

★四川省一级期刊

• 万方数据数字化期刊群入网期刊

• 《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

• 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

• 北极星 中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

• 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954

德阳电业局



9 771003 695128

Vol.35

2012

No.3

四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 邬小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954

CN51-1315/TM

2012年第35卷第3期(总219期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬 谢 舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院情报室

地 址:成都市青华路24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87082036

E-mail:cdsclj@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 94* zh* P* ¥6.00* 4300* 25*

2012-03

目 次

• 基金项目 •

云南电网外送交直流潮流最优分配研究 曾雪松 张瀚月 廖晨淞 等(1)

雷电电流的频谱和能量分析 程 锐 李 梅 张新燕(4)

不同风力机风速突变对其并网系统影响分析 罗 庆 晁 勤 袁铁江 等(8)

考虑网内外功率特性的含风场电网日内发电需求滚动预测

..... 何洪业 汪 颖 肖先勇(11)

电压暂降扰动源电压空间矢量辨识法 李 滨 汪 颖 肖先勇(14)

• 电网技术 •

关于电网黑启动中厂网配合机制的研究 王莉丽 韩 伟(20)

基于合作型协同进化遗传算法分布式发电供电恢复

..... 万 强 孙 昊 王 乾 等(23)

并网光伏发电系统对吐鲁番地区配电网影响的研究

..... 胡仁祥 王晓斌 常喜强(27)

基于交替迭代法的 AGC 与 AVC 协调优化控制策略研究

..... 吕连洁 汪 颖 肖先勇 等(30)

风功率预测系统在新疆电网中的应用及改进

..... 孙立成 马成林 常喜强 等(36)

故障定位系统及其关键技术探讨 宋友文 赵继光(40)

基于连续潮流的静态分岔点追踪方法 李 林 刘 玲(44)

TCSC 次同步谐振阻尼控制器设计 王 敏 康积涛 李 康 等(48)

线路差动保护判别 TA 二次断线的新方法 周 伟 刘宏君(52)

基于频率特性的合闸于故障线路选相 黄 霞 陈 皓(55)

基于 GPRS 的电费抄收催一体化技术在电力系统中的应用 刘芯宇(58)

• 高电压技术 •

交流串入直流造成 500 kV 主变压器无故障跳闸的分析及改进措施

..... 胡晶晶 曾 丽(61)

广角红外透镜在封闭高压开关柜温度检测上的应用 赵 云(64)

电容式电压互感器二次电压偏低现象分析 刘同杰(67)

基于雷电定位系统对一起 220 kV 同塔双回输电线路雷击跳闸故障查找与研究

..... 魏文伟 刘义平 王 伟(70)

架空地线的绝缘化改造及融冰方法 陈义刚 范松海(74)

高电压设备在线监测技术在智能电网中的研究与实施

..... 拉 贵 扎西曲达 尼玛石达 等(78)

基于油色谱分析的变压器有载开关油渗漏缺陷诊断方法创新研究

..... 蒋福佑 袁 鹰(82)

• 电厂技术 •

DG2028/17.45-Ⅱ型锅炉受热面改造的重要性

..... 彭 林 王建华 王 亮(88)

浅谈印度某发电工程镉镍蓄电池选择计算 龙 军(92)

CONTENTS

Research on Optimal Power Distribution Method for AC/DC Connected System of Yunnan Power Grid	Zeng Xuesong Zhang Hanyue Liao Chensong et al(1)
Spectrum and Energy Analysis of Lightning Current	heng Rui Li Mei Zhang Xinyan(4)
Influence Analysis of Different Wind Turbines on Its Grid - connected System in Case of Abrupt Change of Wind Velocity	Luo Qing Chao Qin Yuan Tiejiang et al(8)
Rolling Forecasting Method for Intraday Generation Demand with Wind Farms Considering Power Characteristic inside and outside Power Grid	He Hongye Wang Ying Xiao Xianyong(11)
A Method to Identify Voltage Sag Sources Based on Voltage Space Vector	Li Bin Wang Ying Xiao Xianyong(14)
Research on Coordination Mechanism between Power Grid and Plant in Black Start of Power Grid	Wang Lili Han Wei(20)
Service Restoration of Distributed Generation Based on Co - evolutionary Genetic Algorithm	Wan Qiang Sun Hao Wang Qian et al(23)
Research on Effect of Grid - connected Photovoltaic Power Generation System on Turpan Distribution Network	Hu Renxiang Wang Xiaobin Chang Xiqiang(27)
Research on Coordinated Optimal Control Strategy of AGC and AVC Based on Alternating Iterative Method	Lü Lianjie Wang Ying Xiao Xianyong et al(30)
Application and Improvement of Wind Power Forecasting System in Xinjiang Power Grid	Sun Licheng Ma Chenglin Chang Xiqiang et al(36)
Discussion on Fault Location System and Its Key Technology	Song Youwen Zhao Jiguang(40)
Static Bifurcation Point Tracing Method Based on Continuation Power Flow	Li Lin Liu Ling(44)
Design for TCSC Damping Controller of Subsynchronous Resonance Suppression	Wang Min Kang Jitao Li Kang et al(48)
Novel Identification Method for Secondary Circuit Disconnection of TA by Line Differential Protection	Zhou Wei Liu Hongjun(52)
Phase Selection for Switching into Fault Line Based on Frequency Characteristics	Huang Xia Chen Hao(55)
Application of Collecting Reminder Integration Technology Based on GPRS to Power System	Liu Xinyu(58)
Analysis on 500 kV Main Transformer Tripping Without Fault Caused by AC Flowing into DC Circuit and Its Improvement Measures	Hu Jingjing Zeng Li(61)
Application of Wide - angle Infrared Lens to Temperature Detection of Enclosed HV Switch Cabinet	Zhao Yun(64)
Analysis on Lower Secondary Voltage of Capacitor Voltage Transformer	Liu Tongjie(67)
Detection and Analysis of Tripping Fault Caused by Lightning Stroke in 220 kV Double - circuit Lines on the Same Tower Based on Lightning Location System	Wei Wenwei Liu Yiping Wang Wei(70)
Insulation Reconstruction and Ice - melting Method for Overhead Earth Wire	Chen Yigang Fan Songhai(74)
Research and Implementation of Online Monitoring Technique for High Voltage Equipment in Smart Grid.	La Gui Zhaxi Quda Nima Shida et al(78)
A Novel Diagnostic Method for Oil Leakage from On - load Tap - changer of Transformer Based on Oil Chromatographic Analysis	Jiang Fuyou Yuan Ying(82)
Importance of Heating Surface Reformation for DG2028/17.45 - II 5 Boiler	Peng Lin Wang Jian Hua Wang Liang(88)
Superficial Discussion on Selection and Calculation of Nickel - cadmium Battery in an India Power Plant	Long Jun(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2012 Vol. 35 No. 3

(Ser. No. 219)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 24, Qinghua Road, Chengdu, Sichuan, China

Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

云南电网外送交直流潮流最优分配研究

曾雪松¹, 张瀚月¹, 廖晨淞², 贺钰涵¹, 崔艳龙¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要:云南电网是中国西电东送能源战略的重要组成部分,“十二五”期间拟将建成五回直流,形成一个大型的交直流混合输电系统,不同的交直流输电通道的功率分配,将产生不同的输电损耗。为使潮流分布更为合理,实现减少输电损耗、实现节能降耗的目的,建立了交直流输电最优损耗模型,并采用粒子群优化算法(PSO)计算交直流通道潮流的最优功率分配。优化后南方电网网损下降约1%~6%,效果明显。

关键词:云南电网; 输电损耗; 功率分配; 粒子群优化算法

Abstract: As an important part of West-to-East power transmission project, Yunnan Power Grid will become a large-scale hybrid AC/DC power transmission system at the end of "The Twelfth Five-Year Guideline". The different power distributions of AC and DC line will form the different transmission losses. A model to determine the power distribution for each HVDC lines and AC lines of Yunnan Power Grid is proposed, the power distribution is optimized with particle swarm optimization (PSO) algorithm to get a minimum total power loss. The power loss of China Southern Grid is decreased by approximately 1%~6%.

Key words: Yunnan Power Grid; transmission loss; power distribution; particle swarm optimization (PSO)

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0001-03

TU09ZT13)

0 引言

云南电网是中国西电东送能源战略的重要组成部分,至“十二五”末期拟将新建成四回直流,分别为中西部地区的云广直流、糯扎渡直流、金中直流和澜上直流,与东部地区的溪洛渡直流,形成一个大型的交直流混合输电系统,如图1所示。经过十多年的发展,云南电力外送规模从零起步提高到2010年的7 800 MW,500 kV主网架及外送通道的建设也逐步得到完善,2010年云南电网已建成并形成围绕滇中和滇东的“品”字型500 kV环网,并辐射延伸至滇南、滇西、滇西南等区域,建成了“四交一直”的外送通道,外送能力达到9 100 MW。

根据“十二五”规划,云南的电力外送事业还将得到较大的发展,外送规模还将由7 800 MW提高到21 500 MW,在此基础上还可能新增6 000 MW季节性电能的送出。“十二五”期间,为配套糯扎渡、溪洛渡电站、金沙江中游电站的电力外送,将建设糯扎渡、溪洛渡电站送广东直流输电工程以及金沙江中

游电站送广西直流输电工程,为配套澜沧江上游电站的外送以及季节性电能的外送。到“十二五”末期,云南将建成“五交五直”的电力外送通道,外送能力达到25 600~26 850 MW,裕度在1 100~2 350 MW。如果是在外送规模较少的枯期,这一裕度将会更大。

这样,由于高压直流工程就不必为了提高整个系统的安全稳定水平而按额定容量运行。另外,由于交、直流输电的损耗特性不一致,在维持外送总规模不变的前提下,合理分配同一外送断面间的交、直流通道输送功率分配,将能起到节能降耗的效益。因此,“十二五”期间云南主网架及外送通道的加强,为断面外送功率的优化提供了可能。

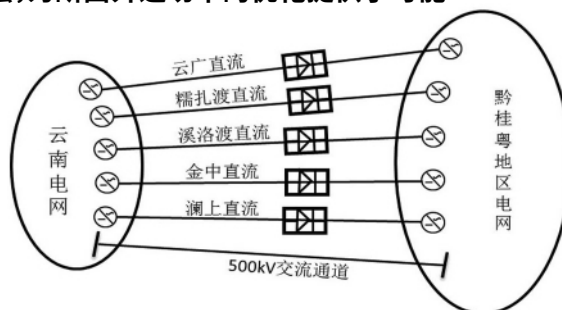


图1 云南电网外送结构示意图

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金专题研究项目(SWJ-

如何在保持电网外送规模不变的前提下,利用直流输电功率的可控性,合理地分配交、直流输电通道的输送功率,以达到输电损耗最低的目标,是中国西电东送亟待解决的问题,是实现电网节能降耗的重要方式。

以云南电网为基础,研究了交流输电通道和直流输电通道的损耗特性,利用 Matlab 建立了交、直流混合输电系统的最小损耗模型,通过粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO),在维持总外送不变的情况下,求解交直流各通道输送功率的最优分配解,并通过回写入 BPA 进行计算,比较优化效果。

1 交、直流输电通道的损耗特性

1.1 交流通道损耗特性

输电线路在输送电力的过程中会产生电力损耗,线路有功功率损耗计算如下。

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R + U_0^2 \cdot G_0$$

$$\approx \left(\frac{P}{U \cdot \cos \varphi} \right)^2 \cdot R = \frac{R}{U^2} \left(\frac{P}{\cos \varphi} \right)^2$$

其中,损耗系数 $k = \frac{R}{(U \cdot \cos \varphi)^2}$

式中, P 、 Q 、 U 为线路同一端的有功功率、无功功率、电压幅值; U_0 为线路两端的平均电压幅值; R 、 X 为线路串联电阻、电抗; G_0 为线路并联电导; $U_0^2 G_0$ 为电晕损耗,数值很小,一般可忽略不计。

根据有功功率损耗计算公式,对输电线路损耗影响因素分析如下:①线路有功功率损耗与传输有功的平方及线路电阻值成正比;②线路有功功率损耗与传输功率因数的平方及系统运行电压的平方成反比。

因此,在交流通道建设方案已确定的前提下,要

想降低交流通道的输送潮流,只能通过合理安排线路潮流、合理投切电网无功补偿以减小线路无功功率传输、适当提高电网运行电压水平等措施来降低电网输电损耗。

1.2 直流系统损耗特性

直流线路损耗与线路长度成正比,包括与电压相关的损耗和与电流相关的损耗。

(1) 与电压相关的损耗:线路电晕损耗和线路绝缘子串泄漏损耗。由于后者数量很小,一般可以忽略不计(如天广直流占额定容量运行下线路电阻损耗的 3.9%)。直流线路电晕损耗比交流线路电晕损耗小,且受气候条件的影响也小。中国国家电力公司电力科学研究院曾对 500 kV 直流线路进行过实测,测得线路电晕损耗正极为 3.1 W/m,负极为 3.6 W/m。

(2) 与电流相关的损耗:直流电流在直流线路电阻上产生的损耗,与输送同样有功功率的交流线路相比,直流线路的损耗通常较小。直流线路损耗还与直流系统运行方式有关。按损耗大小从小到大排序为双极线并联运行、大地回线运行、金属回线运行。

(3) 接地极引线及接地电极损耗:损耗可以忽略不计。

简化模型后,直流输电系统的损耗功率 P_{loss} 与输送功率 P 、电流 I 、电压 U 、电阻 R 之间的关系推导如下。

$$P_{\text{loss}} = I^2 R = \left(\frac{P}{U} \right)^2 R = \frac{P^2 R}{U^2} = k P^2$$

$$\eta = \frac{P_{\text{loss}}}{P} = \frac{PR}{U^2} = k P$$

其中,损耗系数 $k = \frac{R}{U^2}$; η 是输电损耗率。

由上述两式可看出,在其他条件不变的情况下,损耗功率 P 与输送功率的平方和线路电阻成正比,与输电电压的平方成反比,损耗率 η 与输送功率和电路电阻成正比,与输电电压的平方成反比。

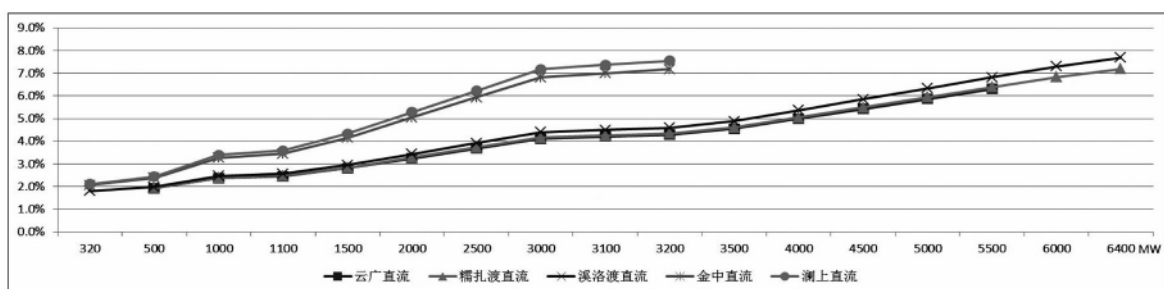


图2 云南电网各回直流输电损耗

根据直流系统运行参数,云南电网各回直流系统在运行过程中输电损耗随其输电功率的变化曲线如图 2 所示(考虑两端换流站有功损耗为输送功率 1.5%,各回直流运行方式为双极平衡运行)。

2 交、直流输电通道最小损耗模型

设云南电网外送通道的输电损耗为 ΔP ,云广直流输电损耗为 ΔP_1 ,糯扎渡直流输电损耗为 ΔP_2 ,溪洛渡直流输电损耗为 ΔP_3 ,金中直流输电损耗为 ΔP_4 ,澜上直流输电损耗为 ΔP_5 ,交流通道输电损耗为 ΔP_6 。

总的云南外送损耗

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (n=6)$$

优化目标为输电损耗最小,即

$$\min \Delta P = \min \sum_{i=1}^n \Delta P_i$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_i = P_{\text{con}} \quad (n=6)$$
$$0 \leq \Delta P_i \leq P_{i\text{max}} \quad (i=1,2,3,4,5)$$

其中, P_{con} 为云南电网交、直流外送总电力; $P_{1\text{max}}$ 为云广直流输送功率极限; $P_{2\text{max}}$ 为糯扎渡直流输送功率极限; $P_{3\text{max}}$ 为溪洛渡直流输送功率极限; $P_{4\text{max}}$ 为金中直流输送功率极限; $P_{5\text{max}}$ 为澜上直流输送功率极限。

此模型属于带有等式约束的混合非线性规划问题,解决此类问题的常用算法包括外点法、内点法、可行方向法等。

粒子群优化 (PSO) 算法是 Kennedy 和 Eberhart 受人工生命研究结果的启发,通过模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群聚行为而提出的一种基于群体智能的全局随机搜索算法,具有易理解、易实现、全局搜索能力强等特点,倍受科学与工程领域的广泛关注,成为发展最快的智能优化算法之一。这里采用粒子群优化(PSO)算法求解以上优化目标,使云南电网外送输电损耗值最小。

3 交、直流通道潮流最优分配计算

至 2013 年,云南电网将投产三回直流,分别为云广直流、糯扎渡直流和溪洛渡直流,其中云广直流为 ± 800 kV,输电容量为 5 000 MW,双极运行;糯扎渡直流为 ± 500 kV,输电容量为 5 000 MW,单极运行;溪洛渡直流为 ± 500 kV,输电容量为 3 200 MW,单回双极运行。2013 年枯期大方式下,云南总体外送电力为 11 200 MW,各回直流均未满送,优化空间较大,具体优化结果见表 1。从表 1 中可看出,2013 年枯期大方式下,原始安排各回直流未满足,交流断面约为 3 700 MW;优化后,云广直流和糯扎渡直流多送,溪洛渡直流少送,云电交流出口降至 3 000 MW 以下,整个南方电网网损有功损耗由 2 736.2 MW 降至 2 689.4 MW,减少约 1.71%,优化效果明显。

至 2015 年,云南电网将新增金中直流、澜上直流和溪洛渡直流的 II 回,其中金中直流和澜上直流均为 ± 500 kV,输电容量为 3 200 MW,双极运行。2015 年丰期小方式下,云南总体外送电力为 15 900 MW,除澜上直流外其余各回直流均未满送,优化空间较大,具体优化结果见表 2。从表 2 中可看出,2015 年丰期小方式下,原始安排各回直流未满足,交流断面约为 1 150 MW;优化后,云广直流和糯扎渡直流多送,溪洛渡直流少送,金中直流由于位于云南滇西北地区,送出损耗大,输送容量减少,整体云电交流出口降至 2 400 MW 以下,整个南方电网网损有功损耗由 2 325.8 MW 降至 2 183.7 MW,减少约 6.11%,优化效果较明显。

4 结 语

随着西电东送规模的不断增加,云南电网将成为国家西电东送的主要组成部分。根据拟签订的

表 1 2013 年云南电网输送功率优化前后对比

项 目	云广直流/MW	糯扎渡直流/MW	溪洛渡直流/MW	交流通道/MW	南网损耗/MW
优化前	3 500	1 750	2 240	3 711	2 736.2
优化后	4 284	2 104	1 934	2 882	2 689.4

(下转第 7 页)

的频率集中在 0 ~ 30 kHz 之间,故雷电流频率属于低频范围之内。

(3) 对于上升时间越快的雷电流而言,其频率分量的初始振幅值越小,但是其所含的高频分量却越丰富,谐波较多。

(4) 雷电流的能量分布主要集中在 1 ~ 10 kHz, 占总能量的 60.44%。工频附近(0 ~ 100 Hz) 的能量只占到总能量的 2.66%。

通过以上的计算分析,明确了雷电流的参数确定、频谱特性及能量分布,为研究雷电对风力发电机产生的电磁干扰过程中,需要重点关注的雷电流频率范围打下坚实基础。

参考文献

[1] 王丽广. 风电机组的防雷保护 [J]. 交流技术与电力牵

(上接第3页)

表2 2015年云南电网输送功率优化前后对比

项 目	云广直流/MW	糯扎渡直流/MW	溪洛渡直流/MW	金中直流/MW	澜上直流/MW	交流通道/MW	南网损耗/MW
优化前	3 000	3 000	3 840	1 920	3 000	1 150	2 325.8
优化后	3 525	3 463	3 183	1 736	1 626	2 369	2 183.7

“十二五”西电东送框架协议的主要内容,至2015年,云南电网外送电力规模约占整个南方电网西电东送总规模的50%,云南电网拟将建成以五回直流、五回交流形成的外送网架。根据交、直流输电损耗的理论,在保持外送功率不变的前提下,不同的各回交、直流通道的输送功率将产生不同的输电损耗;由西电东送协议中安排的各年份各方式电力流来看,云南电网外送电力有一定的裕度,为各通道的输电容量调整提供了可能性。因此,如何安排各回交、直流输电线路的输送功率,使得输电有功损耗最小将是电网节能降耗的有效措施。前面建立了云南电网交直流主通道的最优功率分配模型,运用粒子群优化算法(PSO)求解,获得各输电通道的最优功率分配,从而使电网输电有功损耗降到最小。

计算结果表明,基于所建立的粒子群优化算法,可以优化云南电网交直流输送容量的分配,从而有效降低云南电网外送输电损耗,对电网的节能降耗有明显作用。

参考文献

[1] Kunder P. Power System Stability and Control [M]. 北京: 中国电力出版社,2002: 351 - 354.

引,2008(2): 37 - 39.

[2] 康春华,张小青,王芳. 风电机组的防雷问题 [J]. 山西电力,2006(6): 62 - 64.

[3] C. E. R. Bruce and R. H. Golde. The Lightning Discharge [J]. Inst. Elec. Eng - Pt. 2, 1941, 88: 487 - 520.

[4] F. Heilder. Traveling Current Source Model for LEMP Calculation [J]. In Proc. 6th Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat, Zurich, Switzerland, Mar. 1985: 157 - 162.

[5] 张方舟,陈亚洲,魏明,等. 雷电电流的脉冲函数表示 [J]. 电波科学学报,2002(17): 51 - 53.

[6] 张小青. 风电机组防雷与接地 [M]. 北京: 中国电力出版社,2008: 21 - 22.

作者简介:

程 锐(1985),男,硕士研究生,研究方向为风机控制与电力系统继电保护。

(收稿日期:2012-04-18)

[7] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社,2003.

[8] 陈维荣,张倩,王劲草,等. 搜寻者优化算法在最优潮流中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报,2009,21(1): 64 - 67.

[9] 梁军. 粒子群算法在最优化问题中的研究 [J]. 广西师范大学,2008.

[10] 陈佳琰,彭春华. 基于 PSAT 软件的多目标最优潮流计算 [J]. 华东交通大学学报,2007,24(2): 87 - 91.

[11] 王志勇,梁敬成,熊小伏,等. 西电东送输电通道损耗最小最优功率分配方法 [J]. 南方电网技术,2009,3(2): 38 - 41.

[12] 史丹,任震,余涛. 高压直流换流站损耗计算软件的开发和应用 [J]. 电力系统自动化,2006,30(19): 81 - 83.

[13] 中国南方电网电力调度通信中心. 中国南方电网2011年运行方式 [J]. 广州: 中国南方电网电力调度通信中心,2011.

作者简介:

曾雪松(1984),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

张瀚月(1989),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化,新能源;

廖晨泓(1984),男,硕士,助理工程师,主要从事电力调度工作。

(收稿日期:2012-03-20)

雷电电流的频谱和能量分析

程锐¹, 李梅², 张新燕¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 新疆维吾尔自治区计量测试研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:为了研究风电场中强大电磁干扰源雷电流的基本特性,利用脉冲函数作为 $2.6/50\mu\text{s}$ 雷电流的解析表达式,将其与双指数函数表示的雷电电流进行比较说明其可用性。之后采用傅里叶变换和仿真计算的方法对雷电流的幅频特性以及所含能量进行了研究,得到相应的频谱图和能量分布图。经过分析得到的结论是:雷电流的频率在低频范围之内,能量主要集中在 $1\sim 10\text{kHz}$ 之间,且雷电流脉冲上升越陡频率分量的初始振幅值越小,但是其包含的高频分量却越多。

关键词:雷电电流; 脉冲函数; 频谱; 能量分布

Abstract: The characteristics of the powerful EMI source – lightning current are mainly studied. Firstly, the pulse function is used as the analytical expression of the $2.6/50\mu\text{s}$ lightning current, and then this expression is compared with the lightning current expressed by double – exponential function for explaining its usability. Secondly, the Fourier transform and simulation are adopted to research the amplitude – frequency characteristic and the energy content of lightning current, and the relevant spectrum diagram and the energy distribution are obtained. Finally, through the analysis, the conclusion is gotten that the frequency of lightning current belongs to the low frequency rang and its energy mainly concentrates between $1\sim 10\text{kHz}$. If the pulse of lightning current arises faster, the amplitude of frequency component will be smaller, but the more high – frequency components are contained.

Key words: lightning current; impulse function; spectrum; energy distribution

中图分类号: TM863 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 – 6954(2012)03 – 0004 – 03

0 前言

雷电是自然界中雷云之间或是雷云与大地之间的一种放电现象,其特点是电压很高、上升时间很短、具有很大的危害性。无论是直击雷还是感应雷都会对周边设备产生很强的电磁干扰,从而带来巨大的破坏和损失。当代对风能的开发利用不断增加,风力发电机的安装数量也越来越多。随着风电机组单机容量的增大,风电机组为捕获更多的风能,风轮直径不断增大,机组离地高度不断增高,再加上风电机组一般安装在开阔地带或者山顶,其遭受雷击机率也越来越大。并且由于雷电现象的随机性,无论采取何种措施,也不能完全避免雷击的可能,因此风电机组的防雷措施日益受到重视^[1-2]。鉴于

此,就需要对雷电这个强大干扰源进行分析,对其波形参数的确定、频谱和能量分布进行仿真分析确定其研究范围。

1 雷电电流的脉冲函数表示

大量的实测结果表明,雷电流的波形大致呈现出单极性的脉冲形状,正(负)极性雷电放电产生的雷电流具有正(负)极性脉冲波形。为了计算应用方便,在防雷计算中,需要将雷电流波形等值为典型化的可用解析式表达的波形。目前,国际上常用的雷电流等值波形有双指数函数模型^[3]和Heidler函数模型^[4]。但是双指数函数在 $t=0$ 时导数最大,与实际情况下电流波形在 $t=0$ 时导数为0特征不相符,不适用于电磁场计算,而Heidler函数是不可积函数,没有明确的时间积分式,因此也不便于直接用它来进行雷电电磁场的数值计算,故最近有文献提出用脉冲函数表示雷电电流的模型能克服以上缺

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51010105064);新疆自治区科技厅自然科学基金项目(2011211A012);新疆大学博士基金项目(BS100122)

点,并且能大大减小雷电磁场的计算工作量,有助于更加方便有效地进行雷电磁场的分析与研究。其表达式如式(1)^[9]。

$$i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{I_0}{\xi} [1 - e^{(-t/\tau_1)}]^n e^{(-t/\tau_2)}, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,峰值修正因子 $\xi = (1 - \varepsilon)^n \varepsilon^{\tau_1/\tau_2}$, $\varepsilon = \tau_1 / (\tau_1 + n\tau_2)$; 脉冲函数中的 τ_1 、 τ_2 相对于双指数函数中的关系有 $\alpha = 1/\tau_2$, $\beta = 1/\tau_1$, 因此可以借助双指数函数的 α 和 β 进行取值。

以国际大电网会议(CIGRE)提出的大量实测数据为基础,国际电工委员会(IEC)在其标准《雷电磁脉冲的防护》(IEC-61312-1)中较为系统地推算出各种雷电流的参量指标,其中用波头时间和半幅值时间来描述不同的雷电流波形。由于以上两者的不同分别反映了上升段和下降段的陡度不同,因此不同雷电流波形的应用场合也不同,其中常用的雷电流波形有以下4种^[9],如表1所示。

表1 4种常用雷电流波形适用场合

雷电流波形	适用场合
10/350 μs	该波形表示回击的短脉冲雷电流,主要用于对地面设施的直接雷击防护,也用于一些雷电电涌保护器的试验检测。
0.25/100 μs	该波形表示后续回击的短脉冲雷电流,运用于涉及雷电流变化率的防护设计场合。
8/20 μs	主要是一种冲击电流波形,广泛应用于各种雷电电涌保护器的性能测试。
2.6/50 μs	中国电力行业规定采用的雷电流波形,应用于输电线路和发、变电站的防雷设计。

基于双指数函数形式用 Matlab 对以上4种波形进行仿真如图1所示。

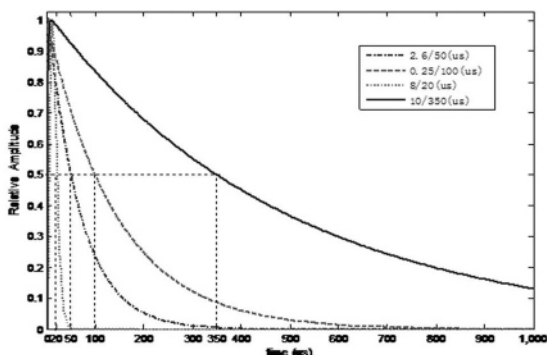


图1 基于双指数函数形式的4种雷电流波形

鉴于研究雷电对风力发电机的影响采取2.6/50 μs 的波形为例,运用脉冲函数将其表示出,并对其频谱和能量分布进行仿真分析。取 $n=2$ 得脉冲

函数表达式如式(2)。

$$i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1.087I_0(1 - e^{-1.86 \times 10^6 t})^2 e^{-1.5 \times 10^4 t}, & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

用 Matlab 对其与双指数函数形式的雷电流波形进行计算仿真做比较,如图2所示。

由图1、2可见,脉冲函数表示的波形较之双指数函数形式的波形在峰值时略微有点偏高,但是其上升段和下降段的陡度是一致的,这是因为脉冲函数展开式的第一项是决定函数衰减的主要项,而后面的项决定上升波形,与双指数函数相比,脉冲函数的指数比其略大,故仿真时波峰略高。该波形下降达到半幅值时间也在50 μs ,该时间反映了雷电流下降速度的快慢和电流脉冲持续时间的长短,因此两者图形是基本一致的,都能够反映出雷电流脉冲的性质。

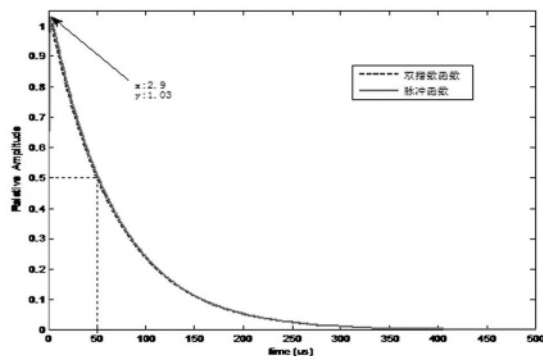


图2 双指数和脉冲函数形式的雷电流波形比较图

2 雷电流的频率分析

首先,对雷电流脉冲函数进行傅里叶变换可得出雷电流的频谱函数,令 $\alpha = 1/\tau_1$, $\beta = 1/\tau_2$, 则

$$\begin{aligned} I(\omega) &= 1.087I_0 \int_{-\infty}^{\infty} [1 - 2e^{-\alpha t} + e^{-2\alpha t}] e^{-\beta t} e^{-j\omega t} dt \\ &= 1.087I_0 \left(\frac{1}{\beta + j\omega} - \frac{2}{\alpha + \beta + j\omega} + \frac{1}{2\alpha + \beta + j\omega} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

令其雷电流的振幅频谱为 $Y(\omega)$, 则有

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= |I(\omega)| \\ &= \frac{2.174\alpha^2 I_0}{\sqrt{(2\alpha^2\beta + 3\alpha\beta^2 - 3\alpha\omega^2 - 3\beta\omega^2)^2 + (6\alpha\beta\omega + 3\beta^2\omega + 2\alpha^2\omega - \omega^3)^2}} \end{aligned} \quad (4)$$

将给定的 α 和 β 的值代入式(4)中可得到雷电流各频率分量相对应雷电流峰值,如表2。

用 Matlab 对其进行仿真得到振幅频谱,如图3所示。

由表2和图3可知,雷电流的频谱0~15 kHz

时振幅很大且变化也很快,并且其主要频率分量主要集中在 0 ~ 30 kHz。

表2 2.6/50 μs 雷电波频率分量振幅值

角频率 ω/Hz	频率 f/kHz	振幅 $Y(\omega) \times 10^{-6} I_0$
0	0	71.6
62 800	10	16.62
94 200	15	11.24
188 400	30	5.647
376 800	60	2.778
628 000	100	1.599
1 256 000	200	0.6733
3 140 000	500	0.1342

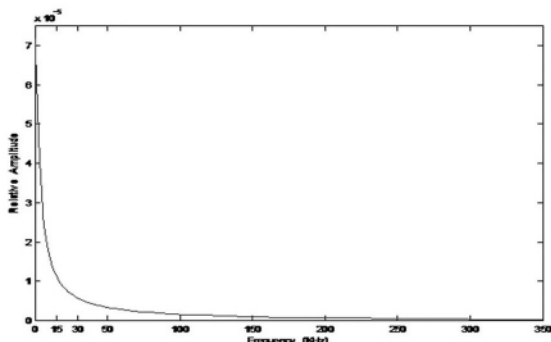


图3 2.6/50 μs 雷电波振幅频谱图

其次,对 2.6/50 μs 雷电波和 10/350 μs 雷电波进行快速傅里叶变换,画出两者的频谱图进行对比,如图4所示。

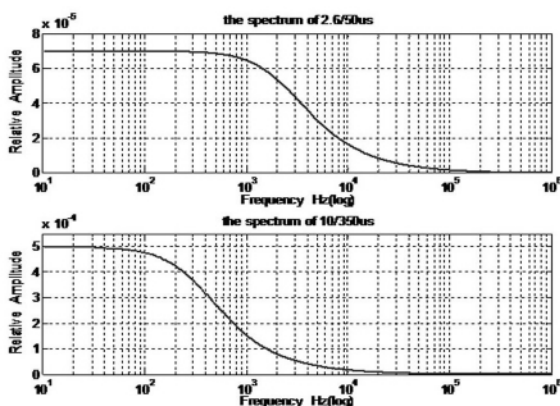


图4 2.6/50 μs 和 10/350 μs 雷电波频谱图

由图4比较可知,上升时间快的比上升时间慢的雷电流的幅值相差一个数量级之多。并且 10/350 μs 雷电波在频率 100 Hz 的时候,谱线开始下降,到频率 40 kHz 的时候幅值基本为零;而 2.6/50 μs 的雷电流在频率为 1 kHz 的时候,谱线开始下降,到 150 kHz 时幅值才趋近于零。因此可以知道,脉冲上升越陡,所含高频分量越丰富。

3 雷电波的能量分布

由式(3)得到的雷电流振幅频谱函数,得到其

能量函数为

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} [i(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |I(\omega)|^2 d\omega$$

$$= 9 \times 10^{24} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(1.05 \times 10^{17} - 5.63 \times 10^6 \omega^2)^2 + (7.08 \times 10^{12} - \omega^2)^2 \omega^2} d\omega \quad (5)$$

用 Matlab 对其角频率的整数倍进行计算得到雷电波能量波形如图5所示。

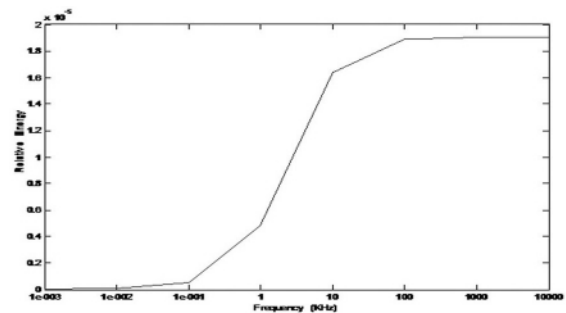


图5 雷电波能量波形图

为了能够更加清晰地认识到各频段内能量的分布,用 Matlab 计算出各频率段的能量占总能量的百分比,如图6所示。

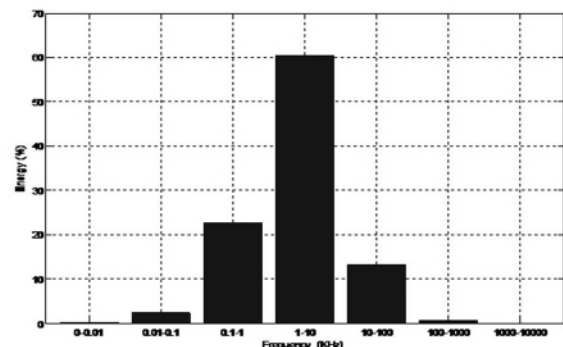


图6 雷电波能量占总能量的比例图

4 结论

主要通过用脉冲函数的形式仿真了 2.6/50 μs 的雷电流波形,将其与双指数函数进行对比,并且对其函数进行傅里叶变换得到雷电流的频谱函数以及能量函数,找到了幅频特性和各频率段能量分布。通过以上的仿真计算结果可得如下结论。

(1) 脉冲函数与双指数函数表示的雷电流波形基本一致,其波形在下降时均在 50 μs 时达到半幅值,这表明雷电流脉冲持续的时间是一样的,对防雷保护装置的影响是一样的,可以用其进行计算。

(2) 雷电波的频率分量在 0 ~ 30 kHz 时振幅最大,即在对雷电流做电磁场分析时,可以将主要关注

的频率集中在 0 ~ 30 kHz 之间,故雷电流频率属于低频范围之内。

(3) 对于上升时间越快的雷电流而言,其频率分量的初始振幅值越小,但是其所含的高频分量却越丰富,谐波较多。

(4) 雷电流的能量分布主要集中在 1 ~ 10 kHz, 占总能量的 60.44%。工频附近(0 ~ 100 Hz) 的能量只占到总能量的 2.66%。

通过以上的计算分析,明确了雷电流的参数确定、频谱特性及能量分布,为研究雷电对风力发电机产生的电磁干扰过程中,需要重点关注的雷电流频率范围打下坚实基础。

参考文献

[1] 王丽广. 风电机组的防雷保护 [J]. 交流技术与电力牵

(上接第3页)

表2 2015年云南电网输送功率优化前后对比

项 目	云广直流/MW	糯扎渡直流/MW	溪洛渡直流/MW	金中直流/MW	澜上直流/MW	交流通道/MW	南网损耗/MW
优化前	3 000	3 000	3 840	1 920	3 000	1 150	2 325.8
优化后	3 525	3 463	3 183	1 736	1 626	2 369	2 183.7

“十二五”西电东送框架协议的主要内容,至2015年,云南电网外送电力规模约占整个南方电网西电东送总规模的50%,云南电网拟将建成以五回直流、五回交流形成的外送网架。根据交、直流输电损耗的理论,在保持外送功率不变的前提下,不同的各回交、直流通道的输送功率将产生不同的输电损耗;由西电东送协议中安排的各年份各方式电力流来看,云南电网外送电力有一定的裕度,为各通道的输电容量调整提供了可能性。因此,如何安排各回交、直流输电线路的输送功率,使得输电有功损耗最小将是电网节能降耗的有效措施。前面建立了云南电网交直流主通道的最优功率分配模型,运用粒子群优化算法(PSO)求解,获得各输电通道的最优功率分配,从而使电网输电有功损耗降到最小。

计算结果表明,基于所建立的粒子群优化算法,可以优化云南电网交直流输送容量的分配,从而有效降低云南电网外送输电损耗,对电网的节能降耗有明显作用。

参考文献

[1] Kunder P. Power System Stability and Control [M]. 北京: 中国电力出版社,2002: 351 - 354.

引,2008(2): 37 - 39.

[2] 康春华,张小青,王芳. 风电机组的防雷问题 [J]. 山西电力,2006(6): 62 - 64.

[3] C. E. R. Bruce and R. H. Golde. The Lightning Discharge [J]. Inst. Elec. Eng - Pt. 2, 1941, 88: 487 - 520.

[4] F. Heilder. Traveling Current Source Model for LEMP Calculation [J]. In Proc. 6th Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat, Zurich, Switzerland, Mar. 1985: 157 - 162.

[5] 张方舟,陈亚洲,魏明,等. 雷电电流的脉冲函数表示 [J]. 电波科学学报,2002(17): 51 - 53.

[6] 张小青. 风电机组防雷与接地 [M]. 北京: 中国电力出版社,2008: 21 - 22.

作者简介:

程 锐(1985),男,硕士研究生,研究方向为风机控制与电力系统继电保护。

(收稿日期:2012-04-18)

[7] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社,2003.

[8] 陈维荣,张倩,王劲草,等. 搜寻者优化算法在最优潮流中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报,2009,21(1): 64 - 67.

[9] 梁军. 粒子群算法在最优化问题中的研究 [J]. 广西师范大学,2008.

[10] 陈佳琰,彭春华. 基于 PSAT 软件的多目标最优潮流计算 [J]. 华东交通大学学报,2007,24(2): 87 - 91.

[11] 王志勇,梁敬成,熊小伏,等. 西电东送输电通道损耗最小最优功率分配方法 [J]. 南方电网技术,2009,3(2): 38 - 41.

[12] 史丹,任震,余涛. 高压直流换流站损耗计算软件的开发和应用 [J]. 电力系统自动化,2006,30(19): 81 - 83.

[13] 中国南方电网电力调度通信中心. 中国南方电网2011年运行方式 [J]. 广州: 中国南方电网电力调度通信中心,2011.

作者简介:

曾雪松(1984),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

张瀚月(1989),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化,新能源;

廖晨泓(1984),男,硕士,助理工程师,主要从事电力调度工作。

(收稿日期:2012-03-20)

不同风力机风速突变对其并网系统影响分析

罗庆, 晁勤, 袁铁江, 罗建春

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要:在风速突变条件下,对异步式、双馈异步式、直驱式风机接入电网时电压和风能利用率进行了研究,通过对动态模拟仿真结果对比分析可知,在风速突变时,其中直驱式和双馈式风机对并网系统电压影响较小,且风能利用率较高,而异步风机对系统电压影响较大。

关键词:风机模型; 突变风速; 风能利用率; 动态仿真; 电网稳定

Abstract: Under the abrupt change of wind velocity, the voltage and the wind power utilization rate when the asynchronous wind turbine, doubly-fed induction wind turbine, direct-driven wind turbine are connected to the power grid are studied. Through the comparison and analysis of dynamic simulation results, it shows that in the abrupt change of wind velocity, the direct-driven and doubly-fed induction wind turbines have less influences on the voltage of grid-connected system, and the wind power utilization rate is higher, while the asynchronous wind turbine has more influence on system voltage.

Key words: wind turbine model; abrupt change of wind velocity; wind energy utilization rate; dynamic simulation; power grid stability

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0008-03

0 引言

目前,越来越多的国家已经把能源作为一个国家的重要战略。其中,中国是世界风电装机容量最大的国家之一,各地区风电场装机容量日渐增大。风速的不可预测性和间断性,导致其有功出力随机变化,严重影响电网安全稳定。对于大规模风电场,当风速突变时,将对并网系统的安全稳定造成较大冲击和影响,威胁其他挂网机组的正常运行,严重时使系统瓦解。

目前,风速突变时对接入电网相关影响的研究不多,文献[1]中主要分析了在风速突变时风电场对电网电压的影响;文献[2]提出了采用小干扰稳定分析的风力发电机组的数学模型,并对风电场和电网之间相互影响进行分析;文献[3]研究实际风电功率波动的时空分布特性及其内在趋势性特征,评估风电波动对电网造成的影响。

单一风机类型在风速突变下对电网的影响的文献较多,但对不同类型风机的对比分析的相关研究较少。针对3种接入电网的风机在风速突变时电压和风能利用率进行了分析,得到了在风速突变情况

下,直驱风电机组对电网影响最小,其风能利用率也是最高的。

1 风速模型与风能转换模型

1.1 风速模型

风速一般分为基本风、阵风、渐变风和随机风。这里采用阵风模型,如图1所示。

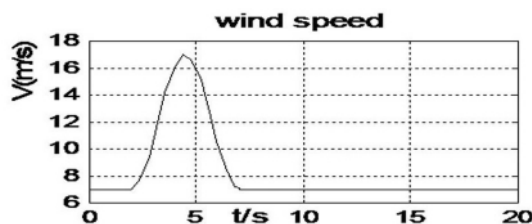


图1 风电场阵风模型图

阵风数学表达式如式(1)所示。

$$V_{WG} = \begin{cases} V_B, & t < t_G \\ V_B + V_{\cos}, & t_G < t < t_{G1} \\ V_B, & t > t_G + t_{G1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, V_B 为基本风速; $V_{\cos}$ 为阵风风速; t_G 为阵风启动时间; t_{G1} 为阵风作用时间。

$$V_{\cos} = \frac{V_{\max}}{2} \left[1 - \cos 2 \left(\frac{t}{t_{G1}} - \frac{t_G}{t_{G1}} \right) \pi \right]$$

基金项目:新疆自然科学基金项目(201211A10,201121A017)

式中, $V_{\max}$ 为阵风最大值。

1.2 风能转换模型

风的动能与风速平方成正比。风力发电是基于风轮在流动的空气中, 获得阻碍流动空气流速的部分动能。风轮从风中吸收的功率可以用式(2)、式(3)表示。

$$P = \frac{1}{2} C_p A \rho V^3 \quad (2)$$

$$A = \pi R^2 \quad (3)$$

式中, P 为风轮输出功率; C_p 为风轮的功率系数; A 为风轮扫描面积; ρ 为空气密度; V 为风速; R 为风轮半径。风轮可获得的最大风效率, 即贝兹极限下 $C_p = 59\%$ [4]。

在风速低于额定风速时, 风力机获得最佳功率与转速的关系式如式(4)。

$$P_{\text{opt}} = kn^3 \quad (4)$$

式中, $k = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{R}{\lambda_{\text{opt}}} \right) C_{p\text{max}}$; n 为转速; P_{opt} 为目标输出功率; A 为式(3)值; $C_{p\text{max}}$ 最佳功率系数; λ_{opt} 为最佳叶尖速比 [4]。

2 不同类型风力发电机结构模型

目前, 国内已运行风电场大部分机组是异步风电机, 其主要特点是结构简单、运行可靠、价格便宜; 双馈式异步发电机应用的是交流励磁变速恒频双馈风力发电技术; 直驱式永磁风力发电机组属于变桨宽带调速同步风力发电机组, 采用永磁同步发电机、无增速齿轮设计。3种风力机组接入电网拓扑结构分别如图2、图3和图4所示。

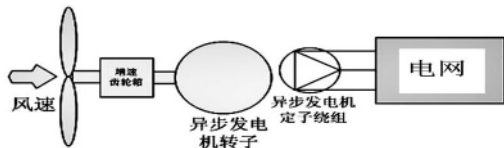


图2 异步风力发电机组接入电网拓扑结构

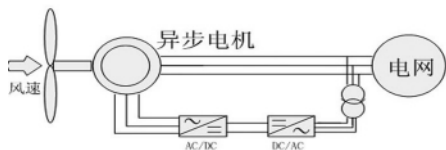


图3 双馈式异步发电机接入电网拓扑结构

3 仿真系统模型与结果分析

3.1 仿真系统结构

基于上述3种风电机组模型分别搭建了同种机型等值风电场接入同一电网的仿真系统, 其系统基本结构如图5所示。

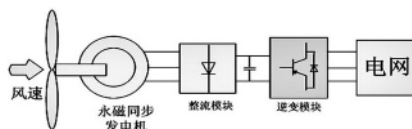


图4 直驱式永磁风力发电机接入电网拓扑结构

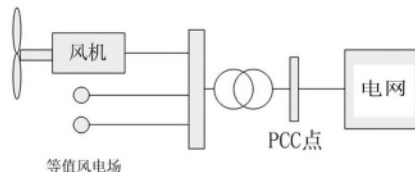


图5 仿真动态系统模型

仿真过程中的风速采用阵风模型, 其基本风为7 m/s, 风速从2 s开始经过2.5 s突增到17 m/s, 再经过2.5 s从17 m/s下降至7 m/s。异步、双馈和直驱等值风电场容量均取10 MW, 分别对3种风电场PCC点的电压、电流、有功和无功波动曲线进行仿真和分析。

3.2 电压仿真结果分析

风速突变时, 3种风电场接入电网的PCC点母线电压的波形, 分别如图6、图7和图8所示。

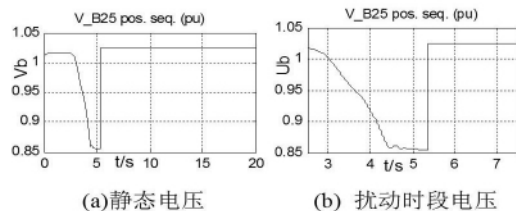


图6 异步风电场PCC母线电压

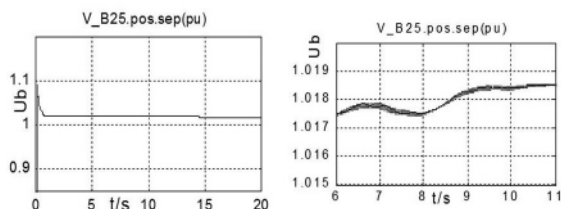


图7 双馈风机风速扰动时段电压

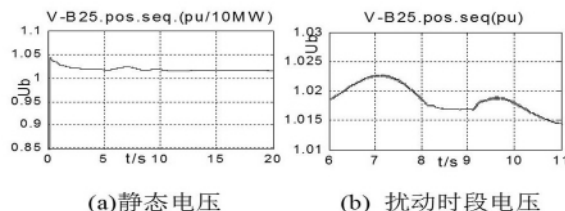


图8 直驱风电场PCC母线电压

对图6、图7和图8分析可知,风力发电机组将风能转化为电能时有时间延迟。在相同突变风速作用下,3种风电场PCC点母线电压波动值如表1所示。

表1 风速突变时段风机电压波动值

类型	异步	双馈	直驱
波动值	$0.14U_N$	$0.001U_N$	$0.0075U_N$

由表1可知,在风速扰动时,异步风电场PCC母线电压跌落较明显,最后跌至风力机低电压保护动作值,将该等值风电场切除。双馈和直驱风电场PCC母线电压波动较平稳,其中双馈风电场PCC母线电压呈上升趋势,电压波动范围为 $0.001U_N$;直驱风电场PCC母线电压呈下降趋势,电压波动范围为 $0.0075U_N$ 。

3.3 电流波动分析

风速突变时,3种风电场接入电网的PCC点母线电流的波形,分别如图9、图10和图11所示。

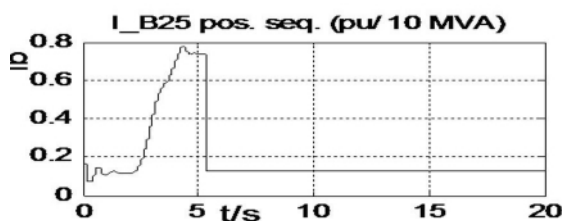


图9 异步风力发电机组电流波动

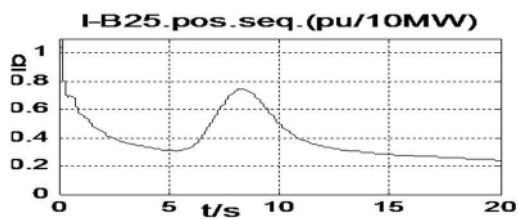


图10 双馈式异步风力发电机组电流图

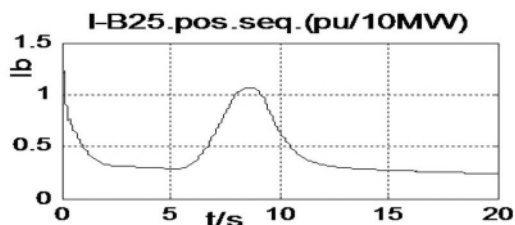


图11 直驱同步风力发电机组电流图

对图9、图10和图11分析可知,等值异步风电场风能转化为电能的时间延迟较短为1s,基本与风速变化一致;等值双馈和直驱风电场延迟时间较长均为4s。电流随着风速增大而增大,但当风速达到额定风速时,电流均没有达到额定值,其中直驱风

电机组电流较大,对风能利用率相对较高。

3.4 有功功率波动分析

风速突变时,3种风电场接入电网的PCC点母线有功功率的波形,分别如图12、图13和图14所示。

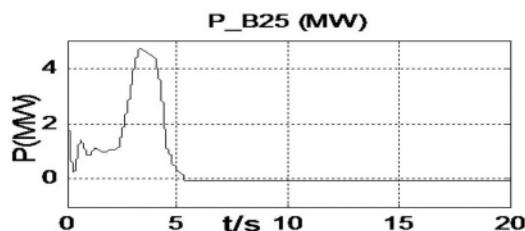


图12 异步风力发电机组有功功率图

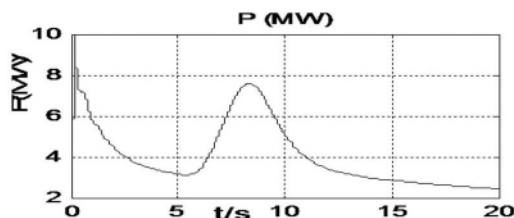


图13 双馈式异步风力发电机组有功功率图

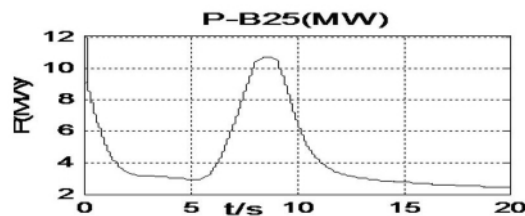


图14 直驱风力发电机组有功功率图

对图12、图13、图14分析可知,不同等值风电场对同一风速突变时,都有随风速变化而变化的趋势,直驱的风力机对风能利用率较高。异步风机随风速增大而有功功率降低,最后在5.35s时刻,继电保护动作将风电场解列。

3.5 无功功率波动分析

风速突变时,3种风电场接入电网的PCC点母线无功功率图形,分别如图15、图16和图17所示。

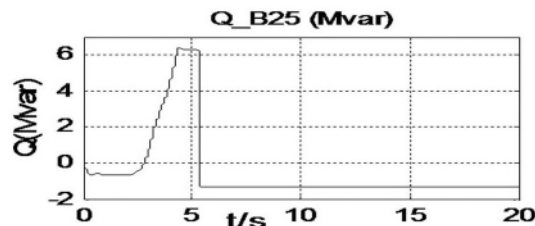


图15 异步风力发电机组无功功率

从图15、图16和图17可以看出在风速突变

(下转第43页)

济性,以及系统后期的可扩展性,是需要进一步深入研究的问题。

3 结 语

故障定位系统直接减少故障定位时间、故障隔离时间,与其他模式比较具有明显的经济性,适合处在配电自动化建设起步阶段的地区使用。故障指示器是故障定位系统的核心部件,目前仍需在故障判

据、取电和通信等技术问题上进一步发展完善。

参考文献

- [1] 秦丝,胡厚欲. 电缆故障指示器的应用经验 [J]. 广东输电与变电技术, 2008, 4(12): 49-52.
- [2] 袁钦成. 配电系统故障处理自动化技术综述 [J]. 电力设备, 2007, 8(12): 1-5.

(收稿日期:2012-02-13)

(上接第10页)

时,异步风力发电机对电网发出无功功率。在风速突变时刻,对应双馈式风机和直驱风机均有向电网吸无功的趋势,且直驱风机较明显。

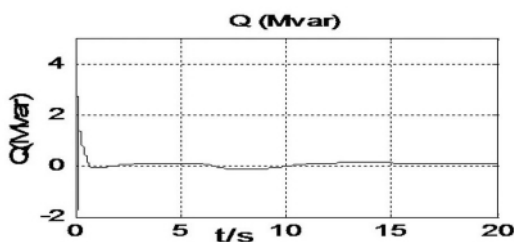


图16 双馈式异步风力发电机组无功功率

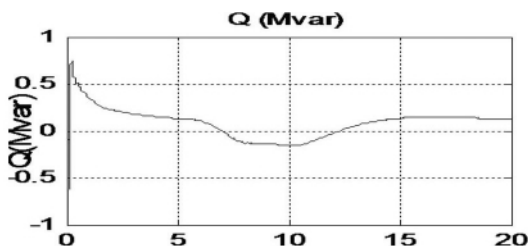


图17 直驱风力发电机组无功功率

从仿真结果图形中,对比可知在引入同一突变风速,对同一接入电网时,电压方面,双馈式风力发电机组和直驱风电机组电压波动较小,对电压影响较小。电流方面,双馈式异步风力发电机组和直驱风力发电机组电流均随风速增大而增加,异步风电机组在保护动作前也是电流随风速增大而增大。相较直驱风电机组对风能利用率较高。

针对的是等值风电场,风电场的容量相对较小,在实际中,风电场的容量将是数十倍、数百倍的容量。当在此类的风电场风速突变时,将形成的效果和影响会更大。

4 结 论

(1) 由文中的动态仿真结果,基于风电场风速年突变率和风电场对接入电网的影响及对自身的安

全,在建设的风电场中,要考虑当风速年突变率较高时,基于电压、电流、有功、无功波动和风能利用率考虑时,应选直驱式风力发电机型,其电压在风速突变时较缓和,对此时的风能利用率较高。

(2) 异步风电机组在风速突变(风速突增)时,电压下降,当风速突变到某一值时,由于电压低于风力机低电压保护整定值,继电器动作,切除该风电场,这将对电网安全造成很大的影响。例如2011年4月甘肃酒泉某风电场由于低电压穿越能力不行,风电场解列,对西北电网造成巨大影响。风电场的异步风力发电机组应注重在风速突变时,风电机组的电压跌落问题。

参考文献

- [1] 范高峰,于德龙,任普春,等. 变动风速作用下风电场对电网电压的影响 [J]. 电网技术, 2006, 30(4): 231-233.
- [2] 汤宏,吴俊玲,周双喜. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 38-41.
- [3] 崔杨,穆钢,刘玉,等. 风电功率波动的时空分布特性 [J]. 电网技术, 2011(2): 110-114.
- [4] 叶杭治. 风力发电系统的设计、运行与维护(第一版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 90-94, 183-187.
- [5] 张志英,赵萍,李银凤,等. 风能与风力发电技术(第二版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 65-73, 290-299.
- [6] 吴学光,张学成,印永华,等. 异步风力发电系统动态稳定分析的数学模型及其应用 [J]. 电网技术, 1998, 22(6): 68-72.

作者简介:

罗庆(1987),男,硕士研究生,研究方向为洁净能源与并网技术;

晁勤(1959),女,教授,博士生导师,主要从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究和教学;

袁铁江(1976),男,讲师,博士研究生,研究方向为风力发电及其并网技术。

(收稿日期:2012-02-22)

考虑网内外功率特性的含风场电网 日内发电需求滚动预测

何洪业¹, 汪颖¹, 肖先勇²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 智能电网四川省重点实验室(四川大学), 四川 成都 610065)

摘 要: 由于自然风力、风向的不确定, 大规模风场并网运行使得电网和风电调度的难度增大, 在最大功率跟踪模式下, 更加准确地预测发电出力是重要课题。考虑风场传统日前负荷预测时间尺度较大导致风场实时调度困难的实际, 提出了一种在基于日内风场出力的发电需求滚动预测方法, 以多级时间尺度为预测依据, 建立了考虑风电接入的理想发电需求预测模型, 提出了该模型下的滚动预测算法, 并结合实际风场数据进行了实际预测, 结果表明, 提出的预测方法、模型和算法能明显提高发电需求预测精度, 为大型风场的科学调度提供了决策依据, 具有一定理论价值和工程应用价值。

关键词: 风电并网; 发电需求; 虚拟天; 滚动预测; 综合模型

Abstract: Large-scale wind power integration makes the grid and wind power dispatching extremely difficult, due to the uncertainty of natural wind and its direction. More accurate power generation prediction is an important issue under the maximum power tracking mode. Considering the day-ahead time scale is somehow long for wind power prediction which makes it difficult for real-time power dispatching, a rolling forecasting method of generation demand based on the intraday output of wind farm is proposed. Firstly, taking multi-level time scale as the forecasting basis, an ideal power generation demand forecasting model is built and the rolling forecasting algorithm using this model is given. Then, based on the actual operation data of wind farms, the computer simulation results show that the proposed method can improve the forecasting accuracy of power generation demand, which provides a decision criterion for the scientific dispatching of large-scale wind farms and may make some contributions to the research and engineering work on wind power dispatching.

Key words: wind power integration; power generation demand; suppositional day; rolling forecasting; comprehensive model

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2012)03-0001-03

大规模风电并网后, 风电出力的随机性和间歇性特性对电网安全运行和电能质量带来了巨大影响, 也给电网有功控制带来了新的挑战^[1,2]。鉴于此, 文献[3]提出了用多时间尺度协调有功调度以提高风电消纳能力的思想, 按时间尺度把控制分解为: 日前计划、滚动计划、实时调度计划和 AGC 等 4 级, 需对各时间尺度进行电网发电需求预测, 其中, 滚动预测对于提高滚动计划准确性, 保证风电和系统的安全稳定运行具有重要意义。

系统调度和实时控制均需对下一时刻总发电需求进行准确预测。现有方法利用传统负荷预测法代替^[4], 由于并网风电的发电功率会抵消部分常规发电机组的负荷需要, 因此, 把风电功率看为“负-负

荷”, 与实际负荷叠加, 定义为“等效负荷”^[4,5], 根据“等效负荷”预测结果制定或调整发电计划。该思想的前提是, 认为风电不可控, 通过控制常规机组消纳风电, 但实际上, 风电场可通过改变桨距角或后停风机等进行有功控制, 具有一定可控性; 其次, 风电具有随机性和间歇性, 当大规模风电接入时, “等效负荷”变化规律变弱, 预测结果的意义可能不明确。从预测样本看, 传统负荷预测样本是变电站采集量, 而在发电与负荷之间, 网损、频率偏差、联络线传输功率偏差等均可能导致采集值与真实值的偏差, 因此, 在发电需求预测时必须考虑这些偏差的影响。

从预测样本出发, 考虑被预测电网与外部电网之间的功率交换、网内功率损耗和频率特性, 提出一种更好地消纳网内风电的电网发电需求预测模型和

基金项目: 四川省科技支撑计划项目, 编号: 2010GZ0256

算法。常规短期预测针对未来1~7天的负荷进行预测,预测样本为前数天数据,而风电场日前预测误差一般为25%~40%^[8],这样大的误差带很大麻烦。风电预测时间越短,误差越小,因此,为了缩短样本的时间尺度,以当前时刻尺度提出虚拟天的概念,采用日内风电发电需求滚动预测法进行预测,提高预测精度。采用的滚动预测周期为30 min(也可设定为其他间隔),并结合国家能源局要求,并网风电场必须在2012年内具备风功率滚动预报能力,每15 min上报一次,每次给出未来15 min至4 h的预报数据,通过对国内某实际电网数据测试表明,该方法能明显提高预测精度,具有较高的工程应用价值。

1 含风场电网发电需求预测模型

不失一般性,含大规模风电的电网连接关系如图1^[9]。

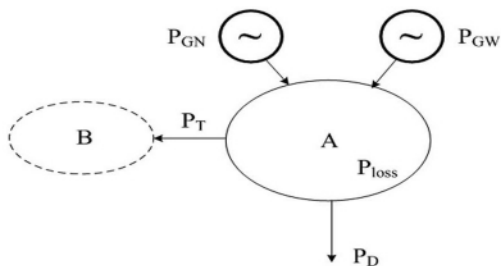


图1 控制区与互联电网

图1中,A为被预测区域;B为外网; P_{GN} 为网内常规机组发电量; P_{GW} 为网内风电发电量; P_{GN} 和 P_{GW} 构成网内总发电量 P_G ; P_D 为网内总负荷; P_{loss} 为网损; P_T 为被预测电网与外网间的联络线功率交换。假设网内所有机组的理想发电出力为 P_G^* ,考虑到负荷的功频响应特性,实际负荷为: $P_D^{Real} = P_D + \Delta f \cdot K_L$,进一步考虑网损与联络线功率交换计划,有如下公式。

$$P_G^* = P_D + \Delta f \cdot K_L + P_{loss} + P_T^S \quad (1)$$

其中, P_T^S 为联络线功率计划值; K_L 为负荷功频特性系数,取正值,单位为MW/0.1 Hz。

传统算法直接以实测数据 P_D 作预测样本,对下一时刻进行预测,没有考虑 $\Delta f \cdot K_L$ 、 P_{loss} 、 P_T^S 的影响。图2显示了一天中某省电网一次调频对负荷的影响。

图2中,功率波动量为

$$\frac{10 \cdot \Delta f \cdot K_L}{P_D} \cdot 100 \quad (1)$$

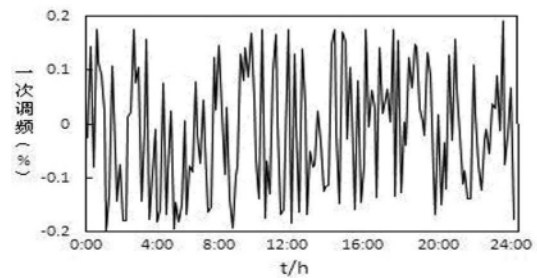


图2 负荷的一次调频功率

在式(1)中, P_{loss} 难以采集,而总发电量 P_G 易于得到。根据网内发电与负荷的关系得

$$P_G = P_D + P_{loss} + P_T \quad (2)$$

式(1)可改写为

$$P_G^* = P_G + \Delta f \cdot K_L + P_T^S - P_T \quad (3)$$

以每日采样96点数据为例,预测未来4 h 16个点,只有预测与 P_G^* 对应的未来 t_{n+j} ($j=1,2,\dots,16$)时刻的发电出力 $P_G^*(t_{n+j})$,并以 $P_G^*(t_{n+j})$ 作为发电预测值,才能为大规模风电消纳提供有利条件。由于 t_{n+j} ($j=1,2,\dots,16$)点的联络线计划 $P_T^S(t_{n+j})$ 可作为已知量,可令

$$P'_G = P_G + \Delta f \cdot K_L - P_T \quad (4)$$

式(3)可改写为

$$P_G^* = P'_G + P_T^S \quad (5)$$

以 $P'_G(t_i)$ ($i=1,2,\dots,n$)作为预测未来 t_{n+j} ($j=1,2,\dots,16$)时刻机组总出力的基础数据,先预测 $P'_G(t_{n+j})$ ($j=1,2,\dots,16$),再与该时刻联络线计划 $P_T^S(t_{n+j})$ 求和得 $P_G^*(t_{n+j})$ 。这样, t_{n+j} ($j=1,2,\dots,16$)时刻理想总发电出力需求预测模型为

$$P_G^*(t_{n+j}) = P'_G(t_{n+j}) + P_T^S(t_{n+j}) \quad (6)$$

由于并网风场会上传未来4 h风功率预测值,其总和记为 $P_{GW}^*(t_{n+j})$ ($j=1,2,\dots,16$),故常规机组的总出力 $P_{GN}^*(t_{n+j})$ 为

$$P_{GN}^*(t_{n+j}) = P_G^*(t_{n+j}) + P_T^S(t_{n+j}) - P_{GW}^*(t_{n+j}) \quad (7)$$

式中, $j=1,2,\dots,16$ 。

2 虚拟天与滚动预测

2.1 虚拟天概念与确定方式

在常规短期预测提前一天或多天完成,为了保证整日曲线的完整性,基准日一般取为预测日的前一天(截止基准日24 h的信息作历史数据),所用历史负

荷数据至少与待预测日相差一天,风电的多时间尺度导致这样的预测精度明显降低。因此,提出采用日内滚动预测的方法,基于新息技术的基本思想,每次滚动预测均采用最新信息,在相同预测方法的条件下,比仅用前一日24 h信息所得结果更准确^[8]。

由于滚动预测每次给出当前时刻后4 h预测值,为了利用最新数据,并能给出未来4 h预测值,因此,提出所谓虚拟天的概念。预测样本基准点不再按实际每天24 h确定,而采用预测时刻前24 h最新信息做预测原始数据。图3给出了这种基准点的选取方式,并和常规的方式进行了比较。

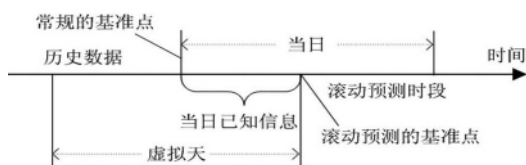


图3 滚动预测基准点选取方式

假定待预测日已知 $k(k \leq T)$ 点负荷数据,可从最后一个已知点开始,向前取 T 个点(T 为日采样点数),作“虚拟天”。以此类推,连续向前取 $n \times T$ 个新息数据作日负荷预测样本,相关数据照此作处理,每次滚动预测更新一次。

2.2 下一虚拟天发电需求预测

由于预测存在多样性和复杂性,受诸多不确定因素影响,单一预测法很难取得满意结果,因此采用多种预测法最优加权预测^[9]。参考历史样本,根据对历史日预测结果的分析,选择 N 种预测方法,这里采用指数平滑算法、线性外推算法、SVR算法等预测算法。各种预测方法分别预测下一虚拟天总发电需求预测,结果为

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{(1,1)} & Y_{(1,2)} & \cdots & Y_{(1,N)} \\ Y_{(2,1)} & Y_{(2,2)} & \cdots & Y_{(2,N)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{(96,1)} & Y_{(96,2)} & \cdots & Y_{(96,N)} \end{bmatrix}_{(96 \times N)} \quad (8)$$

式(8)中,每列对应一种预测方法所得结果,含虚拟日96点发电需求预测值。

2.3 权重优化

组合预测的权重取值对预测效果影响较大,但就预测机理而言,组合预测的权重确定仍然是一个未能很好解决的问题。例如,文献[10,11]认为权重应为正,但却并未给出明确理由,而文献[12]则讨论了权重取负值的问题。这里采用文献[12]所述方式来求取权重 $W_{(N \times 1)}$,具体方法见文献[12]。

2.4 预测结果的确定

求出权重 W 后,求虚拟天最终预测结果。

$$Y_{(96 \times 1)}^* = Y_{(96 \times N)} \times W_{(N \times 1)} \quad (9)$$

滚动预测每次只需给出当前时刻后4 h预测值,故从 $Y_{(96 \times 1)}^*$ 中取出相应的数据即可。如需得到常规机组出力预测值,只需将以上预测值减去风功率预报值即可。

3 实例分析

采用国内某省级电网的实际运行数据来验证所提的方法。所选数据为2010年6月到2011年5月一年的运行数据,预测都是针对总的发电需求。

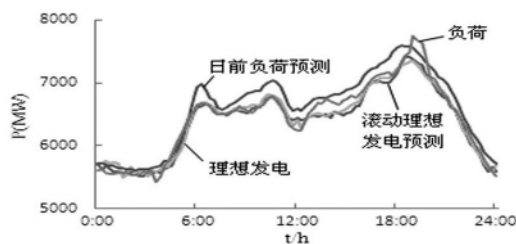


图4 滚动理想发电需求预测结果

图4给出的是2011年4月3日的预测结果对比。相对实际的理想发电曲线,滚动发电需求预测结果的误差,明显比日前负荷预测值要小。对该日的统计数据表明,日前负荷预测准确度为96.5%,滚动发电需求预测为99.1%,预测准确度提高了2.6%。

对该网2010年9月到2011年5月分别进行模拟日前负荷预测和滚动发电需求预测,每月平均准确率对比如表1。

表1 月平均预测精度对比

月份	日前/%	滚动/%	月份	日前/%	滚动/%
09/2010	95.3	98.3	02/2011	96.5	98.9
10/2010	96.1	98.5	03/2011	94.2	98.4
11/2010	96.6	99.2	04/2011	95.8	99.2
12/2010	95.1	98.6	05/2011	96.5	99.1
01/2011	94.7	98.4			

由表1可见,滚动发电需求预测的平均误差为1.3%,远高于日前负荷预测的平均误差4.4%,可见,该方法能较好地修正日前计划偏差,为大型风场接入创造了条件。

4 结 论

(下转第54页)

仿真结果表明,在高阻接地故障和渐变性高阻接地故障时,差流配合零序电压突变判据均能很好地启动,差动保护正确地出口跳闸动作。在重负荷情况的TA断线,装置能正确地判出TA断线,保护不会误动。

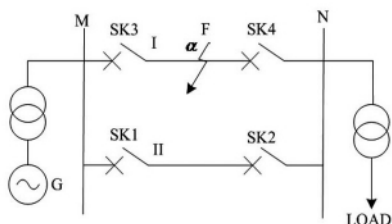


图2 无互感双回线路模型

4 结 语

综合分析线路高阻故障特征,并对比线路TA

断线的差异,提出了一种新的TV断线判别依据。该判据能正确地区分TA断线和高阻接地,提高了差动保护的可靠性。同时,该判据对同时发生TA断线和PT断线也能保证很高的可靠性。RTDS仿真试验证明该判据的正确性。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第3版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 文明浩. 线路纵差保护CT二次断线判据分析[J]. 继电器, 2006, 34(18): 1-3.

作者简介:

周伟(1974),男,工程师,从事电力系统生产管理;

刘宏君(1974),男,高级工程师,从事电力系统继电保护和数字化变电站的研究。

(收稿日期:2012-03-20)

(上接第13页)

为了消纳大规模风电,提出了一种考虑风电接入的发电需求滚动预测方法。建立并考虑了网损、网内调频及与网外功率交换等影响的发电需求预测模型,提出虚拟天的概念和样本选取方式,并将所提方法与现有预测方法进行了比较。结果表明,所提方法的预测精度高,结果更符合实际,能更好地为风电消纳提供机会。所采用的预测方法实际在日内进行,可更好地利用最新负荷、气象等信息,与传统日前预测相比,利用的信息多,预测精度也更高。

通过实际电网运行数据进行测试表明,所提方法能明显地提高大规模风电接入后的发电需求预测精度,该方法已经得到了工程应用,获得良好的效果。

参考文献

- [1] 孙元章,吴俊,李国杰. 风力发电对电力系统的影响. 电网技术, 2007, 31(20): 55-62.
- [2] 高宗和,滕贤亮,张小白. 适应大规模风电接入的互联电网有功调度与控制方案[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 37-41.
- [3] 张伯明,吴文传,孙宏斌,等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 1-6.
- [4] Negnevitsky and Cameron W. Potter. Innovative Short-term Wind Generation Prediction Techniques[C]. Power Systems Conference and Exposition, 2006: 60-65.

- [5] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
- [6] ACKERMANN T. Wind Power in Power System[M]. London, UK: John Wiley & Sons, 2005.
- [7] 李予州,吴文传,张伯明,等. 多时间尺度协调的区域控制偏差超前控制方法[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 15-19.
- [8] 康重庆,夏清,等. 电力系统负荷预测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [9] 康重庆,夏清,沈瑜,等. 电力系统负荷预测的综合模型[J]. 清华大学学报, 1999, 39(1): 8-11.
- [10] 程旭,康重庆,夏清,等. 短期负荷预测的综合模型[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 42-44.
- [11] Chongqing Kang, Xu Cheng, Qing Xia, et al. Novel Approach Considering Load-relative Factors in Short-term Load Forecasting[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 70(2): 99-107.
- [12] 莫维仁,张伯明,孙宏斌,等. 短期负荷综合预测模型的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 30-34.

作者简介:

何洪业(1987),男,硕士研究生,研究方向为电能质量与智能电网;

汪颖(1981),女,博士研究生,讲师,研究方向为电能质量与智能电网;

肖先勇(1968),男,博士,教授,长期从事电能质量与智能电网的教学和研究。

(收稿日期:2012-03-20)

电压暂降扰动源电压空间矢量辨识法

李 滨¹, 汪 颖¹, 肖先勇²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 智能电网四川省重点实验室(四川大学), 四川 成都 610065)

摘要:分析了不同暂降扰动源产生的电压暂降的幅值、相位和谐波特征,提出一种基于电压空间矢量的电压暂降扰动源辨识方法。该方法先对三相电压信号进行 $\alpha\beta$ 变换构造出电压空间矢量和零序分量,利用离散傅里叶变换(DFT)将电压空间矢量分解成正、负序两个旋转分量,构造出幅值、相位和谐波特征量,将三者相结合可对造成电压暂降的扰动源进行辨识。时变电压空间矢量在复平面轨迹的三维可视化的描述可以对电压暂降全过程进行全面表征。利用 Matlab/Simulink 建立简单配电网的仿真模型,结果验证了所提出方法的有效性和正确性。

关键词:电压空间矢量; 电压暂降扰动源; DFT; 特征量; 可视化描述; 扰动源辨识

Abstract: On the basis of analyzing the features of various voltage sags due to short-circuit faults, transformer energizing and induction motor starting in power system, a new method to identify voltage sag sources based on voltage space vector (VSV) is proposed. In the proposed method, $\alpha\beta$ transform is applied to three-phase voltage to get the voltage space vector and zero-sequence components at first. Then, the discrete Fourier transform (DFT) is applied to the VSV to get characteristics of amplitude, phase and the harmonic, which can be used to identify voltage sag sources. The 3d visualization of the time-varying VSV in complex plane could clarify the global voltage sag evolution along the time. The results of simulation using Matlab/Simulink show this method is simple and accurate.

Key words: voltage space vector (VSV); voltage sag sources; discrete Fourier transform (DFT); characteristic quantities; 3d visualization; sources identification

中图分类号: TM835 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0014-06

0 引言

随着现代电力电子设备、冲击性与非线性负荷的不断增长,电压暂降等短时扰动越来越多地被关注。电压暂降(voltage sag)被认为是最严重的电能质量问题^[1]。输配电线路故障、变压器激磁和大型电动机或大负荷接入都可能引起电压暂降^[2]。因此,对电压暂降及其扰动源的研究和识别等成为了研究的热点和难点^[3-5]。

在暂降扰动源辨识研究中,文献[6]提出了根据幅度、持续时间、三相平衡度、谐波等辨识故障、电机启动和变压器激磁引起电压暂降辨识方法。文献[7]提出了基于特征幅值的三相不平衡电压暂降特征刻画方法。文献[8]提出了基于对称分量法的故障类电压暂降分析方法。文献[9]提出了基于统计方法的故障类电压暂降在线分类方法。文

献[3]在忽略系统谐波影响和暂降相位跳变压器的前提下,提出了基于双 dq 变换法的故障类电压暂降分类方法。文献[4]提出基于小波变换提取暂降波形奇异性特征的暂降扰动源辨识法。文献[5]提出了一种仅进行电压有效值计算的电压暂降分类方法。文献[6]和[7]分别通过卡尔曼滤波技术和S变换提取特征信息,并结合专家系统对电压暂降进行分类判别。文献[8]提出了一种基于小波熵和概率神经网络的配电网电压暂降扰动源识别方法。文献[9]对基于Mamdani型模糊推理的电压暂降扰动源识别进行了研究。然而这些方法比较复杂,运算量大,在工程应用中实现较为困难。

上述方法将三相电压看作为3个变量难以满足暂降源辨识要求,于是提出一种基于电压空间矢量^[10]的电压暂降扰动源辨识方法。将三相电压变换成一维时变复变量,利用DFT构造出幅值、谐波和相角特征量,实现电压暂降特征刻画和暂降源辨识,利用三维可视化方法描述暂降的全局特征,并减

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2010GZ0256)

少了分析变量数,用 Matlab/Simulink 对配电网模型的仿真验证了所提方法的正确性和有效性。

1 电压空间矢量

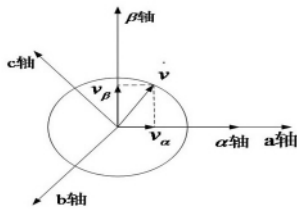


图1 Clark 变换

如图1,Clark 变换^[2]将三相瞬时变量变换到二维静止正交 $\alpha\beta$ 坐标系为

$$\begin{bmatrix} x_\alpha(t) \\ x_\beta(t) \\ x_0(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

矢量形式为

$$\vec{x}(t) = x_\alpha(t) + jx_\beta(t) = \frac{2}{3} [1 \quad e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad e^{j\frac{4\pi}{3}}] \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$x_0(t) = \frac{1}{3} (v_a(t) + v_b(t) + v_c(t)) \quad (3)$$

其中, $\vec{x}(t)$ 为电压空间矢量; $x_0(t)$ 为零序分量,系数 $2/3$ 使得两个变换坐标系的幅值保持不变。假设在故障前中后三相电压基波和各次谐波为正弦量。经欧拉变化,电压空间矢量分解为两个正交旋转分量为

$$\begin{aligned} \vec{x} &= \sum_{h=0}^{\infty} x_p^{-(h)} + \sum_{h=1}^{\infty} x_n^{-(h)} \\ &= \sum_{h=0}^{\infty} x_p^{(h)} e^{jh\omega t} + \sum_{h=1}^{\infty} x_n^{(h)*} e^{-jh\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $x_p^{(h)} = |x_p^{(h)}| e^{j\phi_p^{(h)}}$, $x_n^{(h)*} = |x_n^{(h)*}| e^{j\phi_n^{(h)}}$, * 表示共轭,进一步表示为

$$x_p^{(h)} = \frac{1}{3} [v_a^{(h)} e^{j\phi_p^{(h)}} + v_b^{(h)} e^{j[\phi_b^{(h)} - \frac{2\pi}{3}]} + v_c^{(h)} e^{j[\phi_c^{(h)} + \frac{2\pi}{3}]}] \quad (5)$$

$$x_n^{(h)*} = \frac{1}{3} [v_a^{(h)} e^{-j\phi_p^{(h)}} + v_b^{(h)} e^{-j[\phi_b^{(h)} - \frac{2\pi}{3}]} + v_c^{(h)} e^{-j[\phi_c^{(h)} + \frac{2\pi}{3}]}] \quad (6)$$

详细分析见下文。

2 电压暂降空间矢量特征分析

如式(4),电压空间矢量在复平面的轨迹由正交的两个旋转分量的幅值和初始角决定。正常情况下,三相平衡系统的电压空间矢量仅有正序旋转分量,在复平面的轨迹为半径的标准电压的圆。

若发生不平衡电压暂降,由于正负序旋转分量幅值不等,复平面轨迹为椭圆。如图2,其主轴、副轴以及倾斜角的定义如下。

$$\begin{aligned} r_{maj} &= |x_p| + |x_n|, r_{min} = ||x_p| - |x_n||, \\ \Phi_{inc} &= \frac{1}{2} (\Phi_p + \Phi_n) \end{aligned} \quad (7)$$

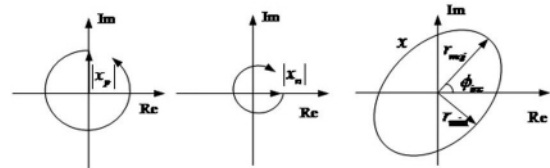


图2 电压空间矢量复平面轨迹形状

发生三相平衡暂降时,负序分量幅值为零, $r_{min} = r_{maj}$,电压空间矢量在复平面的轨迹为半径小于标准电压的圆。正负序分量的幅值相同时, $r_{min} = 0$,对应轨迹为一横线。为了简单描述电压空间矢量轨迹,引入形状因子 SI (shape index) 得

$$SI = \frac{r_{min}}{r_{maj}} \frac{||x_p| - |x_n||}{|x_p| + |x_n|} = \begin{cases} 1: \text{圆} \\ 0 < SI < 1: \text{椭圆} \\ 0: \text{直线} \end{cases} \quad (8)$$

2.1 短路引起的电压暂降

短路引起的电压暂降在开始和结束时刻均有幅值突变,且通常伴有较大相位跳变。对于单相或者两相故障,非故障相会出现一定的幅值降低。此外,故障类型变化或保护动作导致的系统结构改变可能引起多级暂降。由故障引起的电压暂降较深,幅值一般低于 0.7 p.u. 。图3为两相故障引起的电压暂降电压空间矢量 r_{min} 与 SI 变化的仿真结果。

如图4,文献^[1]将故障引起的暂降分为7类。其中,A、B、C和E为基本暂降类型,分别由三相短路、单相短路、相间短路和两相接地故障引起;类型D由类型B或类型C经过变压器传递引起;类型F和类型G由类型E经过变压器引起。 d 表示暂降深度,根据暂降较严重的相,将其分为单相暂降

(BDF)、两相暂降(CEG)和三相暂降(A)。

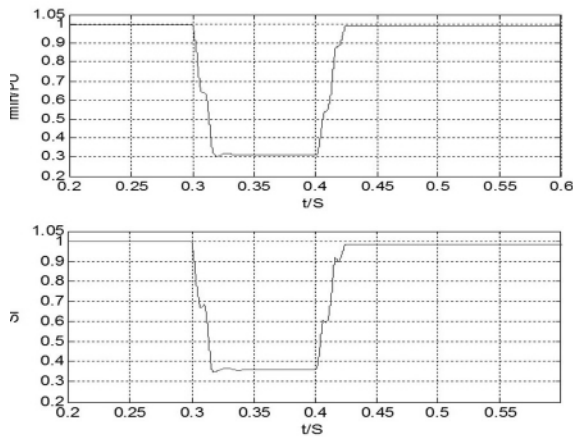


图3 两相故障引起暂降 VSV 的 $r_{\min}$ 与 SI 变化图

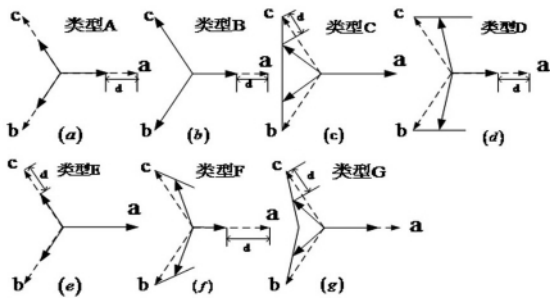


图4 7类不平衡暂降

不同故障类型引起的暂降,其 VSV 特征量不同。以 L_1 相发生故障的 B 类型暂降为得

$$\begin{cases} v_a(t) = (1-d)V\cos(\omega t + \Phi) \\ v_b(t) = V\cos(\omega t + \Phi - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c(t) = V\cos(\omega t + \Phi + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)进行欧拉变换,由式(2)和(3)可得

$$\begin{cases} \vec{x}(t) = (1 - \frac{d}{3})Ve^{j(\omega t + \Phi)} + \frac{d}{3}Ve^{j\pi}e^{-j(\omega t + \Phi)} \\ x_0(t) = -\frac{d}{3}V\cos(\omega t + \Phi) \end{cases} \quad (10)$$

由式(7)可得

$$r_{\max} = V, r_{\min} = (1 - 2/3d)V, \Phi_{\text{inc}} = \pi/2$$

其电压空间矢量在复平面的轨迹如图 5(a)。当 L_2 相和 L_3 相发生电压暂降时,轨迹如图 5(b) 和 5(c),椭圆主轴和副轴大小相同,仅倾斜角 Φ_{inc} 不同。

用电压空间矢量表示的由故障引起的各种暂降类型的参数见表 1。表中的 d 与图 4 相同; n 为相别:单相故障时 n 为故障相,两相故障时 n 为非故障相,且相别 L_1 、 L_2 、 L_3 对应于 1、2、3。

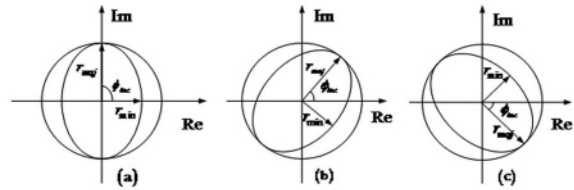


图5 B 类型电压暂降复平面轨迹

2.2 变压器激磁引起的电压暂降

由于变压器投入时三相电压初相角始终相差 120° 和正负半周不对称,故变压器激磁在引起暂降的同时会形成较大谐波分量,且三相幅值始终不平衡,暂降特征与开关合闸时刻、铁心剩磁和网络阻尼有关,暂降幅值一般不低于 0.85 p. u.。文献 [7] 的试验表明,变压器激磁引起的暂降波形中含大量 2、3、4 次谐波。

因谐波的影响,变压器激磁引起的暂降电压空间矢量 $r_{\min}$ 与 SI 变化的仿真结果如图 6。

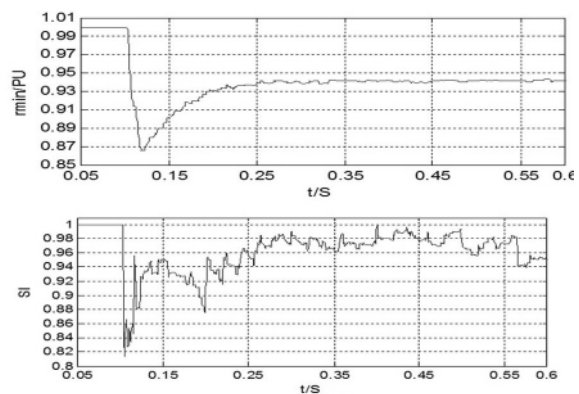


图6 变压器激磁引起暂降 VSV 的 $r_{\min}$ 与 SI 变化图

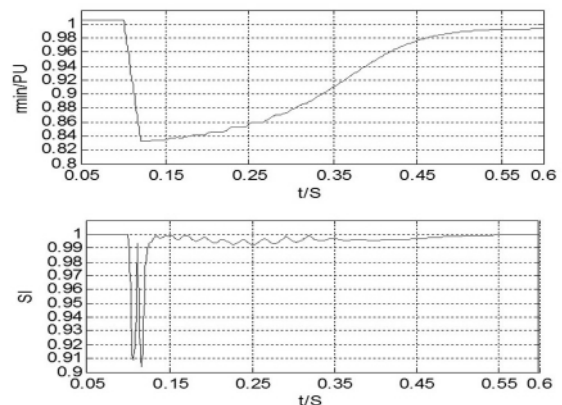


图7 感应电动机启动引起暂降 VSV 的 $r_{\min}$ 与 SI 变化图

2.3 感应电动机启动引起的电压暂降

感应电动机的启动电流大约为正常工作电流的 5~10 倍,是引起暂降的根本原因,但并不是暂降严重程度的决定性因素,暂降程度还与电动机容量、上级变压器容量、启动方式及负荷等有关,暂降幅值一

表 1 不同故障引起电压暂降的空间矢量特征

类 型		电压空间矢量				零序分量
		SI	φ_{inc}	r_{min}	r_{maj}	x_0
非平衡故障	单相故障	B $1 - \frac{2}{3}d$	$\frac{5}{6}\pi - n\frac{\pi}{3}$	$(1 - \frac{4}{3}d)V$	V	$-\frac{d}{3}V\cos[\omega t + -(n-1)\frac{2\pi}{3}]$
		D $1 - d$	$\frac{5}{6}\pi - n\frac{\pi}{3}$	$(1 - d)V$	V	0
		F $\frac{3(1-d)}{3-d}$	$\frac{5}{6}\pi - n\frac{\pi}{3}$	$(1 - d)V$	$(1 - \frac{1}{3}d)V$	0
	两相故障	C $1 - \frac{4}{3}d$	$(1 - n)\frac{\pi}{3}$	$(1 - \frac{4}{3}d)V$	V	0
		E $\frac{3(1-d)}{3-d}$	$(1 - n)\frac{\pi}{3}$	$(1 - d)V$	$(1 - \frac{1}{3}d)V$	$\frac{d}{3}V\cos[\omega t - (n-1)\frac{2\pi}{3}]$
		G $\frac{5-6d}{5-2d}$	$(1 - n)\frac{\pi}{3}$	$(1 - \frac{6}{5}d)V$	$(1 - \frac{2}{5}d)V$	0
平衡故障	三相故障	A 1	-	$(1 - d)V$	$(1 - d)V$	0

般不低于 0.8 p. u.。由于电动机通常为平衡负荷，引起的电压暂降三相基本平衡。电压随启动电流的恢复而恢复，因此只具有一次幅值突变。

角 φ_{inc} 可确定暂降相别。S (single) 表示单相，D (double) 表示两相。

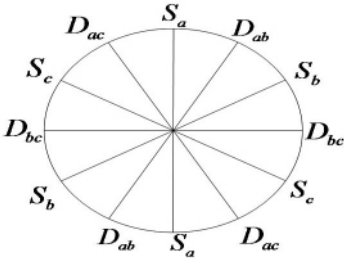


图 8 倾斜角 φ_{inc} 对应的不平衡故障

3 仿真验证

3.1 暂降扰动源辨识模型

基于电压空间矢量的暂降扰动源辨识步骤如下。

- (1) 获得原始数据，包括三相电压瞬时值、系统频率等。
- (2) 利用式 (1) 对数据进行空间向量变换，得到电压空间矢量 $\vec{x}(t)$ 和零序分量 $x_0(t)$ 。
- (3) 根据式 (7) 得到相应参数 r_{maj} 、 r_{min} 和 φ_{inc} 。
- (4) 设定阈值 $r_{min} = 0.9$ ，利用基波参数对小于阈值的电压暂降用分割算法 [2] 进一步进行分析，确定副轴幅值突变点个数。
- (5) 副轴幅值突变点只有一个的为电动机启动或变压器激磁引起的电压暂降。否则，为故障引起的电压暂降，转入步骤 (7)。
- (6) 形状因子 SI 没有明显变化的为电动机启动引起的暂降。否则，为感应电动机启动引起的电压暂降。
- (7) 进一步对由故障引起的电压暂降进行分类、描述。由 SI 判断是否为平衡暂降，再根据倾斜角判断暂降相别，若角度相同，根据主轴和零序电压判断暂降类型。如图 8，对于不平衡暂降，根据倾斜

3.2 仿真模型及结果

利用文献 [4] 的配电网模型，在 Matlab/Simulink 下建立仿真系统，如图 9。电压等级为 110/10.5/0.38 kV。负荷均为恒功率模型，无功为感性无功，功率因数为 0.9。变压器 T1、T2 采用 Y_n/Y 型接线，T3、T4 采用 Y/Y 型接线方式，T2 考虑了变压器的铁心饱和特性。线路上 F 表示故障点；K1、K2 表示三相开关；负荷端的 M 表示感应电动机 (PN = 15 kW 转，转速为 1 460 r/min)，电压波形数据采至低压侧 (0.4 kV) 的 M1 测量点。

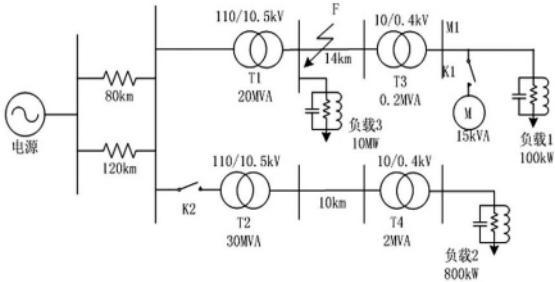


图 9 电压暂降仿真系统

改变系统参数仿真3类电压暂降,对于短路故障,改变故障位置、线路负荷、故障起始时刻及过渡电阻的大小;对于感应电动机启动,改变启动时刻、线路负荷及上级变压器容量;对于变压器T2投运,改变投运时刻、线路负荷及变压器容量,分别获取了3类电压暂降共400个样本数据。从表3的仿真结果可见,暂降源辨识准确率高。

表3 仿真结果

暂降扰动源	仿真数量	识别数量	辨识准确率/%
三相短路	100	100	100
不对称短路	100	96	96
变压器激磁	100	98	98
感应电动机启动	100	100	100

3.3 三维可视化描述

为了更好地刻画暂降过程,将电压空间矢量在复平面随时间变化的轨迹线用三维表示。如图10(a),开始为三相不平衡暂降,随着电压变化逐渐演变为平衡暂降。如图10(b),三个幅值变化点将空间矢量副轴分为4个阶段,由此可见,造成的是多级暂降。

进一步由DFT可得,暂降第一阶段, $SI = 0.78$,可判断为非平衡暂降,正负旋转分量分别为 $x_p = 0.89e^{-j2^\circ}$ 和 $x_n = 0.11e^{j178^\circ}$, $\varphi_{inc} = 88^\circ$,对照图8可知发生暂降的相别为 L_1 , $x_0(t) = 0$,主轴副轴分别为 $r_{maj} = 1$ p. u. 和 $r_{min} = 0.78$ p. u.,综上可判断暂降类型为B,暂降幅值为0.33 p. u.。暂降第二阶段, $SI = 1$ 可判断为三相平衡暂降, $r_{maj} = r_{min} = 0.5$ p. u.,暂降类型为A,暂降幅值为0.5 p. u.。

如图10(d)、10(e),可直观地识别暂降变化规律和暂降严重程度。极坐标图中倾斜角接近 90° 的椭圆和半径为0.5 p. u.的圆,验证了分析方法的正确性。

4 结论

(1) 通过对短路故障、变压器激磁和感应电动机的启动引起的电压暂降的分析,结果表明,电压暂降波形与特定扰动源相关,可根据不同特征对扰动源进行有效辨识。

(2) 电压空间矢量将三相电压用一维时变向量表示,可简化分析过程。为进一步实现电压暂降源

自动识别提供了很好的依据。

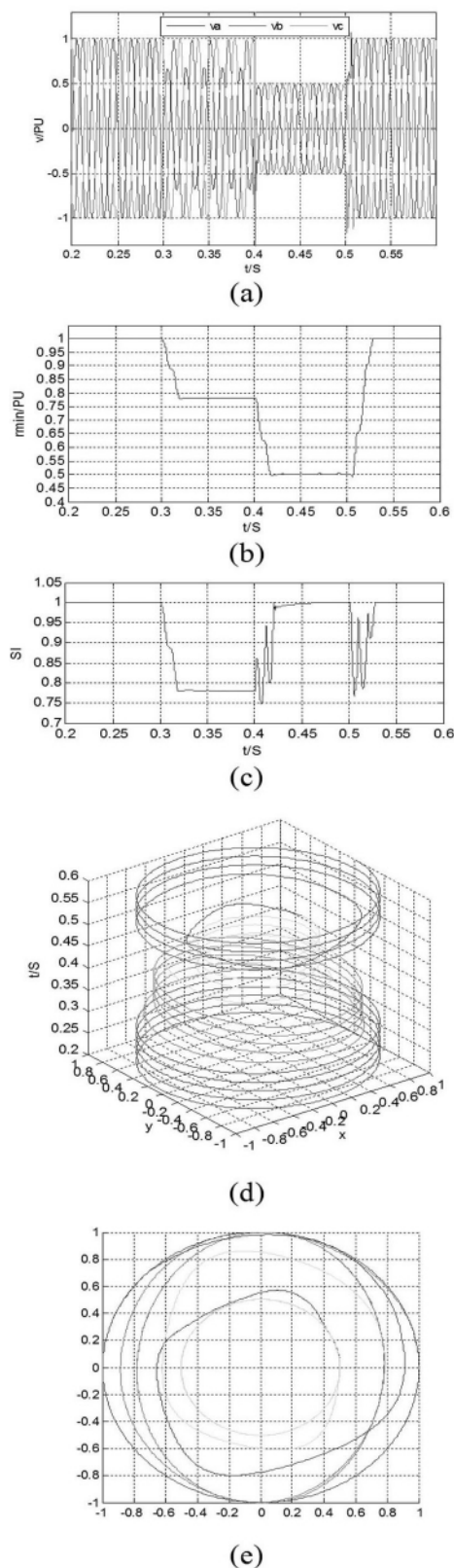


图10 电压暂降的可视化描述

(a) 所测多级电压暂降波形; (b) 椭圆轨迹副轴变化情况; (c) 形状因子; (d) 柱状图描述; (e) 极坐标图描述

(3) 对电压空间矢量进行 DFT 特征提取,需变量少、计算量小,易于工程实现。扰动特征的三维可视化描述,可对暂降特征进行全局表征。

(4) 利用 Matlab/Simulink 对配电网模型进行的仿真结果证明,方法具有准确性、有效性、适用性的特点。

参考文献

- [1] Bollen Math H J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, [M]. Series on Power Engineering, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- [2] Bollen Math H J. Voltage Recovery After Unbalanced and Balanced Voltage Dips in Three-phase Systems [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1376 - 1381.
- [3] 陈伟,郝晓弘,林洁. 电压跌落扰动源的小波-神经网络识别方法 [J]. 甘肃科学学报, 2007, 19(4): 105 - 107.
- [4] 王宾,潘贞存,徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(2): 56 - 59.
- [5] 张庆超,肖玉龙. 一种改进的电压暂降检测方法 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 123 - 126.
- [6] 王宾,潘贞存,徐文远. 配电网电压跌落幅值估算分析 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 29 - 34.
- [7] 赵慧元,张志丰,赵彩宏. 一种新的电压暂降检测及其补偿控制策略研究 [J]. 电气应用, 2007, 26(6): 95 - 98.
- [8] 肖湘宁,徐永海,刘连光. 考虑相位跳变的电压暂降动态补偿控制器的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 64 - 69.
- [9] Emmanouil S, Bollen Math H J, Gu Irene Y H. Classification of Power System Events: Voltage Dips [C]. IEEE ICHQP IX, Orlando, USA, IEEE/PES, 2000: 745 - 750.
- [10] Zhang Lidong, Bollen Math H J. Characteristic of Voltage Dips (sags) in Power System [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(2): 827 - 832.
- [11] Bollen Math H J, Zhang Lidong. Different Methods for Classification of Three-phase Unbalanced Voltage Dips due to Faults [J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66(1): 59 - 69.
- [12] Gu Irene Y H, Nicholas E, Emmanouil S, et al. A Statistical-based Sequential Method for Fast Online Detection of Fault-induced Voltage Dips [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(2): 497 - 504.
- [13] 杜雄,周维维,许可夫. 基于双dq变换的引起电压暂降的短路故障分类 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 86 - 90.
- [14] 王克星,宋政湘,陈德桂,等. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源识别 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 29 - 34.
- [15] 丁宁,蔡维,徐永海,等. 电压暂降源识别方法研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 55 - 59.
- [16] Emmanouil S, Bollen M H J, Gu Irene Y H. Expert System for Classification and Analysis of Power System Events [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(2): 423 - 428.
- [17] 杨洪耕,刘守亮,肖先勇,等. 基于S变换的电压暂降分类专家系统 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 98 - 104.
- [18] 贾勇,何正友,赵静. 基于小波熵和概率神经网络的配电网电压暂降源识别方法 [J]. 电网技术, 2009, 33(16): 63 - 69.
- [19] 李国栋,丁宁,徐永海. 基于Mamdani型模糊推理的电压暂降源识别 [J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(2): 43 - 48.
- [20] Schauder, C. Mehta, H. Vector Analysis and Control of Advanced Static var Compensators [J]. IEEE Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(4): 299 - 306.
- [21] D. Novotny and T. Lipo, Vector Control and Dynamics of AC Drives [M]. London, U. K. Oxford Univ. Press, 1996.
- [22] Emmanouil S. Automating Power Quality Analysis [D]. Sweden: Chalmers University of Technology Goteborg, 2002.

作者简介:

李 滨(1987),男,硕士研究生,研究方向为电能质量与智能电网;

汪 颖(1981),女,博士研究生,研究方向为电能质量与智能电网;

肖先勇(1968),男,博士,教授,长期从事电能质量与智能电网的教学和研究。

(收稿日期:2012-03-20)

关于电网黑启动中厂网配合机制的研究

王莉丽¹, 韩伟²

(1. 四川省电力公司调度中心, 四川 成都 610041; 2. 四川省电力工业调整试验所 四川 成都 610000)

摘要: 电网全黑是电力系统最严重的事故形态, 针对电网黑启动中会遇到的问题, 探讨各变电站黑启动过程中厂网间如何协调配合, 并明确了各变电站的操作目标及各级调度机构的主要职责, 对调度机构处理电网全黑事故具有一定的借鉴意义。

关键词: 电网全黑; 黑启动; 调度; 协调

Abstract: Black out of power grid is the most serious accident in power system. The difficulties that will be met in black start are described and the coordination between the plants and the power grid are studied. The operation targets for each substation and the main task for the different levels of the dispatching centers are defined, which provides a significant reference for the dispatching centers to deal with the black-out accidents.

Key words: black out of power grid; black start; dispatching; coordination

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2012)03-0020-03

0 引言

电力系统是现代社会中最重要、最庞杂的工程系统之一, 由于自然灾害和单一事故引发的大停电事故在全世界范围内仍时有发生。

2004年美国8.14大停电源于1台68 MW的燃气轮机停运, 事故造成美国东北部和加拿大安大略省停电, 影响人口5 000万, 经济损失达60亿美元。调度员未经过黑启动训练, 操作不熟练, 从外部电源恢复供电的速度缓慢, 导致枢纽变电站站用直流电源耗尽, 不能继续操作, 48 h后才逐步恢复。加拿大安大略地区则等了14 d才恢复。2008年四川的“5.12”汶川大地震使得四川电网负荷损失约4 000 MWh, 1座500 kV站及12座220 kV站停运, 位于震中天龙湖电厂、自一里电厂、紫坪铺电厂按事先准备好的黑启动方案在数小时内成功启动机组自带厂用电及向附近重要负荷供电, 不仅避免了水库漫坝的恶性事故, 而且有力支援了抗震救灾工作, 具有重大社会及经济意义。

目前三华(指华东、华中、华北电网)同步运行的交直流电网已经初步形成, 但自然灾害、人为误操作、保护误动造成潮流大范围转移从而引发大停电的风险仍然存在, 电网黑启动操作的可能性在局部电网及区域电网内都还存在。研究在黑启动操作中

如何克服电网由小变大过程中遇到的各种问题、厂网间如何协调配合以及调度机构间如何协调配合, 对于构建大电网的安全防御体系至关重要, 也对于处理一般电网事故具有启发作用。

1 黑启动过程中遇到的问题

黑启动是指整个电力系统因故障停运后, 不依赖别的网络的帮助, 通过系统中具有自启动能力机组的启动, 带动无自启动能力的机组, 逐步扩大电力系统的恢复范围, 最终实现整个电力系统的恢复和向用户供电, 期间将会面临电压、频率、振荡等一系列问题。

1.1 电压问题

电压问题是首要问题。在由小容量的发电机对长线路零起升压过程中, 同步发电机定子回路中联接有电容时(如与空载线路相连)就有可能因电枢反应的助磁作用而发生定子电流、电压幅值自发增大, 产生自激磁现象。电网恢复初期输电线路轻载运行, 由充电电流引起持续的工频过电压问题; 在系统中断路器操作如合空长线及合空载变压器时产生的操作过电压问题; 在某些特殊方式下电压互感器等非线性元件和系统中的电容元件组成许多复杂的振荡回路, 可能发生谐振过电压。

系统恢复过程中应及时投入电抗器、退出电容

器、调整主变压器分接头、发挥接入电厂的进相能力及对电压的快速调整能力,对线路充电尽量采用带有合闸电阻的开关进行充电,同时安排一定容量的低功率因数的负荷也是保证电压合格的必要条件。

1.2 频率问题

频率问题是另一个主要问题。频率与系统出力及负荷有关,控制频率涉及负荷恢复速度、机组调速器响应速度。

首先应保证小网的备用充足,以应付负荷波动,并入小电网的机组的旋转备用容量应大于发电负荷的30%;另一方面控制负荷恢复的节奏,负荷恢复不宜使频率较前次下降大于0.5 Hz,且小系统的运行频率不低于49.5 Hz。每轮负荷恢复后,待频率及电压恢复到正常运行水平时,再开始下一轮的恢复;最后应注意当发电厂与小网并列后,应尽可能将并网电厂的机组均开出,尤其是转动惯量较大的发电厂的机组,提高整个小网的转动惯量水平。同时每台机组所带负荷尽量均匀,避免单一机组跳闸造成跨网。

1.3 低频震荡问题

系统建立初期易形成一个多电源的小系统。此时可出现低频振荡问题,其实质是远距离送电系统缺乏足够的阻尼,阻尼性能变差。

装设在发电机励磁系统中的PSS可以感受发电机转速或电磁功率的变化,适当调整励磁电流,改变发电机端电压,从而达到阻尼功率振荡的目的,因此并入小网的电源应及时投入PSS功能,同时在启动电源和被启动机组并列运行的小网中,要注意协调机组间的调节特性。如果机组调节特性差别较大,则手动调节和自动调节结合使用,避免子系统发生低频振荡。另外调度机构对子网内电厂出力及时调整以达到合理的潮流分布可有效抑制和消除振荡。

2 电厂的配合

2.1 黑启动电源的选择

黑启动首先是电厂的恢复,可承担黑启动任务的电厂为黑启动电源。一般黑启动电源有柴油发电机、燃气机组、水轮发电机、抽水蓄能电站。其中水轮发电机结构简单、没有复杂的辅机系统、厂用电少、启动速度快,因此是理想、方便的“黑启动”电源。但是并不是所有的水电厂都可作为黑启动电

源,如在一大流量低水头的河流上建设的水电厂大多为灯泡式灌流机组,如四川青居电厂,机组额定转速低,转动惯量较小,机组启动和停机过程短,转速变化快,在低负荷区机组振动较大,不仅不具备带自身厂用电的条件,也不具备在黑启动初期负荷较轻时子网调频调压要求,仅能依靠外界电源完成自身机组的启动。火电机组也是需外界电源才可启动的机组。

2.2 水电厂的配合

水轮发电机组自启动的关键是停电后控制水轮机导叶开启的压力油槽油压能否维持在正常工作范围内(允许时间一般为30 min左右)。当判断为电网全黑后,水电厂应马上检查水轮机组导叶开启的压力油槽油压是否满足启动机组的要求,迅速开出机组,带厂用电,同时检查泄洪闸等水工建筑,保证大坝及上下游居民的生产生活安全。不承担黑启动任务的电厂也应配备柴油发电机或其他备用电源。

2.3 火电厂的配合

对于火电厂,电网全黑后,应依靠柴油发电机等设备采取人工盘车等措施,保证主机、主设备安全。火电厂作为需外界电源才能启动的电厂,其顺利启动对于维持子网运行的稳定性将起到关键的作用。火电厂的辅机系统包括电动给水泵、引风机、送风机、循环水泵、一次风机、凝结水泵、闭式水泵、开式水泵等。一般1台20 MW以上的水轮发电机就足以启动1台300 MW的汽轮发电机^[1]。火电厂启动电动机的顺序理论上应考虑先启动大容量的电动机,先启动大电机,线路上电容电流可补偿一部分,但由于大容量电动机启动电流大,在后启动过程中有可能将初始系统拖垮。

2.4 电厂运行方式的调整

对于电厂应不待调度命令将本站的运行方式调整为一条出线开关在合位,拉开其余线路开关。承担黑启动电源的电厂,等待上级调度命令进行零起升压,不承担黑启动电源的电厂,等待系统来电,恢复本厂的厂用电及准备并列。

3 变电站的配合

3.1 运行方式的调整

在电网全黑时,由于站内蓄电池能提供正常运

- [2] Songhai Fan, Xingliang Jiang, Lichun Shu, et al. DC Ice - melting Model for Wet - growth Icing Conductor and Its Experimental Investigation [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2010, 53 (12): 3248 - 3257.
- [3] Songhai Fan, Xingliang Jiang, Lichun Shu, et al. DC Ice - Melting model for Elliptic Glaze Iced Conductor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 26 (4): 2697 - 2704.
- [4] Xingliang Jiang, Songhai Fan, Zhi jin Zhang, et al. Simulation and Experimental Investigation of DC Ice - Melting Process on an Iced Conductor [J]. IEEE Transactions

on Power Delivery, 2010, 25 (2): 919 - 929.

- [5] 蒋兴良,范松海,胡建林,等. 输电线路直流短路融冰的临界电流分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (1): 111 - 116.
- [6] 文聪. 输电线路导线覆冰断股分析 [J]. 云南电力技术, 2009, 37 (5): 24 - 25.
- [7] 周鹏,李光辉. 架空地线的融冰方法及改进措施 [J]. 湖南电力, 2008, 28 (4): 47 - 48.
- [8] 许树楷,赵杰. 电网冰灾案例及抗冰融冰技术综述 [J]. 南方电网技术, 2008, 2 (2): 1 - 2.

(收稿日期:2012-04-01)

(上接第22页)

重要程度分批次恢复是必须遵循的原则。负荷恢复方案可参考低频减载方案。一般来说低频减负荷方案中没有涉及的负荷定为第1级,低频减负荷轮次为“后备”的负荷定为第2级,低频减负荷轮次为“特2”、“特1”轮的分别为第3、第4级,低频减负荷轮次为第6、5、4、3、2、1的分别定为第5、6、7、8、9和第10级。每1级还可按50 MW进行轮次划分^[9]。

在负荷恢复中省地两级调度应做好配合,由省调根据子网的备用及潮流分布情况向地调下达负荷指标,地调根据省调下达的负荷指标,按级别轮次进行负荷恢复,待频率及电压恢复到正常运行水平时,再开始下一轮的恢复。负荷恢复不仅是黑启动的最终目的,也是建立一个稳定运行电网的必要手段。

省调负责省级电网发电和用电的平衡,负责省内500(330) kV及220 kV环网及所辖发电厂的调度运行管理。将子网做大做强是省调的主要职责。根据收集来的信息迅速确定黑启动路径是省调调度员的首要任务。启动路径应由电源到负荷的电压转换的次数尽量少、路径长度尽可能短为原则,并先启动离重要负荷近的机组,主网架先恢复单线联系。在子网做大做强的过程中和地调密切配合保证频率的稳定,同时密切关注电压情况,利用电容电抗及电厂进行调压,并合理分布子网的潮流。在子网运行稳定的情况下,尽快同步电气孤岛,扩大子网的规模。

网调调度管辖的主要是500 kV系统的骨干网络,在黑启动中负责各黑启动路径中网调调度设备的送电,为各省、市调相关地区提供启动电源。省、市调选择网调黑启动电源对其负荷供电后,与省调协调进行频率、电压调整。对于从220 kV系统开始

启动的子网,500 kV系统主要承担了子网间并列的任务。因此网调的主要责任在于省调将子网启动起来后,选择并网点,加强子网间的联系,提高电网运行的稳定性。根据各省调子网恢复的程度及先后次序研究省网黑启动子系统并列点和并列次序是网调调度的主要责任。

国调是电网调度的最高一级调度机构,国调调度管辖的主要设备以网间联络线及直流系统为主,这已经是黑启动过程中最后的一个环节。网间交流联络线主要视送受端的负荷平衡情况来恢复,对系统稳定性的提高并不具备显著效应。直流系统的恢复应在系统送、受端的发电和负荷都恢复到停电前一半的水平以上,并根据送受端的电力电量平衡情况来考虑是否有必要恢复。

6 结 语

一个稳定运行的子网的建立需要电厂、变电站及各级调度机构间的协调配合。黑启动操作是由上级调度对下级调度实施统一协调,实现了分区启动和分区协作的恢复调度。厂网间协调配合才能在尽可能短的时间内建立一个稳步运行的电网,将对社会经济的影响降到最低。

参考文献

- [1] 陈明. 对电网黑启动中试验电源容量问题的探讨 [J]. 华中电力, 2009, 22 (5): 55 - 57.
- [2] 杨春雨,李永锋. 地区电网“黑启动”方案研究 [J]. 云南电力技术, 2008, 36 (1): 14 - 16.

作者简介:

王莉丽(1977),女,硕士,工程师,长期从事电网调度工

作。(收稿日期:2012-02-13)

基于合作型协同进化遗传算法分布式发电供电恢复

万 强¹, 孙 昊¹, 王 乾¹, 谢晓琳², 王 鹏³

(1. 石家庄供电公司, 河北 石家庄 050000; 2. 石家庄深泽供电公司, 河北 石家庄 052500;

3. 石家庄灵寿供电公司, 河北 石家庄 050500)

摘 要: 分布式电源的配电系统, 在发生大面积断电时, 要求最快、最多的恢复失电负荷的供电。引进了合作型协同进化遗传算法来实现分布式发电条件下的供电恢复, 建立了供电恢复问题的协同进化模型。采用随机生成树对染色体进行编码, 完全避免了不可行解。采用高频变异的方式对染色体进行变异操作。在寻优过程中子种群间相互交换信息, 使得算法尽快收敛。算例表明了协同进化遗传算法的高效性及快速性。

关键词: 配电系统; 协同进化; 遗传算法; 分布式发电; 供电恢复

Abstract: In terms of the distribution system with distributed generators, the model based on co-evolutionary genetic algorithm is proposed to solve the service restoration problem in the event of a large-scale blackout in power distribution network with distributed generation. The chromosomes are coded according to the method of the random trees to avoid lots of unfeasible solutions. The high-frequency method is introduced as the mutation operation of chromosomes. In the process of searching for the best solution, the objective is changed dynamically in order to get the best solution as quickly as possible. At last, the calculation example shows the efficiency and the quickness of the co-evolutionary genetic algorithm.

Key words: distribution system; co-evolutionary method; genetic algorithm; distributed generation; service restoration

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0023-03

配电网一般具有闭环设计、开环运行的特点, 它在配电沿线上设有分段开关, 在馈线入口处设有联络开关。由于电力需求的不断增长, 使得现代配电系统的规模也随之增大, 这必然加大了故障发生的概率。故障恢复的主要目的是在配电网发生故障后, 通过网络重构在不发生系统安全越限的条件下, 快速恢复对非故障区域失电负荷的供电^[1]。

当前, 随着能源危机与环保的意识增强以及为了解决集中式发电中存在的问题, 分布式发电 DG (distributed generation) 技术在全球快速发展。在大电网供电的基础上, 配电系统在靠近用户侧引入容量不大(一般小于 50 MW) 的分布式电源供电方式, 分布式电源的接入不改变原来配电网结构, 延缓了输、配电网升级换代所需的巨额投资。同时, 它的接入可以有效的改善大电网的供电可靠性并且可以提高供电质量^[2-3]。

解决配电网供电恢复问题, 国内外学者已提出了诸如启发式算法、禁忌算法以及以遗传算法为主的多种人工智能算法^[4-5]。其中遗传算法编码简单易行, 并且在理论上全局收敛, 从而得到了较多的应用。但是遗传算法有其本身在收敛速度上的缺陷。

分布式人工智能技术打破了传统人工智能自上而下的集中式处理方式, 并且具有良好的鲁棒性、可扩展性、灵活性、自适应性, 它的发展和应用引起了人们的重视^[6]。基于该技术, 提出了一种新的协同进化遗传算法用于实现分布式发电条件下的配电网供电恢复模型。采用随机生成树的方式产生染色体, 动态地改变子种群的进化目标, 应用高频变异方式对染色体进行变异操作, 实现算法的快速收敛。协同进化遗传算法收敛的快速性, 使它更适合在故障后尽快的给出供电恢复方案, 解决了遗传算法在恢复方案出台速度上的不足。

1 分布式发电下配电网供电恢复的数学模型

1.1 配电网拓扑结构的简化

将配电网看作是一种图, 将配电线路沿线的馈线开关当作是图的顶点, 将馈线当作是图的边, 两个开关间的负荷采用等效负荷模型^[7], 从而构成配电网的数学模型。

1.2 故障后分布式电源的运行方式

当配电网发生故障后, 为了最大限度的提高供

电可靠性,联在馈线上的分布式电源可以打开并网开关,以孤岛方式继续供电^[7]。然后启动恢复程序对全网进行供电的恢复。最后根据恢复结果,分布式电源通过相应开关检同期并网,从而减少用户的停电,最大限度的提高配网的供电可靠性。

分布式电源的运行方式与开关类型有着很紧密的关系。如图1所示,如果连接分布式电源的开关不具备检同期并网的功能,如图1(a)的孤岛划分(菱形开关表示具备检同期功能,圆形开关没有检同期并网功能),其边界开关是普通的圆形开关,那么故障后此分布式电源可以孤岛运行一段时间,但当系统从右侧恢复供电的时候,此分布式电源所带负荷由于开关不具有并网能力只能甩掉。而对于图1(b)的孤岛运行模式来说,供电恢复的时候,只需要检同期并网就可以了。

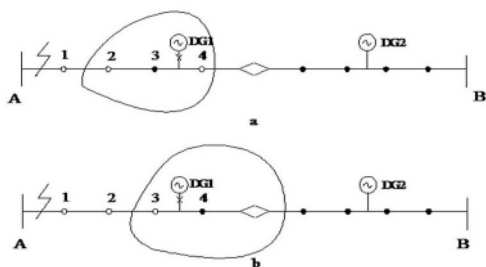


图1 两种不同的孤岛划分

1.3 供电恢复的数学模型

一般情况下,大部分的配电网故障引起的断电除去被隔离的故障区域外,都可以通过联络开关转移负荷全部恢复。但当配电网发生大面积断电的时候,作为电能的提供方,供电公司最关心的是如何最快并最多的恢复重要负荷的供电,因而结合实际选择恢复的负荷量最多作为供电恢复问题的目标函数。

$$\max f = \sum_{i \in N} \lambda Li \quad (1)$$

式中, N 为 $\{1, 2, 3, \dots\}$, Li 为第 i 个负荷恢复的标志位,若第 i 个负荷恢复, Li 取1;反之, Li 取0。 λ 为第 i 个负荷的优先级系数。

在配电网的供电恢复问题中,任一候选解都要满足不等约束,不等式约束包括电压约束、支路过载约束等,即

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \quad (2)$$

$$S_i \leq S_{imax} \quad (3)$$

式中, U_{imin} 和 U_{imax} 分别为节点 i 电压下限和上限值;

S_i 和 S_{imax} 分别为第 i 条支路流过功率的计算值及其最大容许值。

2 协同进化遗传算法

2.1 合作型协同进化的构成

协同进化算法包含竞争型和合作型两种基本类型。竞争型协同进化算法采用多个种群,种群的每个个体代表一个完整解。这些种群处于竞争关系,但同时又存在合作行为,种群间通过个体的迁徙达到信息的交流。基于竞争型的协同进化算法已经获得了众多应用,大多数的基于智能体的算法(即agent技术)都采用这种模式。但这种模式只是硬性的将协同进化算法应用到故障恢复问题,不能反映配电网故障后恢复过程的特点,而基于合作型的协同进化算法可以很好地模拟故障恢复的过程,正因为它更侧重于过程,它解决供电回复问题有着独特的优势。

合作型协同进化算法的基本结构如图2所示,合作型算法与竞争型算法的本质区别在于:合作型协同进化算法把原始问题首先分解为几个部分,这几部分的有机组合才能组成问题的解,单一部分只能反映局部。每个部分对应一个种群(又称子种群),并且每一个种群用一个进化算法来独立进化,这里和竞争型算法的区别是种群(包含子种群)中的任何一个个体都不能表示一个解,问题的解只能由各个子种群各出一个个体组合形成。对一个待解问题,需要由不同种群个体构成的一个共生体对应问题的一个完整解。各个种群中个体的适应度值是通过与其他群体中个体的一系列合作并根据其对目标问题解决的贡献度来确定的,因而单个子种群某一时刻的进化目标(方向)是由其他子种群此刻进化达到的程度所决定的,换句话说就是单个子种群的进化目标是动态变化的^[8]。

2.2 合作型协同进化算法的流程

对某一子种群来说,来自其他子种群的个体集中的一些“优秀个体”经过提取后作为种群间交换的信息,然后单个子种群根据其他种群发来的信息构造完整解并执行进化操作,最终完成进化进程。其具体的进化步骤如下所述。

(1) 根据采用的问题分解策略,确定子种群数目 n ,初始化各个子种群 $pop_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和其他参数。

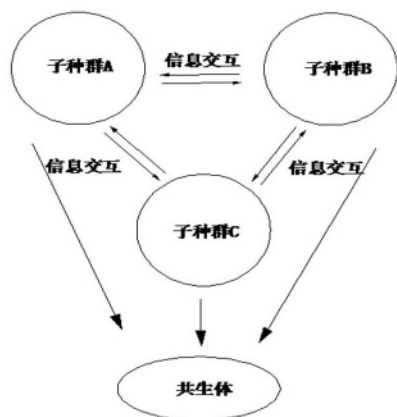


图2 合作型协同进化算法的模型

- (2) 评价各个子种群 pop_i 的个体 pop_{ij} 。
- (3) 进化子种群 pop_i 生成新一代个体。
- (4) 根据合作策略为子种群 pop_i 选择合作者并构造完整解, 计算其适应度, 若满足结束条件则转(5), 否则 $i = i + 1$, 转(3)。
- (5) 算法终止, 输出最优解。

3 供电恢复的协同进化遗传算法

3.1 供电恢复问题协同进化模型的建立

对于大面积断电的供电恢复问题, 首先将问题进行分解。供电恢复可以看成是各个能够提供电能的馈线相互合作恢复尽量多的负荷, 因而对应的子问题就是各个馈线的恢复负荷方式。将能够提供电能的馈线的恢复方式对应为子种群, 有几条可以用于恢复供电的馈线就有几个子种群。每个子种群的染色体表示为此馈线恢复供电的一种方式, 对于供电恢复问题, 每个子种群的染色体有很多种。而每个子种群所对应的进化目标则是对于其他子种群的最优染色体的一个提呈。由于现在的配电网一般采用“手拉手”的供电方式, 馈线比较多。对应的协同进化模型中的子种群就比较多, 在算法进行过程中, 各个子种群间相互交换信息, 对各自的染色体进行更新。正是由于多个子种群的存在, 使得分布式计算的优势得以充分体现, 故本算法解决供电恢复问题的速度较传统人工智能方法有了极大的提高。

3.2 染色体编码

如前所述, 单个染色体对应了某条电源馈线恢复负荷的方式。这里采用实数编码, 如图3所示, 其信息既包含负荷信息又包含顺序信息, 位串ABCDE表示此染色体对应的负荷恢复方式为此馈线依次恢

复了编号为A、B、C、D、E的负荷的供电, 这种编码方式具有直观明了的优点, 可以作为最终结果的直接输出。

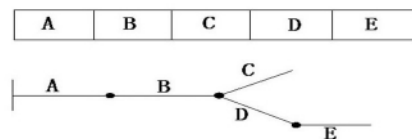


图3 染色体编码

3.3 初始种群生成

配电网闭环设计、开环运行的特点, 使得每个染色体对应的供电恢复方式都应是辐射状结构。这里采用随机生成树的方式, 每个子种群各自形成数目相等的初始种群。这里所说的“树”并不是图论中包含所有节点的树, 而只是指一棵随机生成的子树。所谓随机生成树指的是随机产生一个整数 generation 作为生成一个染色体的循环代数。定义数组 F 、 A , 其中 F 为染色体, A 为待添加的支路, A 中支路满足使 F 为树状结构。从馈线出发, 每代从 A 中随机添加一条支路到 F 中, 然后更新 A , 直到达到循环代数 generation。其中 generation 不能取太大, 因为馈线容量是有限的, 不能恢复无限多负荷。这样 F 中的元素就组成了一个染色体。用相同的方法生成所有初始种群^[9]。

3.4 信息集提呈

某一子种群进化过程中获得的信息是通过对其其他子种群的信息提呈实现的。这里采用如下方式进行信息的提呈: 首先选择要进行信息集提呈的子种群, 然后找到除自身种群外的每个子种群中的最优个体, 最后将其他种群的这些最优个体集中作为此次信息集提呈获得的信息集。

3.5 适应度计算

对于每一个子种群中的染色体都要进行适应度的计算, 适应度的大小和信息提呈中获得的信息集 M 是直接相关的, 它取决于子种群中的染色体和这个子种群的信息集的匹配程度。染色体适应度的计算公式如式(4)。

$$F = \left(1 - \frac{2 \times rst_1 + M_1 - rst_2}{n} \right)^a \times f^b \times c \quad (4)$$

式中, 等式右第1部分描述的是染色体本身的相对优劣程度, 其中, 系数 rst_1 为由染色体 rst 引发的重复冲突。即某负荷在信息集 M 中不重复(因同

一负荷是不会恢复两次的),但由于染色体 rst 中也存在此负荷而引发的冲突。系数 M_1 指信息集 M 中遗漏的负荷数,即所有负荷的总数减去 M 中恢复的负荷数。系数 rst_2 指染色体 rst 包含的负荷总数, a 为这一部分的权重,在此取为 1; 第 2 部分 f 为要优化的目标函数值,在此即公式 1 中的目标函数, b 为这部分的权重,在此取为 0.5; 第 3 部分 c 为约束的越界惩罚系数,当染色体对应恢复方式的潮流满足约束时取 1,否则取 0; 在此需要进行潮流计算,采用前推回代法计算潮流。对于分布式电源,等效为 PQ 节点,这就简化了包含 DG 的配电网的潮流计算。

3.6 遗传操作

遗传操作由选择、交叉和高频变异组成。

(1) 选择: 对每个子种群的染色体根据与适应度成正比的方式进行选择,保留每代中的最优个体不参与选择操作。

(2) 交叉: 按交叉概率 P_c 进行交叉操作,对于随机选取的两个染色体,由于实属编码不易于进行交叉,故按如下方法进行交叉操作: 首先将对应的染色体转换成对开关编码的二进制形式,然后采用普通的两点交叉方式进行交叉操作,调用修复程序对可能产生的孤岛和环路进行修复,最后将新的染色体还原成实数编码形式。

(3) 高频变异: 由于染色体采用随机生成树形成,并且存储在 F 数组中,故可以采用如下的变异规则: 对于 F ,以概率 P_1 、 P_2 和 P_3 表示本次循环要添加 1 条支路的概率、删除 1 条支路的概率以及不做任何变化的概率,在此 P_3 的选取采用和染色体的适应度成正比的原则。 P_1 和 P_2 取相同的数值,其中 P_1 、 P_2 和 P_3 之和为 1。如果根据概率要添加支路,则从 A 数组中随机取出 1 条支路添加到 F 中; 如果要删除 1 条支路,由于 F 中最后 1 条支路必定位于末端(这是由 F 中元素的添加顺序决定的),则将 F 中存储的最后 1 条支路删除即可。

4 算法的具体实现

(1) 参数设置。确定每个子种群的种群规模 N 、染色体编码长度 L 、种群进化代数 N_g 、交叉率 P_c 、变异率 P_1 、 P_2 、 P_3 。

(2) 初始化。对每个子种群随机生成数目为 N 的初始种群。

(3) 进化开始。按式(4)计算每个子种群中染色体的适应度。

(4) 信息集提呈。对每个子种群进行交换信息的提呈。

(5) 遗传操作。对每个子种群进行下述操作: 首先是选择操作,按与适应度成正比的方式对子种群中的染色体进行选择,保留适应度高的个体。然后是交叉操作,对种群中所有染色体依据交叉率 P_c 进行交叉。最后是变异操作,按照设置的变异率对每个染色体进行高频变异。

(6) 终止条件判断。判断进化代数是否到达设定值 N_g 。若是,则输出各个子种群的最优染色体,这些染色体的组合即为最终的解。若没达到 N_g ,则转步骤(3)。

从算法可以看出,由于各个子种群进化目标的动态变化以及各个子种群间的合作,使得染色体比单纯的遗传算法中的染色体更容易找到最优解,因而所提算法具有很高的求解速度。

5 算例分析

用前面提出的协同进化遗传算法对文献 [10] 中的含有 DG 的配电系统(图 4)稍作修改进行了分析。其中带括号的数字表示的为负荷,不带括号的数字表示的是开关节点。假设现在母线 22 故障,并且其出口断路器已跳闸。其中认为 DG4 由于运行方式问题,在故障后要退出运行,断开开关 18,不参与供电恢复。其他分布式电源,在故障后若处在失电区则形成孤岛运行,之后重新并网。

由图 4 可见,母线 22 故障后,还有 0、7、41 处 3 条母线可以用来恢复供电。因而,应用协同进化遗传算法时,子种群的数目为 3。选取每个子种群的种群规模为 30,交叉率为 0.9,变异率 P_1 为 0.3, P_2 为 0.3,则 P_3 为 0.4,适应度函数中的权重 a 和 b 分别取为 1 和 0.5。

应用协同进化算法得到的恢复方案为打开 4、11、20、24 这 4 个开关,这意味着切掉 29、30、31 这 3 个负荷,算法收敛到最优解的平均迭代次数为 11。为便于比较,采用文献 [1] 中的改进遗传算法对此问题同时进行了分析。对于改进遗传算法,初始种群规模也取为 30。遗传算法得到同样最优解的迭

(下转第 35 页)

- [4] 高宗和,丁怡,温柏坚,等. 利用超短期负荷预报实现 AGC 的超前控制 [J]. 电力系统自动化,2000,24(11):42-45.
- [5] 李予州,吴文传,张伯明,等. 多时间尺度协调的区域控制偏差超前控制方法 [J]. 电网技术,2009,33(3):15-24.
- [6] Cova B, Losignore N, Marannino P, et al. Contingency Constrained Optimal Reactive Power Flow Procedures for Voltage control in Planning and Operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 602-608.
- [7] 丁晓群,黄伟,章文俊,等. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法 [J]. 电网技术,2004,28(14):44-48.
- [8] Paul J P, Leost J Y, Tesseron J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 2(2): 505-512.
- [9] LEFEBVRE H. FRANGIER D. BOUSSION J Y et al. Secondary Coordinated Voltage Control System: Feedback of EDF [J]. In: Proceedings of IEEE PES 2000 Summer Meeting. Seattle (WA, US), 2000: 290-295.
- [10] 胡伟,梅生伟,卢强,等. 东北电网混杂自动电压控制的研究 [J]. 电力系统自动化,2004,28(1):68-73.
- [11] 胡伟,卢强. 混成电力控制系统及其应用 [J]. 电工技术学报,2005,20(2):11-16.
- [12] 胡伟,张雪敏,梅生伟,等. 静态混成自动电压控制的研究 [J]. 控制理论与应用,2007,24(6):902-908.
- [13] 李端超,陈实,吴迪,等. 安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计与实现 [J]. 电力系统自动化,2004,28(8):20-22.
- [14] 孙宏斌,张伯明,郭庆来,等. 基于软分区的全局电压优化控制系统设计 [J]. 电力系统自动化,2003,27(8):16-20.
- [15] 孙伟卿,王承民,张焰,等. 电力系统综合节能的有功与无功功率协调优化 [J]. 电机与控制学报,2010,14(7):41-47.
- [16] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 协调二级电压控制的研究 [J]. 电力系统自动化,2005,29(23):19-24.
- [17] 景志滨. 内蒙古电网 AGC 优化控制策略及实现 [J]. 北京:华北电力大学,2007.
- [18] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制(第一版) [M]. 北京:中国电力出版社,2004.

(收稿日期:2012-05-10)

(上接第26页)

代次数在20次左右。协同进化遗传算法较于常规遗传算法有了改进。

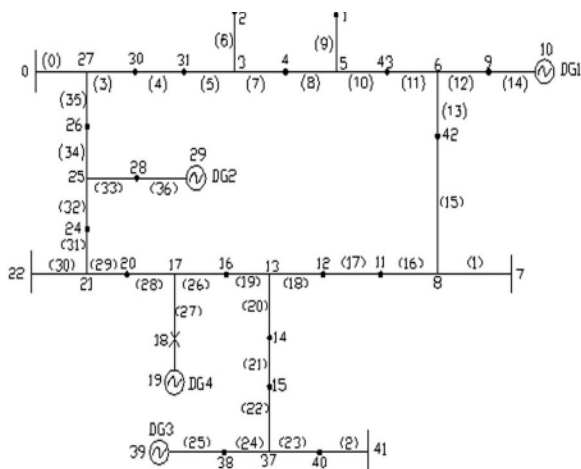


图4 包含DG的配电网简化模型

6 结 语

结合包含分布式电源的配电系统供电恢复的特点及研究现状,提出了一种基于协同进化遗传算法的配电网供电恢复算法。首先,建立了适合含有分布式电源的配电系统供电恢复问题分析的协同进化模型。其次,提出了随机生成树的编码方式,消除了大量不可行解,缩小了解空间。在寻优过程中动态的改变子种群的进化目标,提高了算法的收敛速度。

最后,结合实际算例进行了分析计算。结果表明,协同进化遗传算法解决供电恢复问题计算速度快,可以满足实际要求。

参考文献

- [1] 刘健,毕鹏翔,董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化 [M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电对配电网电压分布的影响 [J]. 电力系统自动化,2004,28(16):56-60.
- [3] 陈琳,钟金,倪以信,等. 含分布式发电的配电网无功优化 [J]. 电力系统自动化,2006,30(14):20-24.
- [4] Popovic DS, Ciric R M. A Multi-objective Algorithm for Distribution Network Restoration [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 1134-1140.
- [5] 盛四清,梁志瑞,张文勤,等. 基于遗传算法的地区电网停电恢复 [J]. 电力系统自动化,2001,25(16):53-55.
- [6] A. H. Bond, L. Gasser. Reading in Distributed Artificial Intelligence [M]. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [7] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网综合控制与分析 [J]. 电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
- [8] van den Bergh F, Engelbrecht AP. A Cooperative Approach to Particle swarm Optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 225-239.
- [9] 郭又华. 基于蚁群算法的配电网结构优化技术 [J]. 成都:四川大学,2006.
- [10] 卢志刚,董玉香. 含分布式电源的配电网故障恢复策略 [J]. 电力系统自动化,2007,31(1):89-92.

(收稿日期:2012-02-07)

并网光伏发电系统 对吐鲁番地区配电网影响的研究

胡仁祥¹, 王晓斌¹, 常喜强²

(1. 吐鲁番电业局 新疆 吐鲁番 838000; 2. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:通过对新疆吐鲁番地区电网中首座兆瓦级光伏电站并网发电后的运行数据进行分析研究,并结合现阶段的光伏并网发电的特点,分析光伏发电接入对该地区的电网调度、无功电压和继电保护等方面的影响。

关键词:光伏发电系统; 并网; 配电网; 影响

Abstract: Through the analysis on operation data of the first MW photovoltaic generating station in Xinjiang Turpan Power Grid, and incorporating with the characteristics of grid-connected photovoltaic power generation in the present stage, the effect of photovoltaic power generation connected to the local grid on grid dispatch, reactive voltage and relay protection are analyzed.

Key words: photovoltaic power generation system; grid integration; distribution network; effect

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0027-03

随着世界能源危机和全球气候变暖等问题的日益突出,发展可再生能源已成迫切需要,其中太阳能光伏发电是再生能源利用的重要形式之一^[1]。目前人们对太阳能资源的利用非常重视,世界范围内的太阳能光伏发电技术和光伏产业发展迅速,光伏发电已从解决边远地区和游牧家庭的用电等零星发电,过渡到规模化兆瓦级甚至百万兆瓦级的光伏发电站,并且发展十分迅速。

从电网运行管理这个角度而言,光伏发电本身具有的特性异于常规发电方式(如火电、水电的可控性),这对电网的运行管理,特别是电能质量、可靠性以及安全性等方面提出了更高的要求。现阶段人们对光伏并网发电系统的特性(包括光伏发电系统自身、并网光伏发电系统对电网的影响以及电网对并网光伏发电系统的影响)认识还不够。所以研究实际的并网光伏发电系统对电网的影响就变得非常有实际意义。

下面以新疆吐鲁番地区 20 MW 光伏发电系统通过 35 kV 输电线路接入配网,现并网发电 4 MW。通过对实际运行的数据分析,并结合现阶段的光伏并网发电的特点,分析光伏发电接入对该地区配电网的电网调度、无功电压和继电保护等方面的影响。

1 并网光伏电站情况

永盛光伏电站是吐鲁番地区首座接入系统的光伏发电站,通过 35 kV 葡萄沟中电支线“T”在 35 kV 葡萄沟煤线上,再通过 110 kV 葡萄沟变电站与主系统联网,接入系统示意图如图 1 所示。本期规模为 20 MW,目前试并网的为 4 MW。站内采用 35 kV 单母线,由 20 台分列升压变压器分成 4 组升压集至 35 kV 母线,35 kV 母线接有一台 SVG(-3.2~3.2 Mvar)。

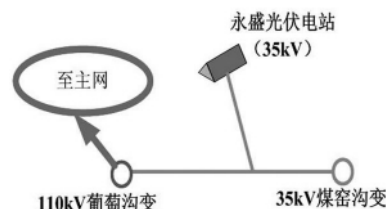


图1 永盛光伏电站系统接线示意图

2 光伏并网发电特点

永盛光伏并网发电系统由光伏组件、直流检测配电箱、并网逆变器、计量装置以及上网配电系统组成。自然界的太阳能照射在光伏组件上转化为直流电能,再通过直流监测配电箱汇集至并网型逆变器,

将光伏组件上转化过来直流电在转化为与接入电网同频率、同相位的正弦波交流电。

光伏发电系统根据发电站容量不同,并网有两种形式^[1]:集中式并网和分散式并网。

集中式并网的特点是光伏电站所发的电能通过高电压等级输电线全部直接送大电网,由大电网集中统一调度,与电网的电能交换是单向的(上网模式)。如图2所示,特别适合于大中型光伏电站并网,如荒漠、戈壁光伏电站,离负荷中心点比较远。新疆吐鲁番七泉湖20 MW永盛光伏电站和鄯善20 MW光伏电站都是通过35 kV输电线路并网。

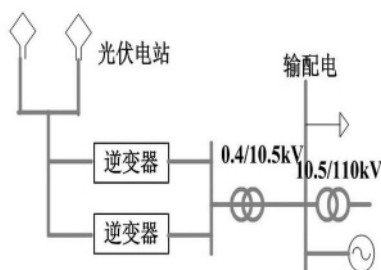


图2 光伏发电系统集中式并网

分散式并网的特点是单个光伏发电板所发的电能直接用于用户的户载上消耗,有多余的电能或电能不足时,再通过连接大电网下网电量,这与大电网在能量交换上是双向的(可上、可下模式)。如图3所示,特别适合于建筑式光伏发电系统。

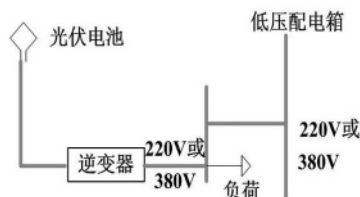


图3 光伏发电系统分散式并网

3 对地区电网的影响

3.1 对电压的影响

由于文中的光伏电站接入等级为35 kV的电网中,该等级电网多为辐射状。在正常运行方式下,电压沿输电线潮流方向逐渐降低。而当接入光伏电站后,光伏发电使得输电线的传输功率下降,使得输电线上的负荷节点电压被抬高,从而导致某些节点的电压越上限,分析表明电压上升的幅度与接入光伏电站的位置和总量的大小密切相关。

对于上述电压越上限的问题,通常采取的措施是调节配电网中有载变压器的分接头、电压调节器和投退电抗器等设备。然而合理设置光伏电站的运行方式对于配电网中的电压调整也是至关重要的。如正午光伏发电出力最大时,线路若轻载,那么接入的电压降明显被抬高。此时接入点电压将可能越上限,这时就必须合理的设置光伏电站的运行方式。比如规定光伏电站必须参与电网的调压,吸收输电线路中多余的无功功率。在线路重负荷期间,光伏电站必须多发无功,以改善线路的电压质量。

光伏发电对电压的影响还表现在谐波、电压偏差、电压不平衡度、直流分量、电压波动和闪变等方面。光伏发电的出力受太阳的入射辐照度而变,可造成局部线路电压波动和闪变,若与负荷的波动叠加在一起,又将带来更大的电压波动和闪变。如图3、4、5所示为永盛光伏电站容量为4 MW的出力情况和对接入点电压的影响。

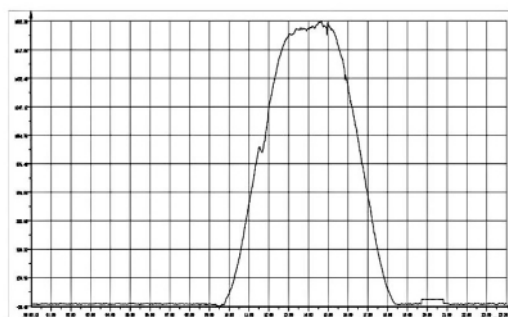


图4 联络线光伏电站侧有功曲线(单位:kW)

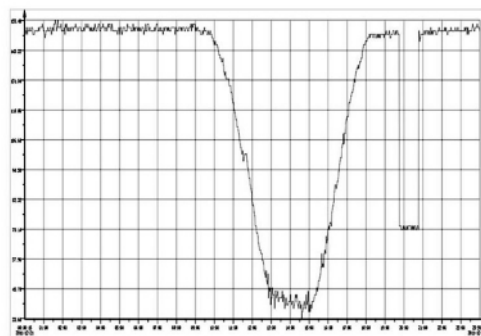


图5 联络线光伏电站侧无功曲线(单位:kvar)

从图3、4可以看出,永盛光伏电站在12:00—15:00有功出力最大,几乎接近满发状态;同时光伏电站也能发出一部分无功功率,对电网电压有一定的支撑能力。从图5中可以看出电压受出力的影响,不停的来回波动,最高电压在37.74 kV,最低电压在36.67 kV,振幅达到1.07 kV。

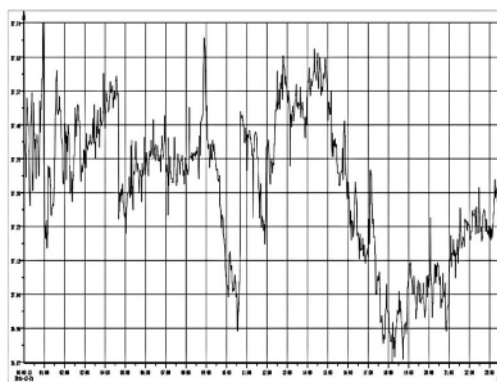


图6 接入点35 kV 母线电压曲线(单位:kV)

3.2 对继电保护的影响

吐鲁番电网中的配电网保护主要是断路器的电流三段保护,主线上装设有自动重合闸,支路上为熔断器。永盛光伏电站接入配电网的末端,改变了原有的单侧电源和辐射型网络,使其变成了双断网络,从而改变了故障电流的方向、大小和持续时间。

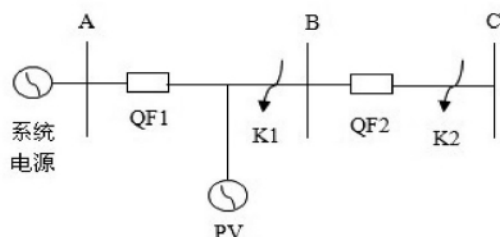


图7 光伏并网与配电网典型接线示意图

如图7所示,当线路AB段 K_1 点发生短路故障,依据选择性原则应由保护QF1动作切除故障。故障点 K_1 的故障电流由系统电源和PV共同提供,此时的故障电流要大于PV接入前的故障电流,然后QF1感受到的故障电流仅由电源侧提供,由于PV分流作用使得QF1感受到的故障电流减小,影响了保护QF1的灵敏性,若接入点PV的容量很大,保护QF1可能会拒动。当 K_2 点故障,故障电流由系统电源和PV共同提供,由于PV的助增电流作用,使得保护QF2的灵敏性增加。

光伏电站自身的故障也会对并网系统的运行和保护产生影响。另外,当光伏系统孤岛保护功能时间不能和自动重合闸装置协调配合时,也会引起非同期合闸等危害。

当配电网故障时,光伏并网发电系统可能采取解列运行方式,但解列后重新接入电网的同期过程中,应尽量减少对配电网产生的冲击,且应采取一定的控制策略和手段给予保证。

3.3 对调度运行的影响

光伏发电受光照变化的影响出力不受控制。永

盛光伏电站也不具有调度自动化功能,电网调度运行部门不能对其直接控制,所以不能参与电网电压的调整和电网的调频。这无疑会减少配电网中的可调度发电厂的容量,给配电网控制与调度运行带来更大的难度。

3.4 对短期负荷预测的影响

现行的电网发电计划,尤其是日负荷预测是当天上午预测第3天的负荷,主要依靠于对本地区电网负荷的准确预测。当光伏发电系统并网后,所发出的电能往往被当地的负荷消耗。由于光伏电站的发电量受气候影响,使得整个电网的负荷总量具有了更多的时变性和随机性,从而给电网的发电计划,尤其是日负荷预测的合理制定,带来了较大的难度。

3.5 对电能计量的影响

在永盛光伏电站接入配电网前,配电网中的潮流方向是单一的。并网后,配电网中个别区域内的潮流流向发生变化为双向。所以将原有的电能计量装置由单向表改为双向计量装置才能满足要求。

4 结 论

光伏作为新能源发电的一种形式,越来越受到人们的青睐,其发展的步伐不可阻挡。然而大量的光伏并网发电运行,对传统的输配电网的安全稳定运行带来了新的挑战。

根据实际的永盛光伏电站运行数据的分析,指出光伏电站对配电网电压、短路电流、电网调度和日负荷预测等方面的影响。因此,有必要深入研究并网发电对配电网的影响,使接入光伏的配电网能够更加安全、稳定和经济的运行。

参考文献

- [1] 王厂贵. 并网光伏发电系统综述(上)[J]. 太阳能, 2008(2): 14-17.
- [2] 方廷, 韩郁, 张岚. 一种多逆变器太阳能光伏并网发电系统的组群控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(7): 57-60.
- [3] 马胜红, 陆虎俞. 太阳能光伏发电技术储能蓄电池[J]. 大众用电, 2006(4): 40-43.
- [4] 赵春江, 杨金焕, 陈中华, 等. 太阳能光伏发电应用的现状及发展[J]. 节能技术, 2007, 25(5): 461-465.

作者简介:

胡仁祥(1987),男,硕士,从事电网调度运行。

(收稿日期:2012-03-20)

基于交替迭代法的 AGC 与 AVC 协调优化控制策略研究

吕连洁, 汪颖, 肖先勇, 张通
(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:针对目前中国电网自动发电控制和自动电压控制系统之间缺乏协调控制、不利于电网安全性和经济性协调统一,且控制指令存在交互影响等问题,定义了面向 AGC 系统控制性能和 AVC 系统控制性能的两类“事件”,采用事件驱动的方式,提出了一种基于交替迭代法的 AGC 与 AVC 协调优化控制策略。根据实际电网的特点,构建了以经济性为最优目标的 AGC 控制模型,同时考虑控制变量约束及网络安全约束,以经济性和安全性为最优目标的 AVC 控制模型,利用交替迭代思想和方法修正 AGC 与 AVC 的控制参考值,得到满足要求的控制指令下发相应的发电厂和变电站。相应设备的调整实现系统的协调控制,及时消除两类“事件”,从而保证电网安全、优质和经济运行。针对实际的内蒙乌海地区电网进行计算机仿真,仿真结果证明了所提出的控制策略的可行性和有效性。

关键词:自动发电控制; 自动电压控制; 事件驱动; 交替迭代法; 协调优化控制策略; 计算机仿真

Abstract: At present, there is lack of coordinated control between automatic generation control (AGC) and automatic voltage control (AVC) of power grid in China, it is not conducive to the harmonization of security and economy of power grid, and the control commands exist the interaction. Aiming at these problems, two types of "event" for the control performance of AGC system and AVC system are defined, the manner of event-driving is adopted, and a coordinated optimal control strategy between AGC and AVC based on alternating iterative method is proposed. According to the characteristics of the actual power grid, a AGC control model with system economy as optimal objective is established, meanwhile, taking the constraints of the control variables and network security into account, a AVC control model with economy and security as optimal objectives is established too, and the AGC and AVC control commands are corrected by alternant iterations method, then the coordinated optimal control commands are sent to the corresponding power plants and substations. The adjustments of the corresponding equipment will realize the coordinated control of power system, and eliminate the two types of "events" timely, which ensures the security, quality and economy of power grid operation. Based on the actual power grid in Wuhai district of Nei Menggu, the computer simulation is carried out. The simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: automatic generation control (AGC); automatic voltage control (AVC); event-driving; alternating iterative method; coordinated optimal control strategy; computer simulation

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0030-06

电力作为一个国家的能源和经济命脉,在经济的不断发展中起着重要的作用。随着中国经济的不断高速发展以及电力系统规模的不断发展,各级电网间的电气联系日益紧密,电网运行特性日渐复杂,电力系统对频率和电压稳定性的要求也越来越高。随着国内高新技术企业和新兴产业的不断增多,在安全、经济供电的基础上,电力用户对电力公司提出了更高的优质供电需求,为电力系统的安全稳定运行问题带来了新的特点,即对发电和电网之间的协调性提出了更高要求。电源是电力产生的主要方式,是统一坚强智能电网发电环节的基本保证和重

要组成部分。自动发电控制(AGC)和自动电压控制(AVC)是电力系统控制的两个重要组成部分。AGC系统^[1]是电力系统能量管理(EMS)中的重要控制功能,其已经在电力系统中得到广泛的应用,它有效地提高了电网的运行质量和经济效益。从时间上看,常规的AGC系统是一个先有偏差再进行校正的滞后控制过程^[2],将功率用于滞后校正难以满足负荷变化和电网快速发展的需求,不利于电网的安全和经济运行^[3]。因此,有学者提出超前控制的思想^[4,5],在实际电网中投入运行,也取得一定的控制效果。同时,随着中国经济的不断高速发展,以及电

电力系统规模的不断发展和复杂程度的不断增大,电力系统对电压稳定性的要求也越来越高,进而对电压稳定性问题的重视,AVC 系统的研究和应用也取得了较大进展。AVC 控制技术,包括两级电压控制^[6,7]、三级电压控制^[8,9]和混成自动电压控制^[10-12]等,已在越来越多的电网中得到了应用和发展^[13,14],对无功电压设备进行优化闭环控制,降低了网损,并提高了电力系统的电压质量。

目前电网中的自动控制系统仍然存在着一些问题和不足:(1) 无功电压的控制不能够及时跟踪电网负荷和有功调度的变化,特别是对于重载的输电线路和地区;(2) 没有考虑有功频率与无功电压两者之间的协调问题,AGC 系统和 AVC 系统作为两个完全独立的闭环控制系统,分别有各自独立的控制模型、控制目标和表述方法,不利于全电网安全性和经济性的协调统一;(3) AGC 系统与 AVC 系统的控制指令和控制目标之间存在交互影响^[5],AGC 机组有功出力调整会引起各控制分区中枢母线电压水平不同程度的偏移,此时需要协调 AVC 对无功电压的调整来满足系统对电压安全性和电压质量的要求。而 AVC 对无功电压的调整会引起系统有功损耗的变化,破坏了 AGC 对联络线交换功率的控制效果,进而会引发 AGC 与 AVC 反复调节的问题,这样既增加了发电机组反复调节的磨损,同时也增加了调度运行人员的工作负担。

针对以上存在的问题,根据国家电网公司提出的“以统一规划、统一标准、统一建设为原则,建设以特高压为骨干网架,各级电网协调发展,具有信息化、自动化、互动化特征,自主创新、国际领先的统一坚强智能电网的发展目标”的要求,如果通过先进的控制技术,实现电网的 AGC 和 AVC 之间的协调优化控制,对于改善电力系统的频率和电压的动态品质、提高系统的稳定性,以及优化潮流从而有效降低网络损耗,保障电力系统的安全、优质和经济运行,构筑坚强智能电网,具有十分重要的意义。

这里借鉴了混成控制系统的思想和理念^[10-12],定义了面向 AGC 系统控制性能和 AVC 系统控制性能的两类“事件”,引入事件驱动的方式,提出一种基于交替迭代法的 AGC 与 AVC 协调优化控制方法,设计了多目标协调控制模型,实现了系统有功功率、无功电压和联络线交换功率的多目标协调控制,及时消除了两类“事件”,从而保证电网安全稳定运

行,以最大限度改善电力系统运行性能。

1 事件定义

电力系统传统的自动控制系统是采用一种时间基的控制方式,该控制方式每次“出调”(下发指令)的时间间隔是人为事先设定好的,其与电网运行中实际发生的状况无关,因此每次“出调”将陷于盲目性。混成电力控制系统^[10-12]采用一种事件驱动的方式,可以实现多指标的协调控制。它是一种事件基的控制方式,以及时消除电网中实际发生的事件为目标,可以避免每次“出调”的盲目性。在电力系统中,可定义不满足要求的电压水平、动态品质和联络线交换功率为“事件”,控制系统采集电网数据,进行处理和事件判断,以判定是否有“事件”发生。若“事件”发生,则启动相关的控制系统,以及时消除“事件”。

将混成电力系统中“事件驱动”的方式应用于协调控制体系中,针对 AGC 系统和 AVC 系统的最终控制目标分别为维持联络线交换功率和中枢节点电压在规定的范围之内,因此定义两类“事件”。

1.1 第1类事件为面向 AVC 控制性能的事件

定义如下逻辑条件构成第1类“事件”。

$$E_{AVC}[k] = \begin{cases} P_{AVCon} & \text{if } ||\Delta V_p[k]|| > \varepsilon_1 \\ P_{AVCnon} & \text{if } ||\Delta V_p[k]|| \leq \varepsilon_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $E_{AVC}[k] = \{P_{AVCon}, P_{AVCnon}\}$ 为 AVC 系统判断环节的输出事件; P_{AVCon} 和 P_{AVCnon} 分别为当前需要和不需要进行 AVC 控制; ε_1 为中枢节点电压阈值; $\Delta V_p[k]$ 为第 k 个控制时间间隔后中枢点电压偏差。

1.2 第2类事件为面向 AGC 控制性能的事件

定义如下逻辑条件构成第2类“事件”。

$$E_{AGC}[k] = \begin{cases} P_{AGCon} & \text{if } ||\Delta P_T[k]|| > \varepsilon \\ P_{AGCnon} & \text{if } ||\Delta P_T[k]|| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

式中, $E_{AGC}[k] = \{P_{AGCon}, P_{AGCnon}\}$ 为 AGC 系统判断环节的输出事件; P_{AGCon} 和 P_{AGCnon} 分别为当前需要和不需要进行 AGC 控制; ε 为联络线交换功率阈值; $\Delta P_T[k]$ 为第 k 个控制时间间隔后联络线交换功率偏差。

2 AGC 与 AVC 协调控制模型

2.1 总体思路

负荷发生波动,电力系统进行实时数据的分析和处理,基于 AGC 与 AVC 协调控制策略,采用交替迭代、相互修正的思想,将协调控制的综合控制指令求解分解成 AGC 调节子问题和 AVC 调节子问题。交替计算实时 AGC 与 AVC 的控制指令,迭代交流潮流,以及时消除两类“事件”为目标,直至控制目标收敛,从而减少了系统的往复调节,实现了有功和电压的精细化调节。得到的 AGC 指令和 AVC 指令将直接送至相应的发电厂和变电站,发电厂和变电站接收下发的相关指令,直接调节相应的发电机励磁系统、调速系统和变电站各种控制装置进行控制,从而及时消除两类“事件”,同时减小系统的网络损耗,保证电力系统安全稳定的运行。

2.2 AGC 控制模型

在该控制策略中,AGC 系统以及时消除第 2 类“事件”为目标,采用实时 AGC 机组承担功率分配,由于实时 AGC 机组调整量较小,动作较快,因此只根据购电成本对其进行排序,按照购电成本排序来分配功率缺额,其模型为

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i \in S_G} a_i \Delta P_i \\ & s. t. \quad \sum_{i \in S_G} \Delta P_i = \Delta P_L \\ & \quad \underline{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i \quad i \in S_G \\ & \quad \underline{Q}_i \leq Q_i \leq \bar{Q}_i \quad i \in S_G \\ & \quad \underline{\Delta P}_i \leq \Delta P_i \leq \bar{\Delta P}_i \quad i \in S_G \\ & \quad \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad i = 1, \dots, n \\ & \quad R_{AVCmax} \leq \sum_{i \in S_G} R_i \end{aligned} \quad (3)$$

式中, a_i 为发电机 i 的报价; ΔP_i 为可控发电机承担 i 的有功功率调节量; S_G 为实时调节 AGC 机组的集合; ΔP_L 为负荷变化量; $P_i, Q_i, \Delta P_i, V_i$ 分别为可控发电机的有功出力、无功出力、一个控制周期内有功功率调整量和端电压幅值; $\underline{P}_i, \bar{P}_i, \underline{Q}_i, \bar{Q}_i, \underline{\Delta P}_i, \bar{\Delta P}_i, \underline{V}_i, \bar{V}_i$ 分别为可控发电机有功、无功调节上下限、有功调节量上下限、运行电压上下限; R_{AGCmax} 为系统所需的 AGC 调节速率 (MW/min); R_i 为 AGC 机组 i 的调节速率 (MW/min)。

采用牛顿法求解上述最优潮流问题,得实时 AGC 机组的有功出力参考值和各电压控制分区中

枢节点电压参考值。

对于仿真计算中的内蒙电网,AGC 控制模式为 FTC(定联络线功率控制)模式,故采用联络线交换功率与设定值的偏差 ΔP_T 来衡量 AGC 控制的性能。

2.3 AVC 控制模型

电压控制分区发电机无功出力裕度越大、出力越均衡,将有利于提高电力系统的安全稳定性。发电机的无功均匀度在一定程度上可以衡量系统的电压稳定水平。

定义发电机 i 的无功出力百分比指标^[4]为

$$k_i = \frac{Q_{i0} + \Delta Q_i - Q_{imin}}{Q_{imax} - Q_{imin}} \quad (4)$$

式中, $\Delta Q_i, Q_{i0}, Q_{imin}, Q_{imax}$ 分别为可控发电机 i 的无功出力调整量、无功出力当前值及最大、最小值。

采用控制分区内发电机无功均匀度的方差 DK_G 衡量系统的电压稳定裕度,其表达式为

$$DK_G(\Delta Q_G) = E(K_G - EK_G)^2 \quad (5)$$

式中, $K_G = [w_1 k_1, w_2 k_2, \dots, w_n k_n]^T$; w_i 为可控发电机 i 的权重系数; $E(Q_G)$ 为相应变量的期望值。

AVC 系统以及时消除第 1 类“事件”为目标,综合考虑电压调整的经济性和安全性,通过与 AGC 系统进行信息交互,预先判断有功功率的调整对电网电压和无功的影响,若超过调节死区的范围,则以无功调整量^[4]和无功均匀度作为优化目标,进行 AVC 控制的双目标优化,构建以经济性和安全性为最优的多目标控制模型为:

$$\begin{aligned} & \min \alpha \Delta Q_G^T R \Delta Q_G + \beta DK_G(\Delta Q_G) \\ & s. t. \quad \Delta V_p - C_Q \Delta Q_G < \varepsilon_1 \\ & \quad Q_{imin} \leq Q_{i0} + C_i \Delta V_{iG} \leq Q_{imax} \end{aligned} \quad (6)$$

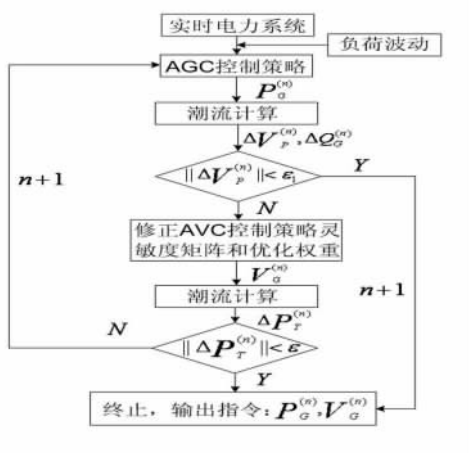
式中, α 和 β 分别为无功调整量和无功均匀度的权重系数; ΔQ_G 为可控发电机无功调整量; R 为权重矩阵; ΔV_p 为发生电压波动后中枢节点电压的变化值; C_Q 为中枢节点电压与可控发电机无功出力之间的灵敏度矩阵; ε_1 为中枢点电压阈值; C_i 为可控发电机 i 的无功出力与其机端电压之间的灵敏度矩阵。

式(6)为简单的二次规划问题,其双目标函数权重系数将由电力系统的运行状态决定。

采用中枢母线电压与设定值的偏差 ΔV_p 为衡量 AVC 控制性能。

2.4 AGC - AVC 的交替迭代控制策略

根据前面提出的 AGC 与 AVC 控制策略,采用交替迭代、相互修正的思想,设计 AGC 与 AVC 协调控制策略,其算法流程如图 1 所示。



R_G 为可控发电机有功出力; V_G 为可控发电机端电压; ε 为联络线交换功率阈值

图 1 交替迭代控制策略流程图

AGC 与 AVC 交替迭代算法的步骤如下。

(1) 电力系统受到负荷波动后,启动 AGC 系统,调整实时 AGC 机组的有功出力,进行潮流计算,得到中枢节点电压偏差 $\Delta V_p^{(n)}$ 和可控发电机的调整变量 $\Delta Q_G^{(n)}$ 。

(2) 判断 $\|\Delta V_p^{(n)}\| < \varepsilon_1$, 满足则直接输出 AGC 指令 $P_G^{(n)}$ 和 AVC 指令 $\Delta V_G^{(n)}$, 否则启动 AVC 系统,修正灵敏度矩阵和相应的权重系数,得到可控发电机组的无功调整量并调节相应的可控发电机组,进行潮流计算,得到联络线交换功率偏差 $\Delta P_T^{(n)}$ 。

(3) 判断 $\|\Delta P_T^{(n)}\| < \varepsilon$, 满足则直接输出 AGC 指令 $P_G^{(n)}$ 和 AVC 指令 $\Delta V_G^{(n)}$, 否则转入步骤 (1)。

3 算例仿真

本仿真算例是基于内蒙电网 2009 年夏季运行方式的数据,仿真工具为 PSASP 7.04 和 Matlab。

分析内蒙电网机组的实际情况^[7],由于内蒙电网电压控制分区较多,在协调控制仿真验证中,选取了调控手段较为充足的乌海地区,仅考虑 220 kV 层面的调控。在负荷波动前,通过计算系统最小模特征值相对乌海地区节点电压的灵敏度^[8],得乌海地区中枢节点分别为五福 21 和黄河 21。

以负荷波动前系统潮流作为初始潮流,在乌海地区设定 201 MW 的负荷增量,在此基础上进行 AGC 和 AVC 的协调控制计算。在该仿真计算中,设置 $\varepsilon = 5 \text{ MW}$ 、 $\varepsilon_1 = 0.5\% \text{ p.u.}$ 。

3.1 AGC 有功调整的效果

控制区负荷增加,调整实时 AGC 机组有功出力,AGC 出力按购电成本最优来分配,其对电力系统的影响如表 1 所示(机组报价等相关参数详见文献^[7])。

表 1 AGC 有功出力对系统的影响

性能指标	调节前	调节后
联络线潮流偏差/MW	-207.70	-14.01
中枢节点电压偏差/p.u.		
五福 21	-0.006 94	-0.007 12
黄河 21	-0.006 74	-0.006 94

可知,由于系统网损的变化,AGC 机组进行一次调节不能够消除第 2 类“事件”,因此需要多次迭代调整 AGC 机组出力。另外,有功功率的调整会对中枢节点电压和系统的无功分布产生较大的影响,中枢节点电压偏差超出了 AVC 调节的死区,因此在控制体系中需要启动 AVC 控制环节进行调节。

3.2 AVC 无功调整的效果

在上述 AGC 调整后,对 AVC 按下面 3 种控制方案的调节效果进行比较如表 2 所示,其各可控发电机的无功出力如图 2 所示。

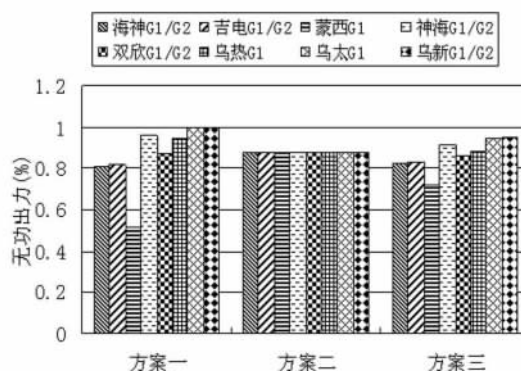


图 2 3 种控制 AVC 无功出力

方案 1: AVC 以调整量最小为目标进行调节;

方案 2: AVC 以发电机无功均匀度作为优化目标进行调节;

方案 3: AVC 以调整量和无功均匀度作为优化目标进行调节。

可知,与方案 1 相比,方案 2 考虑了控制区域内可控发电机的无功均匀度,其提高了系统的安全稳

定裕度,但是这可能造成部分无功出力的长距离输送,使得有功网损增大。方案3综合考虑了可控发电机无功出力的调整量和无功均匀度,提高了系统负荷安全裕度的同时也降低了系统网损,这样更利于系统的安全稳定运行,该控制方案能够消除第1类“事件”,但是仅仅通过调整一次AGC出力,不能够消除第2类“事件”,这就需要再次启动AGC机组,调整其无功出力来消除第2类“事件”。

表2 3种AVC控制方式的优化调整结果

指标		方案1	方案2	方案3
中枢节点电	五福21	-0.002 52	-0.001	-0.001 99
压偏差/p. u.	黄河21	-0.001 53	-0.000 51	0.000 86
有功网损/MW		374.27	374.44	374.34
负荷安全裕度/%		32.21	32.76	32.60
联络线潮流偏差/MW		-13.55	-13.594	-13.70

3.3 交替迭代控制的效果

为比较所提出协调控制策略的调节效果,对以下3种控制方案进行仿真。

方案1: AGC机组按购电成本调整,AVC机组未能及时跟上有功的变化,不进行调节;

方案2: AGC机组按购电成本调整,AVC机组以调整量和无功均匀度指标作为优化目标进行调节;

方案3: 在方案2的基础上,进行AGC和AVC的交替迭代控制。

仿真过程中,方案3第一次迭代过程中,AVC控制双目标权重为1:70,由于第一次迭代已将中枢点电压调回死区范围内,故第二次迭代过程中只调整AGC出力,未对AVC机组进行调整。

3种控制方案下电力系统的安全性指标和质量类指标的对比结果如表3所示。

表3 3种控制方案的结果对比

指标		方案1	方案2	方案3
中枢节点电	五福21	-0.007 12	-0.001 99	-0.002 01
压偏差/p. u.	黄河21	-0.006 94	-0.000 86	0.000 89
有功网损/MW		374.72	374.34	374.341
负荷安全裕度/%		31.61	32.60	32.56
联络线潮流偏差/MW		-14.01	-13.70	-1.40

3种方案下乌海地区参与无功/电压调整的AVC机组无功出力情况如图3所示。

可知,方案2将 ΔV_p 调回死区范围,但AVC机组的无功均匀度较小,不利于系统的安全稳定运行,且 ΔP_T 未能满足要求;方案3考虑了AVC机组无功调整量和无功出力均匀度,其无功均匀度得到较大提高,增大了系统的稳定裕度,并且能够将 ΔV_p

调回死区范围,但 ΔP_T 未能满足要求,即方案2和方案3均能够消除第1类“事件”,不能够消除第2类“事件”;方案4能够将 ΔV_p 和 ΔP_T 调回死区范围,降低了有功网损,同时提高了AVC机组的无功均匀度,这样有利于电网的安全稳定运行,即采用交替迭代的控制策略(方案4)能够消除两类“事件”,改善电网运行质量指标使其满足要求,同时也提高了电网的经济性和安全性指标。

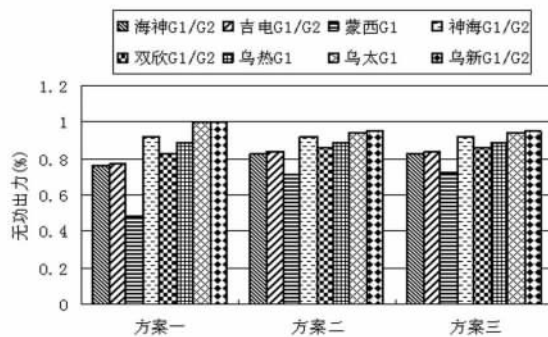


图3 3种控制方案AVC机组无功出力的比较

综上所述,所提出的AGC与AVC协调控制策略能够消除第1类“事件”和第2类“事件”,同时还提高了电力系统的安全稳定裕度,保证了系统的安全稳定运行。

4 结 论

前面定义了面向AGC系统控制性能和AVC系统控制性能的两类“事件”,采用事件驱动的方式,提出了一种基于交替迭代法的AGC与AVC协调优化控制策略,分别构建了相应的AGC和AVC控制模型。基于所提出的控制理论体系,结合内蒙电网乌海地区AGC和AVC的实际情况,进行了AGC与AVC控制策略优化和迭代计算,实现了系统有功功率、无功电压和联络线交换功率的多目标协调控制,及时消除了两类“事件”,从而保证电网安全、优质和经济运行。该仿真研究充分验证了所提出的协调优化控制策略的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 高宗和. 自动发电控制算法的几点改进[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(22): 49-51.
- [2] Chown G A, Hartman R C. Design and Experience with a Fuzzy Logic Controller for Automatic Generation Control (AGC) [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3): 965-970.
- [3] Egidio I, Fernández-Bernal F, Rouco L, et al. Modeling of Thermal Generating Units for Automatic Generation Control Purposes [J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2004, 12(1): 205-210.

- [4] 高宗和,丁怡,温柏坚,等. 利用超短期负荷预报实现 AGC 的超前控制 [J]. 电力系统自动化,2000,24(11):42-45.
- [5] 李予州,吴文传,张伯明,等. 多时间尺度协调的区域控制偏差超前控制方法 [J]. 电网技术,2009,33(3):15-24.
- [6] Cova B, Losignore N, Marannino P, et al. Contingency Constrained Optimal Reactive Power Flow Procedures for Voltage control in Planning and Operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 602-608.
- [7] 丁晓群,黄伟,章文俊,等. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法 [J]. 电网技术,2004,28(14):44-48.
- [8] Paul J P, Leost J Y, Tesseron J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 2(2): 505-512.
- [9] LEFEBVRE H. FRANGIER D. BOUSSION J Y et al. Secondary Coordinated Voltage Control System: Feedback of EDF [J]. In: Proceedings of IEEE PES 2000 Summer Meeting. Seattle (WA, US), 2000: 290-295.
- [10] 胡伟,梅生伟,卢强,等. 东北电网混杂自动电压控制的研究 [J]. 电力系统自动化,2004,28(1):68-73.
- [11] 胡伟,卢强. 混成电力控制系统及其应用 [J]. 电工技术学报,2005,20(2):11-16.
- [12] 胡伟,张雪敏,梅生伟,等. 静态混成自动电压控制的研究 [J]. 控制理论与应用,2007,24(6):902-908.
- [13] 李端超,陈实,吴迪,等. 安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计及实现 [J]. 电力系统自动化,2004,28(8):20-22.
- [14] 孙宏斌,张伯明,郭庆来,等. 基于软分区的全局电压优化控制系统设计 [J]. 电力系统自动化,2003,27(8):16-20.
- [15] 孙伟卿,王承民,张焰,等. 电力系统综合节能的有功与无功功率协调优化 [J]. 电机与控制学,2010,14(7):41-47.
- [16] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 协调二级电压控制的研究 [J]. 电力系统自动化,2005,29(23):19-24.
- [17] 景志滨. 内蒙古电网 AGC 优化控制策略及实现 [J]. 北京:华北电力大学,2007.
- [18] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制(第一版) [M]. 北京:中国电力出版社,2004.

(收稿日期:2012-05-10)

(上接第26页)

代次数在20次左右。协同进化遗传算法较于常规遗传算法有了改进。

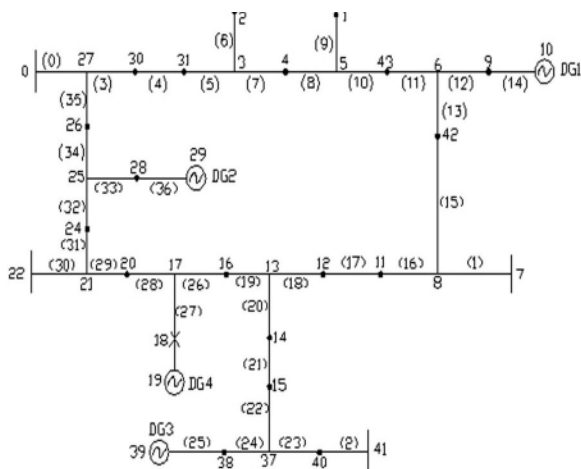


图4 包含DG的配电网简化模型

6 结 语

结合包含分布式电源的配电系统供电恢复的特点及研究现状,提出了一种基于协同进化遗传算法的配电网供电恢复算法。首先,建立了适合含有分布式电源的配电系统供电恢复问题分析的协同进化模型。其次,提出了随机生成树的编码方式,消除了大量不可行解,缩小了解空间。在寻优过程中动态的改变子种群的进化目标,提高了算法的收敛速度。

最后,结合实际算例进行了分析计算。结果表明,协同进化遗传算法解决供电恢复问题计算速度快,可以满足实际要求。

参考文献

- [1] 刘健,毕鹏翔,董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化 [M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电对配电网电压分布的影响 [J]. 电力系统自动化,2004,28(16):56-60.
- [3] 陈琳,钟金,倪以信,等. 含分布式发电的配电网无功优化 [J]. 电力系统自动化,2006,30(14):20-24.
- [4] Popovic DS, Ciric R M. A Multi-objective Algorithm for Distribution Network Restoration [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 1134-1140.
- [5] 盛四清,梁志瑞,张文勤,等. 基于遗传算法的地区电网停电恢复 [J]. 电力系统自动化,2001,25(16):53-55.
- [6] A. H. Bond, L. Gasser. Reading in Distributed Artificial Intelligence [M]. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [7] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网综合控制与分析 [J]. 电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
- [8] van den Bergh F, Engelbrecht AP. A Cooperative Approach to Particle swarm Optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 225-239.
- [9] 郭又华. 基于蚁群算法的配电网结构优化技术 [J]. 成都:四川大学,2006.
- [10] 卢志刚,董玉香. 含分布式电源的配电网故障恢复策略 [J]. 电力系统自动化,2007,31(1):89-92.

(收稿日期:2012-02-07)

风功率预测系统在新疆电网中的应用及改进

孙立成¹, 马成林², 常喜强¹, 姚秀萍¹, 李静坤¹

(1. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:结合风功率预测系统在新疆电网中的应用情况,就风功率预测系统进行了总结。对存在问题进行了深入研究,找出了其中的不足,提出了新的解决措施,克服了原有系统的不足。对推进风功率预测系统的应用及提高风功率预测系统精度有重要的指导意义,也为有类似问题的风功率系统提供了技术参考及借鉴。

关键词:风功率预测系统; 方法; 改进

Abstract: Combining with the application of wind power forecasting system to Xinjiang Power Grid, the wind power forecasting system is summarized. The existing problems are deeply studied, the demerits of this system are found out, and some new measures are presented. The shortages of the current system have been overcome. It has an important guiding significance for the application and improvement of wind power forecasting system. And for those wind power forecasting system with the similar problems, the technical reference and model are also provided.

Key words: wind power forecasting system; method; improvement

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0036-04

0 引言

大力发展风电等先进能源技术在改善能源结构、减少温室气体排放等方面具有非常积极的作用,然而与常规电源相比,风电场的输出功率受人为主观因素干预较小,几乎完全由自然条件决定。随机变化的风速、风向导致风电场输出功率具有波动性、间歇性、随机性的特点,大量风电场集中并网会对电网的安全、稳定、经济运行带来影响,并成为了限制电网接纳风电的主要障碍之一。对风速风功率进行预测,对风电场的出力进行预报,是解决这一问题的有效途径。是提高电网调峰能力、增强电网接纳风力发电的能力、改善电力系统运行安全性与经济性的最有效、最经济的手段之一。通过预测,风电将从未知变为基本已知,增强系统的安全性、可靠性和可控性。根据风电场预测的出力曲线优化常规机组的出力,达到降低运行成本的目的。

1 风功率预测情况

风功率预测方法: 根据数值天气预报的数据,用物理方法计算风电场的输出功率;或是根据数值天气预报与风电场功率输出的关系、在线实测的数据

进行预测的统计方法。目前常见的方法有: 基于数值天气预报的方法、基于物理计算方法和统计方法。

(1) 数值天气预报: 根据大气实际情况,在一定初值和边界条件下,通过数值计算求解描写天气演变过程的流体力学和热力学方程组来预报未来天气的方法。这种预报是定量和客观的预报。常用的预测方法输入数据: 风速、风向、气温、气压等的 SCA-DA 实时数据; 等高线、障碍物、粗糙度等数据; 数值天气预报数据。

(2) 物理方法: 考虑地形、粗糙度等信息的预测方法。利用数值天气预报(NWP)系统的预测结果得到风速、风向、气压、气温等天气数据,然后根据风机周围的物理信息得到风力发电机组轮毂高度的风速、风向等信息,最后利用风机的功率曲线计算得出风机的实际输出功率。对风电场所在地进行物理建模,包括风场的地形、地表植被及粗糙度、周围障碍物等等;还对风机本身的轮毂高度、功率曲线、机械传动和控制策略等进行建模。该方法的输入参数为数字气象预报(NWP)模型。由于气象预报的每日更新频率很低,因此,该方法更适合中期风电场的发电量预测。

(3) 统计方法: 是在系统的输入(NWP、历史统计数据、实测数据)和风电功率之间建立一个映射关系,应用这个关系,采用回归分析法、指数平滑法、

时间序列法^[1]、卡尔曼滤波法、灰色预测法等,通过捕捉数据中与时间和空间相关的信息来进行预测。

(4) 学习方法:是用人工智能的方法提取输入和输出间的关系,建立模型。通过大量数据的学习和训练来建立输入输出间的关系,达到预测。

新疆电网风电功率预测系统于2010年7月投入运行,系统实施初期即将当时所有已建风电场全部纳入预测系统,到目前为止,系统预测风电场为17个,预测总容量达到1 560.75 MW。系统实现对新疆所有已建风电场的超短期功率预测。从系统功能划分及调度一体化角度考虑,将在原预测系统软件平台的基础上开发超短期预测模块,将超短期预

测无缝融入原预测系统中。

2 风功率预测系统存在的问题

为了提高电网风功率预测系统的预测精度,预测结果的可信度,准确性,需要对每个风电场进行建模。按照风功率预测方法需要的数据,则数据量越大,越多,越好。目前风电功率预测建模以单个风电场为最小单元进行,各风电场预测结果累加得到整个调度管辖区的预测结果。单个风电场采用离线建模的方式。目前系统采取的两种建模方法的对比情况如表1。

表1 两种建模对比

序号	统计方法	物理方法
原理	基于“学习算法”,通过一种或多种算法建立 NWP 历史数据与测得的风电场历史输出功率数据之间的联系,再根据该关系式,由 NWP 数据对风电场输出功率进行预测。	应用大气边界层动力学与边界层气象的理论将数值天气预报数据精细化为风电场实际地形、地貌条件下的风电机组轮毂高度的风速、风向,考虑尾流影响后,再将预测风速应用于风电机组的功率曲线,由此得出风电机组的预测功率,最后,对所有风电机组的预测功率求和,得到整个风电场的预测功率。
技术特点	(1) 在数据完备的情况下,理论上可以使预测误差达到最小值; (2) 定期进行模型再训练,预测精度可持续提高; (3) 需要大量历史数据的支持,不适用于新建风电场,对历史数据变化规律的一致性有很高的要求; (4) 统计法的建模过程带有“黑箱”性。	(1) 不需要风电场历史功率数据的支持,适用于新建风电场; (2) 可以对每一个大气过程进行详细的分析,并根据分析结果优化预测模型; (3) 对由错误的初始信息所引起的系统误差非常敏感。 (4) 计算过程复杂、技术门槛较高。
建模数据需求	(1) 风电场历史同期功率数据、测风塔数据、机组故障记录、限电记录等,数据长度至少1年,且为最近两年内的数据。 (2) 每台风机并网时间。	(1) 风电场布局(每台风机位置); (2) 各风机参数(风机型号、轮毂高度、叶轮直径、功率曲线、推理系数曲线等); (3) 历史测风塔数据,数据长度至少1年,且为最近两年内的数据。
其他说明	在数据完备的情况下建模周期约1周,本方法适用于历史运行数据较为充足的风电场,预测精度较高。	物理方法建模在数据完备的情况下建模周期约为2周。新建风电场在并网前提供建模所需基础资料供建模,可保证模型随风电场同步投运。
两种预测方法原理科学,技术严谨。		
评价	需要的历史数据量太大,数据种类复杂,这制约了方法的实用性,需要高质量的基础数据和实时气象信息就能做出预测,但对数据的完整性和有效性有很高的要求。 测风计本身的测量精度误差以及风速计旋转时由于摩擦阻力和风向标的电压死区带来的误差;电信号的失真,存储设备和人为原因带来的数据丢失和破坏;人为的修改数据造成数据的损坏。对风电功率预测系统的预测精确度会有一定的影响。	依赖于对气象数据的分析,计算复杂,可能存在气象数据无法准确描述问题。 对于新疆具有特殊地理位置的风电场来说,变化频繁的自然条件和复杂的地形地貌给预测系统增加了困难。 风电场选址一般在比较偏远的地区,如山脊、戈壁滩。安装在不同海拔高度以及因容量的不同引起风电机组之间在垂直方向的落差,对风电功率预测系统的预测精确度会有一定的影响。

数据需求量大,获取难度较大,且由于需要历史数据,造成模型的滞后性,不利于新建风电场的预测。

新疆电网风功率预测系统存在如下几种不利因素。

2.1 国内外共性问题

(1) 预测精度受制于风电功率预测水平限制,短期、超短期风电功率预测精度不高,中长期预测较难开展。

(2) 风电功率预测必须的风电场实时测风数据、运行状态等数据还存在一些问题。由于部分风电场还没有完成实时测风塔建设等原因,风电场实时测风信息、机组运行状态等信息还没有上传到调度中心;部分风电场虽然已经完成上传,但数据质量不高。

2.2 新疆风功率预测系统的个性问题

(1) 新疆幅员辽阔,地广人稀,独特的“绿洲经济”与独特的“三山夹两盆”环境,以及新疆是远离海洋的地区,使得新疆的气象条件复杂,气候多变,对新疆的风资源的预测,风电的建模产生干扰。

(2) 由于新疆覆盖面积大,气象部门数值天气资料主要涵盖和集中在人居住地区,无法实现新疆全地区信息资料覆盖,无法全面覆盖新疆9大风区,同时又相对于其他省区,新疆一个气象观测点与另外一个气象观测点之间距离远,这就可能造成新疆一个气象观测点覆盖面积太大,无法涵盖该区域范围内的所有气象信息,点少面广的因素与其他省区不同,使得新疆风电预测系统难度增大。

(3) 新疆位居大陆中心,四周远离海洋,被高原高山环绕,属温带极端大陆性气候,冬季漫长严寒,夏季炎热干燥,春秋季短促而变化剧烈。其气候特点是昼夜温差大,多样的气候类型,但全疆南北地跨纬度约 15° ,地形高差大,南、北疆有暖、寒、温带之分,东西部有明显的干湿之别,同一地区因地形高差而具有鲜明的垂直气候特征,造成了新疆东西南北、山上山下气候的不同。使得新疆各种风况复杂,使得新疆风电预测系统难度增大。

(4) 新疆风电资源丰富,风电场开发速度增快,这就使得新增风电场缺少大量的历史数据和测风塔数据,使得新疆风电预测系统难度增大。

(5) 新疆电网中风电场运行人员素质不高,风场自动化程度不能满足风功率预测需求,风电场自身的运行维护,运行人员对机组的开机、停机的统计不准确,数据的完整性降低,测风计本身的测量精度误差以及风速计旋转时由于摩擦阻力和风向标的电

压死区带来的误差;电信号的失真,存储设备和人为原因带来的数据丢失和破坏;人为的修改数据造成数据的损坏。使得新疆风电预测系统难度增大。

(6) 新疆电网风电场改建、扩建、更换机型的风电场较多,对于许多历史数据不能使用,将需要分类辨识应用,这对于风电场预测建模产生了较多的干扰因素,使得新疆风电预测系统难度增大。

3 提高新疆风功率预测的措施建议

通过上述多种因素分析可知:新疆电网风功率预测系统将因新疆独特的气候环境、风况、风向的多变、数值天气预报资料的不足、涵盖范围广、粗、不能完全满足风功率预测需要,缺少风电场运行的历史数据,风电运行数据不准确等因素影响模型准确度、模型的精度、模型的适应性。同时也造成模型滞后于风电场,给风电运行调度运行带来不利因素。为此需要积极研究解决措施。

(1) 为解决新建风电场缺少测风塔数据、历史运行数据而造成的风功率预测模型滞后问题,采取将物理办法与统计方法相结合,采取相似性预测方法,即区域集中预测法,其基本原理为根据调度关系或区域风能特性将所有风电场划分为几个大区,对各区域内部分运行工况良好的风电场进行精细化建模,以一定的优化算法将部分风电场预测结果外推得到整个区域的预测结果,各区域汇总得到整个调度管辖区内的预测结果,同时通过分析区域内风电场相关性及其上下游效应,可将区域预测结果降至单个风电场。该方法可保证调度侧预测系统的完整性,初步解决新建风电场预测模型的滞后问题。

(2) 针对新疆独特的风资源情况,加大风电场测风塔的建设,对地形复杂的风电场应适当增加测风塔,积极收集测风塔数据。积极推进数值天气预报应用的细化、深化,模型的优化及改进。以减少数值天气预报应用带来的误差。

(3) 为了获得更具有代表性的数据特征,在提高数据采集频率的基础上,改进数据采集系统,对数据缺损的情况采用插值填补法,利用同一个风区的多个测风塔,互相对连续缺损数据进行填补。对缺失的数据进行填补仅针对少数不可靠数据,对统计方法需要的大量数据而言不具有实用性。大量数据不合理或错误的气象因子不能被用作预测,而应该

由其它气象因子替代。可以被用作预测的因子有: 风速、风向、气温、气压、太阳辐射、空气湿度、空气密度、降水量、云层高度等9个气象因子。对不能使用的气象因子可以采用在计算该气象因子与其他因子的相关性的基础上进行替代。

(4) 采用对每台风电机组进行预测的方案可以提高预测精度, 风电机组的停机或人为因素控制功率输出也会影响原始数据的有效性。对只具有气象数据而没有历史功率数据或历史功率数据错误的风电机组, 需要对历史功率数据进行相应替代, 从而使模型能得以进行。替代方法可以根据分块预测方法进行, 具体为: 基于同型机组, 气象信息相似度最佳以及在控制策略相同的情况下, 使用该机组的功率曲线进行替代。若不能满足以上3种情况, 则可以选择采用块内其他机组的平均功率曲线进行折算后再代替。

(5) 风电运行受诸多因素影响, 如系统运行方式、网络约束常规机组处理等, 所以当风电场输出功率大于电力系统的接纳能力时, 风电场将被限电, 但对于预测系统来讲, 人为的控制功率输出直接影响原始数据的有效性。故考虑建立3组数据库: 控制下的实际输出功率数据库Ⅰ、不受控制时输出功率差额数据库Ⅱ和理论输出功率数据库Ⅲ。其中数据库Ⅰ用作风电场功率预测, 上报调度部门; 数据库Ⅲ用于本风电场数学建模和风电机组的功率预测; 数据库Ⅱ用作功率差额对比和计算风电场总的功率预测。通过3组数据相互补充, 以减少运行人员人为因素产生的误差。

4 结 论

在深入分析风功率预测系统在新疆电网应用情况及存在问题之后, 针对原系统在实际应用中的不足, 提出相应的改进措施, 采用精确的风电功率预测模型, 提高基础数据的完整率和有效性, 结合更加科学的数据处理方法, 建立相应的风电场管理制度将会对预测系统带来很大帮助。通过开发相应软件对

风电场气象信息进行统一管理; 数值天气预报信息能够提供更高分辨率的气象信息, 提高风速计的机械可靠性和测量精度, 风向标方面, 应减少死区范围。测量方法可以用电信号来代替目前的机械式方法。将智能算法应用到数据管理中, 基于数据挖掘的机器算法更能发掘出数据之间的潜在联系。提高风电运行管理的自动化水平, 提高的数据处理和管理自动化水平, 实现自动数据处理。提出了在开发预测系统的过程中还需要进一步做的工作, 最大程度推进风电功率预测系统的实用化。

参考文献

- [1] 范高锋, 赵海翔, 戴慧珠. 大规模风电对电力系统的影响和应对策略 [J]. 电网与清洁能源, 2008(7): 44 - 48.
- [2] 韩爽. 风电场功率短期预测方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [3] 谷兴凯, 范高锋, 王晓蓉, 等. 风电功率预测技术综述 [J]. 电网技术, 2007, 31(S2): 335 - 338.
- [4] 王丽婕, 廖晓钟, 高阳, 等. 风电场发电功率的建模和预测研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 118 - 121.
- [5] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1 - 5.
- [6] 双斌, 王维庆, 张新燕. 基于支持向量机的风速与风功率预测方法研究 [J]. 华东电力, 2009(9): 1600 - 1603.
- [7] 潘迪夫, 刘辉, 李燕飞. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型 [J]. 电网技术, 2008, 32(7): 82 - 86.
- [8] 罗海洋, 刘天琪, 李兴源. 风电场短期风速的混沌预测方法 [J]. 电网技术, 2009(9): 67 - 71.
- [9] 张国强, 张伯明. 基于组合预测的风电场风速及风电机功率预测 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 92 - 95.

作者简介:

孙立成(1982), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为新能源发电相关技术与管理等。

(收稿日期: 2012-04-01)

建设节约型环境友好电网

故障定位系统及其关键技术探讨

宋友文, 赵继光

(中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510623)

摘要:基于快速复电工作的目标和基本要求,探讨了故障定位系统;并就故障指示器的故障判据和通信等关键技术进行了较深入的研究和探讨,最后给出故障指示器技术进一步发展的建议。

关键词:快速复电;馈线自动化;故障定位;故障指示器;故障判据;取电;通信

Abstract: Based on the objectives and basic requirements of fast restoration in Guangdong Power Grid, the fault location system is discussed. Then, the key technologies such as fault criterion and communication of fault indicator etc. are studied and discussed. Finally, the suggestions for the further development of fault indicator technology are given.

Key words: fast restoration; feeder automation; fault location; fault indicator; fault criterion; power supply; communication

中图分类号:TM734 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)03-0040-04

0 引言

近几年,随着电网结构的发展和人民群众对供电质量要求的不断提高,国家和行业对配电网的建设与运行逐渐重视,并开始了配电网自动化试点建设。配电网故障复电是影响供电可靠性和客户满意度的关键因素,是客户、社会衡量供电企业管理水平和服务理念的重要标准。

配电网故障快速复电包括:故障快速报告、快速诊断、快速定位、快速隔离、非故障段快速复电和故障快速修复。根据分析,故障定位和故障隔离时间约占总故障停电时间的33%,利用技术手段减少故障定位和故障隔离时间是提高配电网故障快速复电效率的关键。

2010年,广东电网公司启动了配电网快速复电机制建设,在技术、流程等6个领域提出具体工作要求,努力实现配电网故障的快速复电。提出了“以提高供电可靠率为总抓手,建立配电网故障快速复电”的工作机制,其中,以故障定位为主的馈线自动化技术是实现快速复电工作的关键举措。

1 故障定位模式探讨

1.1 故障定位模式的选择

配电网故障定位系统是通过安装故障指示器装

置,在配电线路发生故障时,相关人员通过人工巡视或根据上报的故障信息,确定故障区域的系统。该系统仅仅在故障时起作用。

综合目前国内外的故障定位建设模式,大致可分为三类:就地显示的故障定位模式、带有通信功能的“一遥”故障定位模式、带有遥测功能的“二遥”故障定位模式。就地显示的故障指示器没有故障信息的远传功能,主要是通过就地显示功能减少人工巡线发现故障点的时间,后两种模式均带通信系统,是目前主要应用模式,具有便于升级为三遥的优点。

以故障指示器为基础的“一遥”故障快速定位系统能实现故障点的快速、准确定位,节约大量的故障查找时间,是一种最经济实用的方案。可广泛应用于一般供电网络的架空、电缆线路。

以故障指示器自动检测短路故障和接地故障的功能为基础,在此基础上增加通讯功能,可以将故障指示器的动作状态发送到故障监控中心或配电自动化子站,同时也可接入已有配电自动化系统后台,在监控中心的后台系统地理图上或主接线图上直接定位故障点,同时将定位结果以手机短信的形式分组发送给相应的管理人员和运行维护人员的手机上。大大提高了故障指示器定位故障的自动化程度和故障处理效率,是一种最经济实用的自动化方案。故障指示器的通信可以采用GSM网络的短信方式、GPRS或者CDMA等公共通讯平台进行通讯,也可在这一平台上申请VPN等专网数据服务,保证通讯

网络的信息安全,这两种方式均无需专门建设和维护通讯通道。

以故障指示器为基础的“二遥”故障快速定位系统是在“一遥”方案的基础上增加了负荷电流、开关状态遥信等检测功能,满足大多数配电网运行需要,不需要一次设备进行改造,实施难度小,整体性价比。普遍适用于不易改造的电缆线路设备:环网柜、分支箱、箱式变电站和配电房。

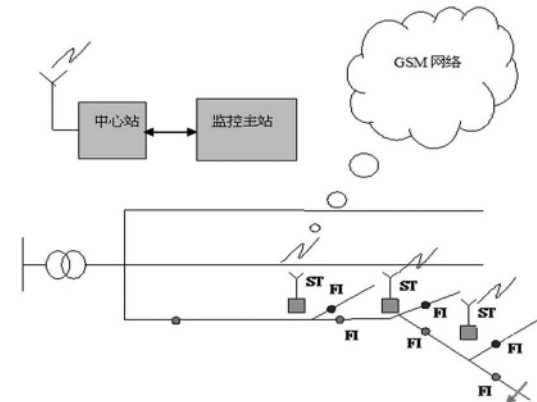


图 1 带通信功能的故障定位系统示意图

1.2 故障指示器的故障判据

故障指示器的判据应该考虑全面,以减少拒动作和误动作的可能性。下面是过负荷跳闸的线路情况,故障指示器需要正确判断,以防止误动。其中的电流值和其持续时间应该根据各地区的线路和负荷情况具体设置,见表 1。

其他有可能使指示器拒动的线路情况如表 2 所示。

表 1 可能引起误动的线路情况

线路工况	描 述
正常负荷波动	线路正常运行过程中负荷存在一定幅度的波动,在线路正常分闸停电时不得引起故障指示器误动。
大负荷投切	电力线路上所带的大功率负载投切过程中,如果线路仍在带电运行,其所产生的电流突变不得引起故障指示器误动。
过负荷跳闸	当电力线路因所带负载过大,导致过负荷跳闸时,其线路上安装的故障指示器不得误动。
负载电源	当电力线路发生短路故障跳闸停电时,线路上所带的大功率旋转动力负载转变为短时电源向故障点反送电,所形成的突变电流不得引起故障指示器误动。
涌流	电力线路在初上电时的充电电流和负载励磁涌流所产生的电流突变不得引起故障指示器误动作。

表 2 可能引起拒动的线路情况

线路工况	描 述
过流保护	当电力线路发生非金属性短路或线路末端短路导致过流跳闸时,故障指示器应正常动作。
区外故障	当电力线路发生区外故障导致较长时间过流跳闸时,故障指示器应正常动作。
速断保护	当电力线路发生短路故障导致速断保护动作或熔断器保护快速熔断时,故障指示器应正常动作。
重载线路故障	当大负荷线路发生短路故障导致过流跳闸或速断跳闸时,故障指示器应正常动作。
空载线路故障	当空载(或较小负载)线路发生短路故障导致过流跳闸或速断跳闸时,故障指示器应正常动作。

2 故障定位关键技术

2.1 故障定位系统的取电技术

2.1.1 故障指示器取电

故障指示器取电,主要有两种取电方式:太阳能电池板方式和线圈取电方式。

太阳能电池板方式是直接在故障指示器上加装小型太阳能板,但考虑到故障指示器的体积较小,而且需要专用的工具带电挂装,其结构较难处理,在现实的使用中不好操作。

线圈取电方式下,为了方便挂接故障指示器,都是采用结构简单的硅钢片。这种方式导致线圈不能完全闭合,漏磁严重,磁能转换的效率低,线路的负载要达到 10 A 以上才能正常工作。而架空线的分布广泛,很多支线的电流达不到 10 A,这种结构的故障指示器就不能完全覆盖整条线路。而且在需要检测电流上传后台,两遥方案时,精度过低不能达到要求。

采用高精度线圈,需要重新设计故障指示器的外形和结构,故障指示器采用双磁芯 TA,一组检测故障电流,一组专门用于取电,在安装完全正确的情况下,线路上只需要 2 A 的负载电流就可正常工作,而且测量精度达到 1%,能满足两遥的要求。

2.1.2 通信终端取电

由于通信终端是通过抱箍固定在高压杆上,它的体积和结构不会受到太大限制,取电相对简单。现在最常用最成熟的取电方案时使用太阳能电池板

供电,配备大容量充电锂电池。在夜晚或阴雨天气时,由电池供电。电池在充足电后的情况下,可以维持子站连续 15 d 工作而不需补充能量。在日照不是太充足的地方,为进一步确保电源的可靠性,可以考虑加装风能发电装置。

2.2 故障定位系统的选点技术

故障指示器在架空线的布置原则,是在主干线上分段安装,同时每个线路的分支点安装,这样能在故障发生时有效区分故障区域。通信终端起的仅是传递信息的作用,其位置和数量直接由故障指示器的位置决定;它们之间常用的通信方式是通过 2.4 G 或 433 MHz 频段,通信距离有限。前者最多只有几十米,后者由于功耗所限只有 1 ~ 200 m。在实际应用中,基本上是一套故障指示器配一个通信终端,而通信终端的成本是故障指示器的 2 ~ 3 倍。所以作为中转信息的通信终端,应该是数量越少越好。要减少通信终端的数量,就要增加通信终端与故障指示器之间的通信距离,使一个终端尽可能与更多故障指示器通信。

2.3 故障定位系统的通信技术

目前的配电网自动化系统中,普遍采用 GPRS 公网无线技术作为主站与终端之间的数据传输技术,除了无线公网的安全性问题之外,GPRS 通信业务一般采用按流量计费的方式收取月套餐费,超出套餐内的流量限制后资费快速上升,当终端数量上千甚至上万的时候,每个月需要交给电信运营商的流量费用是惊人的。

表3 若干配电网自动化项目中 GPRS 通信业务的收费方式

项目名称 /地区	收费方式
北京配电网 自动化项目	12 元/月,包 50 MB 流量,超出部分 0.01 元/KB,500 元封顶
深圳配电网 自动化项目	28 元/月,包 50 MB 流量,超出部分 0.01 元/KB,500 元封顶
广州配电网 自动化项目	15 元/月,包 10 MB 流量,超出部分 0.01 元/KB,500 元封顶

因此,结合 2.2 中最优选点的原则,当大规模地进行故障定位系统建设的时候,需要考虑的一个重要问题就是远程通信终端的成本和每月的运营费用问题,如何选择合适的通信组网模式,使得故障定位系统的经济性与通信可靠性并重,是目前的一个技术难点。

传统的组网方案:架空故障指示器内置 2.4 G 通信模块,通过短距离无线编码信号与通信终端架空子站通信,通信距离在 3 ~ 10 m 之间。通信终端一般安装在线路分支点处,它只能接收两套故障指示器的编码信息,收到的动作信息通过处理后,经过地址编码和时序控制,通过 GSM 通信装置发送给中心站。

由于故障指示器与通信终端的通信距离有限,一个通信终端最多只能覆盖两个故障检测点,一条典型 10 kV 线路按主干线加分支线共 30 个故障检测点计算,必须至少配备 $15 + 3 = 18$ 台通信终端,其中 3 台为冗余配置。

改进的组网方案:目前有技术采用长、中、短距离相结合的通信组网模式,若干套(每套含 A、B、C 三相)故障指示器通过中距离 RF490 信道与单模式通信终端进行信息交互,按照配电线路的结构走向,每两个单模式通信终端之间放置一个双模式通信终端,单模式通信终端与双模式通信终端通过 RF490 信道通信,最后由多模式通信终端通过 GSM/GPRS 无线通信方式发送至远方监控中心。

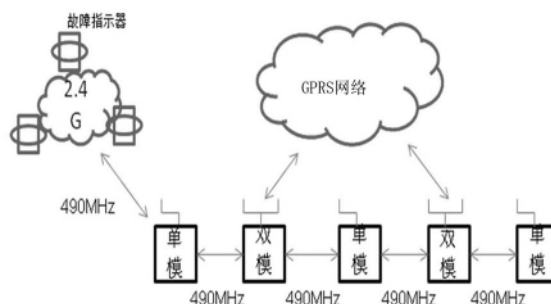


图2 故障定位系统新型通信组网模式示意图

通过中距离 490 MHz 的无线单模基站的数据汇聚和转发,可以大大减少双模通信基站的数量,仅需要 10 台左右的基站,其中单模和双模交替分布,可大大降低通信系统的建设费用和后期的公网无线通道运营费用。

该方案存在的问题:通信模式的混合采用,导致了通信可靠性的不足,实际运行中通信通道发生故障的问题较多,而且也较难排查出故障点,给运行维护带来较大问题;另外,该种方案扩展性不强,每次有新的故障监测点加入的时候,都要求通信通道进行相应的扩展。

因此,如何进行更合理地布点和组网,使得在以可靠性为基本的同时,能够兼顾到建设与运维的经

济性,以及系统后期的可扩展性,是需要进一步深入研究的问题。

3 结 语

故障定位系统直接减少故障定位时间、故障隔离时间,与其他模式比较具有明显的经济性,适合处在配电自动化建设起步阶段的地区使用。故障指示器是故障定位系统的核心部件,目前仍需在故障判

据、取电和通信等技术问题上进一步发展完善。

参考文献

- [1] 秦丝,胡厚欲. 电缆故障指示器的应用经验 [J]. 广东输电与变电技术, 2008, 4(12): 49-52.
- [2] 袁钦成. 配电系统故障处理自动化技术综述 [J]. 电力设备, 2007, 8(12): 1-5.

(收稿日期:2012-02-13)

(上接第10页)

时,异步风力发电机对电网发出无功功率。在风速突变时刻,对应双馈式风机和直驱风机均有向电网吸无功的趋势,且直驱风机较明显。

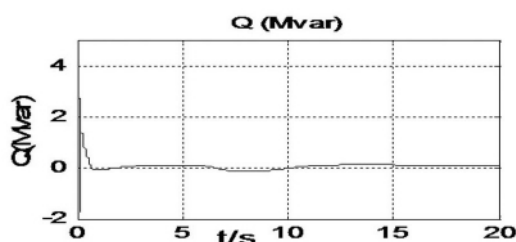


图16 双馈式异步风力发电机组无功功率

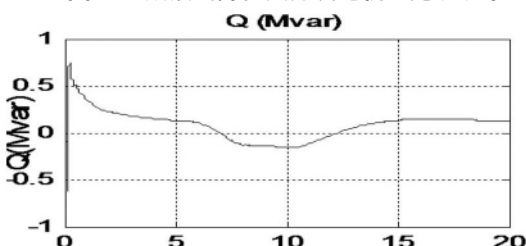


图17 直驱风力发电机组无功功率

从仿真结果图形中,对比可知在引入同一突变风速,对同一接入电网时,电压方面,双馈式风力发电机组和直驱风电机组电压波动较小,对电压影响较小。电流方面,双馈式异步风力发电机组和直驱风力发电机组电流均随风速增大而增加,异步风电机组在保护动作前也是电流随风速增大而增大。相较直驱风电机组对风能利用率较高。

针对的是等值风电场,风电场的容量相对较小,在实际中,风电场的容量将是数十倍、数百倍的容量。当在此类的风电场风速突变时,将形成的效果和影响会更大。

4 结 论

(1) 由文中的动态仿真结果,基于风电场风速年突变率和风电场对接入电网的影响及对自身的安

全,在建设的风电场中,要考虑当风速年突变率较高时,基于电压、电流、有功、无功波动和风能利用率考虑时,应选直驱式风力发电机型,其电压在风速突变时较缓和,对此时的风能利用率较高。

(2) 异步风电机组在风速突变(风速突增)时,电压下降,当风速突变到某一值时,由于电压低于风力机低电压保护整定值,继电器动作,切除该风电场,这将对电网安全造成很大的影响。例如2011年4月甘肃酒泉某风电场由于低电压穿越能力不行,风电场解列,对西北电网造成巨大影响。风电场的异步风力发电机组应注重在风速突变时,风电机组的电压跌落问题。

参考文献

- [1] 范高峰,于德龙,任普春,等. 变动风速作用下风电场对电网电压的影响 [J]. 电网技术, 2006, 30(4): 231-233.
- [2] 汤宏,吴俊玲,周双喜. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 38-41.
- [3] 崔杨,穆钢,刘玉,等. 风电功率波动的时空分布特性 [J]. 电网技术, 2011(2): 110-114.
- [4] 叶杭治. 风力发电系统的设计、运行与维护(第一版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 90-94, 183-187.
- [5] 张志英,赵萍,李银凤,等. 风能与风力发电技术(第二版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 65-73, 290-299.
- [6] 吴学光,张学成,印永华,等. 异步风力发电系统动态稳定分析的数学模型及其应用 [J]. 电网技术, 1998, 22(6): 68-72.

作者简介:

罗庆(1987),男,硕士研究生,研究方向为洁净能源与并网技术;

晁勤(1959),女,教授,博士生导师,主要从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究和教学;

袁铁江(1976),男,讲师,博士研究生,研究方向为风力发电及其并网技术。

(收稿日期:2012-02-22)

故障定位系统及其关键技术探讨

宋友文, 赵继光

(中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510623)

摘要:基于快速复电工作的目标和基本要求,探讨了故障定位系统;并就故障指示器的故障判据和通信等关键技术进行了较深入的研究和探讨,最后给出故障指示器技术进一步发展的建议。

关键词:快速复电;馈线自动化;故障定位;故障指示器;故障判据;取电;通信

Abstract: Based on the objectives and basic requirements of fast restoration in Guangdong Power Grid, the fault location system is discussed. Then, the key technologies such as fault criterion and communication of fault indicator etc. are studied and discussed. Finally, the suggestions for the further development of fault indicator technology are given.

Key words: fast restoration; feeder automation; fault location; fault indicator; fault criterion; power supply; communication

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0040-04

0 引言

近几年,随着电网结构的发展和人民群众对供电质量要求的不断提高,国家和行业对配电网的建设与运行逐渐重视,并开始了配电网自动化试点建设。配电网故障复电是影响供电可靠性和客户满意度的关键因素,是客户、社会衡量供电企业管理水平和服务理念的重要标准。

配电网故障快速复电包括:故障快速报告、快速诊断、快速定位、快速隔离、非故障段快速复电和故障快速修复。根据分析,故障定位和故障隔离时间约占总故障停电时间的33%,利用技术手段减少故障定位和故障隔离时间是提高配电网故障快速复电效率的关键。

2010年,广东电网公司启动了配电网快速复电机制建设,在技术、流程等6个领域提出具体工作要求,努力实现配电网故障的快速复电。提出了“以提高供电可靠率为总抓手,建立配电网故障快速复电”的工作机制,其中,以故障定位为主的馈线自动化技术是实现快速复电工作的关键举措。

1 故障定位模式探讨

1.1 故障定位模式的选择

配电网故障定位系统是通过安装故障指示器装

置,在配电线路发生故障时,相关人员通过人工巡视或根据上报的故障信息,确定故障区域的系统。该系统仅仅在故障时起作用。

综合目前国内外的故障定位建设模式,大致可分为三类:就地显示的故障定位模式、带有通信功能的“一遥”故障定位模式、带有遥测功能的“二遥”故障定位模式。就地显示的故障指示器没有故障信息的远传功能,主要是通过就地显示功能减少人工巡线发现故障点的时间,后两种模式均带通信系统,是目前主要应用模式,具有便于升级为三遥的优点。

以故障指示器为基础的“一遥”故障快速定位系统能实现故障点的快速、准确定位,节约大量的故障查找时间,是一种最经济实用的方案。可广泛应用于一般供电网络的架空、电缆线路。

以故障指示器自动检测短路故障和接地故障的功能为基础,在此基础上增加通讯功能,可以将故障指示器的动作状态发送到故障监控中心或配电自动化子站,同时也可接入已有配电自动化系统后台,在监控中心的后台系统地理图上或主接线图上直接定位故障点,同时将定位结果以手机短信的形式分组发送给相应的管理人员和运行维护人员的手机上。大大提高了故障指示器定位故障的自动化程度和故障处理效率,是一种最经济实用的自动化方案。故障指示器的通信可以采用 GSM 网络的短信方式、GPRS 或者 CDMA 等公共通讯平台进行通讯,也可在这一平台上申请 VPN 等专网数据服务,保证通讯

网络的信息安全,这两种方式均无需专门建设和维护通讯通道。

以故障指示器为基础的“二遥”故障快速定位系统是在“一遥”方案的基础上增加了负荷电流、开关状态遥信等检测功能,满足大多数配电网运行需要,不需要一次设备进行改造,实施难度小,整体性价比高。普遍适用于不易改造的电缆线路设备:环网柜、分支箱、箱式变电站和配电房。

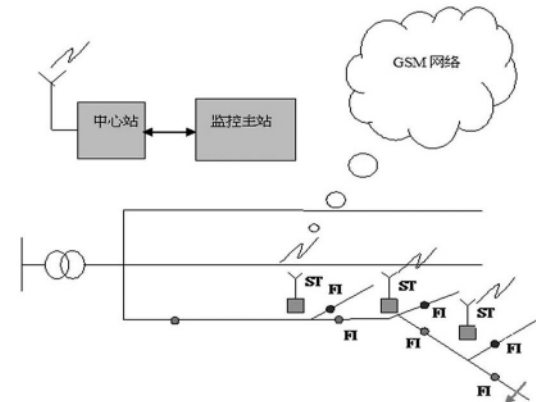


图 1 带通信功能的故障定位系统示意图

1.2 故障指示器的故障判据

故障指示器的判据应该考虑全面,以减少拒动作和误动作的可能性。下面是过负荷跳闸的线路情况,故障指示器需要正确判断,以防止误动。其中的电流值和其持续时间应该根据各地区的线路和负荷情况具体设置,见表 1。

其他有可能使指示器拒动的线路情况如表 2 所示。

表 1 可能引起误动的线路情况

线路工况	描 述
正常负荷波动	线路正常运行过程中负荷存在一定幅度的波动,在线路正常分闸停电时不得引起故障指示器误动。
大负荷投切	电力线路上所带的大功率负载投切过程中,如果线路仍在带电运行,其所产生的电流突变不得引起故障指示器误动。
过负荷跳闸	当电力线路因所带负载过大,导致过负荷跳闸时,其线路上安装的故障指示器不得误动。
负载电源	当电力线路发生短路故障跳闸停电时,线路上所带的大功率旋转动力负载转变为短时电源向故障点反送电,所形成的突变电流不得引起故障指示器误动。
涌流	电力线路在初上电时的充电电流和负载励磁涌流所产生的电流突变不得引起故障指示器误动作。

表 2 可能引起拒动的线路情况

线路工况	描 述
过流保护	当电力线路发生非金属性短路或线路末端短路导致过流跳闸时,故障指示器应正常动作。
区外故障	当电力线路发生区外故障导致较长时间过流跳闸时,故障指示器应正常动作。
速断保护	当电力线路发生短路故障导致速断保护动作或熔断器保护快速熔断时,故障指示器应正常动作。
重载线路故障	当大负荷线路发生短路故障导致过流跳闸或速断跳闸时,故障指示器应正常动作。
空载线路故障	当空载(或较小负载)线路发生短路故障导致过流跳闸或速断跳闸时,故障指示器应正常动作。

2 故障定位关键技术

2.1 故障定位系统的取电技术

2.1.1 故障指示器取电

故障指示器取电,主要有两种取电方式:太阳能电池板方式和线圈取电方式。

太阳能电池板方式是直接在故障指示器上加装小型太阳能板,但考虑到故障指示器的体积较小,而且需要专用的工具带电挂装,其结构较难处理,在现实的使用中不好操作。

线圈取电方式下,为了方便挂接故障指示器,都是采用结构简单的硅钢片。这种方式导致线圈不能完全闭合,漏磁严重,磁能转换的效率低,线路的负载要达到 10 A 以上才能正常工作。而架空线的分布广泛,很多支线的电流达不到 10 A,这种结构的故障指示器就不能完全覆盖整条线路。而且在需要检测电流上传后台,两遥方案时,精度过低不能达到要求。

采用高精度线圈,需要重新设计故障指示器的外形和结构,故障指示器采用双磁芯 TA,一组检测故障电流,一组专门用于取电,在安装完全正确的情况下,线路上只需要 2 A 的负载电流就可正常工作,而且测量精度达到 1%,能满足两遥的要求。

2.1.2 通信终端取电

由于通信终端是通过抱箍固定在高压杆上,它的体积和结构不会受到太大限制,取电相对简单。现在最常用最成熟的取电方案时使用太阳能电池板

供电,配备大容量充电锂电池。在夜晚或阴雨天气时,由电池供电。电池在充足电后的情况下,可以维持子站连续 15 d 工作而不需补充能量。在日照不是太充足的地方,为进一步确保电源的可靠性,可以考虑加装风能发电装置。

2.2 故障定位系统的选点技术

故障指示器在架空线的布置原则,是在主干线上分段安装,同时在每个线路的分支点安装,这样能在故障发生时有效区分故障区域。通信终端起的仅是传递信息的作用,其位置和数量直接由故障指示器的位置决定;它们之间常用的通信方式是通过 2.4 G 或 433 MHz 频段,通信距离有限。前者最多只有几十米,后者由于功耗所限只有 1 ~ 200 m。在实际应用中,基本上是一套故障指示器配一个通信终端,而通信终端的成本是故障指示器的 2 ~ 3 倍。所以作为中转信息的通信终端,应该是数量越少越好。要减少通信终端的数量,就要增加通信终端与故障指示器之间的通信距离,使一个终端尽可能与更多故障指示器通信。

2.3 故障定位系统的通信技术

目前的配电网自动化系统中,普遍采用 GPRS 公网无线技术作为主站与终端之间的数据传输技术,除了无线公网的安全性问题之外,GPRS 通信业务一般采用按流量计费的方式收取月套餐费,超出套餐内的流量限制后资费快速上升,当终端数量上千甚至上万的时候,每个月需要交给电信运营商的流量费用是惊人的。

表 3 若干配电网自动化项目中 GPRS 通信
业务的收费方式

项目名称 /地区	收费方式
北京配电网 自动化项目	12 元/月,包 50 MB 流量,超出部分 0.01 元/KB,500 元封顶
深圳配电网 自动化项目	28 元/月,包 50 MB 流量,超出部分 0.01 元/KB,500 元封顶
广州配电网 自动化项目	15 元/月,包 10 MB 流量,超出部分 0.01 元/KB,500 元封顶

因此,结合 2.2 中最优选点的原则,当大规模地进行故障定位系统建设的时候,需要考虑的一个重要问题就是远程通信终端的成本和每月的运营费用问题,如何选择合适的通信组网模式,使得故障定位系统的经济性与通信可靠性并重,是目前的一个技术难点。

传统的组网方案:架空故障指示器内置 2.4 G 通信模块,通过短距离无线编码信号与通信终端架空子站通信,通信距离在 3 ~ 10 m 之间。通信终端一般安装在线路分支点处,它只能接收两套故障指示器的编码信息,收到的动作信息通过处理后,经过地址编码和时序控制,通过 GSM 通信装置发送给中心站。

由于故障指示器与通信终端的通信距离有限,一个通信终端最多只能覆盖两个故障检测点,一条典型 10 kV 线路按主干线加分支线共 30 个故障检测点计算,必须至少配备 $15 + 3 = 18$ 台通信终端,其中 3 台为冗余配置。

改进的组网方案:目前有技术采用长、中、短距离相结合的通信组网模式,若干套(每套含 A、B、C 三相)故障指示器通过中距离 RF490 信道与单模式通信终端进行信息交互,按照配电线路的结构走向,每两个单模式通信终端之间放置一个双模式通信终端,单模式通信终端与双模式通信终端通过 RF490 信道通信,最后由多模式通信终端通过 GSM/GPRS 无线通信方式发送至远方监控中心。

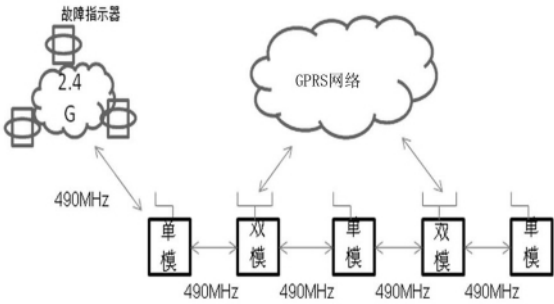


图 2 故障定位系统新型通信组网模式示意图

通过中距离 490 MHz 的无线单模基站的数据汇聚和转发,可以大大减少双模通信基站的数量,仅需要 10 台左右的基站,其中单模和双模交替分布,可大大降低通信系统的建设费用和后期的公网无线通道运营费用。

该方案存在的问题:通信模式的混合采用,导致了通信可靠性的不足,实际运行中通信通道发生故障的问题较多,而且也较难排查出故障点,给运行维护带来较大问题;另外,该种方案扩展性不强,每次有新的故障监测点加入的时候,都要求通信通道进行相应的扩展。

因此,如何进行更合理地布点和组网,使得在以可靠性为基本的同时,能够兼顾到建设与运维的经

济性,以及系统后期的可扩展性,是需要进一步深入研究的问题。

3 结 语

故障定位系统直接减少故障定位时间、故障隔离时间,与其他模式比较具有明显的经济性,适合处在配电自动化建设起步阶段的地区使用。故障指示器是故障定位系统的核心部件,目前仍需在故障判

据、取电和通信等技术问题上进一步发展完善。

参考文献

- [1] 秦丝,胡厚欲. 电缆故障指示器的应用经验 [J]. 广东输电与变电技术, 2008, 4(12): 49-52.
- [2] 袁钦成. 配电系统故障处理自动化技术综述 [J]. 电力设备, 2007, 8(12): 1-5.

(收稿日期:2012-02-13)

(上接第10页)

时,异步风力发电机对电网发出无功功率。在风速突变时刻,对应双馈式风机和直驱风机均有向电网吸无功的趋势,且直驱风机较明显。

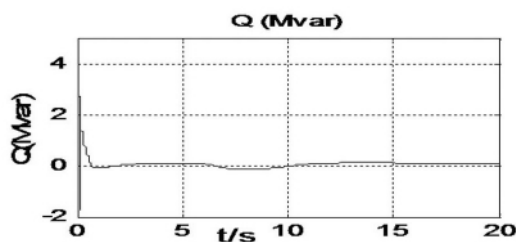


图16 双馈式异步风力发电机组无功功率

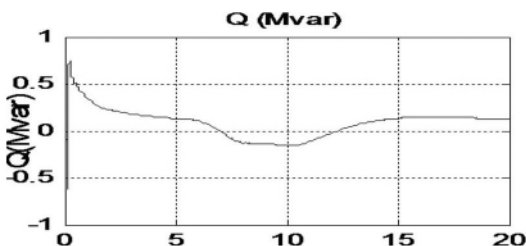


图17 直驱风力发电机组无功功率

从仿真结果图形中,对比可知在引入同一突变风速,对同一接入电网时,电压方面,双馈式风力发电机组和直驱风电机组电压波动较小,对电压影响较小。电流方面,双馈式异步风力发电机组和直驱风力发电机组电流均随风速增大而增加,异步风电机组在保护动作前也是电流随风速增大而增大。相较直驱风电机组对风能利用率较高。

针对的是等值风电场,风电场的容量相对较小,在实际中,风电场的容量将是数十倍、数百倍的容量。当在此类的风电场风速突变时,将形成的效果和影响会更大。

4 结 论

(1) 由文中的动态仿真结果,基于风电场风速年突变率和风电场对接入电网的影响及对自身的安

全,在建设的风电场中,要考虑当风速年突变率较高时,基于电压、电流、有功、无功波动和风能利用率考虑时,应选直驱式风力发电机型,其电压在风速突变时较缓和,对此时的风能利用率较高。

(2) 异步风电机组在风速突变(风速突增)时,电压下降,当风速突变到某一值时,由于电压低于风力机低电压保护整定值,继电器动作,切除该风电场,这将对电网安全造成很大的影响。例如2011年4月甘肃酒泉某风电场由于低电压穿越能力不行,风电场解列,对西北电网造成巨大影响。风电场的异步风力发电机组应注重在风速突变时,风电机组的电压跌落问题。

参考文献

- [1] 范高峰,于德龙,任普春,等. 变动风速作用下风电场对电网电压的影响 [J]. 电网技术, 2006, 30(4): 231-233.
- [2] 汤宏,吴俊玲,周双喜. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 38-41.
- [3] 崔杨,穆钢,刘玉,等. 风电功率波动的时空分布特性 [J]. 电网技术, 2011(2): 110-114.
- [4] 叶杭治. 风力发电系统的设计、运行与维护(第一版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 90-94, 183-187.
- [5] 张志英,赵萍,李银凤,等. 风能与风力发电技术(第二版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 65-73, 290-299.
- [6] 吴学光,张学成,印永华,等. 异步风力发电系统动态稳定分析的数学模型及其应用 [J]. 电网技术, 1998, 22(6): 68-72.

作者简介:

罗庆(1987),男,硕士研究生,研究方向为洁净能源与并网技术;

晁勤(1959),女,教授,博士生导师,主要从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究和教学;

袁铁江(1976),男,讲师,博士研究生,研究方向为风力发电及其并网技术。

(收稿日期:2012-02-22)

基于连续潮流的静态分岔点追踪方法

李 林 刘 玲

(德阳电业局变电检修中心, 四川 德阳 618000)

摘 要:静态电压稳定性分析中,主要有两类分岔:鞍结分岔和极限诱导分岔,并以当前运行点离分岔点间的负荷距离评估电压的稳定裕度。对发电机无功受限后出现的无功/电压约束转换和极限诱导分岔现象进行了分析,并采用了发电机无功极限值引导变步长的连续潮流方法,对鞍结分岔点和极限诱导分岔点进行了搜索,继而利用潮流雅可比矩阵特征值的符号变化进行识别。该方法应用于 IEEE 39 节点测试系统,取得了比较理想的效果,从而验证了该方法的正确性和有效性。

关键词:静态电压稳定;连续潮流;鞍结分岔;极限诱导分岔;无功/电压约束转换

Abstract: There are two types of bifurcations: saddle-node bifurcation and limit-induced bifurcation in the static voltage stability analysis, and the voltage stability margin is assessed according to the distance between the current operating point and the bifurcation point. The phenomenon of reactive power/voltage constraint exchange and limit-induced bifurcation after reactive power of generator is limited is analyzed. The continuation power flow method is proposed in which reactive power limit is guiding the variable step size to search saddle-node bifurcation point and limit-induced bifurcation point, and then the symbol changes of Jacobian matrix eigenvalues are used to identify voltage stability point. The desired results obtained with the proposed method after being applied to IEEE 39 bus test systems demonstrate the correctness and validity of this method.

Key words: static voltage stability; continuation power flow; saddle-node bifurcation; limit-induced bifurcation; reactive power/voltage constraint exchange

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2012)03-0044-04

电力市场化改革以后,经济的快速增长,投入系统的设备增长迅猛,同时电力网络的发展相对滞后,很多地方的电网都经常运行在极限状态,可能遭受电压稳定的威胁^[1]。静态电压稳定分析能判断电力系统有多大的静态电压稳定裕度并指出采取何种合适的控制措施使电力系统运行在安全裕度之内^[2]。

在电力系统静态电压稳定性分析中,电压崩溃点是与静态分岔点相联系的。电力系统中主要有两种静态分岔点:鞍结分岔点(saddle-node bifurcation point, SNBP)和极限诱导分岔点(limit-induced bifurcation point, LIBP)。前者对应潮流雅可比矩阵的奇异点;后者则是由于某发电机节点的无功出力达到极限而导致系统稳定平衡点忽然消失^[3]。因此,只有准确搜索和识别这两类分岔点,才能准确地计算系统的电压稳定裕度,进而准确地计算在该分岔点处各种控制变量对于稳定裕度的灵敏度信息,从而进行预防控制^[4]。求取电压静态分岔点的算法主要有连续潮流法^[5-7]、崩溃点直接算法^[8-10]、

最优潮流算法^[11-13]。

文献[1]利用连续潮流法和崩溃点法的混合方法对极限诱导分岔点和鞍结分岔点进行了识别和计算。文献[4]利用预测-校正方法快速穿越电压崩溃临界点的方法来搜索。文献[15]采用触发条件和两个检测条件的判断准则,对结构变化点进行检测,从而判断极限诱导分岔点的存在。这3篇文献中都提到利用最优步长的方法来计算,但是都没有告诉具体的方法。这里采用发电机无功极限值引导变步长的连续潮流法来搜索静态分岔点,继而利用雅可比矩阵特征值的符号变化进行识别。该方法应用于 IEEE 39 节点测试系统,显示了该方法的正确性和有效性。

1 连续潮流的数学模型

一般,在静态输电计算中,极坐标系统下的潮流方程可用式(1)表示为

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (1) \\ Q_{\min,i} \leq Q_{Gi} \leq Q_{\max,i}, V_i = V_{si} \end{cases}$$

式中, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为节点 i 的发电机有功和无功出力; $Q_{\min,i}$ 、 $Q_{\max,i}$ 为发电机的最小和最大无功极限值; P_{Li} 、 Q_{Li} 为节点 i 负荷的有功和无功; V_i 、 V_{si} 是节点 i 的电压幅值和节点 i 的标准电压幅值; θ_{ij} 是节点 i 和节点 j 的电压相角差值; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的网络导纳矩阵的实部和虚部。

若用 λ 表示发电机和负荷的增长参数, 即为负荷因子; n_{Gi} 、 n_{PLi} 分别表示发电机和负荷有功增长的方向向量; n_{QLi} 表示负荷无功增长的方向向量。则有

$$\begin{cases} P_{Gi} = P_{Gi0} (1 + \lambda n_{Gi}) \\ P_{Li} = P_{Li0} (1 + \lambda n_{PLi}) \\ Q_{Li} = Q_{Li0} (1 + \lambda n_{QLi}) \end{cases} \quad (2)$$

由于引入变量 λ , 使潮流方程的未知数比方程数多一个, 为了使未知数的个数和方程数相同, 避免潮流雅可比矩阵奇异, 此时需要增加一维参数化方程。

连续潮流主要由 4 部分组成: 预估、校正、参数化和步长控制。具体步骤不再叙述, 详情请参考文献 [6]、[7]。

2 发电机无功受限后现象分析

在实际潮流计算中, 发电机的无功并不是不变的。当发电机的无功始终维持在最小值与最大值之间范围内时, 潮流雅可比矩阵在最大功率传输点奇异, 其静态分岔类型为鞍结分岔 (saddle-node bifurcation, SNB); 当发电机的无功越限时, 系统中 PV 节点的无功功率达到极限将保持不变, 而节点电压发生跌落现象, 在潮流方程中发电机节点由 PV 节点类型转化为 PQ 节点类型, 潮流方程中 Q_{Gi} 取值如下。

若 $Q_{Gi} \leq Q_{\min,i}$ 时, $Q_{Gi} = Q_{\min,i}$, $V_i \leq V_{si}$

若 $Q_{Gi} \geq Q_{\max,i}$ 时, $Q_{Gi} = Q_{\max,i}$, $V_i \leq V_{si}$

此时, 系统可能发生两种现象: 无功/电压约束转换 (constraint exchange point, CEP) 和极限诱导分岔 (Gmit-induead bifurcation, LIB)。

2.1 无功/电压约束转换

CEP 对应的分岔图如图 1 所示。图中, 点 A 为系统初始运行点, 此时发电机无功没有越限。随着负荷的增加, 当发电机无功达到极限 (B 点) 时, 系统的结构发生突然变化, 运行点从 $Q_{Gi} \leq Q_{\max,i}$ 曲线的上半分支转化到 $Q = Q_{\max,i}$ 曲线的上半分支运行, 此时系统是稳定的。如果再增加负荷, 系统将运行到 C 点, 就会发生 SNB 而导致电压崩溃。对于 B 点来讲, 是一个

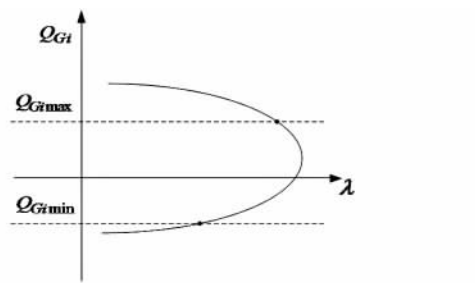


图 1 无功/电压约束转换

2.2 极限诱导分岔

LIB 对应的分岔图如图 2 所示。图中, 点 A 为系统初始运行点, 此时发电机无功没有越限。随着系统负荷的增加, 当发电机无功达到极限 (B 点) 时, 运行点突然从 $Q_{Gi} \leq Q_{\max,i}$ 曲线的上半分支转化到 $Q_{Gi} = Q_{\max,i}$ 曲线的下半分支运行, 形成一个不同于 C 点 (SNBP) 的尖点形状, 系统的结构突然改变导致了电压崩溃。对于 B 点来讲, 是一个不稳定的运行点, 这就是 LIBP。

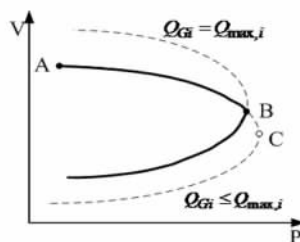


图 2 极限诱导分岔

3 静态分岔点的追踪

3.1 静态分岔点的搜索

搜索方法通常用常规连续潮流法, 从起始点开始逐个搜索。这样的话, 一方面降低了算法的效率, 另一方面, 如果连续潮流法的步长过大的话, 多台发电机都穿越了分岔点。因此, 要用尽可能少的步数达到和穿越分岔点, 从而可以把分岔点限制在一个较小的范围内, 为精确识别做好准备。

于是采用发电机无功极限值引导变步长连续潮

流法来搜索分岔点。当发电机无功没有越限时,采用较大步长的非线性预估,当发电机快要达到无功极限时,采用较小的步长,避免多台发电机在相邻短时间内先后越限。具体步长控制策略如下。

式(1)中发电机的无功功率 Q_{Gi} 可以如下描述。

$$Q_{Gi} = V_i \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \alpha_{ij}) + Q_{Li} \quad (3)$$

式中, Y_{ij} 和 α_{ij} 是导纳矩阵在极坐标下的元素。对于一个特定的电力系统,导纳矩阵是一定的,所以 Y_{ij} 和 α_{ij} 是个常数。对于发电机节点来说 V_i 也是个常数,如果电力系统在正常条件下运行,相角差 θ_{ij} 通常很小,所以,式(3)中的正弦函数接近于常数,描述如下。

$$\sin(\theta_{ij} - \alpha_{ij}) \approx \sin(-\alpha_{ij}) \quad (4)$$

从式(3)中可以看出电压幅值 V_j 是唯一的变量,即发电机的无功功率 Q_{Gi} 是关于电压幅值 V_j 的函数,这样可以简化式(3)如下。

$$Q_{Gi} \approx KV + Q_{Li} \quad (5)$$

式中, $K = [k_1, k_2, k_3, \dots, k_n]$ 是线性系数矩阵, $V = [V_1, V_2, V_3, \dots, V_n]^T$ 是系统的电压幅值矩阵。从式(5)可以看出 V_i 与 Q_{Gi} 成线性关系。负荷因子 λ 与电压幅值 V_i 接近于平方关系^[8], 所以负荷因子 λ 与发电机的无功功率 Q_{Gi} 也接近于平方关系。关系示意图如图3所示,表达式描述如下。

$$\lambda = a_i Q_{Gi}^2 + b_i Q_{Gi} + c_i \quad (6)$$

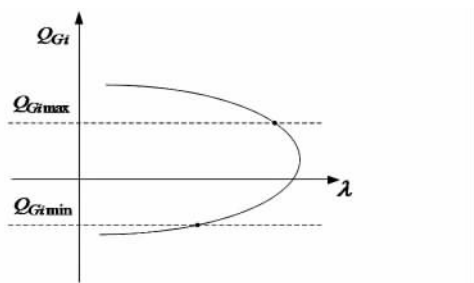


图3 负荷因子 λ 与发电机无功 Q_{Gi} 的关系

如果知道式(6)的3个解,根据二阶拉格朗日插值就可以得出系数 a_i 、 b_i 和 c_i 。当发电机的无功到达极限,把上限 Q_{Gimax} 和下限 Q_{Gimin} 代入式(6),可以得到发电机无功越限时相应的负荷因子。

$$\lambda_{q \max}^i = a_i Q_{Gimax}^2 + b_i Q_{Gimax} + c_i \quad (7)$$

$$\lambda_{q \min}^i = a_i Q_{Gimin}^2 + b_i Q_{Gimin} + c_i$$

取 $\lambda_q = (\lambda_{q \max}^i, \lambda_{q \min}^i)$ 。假设系统目前的运行点 (x_0, λ_0) , 如果 λ_q 大于负荷因子 λ_0 , 连续潮流的步长 $h = \lambda_q - \lambda_0$, 使系统从 (x_0, λ_0) 到下一个运行点 (x_q, λ_q) 。然后进行识别,若不是分岔点就采用小步长进行搜索;若是分岔点就采用相同方法搜索下个

分岔点。

3.2 静态分岔点的识别

分岔点可根据静态分岔类型的特点进行识别。SNB的特点是,雅可比矩阵有零特征值出现; CEP的特点是,在无功/电压约束转换过程的前后,雅可比矩阵的所有特征值仍在左开半平面; LIB的特点是,在发生分岔之前,雅可比矩阵的所有特征值仍在左开半平面,而在发生分岔之后,雅可比矩阵的最小特征值跳跃到右开半平面。

3.3 追踪分岔点的步骤

- 1) 采用连续潮流法计算出3个运行点,获得 λ 与 Q_{Gi} 值;
- 2) 利用二阶拉格朗日插值法获取式(6)的系数 a_i 、 b_i 和 c_i ;
- 3) 利用式(7)计算出发电机无功越限后的 λ_q 值,从而计算出连续潮流的步长 h ;
- 4) 利用连续潮流法进行预估、校正,得到潮流解;
- 5) 对潮流解进行识别,若不是分岔点就采用固定小步长进行搜索,执行上一步;若是分岔点则搜索成功,把PV节点转化为PQ节点,执行第二步,进行下一个点的搜索。

4 算例分析

下面以IEEE 39节点测试系统对采用的方法进行了验证。仿真中所有的负荷和发电机的有功按同一比例 λ 增长,负荷为恒功率模型,并且保持功率因数不变。发电机无功功率取值范围如表1所示,其中Bus_38发电机的最大无功功率 $Q_{\max}$ 有两个值,对应两种不同的模式。

表1 发电机无功功率取值范围

节点号	$Q_{\min}$	$Q_{\max}$	节点号	$Q_{\min}$	$Q_{\max}$
Bus_30	-0.45	0.45	Bus_35	-0.18	0.18
Bus_31	-10.0	10.0	Bus_36	-3.2	3.2
Bus_32	-9.0	9.0	Bus_37	-8.0	8.0
Bus_33	-9.0	9.0	Bus_38	-1.5	1.5/0.32
Bus_34	-9.9	9.9	Bus_39	-0.52	0.52

模式1: Bus_38的 $Q_{\max} = 1.5$ 。Bus_6的PV曲线如图4所示。随着负荷因子的增加,系统的初始运行曲线为曲线1,某一发电机到达无功受限点A

后,系统的潮流方程发生了突变,运行曲线变化到曲线2。接着发电机无功受限点依次为B、C、D,运行曲线对应依次变化为曲线3、4、5,随着负荷因子的进一步增加,系统运行到E点,发生电压崩溃。

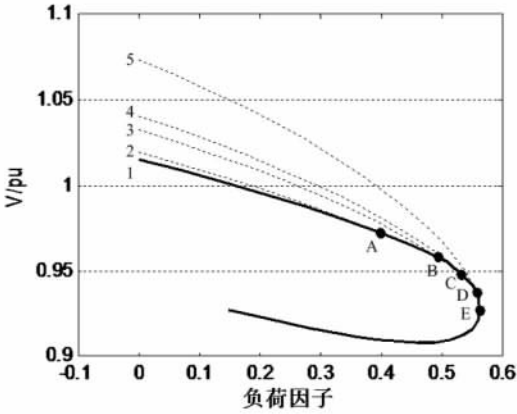


图4 模式1下Bus₆的PV曲线图

图4中,A、B、C、D、E对应的识别结果如表2所示。从表中可以看出在受限点A、B、C、D潮流雅可比矩阵特征值符号都是从负变化到负,即潮流雅可比矩阵的所有特征值仍在左开半平面,系统仍然稳定。在受限点E负荷达到最大,潮流雅可比矩阵特征值从符号为负变化为零,此时对应电压稳定临界点。所以模式1下的电压崩溃是由于鞍结分岔所致。

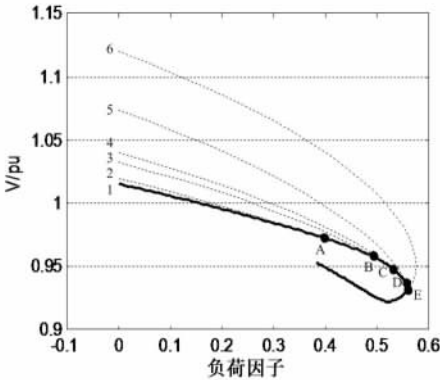


图5 模式2下Bus₆的PV曲线图

表2 模式1下测试系统的识别结果

编号	V_6	λ_6	受限 母线	特征值 的变化	识别 结果
A	0.972 9	0.398 6	Bus ₃₅	负 -> 负	CEPs
B	0.958 6	0.493 4	Bus ₃₆	负 -> 负	CEPs
C	0.948 2	0.533 1	Bus ₃₀	负 -> 负	CEPs
D	0.937 7	0.557 4	Bus ₃₉	负 -> 负	CEPs
E	0.927 7	0.563 0	-	负 -> 零	SNBP

模式2: Bus₃₈的 $Q_{\max}=0.32$ 。Bus₆的PV曲

线如图5所示。随着负荷因子的增加,发电机的无功功率受限点依次为A、B、C、D、E,各点对应的识别结果如表3所示。

表3 模式2下测试系统的识别结果

编号	V_6	λ_6	受限 母线	特征值 的变化	识别 结果
A	0.972 9	0.398 6	Bus ₃₅	负 -> 负	CEPs
B	0.958 6	0.493 4	Bus ₃₆	负 -> 负	CEPs
C	0.948 2	0.533 1	Bus ₃₀	负 -> 负	CEPs
D	0.937 7	0.557 4	Bus ₃₉	负 -> 负	CEPs
E	0.932 0	0.561 7	Bus ₃₈	负 -> 正	LIBP

从图5和表3可以看出在受限点A、B、C、D潮流雅可比矩阵特征值符号都是从负变化到负,即潮流雅可比矩阵的所有特征值仍在左开半平面,系统仍然稳定。在受限点E负荷达到最大,潮流雅可比矩阵特征值符号从负变化到正,即在发生分岔之前,潮流雅可比矩阵的所有特征值仍在左开半平面,而在发生分岔之后,潮流雅可比矩阵的特征值跳跃到右开半平面,此时发生电压崩溃。所以模式2下的电压崩溃是由于极限诱导分岔所致。

5 结 论

对发电机无功受限后出现的无功/电压约束转换和极限诱导分岔现象进行了分析,并采用了发电机无功极限值引导变步长的连续潮流法,对静态电压稳定分析中两类主要的分岔点进行了搜索,继而利用潮流雅可比矩阵特征值的符号变化进行识别。通过IEEE 39节点测试系统的算例分析,取得了理想的效果,表明了该方法的正确性和有效性。本方法可以提供系统可能的电压崩溃方式,这对电力系统运行人员进行预防控制具有非常重要的指导意义。

参考文献

- 王冰,游振华,韩学军,等. 考虑负荷静态电压特性的重负荷节点静态电压稳定分析[J]. 继电器,2007,35(11):21-25.
- 李娟,陈继军,司双. 连续潮流与免疫遗传算法结合的静态电压稳定裕度计算[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(18):24-27.

(下转第81页)

- [4] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
- [5] 胡学浩. 智能电网——未来电网的发展态势 [J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.
- [6] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网 [J]. 中国电力, 2008, 41(6): 19-22.
- [7] 中国国家电网公司智能电网部. 高压设备智能化技术分析报告 [R]. 北京: 中国国家电网公司, 2009.
- [8] 傅书遍. 中国智能电网发展建议 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 23-26.
- [9] Ipakchi A, Albuyeh F. Grid of the Future [J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2009, 7(2): 52-62.
- [10] 钟金, 郑睿敏, 杨卫红, 等. 建设信息时代的智能电网 [J]. 电网技术, 2009, 33(13): 12-18.
- [11] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 10-15.
- [12] The National Energy Technology Laboratory. A Systems View of the Modern Grid [R/OL]. [2007-01-22]. <http://www.netl.doe.gov/mordemgrid>.
- [13] The National Energy Technology Laboratory. The Mod-

ern Grid Initiative. Pittsburgh, PA, USA: NETL, 2007.

- [14] 林宇锋, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8-14.
- [15] Novosel D. Emerging Technologies in Support of Smart grids [C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2008.

作者简介:

拉贵(1978), 男, 助理工程师, 主要从事高电压绝缘技术研究;

米玛次仁(1970), 男, 助理工程师, 主要从事高电压设备现场试验技术研究;

扎西曲达(1985), 男, 助理工程师, 主要从事电力变压器技术研究;

尼玛石达(1979), 男, 助理工程师, 主要从事高压开关设备技术研究;

贡嘎罗布(1987), 男, 助理工程师, 主要从事高电压设备防雷技术研究。

(收稿日期: 2012-03-23)

(上接第47页)

- [5] Canizares C. A., Mithulananthan N., Berizzi A., et al. On the Linear Profile of Indices for the Prediction of Saddle-node and Limit-induced Bifurcation Points in Power Systems [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50(12): 1588-1595.
- [6] 马冠雄, 刘明波, 王奇. 一种识别静态电压稳定分岔点的混合方法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 17-20.
- [7] Ajarapu V., Christy C. The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [8] Feng Z., Ajarapu V., Long B. Identification of Voltage Collapse Through Direct Equilibrium Tracing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 342-349.
- [9] Yorino N., Li Huaqiang, Sasaki H. A Predictor/corrector Scheme for Obtaining Q-limit Points for Power Flow Studies [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 130-137.
- [10] Canizares C. A., Alvarado F. L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 1-8.
- [11] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压崩溃临界点计算的改进零特征根法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 63-66.
- [12] Rosehart W. D., Canizares C. A., Quintana V. H. Multiobjective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Cost in Power Networks [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 578-587.

- [1] Irisarri G. D., Wang X., Tong J., et al. Maximum Load Ability of Power Systems Using Interior Point Non-linear Optimization Method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 162-172.
- [2] 韦化, 丁晓莺. 基于现代内点理论的电压稳定临界点算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 27-31.
- [3] 李华强, 刘亚梅, YORINO N. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56-60.
- [4] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种静态电压稳定临界点的识别和计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 28-32.
- [5] 熊宁, 程浩忠, 马则良, 等. 基于连续潮流的极限诱导分岔检测方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 35-38.
- [6] 徐晓春, 万秋兰, 顾伟, 等. 在线电压稳定分析中快速连续潮流的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 37-41.
- [7] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [8] Antonio C. Z. de Souza, Claudio A. Canizares, Victor H. Quintana. New Techniques to Speed up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1380-1387.

作者简介:

李林(1984), 男, 硕士, 从事电力系统稳定运行与控制方面的研究。

(收稿日期: 2012-01-11)

TCSC 次同步谐振阻尼控制器设计

王 敏, 康积涛, 李 康, 卢绍强

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 输电线路采用串联电容补偿存在引起电力系统次同步谐振的危险, TCSC 常用来解决这一问题。基于提升系统电气阻尼的思想, 设计了 TCSC 附加阻尼控制器, 该控制器针对分模态控制方法存在的不足进行了改进。基于 IEEE SSR 第一标准测试模型的分析表明改进后的控制器能将系统在几乎整个次同步频段内的电气阻尼提高为正, 从而消除了该频段内的 SSR 危险。

关键词: TCSC; 次同步谐振; 附加次同步阻尼控制器; 相位补偿; 电气阻尼

Abstract: Subsynchronous resonance (SSR) is a potential danger to power system with series capacitors compensated in transmission lines, so thyristor-controlled series capacitor (TCSC) has always been used to solve the problem. Based on the idea of enhancing system damping, a supplementary subsynchronous damping controller of TCSC is designed, which improves the shortcomings of the sub-modal control method. The simulations carried out on the first benchmark model of the modified IEEE SSR show that the damping controller can increase the electrical damping of almost the whole SSR frequency band to the positive level, that is, the risk of SSR in that frequency band can be mitigated.

Key words: thyristor-controlled series capacitor; subsynchronous resonance; supplementary subsynchronous damping controller; phase compensation; electrical damping.

中图分类号: TM721.4 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0048-04

输电线路中引入串联电容补偿, 在增加输电经济效益的同时会引起电力系统的稳定运行问题。当采用了串补的输电系统中的汽轮发电机组受到扰动时, 就会因网机耦合而彼此互激, 发生次同步谐振 (subsynchronous resonance, SSR), 导致发电机轴系扭振, 严重时造成发电机轴系损坏, 破坏电力系统的安全稳定运行。

国内外对次同步谐振的抑制措施进行了广泛而深入的研究, TCSC、SVC 等 FACTS 装置在次同步谐振的抑制研究上也受到了充分的重视。在研究使用 TCSC 抑制次同步谐振方面, 国内外学者已经进行了大量的研究^[1-3]。文献[4]的计算表明, TCSC 在一定的导通角下, 具有正电阻特性, 从而可以缓解次同步谐振; 文献[5]提出了 TCSC 主动阻尼控制, 通过对 TCSC 的触发调制, 提升系统电气阻尼来抑制危险模式的振荡。文献[6]基于 TCSC 设计了一宽带通单通道 SSDC, 实现了将整个次同步频率范围的电气阻尼提升为正。

基于提升系统电气阻尼的思想, 在 TCSC 开环控制上附加次同步阻尼控制器。该控制器针对分模态控

制方式的不足进行了改进。基于 IEEE SSR 第一标准测试模型^[7]在 PSCAD/EMTDC 中使用测试信号法^[8], 分析了该控制器对系统电气阻尼的影响。结果表明, 加入该 SSDC 能将系统在几乎整个次同步频段内的电气阻尼提高为正, 即消除了该频段内的 SSR 危险。

1 TCSC 抑制 SSR 的基本原理

1.1 TCSC 运行原理

TCSC 的基本结构如图 1 所示, 由一个电容器和一个晶闸管控制电抗器 (TCR) 组成。

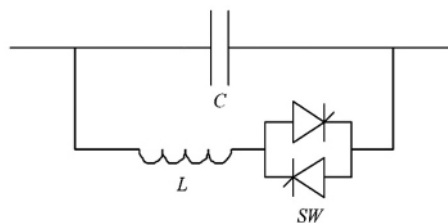


图 1 TCSC 基本模块

稳态运行时, TCSC 的等效基波电抗 X_{TCSC} 与触发角 α 的关系为

$$\begin{cases} X_{\text{TCSC}}(\alpha) = X_c - \frac{X_c^2(2\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha)}{\pi(X_c - X_L)} \\ \quad + \frac{4X_c^2 \cos^2 \alpha (\tan \alpha - k \tan k\alpha)}{\pi(k^2 - 1)(X_c - X_L)} \\ k = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, X_c 为电容器 C 的基波电抗; X_L 为 $\alpha = 90^\circ$ 时 TCR 的等效基波电抗; k 为 TCSC 主回路特征参数, 一般 $k^2 = 3.3 \sim 10$, 以使触发角 α 变化时, TCSC 只出现一个谐振点。

将 TCSC 电抗 X_{TCSC} 以 X_c 为基值进行标么化, 记 $X_{\text{net}} = X_{\text{TCSC}}/X_c$ 。

1.2 TCSC 抑制 SSR

由复转矩系数法可知, 在轴系的某一自然扭振频率附近, 若机械子系统所具有的正阻尼不足以抵消电气子系统所产生的负阻尼, 导致系统对该谐振频率的总阻尼系数小于 0, 则系统将会产生不稳定的次同步谐振^[8]。这里考虑将机械阻尼设为 0, 即考虑机械阻尼最差的情况, 这样在轴系的扭振频率附近, 电气阻尼为正即可保证系统 SSR 是稳定的。

电气阻尼定义为^[8]

$$De(\omega) = Re\left(\frac{\Delta T_e}{\Delta \omega}\right) \quad (2)$$

式中, ΔT_e 为发电机电磁转矩增量; $\Delta \omega$ 为发电机转速偏差。可见, 要使电气系统的阻尼为正, ΔT_e 与 $\Delta \omega$ 的相位差必须在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

发电机转速偏差 $\Delta \omega$ 包含了各个振荡模式分量, 因此常选作次同步阻尼控制器的输入信号。SSDC 提升阻尼的原理如图 2 所示, 其中 $\Delta \omega$ 为发电机转速偏差; $\Delta \alpha$ 为 TCSC 触发角增量; ΔT_{eDC} 为产生的发电机电磁转矩增量; $C(s)$ 为 SSDC 的传递函数, $G(s)$ 为 TCSC 触发角增量到 ΔT_{eDC} 的传递函数。

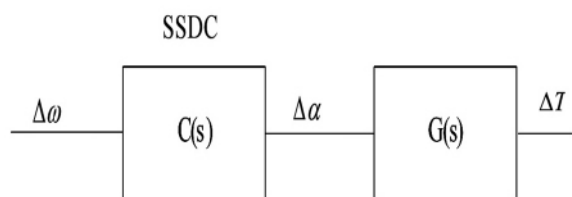


图2 加入 SSDC 提升阻尼的原理
添加 SSDC 后增加的电气阻尼为^[14]

$$De(\omega) = Re\left(\frac{\Delta T_{eDC}}{\Delta \omega}\right) Re[C(s) * G(s)|_{s=j\omega}] \quad (3)$$

设计 SSDC 基本目标就是通过恰当选择 $C(s)$ 的

参数, 使得模态频率附近, ΔT_{eDC} 与 $\Delta \omega$ 的相位差在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 最终实现将系统电气阻尼提升为正。

2 系统模型

测试模型是基于 IEEE 第一标准测试系统, 并将原系统中部分固定电容用可控串补代替, 线路的总串补度为 60%, TCSC 电抗为线路总电抗的 20%, 安装在线路末端, 如图 3 所示。TCSC 的主回路特征参数 k 取 2.5, 稳态触发角为 157.6° 。发电机轴系采用六轴段模型, 即包含 5 个扭振模式, 分别为 15.71 Hz、20.21 Hz、25.55 Hz、32.28 Hz、47.45 Hz。系统其他参数同文献^[7]。

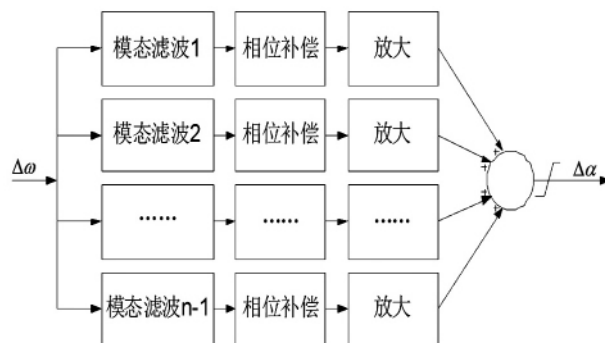


图3 测试系统模型

3 SSDC 设计

图 3 中测试系统具有 5 个扭振模式, 其中模式 5 由于其模态阻尼非常大, 一般不会发生网机扭振相互作用, 在控制器设计时不考虑对模式 5 的影响, 只针对前 4 个模式。

方案 1: 采用分模态控制。

采用分模态控制方式的 SSDC 如图 4 所示, 图中 n 表示轴段数, 记此控制器为 SSDC1。针对可能发生扭振的 4 个模式, 分别进行滤波、相位补偿及放大处理, 最终叠加、限幅成为控制器的输出, 即 TCSC 触发角的变化。这种控制器最大的优点是针对性强, 各分量间的影响小^[11], 缺点是可能削弱其他频率处的电气阻尼, 引起电网中其他发电机的轴系扭振。

方案 2: 改进模态控制。

分模态控制仅能改善系统在模态频率附近的电气阻尼。针对 SSDC1 存在的不足, 对其进行改进。设计的控制器结构如图 5 所示, 记此控制器为 SS-

DC2。其结构与SSDC1相同,差别在于滤波环节通带较宽。图中的 k ,即为控制器的支路数,与轴段数 n 没有必然的关系。根据系统的特点将次同步频率范围划分为数段,分段补偿相位,提升段内频率处的电气阻尼。各支路阻尼提升效果叠加最终实现将次同步频率的电气阻尼提升为正。

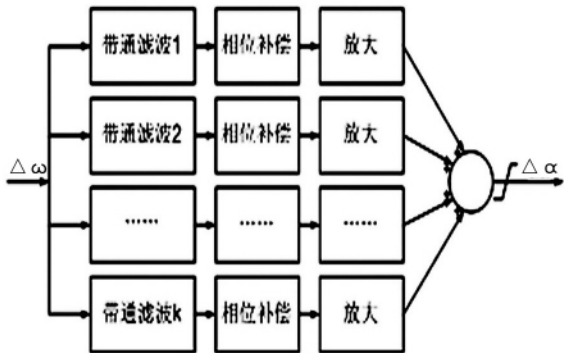


图4 分模态控制SSDC的结构

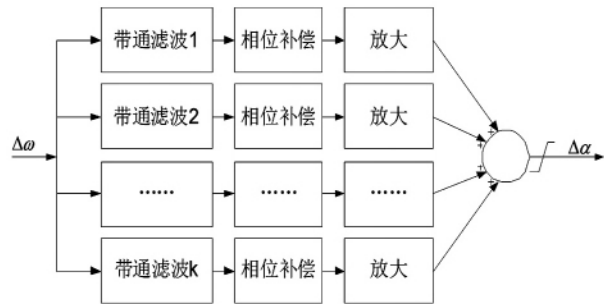


图5 改进模态控制SSDC的结构

各支路中相位补偿环节,补偿 $G(s)$ 及带通滤波引起的相位差。 $G(s)$ 的相位可通过测试信号法得到^[6,14],图6给出了 $X_{net}=1.2、1.25、1.3$ (触发电角分别为 $158.8^{\circ}、157.6^{\circ}$ 和 156.6°)时的 $G(s)$ 相位曲线,其中发电机运行状态为满载,功率因数等于0.9(滞后)。

相位补偿环节采用形如 $(1+saT)/(1+sT)$ 的超前(滞后)环节,当 a 大于1时为超前环节,小于1为滞后环节,其计算公式如下。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1 + \sin\varphi_m}{1 - \sin\varphi_m} \\ T = \frac{1}{\omega_m \sqrt{\alpha}} \end{cases}$$

式中, ω_m 为补偿点角频率; φ_m 为补偿点的相角,即最大超前(滞后)角。

SSDC1由于需要相位补偿的频率范围很窄,其相位补偿选择相对简单。将各自的补偿点分别设为各模态频率点,并选择合适的补偿角度即可。SSDC1参

数见表1。模式4附近频率由于相位滞后很小,故不设置相补环节。各个模式的滤波及相补环节如表1。

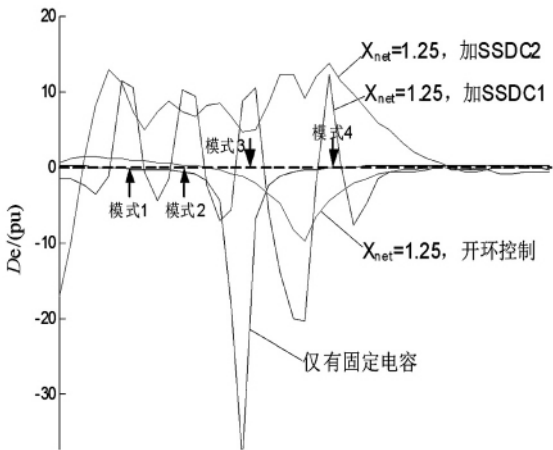


图6 $G(s)$ 的相位特性

表1 SSDC1 参数

模式	通带 /Hz	补偿频率点 /Hz	$\varphi_m /^{\circ}$	环节个数	放大倍数
1	14 ~ 17	15.71	-35	2	10 000
2	19 ~ 22	20.21	-47.5	2	10 000
3	24 ~ 27	25.55	-41.5	2	5 000
4	31 ~ 34	-	-	-	1 000

注: - 表示无此环节

针对本系统中发电机轴系的特点,设计SSDC2时将次同步频率分为4段,即SSDC2包含4个支路。各支路分别提升段内频率的电气阻尼。SSDC2的前3个支路由于 $G(s)$ 在模式3之前频率范围内变化缓慢,其设计思路与SSDC1相同,不再赘述。第4支路在15 Hz处用4个滞后环节补偿 -200° ,并用3个超前环节在90 Hz处补偿 135° ,以改善该通带频率段内的负阻尼,使从模式1到模式4的整个频率段内的电气阻尼都大于0。各个支路的滤波、相补及放大环节参数如表2。

表2 SSDC2 参数

模式	通带 /Hz	补偿频率点 /Hz	$\varphi_m /^{\circ}$	环节个数	放大倍数
1	10 ~ 17	15.71	-35	1	5 000
2	17 ~ 25	20.21	-47.5	2	18 000
3	20 ~ 31	25.55	-41.5	1	5 000
4	30 ~ 60	15	-50	4	60 000
		90	45	3	

4 仿真分析

4.1 电气阻尼分析

选择 TCSC 的稳态触发角为 157.6° , 即 $X_{net} = 1.25$ 。发电机运行状态为满载, 功率因数等于 0.9 (滞后)。为验证所设计的 SSDC 抑制 SSR 的有效性, 考虑以下 4 种运行工况。

工况 1: TCSC 不投入, 即 TCSC 等效为固定电容。

工况 2: TCSC 投入, 采用开环控制。

工况 3: TCSC 投入, 在开环控制上附加 SSDC1。

工况 4: TCSC 投入, 在开环控制上附加 SSDC2。

采用测试信号法分析了 4 种工况下的电气阻尼, 如图 7 所示。可以看到, 全部采用固定电容补偿时, 系统在 4 个模式附近的电气阻尼都为负, 系统 SSR 不稳定。工况 2 下, TCSC 的投入引起系统谐振频率的右移, 模式 1、2 附近的电气阻尼有所增大, 但在模式 3、4 附近的阻尼为负, 系统仍为 SSR 不稳定。工况 3, 加装所设计的 SSDC1 后, 各个模式频率处的电气阻尼均为正。而工况 4, 加装所设计的 SSDC2 后, 从 13 Hz 到 40 Hz 内的电气阻尼均为正, 相对采用分模态控制思想设计的 SSDC1, 阻尼为正的的范围不再局限在模式频率附近, 亦即消除了这一整个频率段内的 SSR 危险。

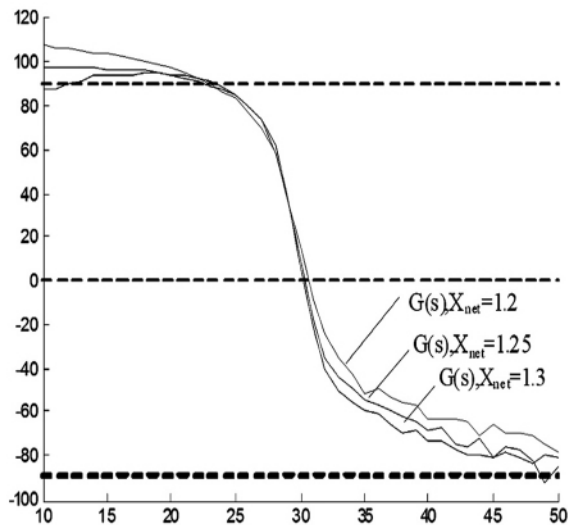


图 7 4 种工况下的电气阻尼曲线

4.2 暂态时域仿真

为进一步验证 SSDC2 抑制 SSR 的有效性, 利用 PSCAD/EMTDC 对图 3 所示系统进行时域仿真。发电机轴系采用六轴段模型, 机械阻尼设为 0。待系统进入稳态后, $t = 2.5$ s 时刻, 图 3 中母线 B 发生三相接地短路故障, 故障持续 0.05 s 后切除。图 8 给出了系统在工况 4 下的各轴段间的扭矩, 可以看出在使用了所设计的 SSDC2 之后, 各轴段间的扭矩逐

渐衰减并最终回到原稳态, 系统 SSR 稳定。

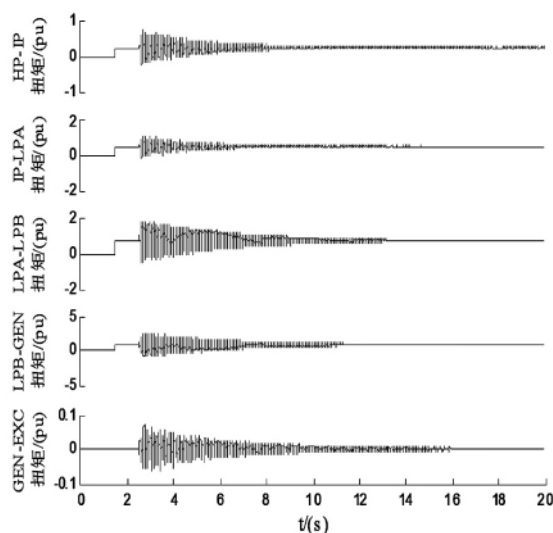


图 8 工况 4 加 SSDC2 后发电机轴段扭矩

5 结论

基于提升系统电气阻尼的思想, 设计了 TCSC 次同步阻尼控制器。该控制器针对分模态控制方式的不足进行了改进。结果表明, 加入该控制器能将系统在几乎整个次同步频段内的电气阻尼提高为正, 即消除了该频段内的 SSR 危险, 因而具有很强的工程实用性和通用性。

参考文献

- [1] S. S. Choi, F. Jiang, G. Shrestha. Suppression of Transmission System Oscillations by Thyristor-controlled Series Compensation [J]. IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib. 1996, 143(1): 7-12.
- [2] Brian K. Perkins, M. R. Iravani. Dynamic Modeling of a TCSC with Application to SSR Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1619-1625.
- [3] 葛俊, 童陆园, 耿俊成, 等. TCSC 抑制次同步谐振的机理研究及其参数设计 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 25-29.
- [4] 吕世荣, 刘晓鹏, 郭强, 等. TCSC 对抑制次同步谐振的机理分析 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 14-18.
- [5] 周长春, 刘前进, Lennart Ängquist, 等. 抑制次同步谐振的 TCSC 主动阻尼控制 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 130-135.
- [6] 郑翔, 徐政, 张静. TCSC 次同步谐振附加阻尼控制器 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 181-186.

(下转第 91 页)

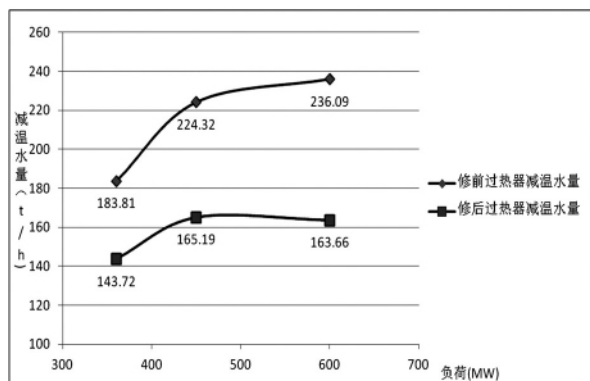


图2 过热器减温水量与负荷关系曲线

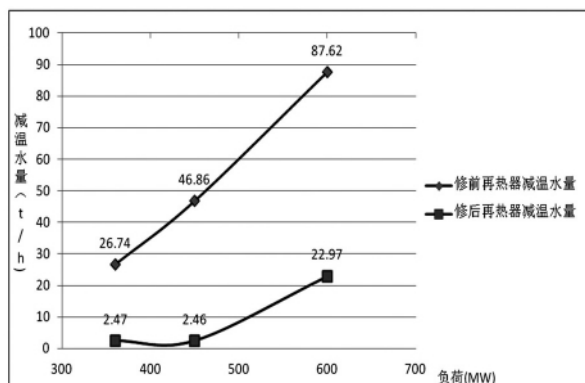


图3 再热器减温水量与负荷关系曲线

试验结果表明:大修后锅炉效率在 600 MW 工况下为 91.16%, 450 MW 工况下为 89.98%, 360 MW 工况下为 89.49%。

试验结论: 600 MW 工况大修后锅炉效率比大修前(机组负荷 550 MW)提高了 1.52%, 450 MW 工况大修后锅炉效率比大修前提高了 1.27%, 360 MW 工况大修后锅炉效率比大修前提高了 1.33%。大修后锅炉效率提高明显。

2.3.2 大修前后减温水流量比较

每一次试验工况调整后,应保证锅炉主要运行参数在允许波动范围之内,试验测试时间为 2 h,试验期间锅炉燃烧工况、燃料量、主蒸汽流量、再热蒸

汽流量、给水流量、汽包水位、过量空气系数及制粉系统投运方式等尽可能保持稳定运行,试验中过热器减温水流量及再热器减温水流量测试见表 5。

试验结果表明:大修后在 600 MW 工况下,过热器减温水流量为 163.66 t/h,再热器减温水流量为 22.97 t/h,再热器和过热器减温水总量为 186.63 t/h; 在 450 MW 工况下,过热器减温水流量为 165.19 t/h,再热器减温水流量为 2.46 t/h,再热器和过热器减温水总量为 167.65 t/h; 在 300 MW 工况下,过热器减温水流量为 143.72 t/h,再热器减温水流量为 2.47 t/h,再热器和过热器减温水总量为 146.19 t/h。

试验结论: 600 MW 工况下,大修后过热器减温水流量比大修前减少 72.43 t/h,再热器减温水流量减少 64.65 t/h,减温水总量比大修前减少 137.08 t/h; 450 MW 工况下,大修后过热器减温水流量比大修前减少 59.13 t/h,再热器减温水流量减少 44.4 t/h,减温水总量比大修前减少 103.53 t/h; 360 MW 工况下,大修后过热器减温水流量比大修前减少 40.09 t/h,再热器减温水流量减少 24.26 t/h,减温水总量比大修前减少 64.36 t/h; 此次 A 级检修对大修前机组减温水流量偏高的针对性改造效果明显。

3 结 论

试验证明,DG2028/17.45-Ⅱ5 型锅炉受热面改造是成功的,具有重要意义。对国内已经投产的机组,通过改造,可以有效降低供电煤耗,提高机组效率;对出口海外的机组,在制造阶段就有针对性的改变设计,有利于机组通过性能考核试验,从而达到顺利移交的目的。

(收稿日期:2012-02-15)

(上接第 51 页)

- [7] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [8] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.
- [9] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] 张静, 徐政, 郑翔, 等. SVC 抑制 SSR 的机理及控制器

设计 [J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 57-61.

- [1] 张丹. 高压直流输电系统次同步振荡的特征值分析与控制 [J]. 北京: 华北电力大学, 2011.

作者简介:

王 敏(1988), 男, 西南交通大学硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

康积涛(1962), 男, 教授, 主要从事电力调度自动化系统、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期:2012-01-19)

线路差动保护判别TA二次断线的新方法

周伟¹, 刘宏君²

(1. 永州电业局, 湖南 永州 425100; 2. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要:微机线路差动保护具备TA断线检测的能力,在线路发生TA断线时不造成误动。而TA断线的特征又与弱馈侧高阻接地的特征很相似。提出了一种判别TA断线的新方法,该方法在确保TA断线能正确检测的前提下,又能确保弱馈高阻接地故障时不会误闭锁差动保护。RTDS试验证明该方案安全可靠。

关键词:线路差动保护; TA断线

Abstract: The microcomputer-based line differential protection has the ability to detect TA disconnection, and it can not cause the misoperation when TA disconnection occurs. The features of TA disconnection are similar to the characteristics of high-impedance grounding in weak feedback side. A new method for identifying TA disconnection is presented. The proposed method can ensure that the differential protection can not be blocked incorrectly when high-impedance grounding fault occurs in weak feedback side on the premise of TA disconnection being detected correctly. RTDS tests show that it is a safe and reliable scheme.

Key words: line differential protection; TA disconnection

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2012)03-0052-03

0 引言

线路光纤电流差动保护应用越来越广泛。线路差动保护中,要求线路两侧的差动保护必须都启动,才可能允许跳闸。这样做的好处是,即可保证差动动作的可靠性,又可有效地防止线路TA断线时差动保护的误动。因为一侧TA断线时,只有断线侧的保护装置启动,而正常侧保护未能启动,即使差流达到动作门槛,差动保护也不会动作。线路差动保护要求两侧均要启动,在线路的弱馈侧发生高阻接地故障时,弱馈侧因零序阻抗小,零序电流能启动,而强电侧仅依赖本侧量不能启动。导致的后果是差动保护拒动。针对此现象,继电保护设计时,会增加差流辅助电压量启动,通用的电压量辅助判据为低电压或者零序电压。增加差流辅助电压量启动判据后,会导致判据无法区分高阻接地故障还是TA断线的故障。这里提出了一种判别TA断线的新方法,该方法在确保TA断线能正确检测的前提下,又能确保弱馈高阻接地故障时不会误闭锁差动保护。RTDS试验证明该方案安全可靠。

1 问题的提出

1.1 线路TA断线判别

线路保护具备TA断线检测功能。目前国内的TA断线检测依据一般有两类。

第一类:差动保护一侧电气量启动,另一侧不启动。启动的一侧有零序电流,无零序电压,判为TA断线,延时告警。根据TA断线是否闭锁差动控制字决定是否闭锁差动保护。

第二类:差动保护一侧电气量启动,另一侧不启动。启动的一侧相电流的变化量大于一定门槛或者相电流消失且存在较大差流但差动保护未动作,判为TA断线,延时告警。根据TA断线是否闭锁差动控制字决定是否闭锁差动保护。

第一类TA断线判别方法的缺陷在于,完全依赖零序电压门槛。若正常运行时零序电压就比较大,就会导致重负荷时发生TA断线,差动保护误动。

第二类TA断线判别方法的缺陷在于,完全根据电流的变化判别TA断线。在重负荷的弱馈侧,发生单相高阻接地故障时,也存在电流变小甚至电流变为零的工况。导致高阻接地误判为TA断线,导致差动保护拒动。

1.2 弱馈侧高阻接地故障分析

参考文献[1]的第8章第5节分析,在系统中发生高阻接地故障时,在故障点零序电压就小,在保护安装点,零序电压更小。由于零序电流分配与短

路点两侧的等效阻抗大小相关,会出现一侧零序电流达到零序电流启动门槛,一侧零序电流小于零序电流启动门槛。这样,差动保护装置若仅靠本侧电气量时,造成一侧能启动,一侧不能启动。差动动作需两侧保护均能启动,在这样的高阻接地故障的情况下,差动保护会拒动。

为解决此问题,线路差动保护中增加了差流启动,为了保证TA断线时不误动,差流启动均增加了电压辅助判据。电压辅助判据的引入,在保证TA断线不误动的同时,就会引起高阻接地拒动。在电力系统中多次出现高阻接地故障差动未动,靠零序延时段切除故障就是由于电压辅助判据选择不合理造成的。

因而,一种好的TA断线判据就是要能保证TA断线不动作的同时,也要保证高阻接地故障能正确动作。

2 判别TA断线的方法

在差动保护中,只要两侧保护均启动,就不判TA断线。TA断线只在一侧保护启动时才判断。保证高阻接地故障时能可靠启动,就不会误判TA断线。

新的TA断线判别方法在于合理的改变启动元件。启动元件的判据为:本侧电流的突变量或者零序电流均不启动,只有差流判据满足时,式(1)或式(2)任何一个判据满足时,装置保护启动。

零序电压判据 1:

$$|3\dot{U}_{0t} - 3\dot{U}_{0(t-2T)}| > 1 \text{ V} \quad (1)$$

式(1)中, $3\dot{U}_{0t}$ 为当前计算时刻的零序电压值;

$3\dot{U}_{0(t-2T)}$ 为2个周波前的零序电压值。

零序电压判据 2:

$$|13\dot{U}_{0t} - 13\dot{U}_{0(t-1)}| > 1 \text{ V} \quad (2)$$

式(2)中, $13\dot{U}_{0t}$ 为当前计算时刻的零序电压值;

$13\dot{U}_{0(t-1)}$ 为差流出现时刻的零序电压值。

式(1)用于检测零序电压的突变,高阻接地故障发生时,零序电流由故障点流向系统接地点,在母线处零序电压存在突变。减去2周波前的零序电压的目的就是消除正常运行时的不平衡零序电压的影响,提高判据的灵敏度。

式(2)用于检测零序电压的幅值相对差流出现时刻的零序电压幅值的变化,用于对单相高阻接地,接地电阻缓慢变小时的故障检测,提高判据的可靠性。

启动流程见图1。

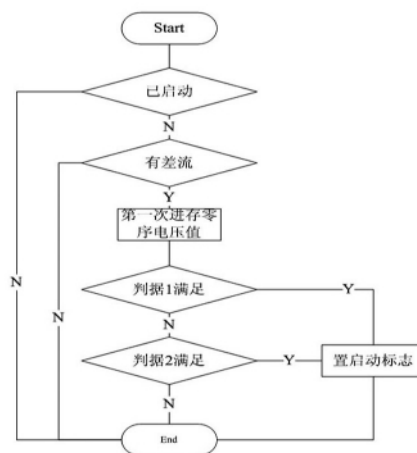


图1 流程图

3 RTDS 仿真分析

为了验证分析的正确性,进行了RTDS仿真。试验模型采用300 km、220 kV无互感双回线路模型,系统架构参照图1。试验模型参数:单回线正序阻抗 $Z_{L1} = 0.0227 + j0.265 (\Omega/\text{km})$,单回线零序阻抗 $Z_{L0} = 0.0966 + j0.73 (\Omega/\text{km})$,单回线正序容抗 $C_1 = 0.013 (\mu\text{F}/\text{km})$,单回线零序容抗 $C_0 = 0.0092 (\mu\text{F}/\text{km})$ 。M侧无穷大系统参数:功率初相角为 30° ,电源正序电阻为 $Z_1 = 10 \Omega$,电感为 $L = 0.02 \text{ H}$ 。M侧发变组参数:发电机容量为600 MW,额定电压为20 kV,功率初相角是 0° , $X_a = 0.1327 \text{ p.u.}$, $X_d = 1.03540 \text{ p.u.}$, $X'_d = 0.0360 \text{ p.u.}$, $X''_d = 0.235 \text{ p.u.}$, $X_d = 0.71940 \text{ p.u.}$, $X'_q = 0.412 \text{ p.u.}$, $X''_q = 0.212 \text{ p.u.}$, $R_a = 0.002 \text{ p.u.}$;变压器容量是720 MVA,电压比为242 kV/20.0 kV,正序电阻为 0.00392 p.u. ,正序电抗为 0.1 p.u. ,零序电阻为 0.012 p.u. ,零序电抗为 0.1 p.u. 。N侧系统参数:变压器容量为150 MVA,短路电压比为30%;等效负载为 $50 \text{ MW} + 10 \text{ Mvar}$ 。TA变比取1250/1 A。开关电阻取 0.01Ω 。

在此系统模型下,模拟以下故障:①模拟N侧发生高阻接地故障,接地电阻 100Ω 。②模拟N侧发生高阻接地故障,接地电阻值由 500Ω 在3 s内渐变为 100Ω 。③重负荷情况下的单相TA断线。

仿真结果表明,在高阻接地故障和渐变性高阻接地故障时,差流配合零序电压突变判据均能很好地启动,差动保护正确地出口跳闸动作。在重负荷情况的TA断线,装置能正确地判出TA断线,保护不会误动。

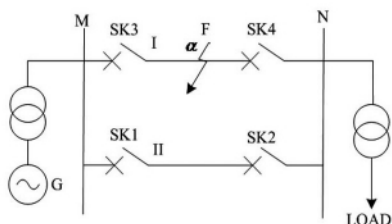


图2 无互感双回线路模型

4 结 语

综合分析线路高阻故障特征,并对比线路TA

断线的差异,提出了一种新的TV断线判别依据。该判据能正确地区分TA断线和高阻接地,提高了差动保护的可靠性。同时,该判据对同时发生TA断线和PT断线也能保证很高的可靠性。RTDS仿真试验证明该判据的正确性。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第3版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 文明浩. 线路纵差保护CT二次断线判据分析[J]. 继电器, 2006, 34(18): 1-3.

作者简介:

周 伟(1974), 男, 工程师, 从事电力系统生产管理;

刘宏君(1974), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护和数字化变电站的研究。

(收稿日期: 2012-03-20)

(上接第13页)

为了消纳大规模风电,提出了一种考虑风电接入的发电需求滚动预测方法。建立并考虑了网损、网内调频及与网外功率交换等影响的发电需求预测模型,提出虚拟天的概念和样本选取方式,并将所提方法与现有预测方法进行了比较。结果表明,所提方法的预测精度高,结果更符合实际,能更好地为风电消纳提供机会。所采用的预测方法实际在日内进行,可更好地利用最新负荷、气象等信息,与传统日前预测相比,利用的信息多,预测精度也更高。

通过实际电网运行数据进行测试表明,所提方法能明显地提高大规模风电接入后的发电需求预测精度,该方法已经得到了工程应用,获得良好的效果。

参考文献

- [1] 孙元章, 吴俊, 李国杰. 风力发电对电力系统的影响. 电网技术, 2007, 31(20): 55-62.
- [2] 高宗和, 滕贤亮, 张小白. 适应大规模风电接入的互联电网有功调度与控制方案[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 37-41.
- [3] 张伯明, 吴文传, 孙宏斌, 等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 1-6.
- [4] Negnevitsky and Cameron W. Potter. Innovative Short-term Wind Generation Prediction Techniques[C]. Power Systems Conference and Exposition, 2006: 60-65.

- [5] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
- [6] ACKERMANN T. Wind Power in Power System[M]. London, UK: John Wiley & Sons, 2005.
- [7] 李予州, 吴文传, 张伯明, 等. 多时间尺度协调的区域控制偏差超前控制方法[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 15-19.
- [8] 康重庆, 夏清, 等. 电力系统负荷预测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [9] 康重庆, 夏清, 沈瑜, 等. 电力系统负荷预测的综合模型[J]. 清华大学学报, 1999, 39(1): 8-11.
- [10] 程旭, 康重庆, 夏清, 等. 短期负荷预测的综合模型[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 42-44.
- [11] Chongqing Kang, Xu Cheng, Qing Xia, et al. Novel Approach Considering Load-relative Factors in Short-term Load Forecasting[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 70(2): 99-107.
- [12] 莫维仁, 张伯明, 孙宏斌, 等. 短期负荷综合预测模型的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 30-34.

作者简介:

何洪业(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与智能电网;

汪 颖(1981), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电能质量与智能电网;

肖先勇(1968), 男, 博士, 教授, 长期从事电能质量与智能电网的教学和研究。

(收稿日期: 2012-03-20)

基于频率特性的合闸于故障线路选相

黄霞, 陈皓

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了对合闸于故障保护进行快速选相, 利用合闸于正常线路和故障线路时所存在的暂态信号频域特性, 通过对合闸于不同故障情况下, 输电线路所产生的暂态电流进行 FIR 带通数字滤波分别得到各相相应的高低频电流值, 进而对三相电流的 6 个高低频分量进行能量比较来判别故障相别、故障类型。进行了大量 Matlab 仿真实验表明该方法下都能基本正确地快速选出故障相, 因而为加快暂态量保护提供有益的参考。

关键词: 合闸操作; 频率特性; 自振频率; 暂态电流能量比; 数字滤波

Abstract: In order to select phase quickly for switching into fault protection, the frequency domain characteristics of transient signal when switching into normal line and fault line are used. FIR digital filter is used for the transient current produced by transmission line under the situation of switching into different faults to obtain the high-frequency and low-frequency current value corresponding to each phase respectively, and then the energy of six high-frequency and low-frequency components of three-phase current are compared to distinguish the phase sequence and the fault types. Lots of simulation experiments with Matlab indicate that this method can distinguish the phase sequence of fault line correctly, which can provide a useful reference for speeding up the transient-based protection.

Key words: circuit-breaker closure; frequency characteristic; natural frequency; ration of transient current energy; digital filter

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0055-03

0 引言

由于暂态量的保护具有速度快且不受过渡电阻、系统振荡和 TA 饱和的影响, 所以成为了高压输电线路继电保护的发展趋势。相关研究表明, 在进行断路器操作时, 合闸产生的操作波暂态过程可能引起暂态保护的误动作^[1]。因此, 面临一个进行断路器操作时暂态保护的可靠性问题。

基于暂态分量的超高速保护包括行波保护和暂态量频率保护。利用暂态量频率特性的保护是通过探测故障时产生的高频电压和电流信号来检测故障的产生^[2]。20 世纪 80 年代末, A. T. Johns 等人提出了利用高频暂态量实现高压传输线单端保护技术的雏形^[3]。文献 [4] 中提出线路合闸操作暂态过程频域特征: 合闸后暂态电压中自振荡频率的含量也显著不同且合闸于故障相的电流中将含有大量的直流分量和工频分量, 并不含有合闸于无故障线路时存在的频率较高、含量较大的自振频率。文献 [5] 中, 分析了母线杂散电容对故障时故障电流的衰减效

应, 发现进入保护单元的高频电流信号在区内和区外故障时明显不同, 故而将高频段和相对较低频段两个频段信号的能量比值的对数值作为区分区内故障和母线故障的判据。

在对线路合闸操作的暂态信号频域特征进行深入研究的基础上, 对线路合闸操作暂态进行了仿真研究, 并利用合闸于故障相和非故障相时两者是否含有明显自振荡频率, 且自振主频率约为工频的 3~12 倍^[6], 所以在每相都有两个带通滤波得出高低频电流能量比值, 分别对比该三相比值以正确地选出故障相并判断合闸于故障与否。

1 暂态电流保护

1.1 合闸信号的特征提取

离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT) 在时域的多样窗函数功能已经被广泛地用于暂态信号的分析中。一个暂态信号可以被一系列的小波和标度函数表示, 并且这些函数的系数是在不同时移和频率情况下用离散小波变换所得的不同系数。

DWT 能够通过分解时域和频域交叠的信号成分来提取暂态信号的特征。

由以上表述可知一个时变函数 $f(t)$ 可以由 $\Phi(t)$ 和 $\varphi(t)$ 的以下等式表示。

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_k c_0(k) \sum_{\Sigma} (t-k) + \sum_{k,j=1} \sum d_j(k) 2^{-j/2} \varphi(2^{-j/2}t - k) \\ &= \sum_k c_0(k) 2^{-j_0/2} \varphi(2^{-j_0/2}t - k) + \sum_{k,j=j_0} \sum d_j(k) 2^{-j/2} \varphi(2^{-j/2}t - k) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\Phi(t)$ 、 $\varphi(t)$ 、 c_0 和 d_j 分别代表标度函数, 小波函数。标度系数和小波系数, 符号 k 是用于定位时间信号的转换系数。标度 $j=1, 2, \dots$ 表示不同的频率带(从高到低), 符号 j_0 不能是任意的整型。小波的变换和标度类型 $\Phi(2^{-j/2}t - k)$ 将通过分解信号来产生一时频图。小波系数 d_j 是暂态合闸高频现象的特征^[4]。

1.2 暂态电流和暂态电流能量

通常暂态保护研究的基本对象是暂态电流与暂态电压或它们所携带的能量。在暂态保护的研究中常常需要讨论暂态电流与暂态电流能量, 而不同的暂态保护算法对暂态分量的定义也不同, 为便于今后的讨论先给出以下基本定义。

暂态电流: 在输电线路发生故障时将产生频带很宽的暂态故障电流、电压, 其频带范围包括直流分量到几百千赫的高频分量, 在暂态电流保护的研究中, 将高于基频分量的较高频率的暂态故障电流称为暂态电流^[5]。

信号能量: 在信号的传输中, 总是伴随着能量的传送。任何信号都带有一定能量, 它代表着信号做功的能力。根据信号理论, 信号 $f(t)$ 具有的总能量 Σ_{Σ} 为

$$\Sigma_{\Sigma} = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (2)$$

暂态电流能量^[6]: 在暂态保护的研究中, 常常需要讨论有限时间内暂态电流的能量。如果 $i(f_k)$ 表示中心频率为 f_k 的频带宽度为 Δf 的暂态电流信号, 时间窗的宽度为 $(t_2 - t_1)$, 则时间窗内暂态电流 $i(f_k)$ 具有的总能量为

$$\Sigma_i = \int_{t_1}^{t_2} |i(f_k)|^2 dt \quad (3)$$

2 改进的暂态电流保护

空载线路合闸操作暂态过程频域特征在文献

[4] 中已经对其进行了分析, 定性地得出了线路合闸操作暂态过程的基本特征, 并更进一步证实自振频率与线路长度存在近似的反比关系, 但所用的小波分析法, 存在计算量大、计算复杂等缺点, 并且未对故障情况进行选相, 而且为了更加大范围的检验是否合闸于故障, 改变了暂态电流能量的定义, 如上1.2所述, 接着在 Matlab 软件中, 为了满足线性要求, 用编程来完成三相 FIR 数字滤波, 得出各相高低频电流平方值, 进而取高低频平方值之比与门槛值 m 进行比较。又由于自振主频率约为工频的 3 ~ 12 倍, 所以低频部分滤波器的中心频率是 100 Hz 而高频部分滤波器的中心频率为 150 Hz。相应的 a、b、c 三相高低频电流能量平方值之比分别为 K_a 、 K_b 、 K_c 。对于输电线路空载合闸的频率特性则分别有如下具体关系。

1) 线路对称故障

(1) 断路器空载合闸于非故障线路时, 线路三相电流中存在明显的自振频率分量。自振频率分量幅值较大, 远远大于基频分量的幅值; 自振频率分量衰减速度较慢, 在合闸后约 5 个周波仍然存在较大幅值。此时, K_a 、 K_b 、 K_c 均大于 m 。

(2) 断路器空载合闸于线路三相故障时, 故障电流中不存在明显的自振频率分量, 主要包含衰减直流分量和故障基频分量, 以及幅值很小的高频分量。此时, K_a 、 K_b 、 K_c 均小于 m 。

2) 线路不对称故障

断路器空载合闸于故障线路时, 故障相电流中不存在明显的自振频率分量; 非故障相电流故障电流中仍然存在明显的自振频率分量。但略有不同的是, 故障点距离母线越近, 自振频率分量衰减速度相对越快。

(1) 单相故障时, 则该单相故障的系数小于 m , 且另两相的系数相等且大于 m 。

(2) 两相故障时, 则非故障相系数大于 m , 另两故障相相等且都小于 m 。

综上所述, 故障选相流程图如图 1 所示。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

所给出的是一条 500 kV 输电线路, 对此予以仿真讨论, 具体如图 2 所示。

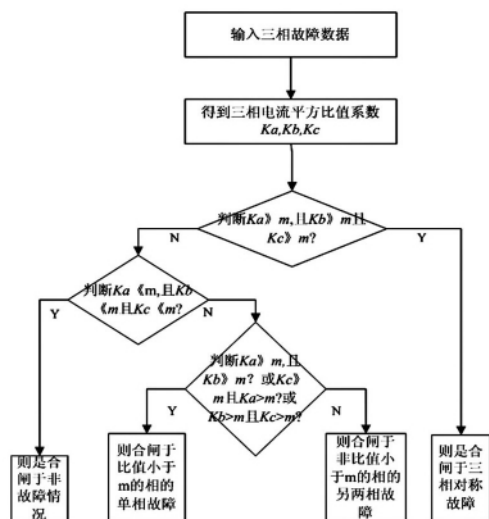


图1 故障选相流程图

图2中模型的线路参数为

正序阻抗: $Z_1 = 0.0262 + j0.2863 \Omega/\text{km}$

零序阻抗: $Z_0 = 0.1724 + j1.03772 \Omega/\text{km}$

线路对地正序电容: $c_1 = 0.0124 \mu\text{F}/\text{km}$

线路对地零序电容: $c_0 = 0.069 \mu\text{F}/\text{km}$

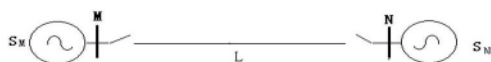


图2 500 kV 输电线路模型

利用上述仿真系统,为了反应不同长度线路暂态分量的特点和差别,分别取线路长度 L 为 50 km、150 km、250 km、300 km、350 km 进行输电线路空载合闸、合闸于非故障线路及合闸于故障线路的仿真。其中,合闸于故障考虑三种情况:合闸于线路单相(A相)故障,过渡电阻 300 Ω ;合闸于线路三相故障,过渡电阻 50 Ω ;合闸于线路两相(A、B相)故障,过渡电阻 50 Ω 。合闸操作由 M 侧断路器进行。由于输电线路空载合闸时的自振频率较低,因此仿真时采样频率取 20 kHz。对上述情况进行全面的仿真实验,因为单相短路占大多数,两相短路较少,且两相短路情况频率特性与单相刚好相反;又因为三相短路最少,且与合闸于非故障情况相反^[4],所以限于篇幅仅给出单相故障和三相非故障的部分实验结果。综上,给出相应的 Matlab 中所搭的合闸于故障线路仿真模型如图3所示。

通过仿真模型、频率特性和相应的暂态电流能量定义等综合分析得出在仿真中阈值 m 设置为 50 为宜。

3.2 仿真结果

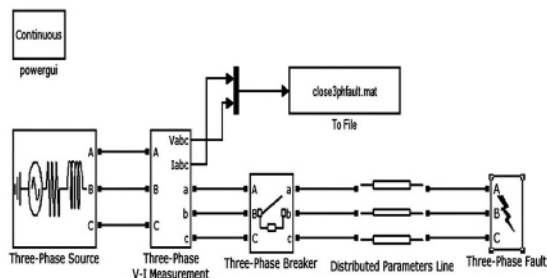


图3 输电线路合闸于故障的 Matlab 模型

3.2.1 单相故障

表1分别给出了合闸于不同线路长度 L 的单相(A相)故障电流高低频能量比值结果。

表1 不同线路长度的合闸于单相故障
三相高低频电流能量比

线路长度 /km	K_a	K_b	K_c
50	2.6	3 800	18 000
150	6	3 050	8 000
250	13	2 100	1 800
300	23	1 900	83
350	140	379	29

通过表1可以知晓,随着线路的增长有一相(A相)的电流高低频能量比值在变大,而另两相(B、C相)相应地却在变小,这就印证了2.1所述的断路器合闸于单相故障时的频率基本特征。但当线路增长到 350 km 时,该相(A相)的能量比值却比 C 相大 4 倍,而且也仅比 B 相小一倍。此时 $K_a > 50 > K_c$,证明此刻该判据失效,即随着线路的增长,该判据效果越来越差直至 350 km 左右时,该判据无效。相应的能量比值结果列表如表1所示。

表2 不同故障距离的合闸于单相故障
三相高低频电流能量比

故障距离 /km	K_a	K_b	K_c
10	5.1	3 350	9 200
50	4.9	3 500	9 450
90	4.8	3 620	9 800

而对于合闸于故障距离分别为 10 km、50 km、90 km 的 100 km 长度单相(A相)故障线路,最终得出的三相电流高低频能量比值结果如表2所示,可以看出除了满足在2.1中所述的基本频率特性外,还能够得到的特点就有:故障点距离母线越近,自振频率

(下转第87页)

漏,对本体油进行彻底的脱气处理,投入运行后进行2~3个周期的色谱跟踪检测(监督周期可根据实际情况进行自行安排,如每月一次),以观察检修的效果并积累处理后油色谱本底值。

6 结 论

探讨了变压器有载开关油渗漏诊断技术,提供了一些创新的判断方法,也通过一些实例验证了这些判断方法的有效性。充油电气设备的故障复杂多

(上接第57页)

分量所衰减速度就相对越快,但其差别并不明显。

3.2.2 三相非故障

表3分别给出了合闸于不同线路长度L的非故障电流高低频能量比值结果。

从表3能够看出三相的电流高低频能量比值都随着线路的延长而减小,但均远远大于50。同时高频的衰减速度也随着线路的增长而增快。相应地也就与2.1中的合闸于非故障相所描述的频率特征符合了,同理,当输电线路增长到350 km时,整个判据随着自振频率的锐减而失效了。相应的能量比值结果列表如表3所示。

表3 不同线路长度的合闸于非故障线路的
三相高低频电流能量比

线路长度 /km	K_a	K_b	K_c
15	1 640	9 000	1 000
50	1 083	7 482	754
150	924	5 230	386
300	400	1 190	189

4 结 语

根据输电线路在合闸于故障相和非故障相时其电流或电压中所包含的自振荡频率类型和含量的不同,采用对各相电流进行高低频率带通数字滤波来得出高低频电流能量比值与设定的域值的大小关系来作为主要的故障判据,能更加明显地得出相应的频率特性结论,并能更好地得出合闸于故障相的具体情况。所进行的仿真实验也更加有力地证明了该判据的有效性。但该方法在线路超过350 km时就

变,任何一种故障诊断技术都有其自身的局限性,并有着各自的适用范围,方法选择不当,易导致判断失误。所以,在诊断故障的时候,一定要根据设备的实际情况,谨慎选择判断方法,注意用多种方法相互配合验证,方可提高故障诊断的准确性。

参考文献

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

(收稿日期:2012-02-15)

无效了,所以距离问题有待深究。

参考文献

- [1] 胡巨. 超高压输电线路暂态电流保护的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2004: 1, 3.
- [2] 何世恩, 岳恒宇, 夏经德. 继电保护技术的发展与展望 [J]. 甘肃电力技术, 2010, 5(2): 15-18.
- [3] Xu, Qingshan, Lai L L, Chen Jingen, et al. Novel and Comprehensive Countermeasures for Single Terminal Fault Location of Transmission Lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 21-25.
- [4] 段建东, 罗四倍, 张保会. 超高速保护中合闸于故障线路的识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 78-84.
- [5] Bo Z. Q. A New Non-communication Protection Technique for Transmission lines [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1073-1078.
- [6] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 121.
- [7] Y. Y. Hong, Y. Y. Chen. Placement of Power Quality Monitors Using Enhanced Genetic Algorithm and Wavelet Transform [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 23(5): 461-465.
- [8] 陈皓. 超高压输电线路暂态电流保护的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2001: 16-17.
- [9] 方达意. 基于暂态电流小波能量谱的超高压输电线路故障类型识别 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009: 14.
- [10] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 26.

作者简介:

黄霞(1986), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制。

(收稿日期:2012-04-26)

基于 GPRS 的电费抄收催一体化技术在电力系统中的应用

刘芯宇

(自贡电业局,四川 自贡 643000)

摘要:在电力系统中,农村用户数量多、居住分散,电费抄表、收费管理困难。如在四川省电力公司农村用户数占比超过 70%,大部分在丘陵和山区分散居住,长期以来电费抄收管理效率低,信息化管理水平差。为了方便农村用户缴费,提高工作效率,降低企业管理成本,在电力企业中研究并应用基于 GPRS 通信的抄表收费一体化技术,有效地解决了该方面的困难。该技术采用 GPRS 无线手持终端,通过 GPRS 专用虚拟网与电力网络相连,实现终端与营销系统的实时数据交互,在抄表的同时实现用户缴费。通过该技术在农村地区的使用,证明能有效地提高农电工的工作效率,提升用户对电业企业的满意度,提高电费回收率,并为电费资金安全提供了监督保障。

关键词:GPRS; 电力营销系统; 抄收催一体化技术; 电费回收

Abstract: In power system, there are a large number of users in rural areas living scattered, so electricity metering and charging management is very difficult. The users in rural areas under Sichuan Electric Power Corporation account for more than 70%, mostly in hilly and mountainous areas, so the efficiency of electricity meter reading management is low and the information management is poor for a long time. In order to facilitate the rural users to pay the bill, to improve the efficiency and to reduce the cost of power enterprises, an integration technology of meter reading and electricity charging based on GPRS communication is studied and adopted. The system uses GPRS wireless handheld devices, and the virtual private network is connected to power grid through the GPRS network to realize the real-time data exchange between the terminal and the marketing system, which can realize the electricity charging while reading the meter. Through being used in the rural areas, the work efficiency of rural electricians is improved, the customers' satisfaction to electric enterprises is enhanced, the recovery rate of electricity charge is improved too, and the supervision for ensuring the electricity financial security is provided.

Key words: GPRS; power marketing system; collecting reminder integration technology; electricity charge recovery

中图分类号:TM727 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2012)03-0058-03

长期以来农村地区的用电服务问题一直困扰着供电企业,由于农村地域广阔,用户分散,并且山区多、路途远,电力营业厅所能覆盖的服务范围有限。在多数农村地区,银行出于成本考虑网点少,由此,给农村用户的缴费带来了很大的不便,导致电费回收率下降。同时对于供电企业的抄表人员,由于用户地处偏远,电表分散,到用户现场距离远,农村用户电费抄收管理给供电企业带来了较大的困难。近年来,虽然供电企业通过信息化技术拓展了多种电费缴费渠道,如银行代收、第三方机构代收、自助缴费平台建设,但是对于广大的农村地区,银行网点覆盖有限,第三方代收机构投入得不到回报也不愿意在偏远地区布点。

针对目前农村用户电费管理存在的问题,四川省电力公司在 2011 年建设了基于 GPRS 抄收催一体化

技术的管理系统,该系统将抄表、收费、催费业务整合于一体,在抄表的同时实现了电费计算、电费收费和催费工作,提高了电力抄收现场服务水平。

1 系统技术原理

基于 GPRS 抄收催一体化技术的管理系统主要由无线 GPRS 抄收催一体化终端(以下简称抄收催一体机)、GPRS 抄表收费主站软件(以下简称主站软件)、GPRS 专网通道及相关网络设备、主站服务器构成。其系统结构图如图 1 所示。

①抄收催终端:一款专门定制的多功能终端设备,通过 GPRS 通讯网关和 GPRS 抄表收费系统主站相连。终端配有专用 SIM 卡,拥有独立 IP; ②GPRS 专线网络:连接移动和供电企业的通信专线,GPRS 终

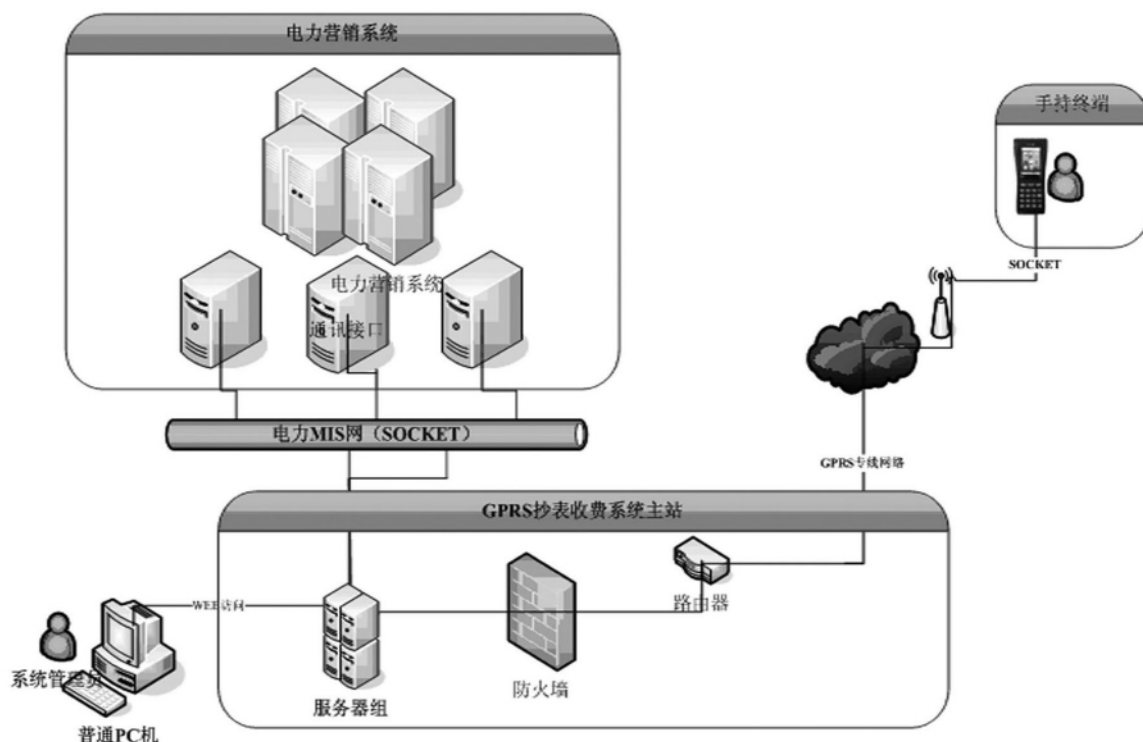


图1 系统结构图

端通过无线公网到移动 APN 接入点,通过移动专网认证后与供电企业主站进行通信;③GPRS 抄表收费主站软件: GPRS 抄表收费系统的核心部分,负责连接营销系统和抄收催终端;④电力营销系统: 电力营销业务应用、业务处理系统,是电力营销业务的核心系统,提供统一的标准的对外接口。

1.1 GPRS 抄表收费主站软件

GPRS 抄表收费主站软件采用全省集中部署方式,通过省公司与移动公司建立 GPRS 移动专线实现系统主站软件与抄收一体机的通信。GPRS 抄表收费系统主站按其硬件部署角色可分为应用服务器(提供 web 应用服务)、接口服务器(部署与营销

SG186 接口服务)、数据库服务器(负责数据存储)、前置服务器(负责主站与一体机的通信、业务处理)。主站软件按功能可分为以下 4 个层次:①终端层: GPRS 无线手持终端,负责现场的抄表、收费、催费应用;②通信层: 包括通信链路和通信前置服务。负责主站软件与终端的通信、数据采集、数据处理、业务处理;③应用层: 负责主站软件的业务处理功能,权限管理、综合查询;④接口层: 负责主站软件与营销 SG186 应用系统的接口服务。

1.2 抄收催一体机

抄收催一体机是根据电力现场抄表、收费、催费业务需要定制的基于 GPRS 通信的无线手持终端。终端采用开源的 LINUX 操作系统,配有专用 SIM 卡,拥有独立 IP。在硬件构成上,抄收催一体化终端具备 GPRS 通信模块,支持 900/1800 MHz 双频通信,可与主站系统实时通信;终端配备红外通信功能,可自动接收电表数据,方便抄表;终端具备条码扫描功能,可读取电表编号,定位用户档案;终端标配热敏打印纸,可在工作现场方便打印缴费凭证,抄表通知单。

1.3 工作原理

GPRS 抄表收费过程由终端发起,经过 GPRS 专线网络通讯、GPRS 抄表收费主站管理软件、营销信息系统接口,完成电费抄收业务。终端与主站平台采用 socket 短连接的通信方式,交易开始建立 socket 连

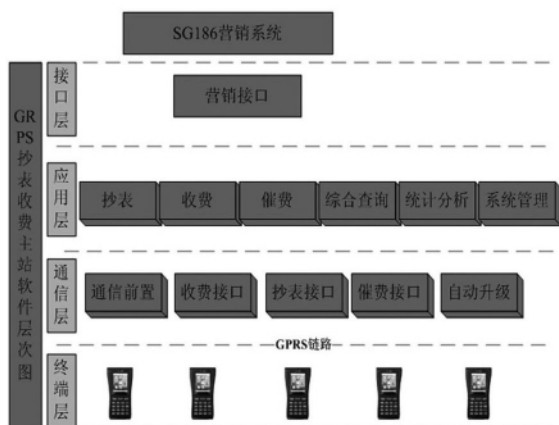


图2 GPRS 抄表收费主站软件层次图

接,交易结束断开连接,其工作过程见图3。

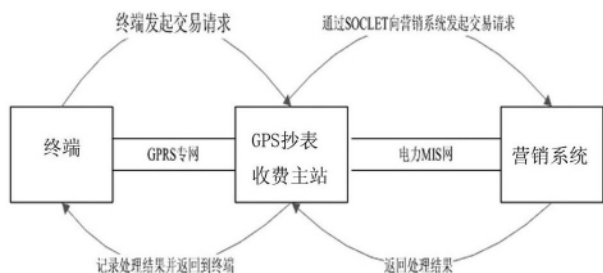


图3 工作原理图

- (1) 终端根据用户输入请求,通过 GPRS 移动专网向用户抄表收费主站发起交易请求。
- (2) 抄表收费主站根据终端的交易请求,生成符合营销系统接口规范的报文,采用 socket 通信方式向营销系统发起交易请求。
- (3) 营销系统收到抄表收费主站的请求后作相应的业务处理,并将处理结果返回到抄表收费主站。
- (4) 抄表收费主站接收营销系统的处理结果报文,在本地交易明细记录,同时将处理结果返回到终端,socket 连接结束,用户根据终端界面显示的内容确认下一步动作。

1.4 安全设计

GPRS 抄表收费主站涉及抄收催一体机、GPRS 网络、主站软件、营销系统等多个环节,为确保信息系统的安全性,系统进行了严密的安全设计。

(1) 终端安全设计:终端采用的 LINUX 操作系统是根据业务应用需要进行定制,只安装了必要的软件支持包和驱动程序,并且终端在报文发送上采用了 3DES 加密算法,有效防止报文被监听、截取。

(2) 网络安全设计:在网络通道上,移动公司为电力企业提供 VPN 专网,终端所使用的 SIM 卡在专网内拥有固定 IP 地址,终端 GPRS 产生的所有数据通过 VPN 专网传输。并且在移动和电力企业之间的网络边界部署了专用防火墙,只允许访问电力前置机服务器的固定 IP 地址和端口。

(3) 数据安全审计:GPRS 抄表收费主站采用了严格的数据安全审计管理,系统保存终端与主站交互解密前后的原始报文,严格记录终端电费缴费的交易数据。GPRS 抄表收费主站与营销系统每日进行账务核对,账务核对的所有原始信息进行保存,并需通过系统审计功能审查,异常信息报警提示。

2 电费抄收催一体化应用功能

基于 GPRS 抄收催一体化技术的管理系统采用 GPRS 无线手持终端实现集抄表、收费、催费于一体应用,在抄表的同时实现电费计算、电费收费。系统主要应用功能见图4。



图4 系统应用功能结构图

2.1 抄表功能

功能包括:抄表数据远程下载、抄表数据远程上装、抄表数据准备、抄表异常登记、抄表预算电费。抄收催一体化终端可通过 GPRS 网络实现抄表数据的远程上装、远程下载功能,节约了抄表员往返于供电企业和抄表现场的时间成本和空间成本。同时终端还具备电费计算功能,可准确计算低压用户电费,作为现场收费的依据。

2.2 缴费功能

功能包括:电费查询、电费收费、凭证打印、电费冲正、代收对账、收费信息统计。抄收催一体终端可以在缴费现场实时查询欠费数据、实时缴费,对缴错的电费允许当天冲正,同时支持预收电费。同时缴费数据实时传递到主站软件,便于供电企业掌握所有抄收人员的在途资金,方便电费回收管理。

2.3 催费功能

功能包括:远程下载催费任务、催费单打印、实时电费查询。催费停电人员可根据表段号实时查询用户的欠费清单,并可在催费现场打印催费通知单。在停电应用中,停电前可输入待停电用户编号,实时查询用户欠费停电,避免误停电。

3 系统应用难题和解决措施

(下转第66页)

等级达到 IP65, 高于封闭开关设备的防护等级。

安装在 XGN2-12 型箱型固定式交流金属封闭开关设备上的 FRESNEL 透镜具有如下参数: 直径为 $\varphi 40$ mm; Fresnel 透镜直径为 $\varphi 30$ mm; 材质为 LLDPE 树脂; 厚度为 0.38 mm; 焦距为 -330 mm; 增加视角为 15° 。通过测温, 得出了柜内被测铜排及接头区域详尽全面的温度分布云图, 如图 5 所示。

该试验表明, 将广角 Fresnel 红外透镜用单面安装法安装于封闭设备外壳的适当位置, 与红外热成像

仪相结合, 能够很方便地得到高压开关柜内部设备详尽全面的温度分布情况。

5 结 论

综上所述, 所发明的广角 Fresnel 红外透镜, 结构坚固耐用, 观察范围宽广, 便于单面安装, 可以方便安全地实现封闭开关设备大面积、大范围的红外发热在线监测, 为状态检修提供有力依据。

参考文献

- [1] 国网武汉高压研究院, 华东电网有限公司. DL/T 664-2008, 带电设备红外诊断应用规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 陈永辉, 蔡葵, 刘勇军. 等. 供电设备红外诊断技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [3] 曾琛. 高精度红外仪器透镜用光学树脂的开发 [J]. 石化技术与应用, 2004, 22(5): 342-343.

(收稿日期: 2012-02-15)

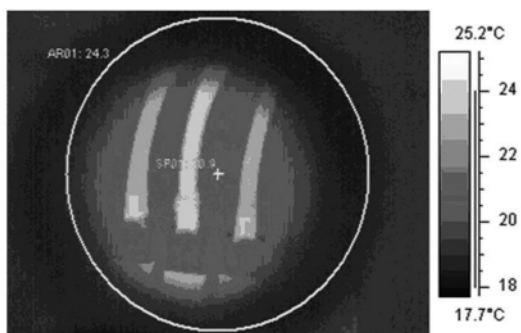


图 5 测温所得柜内铜排及接头的温度分布云图

(上接第 60 页)

电力信息技术是一个不断深入发展的过程, 基于 GPRS 抄收催一体化技术的管理系统在设计、开发、调试和应用集成的过程中进行了不断完善。在系统上线后也遇到一些问题, 系统经过硬件改进和应用升级得以解决。

3.1 应用中发现的问题

(1) 系统采用移动 GPRS 网络, 在部分农村偏远地区移动信号弱或未覆盖, 终端设备无法上线。

(2) 随着智能电网发展, 智能电表在农村逐步应用, 抄收催终端需要解决智能电表快速充值缴费的问题。

(3) 由于 GPRS 通讯信息中涉及电费缴费、账务资金等敏感数据, 该系统 GPRS 通信过程需要极高的安全保障。

3.2 应用改进和解决措施

(1) 终端设备采用更换终端通讯模块、延长终端天线等措施, 增强终端的通讯能力; 同时协调移动公司, 对 GPRS 信号未覆盖的地方进行补点, 从源头上解决 GPRS 通信问题。

(2) 抄收催终端在设计时预留了 IC 卡接口, 并在系统应用功能中增加智能电表充值缴费功能。通过抄表收费人员上门充值或在农村便利店部署抄收催终端, 实现了智能卡表用户的充值缴费。

(3) 基于 GPRS 抄收催一体化技术采用了 APN (Access Point Name) 专网模式, 利用 SIM 卡的唯一性, 划定用户可接入系统的范围, 有效避免了非法入侵。采用移动公司分配的 APN 进行无线网络接入, 在网络侧对 SIM 卡和 APN 进行绑定, 只有属于电力行业的 SIM 卡才能访问专用 APN。同时, 在网络边界采用安全的防火墙过滤, 设置防火墙软件保障系统安全。

4 结 语

基于 GPRS 抄收催一体化技术的管理系统将通信技术和计算机应用有机结合, 较好地解决了“农村用户抄表、收费、催费难以有效管理”的问题, 为电力企业提高了工作效率、降低了企业管理成本, 同时也为农村用户电费缴费提供了便利, 提高了客户满意度。同时, 系统全面支持预付费, 实时监控电费资金状况, 为农电资金安全提供了保障。通过推广试点证明, 基于 GPRS 抄收催一体化技术的管理系统为供电企业带来了良好的经济效益和社会效益, 提高了供电企业对现场工作的管理水平, 符合“精细化”管理的要求, 在供电企业内具有较大的推广应用价值。

(收稿日期: 2012-03-28)

交流串入直流造成 500 kV 主变压器 无故障跳闸的分析及改进措施

胡晶晶¹, 曾 丽²

(1. 四川省电力公司超(特)高压公司, 四川 成都 610041; 2. 德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘 要:介绍了 500 kV 某变电站由于设计错误造成交直流混用引起 1 号主变压器无故障跳闸的事故。通过对事故发生时情况的模拟,以及对主变压器出口继电器及其二次回路的检查,找到了事故的原因:由于交流量窜入直流控制回路引起中间出口继电器动作从而造成主变压器无故障跳闸。通过试验对事故进行了分析,并提出了提高开关操作箱出口继电器的动作功率,合理规范二次电缆的路径,在不影响保护性能的前提下增加某些可能引起误动的关键开入量的动作时间的预防措施。

关键词:交流; 分布电容; 绝缘电阻; 二次回路; 出口继电器

Abstract: The tripping of No. 1 main transformer without fault in a 500 kV substation is described as a result of design errors caused by a mix of AC and DC. Through the simulation of the accident situation, the out-tripping relay and its secondary circuit of main transformer are inspected, and the reasons are found, that is, the tripping of main transformer without fault caused by the action of intermediate out-tripping relay because of AC flowing into DC control loop. Through the test and analysis of the accident, the precautionary measures are proposed, that is, to improve the action power of out-tripping relay of switching operation box, to standardize the path of secondary cable reasonably, and to increase the action time of some key inputs which may cause malfunction without affecting the protection performance.

Key words: AC; distributed capacitance; insulation resistance; secondary circuit; out-tripping relay

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2012)03-0061-03

某 500 kV 变电站是四川地区的重要枢纽站,其中 500 kV 为 3/2 接线,220 kV 为双母双分段不带旁路接线方式。保护和测控采用的是小室设计,500 kV 有两个小室即 51 小室和 52 小室,220 kV 一个小室,主变压器和 35 kV 一个小室。

关保护屏第一组“TA”、“TB”、“TC”灯亮。

两次事故检查后均发现一次系统无故障,一次设备无异常,故障录波图表明电流、电压正常。但是在这两次事故时都有外单位人员在进行 2 号主变压器扩容施工。

1 事故经过

2009 年 12 月 25 日,500 kV 某变电站 1 号主变压器 5021、5022、201 开关跳闸,其中 1 号主变压器中压侧操作箱“跳闸位置”、“1 跳闸启动”、“保护 1 跳闸”信号灯亮;5021 开关保护屏第一组“TA”、“TB”、“TC”灯亮;5022 开关保护屏第一组“TA”、“TB”灯亮,5022 开关 A、B 相跳闸,开关本体三相不一致动作跳开 C 相。

2010 年 1 月 7 日 1 号主变压器 5021、201 开关再次跳闸。其中 1 号主变压器中压侧操作箱“跳闸位置”、“1 跳闸启动”、“保护 1 跳闸”信号灯亮;5021 开

2 检查分析

事故后对监控的 SOE 和绝缘监测仪的事件列表进行了检查,发现跳闸发生时后台均收到大量干扰信号,特别是第一次与第二次跳闸时 500 kV 二母地刀均有多次开入变位报文,且发现各开入量变位有明显的周期性。而绝缘监测仪在每次事故时均发出“直流接地”信号,由此重点怀疑事故是由交流混入直流回路引发的。

2.1 现场试验及检查情况

2.1.1 相关回路绝缘检查

对 5021、5022、201 和 301 开关跳闸回路及相关信

号回路进行了绝缘测试。测试点主要是芯线之间的相对绝缘及对地绝缘,从数据上反映结果正常,二次电缆对地绝缘良好,不存在由于绝缘不好造成的交直流混用现象。

2.1.2 现场情况模拟

由于二次回路绝缘检查正常,而当时又有人员在现场工作,交流侵入点是不易确定的,而2号主变压器施工人员此时的工作作为重点怀疑对象。

第一次跳闸时虽然怀疑是交流混入直流造成的,但一直未找到交流侵入点。发生第二次跳闸后,决定按照当时的运行情况,对2号主变压器施工人员在事故发生时的工作进行了实际模拟,即:把1号主变压器各侧开关合上(隔离开关不合),由当时运行值班人员和2号主变压器施工人员一起按照当时的工作内容、工作流程和方式进行模拟操作,当2号主变压器施工人员对2号主变压器扩建工程中的一把35 kV隔离开关进行就地合、分操作试验时,1号主变压器5021、5022、201开关再次重现三相跳闸,干扰信号及操作箱信号灯与前两次异常跳闸基本一致。

进一步检查该隔离开关操作机构接线,将操作机构箱直流信号电缆解开,在隔离开关操作同时用万用表监视该电缆的交流电位,发现该隔离开关在进行分闸操作时其直流信号芯线(隔离开关合位信号)出现200 V左右的交流电位。通过该隔离开关操作机构箱接线的核实,发现存在明显的图实不符:隔离开关直流合位信号芯线(编号805)接在端子号为机构箱X1:2,与隔离开关交流操作回路迂回,在就地手动分闸时就会造成交流窜入直流回路。

2.2 出口继电器及分布电容参数测试

对1号主变压器跳闸回路中所有跳闸电缆的分布电容和CZX-11R和PST-1200操作箱中TJR的动作电压、动作电流和功率进行了测试。

2.2.1 出口继电器参数的测试

测试了跳闸的5021、5022、201和未跳闸的301的TJR及本体重瓦斯开关操作箱出口小继电器动作电压和动作电流,测试未跳闸开关301和重瓦斯跳闸继电器的目的是为了便于分析比较,其试验测量数据见表1。

由表1可见,5021、5022、201和301跳闸继电器动作功率都很低;而瓦斯跳闸继电器则达到了3 W,虽然不满足反措要求的大于5 W,但在本次事故中未动作也充分说明了动作功率大小的重要性。

表1 出口继电器动过电压、电流和功率测试

测试继电器		动作电压 /V	动作电流 /mA	功率 /W
5021 操作箱 TJR	跳圈一	132	5.1	0.67
	跳圈二	110	5.6	0.62
5022 操作箱 TJR	跳圈一	116	6	0.70
	跳圈二	127	6.42	0.82
201 操作箱 TJR	跳圈一	90	5.1	0.50
	跳圈二	120	5.4	0.65
301 操作箱 TJR	跳圈一	79	4.5	0.36
	跳圈二	110	4.8	0.53
重瓦斯跳闸继电器		167	18	3

2.2.2 分布电容测试

测试了5021、5022、201和301开关跳闸回路的分布电容。试验数据如表2。

表2 跳闸回路分布电容测试

	$C_1 / \mu\text{F}$	$C_2 / \mu\text{F}$
5021 开关	92.8	93.3
5022 开关	92	86.8
201 开关	126.6	117.5
301 开关	4.6	4.8

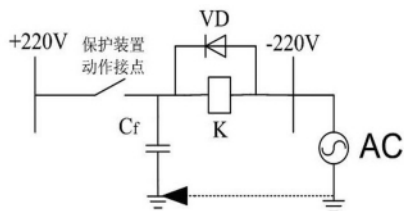
注: C_1 为 TJR1 跳闸回路分布电容; C_2 为 TJR2 跳闸回路分布电容。

由表2可见,所有跳闸开关的跳闸回路分布电容均较大,而未跳闸的301开关的跳闸回路分布电容较小,其影响分布电容大小的原因如下。①1号主变压器柜跳5021、5022开关的控制回路长约180 m左右,从主变压器保护室到51小室,跨越距离远,因此5021、5022开关操作箱跳闸回路分布电容较大;②1号主变压器柜跳201开关的控制回路长约110 m左右,从主变压器保护室到220 kV小室,跨越距离远,因此201开关操作箱跳闸回路分布电容也较大;③1号主变压器柜跳301开关的控制电缆由于只在主变压器小室内,其跨越距离很近,所以其分布电容很小。

2.3 跳闸原理及原因分析

2.3.1 跳闸原理分析

当站内绝缘良好时直流回路一般不会受到影响。但是当交流量进入直流回路中时,在直流回路中基本不起作用的分布电容和杂散电容就会形成回路能够让交流量流过(如图1),当电容值足够大,储存的能量足够多时,就会使继电器K抖动,严重时使相应开关跳闸。



C_f 为跳闸回路等效分布电容; K 为跳闸继电器;

AC 为窜入直流回路的等效交流电源

图1 跳闸等效原理图

2.3.2 跳闸原因分析

事故的主要原因是交流窜入了直流,由于分布电容的影响造成出口继电器动作跳闸。从 SOE 和直流监控机上的信号来分析,故障前存在交流混入直流电源回路的情况。当交流量窜入直流回路时,若无对地分布电容的影响,一般情况下只会引起直流瞬间接地而无严重后果,但当跳闸回路分布电容较大时,会对操作箱的出口小继电器产生影响,达到一定数值就会引起跳闸。本次跳闸事故均说明了上述论断,即所有跳闸回路分布电容大的开关均跳闸,所有跳闸回路分布电容小的均未跳闸。

事故另一个重要因素是操作箱出口继电器动作功率低。本体重瓦斯电缆也较长,但是由于动作功率达到了 3 W,同样的电压施加在上,没有达到其出口动作功率而未造成主变压器三侧开关跳闸。

综上所述,这两次跳闸的主要原因是交流窜入了直流,由于分布电容的影响,出口继电器感受到的电压超过其动作值,造成开关无故障跳闸情况的发生;并且由于两次交流入侵点的不同而造成了两次所跳开关也不一样。

3 危险点分析和防范措施

3.1 危险点分析

由于该类事件的随机性较强,涉及全站几乎所有的交直流二次系统,对造成的后果往往分析判断难度较大,因此对常见危险点应有相应的认识:①屏顶小母线上既有交流又有直流,在上面工作时或小动物引起小母线短路时,很可能造成交直流回路串接;②主变压器风冷箱。变压器风冷箱内既有直流又有交流,且接线较为复杂,接线错误或工作过程中的误接线、误碰和设计等诸多因素均可能造成交流窜入直流;③开关和隔离开关机构箱。交流电源包括电气五防、隔离开关电源、储能电源、照明等。直流包括操作电源、

信号回路等。工作过程中的误接线、误碰和设计错误都可能造成交流窜入直流;④控制电缆。反措虽然明确规定了交流与直流不能共用一根电缆,但是由于对此造成的危害认识不够,目前设计上仍然存在交流与直流共用一根电缆的情况。

3.2 防范措施

1) 提高开关操作箱的出口继电器的动作功率,更换 5021、5022 和 201 开关操作箱的 TJR 继电器所在操作板。变压器瓦斯启动中间继电器已有反措要求必须大于 5 W^[1-3],但线路等跳闸回路并无此标准,因此可以参考主变压器瓦斯启动中间继电器的反措要求,将其他重要且电缆较长的跳闸回路出口继电器启动功率提高到 2.5 W 以上。

2) 合理规范二次电缆的路径。二次电缆敷设尽可能离开高压母线、避雷器和避雷针的接地点、并联电容器、电容式电压互感器、结合电容及电容式套管等设备,避免和减少迂回,缩短二次电缆的长度。

3) 在不影响保护性能的前提下可以增加某些可能引起误动的关键开入量的动作时间降低灵敏度,使其动作时间大于 20 ms^[4],这种方法可以有效地躲过工频交流量窜入时带来的干扰,但会部分牺牲保护的動作速度(此项要求国网 QGDW175-2008 变压器高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范中 4.2.1 的 f 项有要求,不经判据的跳闸应有 10~35 ms 的延时)。

参考文献

- [1] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] 国家电力调度通信中心. 继电保护培训教材 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [4] 江苏省电力公司. 电力系统继电保护原理与实用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [5] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [6] 国家电力调度通信中心. 变压器高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

作者简介:

胡晶晶(1979),男,硕士,长期从事继电保护工作;

曾丽(1980),女,工程师,长期从事电力系统状态检修工作。

(收稿日期:2012-01-12)

广角红外透镜在封闭高压开关柜温度检测上的应用

赵 云

(四川省电力公司阿坝公司, 四川 阿坝 623200)

摘 要:在介绍广角红外透镜的基本原理基础上,探讨了该型透镜在封闭开关设备内部发热检测中的应用,并给出了单面安装方法。其研究工作,对提高封闭开关设备内部发热监测水平,具有较高的价值。

关键词:广角红外透镜; 封闭开关设备; 内部发热; 检测; 单面安装方法

Abstract: Based on the basic principles of wide-angle infrared lens, its application to the internal heating detection of enclosed switchgears is discussed, and a single-sided installation method is given, which is of great value to the improvement of internal heating detection for enclosed switchgears.

Key words: wide-angle infrared lens; enclosed switchgear; internal heating; detection; single-sided installation method

中图分类号: TM835 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)03-0064-03

作为发电厂、变电站中的重要设备,高压开关柜具有合关及开断电力线、实现输送及倒换电力负荷、退出故障设备和线段等功能,对保证电力系统安全运行起着举足轻重的作用。但在长期运行过程中,柜内的触点和母线排连接处等部位,常常因老化和接触电阻过大而发热,致使在高温高负荷期间,由柜内触头过热引起的烧柜事故时有发生。为保证开关设备与电力系统运行安全,有必要对封闭开关柜内部温度进行严密准确的监测。

红外测温是检测电力设备发热的有力手段,但一般只用于敞开电力设备。对于大量运行的封闭开关设备而言,由于外壳的阻隔,需要在外壳上安装红外透镜,才能使用红外热成像仪等进行发热诊断。但迄今为止,绝大多数红外透镜的成本、尺寸、机械性能等诸项指标都不尽人意,严重影响了红外透镜在封闭电力设备内部测温领域的推广和应用。

随着透镜材料技术的发展,一种采用LLDPE树脂的广角Fresnel红外透镜可用于封闭开关设备红外检测,结合封闭开关设备的特点,需研究单面安装的镜框结构和安装方法。

1 常规红外透镜的缺点

常规的红外透镜通常用单晶硅、单晶锗、硒化锌、硫化锌等无机晶体材料加工而成,具有以下性能缺陷:①价格贵,直径为60 mm的圆形镜片,单价通常在

千元以上,尺寸越大,价格越贵;②加工难,尺寸小。无机晶体材料的加工极为困难,导致此类红外透镜的直径一般不超过100 mm,再大,则很难加工成功。此类尺寸的红外透镜,观察范围较为有限,难以全面监测封闭开关设备内部的发热情况;③机械性能差,无机晶体材料红外透镜机械强度与韧性较差,容易破碎,以致给设备外壳留下空洞,造成安全隐患;④表面硬度很低,容易磨花。如果透镜表面有污秽或灰尘,只能用软棉布沾无水酒精轻轻擦拭;⑤稳定性差,易水解,不耐酸碱的腐蚀,不能在有污染和湿度大的环境下长期工作。

这些技术问题严重影响了红外检测技术在封闭开关设备上的推广应用,成为了该类设备发热状态检测和状态检修的障碍。

2 LLDPE树脂广角Fresnel红外透镜的原理

LLDPE树脂材料物理化学性能稳定,能克服无机晶体材料上述缺陷。在红外光学性能方面,不仅有较高的长波红外线透过率,而且其折射率大约为1.5,在没有镀膜的情况下其反射损失为10%,不需要像无机晶体材料如单晶硅材料那样需要在表面镀以昂贵的增透膜来减少反射损失。其光学透过率曲线如图1所示。

鉴于此,采用LLDPE树脂,研制加工出一种用于封闭开关设备红外检测的广角Fresnel红外透镜。

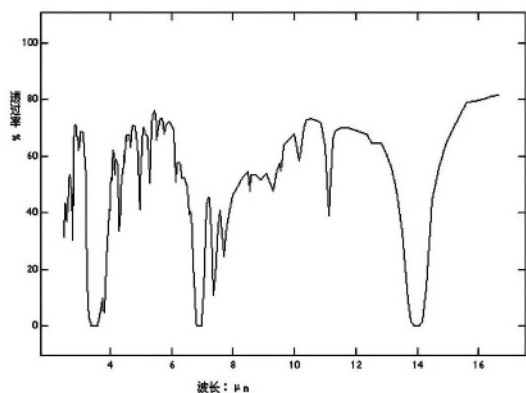


图1 LLDPE树脂材料的光学透过曲线

在加工时,先将LLDPE树脂材料热压成是厚度为0.38 mm的薄膜,两面为平面,再采用了准分子激光微加工系统加工成负焦距Fresnel透镜。准分子激光微加工系统的加工能力可使透镜加工按最优光学方案进行:透镜采用完全非球表面,而没采用圆锥形的齿槽;采用非周期的齿槽结构,即在径向单位长度内具有变化的齿槽数,从透镜边缘到中心,齿槽数是减少的,而没采用在径向单位长度内具有固定的齿槽数的结构;同时又保持所有齿槽的深度不变。这些措施减少了不确定的散射和衍射,减少了透镜光学误差,提高了透镜成像质量和对特定波长范围光线的透过率。通过在兼顾成像质量的前提下,根据封闭开关设备的尺寸和检测范围来确定适当透镜的负焦距,扩大了视角。配合镜框安装于封闭开关设备外壳适当位置,在其狭窄的空间内可使观察范围扩大2至4倍。该透镜的部分光学结构如图2、图3所示。

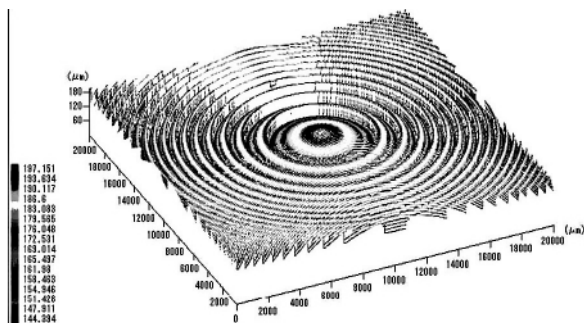


图2 广角Fresnel红外透镜中央3D形状图

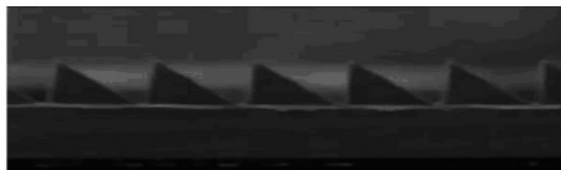


图3 广角Fresnel红外透镜齿槽剖面的扫描电子显微照片

3 LLDPE树脂广角Fresnel红外透镜的安装

该透镜构件的结构采用如下方案:广角红外透镜安装在金属外框上,用密封胶密封并与金属外框固定在一起,金属外框上有孔,安装时根据纸钻模所示位置在封闭开关设备面板上钻孔,用手动抽芯铆枪和高强度不锈钢抽芯封闭铆钉将金属外框紧固于封闭开关设备面板。金属盖板通过螺纹和金属外框连接,红外透镜的防护等级达到IP65,高于封闭开关设备的防护等级。所以安装窗口不会改变封闭开关设备的安全性。并完全符合DL/T 664-2008《带电设备红外诊断技术应用导则》的要求。

由于封闭开关设备内部空间狭窄,安装红外透镜时操作人员及工具往往不能抵达封闭开关设备面板背面。因此开发出相应的单面安装方法,既不用进入,也不需要用手或工具伸入封闭开关设备里面,就可完成红外透镜安装。相应安装流程如下:①准备如下安装工具:不干胶纸钻模、锤子、镊子、电钻、4.2 mm钻花、开孔器、圆锉、手动抽芯铆枪;②按红外透镜尺寸,用不干胶纸钻印制纸模,并将其贴于安装处;③用镊子标注中心孔和安装孔位置;④用电钻安装4.2 mm钻花钻中心孔和3个安装孔;⑤用开孔器在中心孔所示位置开圆孔;⑥用圆锉打磨切口毛刺,并用防锈漆涂抹切口;⑦用手动抽芯铆枪和高强度不锈钢抽芯封闭铆钉紧固红外透镜于面板。

安装好的LLDPE树脂广角Fresnel红外透镜结构与位置如图4所示。

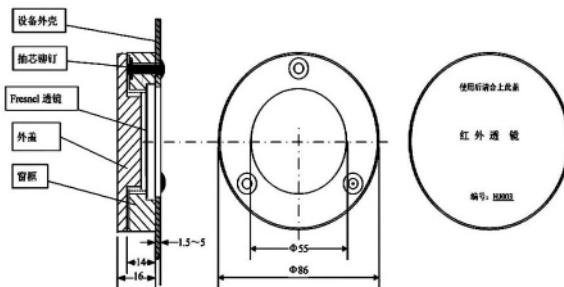


图4 广角Fresnel红外透镜安装结构示意图

4 现场试验

为检验该观测窗与红外热成像仪配合测量柜内温度的效果,专门进行了现场安装及测温试验。在现场安装中,为保证封闭开关设备的安全,窗口的防护

等级达到 IP65, 高于封闭开关设备的防护等级。

安装在 XGN2-12 型箱型固定式交流金属封闭开关设备上的 FRESNEL 透镜具有如下参数: 直径为 $\varphi 40$ mm; Fresnel 透镜直径为 $\varphi 30$ mm; 材质为 LLDPE 树脂; 厚度为 0.38 mm; 焦距为 -330 mm; 增加视角为 15° 。通过测温, 得出了柜内被测铜排及接头区域详尽全面的温度分布云图, 如图 5 所示。

该试验表明, 将广角 Fresnel 红外透镜用单面安装法安装于封闭设备外壳的适当位置, 与红外热成像

仪相结合, 能够很方便地得到高压开关柜内部设备详尽全面的温度分布情况。

5 结 论

综上所述, 所发明的广角 Fresnel 红外透镜, 结构坚固耐用, 观察范围宽广, 便于单面安装, 可以方便安全地实现封闭开关设备大面积、大范围的红外发热在线监测, 为状态检修提供有力依据。

参考文献

- [1] 国网武汉高压研究院, 华东电网有限公司. DL/T 664-2008, 带电设备红外诊断应用规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 陈永辉, 蔡葵, 刘勇军. 等. 供电设备红外诊断技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [3] 曾琛. 高精度红外仪器透镜用光学树脂的开发 [J]. 石化技术与应用, 2004, 22(5): 342-343.

(收稿日期: 2012-02-15)

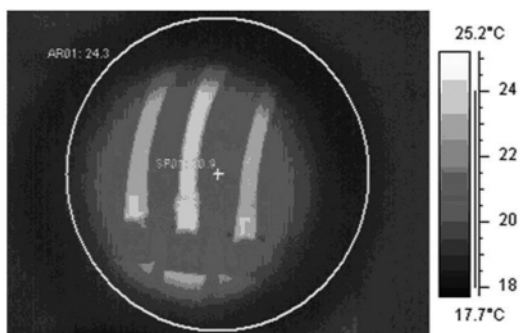


图 5 测温所得柜内铜排及接头的温度分布云图

(上接第 60 页)

电力信息技术是一个不断深入发展的过程, 基于 GPRS 抄收催一体化技术的管理系统在设计、开发、调试和应用集成的过程中进行了不断完善。在系统上线后也遇到一些问题, 系统经过硬件改进和应用升级得以解决。

3.1 应用中发现的问题

(1) 系统采用移动 GPRS 网络, 在部分农村偏远地区移动信号弱或未覆盖, 终端设备无法上线。

(2) 随着智能电网发展, 智能电表在农村逐步应用, 抄收催终端需要解决智能电表快速充值缴费的问题。

(3) 由于 GPRS 通讯信息中涉及电费缴费、账务资金等敏感数据, 该系统 GPRS 通信过程需要极高的安全保障。

3.2 应用改进和解决措施

(1) 终端设备采用更换终端通讯模块、延长终端天线等措施, 增强终端的通讯能力; 同时协调移动公司, 对 GPRS 信号未覆盖的地方进行补点, 从源头上解决 GPRS 通信问题。

(2) 抄收催终端在设计时预留了 IC 卡接口, 并在系统应用功能中增加智能电表充值缴费功能。通过抄表收费人员上门充值或在农村便利店部署抄收催终端, 实现了智能卡表用户的充值缴费。

(3) 基于 GPRS 抄收催一体化技术采用了 APN (Access Point Name) 专网模式, 利用 SIM 卡的唯一性, 划定用户可接入系统的范围, 有效避免了非法入侵。采用移动公司分配的 APN 进行无线网络接入, 在网络侧对 SIM 卡和 APN 进行绑定, 只有属于电力行业的 SIM 卡才能访问专用 APN。同时, 在网络边界采用安全的防火墙过滤, 设置防火墙软件保障系统安全。

4 结 语

基于 GPRS 抄收催一体化技术的管理系统将通信技术和计算机应用有机结合, 较好地解决了“农村用户抄表、收费、催费难以有效管理”的问题, 为电力企业提高了工作效率、降低了企业管理成本, 同时也为农村用户电费缴费提供了便利, 提高了客户满意度。同时, 系统全面支持预付费, 实时监控电费资金状况, 为农电资金安全提供了保障。通过推广试点证明, 基于 GPRS 抄收催一体化技术的管理系统为供电企业带来了良好的经济效益和社会效益, 提高了供电企业对现场工作的管理水平, 符合“精细化”管理的要求, 在供电企业内具有较大的推广应用价值。

(收稿日期: 2012-03-28)

电容式电压互感器二次电压偏低现象分析

刘同杰

(乐山电业局, 四川 乐山 614000)

摘要:针对电容式电压互感器(CVT)二次电压偏低情况,采用电气试验手段,对CVT解体分析,查找出故障点,通过试验数据进行准确计算,验证了该故障点查找的正确性,并针对CVT结构和制作工艺的不足,提出了应对该故障的预防措施。

关键词:电容式电压互感器; 二次电压; 绝缘故障; 预防措施

Abstract: Aiming at the lower secondary voltage of capacitor voltage transformer (CVT), the electrical test is used to find out the fault point after disassembling the CVT. The correctness of the troubleshooting is verified by the accurate calculation of test data. According to the shortcomings of the structure and manufacturing process of CVT, the precautionary measures against such fault are put forward.

Key words: capacitor voltage transformer; secondary voltage; insulation fault; precautionary measure

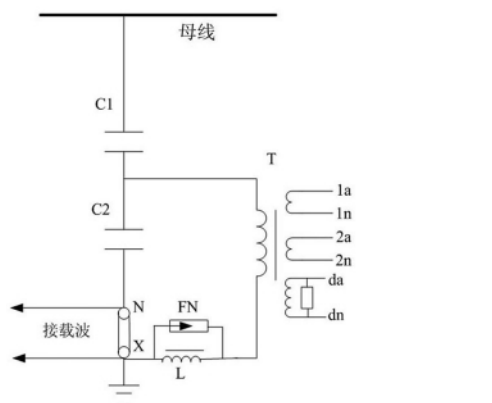
中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0067-03

电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, 简称 CVT)是由电容分压器与电磁单元两部分构成,它具有电压互感器与电力线路载波耦合装置中的耦合电容器的双重功能,因此近年来在电力系统中得到广泛的应用^[1]。

CVT一般常用于110 kV等级及以上变电站中。目前,由于受制作工艺、运输、设计等诸多因素的影响, CVT在运行中的问题也远远高于电磁式电压互感器和耦合电容器^[2],文献[3]中电容式电压互感器二次电压偏高分析,文献[4]中对 CVT 二次失压故障的试验分析等,都表明 CVT 二次电压出现异常情况的现象很频繁,急迫需要透彻地对其现象进行分析。因此针对此问题,以 CVT 二次电压偏低现象为基础,进行试验数据分析、CVT 解体及相关理论计算,在详细阐述该 CVT 的结构和制作工艺不足的基础上,提出了相关的预防措施,以便减少该现象的继续发生,保证电容式电压互感器在电网中稳定、安全运行。

1 CVT 的工作原理与结构

电容式电压互感器主要由电容分压器和中间变压器组成。由串联电容器抽取电压,再经变压器变压用作计量、继电保护,如图1所示。



C1 为高压电容; C2 为中压电容; T 为
TN 为保护避雷器; L 为补偿电抗器

图1 110 kV 电容式电压互感器原理图

出现异常现象的电容式电压互感器为西安西电电力电容器有限公司,型号为TYD110 $\sqrt{3}$ -0.02H, 2006年7月生产,2006年12月投运。其内部结构由5节电容串联组成,上4节为C1,最下面1节为C2,并用酚醛层压纸板组成的框架将其夹紧,其中每节电容又由16个电容单元串联构成,各单元间的连接采用窄铜带焊接方式。该互感器引出端子设置在环氧层压板上,端子与板间用密封圈密封。并且能满足在1.2Un及1.5Un(中性点有效接地系统)或1.9Un(中性点非有效接地系统)的铁磁谐振试验要求。

2 故障情况经过

2011年7月28日下午4时37分,某110 kV变电站运行人员对110 kV I段母线TV进行倒母操作,操作后继保人员发现B相TV出现二次采样电压偏低的异常现象,如表1。事故发生前,检修人员只对I段母线刀闸进行除锈工作,对其他设备没有任何操作。

表1 二次电压采样数据

U_{1a1n}	U_{2a2n}	U_{dadn}
55.1	55.4	95.8

2.1 停电后检查

故障发生后,针对此异常现象,现场对I母B相TV进行设备外观检查,其绝缘瓷瓶外表清洁、连接可靠、油位正常、N端与X端也可靠接地,并未发现闪络的迹象及其他异常。继保班工作人员对二次回路进行了详细检查,测量各节点电压,检查二次回路的绝缘状况,一切正常,由此推断是主设备自身的原因。为了查清CVT自身问题所在,高压试验班对B相CVT进行了绝缘试验、直阻和变比试验,表2、表3、表4分别为CVT介质损耗、二次直阻、变比试验的故障检查试验数据。

表2 介质损耗实测结果表

部位	$\tan\delta / \%$	C_x / pF	C_N / pF	误差 / %
$C_{\text{总}}$	0.159	20 229	20 060	0.8
C_1	0.126	25 510	25 256	1.0
C_2	0.114	97 900	97 500	0.41

表3 二次直阻实测结果表

laln	2a2n	dadn
26.7	62.1	120.3

表4 变比实测结果表

端子号	输入变化	实测变化	误差 / %
1a1n	1 100.00	1 148.7	4.42
2a2n	1 100.00	1 149.1	4.46
dadn	635.10	659.5	3.84

表2表明,I母B相TV绝缘试验数据合格,可排除TV进水受潮和断线的可能性。表3中可知道二次绕组直阻数据属于正常值,也可排除由于二次绕组的问题造成此异常现象。从表4中可看出故障后变比测试的误差值比较大。综合以上3类试验数据,可大体上推断出此异常状况是由CVT的一次电容屏绝缘受到局部破坏所导致。

2.2 CVT解体检查

为了进一步查清楚故障所在处,对I母B相TV进行解体,拧下电容分压器与电磁单元法兰处的螺丝,吊起电容分压器,经仔细检查发现,在电容分压器的C2的第8个电容单元处有黑点,并对16个电容单元逐一进行电容量测试,发现第8个电容量为零。对第8个电容单元进行拆解,如图2,发现锡箔纸受到局部放电的影响已被击穿。

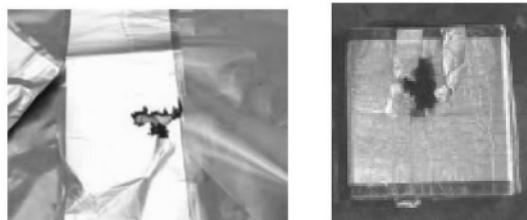


图2 锡箔纸局部破坏

2.3 计算分析

为了进一步确认故障由该处所引起,利用表2中的电容量相关数据进行计算,计算过程如下。

中压电容 C_2 所分得的额定电压为

$$U_{C2N} = 110 / \sqrt{3} \times \frac{C_{1N}}{C_{1N} + C_{2N}} = 13.06 \text{ kV} \quad (1)$$

那么 C_2 对二次绕组的额定变比分别为

$$n_1 = 13\ 060 / 100 / \sqrt{3} = 226.34 \quad (2)$$

$$n_2 = 13\ 060 / 100 / \sqrt{3} = 226.34$$

$$n_d = 13\ 060 / 100 = 130.6$$

C_2 未故障时,每个电容单元电容量为

$$C_{2\text{单}} = nC_2 = 16 \times 97\ 900 = 1\ 566\ 400 \text{ pF} \quad (3)$$

当第8片电容量为零, C_2 总电容量为

$$C_2^1 = C_{2\text{单}} / (n - 1) = 104\ 426.7 \text{ pF} \quad (4)$$

则此时中压电容上所分得的电压为

$$U_{C2}^1 = 110 / \sqrt{3} C_1 / (C_1 + C_2^1) = 12.48 \text{ kV} \quad (5)$$

利用式(2)中的计算结果,得二次电压为

$$U_{1a1n} = U_{C2}^1 / n_1 = 12\ 480 / 226.34 = 55.1$$

$$U_{2a2n} = U_{C2}^1 / n_2 = 12\ 480 / 226.34 = 55.1 \quad (6)$$

$$U_{dadn} = U_{C2}^1 / n_d = 12\ 480 / 130.6 = 95.6$$

从式(6)计算数据中可得出I母B相TV二次电压与表1中所反应的数据相差不大,从理论上可以将此次二次电压偏低的异常现象得到论证,此故障确实是由第8节电容单元电容量为零所引起。

3 故障原因分析

从故障现象及试验检查情况来看,出现该故障可

能有以下几点原因。

(1) 该次出现故障的产品只能满足在 $1.2U_n$ 及 $1.5U_n$ (中性点有效接地系统) 或 $1.9U_n$ (中性点非有效接地系统) 的铁磁谐振试验要求, 此次倒母操作很可能产生多次的谐波谐振电压, 易产生局部放电, 损坏分压电容绝缘。

(2) 酚醛纸板的层间易带杂质, 且纸板不易干燥彻底, 这些将导致电容芯柱高压端对地发生放电击穿现象。

(3) 铝箔端部尖端处场强集中, 易产生局部放电, 从而对膜纸复合介质的绝缘性能产生了积累效应, 缩短了使用寿命。

(4) 元件间的连接采用窄铜带焊接方式, 不能承受大电流的冲击, 电流密度大, 并且在焊接时温度较高, 有可能会烫伤元件端绝缘, 且焊渣易脱落, 位于两极板间的焊渣易导致局放量增大, 更严重者将引起电容元件的击穿。

4 预防措施

与此次故障类似结构的 CVT 仍有大量在网运行, 为了避免类似故障再次发生, 保障电网安全稳定运行, 可采取以下措施预防: ① CVT 产品为充油密封结构, 在使用期间应经常巡查产品的密封情况; ② 出线盒中 d1、d2 端子是阻尼器的连接端子, 使用中必须保证可靠连接, 不允许松动; ③ 当不接载波装置时, N、X 端子必须可靠短接; ④ 运行中应注意产品有无异常响声, 二次电压指示是否正常, 开口三角形电压是否升高, 如有异常应停止运行; ⑤ 利用停电预试机会, 加强对 CVT 的检查和试验; ⑥ 日常维护中重视红外热成像的应用, 通过定期进行红外监测和诊断, 及早发现设备的缺陷, 排除事故隐患; ⑦ 每次过电压操作后, 应注意观察 CVT 二次的电压有无较大的变化。

以上为针对类似结构产品提出的预防措施, 对于新建变电站使用的 CVT, 针对其内部结构及制作工艺, 提出以下几点要求, 以防止缺陷的频繁发生。

(1) 要求 CVT 在 $0 \sim 1.5U_n$ (中性点有效接地系统) 或 $0 \sim 1.9U_n$ (中性点非有效接地系统) 任一电压下都能满足铁磁谐振试验的要求, 以保证 CVT 投运时不发生铁磁谐振现象。

(2) 引出端子板采用一体式环氧浇注板(即引出端子的导杆与环氧在真空下浇注而成), 端子与板的结合致密, 保证不吸潮, 绝缘性能好。

(3) 元件间的连接采用宽铝带压接方式, 保证能承受大电流的冲击, 电流密度小, 对极板无灼伤作用, 杜绝由于脱落的焊渣引起的电容器内部的击穿现象。

(4) 在铝箔的端部处增设补强纸, 降低局部放电量, 提高了绝缘水平, 延长使用寿命。

(5) 电容分压器芯子紧固, 采用塑料收缩带及瓷套两端的盖板, 包角采用电工纸板。杜绝酚醛层压板的沿面放电现象。

5 结论

随着电容式电压互感器广泛地在电力系统中应用, 出现的故障也在相应地增加。此次故障并非是偶然, 在本单位已有两起该故障发生, 并且在外单位也有多起类似缺陷出现, 尽管表现形式多样, 但始终归结于制造工艺、结构原理及绝缘的累积效应所导致。近年来, CVT 故障率的不断增加影响了电网的安全运行, 为此, 必须引起制造厂家和电力部门对该问题的高度重视, 要求不断改进产品的制造工艺和手段, 重视日常运行维护管理工作。

参考文献

- [1] 周芳, 韩幸军, 李懂懂, 等. 一起 110 kV 母线电容式电压互感器二次电压异常分析与处理 [J]. 电气技术, 2011(5): 51-52.
- [2] 江疆, 张富刚, 樊越甫, 等. 110 kV 变电站电压互感器故障原因分析 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 139-140.
- [3] 刘胜军, 王慷, 郭猛. 电容式电压互感器二次电压偏高分析 [J]. 变压器, 2010, 47(4): 66-68, 11.
- [4] 胡伟, 王天一. 电容式电压互感器二次失压故障的试验分析 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(2): 59-62.
- [5] 张金祥, 黄德顺. 浅析电容式电压互感器二次电压偏高现象 [J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 115-116.

作者简介:

刘同杰(1984), 男, 硕士, 工程师, 现从事电气试验工作。

(收稿日期: 2012-02-22)

基于雷电定位系统对一起 220 kV 同塔双回输电线路 雷击跳闸故障查找与研究

魏文伟¹, 刘义平², 王 伟³

(1. 内江电业局, 四川 内江 641000; 2. 天津市电力公司路灯处, 天津 300151;
3. 十堰郧西县供电公司, 湖北 十堰 442600)

摘 要:结合 GPS 雷电定位系统提供的地闪电流值, 准确地对一起 220 kV 同塔双回输电线路雷击跳闸故障进行定位与查找, 通过对现场杆塔尺寸、保护动作及接地电阻等资料的收集, 采用反击耐雷水平和绕击几何电气模型等理论分析了线路跳闸原因, 并提出了相关的整改建议。

关键词:雷电定位系统; 同塔双回; 雷击; 研究

Abstract: Based on the current values of ground flash provided by GPS lightning location system, an accurate location and troubleshooting of tripping fault caused by lightning stroke in a 220 kV double-circuit lines on the same tower is achieved. According to the data collected in the tripping site such as the sizes of towers and poles, protection action and ground resistance etc., the theories, such as lightning withstand level of back flashover and electrical geometrical model of shielding failure are adopted to analyze the causes of line tripping, and the corresponding suggestions for improvement are proposed.

Key words: lightning location system; double-circuit lines on the same tower; lightning stroke; analysis

中图分类号: TM835 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0070-04

0 引 言

220 kV 输电线路作为内江电网主干骨架, 其安全稳定运行意义重大。但近年来, 雷害故障在 220 kV 输电线路运行中问题突出, 又由于同塔双回线路可减小走廊宽度、增大单位走廊宽度的输电容量, 且节省造价, 在 220 kV 及以上输电工程中被愈来愈多地采用^[1]。由于同塔双回线路杆塔高, 更易遭受雷击, 利用雷电定位系统测得的雷电参数, 对一起 220 kV 同塔双回输电线路(白凉东线)发生的跳闸事故进行故障定位查找, 对其耐雷性能进行了计算, 并对引起线路跳闸的原因进行分析, 提出相应的防雷整改建议。

1 220 kV 白凉东线简介及保护动作情况

1.1 220 kV 白凉东线简介

220 kV 白凉东线于 1985 年 9 月投运, 全线同塔架设, 共 87 基杆塔, 线路全长 35.686 km, 导线型号为 LGJ-400/35, 地线型号为 GJ-50, 绝缘子型号为 FXWB-220/100, 绝缘子防污等级按 II 级污秽区配

置, 是白马电厂与 220 kV 凉水井变电站的主要联络线。

1.2 保护动作情况

2010 年 6 月 18 日 23 时 50 分, 220 kV 白凉东线两侧(白马电厂、凉水井变电站) 1 号、2 号高频闭锁距离、零序保护动作跳闸, 故障相相电流 $I_{\max} = 33.66$ A, 故障零序电流值 $I_0 = 29.03$ A, 选相 L2 相。白马侧双纵联保护动作, 保护测距 7.5 km, 凉水井侧保护测距 27.2 km, 重合闸成功。

2 雷电定位系统故障定位情况

发生雷击事故时当地天气情况为雷雨天气, 空气相对湿度较高, 气温 18℃左右。查询雷电定位系统, 当天 220 kV 白凉东线附近共落雷 169 次。在 23 时 50 分左右, 线路通道有 3 处雷区, 17-18 号、18-19 号、21-22 号, 距离分别为 695 m、319 m、303 m。于是巡视人员将故障点锁定在 17-22 号塔区段, 在巡视过程中发现 19 号塔 L2 相复合绝缘子串、均压环有明显放电闪络痕迹, 在对 19 号塔带电登塔检查时证实复合绝缘子和均压环遭雷击引发故障跳闸, 同时其

表1 220 kV 白凉东线雷击故障点查询

2010-06-18 搜索时间	电流 /kA	经度 /°	纬度 /°	回击 /次	杆号	距离 /m	序号
23:50:43.6450	-416.1	104.954 4	29.557 2	5	21~22	303	1
23:50:43.6752	-34.2	104.963 3	29.546 5	0	18~19	319	2
23:50:43.6915	-46.3	104.967 8	29.546 7	0	17~18	695	3

他段未发现异常。

2.1 雷电定位系统雷击故障点查询情况

查询情况如表1所示。

2.2 线路雷电活动分布情况(主要反映故障前后线路附近雷电流情况)

线路雷电活动分布见图1。



图1 线路通道情况,红色点表示落雷情况

3 铁塔雷击闪络原因分析

220 kV 白凉东线19号塔复合绝缘子型号为FX-BW-220/100,结构高度为2 150 mm,2008年线路经调爬加一片大盘径XWP2-7玻璃钢绝缘子,绝缘总长度为2 200 mm,爬电距离为5 425 mm。查找其出厂时试验报告知:工频试验耐受电压560 kV,耐受时间1 min正常;陡波冲击试验电压陡度为1 150 kV/FMS,冲击次数5次正常。19号塔绝缘子雷击放电情况见图2和图3。



图2 19号塔复合绝缘子均压环放电图

3.1 反击耐雷水平的分析



图3 19号塔大盘径绝缘子金具连接处放电图

根据DL/T 620-1997,同塔架设的双回输电线路,雷击杆塔时,其中一回输电线路绝缘被击穿的耐雷水平为^[2]

$$I = U_{50\%} / \left[(1-k) \beta R_{ch} + (h_a/h_t - k) \beta L_t / 2.6 + (1 - k_0 h_g/h_t) h_c / 2.6 \right] \quad (1)$$

式中, $U_{50\%}$ 为绝缘子串50%冲击闪络电压,kV; k 为导线线间耦合系数; k_0 为电晕效应校正系数; β 为杆塔分流系数; R_{ch} 为杆塔冲击接地电阻, Ω ; L_t 为杆塔电感, μH ; h_g 为地线平均高度,m; h_c 为导线平均高度,m; h_t 为杆塔高度,m; h_a 为横担对地高度,m。

由式(1)可知,反击的形成与下列因素有着密切的关系:雷电流幅值与极性、雷电波陡度、接地电阻、避雷线耦合系数及分流系数、接地引下线与塔间接触电阻、杆塔形式等^[3]。

下面根据线路防雷设备运行状况和反击耐雷水平以及雷电流出现概率来进行分析。220 kV 白凉东线19号塔反击耐雷水平计算如下。

(1) 计算参数:19号塔塔型为SZT3直线塔, $h_a = 37.6$ m, $h_t = 44.6$ m, $U_{50\%} = 1 150$ kV, $k_1 = 1.25$, $\beta = 0.88$, $R_{ch} = 1.5$ Ω ,导线弧垂 $f_c = 14.4$ m,地线弧垂 $f_g = 11.7$ m,地线型号GJ-50,绝缘子串长 $h_e = 2.2$ m。

$$(2) \text{ 避雷线平均高度 } h_g = h_t - \frac{2}{3} f_g = 36.8 \text{ m}$$

$$(3) \text{ 导线平均高度 } h_c = (h_a - h_e) - \frac{2}{3} f_c = 25.8 \text{ m}$$

(4) 双避雷线对导线的几何耦合系数

$$k_0 = (Z_{13} + Z_{23}) / (Z_{11} + Z_{12}) = 0.237$$

(5) 电晕下的耦合系数 $k = k_1 k_0 = 0.296$

(6) 杆塔电感 $L_t = 0.5 h_t = 22.3 \mu\text{H}$

将计算参数代入上述计算公式,则反击耐雷水平为: $I = 88.18 \text{ kA}$,则雷电流超过的概率为 $\lg P =$

$$-\frac{1}{88}, \text{ 得出 } P = 9.95\%。$$

从反击耐雷水平计算可知,一般发生雷击故障杆塔的反击耐雷水平普遍较高,同时通过测量19号塔雷击故障杆塔的工频接地电阻未超过其设计值(一般是 10Ω),说明线路杆塔的反击耐雷水平比设计值还会更高,具有较高的防止反击事故的能力,反击一般难以形成。从GPS雷电定位系统提供的雷电流数据来看,该线路当天落雷高达169次,且在23时50分220 kV白凉东线故障跳闸时间段内,19号塔附近出现了幅值为 -34.2 kA 的落雷,其雷电流幅值远小于19号塔耐雷水平(88.18 kA),故判断19号塔不具备发生反击的条件。

3.2 绕击原因分析

目前,国内对绕击的分析主要有规程法、击距法两种。规程法计算方法简单,但偏差较大。另一种方法是近年发展起来的电气几何模型法即EGM,它利用“击距理论”较好地解释了运行中导线屏蔽失效时的雷电绕击机理。它考虑了杆塔几何尺寸、地形、雷击电流大小等因素,反映了线路运行的实际情况,得到较广泛应用^[4]。下面利用EGM法对线路雷击事故进行绕击分析。

2010年6月18日23时50分,雷雨天气,220 kV白凉东线L2相故障跳闸,重合成功,据GPS雷电观测系统反映,雷击故障定位于17-18号、18-19号、21-22号之间,并获得3个地闪雷电流,均为负极性,其幅值分别为 -46.3 kA , -34.2 kA , -416.1 kA 。

经现场检查发现19号塔L2相(外侧右边线)整串绝缘子有闪络痕迹。故障前测得接地电阻分别为 1.5 kA ,该塔位于斜山坡上,L2相为山坡外侧边导线,山坡倾角约 30° ,塔型为SZT3直线塔,绝缘配合为FXWB-220/100,经调爬加一片大盘径玻璃钢绝缘子。两侧档距分别为 205 m 和 469 m ,避雷线对导线的保护角为 $14^\circ 20' 30''$ 。

绕击计算分析如下。

(1) 临界击距 γ_{sc} 、临界电流 I_{sc} (EGM法、击距理论)

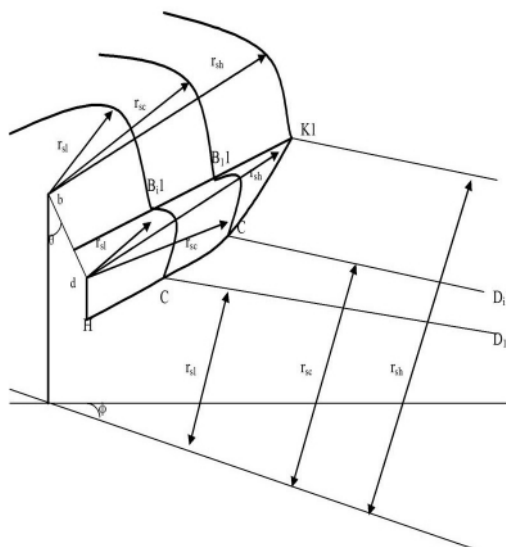


图4 输电线路绕击的电气几何模型

实际击距小于临界击距或实际雷电流小于临界电流的绕击,不会使绝缘闪络。线路绝缘的绕击耐雷水平计算公式为

$$I_{sc} = 4 \times U_{50\%} / Z$$

式中, Z 为导线波阻抗,按过电压规程DL/T 620-1997取为 400Ω ,则依据220 kV白凉东线19号塔的绝缘配置为

$$I_{sc} = 4 \times U_{50\%} / Z = 11.5 \text{ kA}$$

$$\text{由 } \gamma_{sc} = 7.1 I_{sc}^{\frac{3}{4}} \text{ 得出 } \gamma_{sc} = 44.34 \text{ m}$$

(2) 最大击距 I_{sc} 及相应雷电流 I_{smax}

这是由杆塔几何尺寸及地形决定的一个击距。击距大于 I_{smax} 的雷击只能对屏蔽线或地面闪络,一般不会绕击相导线。

依据最大击距计算公式为

$$\gamma_{smax} = (h_g + h_c) / 2 [1 - \sin(\alpha + \theta)]$$

式中, h_g 为地线平均高度,m; h_c 为导线平均高度,m; α, θ 分别为避雷线保护角和山顶倾角。

220 kV白凉东线相应计算参数为 $h_g = 36.8 \text{ m}$, $h_c = 25.8 \text{ m}$, $\alpha = 14^\circ 20' 30''$, $\theta = 30^\circ$,则 $\gamma_{smax} = (h_g + h_c) / 2 [1 - \sin(\alpha + \theta)] = 103.96 \text{ m}$ 。

$$I_{smax} = (\gamma_{smax} / 7.1)^{\frac{4}{3}} = 35.82 \text{ A}$$

计算绕击率 $I_g P'_\alpha = \frac{\alpha \sqrt{h_t}}{86} - 3.35$ 得出山丘地区

$P'_\alpha = 0.58\%$,根据 $I_{sc} < I < I_{smax}$,即19号塔雷电流幅值为 -34.2 kV ,在最大电流 $I_{smax} = 35.82 \text{ kA}$ 之内,与最大绕击雷电流差 1.62 kA ,说明避雷线的屏蔽效果较好。可初步判断3个实测雷电流中,有可能是 -34.2 kA 的雷绕击L2相导线,造成事故跳闸。

3.3 反击与绕击对比分析

反击与绕击对比分析见表2。

表2 反击与绕击对比

比较项目	反击	绕击
雷电流幅值	大(相对杆塔耐雷水平)	小(相对杆塔耐雷水平)
接地电阻	大	小
闪络基数	一基多相或多基多相	单基单相或相邻二基同相
塔身高度	较高	较低
地形特点	一般,不易绕击	山坡及山顶易绕击处
闪络相别	耐雷水平较低相(如下相)	易绕击的相(如顶相、边相)

由本次雷击杆塔搜集的基本数据和特征(单基单相、小雷电流幅值等),再结合表2所列的个性特征和表象进行比较得出220 kV白凉东线19号塔发生雷绕击导致跳闸。

4 结论与建议

通过上述分析,本次220 kV白凉东线跳闸是雷电绕击19号塔所致。由于19号塔避雷线对边导线保护角和塔地面倾角的影响,降低了避雷线及地面屏蔽的有效性,在一定程度上增大了雷击杆塔时绕击的概率,从而导致了雷电绕击跳闸的发生。

为了避免以后输电线路雷击情况的发生,减小双回路高塔雷害事故的措施如下。

(1) 雷害事故预防要做到防反击与防绕击并举。对于防止反击来说,降低杆塔接地电阻,尽量减少杆塔高度及接地体长度至关重要;架设耦合地线,由于增大了避雷线与导线之间的耦合系数,减少了绝缘子串两端的反击电压和感应分量。对于防止绕击来说,应从加强线路绝缘(例如在塔头间隙尺寸允许的情况下,增加一至两片绝缘子),尽量采用分裂导线(减小波阻抗),加强屏蔽效果等方面采取措施;在易绕击地段,可考虑加装线路用的ZnO避雷器,以及加装防绕击避雷针。

(2) 对220 kV线路,由于地面倾角的影响,降低了避雷线及地面屏蔽的有效性,在设计选线中,应尽量避免山顶、连续斜坡等塔位,并尽量选用保护角较小甚至负保护角的塔型。

(3) 加强线路零值瓷瓶的检测,保证线路足够的绝缘强度。线路尽量采用钢化玻璃绝缘子,可以免去大量的零值测试工作。合成绝缘子对污秽严重地区作用明显,由于遭受雷击后巡查和雷击定点较困难,如果遭雷击后金属端部烧损严重,渗水性能下降,潮气进入,也极易引起次雷击芯棒烧损掉串。因此,合成绝缘子的金具或绝缘烧损后,要及时更换^[5]。

(4) 充分利用GPS雷电信息系统提供的资料,在落雷密度较大的线段提高线路的防雷设计等级,以提高线路的防雷能力。

参考文献

[1] 金祖山,吴建儿. 220 kV同塔双回输电线路雷击跳闸原因分析[J]. 浙江电力,2009(1):51-53.
[2] DL/T 620-1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
[3] 周泽存,沈其工,方瑜,等. 高电压技术(第三版)[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
[4] 秦海波,李琳,赵志斌. 输电线路绕击跳闸率的改进电气几何模型[J]. 电力科学与工程,2009,25(5):16-19.
[5] 吴建儿. 浅谈输电线路雷电绕击与反击[J]. 浙江电力,2007,26(4):43-46,56.

作者简介:

魏文伟(1984),男,助理工程师,主要从事线路运行与检修等研究工作;

刘义平(1985),男,助理工程师,主要从事配电线路运行与检修等研究工作;

王伟(1984),男,助理工程师,主要从事线路运行与检修等研究工作。

(收稿日期:2012-02-12)

欢迎投稿 欢迎订阅

架空地线的绝缘化改造及融冰方法

陈义刚¹, 范松海²

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要:提出了一种架空地线的融冰方法。通过对架空地线进行绝缘化改造,使架空地线沿线对地绝缘,从而使其具备融冰条件,并基于此提出了架空地线融冰电流的计算方法。架空地线由于电阻大,融冰时主要为有功功率消耗,宜采用交流融冰方法,融冰过程中不需停负荷,在实际中具有较强的经济性和可操作性。

关键词:架空地线; 融冰; 绝缘化改造

Abstract: An ice-melting method for overhead earth wire is presented. The overhead earth wire is insulated to the ground by insulation reconstruction, which makes it possess ice-melting conditions. Then, a calculation method of ice-melting current on overhead earth wire is proposed. Because of the great resistance of overhead earth wire, the active power is the main consumption during the ice melting. So the AC ice-melting method should be adopted for the overhead earth wire. It needs no power supply interruption during the ice melting, so it has a stronger economy and operability in the practice.

Key words: overhead earth wire; ice melting; insulation reconstruction

中图分类号: TM75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2012)03-0074-04

0 概述

最近几年,输电线路冰灾事故频发,给电力系统带来巨大的经济损失。2008年冰灾,造成全国范围内电网因冰灾停运的电力线路计39 033条,造成了数以千亿的经济损失^[1-3]。2011年年初,连续的冰雪灾害造成四川电网500 kV布坡高压线倒塔两基,使二滩、瀑布沟等重要水电送出通道瘫痪。2011年12月10日,四川月普一、二线发生了因冰灾断线倒塔的事故。2012年年初,布坡线又发生了倒塔断线事故。

2008年年初中国南方大面积冰灾后,通过分析和比较,国家电网公司和南方电网公司均把短路融冰作为防治电网冰灾的主要方法,相继投入了大量的人力、财力和物力研究以及开发短路融冰方法和装备^[4]。四川省电力公司于2011年在普提站和东坡站装设了两套直流融冰装置,2012年又计划新安装3套直流融冰装置。

但是,由于架空地线沿线分布接地特性,不能直接采用短路融冰,这导致架空地路除冰成为难点。而架空地线处在输电线路的上方,其覆冰往往比输电线路更严重。2011年年底,普洪三线实施直流融

冰之后,无法恢复送电,后在巡线时发现,该输电线路的某一段地线出现断线,折断的地线搭在输电线路路上,从而导致输电线路无法恢复供电。在2012年年初,又出现了两次地线断股断线事故。地线除冰已成为当前输电线路防冰减灾的紧迫课题。下面提出了通过对架空地线绝缘化改造,使架空地线具备融冰条件,采用交流电源提供融冰电流,可以实现输电线路带负荷除去架空地线的覆冰。

1 架空地线覆冰的危害性

1.1 架空地线在冰荷载的作用下出现断股、断线

如果冰荷载超过了架空地线的机械强度,架空地线就会出现断股、断线^[5]。折断的地线可能悬空或直接搭在输电线路路上,易造成输电线路对地线放电或直接短路故障,使输电线路无法正常输电。此外,架空地线的断线也会造成输电线路力学体系失衡,为杆塔倾斜甚至倒塌埋下隐患。

1.2 架空地线在冰荷载的重力作用下弧垂过低

由于冰荷载的重力作用,架空地线将比无覆冰时的弧垂要低,弧垂降低的程度取决于冰荷载的重力和架空地线本身的弹性模量。一般来说,架空地线与同走廊的导线的弹性模量不会有太大差别。同

一地段的导线覆冰也相差不会太大,故在一般情况下,可以粗略地认为地线和导线的弧垂近似一致,二者之间的间距也基本恒定。但是,弧垂过大,再加上覆冰导线特殊的空气动力特性,容易导致导线发生舞动,因而增加了导线之间放电的风险。此外,当导线实施融冰之后,导线因冰荷载的释放而恢复正常弧垂,而地线由于无法实施除冰,其与导线之间的距离可能会小于安全距离,这将会导致导线之间的放电甚至直接放电,如图1所示。

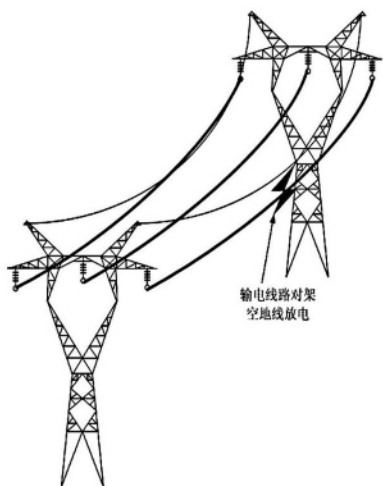


图1 架空地线因弧垂过低与输电线路放电

2 架空地线的融冰方案

由于架空地线与塔直接连接,沿线分布接地,因而不能通过融冰电流。要对架空地线实施融冰的前提条件是要对其进行绝缘化改造^[7-8]。改造的目标是让塔与地线之间相互绝缘。改造的方式是在塔与地线之间安装绝缘子,使架空地线与塔之间通过绝缘子相连,从而隔断了塔与地线之间的电气连接(如图2所示)。在地线两端的变电站,架空地线通过一个开闸后接地。在正常运行时,隔离开关处在合闸位置,使架空线在变电站内接地。而在融

冰状态,使隔离开关处在断开状态,电源端变电站对架空地线通融冰电流,在对侧变电站使两地线直接短接,融冰电流通过两架空地线形成回路,从而达到融冰的目的。

2.1 架空地线融冰电流的选择

架空地线融冰与导线融冰原理是一致的。如图3所示,架空地线通融冰电流后,将产生焦耳热。焦耳热一部分用于加热地线,使其温度升高。焦耳热的另一部分则传递至冰层内表面。在冰层内表面上,一部分热量用于融冰所吸收的潜热,另一部分则传导至冰层外表面,使冰层外表面的温度上升至 T_i 。由于冰层外表面的温度 T_i 大于环境温度 T_a ,所以,冰表面将以对流传热和辐射散热的方式向周围的空气中散失热量。而对流传热和辐射传热是由风速和环境温度控制的,所以,导线融冰也受风速和环境温度的影响。根据融冰过程中热传递过程,可以得到式(1)~(4)的融冰电流计算公式^[1-5]。

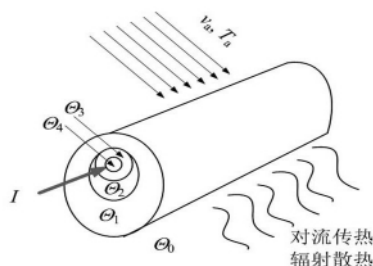


图3 融冰的热平衡示意图

$$h = (0.295R_i)^{-0.534} v_a^{0.466} + 4.39 \times (1 + 0.01T_a) \quad (1)$$

$$T_i = \frac{T_a}{1 + \frac{13.947}{h \ln(R_i/R_c)}} \quad (2)$$

$$t = \frac{x}{I^2 r_T - 2\pi h \Delta T R_i} \times 10^6 \quad (3)$$

$$I = \sqrt{\frac{x + 2\pi h \Delta T R_i t \times 10^{-6}}{r_T t}} \times 10^3 \quad (4)$$

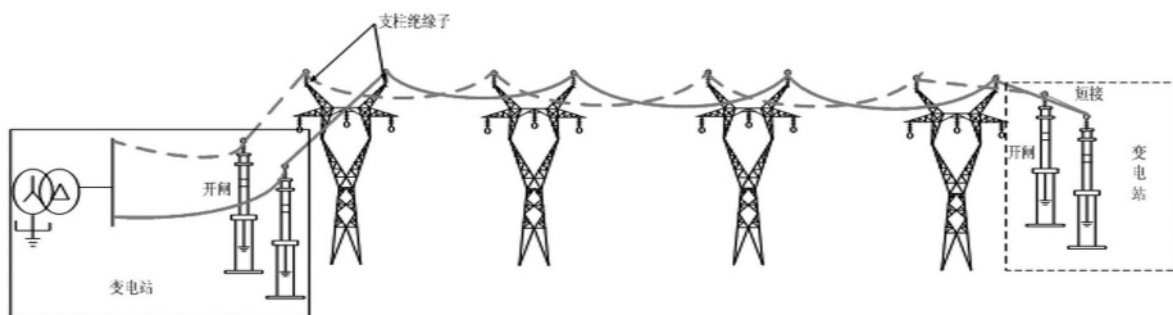


图2 架空地线的绝缘化改造

表1 几种型号地线的融冰电流及电源容量

$v_a = 5 \text{ m/s}$; $T_a = -5 \text{ }^\circ\text{C}$; d_i (覆冰厚度) = 10 mm; $t = 60 \text{ min}$

地线型号	I_{dc} /A	I_{ac} /A	S_{dc} /(kVA · km ⁻¹)	S_{ac} /(kVA · km ⁻¹)	U_{dc} /(kV · km ⁻¹)	U_{ac} /(kV · km ⁻¹)
GJ-70	110.385 2	110.382 7	16.510 53	17.963 26	0.149 572	0.162 736
GJ-80	129.766 6	129.763 0	20.744 29	22.840 25	0.159 859	0.176 015
GJ-100	142.758 8	142.752 6	19.767 63	22.931 05	0.138 469	0.160 635
GJ-135	178.743 2	178.729 4	23.276 42	29.382 36	0.130 223	0.164 396

式(1)~(4)中, h 为散热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; T_i 为冰表面温度, $^\circ\text{C}$; v_a 为风速, m/s ; T_a 为环境温度, $^\circ\text{C}$; R_c 为地线半径, m ; R_i 为地线覆冰后的半径, m ; r_T 为地线的电阻率, Ω/m ; t 为融冰时间, s ; I 为直流融冰电流, A ; $x = 341.18(R_c + R_i)^{1.5} R_c^{0.5} + 3.01(R_i^2 - R_c^2) \Delta T$; $\Delta T = T_i - T_a$ 。

对于交流, 由于存在趋肤效应, 地线的线电阻率计算式为

$$r_{ac} = r_{dc} (1 + \gamma_s) \quad (5)$$

式中, r_{dc} 为地线的直流电阻率, Ω/m ; r_{ac} 为地线的交流电阻率, Ω/m ; γ_s 的计算式为

$$\begin{cases} \gamma_s = \frac{x_s^4}{192 + x_s^4} \\ x_s^2 = \frac{8 \times 10^{-7} \pi f k_s}{r_{dc}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, f 为电流的频率, Hz ; k_s 为导线的结构系数, 对于地线, $k_s = 1$ 。

将地线的直流电阻率 r_{dc} 和交流电阻率 r_{ac} 分别代入式(1)~(4), 即可分别得到地线的直流融冰电流 I_{dc} 和交流融冰电流 I_{ac} 。

直流融冰电源的容量(S_{dc})可由以下公式确定。

$$S_{dc} = I_{dc}^2 r_T L_c \quad (7)$$

式中, S_{dc} 为直流融冰的电源容量, $\text{V} \cdot \text{A}$; r_T 为地线在温度 T $^\circ\text{C}$ 时的电阻率, Ω/m ; L_c 为融冰导线的长度, m 。

交流短路融冰电源容量为

$$S_{ac} = I_{ac}^2 L_c \sqrt{r_T^2 + \omega^2 l^2} \quad (8)$$

式中, l 为单位长导线电感, H/m 。

根据以上计算方法, 可得到几种型号地线的融冰电流及电源容量, 如表1所示。由表1数据可知, 由于地线的电阻较大, 采用交流融冰时, 有功消耗为主, 无功消耗相对较小。故从成本和方便的角度考虑, 架空地线融冰宜采用交流融冰。

3 架空地线融冰改造的实施方案及其

影响

3.1 架空线路绝缘化改造的方法

由表1数据可知, 对于架空地线融冰, 线路压降不大, 100 km 线路压降小于 20 kV, 故线路改装相对较为容易, 可以考虑采用输电线路不停电改造。

但是, 带电改造过程中, 要考虑到地线可能会折断并与输电线路短路。在短路瞬间, 地线会有短路电流通过。大短路电流可能会使地线瞬间温度上升, 从而可能会烧伤操作人员, 故线路改造技术人员一定要带防烧伤手套。

3.2 架空线路绝缘化改造后对防雷的影响

架空线路绝缘化改造后, 除在两端变电站接地外, 中间塔位处不再接地, 当雷落在输电线路中间断的地线上时, 会增加线路反击雷的概率。因此, 为防止落在地线上的雷反击导线, 在不覆冰的季节, 建议将雷区地线恢复接地。

4 结 语

(1) 要对地线进行融冰, 要对其进行绝缘化改造, 改变其沿线分布式接地特性, 使地线具备通融冰电流的条件;

(2) 由于地线电阻远大于同走廊导线电阻, 故在通融冰电流的情况下, 电源容量主要提供有功消耗。考虑到经济成本和方便性等因素, 建议采用交流融冰方法;

(3) 地线绝缘化改造后对防雷有一定的影响, 因此在雷季的多雷区线路, 建议将绝缘化改造的线路恢复接地。

参考文献

- [1] Songhai Fan, Xingliang Jiang, Caixin Sun, et al. Temperature Characteristic of DC Ice-melting Conductor [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65 (1): 29-38.

- [2] Songhai Fan, Xingliang Jiang, Lichun Shu, et al. DC Ice - melting Model for Wet - growth Icing Conductor and Its Experimental Investigation [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2010, 53 (12): 3248 - 3257.
- [3] Songhai Fan, Xingliang Jiang, Lichun Shu, et al. DC Ice - Melting model for Elliptic Glaze Iced Conductor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 26 (4): 2697 - 2704.
- [4] Xingliang Jiang, Songhai Fan, Zhi jin Zhang, et al. Simulation and Experimental Investigation of DC Ice - Melting Process on an Iced Conductor [J]. IEEE Transactions

on Power Delivery, 2010, 25 (2): 919 - 929.

- [5] 蒋兴良,范松海,胡建林,等. 输电线路直流短路融冰的临界电流分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (1): 111 - 116.
- [6] 文聪. 输电线路导线覆冰断股分析 [J]. 云南电力技术, 2009, 37 (5): 24 - 25.
- [7] 周鹏,李光辉. 架空地线的融冰方法及改进措施 [J]. 湖南电力, 2008, 28 (4): 47 - 48.
- [8] 许树楷,赵杰. 电网冰灾案例及抗冰融冰技术综述 [J]. 南方电网技术, 2008, 2 (2): 1 - 2.

(收稿日期:2012-04-01)

(上接第22页)

重要程度分批次恢复是必须遵循的原则。负荷恢复方案可参考低频减载方案。一般来说低频减负荷方案中没有涉及的负荷定为第1级,低频减负荷轮次为“后备”的负荷定为第2级,低频减负荷轮次为“特2”、“特1”轮的分别为第3、第4级,低频减负荷轮次为第6、5、4、3、2、1的分别定为第5、6、7、8、9和第10级。每1级还可按50 MW进行轮次划分。

在负荷恢复中省地两级调度应做好配合,由省调根据子网的备用及潮流分布情况向地调下达负荷指标,地调根据省调下达的负荷指标,按级别轮次进行负荷恢复,待频率及电压恢复到正常运行水平时,再开始下一轮的恢复。负荷恢复不仅是黑启动的最终目的,也是建立一个稳定运行电网的必要手段。

省调负责省级电网发电和用电的平衡,负责省内500(330) kV及220 kV环网及所辖发电厂的调度运行管理。将子网做大做强是省调的主要职责。根据收集来的信息迅速确定黑启动路径是省调调度员的首要任务。启动路径应由电源到负荷的电压转换的次数尽量少、路径长度尽可能短为原则,并先启动离重要负荷近的机组,主网架先恢复单线联系。在子网做大做强的过程中和地调密切配合保证频率的稳定,同时密切关注电压情况,利用电容电抗及电厂进行调压,并合理分布子网的潮流。在子网运行稳定的情况下,尽快同步电气孤岛,扩大子网的规模。

网调调度管辖的主要是500 kV系统的骨干网络,在黑启动中负责各黑启动路径中网调调度设备的送电,为各省、市调相关地区提供启动电源。省、市调选择网调黑启动电源对其负荷供电后,与省调协调进行频率、电压调整。对于从220 kV系统开始

启动的子网,500 kV系统主要承担了子网间并列的任务。因此网调的主要责任在于省调将子网启动起来后,选择并网点,加强子网间的联系,提高电网运行的稳定性。根据各省调子网恢复的程度及先后次序研究省网黑启动子系统并列点和并列次序是网调调度的主要责任。

国调是电网调度的最高一级调度机构,国调调度管辖的主要设备以网间联络线及直流系统为主,这已经是黑启动过程中最后的一个环节。网间交流联络线主要视送受端的负荷平衡情况来恢复,对系统稳定性的提高并不具备显著效应。直流系统的恢复应在系统送、受端的发电和负荷都恢复到停电前一半的水平以上,并根据送受端的电力电量平衡情况来考虑是否有必要恢复。

6 结 语

一个稳定运行的子网的建立需要电厂、变电站及各级调度机构间的协调配合。黑启动操作是由上级调度对下级调度实施统一协调,实现了分区启动和分区协作的恢复调度。厂网间协调配合才能在尽可能短的时间内建立一个稳步运行的电网,将对社会经济的影响降到最低。

参考文献

- [1] 陈明. 对电网黑启动中试验电源容量问题的探讨 [J]. 华中电力, 2009, 22 (5): 55 - 57.
- [2] 杨春雨,李永锋. 地区电网“黑启动”方案研究 [J]. 云南电力技术, 2008, 36 (1): 14 - 16.

作者简介:

王莉丽(1977),女,硕士,工程师,长期从事电网调度工

作。(收稿日期:2012-02-13)

高电压设备在线监测技术 在智能电网中的研究与实施

拉 贵,扎西曲达,尼玛石达,米玛次仁,贡嘎罗布
(西藏电力科学研究院,西藏 拉萨 850000)

摘 要:分析了智能电网的特征及研究进展,结合今后中国智能电网建设的发展规划,根据高电压设备状态检测的需要,指出了在线监测技术在智能电网建设中的作用,针对智能电网与传统电网的差异,提出了高电压设备智能状态检测的分阶段实施的具体建议。为推进智能电网的深入研究与运用,应加强高压设备智能化研发,根据在线监测数据,对设备的可靠性做出判断,对设备的剩余寿命进行预测,应用专家分析诊断系统实现高压设备的智能状态检修。

关键词:高电压设备; 在线监测; 智能电网; 状态检修; 西藏

Abstract: The features and recent progress of smart grid are analyzed firstly. Then, based on the requirements of the detection for high voltage transmission equipment as well as the plans of smart grid construction in China, the importance of online monitoring techniques for smart grid is highlighted. Meanwhile, aiming at the differences of smart grid and traditional grid, some specific proposals for the realization of online monitoring of high voltage transmission equipment are presented. It suggests that the future work should be focused on the high voltage equipment, such as the development of intelligent equipment, the reliability analysis and the estimation of residual life according to online monitoring data, and the realization of intelligent condition-based maintenance for high voltage equipment by means of expert systems et al.

Key words: high voltage equipment; online monitoring; smart grid; condition-based maintenance; Tibet

中图分类号:TM835 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)03-0078-04

0 前 言

随着全球资源环境压力的不断增大,节能减排、绿色能源、可持续发展已成为各国关注的焦点^[1]。电网作为关系到国民经济命脉的基础产业和公用事业,其发展已经迎来机遇与挑战并存的关键时期。因此期望通过建造能源使用的创新体系,以信息技术彻底改造现有的能源利用体系,最大限度地开发电网体系的能源效率^[2]。

电力市场化进程的不断推进以及用户对电能可靠性和质量要求的不断提升,要求未来的电网必须能够提供更加安全、可靠、清洁、优质的电力供应,能够适应多种能源类型发电方式的需要,能够更加适应高度市场化的电力交易的需要,能够更加适应客户的自主选择需要,进一步提高庞大的电网资产利用效率和效益,提供更加优质的服务。为此,以美国和欧盟为代表的不同国家和组织不约而同地提出要建设灵活、清洁、安全、经济、友好的智能电网,将智能电网视为未来电网的发展方向。随着中国特高压

电网的建设和电力体制改革的不断深化,智能电网已将成为中国电网发展的一个新方向^[3-4]。

高电压设备是电网的基本单元,高压设备在线监测技术作为高压设备智能化发展的关键技术,是智能电网的重要组成部分,也是区别传统电网的主要标志之一。高电压设备在线监测技术主要是利用传感器对关键设备的运行状况进行实时监控,然后把获得的数据通过网络系统进行收集、整合,最后通过对数据的分析、挖掘,达到对整个电力系统运行的优化管理。同时随着近几年新技术的发展带动了在线监测技术的进步,为高电压设备的智能发展提供了机遇^[5]。结合今后中国智能电网建设的发展规划,根据高电压设备状态检测的需要,分析了在线监测技术在智能电网建设中的应用,探讨了区域电网如西藏电网智能电网建设中高电压设备智能化发展的具体建议。

1 智能电网的特征及研究进展

智能电网是一个现代化或智能化的电力网络,

是一系列能使电力网络智能化的技术的总称。根据目前收集到的资料和初步研究,智能电网可以理解为是将信息技术、通信技术、计算机技术和原有的输、配电基础设施高度集成而形成的新型电网,它具有提高能源效率、减少对环境的影响、提高供电的安全性和可靠性、减少输电网的电能损耗等多个优点^[7-9]。因此智能电网也是现有输配电网的智能化升级。智能电网应该具备以下特征^[10]。

(1) 坚强。能够监测电网的实时运行状态,预测电网运行状态,及时发现、快速诊断和消除故障隐患,提高电网运行的可靠性。

(2) 交互。用户积极参与电网的运行,根据实时电价调整用电模式;支持用户使用分布式电源,变电站可以实时监控用户的用电情况。

(3) 环保。支持分布式电源并网运行,做到“即插即用”;支持风力发电和太阳能等大规模可再生能源发电的应用,提高电能利用率。

(4) 经济。优化资源配置,提高设备传输容量和利用率;控制成本,实现电网经济运行。

目前,智能电网还处于初期研究阶段,国际上尚无统一而明确的定义。由于发展环境和驱动因素不同,不同国家的电网企业和组织都在以自己的方式理解,对智能电网进行研究和实践;各国智能电网发展的思路、路径和重点也各不相同。因此,智能电网概念本身也在不断发展、丰富和明晰中^[11-13]。

美国、加拿大以及欧洲各国都相继开展了智能电网相关研究,从研究现状和产业化进程来看,各个国家和地区的侧重点不完全相同。对美国来说,对复杂大电网的安全稳定控制,是其智能电网发展最初的驱动,主要侧重于推广信息化、新能源、新材料和新元件。而对于欧洲智能电网的发展,严格的温室气体排放政策显然起到了更大的推动作用,分布式能源和可再生能源接入研究也相应获得了更多的支持^[14]。中国的智能电网建设,不仅要涵盖欧、美智能电网的概念和范围,还要加强骨干电网建设。2009年5月,中国国家电网公司在2009年特高压输电技术国际会议上宣布了中国智能电网的发展战略,明确提出建立一个以特高压电网为骨干网架的各级电网高度协调发展的智能电网^[15-17]。

2 在线监测技术在智能电网中的研究与应用

与传统电网相比,智能电网将进一步拓展对电网全景信息的获取能力,比如通过在线监测技术能够获得更精确的高压设备的实时状态数据,应用专家分析诊断系统,可准确估测设备运行的状态,预测故障,优化系统运行方式,提高系统的安全稳定性^[18]。

中国自开始研究智能电网以来,十分重视在线监测技术在未来智能电网中的应用。先后与国内主要高压设备制造商、设备在线监控技术供应商和高等院校进行了交流,在多年从事高压设备检测和诊断技术的基础上,对在线监测技术在智能电网中的作用进行了更加清晰的分析和定位^[19]。认为在线监测技术可以实现智能电网中高压设备状态的可视化和自动化,为智能电网提供了最基础的功能支撑。

对于在线监测技术在智能电网中的应用,需要考虑到所应用的技术应具有通过传感器自动采集设备状态信息的能力,同时应具有上传采集信息到数据网络以及从数据网络自动复制其他状态信息的能力,包括家族缺陷信息、现场试验信息等,便于开展设备状态的综合分析和诊断。在不影响测量和可靠性的前提下,宜采用外置型传感器,确需内置的,仅内置最必要部分。不论内置或外置,传感器的接入应不影响高压设备的安全运行。

变压器、断路器、GIS、电力电缆、高压套管等高压设备,或故障率相对较高,或故障影响较大,因此在智能电网建设中具备了在线监测的需求。另一方面,对于这些设备,可用的在线监测技术已有一定的研究基础和应用经验,具备开展高压设备智能化应用的基本条件。因此可以针对不同设备的故障模式与特点,可以逐步开展在线监测技术的现场应用,具体实施原则是在线监测技术应具有检测价值、技术相对成熟并有一定应用经验。对于油浸式电力变压器,目前可推荐的监测状态参量如表1所示。对于SF₆断路器以及GIS设备而言,可监测的状态量如表2所示,其中备注为GIS的仅适用于GIS设备。

传感器将设备的状态信息转化为可测量信息,是设备状态的感知元件。以前高压设备制造商很少关注设备的状态检测功能,大多数检测功能是设备投运之后由监测技术提供商加装的。由于一部分传感器需要改装高压设备,这不仅或多或少地影响了设备的安全,传感器也往往不能置于最佳位置。对于外置传感器,虽然不需改装主设备,但影响设备的

美观甚至外绝缘。还有部分传感器,一旦设备制造完毕,就无法植入,如变压器绕组光纤测温等。综合这些情况,首先应从高压设备的设计开始就考虑在线监测技术的需求,对需要内置的传感器在设计时就应充分考虑,制造时就安装好,且有规范的信号接口,出厂试验时应带着传感器进行。对于外置传感器,应留有专门的安装位置,或者也由高压设备制造商集成。这样处理之后,不仅设备的整体性和美观方面得到改进,也会提升自检测的质量,保障高压设备的安全。

表1 油浸式变压器监测状态参量

监测设备	监测参量	应用价值
变压器	油中溶解气体	放电或过热性缺陷
	油含水量	绝缘受潮
	局部放电	放电性缺陷
	绕组温度	过热、老化
	顶层与底层油温	过热、老化

表2 SF₆ 断路器(含GIS)监测状态参量

监测设备	监测参量	应用价值
SF ₆ 断路器 (含GIS)	局部放电	放电性缺陷(GIS)
	气体压力	密封/受潮缺陷
	气体含水量	受潮缺陷
	气体温度	电气接触不良(GIS)

3 在线监测技术在智能电网中的具体实施

为了在区域电网中,比如在西藏电网中积极推进智能电网建设,利用在线监测技术对高压设备的运行状况进行实时监控,进而实现电网设备可观测、可控制和自动化,可分3个阶段开展实施西藏电网的智能电网状态监测建设。第一阶段为规划试点阶段,大约1~2年时间,主要开展高压设备在线监测关键技术研究,实现对设备状态和可靠性水平的在线智能监测和评估,开展智能变电站在线监测系统试点。针对高压设备全面采集能够反映系统主设备运行的电脉冲、气体生成物、局部过热等各种特征量,进行相关参量数字信息的采集,进而根据电网需求进行相关的状态预判,保证设备安全和供电的可靠性。能够监测高压设备的状态参量有:主变压器与高压电抗器(油中溶解气体分析)、GIS(SF₆ 气体

密度、微水含量、局部放电)、避雷器(泄漏电流、动作次数)等,为开展智能变电站状态监测积累经验。

第二阶段为全面推广阶段,大约5年时间,在第一阶段基础上,全面推广智能变电站在线状态监测系统建设。变电站内分散的监控系统基本融为一体,进行动态数据处理,深化基于状态的全寿命周期管理,建立精益化的评估体系,基本完成变电站全方位、多层次监控的智能化变电站系统。基本实现的主要监测特征量有:主变压器与高压电抗器(油中溶解气体分析、局部放电、铁心接地电流、高压套管的介损、油中微水含量等)、断路器(SF₆ 压力、温升、机械特性、过热)、GIS(SF₆ 压力、温度、微水含量、局部放电、机械振动、机械特性)、避雷器(泄漏电流、动作次数)等。高压设备状态监测基本实现一体化设计、集成在线监测功能。

第三阶段为引领提升阶段,大约也为5年时间。在前一阶段智能化建设的经验积累和技术完善基础上,继续提升智能化水平。枢纽及中心变电站全面建成或更新改造成为智能变电站。变电站内各监控系统全面融为一体,全面实现高压设备的智能在线监测,形成变电站全方位、多层次监控的智能化变电站状态监测系统。根据在线监测数据,对设备的可靠性做出判断,对设备的剩余寿命做出预测,应用专家分析系统实现输变电设备的智能状态检修。在智能设备广泛实用的基础上,对设备的检修模式进一步优化,电网可靠性水平和检修效率大幅度提高。

4 结 论

介绍了智能电网的基本特征及研究进展,结合今后中国智能电网建设的发展规划,根据高电压设备状态检测的需要,提出了高电压设备智能状态检测的分阶段实施的具体建议,为今后规模化的智能电网建设提供可借鉴的参考。

参考文献

- [1] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望 [J]. 电网技术,2009,33(2):1-7.
- [2] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述 [J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.
- [3] 张文亮,刘壮志,王明俊,等. 智能电网的研究进展及发展趋势 [J]. 电网技术,2009,33(13):1-11.

- [4] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
- [5] 胡学浩. 智能电网——未来电网的发展态势 [J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.
- [6] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网 [J]. 中国电力, 2008, 41(6): 19-22.
- [7] 中国国家电网公司智能电网部. 高压设备智能化技术分析报告 [R]. 北京: 中国国家电网公司, 2009.
- [8] 傅书遍. 中国智能电网发展建议 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 23-26.
- [9] Ipakchi A, Albuyeh F. Grid of the Future [J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2009, 7(2): 52-62.
- [10] 钟金, 郑睿敏, 杨卫红, 等. 建设信息时代的智能电网 [J]. 电网技术, 2009, 33(13): 12-18.
- [11] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 10-15.
- [12] The National Energy Technology Laboratory. A Systems View of the Modern Grid [R/O]. [2007-01-22]. <http://www.netl.doe.gov/mordemgrid>.
- [13] The National Energy Technology Laboratory. The Mod-

ern Grid Initiative. Pittsburgh, PA, USA: NETL, 2007.

- [14] 林宇锋, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8-14.
- [15] Novosel D. Emerging Technologies in Support of Smart grids [C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2008.

作者简介:

拉贵(1978), 男, 助理工程师, 主要从事高电压绝缘技术研究;

米玛次仁(1970), 男, 助理工程师, 主要从事高电压设备现场试验技术研究;

扎西曲达(1985), 男, 助理工程师, 主要从事电力变压器技术研究;

尼玛石达(1979), 男, 助理工程师, 主要从事高压开关设备技术研究;

贡嘎罗布(1987), 男, 助理工程师, 主要从事高电压设备防雷技术研究。

(收稿日期: 2012-03-23)

(上接第47页)

- [5] Canizares C. A., Mithulananthan N., Berizzi A., et al. On the Linear Profile of Indices for the Prediction of Saddle-node and Limit-induced Bifurcation Points in Power Systems [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50(12): 1588-1595.
- [6] 马冠雄, 刘明波, 王奇. 一种识别静态电压稳定分岔点的混合方法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 17-20.
- [7] Ajarapu V., Christy C. The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [8] Feng Z., Ajarapu V., Long B. Identification of Voltage Collapse Through Direct Equilibrium Tracing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 342-349.
- [9] Yorino N., Li Huaqiang, Sasaki H. A Predictor/corrector Scheme for Obtaining Q-limit Points for Power Flow Studies [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 130-137.
- [10] Canizares C. A., Alvarado F. L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 1-8.
- [11] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压崩溃临界点计算的改进零特征根法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 63-66.
- [12] Rosehart W. D., Canizares C. A., Quintana V. H. Multiobjective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Cost in Power Networks [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 578-587.

- [1] Irisarri G. D., Wang X., Tong J., et al. Maximum Load Ability of Power Systems Using Interior Point Non-linear Optimization Method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 162-172.
- [2] 韦化, 丁晓莺. 基于现代内点理论的电压稳定临界点算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 27-31.
- [3] 李华强, 刘亚梅, YORINO N. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56-60.
- [4] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种静态电压稳定临界点的识别和计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 28-32.
- [5] 熊宁, 程浩忠, 马则良, 等. 基于连续潮流的极限诱导分岔检测方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 35-38.
- [6] 徐晓春, 万秋兰, 顾伟, 等. 在线电压稳定分析中快速连续潮流的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 37-41.
- [7] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [8] Antonio C. Z. de Souza, Claudio A. Canizares, Victor H. Quintana. New Techniques to Speed up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1380-1387.

作者简介:

李林(1984), 男, 硕士, 从事电力系统稳定运行与控制方面的研究。

(收稿日期: 2012-01-11)

基于油色谱分析的变压器有载开关油渗漏 缺陷诊断方法创新研究

蒋福佑, 袁 鹰

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 变压器有载开关油渗漏导致变压器本体油中乙炔含量增长、超过注意值的现象时有发生, 对判断设备缺陷带来困扰。国标中提出的 $C_2H_2/H_2 > 2$ 法, 由于正常运行状态下变压器油中氢气浓度相比乙炔浓度要高, 该判断方法适用范围受到限制。通过分析有载开关油中各气体组分特征, 提出了比值法、曲线法、特征气体法和运行方式法等判断方法用于诊断有载开关油渗漏现象, 并举例分析, 结果表明比值法等方法对诊断变压器有载开关油渗漏具有较高的准确性。

关键词: 有载开关; 变压器油; 乙炔; 渗漏

Abstract: The oil leakage from on-load tap-changer (OLTC) of transformer occasionally occurs that causes the increment of acetylene content in the oil of transformer body over the alert value, resulting in a difficult position for determination of equipment defects. A method of $C_2H_2/H_2 > 2$ is put forward by the Chinese GB standard, however, the applicable scope of the method is often restricted since the concentration of hydrogen is comparably higher than that of acetylene in the transformer oil. Those methods for diagnosis of the oil leakage from on-load tap-changer, such as ratio method, curved method, characteristic gases method and operation mode method are presented by analyzing the characteristics of various components of gases in on-load tap-changer oil. And with the analysis by examples, the results prove that the higher accuracy may be obtained for the diagnosis of the oil leakage from on-load tap-changer of transformer with the ratio method etc.

Key words: on-load tap-changer; transformer oil; acetylene; leakage

中图分类号: TM406 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0082-06

变压器有载开关油渗漏时有发生, 由于有载调压操作产生的气体与放电故障特征相符, 有载开关油渗漏至本体后, 容易造成对主变压器本体故障的误判断, 对此类情况要引起高度重视, 避免不必要的重复停电和检修。对有载开关油渗漏的判断, 国标中指出, 在变压器主油箱中 $C_2H_2/H_2 > 2$, 认为变压器存在有载开关油渗漏的迹象。但在实际生产工作中此判据实用性相当有限。力求在对有载开关油渗漏特征进行深入分析的基础上, 对判别方法进行创新, 希望对判断变压器有载开关油渗漏提供一些有益的帮助。

1 有载开关油渗漏的特征

由于变压器有载调压开关的运行方式比较固定, 在调压过程中产生电弧放电, 油中主要特征气体为乙炔和氢气, 甲烷和乙烯为次要特征气体。大量

的实践案例表明, 变压器有载开关油中乙炔一般占总烃的 60% ~ 80%。有载开关油渗漏的特征可以从两个方面来进行分析。

(1) 选择乙炔作为有载开关油渗漏的特征气体主要考虑两个方面的原因: ①虽然有载开关油中的氢气含量一般情况下比乙炔更高, 但是由于氢气的溶解系数小(50℃时, 氢气在变压器油中的奥氏瓦尔特系数仅为 0.06, 氢的奥氏瓦尔特系数随着温度的升高而降低); 另外变压器在正常运行中也会产生一定量的氢气(主油箱中), 不容易发现其增长趋势, 故不能作为特征气体。②其他烃类组分(CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6) 尽管溶解系数较大, 但是由于在变压器正常运行中也会产生一定的量, 大多为几个到几十个 $\mu L/L$ 的浓度, 故由有载开关油渗漏所带来的增长可能不易被察觉。由于正常运行的变压器, 油中一般无乙炔, 所以由有载开关油渗漏而造成变压器本体油中乙炔的增长表现非常明显。

(2) 乙炔作为有载开关油渗漏的特征气体,其增长方式有下列特征: 变压器本体油中的乙炔增长速度与有载开关的动作次数关系明显,与变压器负荷关系不明显,若有载开关油箱密封不良,当其动作时对油形成的强大推力往往导致在动作瞬间会发生很大的渗漏量,一般情况下动作越频繁乙炔的增长速度越快。有载开关不动作期间,油中乙炔一般保持一个相对比较恒定的增长速率; 当有载开关存在渗漏时的变压器本体油中乙炔增长到一定的量后不再增长,但不能据此判断渗漏已自动消失。

2 有载开关油渗漏的判断技巧

2.1 油位观察法

一般情况下,由于本体的油位高于有载开关的油位,若有载开关与变压器本体存在渗漏,有载开关的油位会上升,或放出部分有载开关油,观察其油位是否缓慢上升,通过观察油位的变化可以粗略判断此类缺陷。

2.2 C_2H_2/H_2 法

该法在国家标准《变压器油中溶解气体和判断导则》(GB/T 7252 - 2001) 里提出,并有详细的叙述“主油箱中 $C_2H_2/H_2 > 2$,认为是有载调压污染的迹象”。由于正常运行的变压器油中都有一定量的氢,有的变压器油中氢气含量可以达到数十甚至上百 $\mu L/L$ 的浓度,乙炔作为放电故障的特征气体,技术监督人员对其敏感性非常高,一般情况不可能等到乙炔的含量达到氢含量的两倍以上再做出判断。

2.3 比值法

当怀疑存在有载开关油渗漏后,同时采取变压器本体和有载开关油样,进行油色谱分析,分别计算

本体和有载油 C_2H_2/CH_4 、 C_2H_2/C_2H_4 两组比值。采用 C_2H_2/CH_4 、 C_2H_2/C_2H_4 这两组比值作为判断有载开关油渗漏判据的理论依据在于: ①根据质量守恒定律,从有载开关中渗漏(主要方式应是相互交换)至本体主油箱的油与有载开关缸体内的油中各气体组分含量一致,当有载开关油渗漏至本体主油箱后,各气体组分被极度稀释,但是各组分所占的比例是不变的(理想情况下,假设主变压器本体油中各气体组分的本底值可以确切得知),故可以通过计算主变压器本体油中各组分相互比值判断是否发生有载开关油渗漏。②有载开关油中乙炔为第一特征气体,一般占总烃的 60% ~ 80%,甲烷和乙烯也有较高的浓度,由于这 3 种气体都有比较高的稳定性,易于积累(氢气由于其容易逃逸的特性,不能作为比值特征气体),故选择这 3 种气体为特征气体。以第一特征气体为中心,计算两组比值,有助于判断有载开关油渗漏的问题。

在使用本法的时候,要根据实际情况,对各气体组分进行合理的修正,不能盲目套用比值。具体做法如下: (1) 有载开关油的两组比值可以用分析结果直接计算。(2) 一般情况下,主变压器本体油的两组比值不宜直接计算,应对各气体组分进行合理修正,设发现有载开关油渗漏前一次各气体组分含量测试值为 B ,合理估算(假设气体组分浓度匀速增长)该变压器正常运行情况下油中各气体组分该时段内可能产生的含量为 C ,本次试验数值为 A ,设修正后的各气体组分含量为 X_i ,则存在 $X_i = A - B - C$; 一般情况下,本体油在正常运行下各组分很低,可不估算 C ,计算公式简化为 $X_i = A - B$ 。(3) 使用修正后的气体组分计算两组比值,初步判断是否发生渗漏。下面略举例说明。

例 1: 某 110 kV 主变压器的试验数据如表 1。

表 1 一例有载开关油渗漏的油色谱试验数据 (单位: $\mu L/L$)

油来源	检测时间	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	备 注
本体油	2001.7.13	3.1	0.1	0	0	
本体油	2002.8.17	5.2	2.1	0.7	11.7	
有载油	2002.8.17	147.3	127.1	14.7	897.3	
本体油(修正后, $A - B$)		2.1	2.0	0.7	11.7	未考虑主变压器正常运行下产生甲烷和乙烯的数值(即 C 值)
		C_2H_2/CH_4	C_2H_2/C_2H_4			
计算比值	本体	5.6	5.9			
	有载开关	6.1	7.1			

表 2 一例有载开关油渗漏的油色谱试验数据 (单位: $\mu\text{L/L}$)

油来源	试验时间	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
本体油	2005. 11. 24	551. 3	2 899. 0	6. 0	1. 7	1. 1	0
本体油	2007. 7. 26	2 562. 6	13 819. 1	18. 1	8. 0	3. 4	26. 3
有载油	2007. 7. 26	273. 1	3 249. 1	1 893. 5	2 400. 4	134. 5	24 239. 2

备注: 本体油与有载油中 CO、CO₂ 浓度差别明显。

表 3 有载开关油渗漏判断方法一览表

判断方法	方法简述	适用类型	备 注
油位观察法	观察有载开关油位的变化	能明显观察到油位变化	部分变压器有载开关油位不易观察,有载开关放油需要停电
C ₂ H ₂ /H ₂ 法 (国标法)	主油箱中 C ₂ H ₂ /H ₂ > 2, 认为是有载调压污染的迹象	C ₂ H ₂ 含量非常高才能满足 C ₂ H ₂ /H ₂ > 2	实用性不强
两比值法	分别计算本体(数值要进行修正)和有载油的 C ₂ H ₂ /CH ₄ 、C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ 两组比值, 进行比较分析	乙炔较高(超过注意值较多), 准确度较高	影响该方法准确度主要在于本体油各组分含量的修正
曲线法	在坐标平面分别做本体油(数值要进行修正)和有载油中 4 种烃类组分的曲线图, 比较曲线的相似程度	乙炔较高(超过注意值较多), 准确度较高	影响该方法准确度主要在于本体油各组分含量的修正
CO、CO ₂ 法	对比本体油和有载油中 CO、CO ₂ 含量	主要适用于变压器本体与有载开关油中 CO、CO ₂ 含量差别明显的情况	该方法仅能进行否定判断, 即能判断不渗漏
运行方式法	通过控制负荷和增加有载动作次数, 观察乙炔的增长速度是否恒定	该方法对有载开关油渗漏初期、乙炔含量比较低的情况适用	对渗漏初期比较有效

本例由于该主变压器投入运行刚 1 年, 通过上述两组比值对照, 考虑到仪器误差和未估算正常运行情况下产生的甲烷和乙烯的数值, 是可以高度怀疑该主变压器存在有载开关油渗漏。

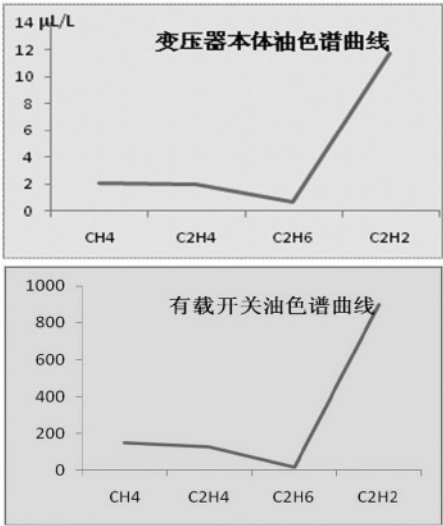
2.4 曲线法

该方法跟比值法有异曲同工之妙, 操作的方法也基本一致, 下面简单叙述曲线法的原理和使用技巧。

从有载开关中渗漏至本体主油箱的油与有载开关缸体内的油中各气体组分含量一致, 当有载开关油渗漏至本体主油箱后, 各气体组分被极度稀释, 但是各组分所占的比例是不变的, 故通过画各烃类组分的曲线图, 观察有载开关油与本体油各气体组分曲线图的相似程度来初步判断是否发生有载开关油渗漏。

做法如下: (1) 参考 C₂H₂/CH₄、C₂H₂/C₂H₄ 比值法对主变压器本体的油各气体组分进行修正, 利用修正后的数值(可考虑放大数倍至数十倍, 使得数值与有载油基本处在同一数量级) 画出曲线图; (2) 有载油可以直接使用(也可以考虑缩小数倍至数十倍), 画出曲线图; (3) 对比两曲线的相似程度(如果能把两条曲线做在同一坐标内更加有助于判断), 作出判断。使用该方法同样要注意对本体数值进行修正, 修正的准确度如何直接影响判断结果。

利用例 1 的数值做如下示范。通过观察两条曲线, 容易发现两条曲线的走向非常一致, 可以高度怀疑该设备存在有载开关油渗漏。



说明: 横坐标代表烃类各气体组分, 纵坐标代表各气体组分含量; 1 为 CH₄; 2 为 C₂H₄; 3 为 C₂H₆; 4 为 C₂H₂

图 1 各烃类组分曲线对比图

2.5 CO、CO₂ 法

本方法的适用范围比较窄, 一般说来仅仅适用于有载开关油的 CO、CO₂ 含量比较低而主变压器本体 CO、CO₂ 含量又比较高的情况。某些情况下, 通

过对比本体油和主变压器有载油中的 CO 、 CO_2 有时候是非常容易判断是否存在有载开关油渗漏的。下面略举一例。

例2: 某 110 kV 主变压器的试验数据如表 2。

通过观察主变压器本体油与有载开关油中 CO 、 CO_2 含量,可以轻易判断该变压器未发生有载开关油渗漏。

2.6 运行方式法

变压器有载开关发生油渗漏与变压器放电、过热故障不同,一般跟变压器运行负荷没有直接关系,即一般不会因为改变变压器负荷而改变增长速度,而与有载开关动作频繁程度有密切的关系。

当怀疑发生有载开关油渗漏时,在使用其他几种判断方法判断可能存在有载开关油渗漏时,可以通过改变变压器的运行负荷来进一步判定是否存在有载开关油渗漏,该方法是一种非常有效而重要的验证和判断手段。在使用其他方法难于判断(如有载开关油渗漏发生的初期,由于乙炔含量可能很低,使用其他几种方法存在困难)时,可以通过改变变压器运行负荷和增加有载开关动作次数,及时进行油色谱分析,观察分析结果,来有效判断有载开关油渗漏。具体做法可以参考如下步骤: 限制变压器负荷,在有条件的情况下,逐步降低变压器的运行负荷(可以逐步降低直至空载运行),保证有载分接开关的动作次数与日常运行基本保持一致,按照预定的周期进行色谱监督,观察乙炔增长趋势,直至空载运行依然维持原来的恒定增长速度,可以怀疑存在有载开关油渗漏。

3 有载开关油渗漏判断方法的选择

前面讲述了 6 种变压器有载开关油渗漏的判断

表 4 一例有载开关油渗漏的油色谱试验数据 (单位: $\mu\text{L/L}$)

油来源	试验时间	H_2	CO	CO_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	备注
本体油	2004. 10. 11	23. 2	191. 6	650. 9	2. 2	0. 8	0. 5	0	
本体油	2005. 11. 24	33. 6	551. 3	2 899. 0	6. 0	1. 7	1. 1	0	
本体油	2007. 7. 26	47. 8	2 562. 6	13 819. 1	18. 1	8. 0	3. 4	26. 3	
有载油	2007. 7. 26	19 967. 3	273. 1	3 249. 1	1 893. 5	2 400. 4	134. 5	24 239. 2	
本体油 (修正后)					6. 3 ^[1]	5. 0	1. 4	26. 3	此处考虑 C 值
计算 比值	本体 有载开关					$\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$		
						4. 535	5. 3		
						12. 8	10. 1		

注: 本体油修正值计算如下(以甲烷为例,后面部分将不再列详细步骤): $A = 18. 1 \mu\text{L/L}$, $B = 6. 0 \mu\text{L/L}$, $C = (6. 0 - 2. 2) / 13 \times 20 = 5. 8 \mu\text{L/L}$, $X_{\text{CH}_4} = A - B - C = 6. 3 \mu\text{L/L}$ 。

方法,其中任何一种技巧都不是万能的,都有其自身的缺陷,没有任何一种判断方法能做到完全准确。其中部分判断方法若使用不当,甚至可以得出截然不同的结果,故在使用这些判断方法的时候,一定要根据变压器的实际情况,谨慎选择判断方法,最好多种判断方法并举,相互配合验证。下面对有载开关油渗漏各判断方法进行归类说明,见表 3。

4 实例分析

下面通过几个实例来看看上述判断方法如何使用,每个实例都尽量提供多种判断方法,并进一步说明使用各判断方法的注意事项。

例3: 某 110 kV 主变压器的试验数据如表 4。

例4: 某 35 kV 调压变压器的试验数据如表 5。

该主变压器由于其他组分不高,且乙炔特征非常明显,怀疑该主变压器存在有载开关油渗漏的可能,故采取有载开关油样进行色谱分析。几种判断方法的对比: (1) $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ 法(国标法)显然无法对其进行判断,因为氢气的含量高于乙炔含量。(2) 比值法,容易发现本体油 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 两组比值分别为 3. 5、5. 3,与有载油 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 两组比值的 12. 8、10. 1 相差甚远,有载开关油渗漏的概率较小,设备内部存在放电故障的可能性较大。(3) 曲线法,参考例 1 可以画出曲线,可以发现两条曲线相似程度不高,也可以判断有载开关油渗漏的可能性不大(见图 2)。(4) CO 、 CO_2 法: 本体油与有载开关油中 CO 、 CO_2 含量差别巨大,容易进行否定判断,即该变压器未发生有载开关油渗漏。该主变压器经吊罩检查未发现有关有载开关有渗漏痕迹,发现 110 kV 侧套管 C 相均压球有显著的放电痕迹。

表5 一例有载开关油渗漏的油色谱试验数据 (单位: $\mu\text{l/l}$)

油来源	试验时间	H_2	CO	CO_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	备注
本体油	2001.6.29	0	243.9	7 979.1	7.6	9.1	2.4	1.0	
本体油	2002.8.21	21.8	367.1	4 051.3	7.7	11.3	2.0	2.0	
本体油	2003.7.8	35.3	448.1	2 903.1	8.5	13.7	3.4	12.8	
有载油	2003.7.8	3 259.5	220.7	17 418.7	533.8	761.0	124.2	6 209.3	
本体油 (修正后)					0.8	2.410	1.4	10.8	此处不 考虑C值
计算 比值						$\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$		
本体						13.5	4.510 8		
有载开关						11.6	8.2		

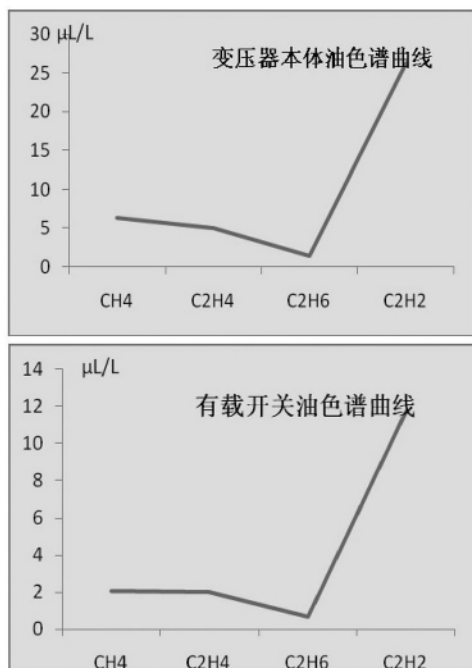


图2 各烃类组分曲线对比图

5 几个疑难问题的探讨

虽然变压器有载开关油渗漏导致变压器本体油中有乙炔不会危及设备安全运行,对其进行准确的判断对电网企业的安全生产有积极意义。虽然通过分析和总结,提出了几种创新的诊断方法,但是仍有许多疑难问题期待着同行们进行进一步的深化研究。

(1) 比值法和曲线法判别边界的确定需要进一步研究。变压器本体油与有载开关油的 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 两组比值究竟差距多大范围内可做出肯定判断,差距大于何值可做出否定判定,需要更多的实践例证进行进一步的研究论证。同理,两条曲线多大的相似度可做出肯定判断,何时做否定判断? 此外,数值修正公式中的C值计算假设各组

分是匀速增长,实际情况是变压器油中各组分非匀速增长,现实情况显然与理想假设存在一定差距。

(2) 是什么原因造成部分变压器发生有载开关油渗漏后,乙炔增长到一定的浓度后便不再增长、甚至出现下降趋势? 这里对此做三点分析: ①有载开关油中有大量的游离碳和杂质,或运行久远的设备油质老化而产生油泥等原因都可能造成对渗漏沙眼的堵塞,减少渗漏量,甚至消除渗漏; ②有载开关油渗漏量达到一定的程度后,本体油中乙炔浓度达到了一定的高度,油中乙炔浓度越高,逃逸的趋势越大,当逃逸速度与渗漏速度达到平衡状态,表现出来便是乙炔不再增长; ③绝缘纸在不同温度下对各气体组分的吸附能力不一致,变压器在不同负荷下运行油温不一致,溶解在变压器油中的乙炔与隐藏在绝缘材料中的乙炔之间随着油温的关系而表现出相互平衡的波动亦属于正常情况。上述三点原因仅是一个初浅逻辑分析,乙炔的产生与运行机理需要进一步进行实证研究。

(3) 对于有载开关油渗漏问题,所掌握的资料、案例还非常有限,比如对控制负荷,增加有载开关动作次数的判断方法还未实践过,也没有掌握有载开关动作次数对本体乙炔的影响有什么样线性关系,这都需要进一步积累经验。

(4) 虽然有载开关油渗漏造成的变压器本体油中乙炔含量高对设备的运行并不带来安全隐患,但由于长期的有载开关油渗漏造成变压器本体油中乙炔含量过高,从而容易掩盖本体的其他故障。大部分故障在发展初期,乙炔的增长速度都比较缓慢,一般仅为零点几到几个 $\mu\text{l/l}$,有载开关油渗漏带来比较高浓度的乙炔污染,很容易延误发现真实故障的最佳时期,带来较大的安全隐患。鉴于有载开关油渗漏给设备的监督工作带来的困难,建议在不影响供电的情况下,及时安排检修,处理有载开关油渗

漏,对本体油进行彻底的脱气处理,投入运行后进行2~3个周期的色谱跟踪检测(监督周期可根据实际情况进行自行安排,如每月一次),以观察检修的效果并积累处理后油色谱本底值。

6 结 论

探讨了变压器有载开关油渗漏诊断技术,提供了一些创新的判断方法,也通过一些实例验证了这些判断方法的有效性。充油电气设备的故障复杂多

(上接第57页)

分量所衰减速度就相对越快,但其差别并不明显。

3.2.2 三相非故障

表3分别给出了合闸于不同线路长度L的非故障电流高低频能量比值结果。

从表3能够看出三相的电流高低频能量比值都随着线路的延长而减小,但均远远大于50。同时高频的衰减速度也随着线路的增长而增快。相应地也就与2.1中的合闸于非故障相所描述的频率特征符合了,同理,当输电线路增长到350 km时,整个判据随着自振频率的锐减而失效了。相应的能量比值结果列表如表3所示。

表3 不同线路长度的合闸于非故障线路的
三相高低频电流能量比

线路长度 /km	K_a	K_b	K_c
15	1 640	9 000	1 000
50	1 083	7 482	754
150	924	5 230	386
300	400	1 190	189

4 结 语

根据输电线路在合闸于故障相和非故障相时其电流或电压中所包含的自振荡频率类型和含量的不同,采用对各相电流进行高低频率带通数字滤波来得出高低频电流能量比值与设定的域值的大小关系来作为主要的故障判据,能更加明显地得出相应的频率特性结论,并能更好地得出合闸于故障相的具体情况。所进行的仿真实验也更加有力地证明了该判据的有效性。但该方法在线路超过350 km时就

变,任何一种故障诊断技术都有其自身的局限性,并有着各自的适用范围,方法选择不当,易导致判断失误。所以,在诊断故障的时候,一定要根据设备的实际情况,谨慎选择判断方法,注意用多种方法相互配合验证,方可提高故障诊断的准确性。

参考文献

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

(收稿日期:2012-02-15)

无效了,所以距离问题有待深究。

参考文献

- [1] 胡巨. 超高压输电线路暂态电流保护的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2004: 1, 3.
- [2] 何世恩, 岳恒宇, 夏经德. 继电保护技术的发展与展望 [J]. 甘肃电力技术, 2010, 5(2): 15-18.
- [3] Xu, Qingshan, Lai L L, Chen Jingen, et al. Novel and Comprehensive Countermeasures for Single Terminal Fault Location of Transmission Lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 21-25.
- [4] 段建东, 罗四倍, 张保会. 超高速保护中合闸于故障线路的识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 78-84.
- [5] Bo Z. Q. A New Non-communication Protection Technique for Transmission lines [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1073-1078.
- [6] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 121.
- [7] Y. Y. Hong, Y. Y. Chen. Placement of Power Quality Monitors Using Enhanced Genetic Algorithm and Wavelet Transform [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 23(5): 461-465.
- [8] 陈皓. 超高压输电线路暂态电流保护的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2001: 16-17.
- [9] 方达意. 基于暂态电流小波能量谱的超高压输电线路故障类型识别 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009: 14.
- [10] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 26.

作者简介:

黄霞(1986), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制。

(收稿日期:2012-04-26)

DG2028/17.45 – II 5 型锅炉受热面改造的重要性

彭 林, 王建华, 王 亮

(四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610016)

摘 要: 东方锅炉厂股份有限公司生产的 DG2028/17.45 – II 5 型锅炉在国内有着比较大的装机容量, 同时也是现时中国出口海外的主力炉型之一, 通过成都金堂电厂的成功改造经验, 论述了该炉型受热面改造的重要性及必要性。

关键词: 减温水; 受热面; 技术改造; 节能降耗

Abstract: DG2028/17.45 – II 5 type boiler made by Dongfang Boiler Manufacturing has a relatively large installed capacity in China, and it is one of the main furnaces exported to foreign countries. Through the successful experiences of the reconstruction in Chengdu Jintang Power Plant, the importance and necessity for heating surface reconstruction of such furnace are discussed.

Key words: desuperheating water; heating surface; technical reconstruction; energy saving and consumption reducing

中图分类号: TK223 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003 – 6954(2012)03 – 0088 – 05

1 现实应用及减温水问题

1.1 现实的运用

东方锅炉厂生产的 DG2028/17.45 – II 5 型锅炉为亚临界参数、自然循环、前后墙对冲燃烧方式、一次中间再热、单炉膛平衡通风、固态排渣、尾部双烟道、全钢构架的 II 型汽包炉, 再热汽温采用烟气挡板调节, 空气预热器置于锅炉主柱内。

虽然该类型(及相似类型)锅炉现在在国内已

经基本没有订货, 但在国际市场上还有一定的市场。以印度市场为例, 截至 2011 年年底, 仅东方集团做 BTG 的就有 Udupi、Mettur、Ampara、Kalisindh 这 4 个项目采购了该类型锅炉共 7 台。其中笔者负责了 Udupi 电厂两台机组的调试, 现在均已投产。

1.2 运行过程中减温水量过大问题

笔者曾经先后负责华电广安电厂 3 期、国电成都金堂电厂、印度 UPCL 电厂的调试, 这 3 个电厂采用了几乎一样的炉型, 现将 3 个电厂 168 期间的数据做如下对比。

表 1 3 电厂 168 h 运行数据对比表

		广安电厂 3 期	成都金堂电厂	印度 UPCL
入炉煤收到基	全水 / %	6.40	7.52	9.11
	灰份 / %	35.83	44.35	6.82
	挥发分 / %	11.43	13.83	43.74
	固定碳 / %	46.34	34.30	40.33
	低位发热量 / (kJ · kg ⁻¹)	18 609	15 163	26 902
	设计煤种低位发热量 / (kJ · kg ⁻¹)	19 900	20 190	24 832
一级减温水	飞灰含碳量 / %	4.10	2.80	1.30
	底渣含碳量 / %	6.20	5.30	3.10
	设计值(BMCR) / (t · h ⁻¹)	40.20	19.21	36.23
二级减温水	实际值 / (t · h ⁻¹)	195	197	77
	设计值(BMCR) / (t · h ⁻¹)	26.8	12.18	24.15
再热减温水	实际值 / (t · h ⁻¹)	52	33	36
	设计值(BMCR) / (t · h ⁻¹)	0	0	0
	实际值 / (t · h ⁻¹)	35	31	20

从表 1 对比可以看出,即使是在燃用优质煤的情况下,减温水量仍然偏大,这不但增加了机组能耗,作为出口机组,更将在移交过程中出现问题。以印度 UPCL 电厂为例,东方集团与印度 Lanco 签署的技术协议里,BMCR 工况下,过热器减温水保证值 103 t/h,再热器为 0。在经过多次燃烧及制粉系统调整后,过热器减温水量基本达标,但再热器减温水量要达标困难很大。

2 受热面改造及测试结果

2.1 受热面改造的必要性

为了解决减温水量过大这一难题,金堂电厂协同西南电力设计院、东方锅炉厂、四川电力调试所对此问题进行了深入研究,分析根本原因为由于锅炉设计时对劣质烟煤的燃烧特性认识不足,炉膛结构尺寸、辐射和对流受热面分配比例设计不合理,引起炉膛吸热量的不足,而对流受热面换热过大,致使减温水量偏大,因此受热面改造是必要而可行的。

2.2 受热面改造方案

2.2.1 改造主要内容

- (1) 将后竖井后烟道的水平低温过热器下组改为省煤器;
- (2) 将中组水平低温过热器部分去除;

- (3) 切除部分中组和下组水平低温再热器受热面;
- (4) 将中隔墙下集箱上移;
- (5) 前竖井增加省煤器。

2.2.2 改造示意图

锅炉受热面改造示意图见图 1。

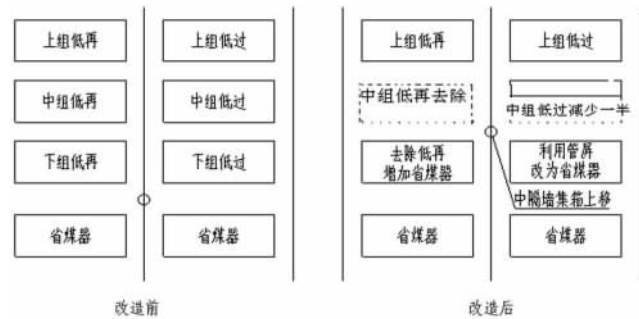


图 1 受热面改造前后示意图

2.3 改造后的测试结果

对 61 号机改造后的性能进行了测试,在正式试验期间,保证煤质的稳定,关闭排污系统,尽量减少对炉膛燃烧有扰动的操作,3 个工况点分别为 600 MW、450 MW 和 360 MW,每个工况试验持续时间为 2 h。在进行试验过程中,每个试验工况均无异常状况出现,各取样工作完成顺利。正式试验的工作主要针对锅炉的热效率、空气预热器的漏风率及减温水量的测试,结果见表 2、表 3、表 4 和图 2、图 3。

2.3.1 锅炉效率试验及结论

表 2 600 MW 工况大修前后锅炉效率对比

项 目		大修前(550 MW)	大修后(600 MW)	备 注
煤质元素分析	碳收到基 Car/%	46.01	45.11	元素分析
	氢收到基 Har/%	2.66	2.72	元素分析
	氧收到基 Oar/%	8.85	5.16	元素分析
	氮收到基 Nar/%	0.60	0.75	元素分析
	硫收到基 Sar/%	2.36	2.09	元素分析
	灰分收到基 Aar/%	32.02	35.12	元素分析
	水分收到基 Mar/%	7.50	9.05	元素分析
	燃料低位发热量 $Q_{\text{net,ar}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	17 690	17 530	元素分析
各项损失及锅炉效率	排烟热量损失 $q_2/\%$	7.659	6.69	计算值
	化学不完全燃烧损失 $q_3/\%$	0.059	0.01	计算值
	机械不完全燃烧损失 $q_4/\%$	1.923	1.50	计算值
	散热损失 $q_5/\%$	0.396	0.32	计算值
	灰渣物理热量损失 $q_6/\%$	0.327	0.31	计算值
	总损失 $\sum q/\%$	10.36	8.84	计算值
	锅炉效率 $\eta/\%$	89.64	91.16	计算值
	大修后比大修前效率提高 $\Delta\eta/\%$		1.52	计算值

表3 450 MW 工况大修前后锅炉效率对比

项 目	大修前	大修后	备 注	
煤质元素分析	碳收到基 Car/%	47.30	45.23	元素分析
	氢收到基 Har/%	2.63	2.7	元素分析
	氧收到基 Oar/%	8.99	5.7	元素分析
	氮收到基 Nar/%	0.72	0.78	元素分析
	硫收到基 Sar/%	2.93	1.92	元素分析
	灰分收到基 Aar/%	30.53	33.9	元素分析
	水分收到基 Mar/%	6.90	9.76	元素分析
燃料低位发热量 $Q_{\text{net,ar}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	17 480	17 460	元素分析	
各项损失及锅炉效率	排烟热量损失 $q_2/\%$	7.886	6.70	计算值
	化学不完全燃烧损失 $q_3/\%$	0.033	0.04	计算值
	机械不完全燃烧损失 $q_4/\%$	2.547	2.52	计算值
	散热损失 $q_5/\%$	0.491	0.45	计算值
	灰渣物理热量损失 $q_6/\%$	0.329	0.30	计算值
	总损失 $\Sigma_q/\%$	11.29	10.02	计算值
	锅炉效率 $\eta/\%$	88.71	89.98	计算值
大修后比大修前效率提高 $\triangle\eta/\%$		1.27	计算值	

表4 360 MW 工况大修前后锅炉效率对比

项 目	大修前	大修后	备 注	
煤质元素分析	碳收到基 Car/%	46.02	46.09	元素分析
	氢收到基 Har/%	2.76	2.75	元素分析
	氧收到基 Oar/%	8.96	5.34	元素分析
	氮收到基 Nar/%	0.50	0.65	元素分析
	硫收到基 Sar/%	1.20	2.04	元素分析
	灰分收到基 Aar/%	30.06	34.75	元素分析
	水分收到基 Mar/%	10.50	8.38	元素分析
燃料低位发热量 $Q_{\text{net, ar}}/(\text{ kJ} \cdot \text{ kg}^{-1})$	17 320	17 880	元素分析	
各项损失及锅炉效率	排烟热量损失 $q_2/\%$	7.358	6.97	计算值
	化学不完全燃烧损失 $q_3/\%$	0.023	0.07	计算值
	机械不完全燃烧损失 $q_4/\%$	3.574	2.63	计算值
	散热损失 $q_5/\%$	0.576	0.55	计算值
	灰渣物理热量损失 $q_6/\%$	0.314	0.30	计算值
	总损失 $\Sigma q/\%$	11.84	10.51	计算值
	锅炉效率 $\eta/\%$	88.16	89.49	计算值
大修后比大修前效率提高 $\triangle \eta/\%$		1.33	计算值	

表5 锅炉大修前后减温水量对比表

项 目	600 MW		450 MW		360 MW	
	大修前	大修后	大修前	大修后	大修前	大修后
一级减温水 $A/(t \cdot h^{-1})$	90.02	36.98	91.4	51.68	82.07	55.07
一级减温水 $B/(t \cdot h^{-1})$	91.40	79.00	90.09	73.81	70.08	54.34
二级减温水 $A/(t \cdot h^{-1})$	34.58	15.61	21.11	14.67	12.32	19.68
二级减温水 $B/(t \cdot h^{-1})$	20.10	32.07	21.72	25.03	19.33	14.63
过热器减温水总量 $/(t \cdot h^{-1})$	236.09	163.66	224.32	165.19	183.81	143.72
大修前后过热器减温水流量之差 $/(t \cdot h^{-1})$	72.43		59.13		40.09	
再热器减温水流量 $/(t \cdot h^{-1})$	87.62	22.97	46.86	2.46	26.74	2.47
大修前后再热器减温水流量之差 $/(t \cdot h^{-1})$	64.65		44.4		24.26	
再热器和过热器减温水总量 $/(t \cdot h^{-1})$	323.71	186.63	271.18	167.65	210.55	146.19
大修前后减温水总量之差 $/(t \cdot h^{-1})$	137.08		103.53		64.36	

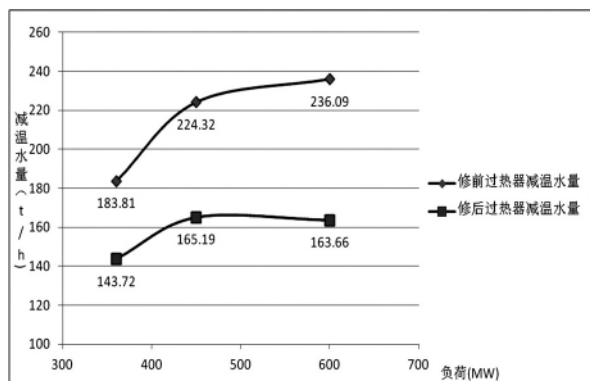


图2 过热器减温水量与负荷关系曲线

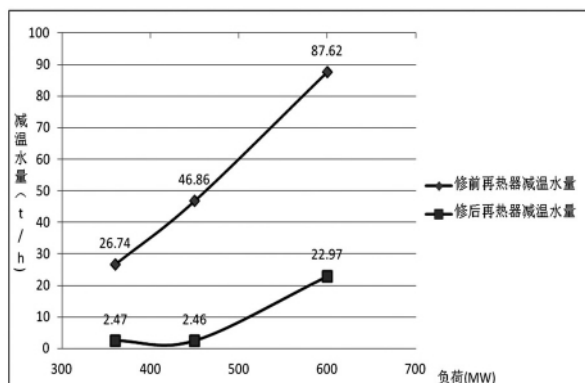


图3 再热器减温水量与负荷关系曲线

试验结果表明:大修后锅炉效率在 600 MW 工况下为 91.16%, 450 MW 工况下为 89.98%, 360 MW 工况下为 89.49%。

试验结论: 600 MW 工况大修后锅炉效率比大修前(机组负荷 550 MW)提高了 1.52%, 450 MW 工况大修后锅炉效率比大修前提高了 1.27%, 360 MW 工况大修后锅炉效率比大修前提高了 1.33%。大修后锅炉效率提高明显。

2.3.2 大修前后减温水流量比较

每一次试验工况调整后,应保证锅炉主要运行参数在允许波动范围之内,试验测试时间为 2 h,试验期间锅炉燃烧工况、燃料量、主蒸汽流量、再热蒸

汽流量、给水流量、汽包水位、过量空气系数及制粉系统投运方式等尽可能保持稳定运行,试验中过热器减温水流量及再热器减温水流量测试见表 5。

试验结果表明:大修后在 600 MW 工况下,过热器减温水流量为 163.66 t/h,再热器减温水流量为 22.97 t/h,再热器和过热器减温水总量为 186.63 t/h; 在 450 MW 工况下,过热器减温水流量为 165.19 t/h,再热器减温水流量为 2.46 t/h,再热器和过热器减温水总量为 167.65 t/h; 在 300 MW 工况下,过热器减温水流量为 143.72 t/h,再热器减温水流量为 2.47 t/h,再热器和过热器减温水总量为 146.19 t/h。

试验结论: 600 MW 工况下,大修后过热器减温水流量比大修前减少 72.43 t/h,再热器减温水流量减少 64.65 t/h,减温水总量比大修前减少 137.08 t/h; 450 MW 工况下,大修后过热器减温水流量比大修前减少 59.13 t/h,再热器减温水流量减少 44.4 t/h,减温水总量比大修前减少 103.53 t/h; 360 MW 工况下,大修后过热器减温水流量比大修前减少 40.09 t/h,再热器减温水流量减少 24.26 t/h,减温水总量比大修前减少 64.36 t/h; 此次 A 级检修对大修前机组减温水流量偏高的针对性改造效果明显。

3 结 论

试验证明,DG2028/17.45-Ⅱ5 型锅炉受热面改造是成功的,具有重要意义。对国内已经投产的机组,通过改造,可以有效降低供电煤耗,提高机组效率;对出口海外的机组,在制造阶段就有针对性的改变设计,有利于机组通过性能考核试验,从而达到顺利移交的目的。

(收稿日期:2012-02-15)

(上接第 51 页)

- [7] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [8] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.
- [9] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] 张静, 徐政, 郑翔, 等. SVC 抑制 SSR 的机理及控制器

设计 [J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 57-61.

- [11] 张丹. 高压直流输电系统次同步振荡的特征值分析与控制 [J]. 北京: 华北电力大学, 2011.

作者简介:

王 敏(1988), 男, 西南交通大学硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

康积涛(1962), 男, 教授, 主要从事电力调度自动化系统、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期:2012-01-19)

浅谈印度某发电工程镉镍蓄电池选择计算

龙 军

(西南电力设计院,四川 成都 610021)

摘 要:印度火力发电工程中蓄电池型式较多采用镉镍蓄电池,其相关参数选择计算上与国内有一定的区别。结合西南电力设计院设计的某印度发电工程,探讨双方在选择计算上的一些主要差异,供类似工程借鉴。

关键词:镉镍蓄电池;端电池;充电装置

Abstract: Thermal power projects in India more like using nickel - cadmium battery, and the selection and calculation of its associated parameters have some differences with the domestic engineering. The main differences of selection and calculation on nickel - cadmium battery between India and China are discussed according to the design of a power plant in India, which provides a reference for the similar project.

Key words: nickel - cadmium battery; terminal battery; charging device

中图分类号:TM912 文献标志码:B 文章编号:1003 - 6954(2012)03 - 0092 - 03

0 工程背景介绍

近年国内电力设计院在印度市场参与了较多发电工程项目的设计,大多数为 BTG 项目。BTG 项目中一般不会涉及到直流系统设计,但在最近中方(指西南电力设计院,下同)参与设计的某印度 3×660 MW 燃煤机组工程中,其设计范围要求与常规 BTG 项目有所不同,该项目要求在概念设计阶段完成全厂除升压站外的所有部分,设计施工图阶段时则只完成 BTG 部分的设计,因此在概念设计阶段中,要求中方需提供单元机组蓄电池选择计算书。

1 镉镍蓄电池选型计算与中方的差异

印方在招标文件中要求机组蓄电池采用 220 V 镉镍蓄电池,动控合用,冗余设置,即设置 $2 \times 100\%$ 蓄电池组, $2 \times 100\%$ 充电装置,直流母线采用单母线分段,每套蓄电池组和充电装置接到不同的母线上,这种直流系统配置方式是印度发电工程中常用的配置。据了解印方在发电工程中习惯采用镉镍蓄电池而不同于国内采用铅酸蓄电池主要是因为当地环境温度较高,采用镉镍蓄电池更可靠,寿命更长。

下面将通过印方对中方概念设计阶段计算书的审查意见,以及印方咨询设计单位 Fichtner India 公司提供的施工图阶段终版计算书,对本工程双方在

机组镉镍蓄电池及充电装置选择计算上的主要差异进行讨论。

1.1 镉镍蓄电池选型计算依据的标准

印方在审查意见第一条就提出,镉镍蓄电池选择计算应依据 IEEE 1115(IEEE Recommended Practice for Sizing Nickel - Cadmium Batteries for Stationary Applications)标准。中方依据的标准主要是“DL/T 5044 - 2004 电力工程直流系统设计技术规程(简称 04 版直规)”,其规范性引用文件为现行国家和行业有关标准,没有提到是否依据或等同于国际、国外标准。经查阅 IEEE 1115(2000 版)标准,其采用的容量计算方法与 04 版直规中的阶梯算法总体相同,将此意见回复印方后,印方没有再提出异议。

对比 Fichtner India 公司完成的计算书,其依据的标准除 IEEE 1115 外,还采用了印度标准:IS10918 - Vented - type Nickel - cadmium Batteries,以及印度 HBL POWER SYSTEMS LIMITED 公司提供的镉镍蓄电池选择计算参数文件:Technical Data & Capacity Calculation Curves for Ni - Cd Battery of 'HBL Nife'。

1.2 镉镍蓄电池的最大选择容量

工程设计初始,中方对本工程机组 220 V 中倍率镉镍蓄电池组容量进行了初步计算,大致需要 1 200 Ah(注:UPS 直流电源来自专用镉镍蓄电池组),而国内镉镍蓄电池一直没有大容量产品,根据

相关资料及咨询制造厂,中倍率镉镍蓄电池目前最大容量仅 GNZ 800 Ah,国内产品无法选择。

印方对此答复 IEEE 1115 标准里中倍率镉镍蓄电池最大容量为 1 390 Ah,且印度 HBL POWER SYSTEMS LIMITED 公司能生产的中倍率镉镍蓄电池最大容量为 1 460 Ah,要求仍按镉镍蓄电池进行概念设计。

1.3 镉镍蓄电池组只数选择上的差异

1.3.1 计算书中镉镍蓄电池组只数选择

按照 04 版直规 4.1.6 条条文说明,“镉镍碱性蓄电池,由于单体电池电压为 1.20 V,正常浮充电电压较高,而放电时电压下降幅度较大,终止电压又低,无降压装置不能保证直流母线电压在允许范围之内,所以,镉镍碱性蓄电池应保留端电池和降压装置”,按 04 版直规设计了端电池及硅降压装置,并将硅降压装置接入蓄电池组与直流母线之间。

基本电池个数由 04 版直规 7.1.1 条第 2 节确定,即“有端电池的镉镍蓄电池组,应根据单体电池正常浮充电电压值和直流母线电压为 1.05 倍直流系统标称电压值来确定基本电池个数”。

$$\text{基本电池个数为 } N_0 = \frac{1.05 U_n}{U_f} = \frac{1.05 \times 220}{1.42} =$$

162.67,取 163 个。

式中, U_n 为直流系统额定电压; U_f 单体镉镍蓄电池正常浮充电电压值,宜取 1.42 ~ 1.45 V。

整组电池个数按 04 版直规 7.1.1 条第 2 节描述,应根据该电池放电时允许的最低电压值和直流母线电压为 1.05 倍直流系统标称电压值确定。针对此条,95 版直规 3.4.2 条对最整组蓄电池只数选择描述更为清晰,即“镉镍蓄电池每组蓄电池个数,宜按直流母线电压在事故放电末期为直流系统额定电压的 90%,每个蓄电池电压按 1.1 V(高倍率)或 1.07 V(低倍率)计算”。

$$\text{整组电池个数为 } N = \frac{U_{\min}}{U_m} = \frac{192.5}{1.07} = 179.9, \text{取}$$

180 个。

式中, $U_{\min}$ 为放电末期直流系统允许的蓄电池组端电压,按 04 版直规 4.2.4 条,动力控制合并供电时 $U_{\min} \geq 87.5\% U_n = 0.875 \times 220 = 192.5 \text{ V}$; U_m 为单体蓄电池放电末期终止电压;此处按 04 版直规表 B.1.4,取 1.07 V;端电池个数 $N_d = N - N_0 = 180 - 163 = 17$ 个。

该计算结果符合 04 版直规附表 B.3 推荐的中倍率镉镍蓄电池组只数选择。

1.3.2 Fichtner India 公司计算书中镉镍蓄电池只数选择

Fichtner India 公司的选择计算依据 IEEE 1115, IEEE 1115 对镉镍蓄电池只数选择公式如下。

$$\frac{\text{Maximum allowable system voltage}}{\text{Cell voltage required for satisfactory charging}} = \text{Number of cells}$$

$$\frac{\text{Minimum battery voltage}}{\text{Number of cells}} = \text{Minimum cell voltage}$$

即蓄电池只数由该直流系统允许的最高系统电压与蓄电池浮充电压决定,而单只蓄电池放电末期电压由该直流系统允许的最小蓄电池组端电压与蓄电池只数决定;同时指出“最小蓄电池组端电压等于直流系统允许的最低电压加上终端负荷到蓄电池出口的电压降”。

Fichtner India 公司计算如下。

确定直流系统电压范围为 $-15\% U_n \sim +10\% U_n$, 即 187 ~ 242 V;

最小蓄电池组端电压 = 187 + 蓄电池至终端负荷电压降(按 $3\% U_n$) = $187 + 6.6 = 193.6 \text{ V}$;

单只蓄电池放电末期电压确定为 1.14 V;

蓄电池只数 = $\frac{193.6}{1.14} = 169.83$ 只,选择 170 只;

蓄电池浮充电压确定为 1.4 V/只;

最大蓄电池组电压 = 蓄电池只数 × 蓄电池浮充电压 = $170 \times 1.4 = 238 \text{ V} \leq 242 \text{ V}$ 。

其选择出来的只数在均恒充电时蓄电池组电压势必会超过直流系统允许的最高电压,因此均充时蓄电池组与直流母线应脱开进行。

1.3.3 两种镉镍蓄电池组只数选择的比较

IEEE 1115 标准对镉镍蓄电池组只数选择方法与 04 版直规总体是相同的,两者的区别主要在于对浮充电时允许的蓄电池组最高电压不同。2004 版直流技规按 $105\% U_n$ 考虑,更多的是出于满足直流供电设备额定电压的要求,IEEE 1115 按直流系统允许的最大电压考虑,这个最大电压主要决定于直流供电设备允许的最大电压。

印方在审查意见中对中方蓄电池组只数选择未提有意见,但却提出取消降压装置。对比 Fichtner India 公司对蓄电池个数的选择办法,其未设置端电池及降压装置的前提条件实际上是提高了预期的单

只蓄电池放电末期电压,这样会直接导致最终计算容量提高,不太经济。如果不考虑经济因数,计算中也可以不采用技规中推荐的蓄电池放电末期终止电压 1.07 V,而将其提高为附表 B.11 中列举的 1.19 V,也能选择出满足工程要求,同时不设置端电池的镉镍蓄电池组,计算如下。

$$\text{整组蓄电池只数为 } N = \frac{1.05 U_n}{U_f} = \frac{1.05 \times 220}{1.42} =$$

162.7,选择 163 只。

放电末期蓄电池组出口端电压 $U_{\min} = N \times U_m = 163 \times 1.19 = 193.97 \geq 87.5\% U_n$ 。

上述结果满足 2004 版直流技规要求,即正常浮充时母线电压为直流系统标称电压的 105%,同时在事故放电情况下,蓄电池组端电压不低于直流系统标称电压的 87.5%。

上述选择,由于最大限度地提高了单体蓄电池预期放电末期终止电压,会导致蓄电池组计算容量大幅度增加。如果蓄电池厂家能在将来进一步提高镉镍蓄电池性能,生产大容量产品,并降低浮充和均充电压,探讨取消端电池,会使中方的设计更能被印方认可。

1.4 充电装置额定电流选择计算差异

计算书中充电装置额定电流按 04 版直规要求,按以下 3 个条件计算。

- 1) 满足浮充电要求: $I_r = 0.01 I_5 + I_{jc}$
- 2) 满足初充电要求: $I_r = 1.0 I_5 \sim 1.25 I_5$
- 3) 满足均衡充电要求: $I_r = (1.0 I_5 \sim 1.25 I_5) +$

I_{jc}

式中, I_r 为充电装置额定电流; I_5 为镉镍碱性蓄电池 5 h 放电率电流,一般 $I_5 = 0.2 C_5$; I_{jc} 为直流系统经常负荷电流。

印方在审查意见中提出,充电装置额定电流选择应满足在浮充电运行时,考虑一台最大功率直流电动机试验运行要求,即要求 I_r 应在条件 1) 中再加上一台最大功率直流电动机的额定电流 I_M 。

Fichtner India 公司计算书其充电装置额定电流按以下两个条件计算。

- 1) 满足浮充电流: $I_r = 0.01 I_5 + I_M$
- 2) 满足均衡充电要求: $I_r = 1.0 I_5$

额定电流选择上式最大值并考虑 10% 备用余

量。

Fichtner India 公司在计算均衡充电时没有考虑经常电流,从这里也可以看出均充时蓄电池组是与直流母线脱开进行的。

1.5 直流负荷统计差异

按 04 版直规 5.2.4 条要求,直流负荷统计时对不同直流负荷应乘以对应的负荷系数。印方在审查意见中对负荷系数提出疑问,并叫中方澄清,由于此问题沟通较为困难,中方一并回复为经验数据,最终印方未在此问题上继续纠缠。Fichtner India 公司在直流负荷统计表中没有考虑负荷系数,其直流负荷全部按额定功率转换为电流,加上其选择的单只蓄电池放电末期电压较高,最终计算出来的容量比中方计算容量稍大,为 1 440.6 Ah。

Fichtner India 公司对厂用交流电源事故停电时间选择与中方一样,按 1 h 计算,同时 Fichtner India 公司在直流负荷统计计算时间中采纳了中方对各主机直流油泵的计算时间,即大机、小机直流油泵采用 1.5 h,发电机密封油泵采用 3 h。

2 建 议

据了解,2004 版直流技规目前正在修订中,为更好地与国际标准接轨,以使国内设计的东西更能被国外业主认可,希望新版直规能结合有关国际或国外先进标准,增加更为全面详尽的镉镍蓄电池选择计算指导性条文。

参考文献

- [1] DL/T 5044 - 2004, 电力工程直流系统设计技术规程 [S].
- [2] 电力工程直流系统设计手册(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3] IEEE 1115, IEEE Recommended Practice for Sizing Nickel - Cadmium Batteries for Stationary Applications [S].

作者简介:

龙 军(1978),男,大学本科,工程师,从事电气二次设计工作。

(收稿日期:2012-02-07)

四川自贡电业局：回眸，聆听铿锵的足音

自贡电业局属国家电网四川省电力公司大一型供电企业，拥有电力客户23.98万户，2011年售电3 640 GWh，同比增长9.54%。担负着自贡市四区两县（其中趸售县1个）和内江市威远县部分区域的电能供应、电网建设和运行管理任务。

2011年，是“十二五”开局之年，是国家电网自贡电业人用激情书写华章、用奉献彰显责任、用勤奋铸就辉煌的一年。

荣获国家电网公司文明单位、四川省五一劳动奖状、四川省电力公司红旗党委、十佳文明单位和模范职工之家等称誉。总体工作成绩喜人，企业“十二五”发展实现良好开局。

安全管控能力持续提升



“抢险不能冒险”的叮咛始终萦绕在自贡电业人耳边。

2011年，随着“两抓一建”安全风险管

控年活动的深入开展，“三个专项监督”、“三查四防”安全大检查与隐患排查治理工作的有机结合，自贡电业局状态检修全方位

落实，103户重要客户安全专项检查全面开展，主网设备预检预试质量不断提升，设备健康水平得以不断优化，重要客户供用电安全管理随之加强，企业良好安全生产态势得以持续保持。面对迎峰度夏严峻电力供需形势，自贡电业局通过精心制定电网运行方式，全面开展电网安全性评估、电网迎峰度夏反事故应急演练等多项举措，有效防范了电网运行的安全风险，企业安全管控能力持续提升。

电网建设全面加速

2011年，自贡电业局自豪地看到，再造一个自贡电网繁浩工程，在自贡电业局手中全面开启并加速实施。

向义变电站220 kV有源改造工程、乐德220 kV新建输变电工程顺利推进；宋家桥变电站主变压器扩建工程被省公司评为优质工程；220 kV仙市新建、王渡扩建工程，110 kV胜利、汇西输变电工程顺利进展。自贡电网“十二五”规划与自贡市“十二五”发展规划实现有效对接，做到了“经济发展电力先行”。

回眸2011年，自贡电业人无法忘记向义变电站的新生历程因牵涉到自贡、

自贡电网十二五规划与城市规划成功对接



国家电网

四川自贡电业局

内江两市的迎峰度夏电网安全可靠供电，向站改造备受四川省电力公司和当地政府的高度关注。省公司领导刘勤、王平、甘和全，自贡市委市政府领导向华全、刘国庆等，相继莅临施工现场，关心、协调和指导工作，这极大地鼓舞了全体人员的斗志。在巨大的精神感召下，自贡电业人集全局之力、汇全员之智，圆满完成了向家岭变电站220 kV系统的改造及投运任务，为新时期的电网建设积累了宝贵的经验和精神财富，成为公司系统老站改造的样板工程。

优质服务塑造品牌

自贡电业人欣慰地看到，在自己手中，一条条优质服务的创新举措，塑造了“国家电网”品牌形象。

2011年，自贡电业局认真贯彻落实国家电网新“三个十条”，扎实开展供电服务提升工程，不断规范深化“共产党员服务队”建设、丰富细化95598电力服务热线功能，积极服务西博会项目、自贡市重大项目，为全市重大项目开通绿色供电服务通道，全方位助力地方经济社会快速发展。并在全省率先开通移动营业厅充值、首家开展移动POS机上门开卡充值服务、成为农村抄收催一体化建设试点单位，新增收费网点、渠道160个，有效解决居民缴费难问题的同时，优质服务水平不断提升。

2011年，自贡电业局成功完成了川南

抗旱保电、灯会保电、中央领导视察等一系列重大保电任务，建立了高效顺畅的信息传递和应急处置机制，妥善处置各类突发事件，特别是主动应对413富顺压缩天然气泄漏事故和522荣县新胜煤矿瓦斯爆炸事故，获得自贡市委、市政府的高度赞扬，彰显了央企责任，更赢得了社会的广泛认可。

百尺竿头思更进，策马扬鞭自奋蹄，2012年，是“十二五”发展的提速年，是自贡电业局深化“两个转变”、加快电网建设、实施“五大”体系建设、冲刺安全生产3 000 天周期的关键之年。

凝眸远望，机遇和困难同在，挑战与希望并存！自贡电业局将不懈坚持：

安全发展依然是自贡电业局工作的首要任务；

和谐发展依然是自贡电业局工作的不变主题；

创新发展依然是自贡电业局工作的不竭动力。

自贡电业局必将迈着坚实的步伐，不断超越、追求卓越，高歌猛进、破浪前行、加快发展，用智慧与激情书写更加灿烂的华章！



11.08 自贡





国家电网
STATE GRID

德阳电业局：努力实现跨越新发展



德阳电力员工在汉旺新镇开展带电作业



电力员工接受安全警示教育

2011年是全面实施“十二五”规划的起步之年，在四川省电力公司的坚强领导下，德阳电业局紧紧围绕“两个转变”的工作要求，深入贯彻落实国网公司、省公司各项战略决策部署，抢抓机遇、创新超越，推进企业发展和电网发展不断取得新的成绩。





企业文化活动丰富多彩



德阳电业局喜获省公司供电服务技能竞赛团体一等奖

2011年，全局完成售电量9 838 GWh；完成电网投资15.56 亿元；累计售电均价521.95 元/MWh；累计应收综合电费53.87 亿元，电费回收率100%；综合线损率5.41%，较省公司下达目标低1.08个百分点；截至2012年2月8日，全局已连续安全生产2 508 天。

