化数据的范畴,在此对科学可视化不做详细介绍。

(2) 信息可视化主要研究对象是抽象的、非结构化数据集合,实现非空间复杂数据的视觉呈现^[4]。信息可视化的关键研究问题是在有限的空间中以直观的方式传达大量的复杂抽象信息。实现信息可视化的方法主要决定于数据类型,主要有时空数据可视化、层次与网络结构数据可视化、文本和跨媒体数据可视化、多变量数据可视化四类。电网企业的大数据如电网运行数据、电力客户数据和电网企业管理数据基本上都属于以上数据类型,因此信息可视化是电网企业的可视化技术研究主要方向之一。

(3) 可视分析涉及多个学科,由图形学、数据挖掘分析、人机交互等学科交叉组成,是数据可视化发展的一个较高阶段。可视分析能通过先进的方法与工具,实现人与海量数据之间的复杂信息高速交流^[3]。可视分析能在电网的运行管理、应急事件处理、负荷预测等方面发挥较大的作用,因此可视分析也是电网企业数据可视化研究的热点。

2 大数据可视化在电网企业中的运用

2.1 电网企业大数据

电网企业的主营业务主要包括电网运行维护、电力客户服务、人财物等核心资源运营管理等,相应的电

网企业大数据可以分为电网运行数据、电力客户数据及电网企业管理数据三类^[4]。

(1) 电网运行数据主要包括电网运行关键指标及电网潮流数据、设备状态监测遥信(测)数据、变电场所视频监控数据等。除视频、图像数据为非结构化数据以外,其余数据均为结构化数据,且具有一定的时序分布特点。随着智能电网建设的进一步推进,大量的物联网智能终端设备投入运行^[5],采集点的覆盖范围愈加广泛,电网调度与生产管理系统获取的实时性监测数据被大规模的存储与处理。据测算,一个年售电量达 300 亿 kW·h 规模的地市供电公司,其电网调度系统按 5 min 采样模式,年度产生的电网主要设备运行数据量达到 250 GB 左右。随着快速采样技术在智能电网中的不断实践运用^[6],电网运行数据量还会呈现几何级数的增长,若采样精度提高至 5 s,年度数据量则会突破 15 TB。

(2) 电力客户数据主要包含电费、电价、业扩服务等相关营销数据。智能电网的一个重要环节——智能用电终端采集系统的配置已经得到了范围较广的覆盖。目前在地市电网公司层面,智能用电采集装置覆盖率超过 99%,数百万的电力客户的用电信息已经基本实现用电行为、用电量等信息的实时记录与存储。以低压智能采集系统为例,终端智能电表最小采集周期为 15 min,每 24 h 与采集终端通讯一次,传输日电量相关信息。部署 15 万采集终端的地市供电公司,年度用电信息采集存储量会超过 60 GB。若将系统储存的用电信息存储周期细化,相关数据报文信息进一步丰富,则年度数据量将会达到 TB 以上级别。

(3) 电网企业管理数据由各级业务支撑系统所产生,主要包括企业资源计划管理(ERP)系统、财务管控、档案管理等。各级业务流程的节点数据、过程数据等结构化数据是电网企业管理数据的最大组成部分。随着 ERP 系统的使用愈加广泛,电网企业已经积累了大量的业务节点明细数据。

2.2 电网大数据可视化分析思路

由于电网大数据具有海量、多类、低价值、处理要求高等特点^[5],通过信息可视化与可视分析的技术方法,能快速地挖掘出高精度、时变及多变量数据的潜在价值信息。但针对不同的电网大数据,需采取不同的可视化分析方法。

(1) 电网运行数据可视化分析。近年来,随着智能配网技术的不断突破,电网运行数据已经不仅仅包含传统的系统主要设备参数数据,越来越多的高精度配电网终端数据不断接入配电自动化系统,并改变了以往由于终端信息缺失导致的事故处理判断不全面的问题。由电网系统主要设备参数与配网终端数据组成的

电网运行数据具有时序、高维、快速的特点,应采取信息可视化与可视分析相结合的技术方法进行处理。

基于系统的主参数及配网终端数据,可以构建一个全景的电网络信息拓扑图,并在图中将相关信息采取信息可视化及可视分析的技术手段实现丰富信息的集中展现。在此全景的电网拓扑图中能够实现如下几类问题的在线分析:重要设备健康状况的在线监测与分析;分布式微电源系统的运行评价;专线用户的用电行为特征分析与预测;对电能质量进行在线评价与分析等。

(2) 电力客户数据可视化分析。电力客户数据的来源主要来自于广泛部署的智能用电终端信息采集系统,如上文提到的用户集采系统存储了大量的用户电量信息。利用可视分析的技术方法,能实现如下几类可视化应用:将用户电量信息与用户地理区域、行业划分一一对应,可以实现用户用电行为分析与负荷特性的可视分析;结合前期推广部署的地理信息系统(GIS),能绘制全面的地区电力客户地图,并将该全景电力客户地图按照一定的权限向公众开放,实现用户的用电互动服务,实时反馈购、用电信息^[7];将行业、地区用户电量信息与气象因素、经济发展因素结合考虑,同时考虑用电档案、用电量分析、负荷特性分析、电费分析、用电影响模型、产能利用率等多个影响因子,实现超短期负荷预测,并最终通过降维处理的方式实现负荷预测结果可视化呈现。

(3) 电网企业管理数据可视化分析。电网企业管理数据复杂多样,且大多具有结构化的特征,对其进行可视化分析可以根据源业务系统的特点开展。如对财务管控系统的业务数据,可以按照现金流量特点,绘制平面现金流图,在此基础上实现下钻查询与动态查询分析。如要实现对电网企业管理情况进行全面的系统分析与展示,则需要构建一套全新的业务模型,并在此基础上实现可视化的各项功能。类似于电网络信息拓扑图,可以构建企业经营管理在线监测网络拓扑图,对现有的流程网络进行梳理,以企业经营目标和业务流程为脉络,查找发现企业运营目标、端到端业务流程、业务节点活动中的逻辑层次关系,绘制基于流程网络与流程指标的电网企业管理在线监测网络拓扑图,并在此图上实现信息可视化与可视分析等交互功能。

3 大数据挖掘可视化平台构建的相关建议

3.1 数据挖掘系统基础平台

大数据挖掘处理主要是对数据进行存储,再结合分析的需要读取数据进行计算处理,对基础平台的要求是存储可扩展,计算能力可伸缩^[8]。关于大数据挖掘处理系统的基础平台构建,已经有较为成熟的研究,目

前主流的分布式数据管理系统有 Hadoop, GFS, Cassandra 和 Dynamo 等。文献[5]中提出了为智能电网大数据构建多级存储系统,通过任务管理、调度与监控,依托 Hadoop 云计算系统与并行、实时数据库技术,将各业务系统的数据进行接入存储与分析处理。基于云计算平台的解决方案已经被越来越多的大数据研究与运用机构所采用,但在部署基于云的大数据平台时,仍然需要重点关注数据间的关联关系,提高云传输效率。关于数据挖掘系统基础平台的构建在文献[9-11]中已有详细讨论,且在多家省级电网公司中已有大量的实践。

3.2 可视化系统构建与运用建议

作为大数据挖掘处理结果与过程的终端反馈,可视化系统的实现可以有多种方式。对于电网大数据的分析处理而言,在基于云存储与计算的平台上,通过高级应用接口调用现有第三方可视化软件平台更易于实现,但其局限在于可视化系统功能可扩展性和交互性较差。因此将可视化系统与现有数据存储、计算处理的平台整合,自行开发针对不同业务模型的可视化展示应用显得更为有效。面对大数据分析处理结果的不同用户、不同的显示终端等情况,可视化展示系统的构建需要充分予以考虑,并提出个性化的解决方案。在构建可视化系统的过程中同样需要充分考虑可视分析的交互性功能,通过交互工具开发,允许人与海量复杂信息之间的快速交流,提供先进的分析手段、交互技术和可视表达,使可视化充分发挥其巨大的潜力,展现大数据挖掘分析的价值。

4 结束语

作为大数据挖掘分析工作的高级运用与结果的最终体现,可视化技术需要引起电网企业的高度重视,方

能实现大数据挖掘分析技术的最大潜力,推进智能电网的建设。目前电网企业大数据挖掘分析工作虽然不断取得新的突破,但是将相关数据绘制成高精度、高分辨率的图片的业务模型、智能算法和交互式图形处理工具开发的研究才刚起步,相关可视化系统的功能实现需要进一步予以研究开发。

参考文献:

- [1] 袁晓如,张 昕,肖 何,等. 可视化研究前沿及展望[J]. 科研信息化技术与应用,2011,02(4):3-13.
- [2] JOHNSON C. Tops Cientific Visualization Research Problem[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2004, 24(4):13-17.
- [3] 陈 为,沈则潜,陶煜波,等. 数据可视化[M]. 北京:电子工业出版社,2013:15-36.
- [4] 宋亚奇,周国亮,朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术,2013,37(4):927-934.
- [5] 杜 威,潘 苗. 物联网在智能电网中的应用[J]. 江苏电机工程,2013,32(4):81-84.
- [6] 李宁峰. 基于 TMS28335 的智能电网快速采样系统设计[J]. 江苏电机工程,2012,31(6):35-38.
- [7] 闫龙川,李雅西,李斌臣,等. 电力大数据面临的机遇与挑战[J]. 电力信息化,2013,11(4):1-4.
- [8] 肖 飞,齐立磊. 大数据处理技术与探索[J]. 计算机与现代化,2013(9):75-77.
- [9] 米可菲,张 勇,邢春晓,等. 面向大数据的开源推荐系统分析[J]. 计算机与数字工程,2013,41(10):1563-1566.
- [10] CCF 大数据专家委员会. 2014 年大数据发展趋势预测[J]. 中国计算机学会通讯,2014,10(1):32-36.
- [11] 胡雄伟,张宝林,李抵飞. 大数据研究与应用综述(下)[J]. 标准科学,2013(11):29-33.

作者简介:

王 栋(1982),男,江苏南通人,工程师,从事电网企业运营监测管理工作及大数据挖掘分析研究工作。

Application of Big Data Visualization Technique in Power Grid Enterprise

WANG Dong^{1,2}

(1. Nantong Power Supply Company, Nantong 226006, China;

2. School of Management Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: With the development of big data mining, visualization analysis has been becoming an important tool. This paper introduced the meanings of big data mining visualization technology and its applications. Targeting at the three types data of grid enterprises, namely grid operating data, customer data, and data of management, this paper presented an idea for the visualization of big data mining analysis, and provided suggestions to visualization platform construction for enterprises.

Key words: smart grid; big data; visualization

欢迎投稿 欢迎订阅

《江苏电机工程》2014 年总目次

专论与综述

含分布式风光电源的配电系统故障恢复策略	
..... 范钧慧,徐楠,刘皓明(1.1)	
锦—苏特高压直流对江苏电网变压器直流偏磁的影响	
..... 吴鹏,田猛,陆云才,等(1.5)	
SVC 预防电压失稳的快速控制方法	
..... 任旭超,万秋兰(2.1)	
基于 GAMS 的光伏发电消纳体系研究	
..... 薛斌(2.4)	
应用于月度用电量预测的小波分析法	
..... 吴雪花(2.8)	
基于 EPON 和工业以太网的新型配网通信混合组网方案	
..... 赵家庆,王鼎,钱科军,等(3.1)	
660 MW 机组送风机降速改造与变频改造的分析研究	
..... 孟庆龙,韦红旗,何长征(3.6)	
基于直流概率潮流的风电穿透功率极限计算	
..... 张文婷,范立新(4.1)	
配电网线路最优分段数算法研究及应用	
..... 王峰,李颖,王春宁(4.5)	
新一代继电保护及故障信息管理主站的设计与实现	
..... 祁忠,笃竣,张海宁,等(4.8)	
汽轮机通流效率与机组热耗率关系的计算	
..... 李刚,胥建群,汤涛,等(4.13)	
500/220 kV 电磁环网解合环方式评价方法研究	
..... 刘建坤,赵静波,周前,等(5.1)	
基于源网协同的风电并网系统双层优化调度	
..... 丁楠,陈中,胡吕龙(5.6)	
大型地区电网调度控制系统海量历史数据处理技术	
..... 彭晖,赵家庆,王昌频,等(5.11)	
基于 EMD 去噪的 Prony 算法在电网事故分析中的应用	
..... 胡昊明,江叶峰,葛亚明,等(6.1)	
海上风电场 VSC-HVDC 并网不对称故障负序电流控制	
..... 张广明,田炜(6.7)	

故障诊断与检修策略

一起 110 kV 电缆终端特殊部位发热的分析处理	
..... 王雨阳,王永强,王浩(1.9)	
一起地铁供电系统停电事故的分析及对策	
..... 魏巍,严伟,沈全荣,等(1.11)	
真空断路器投切并联电抗器过电压故障分析	
..... 吉亚民,周志成,马勇,等(2.12)	
汽流激振机理分析及某 330 MW 汽轮机故障处理	
..... 姜广政,傅行军(2.15)	
基于雷电信息的电网故障诊断系统研究	
..... 李鹏,张小易,黄浩声,等(2.17)	
一起 35 kV 电容式电压互感器二次电压异常升高的故障分析	
..... 徐长海,王静君(3.10)	
一例核电站电压互感器三相电压不平衡缺陷的分析与处理	
..... 王略,雷成,张钰,等(3.12)	
江苏电网 220 kV 及以上输电线路雷击跳闸分析	
..... 高嵩,周志成,陶风波,等(4.17)	
直流故障引起的线路保护误动作事件分析	
..... 刘孝刚,黄浩声,崔晓祥,等(4.21)	
对两条线路相继跳闸的保护配置分析	
..... 刘明,伏祥运,卢笛,等(4.24)	
一起 35 kV 电容式电压互感器缺陷的分析及处理	
..... 季烨(5.15)	
10 kV 开关手车控制回路断线原因分析及处理方法	
..... 陆琳(5.18)	
基于智能理论的高压断路器机械故障诊断	
..... 田涛,陈昊,张建忠,等(6.12)	
一起变压器低压绕组介损及电容量异常分析	
..... 赵胤,李华丹,董典帅(6.16)	

电网技术

基于遗传算法的有源电力滤波器直流母线电压控制	
..... 韩学栋,王海华(1.14)	

双重化配置线路保护的重合闸功能运行分析	 宋亮亮,汪 萍,袁宇波,等(1.18)
基于内点法和离散粒子群算法的输电网参数辨识	 周寅飞(1.22)
基于辨识模型的变压器故障诊断方法研究	 王 峰,王春宁(1.26)
面向电网削峰的商业楼宇空调负荷调控实证研究	 叶剑斌,黄 堃,刘 琼,等(1.30)
基于 PCS-985B 的发电机定子接地保护应用及整定	 张伟伟,徐 静,张婷昉(1.35)
智能继电保护测试仪程序在线升级技术研究	 王治国,于 哲,王言国,等(1.38)
便携式保护在智能电网设备投运中的应用	 姚 亮,陈 琦,邹 磊(1.42)
闭锁逻辑解析在电脑钥匙软件设计中的应用	 任金华(1.45)
基于缓存的补采策略在智能用电系统中应用	 陶晓峰,陈方周(1.48)
760 kN 绝缘子双联耐张串金具研究	 陈 宁,黄海俊,王圣博(1.50)
低压灭磁开关触头发热分析及处理	 高 雷,肖立军(1.54)
中低压母线电弧光保护设计与应用	 牛洪海,严 伟,王 杰(1.56)
特高压淮南—上海输变电工程新施工技术的应用	 鲁俊荣,宋念达,宋 丹,等(1.60)
开闭所开关柜排列方式对配网运行检修的影响	 沈 忱(1.63)
±800 kV 特高压锦苏线检修关键工器具的研制	 鲁永生,康宇斌,张云翔(2.22)
基于 MAS 服务的有序用电信息发布研究与应用	 张 斌,厉文婕,尹 飞(2.26)
基于 EMS 的地区电网合环风险评估系统	 罗玉春,龚成明,王 毅,等(2.30)

继电保护装置远方修改定值模式研究	 李德文,刘 进,刘 伟,等(2.34)
超高压输电系统中磁可控电抗器保护配置与实现	 熊 蕙,程 骁,文继锋,等(2.37)
采用可控负荷平滑光伏发电功率波动的需求响应策略	 李卫良,黄 堃,陈 璐,等(2.40)
异构系统间数据远程调阅的方法与实现	 史金伟,杨启京,肖艳炜,等(2.44)
基于 WEB 的省级能效管理平台的设计与应用	 孙 虹,李昆明,王 林,等(2.48)
智能变电站网络交换机在线监测设计与实现	 徐 勇,陆玉军,张 雷(2.52)
江苏电网省地县一体化电量智能采集系统研究	 熊 政,彭 栋,仲春林(2.56)
一起 SVC 一相可控硅全部击穿的原因分析	 胡建农(2.61)
区域电网电缆—架空线混合线路故障区间判别方法及实现	 李园园,沈 军,朱晓彤,等(2.64)
特高压铝管预制式跳线接头防滑移方案研究	 陈 宁,陈龙元,高剑凌(2.69)
基于 CIM 的配电自动化系统信息交互	 费建法,方 泉,王成现,等(3.15)
电动变桨系统超级电容后备电源测试装置设计	 沈 鑫,田 炜,鲁 斌,等(3.18)
智能变电站中低压母线保护设计	 陆玉军,徐 勇,薛 军,等(3.21)
大容量直流融冰系统在 500 kV 康定变的应用	 吴林平,田 杰,李长伟,等(3.26)
电力二次系统内网安全监视功能的研究与实现	 陈茂源,孙 炜,梁 野,等(3.31)
智能变电站同杆双回线保护功能优化的探讨	 申 泉,高 云(3.35)
高性能的新一代母线保护装置研究和应用	 王风光,高兆丽,潘东明,等(3.37)

智能变电站图模一体化设计软件实现方案 叶 翔,刘 辉,周永忠(3.41)	基于电压补偿原理的避雷器泄漏试验方法研究 甘 强,陈 轩,邵新苍,等(4.66)
一种高性能数字化采样新平台的研制 张 吉,谢 黎,汪世平(3.45)	500 kV 线路远方跳闸保护运行分析及改进措施 虞晓洁,周云波(4.69)
配网抢修移动应用系统的设计与实现 胡扬波,王成现,袁 杰(3.49)	配电变压器供应商生产制造能力评价体系研究 薛 祥,张丹丹,周志强,等(4.72)
电网设备系统检修策略 汤宗亮,衡思坤,韦海荣(3.53)	基于 D-S 证据理论的母线负荷预测 刘亚南,卫志农,季 聪,等(5.21)
变压器综合试验系统的设计与实现 孙秋芹,周志成,赵 科,等(3.56)	小电阻接地系统零序电流 II 段保护整定策略研究 鲍有理,季东方(5.25)
基于罗氏线圈的室内电源负载电流检测电路设计 王鹏宇,王 勤(3.59)	基于改进 PSO 算法的含风电场电力系统网架扩展规划 研究 周建华,孙 蓉,陈久林,等(5.28)
电力管廊顶管施工杆塔保护方法探讨 卞茂斌(3.62)	太阳能光伏电池建模与动态特性仿真 易桂平,胡仁杰(5.32)
电气设备 SF ₆ 气体检漏技术研究与应用 林 敏,杨景刚,贾勇勇,等(4.27)	新能源发电与电动汽车充换储站协调运行研究 薛钟兵,彭 程(5.36)
基于时域多周期同步和频域代数运算的谐波检测法 李安娜,黄家晖,熊杰锋(4.30)	馈线自动化终端设备智能接入的研究 王川化(5.39)
微型燃气轮机发电建模与仿真研究 易桂平,胡仁杰(4.34)	基于预制舱的配送式智能变电站设计 孙建龙,鲁东海(5.43)
引入虚拟电抗的独立运行微电网改进下垂控制 黄春燕(4.39)	基于 PSD-BPA 的暂态稳定控制批处理计算方法的实现 常宝立,徐光虎,易 杨,等(5.48)
县域配电网配电自动化系统的通信方案选择 秦 健,施金阳,孙 超(4.44)	基于突变理论的配电网规划方案综合评估 季晓明,成乐祥(5.51)
变压器调压区均压环的设计与优化 梅文哲,赵 建,范小辉,等(4.48)	江苏海上风电接入系统若干问题探讨 陆 燕,谈 健(5.55)
220 kV 变电站低压侧电压等级选择研究 丁 诚(4.52)	一种超高压输电线路恢复电压的精确计算方法 薛明军,陈福锋,姚 亮(5.59)
分布式光纤测温系统在电力电缆在线监测中的应用 张春阳(4.56)	多采样率转换算法对差动保护的应用研究 薛 蓉(5.62)
一起 220 kV 变电站母线 TV 二次回路的改造 王德全(4.59)	500 kV 串联补偿装置自触发及主间隙放电分散性研究 林 敏,李 杰,周志成(6.20)
基于高压调功器的冲击负荷平衡研究 黄 华,丁 勇,常宝立,等(4.63)	±500 kV 直流输电线路暂态故障监测装置的设计与应用 魏 旭,谢天喜,陶风波,等(6.23)

一种快速估算运行状态母线短路容量的方法 唐建清 (6.26)	某 1000 MW 机组一次风机变频后存在问题及解决方法 赵恒斌,马剑宇 (1.76)
电磁式电压互感器误差矢量分析法 穆小星 (6.30)	3×35%静调轴流引风机在 1000 MW 机组中的应用 崔国华,朱广忠,何俊松 (1.79)
分布式光伏逆变器并网侧短路暂态特性分析 文 珊,陈 兵 (6.34)	660 MW 机组基建过程中对脱硫装置的改进 张荣发 (2.72)
智能电能表小电量走字原因分析及抑制方法 田正其,纪 峰,徐 晴,等 (6.38)	660 MW 汽轮机组轴瓦温度异常的分析与处理 陈华桂,秦惠敏,戴兴干 (2.75)
江苏电网降损潜力和实现途径方法分析 安海云,周 琪,周 前 (6.42)	电厂开式循环水系统水藻堵塞的原因及解决措施 于 强,彭 辉 (2.79)
500 kV 线路安装串联电抗器后断路器 TRV 分析 尹元明,谢天喜,周志成 (6.45)	Caesar II 与 Glif 对高温高压管道静力分析的比较 王 静,徐 蕾 (3.66)
有序用电用户负荷特性分析方法研究 颜庆国,陈 霄,易永仙,等 (6.48)	某 150 MW 机组新投运期间水汽品质异常分析及控制 刘兰平 (3.69)
提高远程遥控安全性的 IEC 60870-5-104 规约扩展研究 朱海兵,吴 奕,陈 宁,等 (6.51)	1000 MW 超超临界锅炉不带炉水循环泵的冲管方式 崔国华,厉富超 (3.72)
基于同类划分的线损指标评价方法 孙志明,郑爱霞,周 前 (6.55)	防止超超临界锅炉受热面超温的技术措施分析 闫仕军 (3.75)
带电更换 500 kV 直线转角塔绝缘子通用工具的研制 张 伟,张佰庆,邵长一,等 (6.58)	电厂入炉煤皮带秤的测量精度分析 郭剑锋 (3.78)
6 kV 高压变频调速系统恒压频比控制研究 翟学锋,徐 钢,李辰龙,等 (6.61)	火电厂净烟气烟道流场特性分析及流量测点选择 张振义,邹 磊 (4.75)
温度对典型光学电压互感器误差特性影响的研究 陈 刚,陈铭明,徐敏锐,等 (6.65)	600 MW 机组脱硫增压风机与引风机二合一节能改造 于 泳,马月明 (4.78)
高频电源在 1000 MW 机组电除尘上的应用及优化分析 朱培峰 (6.68)	燃煤 PM10 湍流聚并 GDE 方程算法及算例分析 周林海,骆建友,刘含笑,等 (5.66)
使用树莓派实现主机远程断电重启 刘佳诞,周 琦 (6.70)	高硫煤对燃煤机组的影响分析 宋金琳,张 光 (5.70)
发电技术	1000 MW 机组塔式锅炉 NO _x 排放的试验研究 卞康麟 (5.73)
江苏省火力发电机组二氧化碳排放量估算 孙栓柱,代家元 (1.65)	火电厂选择性催化还原法脱硝效益与安全 董志军,施 跃 (5.76)
某 600 MW 机组配煤掺烧试验与分析 陈孝武,葛 伟,张 军 (1.68)	汽包锅炉炉内结渣的监控及优化吹灰策略 万 跃,晏海能 (5.80)
脱硫废水处理装置运行现状及优化建议 祝业青,傅高健,顾兴俊 (1.72)	江苏电网 1000 MW 超超临界机组可靠性分析 蒯狄正 (6.73)

480 t/h 锅炉低氮燃烧器改造与运行优化调整 单锦宏 (6.76) 汽轮机疏水系统优化节能改造 万 跃,晏海能 (6.79)	汽机专业 600 MW 汽轮机组凝汽器真空低故障诊断与处理 陈华桂 (S1.28) 某 660 MW 超超临界机组汽轮机内效率提升的技术措施 吴 伟 (S1.31) EH 油质裂化的原因分析和防止措施 王大伟,吴寅琛 (S1.35) 本质安全汽水品质控制在超(超)临界机组应用 王金宝 (S1.38) 脱硫浆液循环泵气蚀振动故障诊断与处理 蔡其斌,刘晓锋,卢修连 (S1.43)
科普园地 能源互联网的发展现状 沈 洲,周建华,袁晓冬,等 (1.81) 交流特高压输电线路运行维护现状综述 高 嵩,刘 洋,路永玲,等 (2.81) 大规模海上风电场并网接入方式 陈 锋,刘连永,董余凡 (3.81) 火力发电厂电气设备状态检修 孙成林 (4.81) 电力系统信息安全及博弈防御系统 王 燕 (5.82) 大数据可视化技术在电网企业的应用 王 栋 (6.82)	电气专业 核电站海水循环水泵电机绕组温度偏高原因分析及改造 马建明,王 勇,孙士睿,等 (S1.47) 高压厂用电快速切换控制回路分析及改进 唐鹏程 (S1.51)
锅炉专业 600 MW 超临界旋流燃煤锅炉低 NO _x 燃烧器改造 于 泳,杭庆均 (S1.1) 300 MW 机组余热用于生产 90 ℃ 洁净热水的技术 许昌杭,唐 超 (S1.4) 中储式制粉系统爆炸原因分析与解决措施 王连景 (S1.6) 彭城电厂 300 MW 锅炉低氮燃烧的改造技术 杨允平 (S1.9) 某 660 MW 超超临界锅炉热偏差调整方法 王 凯 (S1.13) 百万机组锅炉积灰分析及受热面吹灰方式运行优化 韩 涛 (S1.15) 磨煤机入口一次风量测量系统改造 张 芑,张建业 (S1.18) 基于实时数据的锅炉尾部受热面清洁因子算法研究 王国红 (S1.22) 低氮燃烧器在氮氧化物脱除中的重要性 邹红宇 (S1.26)	热控专业 热电联产供热网络实时信息系统的集成与研发 顾建国 (S1.53) 660 MW 超超临界机组引风机 RB 功能优化实例 张荣发,徐建中 (S1.57) 某超超临界 660 MW 机组协调控制特点 王亚顺,于国强 (S1.61) 发电机断水保护系统测量信号回路改造 杨洪武 (S1.65) 超临界锅炉低氮燃烧及 SCR 喷氨自动联合控制及优化 曹 鹏,冯晓萍 (S1.67)
	环保专业 1030 MW 超超临界机组氮氧化物排放控制技术研究 徐洪良,周林海 (S1.70) 排污权有偿使用和交易对发电公司的影响分析 郁海华 (S1.75) 浆液循环泵进口滤网的设计选型与维护 田赣兰 (S1.77) 吕四港发电公司电除尘器电控提效节能改造技术 董志江,刘效东,范玉军 (S1.79)

吕四港电厂氧化风机噪声和散热问题解决措施	李冀武(S1.83)
RAF35.5-20-1 型脱硫升压风机失速的原因分析	姚红梅(S1.86)
300 MW 机组电除尘器阴极线断线问题与解决措施	许昌杭,唐 超(S1.89)
SNCR+SCR 混合法脱硝技术在 600 MW 机组上的应用	胡浩毅(S1.91)
湿法脱硫“石膏雨”原因分析及其治理措施	赵家涛(S1.94)
神华国华太仓电厂除灰渣控制系统升级改造	张建业,张建伟(S1.97)

金属专业

1000 MW 机组锅炉监检中发现的主要缺陷及处理	张 禹,孙 雄,黄 俊(S1.100)
---------------------------	---------------------

系统分析

高压直流输电主电路稳态特性参数计算及应用	王 峰,王春宁,李 颖(S2.1)
分布式电源接入对配电网损耗影响分析	朱 红,韦 磊,史豪杰,等(S2.4)
S 变换在电力系统故障暂态信号时频分析中的应用	刘文涛,蒋东平(S2.7)
风力发电对配电网电压波动性的影响研究	朱 红,韦 磊,蔡 敏,等(S2.10)
电力系统瞬时无功功率补偿研究与应用	袁 远,王徐延(S2.13)
分布式旋转发电机接入配电网对继电保护影响及案例分析	李 琳,吴 罡(S2.17)
一种新的电网状态及参数误差离线估计方法	陆子强(S2.20)
一种全局无功优化的新型智能混合算法	周冬旭,罗 兴,李征恢(S2.25)
基于改进遗传 K-means 聚类算法的风电场多机聚合建模	马洲俊,朱 红,岳浩永,等(S2.29)

输变电技术

电网故障综合智能告警在地区调度自动化系统的应用	朱红勤,陈 艳,王 赫(S2.34)
-------------------------	--------------------

大容量低压短路试验相关问题研究	朱英杰,胡新瑞(S2.37)
220 kV 大截面电缆拉管敷设安装研究	马耀家,郑 瑱(S2.40)
一起电网调度自动化系统告警信息丢失故障分析和思考	郭 晏,赵 扬,朱红勤,等(S2.44)
变电站辅助设备监控集成技术研究与系统应用	司小庆,陈冰冰,廖英祺(S2.46)
两起电容器串抗故障的分析	王 弢,陈冰冰(S2.50)

配网技术

智能配电网超短期运行优化需求探讨	王 勇,余 昆,罗 兴(S2.54)
面向智能用电的高级量测体系关键技术探讨	周恒俊,肖 晶,李 雪,等(S2.57)
南京一流配电网自动化建设实践研究	陈庭记,颜 昕,许洪华(S2.61)
基于有限元法的 110 kV 联合建设变电站电磁环境仿真分析	蒋 涛,还留龙,徐志科(S2.64)
基于地理信息平台的智能通道规划辅助系统的开发和应用	肖 晶,李 雪(S2.67)
物联网技术在电动汽车充换电领域的应用	李 荣,蒋东平,卞孝琴(S2.70)
南京电网调度自动化基础数据校核技术	朱红勤,王 赫(S2.74)
配电通信网技术及维修案例	周俊礼(S2.78)
基于可靠性的 110 kV 输电线路停电优化方案	李懂理,刘 倩,丛 云(S2.81)
南京苏南现代化电网评估指标体系研究	李 晨,肖 晶,王自桢,等(S2.85)
10 kV 电缆线路不停电作业应用研究	陈庭记,颜 昕,许洪华(S2.90)
同步相量测量技术在配网合环的实用化应用研究	李 凯,张玉林,杜红卫,等(S2.93)