

★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刊源期刊

• 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

瀑布沟水电站



四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.33

2010

No.3

《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 郭小端

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:

ISSN 1003-6954
CN 51-1315/TM

2010年第 33卷第 3期(总 207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

四川电力试验研究院

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:四川电力试验研究院情报室

地 址:成都市青华路 24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87314278

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] CN 51-1315/TM * 1978 *

b * A4 * 94 * 24 * P * Y6.00 * 4300 * 26 *

2010-02

目 次

·四川电研院青年创新创效·

接地装置暂态特性分析 杨 琳 田晓菲 李建明(1)

MMS协议及其在数字化变电站中的应用研究 李琪林 樊留敬(3)

·电力市场·

电力系统网损分摊方法研究 董世勇 倪广魁(6)

面向不平衡负荷补偿的 SVC的研究 林 峰 施进平 王伟甲(11)

基于小波变换和遗传算法优化神经网络负荷预测 刘 绚 刘天琪(15)

考虑线路阻塞情况下的 ACOPF节点电价研究

..... 李 平 李建兵 揭海宝(19)

基于近似线性规划和暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算

..... 廖 萍 李兴源(23)

空热备用输电线路电能计量分析 熊晓岚 李 琦(27)

·高电压技术·

110 kV线路覆冰防范措施及对策 魏长喜(30)

不受波速和噪声影响的雷击定位模式识别法 唐启红 汪 颖 肖先勇(33)

用麦也尔电弧模型分析雷击引起的电压凹陷 黄建康(38)

小电网负荷低谷时段谐波电压问题的研究 马志远 贺建闽(42)

事故中双跳圈开关操作回路的电源研究 罗永刚 薛永原 龚在礼(47)

"V"型悬垂绝缘子串设计研究 刘 然(50)

电力系统中谐波对电容的影响及对策 黄 胜(53)

接地网地面电位分布计算分析 李 欣 龙辉 戴玉松等(56)

基于小波变换的直流系统接地故障检测 阳细斌(58)

·输配电技术·

四川特高压投运初期的问题和对策 朱国俊 王 滨(62)

提高电力系统稳定性综合措施效能分析及 MATLAB仿真 熊来红(64)

感应电动机参数对小干扰电压稳定影响

..... 李 林 康积涛 张学群等(68)

电力系统云计算初探 杨旭昕 刘俊勇 季宏亮等(71)

储能装置提高电力系统暂态稳定最优位置安装 李 勇 刘俊勇(77)

普光气田 220 kV变电站 35 kV系统接地设计 刘永寿(81)

电容式电压互感器负介损值现象分析与解决措施 李 辉 姚龙泉(84)

四川电网输电线路近年一季度故障原因分析及防治措施 李龙江(87)

水电厂励磁系统数学建模中存在的问题及解决方法 毕 坚 夏 潮(92)

CONTENTS

Analysis on Transient Characteristic of Earthing Device	Yang Lin Tian Xiaofei Li Jianming(1)
Research of MMS Protocol and Its Application to Digital Substation.....	Li Qilin Fan Liujiang(3)
Discussion on Loss Allocation Method for Power System.....	Dong Shiyong Ni Guangku(6)
Research on SVC Acting at Unbalanced Load Compensation	Lin Feng Shi Jinping Wang Weijia(11)
Load Forecasting Based on Wavelet Transform and Neural Network Optimized by Genetic Algorithm	Liu Xuan Liu Tianqi(15)
Research on ACOPF Nodal Price Considering Line Congestion	Li Ping Li Jianbing Jie Haibao(19)
Improved Algorithm for Wind Farm Penetration Optimization Based on Approximate Linear Programming Method and Transient Stability Analysis	Liao Ping Li Xingyuan(23)
Cause Analysis for Active in Reverse Direction Occurring in 35 kV No-load Standby Heat Line.....	Li Qi Xiong Xiaojian(27)
Precautionary Measures and Countermeasures for Ice Accretion of 110 kV Transmission Line	Wei Changxi(30)
Lightning Stroke Location Based on Pattern Recognition Avoiding Wave Velocity and Noise Influence	Tang Qihong Wang Ying Xiao Xianrong(33)
Analysis of Voltage Sag Caused by Lightning Stroke Based on Mayr Arc Model	Huang Jiankang(38)
Research on Harmonic Voltage Problem When Small Power Grid in Valley Period of Load.....	Ma Zhiyuan He Jianmin(42)
Power Supply Analysis for Switch Operating Circuit of Redundant Trip Coil in Accident	Luo Yonggang Xue Yongyuan Gong Zaili(47)
Design and Research of V-shaped Suspension Insulator String	Liu Ran(50)
Influence of Harmonic on Capacitance in Power System and Its Countermeasures	Huang Sheng(53)
Calculation and Analysis of Earth Surface Potentials Distribution of Ground Grid.....	Li Xin Long Hui Dai Yusong et al(56)
Grounding Fault Detection of DC System Based on Wavelet Transform	Yang Xibin(58)
Problems in Initial Operation Stage of Sichuan UHV Transmission and Its Countermeasures.....	Zhu Guojun Wang Bin(62)
Efficiency Analysis of Comprehensive Measures for Improving Stability of Power System and Its MATLAB Simulation.....	Xiong Laibong(64)
Influence of Induction Motor Parameters on Small Signal Voltage Stability	Li Lin Kang Jiao Zhang Xuequn et al(68)
Preliminary Study of Cloud Computing in Power System	Yang Xuxin Liu Junyong Ji Hongliang et al(71)
Improving Best Location of Power System Transient Stability by Energy Storage Device	Li Yong Liu Junyong(77)
Grounding Design of 35 kV System in 220 kV Substation of Pu Guang Gas Field.....	Liu Yongshou(81)
Analysis on Negative Value Phenomenon of Dielectric Loss of Capacitor Voltage Transformer and Its Solution	Li Hui Yao Longquan(84)
Analysis of Transmission Line Fault Causes in Sichuan Power Grid in the First Quarter of Recent Years and Its Preventive Measures	Li Longjiang(87)
Questions in Mathematical Modelling of Excitation System in Hydroelectric Plant and Its Solution	Bi Jian Xia Chao(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2010 Vol.33 No.3

(Ser. No. 207)

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

接地装置暂态特性分析

杨琳¹, 田晓菲², 李建明¹

(1 四川电力试验研究院, 四川 成都 610071; 2 四川电力物流集团公司, 四川 成都 610041)

摘 要:对接地装置暂态特性概率进行了详细分析, 为工程技术人员了解接地装置冲击电流作用下暂态特性提供理性认识。

关键词:接地装置; 暂态特性; 接地阻抗

Abstract In order to make a rational imaging for the engineers a comprehensive and objective approach is presented to analyze the transient characteristic probability of earthing device when it is subjected to lightning currents

Key words earthing device; transient characteristic; impedance of grounding connection

中图分类号: TM862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)03—0001—02

0 引 言

雷击是影响电网安全运行的重要因素之一。当雷击电力系统设备时, 如果接地装置接地电阻较大, 将会造成输电线路反击、接地系统本身局部电位异常升高事故, 严重危及系统设备及人员安全。

接地装置起着将雷电流快速经大地泄流, 维护电力系统安全可靠运行、保障电气设备与运行人员安全的重要作用。接地装置暂态特性决定因素较多, 决定于接地装置结构尺寸、土壤电阻率、雷电流参数等因素。接地装置工频特性已为广大工程技术人员所熟知, 下面对接地装置暂态特性概率进行了详细分析, 为工程技术人员了解接地装置冲击电流作用下暂态特性提供理性与感性认识。

1 接地装置散流特性

一般而言, 接地系统由三部分组成: ①连接接闪器与接地体的金属引线; ②接地体; ③包围接地体的土壤。单位长度接地体电路模型可定义为电感、电阻、电容、电纳二端回路^[1], 如图 1 所示, 散流电流可由泄散到土壤的横向电流 I_T 和传递到接地体远端的纵向电流 I_L 组成。纵向电流将产生接地体内电阻热损失并在接地体内及周围建立磁场, 图 1 中电阻 R 及电感 L 代表这一现象, 两个参数都将在电流流过时产生电压降。此外, 纵向泄漏电流在接地体周围建立

起电场 (由媒质的电阻率 ρ 及介电参数 ϵ 决定), 媒质的影响将由图 1 中电容 C 和电纳 G 决定。电容电流与传导电流的比值与接地体几何形状无关, 只决定于 $1/2\pi f\rho\epsilon$ ^[2]。

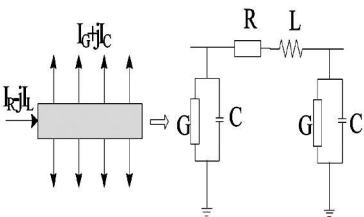


图 1 单位接地体等效电路图

以上接地体的电路模型只适用于单位长度接地体, 为了对整个大尺寸接地装置 (地网、伸长接地体等) 进行建模, 需考虑接地元件间的电磁耦合 (互阻、互感、互容), 并以单位接地体电路模型建立拓扑结构的接地系统。整个接地系统的接地阻抗由注入点电流引起的电位升与注入电流之比决定。

由电磁耦合角度可将接地体散流现象理解为接地阻抗, 但工程应用中及接地阻抗测试国家标准 (DL/T 621—1997 交流电气装置的接地) 中将其表示为接地电阻。这是因为在低频电流作用下, 接地体电抗部分可以忽略, 恒定电流下接地体可由一系列电阻组成, 故接地电阻为一确定值, 可由 $R_T = V_T / I_T$ 表示。

通常接地系统由接地阻抗表示, 对频域内每一精确的频率下, 复杂的接地阻抗可精确地表示为 $Z(w) = V(w) / I(w)$ 。图 2 为埋设于电阻率 $2\,500\,\Omega \cdot m$ 土壤中 50 m 长接地体各频率下接地阻抗。

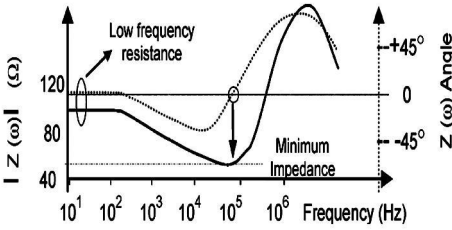


图 2 伸长接地体频率电阻

2 接地体雷电作用下暂态特性

为了表述清楚接地体雷电作用下暂态特性,必须理清两个概念:①注入电流电磁作用下土壤的放电特性;②接地体各元件间电磁耦合及波过程。第一种影响主要由土壤性质决定,第二种主要受接地体几何尺寸影响。准确计算两种作用是非常复杂的,下面将对以上基本概念进行详细讨论。

2.1 土壤频率特性

土壤可视为具有一定导电能力的介电媒质,在缓变电流及低土壤电阻率情况下,电容引起的位移电位通常被忽略。但在瞬变电流,尤其在高土壤电阻率情况下,位移电流能达到与电阻引起的泄漏电流相比拟的幅值。实验表明雷电流等值频率电流作用下,泄漏电流与位移电位之比变化很大^[3]。由图 2 知,当频率增加时,接地阻抗曲线由于电容位移电位影响偏离低频电阻值。随着频率继续增加,电感电流将起作用,并使接地阻抗继续降低,在电感电流与电容电流相互补偿时,接地阻抗值降至最低。频率继续增加时,电对电流传播起主要作用,进而导致接地阻抗值持续上升。

2.2 接地体上波过程

当电流或电压波作用于较大尺寸接地装置上时,相应的电磁波将在接地装置上传播,接地装置可视为埋于有损介质中的传输线。当电磁波在接地体上传播时,能量损耗将使波的幅值衰减。此外,波的衰减随频率与土壤电阻率增加而增加,由于不同频率分量的波传播速度不一样,其衰减程度也不一样。简言之,电流、电压波沿接地体传播时,其波幅将衰减且波形畸变,波头陡度亦随之减小,如图 3 所示。

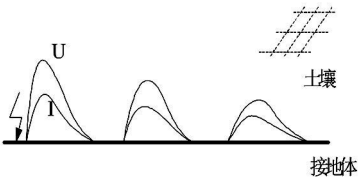


图 3 电压、电流波在接地体上传播

由于接地体一般都是有限长的,因此接地体电流注入点处电场磁场将最强,整个接地体电位分布将不相等。此现象在多个接地元件联接在一起时更为明显,如多个接地扁铁联结而成的地网。伸长接地体及地网存在有效散流长度及区域的概念,此散流长度及区域外接地体对散流没有贡献,如图 4 所示。

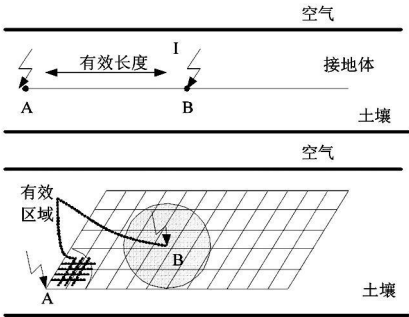


图 4 接地装置等效散流区域

2.3 火花放电效应

电流通过接地体散流时,在很大范围电流密度内土壤呈现线性散流现象,即电压与电流之比为恒值。但当较大幅值雷电流作用于集中接地体时,由于接地体周围电流密度将达很高幅值,接地体周围土壤电场强度 $E=J\rho$ 将超过土壤临界击穿值,土壤将发生火花放电,如图 5 所示。土壤临界击穿值由土壤密实程度、电阻率、湿度等因素决定,实验测得 E_c 达 $0.2\sim 1.7\text{ MV/m}^{[4-5]}$ 。火花放电造成土壤放电通道呈很强的导电性,可视为纯导体,相当于接地体等效放电半径增大,因此在接地体电压、电流峰值部分,接地电阻等效降低了。图 6 为实测不同幅值冲击电流作用下接地体电压、电流波形。

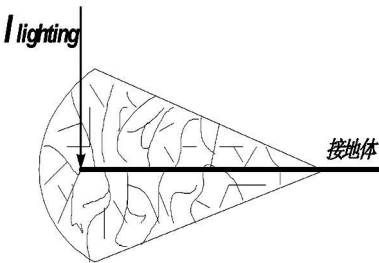


图 5 接地体火花放电示意图

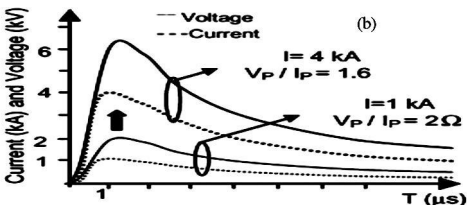


图 6 接地体冲击电压、电流图

(下转第 52 页)

电干扰。

(4)适应带电检修的要求。

对于“V”型串而言,合成绝缘子与盘型绝缘子的链接不同,合成绝缘子上没有铰接点,刚性容易显现,两端球头与碗头连接处容易形成球头与 R 销的挤压,造成 R 销变形,导致绝缘子脱落。目前采取的防球头脱落措施虽然在一定程度上限制了“V”型合成绝缘子串脱落,但仍存在缺陷。若从根本上解决导线合成绝缘子“V”型串球头脱落问题,必须取消合成绝缘子上的球头、碗头联结结构,换以环、环联结形式,消除球头对 R 销的挤压问题。如果将合成绝缘子的导线侧端部修改为环,或采用单板碗头,通过两个 U 型环与联板连接,增加铰接点,使其不受弯矩影响,从根本上杜绝球头局部应力集中疲劳断裂事故。对于双联和多联绝缘子,由于导线联板和绝缘子球头间有多个铰接点不存在单联球碗联接的问题,不用进行改动,按常规设计即可。

两方案各有优缺点,修改绝缘子导线侧端部,将球头改为环形结构,其优点是不增加连接环节,“V”

型串的串长不增加,因此塔头尺寸不增加,但是合成绝缘子厂家需重新进行金具设计;在不改动绝缘子的情况下,增加铰接点,也可从受力上解决受压问题,但是需要增加绝缘子串的长度,以 210 kN 绝缘子串为例,“V”绝缘子串单肢长度需增加 220 mm,但对于超、特高压铁杆塔尺寸来说,影响很小。

5 结 论

综上所述,在同等条件下,输电线路采用“V”型串悬挂方式,铁塔结构尺寸紧凑,“V”型串受力科学合理,开角稳定,防雷性能优良,可有效防止绝缘子串污闪、冰闪、雨闪等事故,还具有节约土地资源、减少房屋拆迁、降低林木砍伐量,减少水土流失等经济效益、环境效益和社会效益。超、特高压输电线路采用“V”型串悬挂方式既体现了国网公司建设“两型三新”输电线路的设计理念,又符合节约型社会发展的需求。

(收稿日期: 2010—03—10)

(上接第 2 页)

3 讨论与结语

就工程应用而言,接地体暂态特性应注意以下几个方面。

(1)接地体散流作用应视为接地阻抗,只有在特殊条件下,如低频电流作用(工频、直流)下可将其视为接地阻抗。此外,一些学者采用瞬时接地电阻或动态接地电阻概率描述接地全暂态特性是不太合适的,因为它隐藏了接地装置的本质参数阻抗的作用。采用冲击系数概念表述冲击接地电阻的方法于工程应用是十分有效的,它既避免了现场工程应用人员去测量复杂且难以准确测量的接地阻抗,又能大概了解雷电流作用下,接地体最大电位升。

(2)接地装置等电位电路模型只适用于低频电流作用下散流特性分析,高频电流情况下,波传播过程及由接地体电感、电阻引起的电位降将对接地电位分布造成很大影响。

(3)接地体暂态电流作用下,接地体将呈有效散流区域,如高土壤电阻率地区采用埋设伸长接地体以降低接地电阻,这一措施对降低工频接地电阻很有效,但对降低冲击接地电阻效果甚微。因此,工程设

计时应计算接地体暂态电流作用时有效散流区域,以降低不必要的材料浪费。

参考文献

- [1] Silverio Visacro A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents[J]. IEEE Transactions On Power Delivery, 2007, 22(1).
- [2] A. M. Mousa The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes [J]. IEEE Trans Power Del, 1994, 9(3); 1669—1677.
- [3] A. C. Liew and M. Darveniza Dynamic Model of Impulse Characteristic of Concentrated Earths[J]. Proc Inst Elect Eng, 1974, 121(2); 123—135.
- [4] S. Visacro and C. Portela Soil Permittivity and Conductivity Behavior on Frequency Range of Transient Phenomena in Electric Power Systems[C]. the Symp. High Voltage Engineering Braunschweig Germany 1987.
- [5] S. Visacro and C. Portela Modeling of Earthing Systems for Lightning Protection Applications Including Propagation Affects[C]. in Proc Int Conf Lightning Protection Berlin Germany 1992; 129 - 132.
- [6] 杨琳, 李建明. 冲击接地电阻测量装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11); 93—96.
- [7] 张宝平, 何金良, 康鹏, 等. 冻土冲击特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16); 143—147.

(收稿日期: 2010—01—26)

电力系统网损分摊方法研究

董世勇¹, 倪广魁²

(1. 四川内江电业局变电运检中心, 四川 内江 641000; 2. 华北电力大学电力系统研究所, 北京 102206)

摘 要:综合分析和探讨了几种经典的网损分摊方法,并指出了这些网损分摊方法各自的优点和缺点及面临的问题;同时阐述了一般的潮流跟踪法由于分摊因子的存在,产生了本来没有有功、无功损耗,分摊后却产生了有功、无功损耗的不合理现象;从网损产生的本质出发,根据电网能量分布规律,利用能量的一维特性,得出了任意两个节点间支路的线损是由电力系统中所有电源共同引起的结果的网损分摊方法,并给出了该方法的算例分析。

关键词:电力系统;电力市场;功率;网损分摊

Abstract Several typical power loss allocation methods are analyzed and discussed and their advantages and disadvantages are pointed out. At the same time, the existing drawbacks of the power flow tracking method are analyzed, as the allocation factors resulted in unaccepted phenomena that there is actually no active/reactive loss but in allocation results active/reactive loss appears. From the nature of the losses coming into being according to the law of energy distribution, using the one-dimensional characteristics of the energy, the loss allocation method is obtained based on the description of the linear superposition theorem that the line losses between any two nodes of power system are the results caused by all the power supplies in power system, and the computation example analysis of this approach is given.

Key words power system; electricity market; power; loss allocation

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)03—0006—05

0 引 言

电网线损是电力系统运行的基础参数,在电力市场中正确有效的网损分摊方法是非常有用的。一方面,在电力市场交易过程中,虽然输电损耗占总发电量的 4%~8%^[1],输电网的损耗只占全部成本的一小部分(典型值为 2.5%^[2])。但是,它增加了电能的输送费用,而且对具体的交易和电网用户,也可能有很大的影响。英国电力市场的运行实践表明,不同的网损分摊方案可能对交易电价的影响高达 10%^[3]。另一方面,现在网损分摊的研究处于百家争鸣的状态,但是没有任何一个网损分摊方法可以证明自己的网损分摊结果是符合物理实际的。因此,如何科学、公平合理地确定网损分摊方案,是当前电力市场改革所面临的重大课题。

考虑市场因素,传统意义的网损必须附加来源,因此,网损分摊成为研究的热点,提出了多种计算方法。这些网损分摊方法应遵循保证用户的长期和短期经济利益、系统安全性、经济效益、透明度、可行性等原则,并且应当能够提供正确的经济信号、能够促

使整个网络损耗的降低等。如果能科学有效地解决网损分摊中的这些问题,将对输电服务的电力市场化进程产生积极和深远的推动作用。

1 典型网损分摊方法

目前,网损分摊的经典方法主要有:平均网损分摊法^[4]、边际网损系数法^[5]、跟踪潮流法^[6]、合同路径法、基于阻抗矩阵的网损分摊方法、CLP方法、针对双边交易的合同路径法、基于博弈论的网损分摊方法^[7]等。在国外的一些大电网公司采用较多的是平均网损分摊法和边际网损系数法。由于篇幅所限,就平均网损分摊法、边际网损系数法、跟踪潮流法这三种进行探讨,并指出了各自的优缺点。

1.1 平均网损分摊法

平均网损分摊方法是根据用户的电能大小比例来分摊网损,按相同的系数值来分配网损。因此平均网损分摊法实际上是一种“邮票法”,该方法算法简单,不考虑输电网的结构、输电线路的距离和输送功率的收发点位置,在全网范围内按相同的网损系数进行分配,是最早被电力联营市场所采用的方法。西班

牙、英格兰和威尔士电力市场采用的就是这种分摊方法。网损系数为

$$\lambda = \frac{P_{\text{loss}}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{GL } i}} \quad (1)$$

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{loss } i} \quad (2)$$

其中, i 为节点号; $P_{\text{GL } i}$ 为第 i 个节点的有功出力或有功负荷; P_{loss} 为全网网损; $P_{\text{loss } i}$ 是第 i 条支路的损耗, 变压器等输电设备可并入相应的支路计算。

则节点 i 的有功出力或有功负荷应该分摊的网损量为

$$P_{\text{N loss } i} = P_{\text{GL } i} \lambda \quad (3)$$

这种网损分摊方法既直接又透明, 可以通过事前计算、事后计算、实时计算或三者之间组合来完全回收输电损耗成本, 也可以减少网损分摊量的意外波动, 从而降低了独立发电厂投资的风险性。

但是这种网损分摊方法也有其缺点, 无论用户是就近买电, 还是向离其电气距离较远的发电厂买电, 其网损是均摊的, 因此它忽略实际运行情况和输电用户的电气位置, 可能会向用户提供不正确的损耗成本信号。并且平均网损分摊方法不能提供电网短期和长期经济运行的经济学信号, 缺乏强有力的电力市场经济激励机制。因此, 在电力市场运营初期, 相关理论还不成熟的情况下采用该方法。有不少方法是在这种分摊方法的基础上进行了一些改进, 但随着电力市场理论研究的逐步完善和实践的不断深入, 该方法将被其他方法所取代。

1.2 边际网损系数法

边际网损系数法根据节点注入功率的单位变化引起全网网损变化量的大小来对各节点上负荷或发电机进行网损的分摊, 是一种灵敏度方法, 各发电节点的损耗灵敏度 K_i 为

$$K_i = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_{\text{G } i}} \quad (4)$$

式中, $P_{\text{G } i}$ 为第 i 个发电用户发电功率; P_{loss} 为总输电功率损耗。

发电机应承担的功率损耗为

$$P_{\text{G loss } i} = K_i \cdot P_{\text{G } i} \quad (5)$$

这种分摊方法能反映各节点造成全网网损的微增成本信息, 从而能够提供很好的经济信号, 通过市场的手段促使潮流向网损减少的方向流动, 达到优化潮流、提高经济效益以及指导用户投资决策的目的。

虽然在美国加州、澳大利亚的电力市场均采用这种网损分摊方法, 分摊方法的具体实现方式也有所不同, 但该方法计算出所有交易分摊网损之和与实际系统网损不相等, 不能完全回收输电损耗成本。

1.3 潮流追踪法

潮流追踪是以潮流计算或状态估计所得到的系统潮流分布为基础, 根据节点功率比例分配原则, 追溯潮流走向, 从而确定输电用户功率在每个输电设备中通过功率所占份额, 以此作为输电功率损耗分摊的依据, 该方法的计算直接针对输电用户功率总量。其基本原理是判定由发电节点注入的功率如何在电网的各输电线及负荷节点间进行分配。由于其原理简单, 符合人们的常规思维, 故一般都将其作为输电损耗分摊的一个备选方案。该方法按所追踪的量不同主要包括按电流追踪损耗分摊方法和按功率追踪损耗分摊方法。

1.3.1 按电流追踪损耗分摊方法

按电流量跟踪方法是根据各电源对支路的使用程度计算各电源对各支路应承担的损耗, 从而计算系统网损在电源中的分摊。通过研究网络中支路电流的组成及其对网络损耗的影响来进行全网网损的分摊。在忽略无功潮流影响的情况下, 文献 [8] 证明了“利用份额”采用电流比值与采用功率比值等价, 提出各出线分摊节点网损按电流幅值进行分摊, 认为按电流幅值的平方进行分摊的原则是不合理的。因为按电流幅值的平方分摊可能使全局网损和电源分摊网损的增长趋势出现矛盾的情况, 并且这种分摊将使电源对线路“利用份额”在首末端不再保持一致。

从现实中电磁耦合存在性出发, 为了体现潮流追踪的公平性, 有些按电流量跟踪的方法考虑了线路上各电流分量的耦合, 引入耦合网损系数, 使所分摊的网损不仅包括自身电流分量所产生的部分 $I_i^2 R_i$ (I_i 为线路 i 上的自身电流分量, R_i 为线路上的电阻), 而且还包括由于其他线路上的电流在此线路上产生的耦合电流分量而成的网损量, 即由电流量耦合的交叉网损部分 $I_k^2 R_i$ (I_k 为线路 i 上的由于线路 k 上电流引起的耦合电流分量, R_i 为线路 i 上的电阻)。这种方法新颖, 但计算量大, 在复杂的电力系统中不宜使用。

1.3.2 按功率追踪损耗分摊方法

对于按功率追踪损耗分摊方法, 如果从复功率出发进行分析, 由于存在着有功功率和无功功率的耦合关系, 分析计算相当复杂。为了计算简便, 最初的分

析方法是对复功率进行解耦。又由于线路的损耗是由有功功率引起的,所以解耦后,按有功功率进行跟踪。

有功功率跟踪为了分析与计算的简便,忽略了有功和无功的联动的影响,直接对有功潮流和无功潮流进行解耦,而不考虑节点无功对有功功率损耗影响,按照有功功率比例共享的原则,进行有功跟踪和网损分摊。但是,各发电厂在实际的运行当中,由于电压控制等原因,其功率因数不可能相等。当功率因数较差且不相等时,有功跟踪方法在确定输电设备利用份额及分摊的网损时会引起较大的误差。

随着计算机的发展及其计算速度的提高,人们对网损分摊的精度要求更加精准。在有功功率跟踪会引起较大误差的情况下,人们对这种跟踪方法进行了改进,也就产生了另一种功率跟踪方法,即复功率跟踪和按复功率进行网损分摊的方法。

复功率跟踪的方法,考虑了有功功率和无功功率对全网网损的综合影响,所采用的简化少,因此,比有功功率跟踪方法更趋于公平合理,理论上更易被用户接受。但是,这种方法涉及大量复数运算,包括复数矩阵的求逆,因而计算复杂,对于复杂电力系统中的实际应用,还有待进一步的研究。

由于基于潮流跟踪的网损分摊法只考虑了各交易引起的支路潮流对网损的影响,而对交易之间相互作用产生的网损责任问题未予计及。因此,按照这种方法分摊网损的结果可能有失公平的原则。

2 经典方法存在的问题

经典网损分摊方法各有其优点和使用范围,但是目前对网损分摊问题本质的认识还没有达到透彻的程度,有必要再度审视这一问题。因为,任何一种分摊因子为复数的网损分摊方法都会出现一种不合理的现象,即本来没有有功、无功损耗,分摊后却产生了有功、无功损耗,因而在原则上是难以接受的。如下例所示。

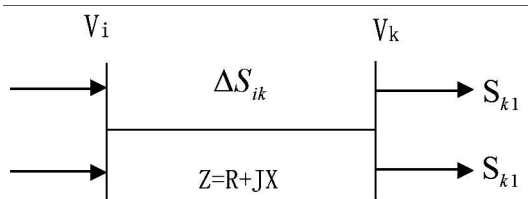


图 1 含分支的简单系统

对图 1 所示简单系统,考虑一种特殊的情况,

假设 $V_k=1, R=1, X=0, \Delta S_{ik}=3.6, S_{k1}=0.65+j0.562731, S_{k2}=0.8+j0.435726$ 时,由于线路的电抗 $X=0$,显然没有无功损耗,线路的损耗为 $\Delta S_{ik}=3.6$ 。如果网损分摊按 $S_{k1}、S_{k2}$ 复功率之比进行分摊,按此原则 $S_{k1}、S_{k2}$ 分得的损耗分别为

$$\begin{aligned} \Delta S_{k1} &= \Delta S_{ik} \frac{S_{k1}}{S_{k1} + S_{k2}} \\ &= 1.747331 + j0.193329 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{k2} &= \Delta S_{ik} \frac{S_{k2}}{S_{k1} + S_{k2}} \\ &= 1.747331 - j0.193329 \end{aligned} \tag{7}$$

从式 (6)、(7) 可以看到 S_{k1} 分到了正的无功损耗, S_{k2} 分到了负的无功损耗,但线路上实际是没有无功损耗的, S_{k1} 会认为这种方法是不符合实际的。

造成这种不合理现象的原因是分摊公式中出现的分摊因子 $\frac{S_{k1}}{S_{k1} + S_{k2}}$, 一般情况下是虚、实部都不为零的复数,显然不论线路损耗是纯有功还是纯无功,乘以这一分摊因子后都将成为一个虚实部都不为零的复损耗,产生这种现象。复数分摊因子将使分摊结果的定性性质发生变化,有功可能变成无功,无功也可能变成有功,对大多数用户而言这种情况是不易接受的。

一般说来,电力网络中任一节点的电压 (除作为参考点的平衡节点外) 都是由所有节点注入功率共同维持的。因此,各个节点的电压以及各个支路的电流与所有节点的注入功率有关,这样一般的分摊因子都会带来不合理的计算结果。

3 改进方法

既然潮流跟踪法基于物理潮流,概念清晰,易于理解和实施,这样对这种方法进行改进,可以从另一个角度来考虑分析,从而得到一种合理的物理潮流跟踪法。

在电流、电压所在的正交空间内,功率与电流和电压量间呈非线性关系,直接利用电力系统和电路理论现有的结论,最终必须解决两乘数占其积的比例问题,是一个没有定义的数学命题,没有解决方案,无法获得令人满意的解释。为此,利用在能量空间求证网络中支路功率的物理组成的观念,得出电网络中电流参量证明网络中任意支路线损的功率组成和分布特征的思路。

为不失一般性, 设电网具有 n 个节点, q 个电源。为使所得结果具有规律性, 约定电源节点编号从 1 开始, 依次到 q 其后的节点编号次序任意。电源以电流源描述, 记为 $\dot{I}_{ks}$, $k=1, 2, \dots, q$

电网的节点电压导纳矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_q \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1q} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2q} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{q1} & y_{q2} & \cdots & y_{qq} & \cdots & y_{qn} \\ y_{q+1,1} & y_{q+1,2} & \cdots & y_{q+1,q} & \cdots & y_{q+1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nq} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_q \\ U_{q+1} \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式 (8) 中, y_{ij} 为电网导纳矩阵的元素; $\dot{U}_i$, $i=1, 2, \dots, n$ 为第 i 个节点的电压, 是未知量; $\dot{I}_{ks}$, $k=1, 2, \dots, q$ 为第 k 个电源的电流源电流, 为已知量。利用式 (8) 求解节点电压量。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_q \\ U_{q+1} \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1q} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2q} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{q1} & A_{q2} & \cdots & A_{qq} & \cdots & A_{qn} \\ A_{q+1,1} & A_{q+1,2} & \cdots & A_{q+1,q} & \cdots & A_{q+1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nq} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_q \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式 (9) 中, A_{ij} 为式 (8) 中节点导纳阵对应元素 (i, j) 的代数余子式, 于是可得各个节点电压 $\dot{U}_i$, $i=1, 2, \dots, n$

$$\dot{U}_i = \begin{bmatrix} \frac{A_{i1}}{\Delta} & \frac{A_{i2}}{\Delta} & \cdots & \frac{A_{iq}}{\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} \quad (10)$$

于是得节点 i 和 k 间的支路线损为

$$\begin{aligned} \Delta S_{ik} &= (\dot{U}_i - \dot{U}_k) \dot{I}_{ks} \\ &= (\dot{U}_i - \dot{U}_k) \left(\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_k}{\dot{Z}_{ik}} \right)^* \\ &= \frac{1}{Z_{ik}^*} \left[\frac{1}{\Delta} (A_{1k} \dot{I}_{1s} + A_{2k} \dot{I}_{2s} + \cdots + A_{qi} \dot{I}_{qs}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\Delta} (A_{1k} \dot{I}_{1s} + A_{2k} \dot{I}_{2s} + \cdots + A_{qk} \dot{I}_{qs}) \right] \cdot \\ &\quad \left[\frac{1}{\Delta} (A_{1i} \dot{I}_{1s} + A_{2i} \dot{I}_{2s} + \cdots + A_{qi} \dot{I}_{qs}) \right] \end{aligned}$$

$$- \frac{1}{\Delta} (A_{ki} \dot{I}_{1s} + A_{ki} \dot{I}_{2s} + \cdots + A_{ki} \dot{I}_{qs}) \quad (11)$$

根据式 (9), 将式 (11) 整理得

$$\begin{aligned} \Delta S_{ik} &= \frac{y_{ik}^*}{|\Delta|^2} \left[(A_{1i} - A_{1k})(A_{1i} - A_{1k})^* \dot{I}_{1s} \dot{I}_{1s}^* + \right. \\ &\quad (A_{2i} - A_{2k})(A_{1i} - A_{1k})^* \dot{I}_{2s} \dot{I}_{1s}^* + \cdots + \\ &\quad (A_{qi} - A_{qk})(A_{1i} - A_{1k})^* \dot{I}_{qs} \dot{I}_{1s}^* + \\ &\quad (A_{1i} - A_{1k})(A_{2i} - A_{2k})^* \dot{I}_{1s} \dot{I}_{2s}^* + \\ &\quad (A_{2i} - A_{2k})(A_{2i} - A_{2k})^* \dot{I}_{2s} \dot{I}_{2s}^* + \\ &\quad \cdots + (A_{qi} - A_{qk})(A_{2i} - A_{2k})^* \dot{I}_{qs} \dot{I}_{2s}^* + \\ &\quad \cdots + (A_{1i} - A_{1k})(A_{qi} - A_{qk})^* \dot{I}_{1s} \dot{I}_{qs}^* + \\ &\quad (A_{2i} - A_{2k})(A_{qi} - A_{qk})^* \dot{I}_{2s} \dot{I}_{qs}^* + \cdots + \\ &\quad \left. (A_{qi} - A_{qk})(A_{qi} - A_{qk})^* \dot{I}_{qs} \dot{I}_{qs}^* \right] \quad (12) \end{aligned}$$

从式 (12) 可以看出, 对于 $q (q > 1)$ 个电源的电力系统, 其支路的线损功率为电源自功率和互功率的代数和。

对于节点 i 和 k 间支路线损的自功率具有 $\dot{I}_{ms} \cdot \dot{I}_{ms}^* (m=1, 2, \dots, q)$ 的项, 是由电源 mS 独立提供能量的形式, 其表达式为

$$\begin{aligned} &\frac{y_{ik}^*}{|\Delta|^2} \left[(A_{mi} - A_{mk})(A_{mi} - A_{mk})^* \dot{I}_{ms} \dot{I}_{ms}^* \right. \\ &\quad \left. = \frac{y_{ik}^*}{|\Delta|^2} |A_{mi} - A_{mk}|^2 \cdot |\dot{I}_{ms}|^2 \right] \quad (13) \end{aligned}$$

对于节点 i 和 k 间支路线损的互功率具有 $\dot{I}_{ms} \cdot \dot{I}_{ns}^* (m=1, 2, \dots, q, n=1, 2, \dots, q, m \neq n)$ 的项, 表示电源 mS 和 nS 共同存在时, 向网络提供能量的形式, 其表达式为

$$\frac{y_{ik}^*}{|\Delta|^2} (A_{mi} - A_{mk})(A_{ni} - A_{nk})^* \dot{I}_{ms} \dot{I}_{ns}^* \quad (14)$$

由此可知, 电力系统中任意两个节点之间的支路线损是由电力系统中所有电源共同引起的结果。系统中线损功率由多种功率形式组成, 为各种组成成分的代数和, 这就是功率线性叠加定理。线损功率可以根据其电源提供能量的组合, 表现为多种功率形式, 数值等于电源自功率和互功率的代数和。这样很好地解决了系统网损的真正来源与分摊问题。

4 改进方法算例分析

这种改进方法是建立在潮流计算的基础上的网

损分摊方法,利用潮流计算的结果,将电力系统等效。以下述简单的三节点电路为例,如图 2 所示。

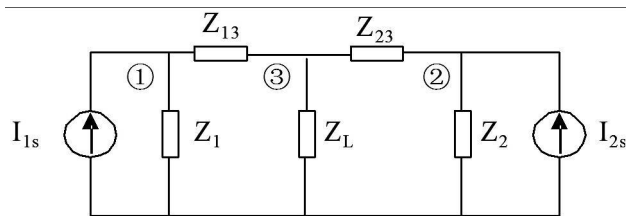


图 2 两电流源直流网络

其中电源 1S 的内阻 $Z_1 = 1.10 + j0.36$; 电源 2S 内阻 $Z_2 = 0.9 + j0.2$; 线路阻抗分别为 $Z_{13} = 0.04 + j0.12$, $Z_{23} = 0.03 + j0.09$; 负载为 $Z_L = 1.05 + j0.21$; 两电流源电流分别为 $I_s = 1.85 + j0.24$, $I_s = 1.64 + j0.2$ 。

则图 2 对应的节点导纳矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} 3.3210 - j0.7687 & 0 & -2.5 + j0.5 \\ 0 & 4.3922 - j0.2353 & -3.3333 + j0 \\ -2.5 + j0.5 & -3.3333 + j0 & 6.7491 - j1.6832 \end{bmatrix}$$

其对应的等效阻抗矩阵为

$$Z = \begin{bmatrix} 0.3611 + j0.1501 & 0.3182 + j0.0413 & 0.3314 + j0.0716 \\ 0.3182 + j0.0413 & 0.3573 + j0.1239 & 0.3353 + j0.0719 \\ 0.3314 + j0.0716 & 0.3353 + j0.0719 & 0.3467 + j0.1053 \end{bmatrix}$$

根据式 (12)、(13), 可计算节点 1、3 间支路上由 $I_s \cdot I_s^*$ 作用引起的线损为

$$\begin{aligned} \Delta S_{13|1s} &= -\frac{y_{13}^*}{|\Delta|^2} [(A_{11} - A_{13})(A_{11} - A_{13})^* \cdot I_s \cdot I_s^*] \\ &= y_{13}^* \left(\frac{A_{11}}{\Delta} - \frac{A_{13}}{\Delta} \right) \left(\frac{A_{11}}{\Delta} - \frac{A_{13}}{\Delta} \right)^* |I_s|^2 \\ &= (2.5 - j0.5)^* [(0.3611 + j0.1501) - (0.3314 + j0.0716)] \cdot [(0.3611 + j0.1501) - (0.3314 + j0.0716)]^* \cdot |1.85 + j0.24|^2 \\ &= 0.0613 + j0.1840 \end{aligned}$$

同理, 可计算节点 1、3 间支路上由 $I_s \cdot I_s^*$ 、 $I_s \cdot I_s^*$ 各自作用引起的线损为

$$\begin{aligned} \Delta S_{13|22} &= -\frac{y_{13}^*}{|\Delta|^2} [(A_{21} - A_{23})(A_{21} - A_{23})^* \cdot I_{2s} \cdot I_{2s}^*] \\ &= 0.0084 + j0.0252 \\ \Delta S_{13|12} &= -\frac{y_{13}^*}{|\Delta|^2} [(A_{11} - A_{13})(A_{21} - A_{23})^* \cdot I_s \cdot I_{2s}^*] \\ &= -0.0119 - j0.0707 \\ \Delta S_{13|21} &= -\frac{y_{13}^*}{|\Delta|^2} [(A_{21} - A_{23})(A_{11} - A_{13})^* \cdot I_{2s} \cdot I_s^*] \\ &= -0.0329 - j0.0637 \end{aligned}$$

同理, 可计算节点 2、3 间支路上由 $I_s \cdot I_s^*$ 、 $I_s \cdot I_s^*$

$I_s \cdot I_s^*$ 、 $I_s \cdot I_s^*$ 各自作用引起的线损为

$$\begin{aligned} \Delta S_{23|21} &= -\frac{y_{23}^*}{|\Delta|^2} [(A_{11} - A_{13})(A_{11} - A_{13})^* \cdot I_s \cdot I_{1s}^*] \\ &= 0.0289 + j0.0868 \\ \Delta S_{23|22} &= -\frac{y_{23}^*}{|\Delta|^2} [(A_{21} - A_{23})(A_{21} - A_{23})^* \cdot I_{2s} \cdot I_{2s}^*] \\ &= -0.0126 - j0.0379 \\ \Delta S_{23|12} &= -\frac{y_{23}^*}{|\Delta|^2} [(A_{11} - A_{13})(A_{21} - A_{23})^* \cdot I_s \cdot I_{2s}^*] \\ &= -0.0193 - j0.0573 \\ \Delta S_{23|21} &= -\frac{y_{23}^*}{|\Delta|^2} [(A_{21} - A_{23})(A_{11} - A_{13})^* \cdot I_{2s} \cdot I_s^*] \\ &= -0.0190 - j0.0574 \end{aligned}$$

对于符号下标, 以 $\Delta S_{13|11}$ 、 $\Delta S_{13|12}$ 为例, 下标 13 表示节点 1、3 间的支路; 11 表示该支路上的线损是由电源 1S 引起的自功率, 12 表示该线路上的线损是由电源 2S 引起的互功率。其他下标类同。

于是可得, 系统的总网损是

$$\sum S = \Delta S_{13|11s} + \dots + \Delta S_{23|21s} = 0.281 + j0.0848$$

其中, 节点 1、3 间支路上由电源 1S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{13|1s} &= \Delta S_{13|11} + \Delta S_{13|21} \\ &= 0.0284 - j0.0455 \end{aligned}$$

节点 1、3 间支路上, 由电源 2S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{13|2s} &= \Delta S_{13|22} + \Delta S_{13|12} \\ &= -0.0035 - j0.0455 \end{aligned}$$

节点 2、3 间支路上, 由电源 1S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{23|1s} &= \Delta S_{23|11} + \Delta S_{23|21} \\ &= 0.0099 + j0.0294 \end{aligned}$$

节点 2、3 间支路上, 由电源 2S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{23|2s} &= \Delta S_{23|22} + \Delta S_{23|12} \\ &= -0.0067 - j0.0194 \end{aligned}$$

全系统的网损中由电源 1S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{1s} &= \Delta S_{13|1s} + \Delta S_{23|1s} \\ &= 0.0383 + j0.01497 \end{aligned}$$

全系统的网损中由电源 2S 引起的线损是

$$\begin{aligned} \Delta S_{2s} &= \Delta S_{13|2s} + \Delta S_{23|2s} \\ &= -0.0102 - j0.0649 \end{aligned}$$

通过以上计算, 一方面, 计算结果与节点法计算结果一致; 另一方面, 利用这种方法可以清晰明确地得出系统网损的真正来源, 从而很好地解决了电力系统的网损分摊问题。

(下转第 46 页)

波电流在电网中引起的谐波电压倾向于减小变压器磁通的谐波含量和电流的谐波含量;而当谐波阻抗呈容性时,则变压器的谐波电流和谐波磁通倾向于互相增强。当电网在负荷低谷时段时,会有一些电容器组未切除,使电网的谐波阻抗呈容性,一方面会使电网电压升高,另一方面会引起某次谐波放大现象。

参考文献

[1] 贺建闽,黄治清,李群湛. 电网背景谐波电压测量与研究 [J]. 铁道学报, 2005(6): 28—33.
[2] 张直平主编. 城市电网谐波手册 [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
[3] 张直平. 电力系统中谐波的某些主要影响 [J]. 电网技

术, 1989(1): 8—14.
[4] 柴宇,房俊龙,高延英. 农村电网的谐波分析及治理 [J]. 农机化研究, 2006(3): 68—70.
[5] 余培岩,马卫平,界金星. 变压器 5 次谐波的产生及其对负序电压继电器的影响 [J]. 电力设备, 2004, 8(5): 27—30.
[6] Acha E, Arrillaga J, Medina A, Semlyen A. General Frame of Reference for Analysis of Harmonic Distortion in Systems with Multiple Transformer Nonlinearities [J]. Generation Transmission and Distribution [see also IEE Proceedings—Generation Transmission and Distribution], IEE Proceedings C, 1989, 36(5): 271—278.
[7] 施围. 电力系统过电压计算 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

(收稿日期: 2010—01—26)

(上接第 10 页)

5 结 语

电力系统的网损分摊方法有多种,但目前还没有一种让各国电力市场都接受的方法,大多数国家倾向于实行边际网损系数法或直接包括网损在内的实时节点定价。潮流跟踪法是一种会计学方法,许多人认为特别适合于固定成本回收,所以也很引人注目。但该方法不能提高电力系统的效益和为用户的投资决策提供有效的经济信号,而边际网损系数法则可以做到这点。由于分摊因子的存在,经典方法存在一些问题,使得原本没有有功损耗、无功损耗,分摊后却产生了有功损耗、无功损耗的不合理现象。功率线性叠加定理从网损产生的物理本质出发,经过严格的数学推导,有效解决了这一问题,体现了其优越性。

参考文献

[1] Alaywan Z, Allen J. California Electric Restructuring: A Broad Description Of the Development Of the California ISO [J]. IEEE Trans Power Syst, 1998, 13: 1445—1452.
[2] Christie R. Markets and Economic Dispatch and Transmission Losses [J]. IEEE Power System Economics, 2001.
[3] Shuttleworth G, Williams I. Allocation Transmission Losses: Methods and Criteria [A]. A Submission to the DICG Prepared by NERA. London, 1999.
[4] 曾鸣. 电力市场理论及应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 2000.
[5] Mutale J, Strbac G, Curcic S, et al. Allocation of Losses in Distribution Systems with Embedded Generation [J]. IEEE Proc on Gener, Transm & Distrib, 2000, 147(1)

: 7214.
[6] Wu Z Q, Chen G Z. MVA Power Flow and Loss Analysis for Electricity Market [J]. IEE Proc on Gener Transm & Distrib, 2001, 148(2): 153—158.
[7] 刁勤华,林济铿,倪以信,等. 博弈论及其在电力市场中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 19—23.
[8] Macqueen C N, Irving M R. An Algorithm for the Allocation of Distribution System Demand and Energy Losses [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 338—343.
[9] Slavickas R A. Allocation of Network Losses to Variable Electrical Loads [C]. The Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, (2): 391—396.
[10] 鲍海,马千. 电网线损物理分布机理 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 82—86.
[11] 王锡凡,王秀丽,郑斌. 电力市场过网费的潮流分析基础——网损分摊问题 [J]. 中国电力, 1998, 6(31): 6—9.
[12] 常乃超,郭志忠. 网损分摊问题的思考 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 4(23): 43—47.
[13] 吴政球. 有功、无功功率分摊及网损分摊的研究 (一) [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(3): 9—13.
[14] 吴政球. 有功、无功功率分摊及网损分摊的研究 (二)——有功、无功联合贡献因子及其应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(4): 9—22.
[15] 吴政球,姚建刚. 有功、无功功率分摊及网损分摊的研究 (三)——拓扑潮流分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(4): 14—22.

作者简介

董世勇 (1980—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护工作。
倪广魁 (1984—),硕士研究生,男,从事电力系统分析与控制方面的研究工作。

(收稿日期: 2009—12—17)

基于小波变换和遗传算法优化神经网络负荷预测

刘 绚, 刘天琪

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:提出了采用小波变换和遗传算法优化神经网络的混合模型对电力负荷进行短期预测。首先通过小波变换,将原始负荷序列分解到不同的尺度上,然后根据不同的子负荷序列的特性分别建立相匹配的神经网络模型,采用遗传算法优化各神经网络模型的初始权值,最后对各分量预测结果进行重构得到最终预测值。采用成都某地区 2009 年的实际负荷对所提方法进行验证,实验结果表明基于该方法的负荷预测系统具有较高的预测精度。

关键词:负荷预测;神经网络;小波变换;遗传算法

Abstract: A novel short-term load forecasting method using wavelet transform and neural network optimized by genetic algorithm is proposed. Firstly, by the wavelet transform, the load series is decomposed into the subseries with different frequency characteristics, then according to the features of the decomposed components, the corresponding neural network models are constructed to forecast the components, finally the forecasting result is obtained by the reconstruction of the forecasting result of components. The genetic algorithm optimization is used to optimize the initial weights of neural network model of each decomposed subsequence. Experimental results show that the proposed forecasting method has a satisfactory accuracy.

Key words: load forecasting; ANN; wavelet transform; genetic algorithm

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0015-04

负荷预测是电力系统管理现代化的重要内容之一,对电力系统的安全、经济、可靠运行具有重要作用。传统的负荷预测方法有时间序列法、回归分析法、灰色模型法^[1]、支持向量机^[2]等。这些方法模型简单便于使用,但预测精度低,难以满足负荷预测的要求。随着人工智能技术的发展,人工神经网络被广泛应用于负荷预测^[3-6],并成为其主要方法之一。径向基函数(RBF)神经网络^[4]作为前向神经网络的一种主要形式,具有结构简单、学习快速的特点,但是从本质上讲,RBF神经网络算法属于梯度下降算法,初始连接权随机选取,一旦取值不当,就会引起网络的振荡、不收敛或训练时间过长,再加之实际问题往往是极其复杂的多维曲面,存在多个局部极值点,使得BP算法极易陷入局部极值点,泛化能力比较低。

遗传算法^[7]是从自然进化的思想和理论发展而来的一种高效的并行全局搜索算法,该算法具有很好的鲁棒性,在解决全局优化问题方面取得了成功。用遗传算法优化设计神经网络,不仅容易获得全局最优解,还可以提高神经网络的泛化性能。

电力系统负荷序列明显地展现出以天和周为单位进行变化的周期性。因此负荷序列可以看作是多

个具有不同频率分量的叠加,所以可以通过对负荷序列进行频域分析将这些频率分量分离出来,对每个分量单独进行分析并根据其特性建模并预测。负荷中某些分量在时域上的表现是瞬时的、随机的,为了能捕获这一类分量的频率规律,用传统的时频分析方法就显得力不从心。

这里采用小波变换的方法,对负荷序列进行小波变换,将负荷序列分别投影到不同的尺度上,而各尺度可近似地看作各个不同的“频带”,这样各个尺度上的子序列分别代表了原序列中不同频域的分量,它们更加清楚地表现了负荷序列的周期性。根据小波分解后不同尺度上的负荷序列的不同特性建立相应的神经网络模型,利用遗传算法优化选取神经网络初始权重,最后将各负荷分量的预测结果叠加,得到预测结果。

1 小波分析基本原理

小波分析^[8-11]是近年发展起来的一种用于信号分析的数学方法。它的主要思想是选择合适的小波基函数,然后对小波基函数通过如下方式生成函数族。

基金项目:国家科技支撑计划项目(批准号:2008BAA13B01)

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

再通过函数族 $\{\psi_{a,b}\}$ 对信号进行分析。对于一个能量有限函数 $f(t)$, 其连续小波变换定义为

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

相应的连续小波变换的逆变换方程为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \iint_{\mathbb{R}^2} W_f(a,b) \overline{\psi_{a,b}(t)} \frac{da db}{a^2} \quad (3)$$

其中 C_ψ 满足下式

$$\iint_{\mathbb{R}^2} W_f(a,b) \overline{W_f(a,b)} \frac{da db}{a^2} = C_\psi \langle f, f \rangle \quad (4)$$

其中 b 代表时间上的位移, 而 a 则代表时间尺度, $W_f(a,b)$ 是指原信号 $f(t)$ 在时间 b 处所包含的尺度为 a 的小波函数分量, 表示了信号 $f(t)$ 小波函数 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 相关联的程度。

1987 年, Mallat 根据多分辨率分析理解, 提出了小波分解与重构的快速算法, 称为马拉 (Mallat) 算法^[8], 即金字塔算法。该算法的计算程序如下。

小波分解就是由高分辨率的离散近似 a_k^{j-1} 不断分解为低分辨率的离散近似 a_k^j 和离散细节 (小波数) d_k^j 的过程。

$$a_n^j = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(2n-k) a_k^{j-1} \quad (5)$$

$$d_n^j = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(2n-k) a_k^{j-1} \quad (6)$$

小波重构过程是小波分解过程的逆过程, 是由低分辨率的逼近系数 a_k^j 和小波系数 d_k^j 恢复出高分辨率逼近系数 a_k^{j-1} 的过程。

$$a_n^{j-1} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(n-2k) a_k^j + \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(n-2k) d_k^j \quad (7)$$

其中 a_k^j 和 d_k^j 为相应的小波分解系数, h_j 和 g_j 为离散滤波器。

2 径向基函数神经网络

径向基函数 (RBF) 神经网络作为前向神经网络的一种主要形式, 具有结构简单、学习快速的特点, 而且已经从理论上证明, 只要给定足够多的网络隐层节点, RBF 神经网络可以以任意精度逼近任何单值连续函数。RBF 神经网络由输入层、隐层、输出层组成, 其中隐含层的作用是完成对输入量的非线性变换, 选取高斯基函数作为隐含层的激活函数, 网络的

在输出则由隐含层输出线性组合得到。

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (8)$$

式中, x 为输入样本; c_i 为第 i 个隐层节点的高斯核函数的中心值; σ_i 是第 i 个隐层节点的变量, 称标准化常数或基宽度; m 为网络隐层节点的个数; ω_i 是第 i 个隐层节点到输出节点的权值。

对于隐含层单元中心矢量, 采用正交最小二乘法进行选取。对隐含层与输出层之间的连接权值应用递推最小二乘算法进行学习训练, 其学习训练的目标是使总误差达到最小, 即

$$m \ln J = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L \epsilon_{ij}^2 = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L (y_{ij} - y_{0ij})^2 \quad (9)$$

其中, y_{ij} 为当输入样本为 x_i 时, 输出层第 i 个单元的期望输出; ϵ_{ij} 为其拟合误差。

3 遗传算法的优化 RBF 神经网络初始权重

从本质上讲, RBF 算法属于梯度下降算法, 其学习结果对初始权向量异常敏感, 神经网络训练具有很大的盲目性, 初始连接权随机选取, 一旦取值不当, 就会引起网络的振荡、不收敛或训练时间过长, 再加上实际问题往往是极其复杂的多维曲面, 存在多个局部极值点, 有可能在网络权值参数优化时陷入局部极小, 使得网络的泛化能力及适应能力较差, 甚至带来死机和无法满足精度要求的情况。

遗传算法是基于自然选择和自然基因的搜索算法, 通常由三个基本操作组成: 选择、交叉和变异。GA 通常应用于神经网络权值训练, 网络结构的设计以及寻找最优学习规则^[12-14]。由于通过实验已经确定了网络的结构, 所以, 此处只用遗传算法进行神经网络权值修正。具体实现如下。

(1) Gray 编码

传统的二进制编码可能具有较大的 Hamming 距离, 这种缺陷将降低遗传算子的搜索效率。二进制编码的这一缺点有时被称为 Hamming 悬崖。而 Gray 编码即是二进制编码通过一个变换得到的编码, 目的即为克服二进制编码中的 Hamming 悬崖的缺点。

设有二进制串 $b_1 b_2 \cdots b_n$ 对应的 Gray 串为 $a_1 a_2 \cdots a_n$, 则从二进制编码到 Gray 编码的变换为

$$a_i = \begin{cases} b_i, & \text{如果 } i = 1 \\ b_{i-1} \oplus b_i, & \text{如果 } i > 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中,⊕表示模 2 加法。

而从一个 Gray 串到二进制串的变换为

$$b_i = \sum_{j=1}^i a_j (\text{mod} 2) \tag{11}$$

编码:将神经网络权值 w_{ij} 编成长度为 l 的 Gray 代码字符串。

(2) 决定初始种群,把神经网络的节点编号,将连接权 w_{ij} 组成一组数据,代表一个个体,若干个数据组构成初始种群。

(3) 适应度计算,以神经网络的输出节点误差的网络能量函数 e 为基础,选定 $F=C/e$,其中 C 为一常数, e 为网络的能量函数。

(4) 根据每个个体的适应度 F_i , 计算其选择概率 P_{Si} 。

$$P_{Si} = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \tag{12}$$

(5) 只用一点交叉,但在训练中将整个 0, 1 串分成四部份,输入层到隐含层连接权值、隐含层到输出层连接权值、隐含层阈值、输出层阈值。

(6) 变异操作,采用基本位变异算子,防止丢失有用的可能解,保证算法的全局收敛,变异概率设为 0. 02。

(7) 从当前父代和子代的所有个体中选择出适应度较大的个体构成下一代群体。然后再计算适应度值,开始了新一代的迭代。终止的条件为群体适应度趋于稳定或误差 e 小于某一给定值,或已达到预定的进化代数。

4 算 例

以成都某地区 2009 年 3、4 月实际负荷数据进行预测,采用 24 点预测,一共 1 464 个样本数据,原始负荷曲线如图 1 所示,记为 S_t 。首先对电力负荷序列进行小波分解,使分解后各小波分量具有更强的周期性和规律性。

负荷预测小波基的选择目前还没有统一的标准。这里用验证的方法选择 db4 作为小波基。为保证高次分量与低次分量充分分离,分解层数不宜太小,而过大的分解层数也无益于提高预测精度,故选择为 3 层分解。

分解尺度为三,得到分解后的各分量如图 2 所示。从图 2 中可看出小波分量 $d1$ 、 $d2$ 主要表现为随

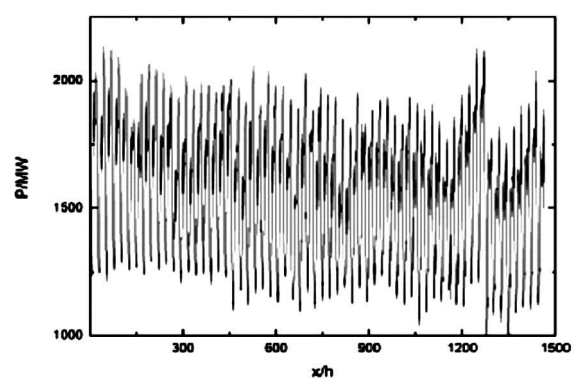


图 1 原始负荷序列 S

机性较强的非线性特征,小波分量 $d3$ 主要表现为部分随机性,尺度分量 $a3$ 主要表现了负荷的基本趋势。

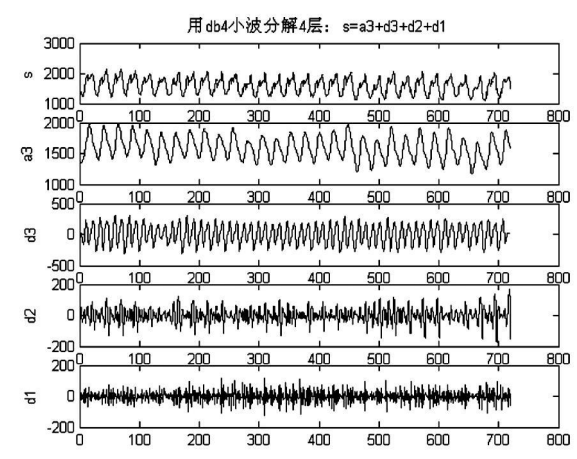


图 2 原负荷序列和小波分解序列

用遗传算法优化神经网络对小波各分量进行预测,然后进行小波重构,最后将各分量预测结果叠加得到预测的最后结果。具体步骤如下。

- ①对原始的负荷序列进行小波分解,如图 2 所示。图中曲线清楚显示了各分量的变化趋势。
- ②根据各负荷分量的特性分别建立如表 1 所示的神经网络模型, $L(i, t)$ 代表第 i 天 t 时刻的负荷值。

表 1 负荷分量特性				
名称	A3模型	D3模型	D2模型	D1模型
输入样本属性	$L(i-14, t);$ $L(i-7, t);$ $L(i-2, t-1);$	$L(i-7, t);$ $L(i-2, t-12);$ $L(i-2, t);$ $L(i-1, t-1);$ $L(i-1, t);$	$L(i-7, t);$ $L(i-1, t-18);$ $L(i-1, t-12);$ $L(i-1, t-6);$ 前 24 时刻数据	$L(i-7, t);$ $L(i-1, t-18);$ $L(i-1, t-12);$ $L(i-1, t-6);$ 前 24 时刻数据
	$L(i-2, t);$	$L(i-2, t);$	$L(i-1, t-12);$	$L(i-1, t-12);$
	$L(i-1, t-1);$	$L(i-1, t-12);$	$L(i-1, t-6);$	$L(i-1, t-6);$
	$L(i-1, t);$	$L(i-1, t-12);$	$L(i-1, t-6);$	$L(i-1, t-6);$
	$L(i-2, t);$ $L(i-1, t);$	前 24 时刻数据	前 24 时刻数据	前 24 时刻数据

- ③利用遗传算法优化各子序列神经网络的初始权重。

④对小波分量利用前 n 日的负荷数据直接预测第 n+1 日的一个逐时负荷, 将小波分量的数据归一化处理后进行样本训练, 得到预测结果。

⑤将预测的各分量进行小波重构, 得到负荷的预测值。

⑥相对误差

$$E = \frac{|y - \hat{y}|}{y}$$

(13)

用两种方法对成都某地区 4 月 18 日负荷进行预测, 数据取 20 次运行结果的平均值, 预测结果如表 2。

表 2 预测结果

预测时刻 /h:m in	实际值 /MW	小波-ANN		优化模型	
		预报值 /MW	相对误差 /%	预报值 /MW	相对误差 /%
0:00	1 505	1 504.8	-0.01	1 500.8	-0.28
1:00	1 365	1 366.8	0.13	1 366.5	0.11
2:00	1 250	1 233.5	-1.32	1 248.1	-0.15
3:00	1 303	1 284.4	-1.43	1 294.5	-0.65
4:00	1 251	1 204.6	-3.71	1 220.4	-2.45
5:00	1 197	1 194.4	-0.22	1 193.9	-0.26
6:00	1 268	1 214.1	-4.25	1 264.8	-0.25
7:00	1 422	1 439.2	1.21	1 427.0	0.35
8:00	1 408	1 414.8	0.48	1 408.7	0.05
9:00	1 628	1 636.3	0.51	1 632.1	0.25
10:00	1 697	1 697.8	0.05	1 704.1	0.42
11:00	1 681	1 670.7	-0.61	1 675.1	-0.35
12:00	1 768	1 764.5	-0.20	1 749.4	-1.05
13:00	1 554	1 530.4	-1.52	1 552.1	-0.12
14:00	1 658	1 717.0	3.56	1 658.7	0.04
15:00	1 733	1 775.5	2.45	1 734.6	0.09
16:00	1 753	1 731.6	-1.22	1 747.4	-0.32
17:00	1 833	1 923.9	4.96	1 848.4	0.84
18:00	1 791	1 774.0	-0.95	1 787.1	-0.22
19:00	1 772	1 765.6	-0.36	1 767.2	-0.27
20:00	1 958	1 957.2	-0.04	1 955.8	-0.11
21:00	1 956	1 957.4	0.07	1 956.8	0.04
22:00	1 846	1 850.6	0.25	1 844.5	-0.08
23:00	1 597	1 630.9	2.12	1 603.7	0.42
平均误差			1.32		0.38

两种方法预测一周的预测结果对比如表 3 所示, 数据取 20 次运行结果的平均值。

5 结 论

提出利用小波变换将负荷序列分解到不同的尺度上, 根据负荷子序列的不同特性建立相应的神经网络模型, 利用遗传算法优化选取神经网络的初始权

表 3 一周预测结果比较

日期	小波-ANN 相对误差 /%	优化模型相对误差 /%
星期一	1.32	0.38
星期二	1.45	0.54
星期三	1.68	0.62
星期四	1.55	0.76
星期五	1.40	0.65
星期六	1.28	0.50
星期日	1.38	0.68

重。通过对成都某地区的实际预测结果与未经优化的小波-神经网络模型预测结果相比较, 结果表明, 优化后的神经网络泛化能力提高, 预测精度也大为提高, 证明了该方法的正确性。

参考文献

[1] 牛小东, 等. 电力负荷预测技术及其应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[2] Bo-Juen Chen, Ming-Wei Chang and Chih-Jen Lin. Load Forecasting Using Support Vector Machines: A Study on EUNITE Competition 2001 [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1821-1830.

[3] Peng T. M., Hubele N. F., Karady G. G.. Advancement in the Application of Neural Networks for Short-term Load Forecasting [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 250-257.

[4] 赵剑剑, 张步涵, 程时杰, 等. 一种基于径向基函数的短期负荷预测方法 [J]. 电网技术, 2003, 27(6): 22-25.

[5] W. Charytoniuk, M. S. Chen. Neural Network Design for Short-Term Load Forecasting [C]. Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000, City University, London, 4-7 April 2000, 554-561.

[6] 徐丽娜. 神经网络控制 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 35-45.

[7] 陈国良, 王煦法. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.

[8] 徐军华, 刘天琪. 基于小波分解和人工神经网络的短期负荷预测 [J]. 电网技术, 2004, 28(8): 30-33.

[9] 邵能灵, 侯志俭, 李涛, 等. 基于小波分析的电力系统短期负荷预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 45-50.

[10] 冉启文, 单永正, 王骥, 等. 电力系统短期负荷预报的小波-神经网络-PARMA 方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 38-42.

[11] 杨延西, 刘丁. 基于小波变换和最小二乘支持向量机的短期电力负荷预测 [J]. 电网技术, 2005, 29(13): 60-64.

(下转第 67 页)

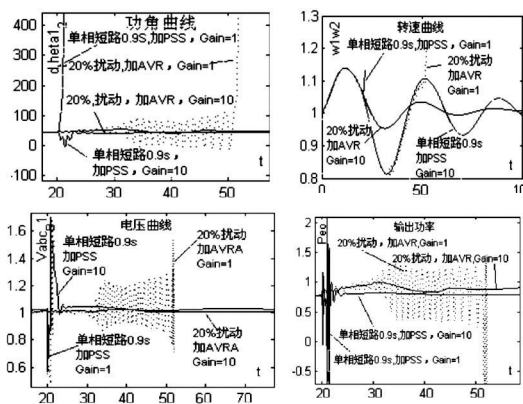


图 7 励磁电压增益仿真效果

3.4 线路容性补偿仿真分析

由公式可知,减小线路电抗,可以提高系统稳定极限功率,提高系统稳定性。在线路中串联电容可以达到此目的,现实中是用 TSCS 等装置来实现,本仿真中直接在线路中串联电容器来验证电容器补偿的效能。补偿度为 $\sigma = \frac{1/\omega C}{WL}$,仿真中用阻抗测量器分别测量补偿电容的阻抗和输电线路的阻抗,通过仿真测量得到如图 8 曲线。

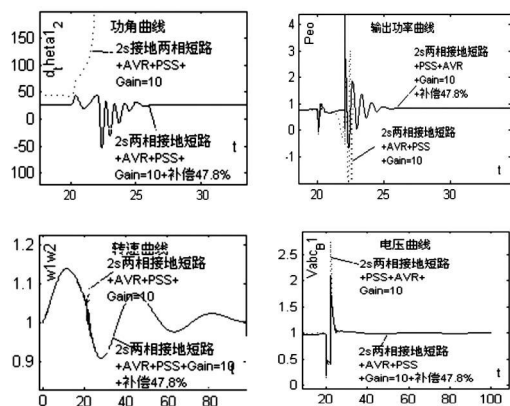


图 8 线路容性补偿仿真效果

可以看出,对 2 s 的两相接地短路这样的大扰动,即使同时加装 AVR、PSS 和 Gain=10 也不能稳定系统,当采用 47.8% 的容性补偿后,能够快速稳定系统,可见容性补偿能够大大提高系统功率极限,提高

了系统稳定性。

4 结 语

通过构建双机系统对励磁调节器 AVR、稳定器 PSS、励磁增益 Gain、串补电容等静态稳定性措施进行对比分析,观测系统稳定性参数功角曲线、电磁功率、母线电压、转速、极限功率等,得出了各种措施提高系统稳定性的影响力范围。励磁调节器虽然是现代发电系统必备设备,但是其稳定性能力较小,一般对 20% 范围内的小扰动有稳定能力;附加 PSS 后,稳定性大大提高,若扰动进一步增大,可适当提高发电机励磁电压增益 Gain;若扰动再增大,还可以采用线路串联电容进行容性补偿,以降低线路阻抗,提高系统稳定极限功率,提高抵抗扰动的能力。由此可见,实际中只要综合应用以上措施,可以大大提高系统稳定极限,抵抗更大的系统干扰,提高系统稳定性。

参考文献

- [1] 李光琦. 电力系统暂态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [2] 赵彩宏, 田立军, 邹贵彬, 等. FCL 对电力系统暂态稳定性影响的机理分析与仿真 [J]. 电力自动化设备, 2001, 21(2): 14-17.
- [3] 吴天明. MATLAB 电力系统设计与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [4] 袁宇春, 张保会. PSS 对电力系统动态及静态稳定性的影响 [J]. 中国电力, 1997, 30(12): 7-9.
- [5] 范影乐. MATLAB 仿真应用详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [6] 毛钧鑫. 提高电力系统稳定运行的措施 [J]. 电气杂志 OHM, 1994, 2.
- [7] 周兆庆. MATLAB 电力系统工具箱在电力系统机电暂态仿真中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 51-55.

(收稿日期: 2010-01-26)

(上接第 18 页)

- [12] S. H. Ling, Frank H. F. Leung, H. K. Lam, Yin-Shu Lee, Peter K. S. Tam. A Novel Genetic-A Algorithm-Based Neural Network for Short-Term Load Forecasting [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 793-799.

- [13] 梅家斌, 谢春娣. 遗传算法在神经网络权值优化中的应用 [J]. 中南民族学院学报: 自然科学版, 2001(21): 1-3.

- [14] 洪露, 马长山, 谢宗安. 基于遗传算法的神经网络权值优化 [J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2003, 32(6): 48-51.

作者简介:

刘 绚 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能及复杂网络在电力系统中的运用。

刘天琪 (1962-), 女, 博导, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。

(收稿日期: 2010-03-19)

基于近似线性规划和暂态稳定分析 的风电场穿透功率极限计算

廖 萍¹, 李兴源²

(1. 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072; 2. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 简要介绍了风力发电的现状, 指出了确定风电场穿透功率极限的重要性。提出了一种将近似线性规划与暂态稳定分析相结合的方法, 将原计算风电场容量的非线性目标约束函数作线性化, 再应用线性近似解法去逼近非线性真实解。通过暂态仿真结果与优化算法相交替的计算, 得到最终解。通过 36 节点系统进行仿真计算, 验证了该方法的有效性及其快速准确性。

关键词: 风力发电; 风电穿透极限; 近似线性规划; 暂态稳定

Abstract: The actuality of wind power generation is introduced in brief. Then the importance of wind power penetration limit is pointed out. An optimal method based on approximate linear programming and transient stability is introduced for calculating the wind farm penetration. This method gets the object function and constraint function approximately linearized firstly. Then it uses linear solution to find the accurate solution. The final solution can get from the transient simulation and optimal method. The results of 36-node system demonstrate that this method is rapid, precise and effective.

Key words: wind power generation; wind power penetration limit; approximate linear programming; transient stability

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0023-04

0 引 言

能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题。在 20 世纪的 100 年里, 世界能源消耗量增加了约 9 倍。根据国际能源机构 (IEA) 的预测, 未来 25 年里世界能源需求总量还将增加近 1 倍^[1]。因此, 对风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等可再生能源的开发利用, 是世界各国能源领域的热点问题。风是人们非常熟悉的一种自然现象, 它是因太阳加热空气, 热空气上升, 冷空气适时地补充导致空气流动而形成的, 其中蕴藏着巨大的能量。按照不同的需要, 风能可以被转换成其它不同形式的能量, 如机械能、电能、热能等。由于电能所具有的无可比拟的优越性, 将风能转换成电能, 即风力发电, 便成为人们利用风能的首选, 并在近年来得到迅速发展^[2]。

随着世界上风力发电项目数量的增加和规模的扩大, 风电规划中的问题已明显地暴露出来^[3]。大型风电场并网运行对电力系统的影响越来越明显, 大规模的风电并网运行对系统供电质量和可靠性的影响也受到更多的关注。因此, 确定一个风电场的穿透功率极限及其影响因素成为规划设计风电场时迫切

需要解决的问题^[4]。

风电场并网容量的增加会使系统电压和频率产生偏差、电压发生波动和闪变、电压稳定性受到影响等, 且系统为减小风电场发电间歇性对系统的影响而必须增加旋转备用容量, 从而使系统可靠性和经济性下降。因此计算风电场穿透功率极限非常重要, 但由于涉及的因素较多, 范围较广, 至今还没有统一的算法和公式^[5]。数值仿真方法是一种校验系统动态特性的方法, 通过比较各组数据确定穿透功率极限。带约束的优化方法则是利用优化算法对整个问题进行数学化的求解, 最终得到一个确定的值, 其不足在于没有考虑各种扰动因素的影响。通过分析现有方法的优缺点, 提出一种基于近似线性规划和暂态稳定分析的方法, 求取风电场穿透功率极限。

1 风电场穿透功率极限的基本概念

关于风电场穿透功率极限的定义有多种形式。1998 年的国际大电网会上 J. F. Christensen 等人提出的风电场穿透功率极限指系统所能接受的风电场最大容量和系统最大负荷的比值。R. A. Schlueter 等人将风电场穿透功率极限看作是系统所能接受的风电

场最大容量与系统容量的比值^[5]。考虑到中国的实际情况,将风电场穿透功率极限定义为系统能够接受的最大风电场装机容量占系统最大负荷的百分比。

风电场穿透功率极限 =

$$\frac{\text{系统能够接受的最大风电场装机容量}}{\text{系统最大负荷}} \times 100\% \quad (1)$$

2 基于近似线性规划和暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算模型

并网风电场穿透功率极限实质是在可以使用的控制手段、优化运行策略实施以后,能够保证系统的稳定水平、安全运行及电能质量不受影响的前提下,系统最多可以接受的风电功率(或容量)。如果把系统可以接受的风电功率(或容量)最大化作为目标,把影响系统稳定的电压和频率作为约束条件,那么,风电场的最大注入功率在数学意义上的实质就是最优化(或说最大化)问题。

根据线性规划理论,可以得到数学模型为^[6]

$$\begin{aligned} \max F(w) &= w \\ \text{s.t. } u_{\min} &\leq u(w) \leq u_{\max} \\ f_{\min} &\leq f(w) \leq f_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, w 为风电场容量; $u(w)$ 为系统节点电压标么值; $f(w)$ 为系统频率标么值; $u_{\min}$ 、 $f_{\min}$ 、 $u_{\max}$ 、 $f_{\max}$ 分别为系统电压和频率的极限值。

考虑到系统在一定的运行方式下,风电场容量的增加会导致系统暂态变化加大。也就是说,系统在极端的运行方式下,随着风电场容量的逐渐增加,系统电压和频率的暂态值会越升越高或越降越低,二者的变化方向是一致的。基于上述分析,可以将式(2)做如下变换。

$$\begin{aligned} \max F(w) &= X_u(w) + X_f(w) \\ \text{s.t. } X_u(w) &= \left| \frac{u_n(0) - u_n(w)}{u_n(0) - u_0} \right| \leq 1 \\ X_f(w) &= \left| \frac{f_n(0) - f_n(w)}{f_n(0) - f} \right| \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, w 为风电场容量。若系统节点电压值随风电场容量增加而升高,则令 u_n 为系统节点电压最大值, u_0 为系统节点电压上限值;反之, u_n 为系统节点电压最小值, u_0 为系统节点电压下限值。 f_n 、 f 定义同上。 $X_u(w)$ 、 $X_f(w)$ 表示系统电压、频率能越限的程度,当其值为 1 时,相应的电压或频率达到约束条件的边界值。当风电场容量增加时,系统电压和频率的暂态值

偏移加大, $X_u(w)$ 、 $X_f(w)$ 单调递增,它们的和 $F(w)$ 为一单调递增函数。在满足稳定约束条件下,当风电场容量达到穿透功率极限时, $F(w)$ 值最大。

假设风电场最大容量有一近似值 $w^{(k)}$,在 $w^{(k)}$ 处将 $F(w)$ 、 $X_u(w)$ 和 $X_f(w)$ 作线性展开

$$\begin{aligned} F(w) &\approx F(w^{(k)}) + (w - w^{(k)}) \nabla F(w^{(k)}) \\ X_u(w) &\approx X_u(w^{(k)}) + (w - w^{(k)}) \nabla X_u(w^{(k)}) \\ X_f(w) &\approx X_f(w^{(k)}) + (w - w^{(k)}) \nabla X_f(w^{(k)}) \end{aligned} \quad (4)$$

上式中的 $F(w)$ 、 $X_u(w)$ 和 $X_f(w)$ 的一阶导数可分别用下式近似得

$$\begin{aligned} \nabla F(w^{(k)}) &= \frac{F(w^{(k)}) - F(w^{(k-1)})}{w^{(k)} - w^{(k-1)}} \\ \nabla X_u(w^{(k)}) &= \frac{X_u(w^{(k)}) - X_u(w^{(k-1)})}{w^{(k)} - w^{(k-1)}} \\ \nabla X_f(w^{(k)}) &= \frac{X_f(w^{(k)}) - X_f(w^{(k-1)})}{w^{(k)} - w^{(k-1)}} \end{aligned} \quad (5)$$

将公式(4)、(5)代入公式(3),整理后得到式(3)的近似线性规划为

$$\begin{cases} \max w \nabla F(w^{(k)}) + F(w^{(k)}) - w^{(k)} \nabla F(w^{(k)}) \\ w \leq \min(w_u^{(k)}, w_f^{(k)}) \\ w_u^{(k)} = w_u^{(k)} + \frac{1 - X_u(w^{(k)})}{\nabla X_u(w^{(k)})} \\ w_f^{(k)} = w_f^{(k)} + \frac{1 - X_f(w^{(k)})}{\nabla X_f(w^{(k)})} \end{cases} \quad (6)$$

经近似线性变化后的目标函数为 w 的一次线性函数,其满足约束条件的近似解为

$$w^{(k+1)} = \min(w_u^{(k)}, w_f^{(k)}) \quad (7)$$

将电力系统暂态稳定分析与近似线性规划算法相结合,对系统在某种运行方式下系统受到扰动后的风电场最大容量的求取步骤如下。

1)系统未接入风电场时,对系统运行仿真,求得 $u_n(0)$ 、 $f_n(0)$,且 $X_u(0) = X_f(0) = 0$ 。假设风电场最大容量近似解为 $w^{(1)}$ ($w^{(1)}$ 的值取一般为系统总负荷的 5%);

2)系统接入风电场后,在某种扰动下,对系统进行暂态稳定分析,得到 $u_n(w^{(k)})$ 、 $f_n(w^{(k)})$,通过式(3)到(7)求得 $X_u(w^{(k)})$ 、 $X_f(w^{(k)})$ 和 $w^{(k+1)}$;

3)若 $X_u(w^{(k)}) > 1$ 或 $X_f(w^{(k)}) > 1$,则令

$$\begin{cases} w^{(k+1)} = \frac{w^{(k)} + w^{(k+1)}}{2} \\ \Delta w^{(k)} = w^{(k+1)} - w^{(k)} \\ X_u(w^{(k)}) = X_u(w^{(k-1)}) \\ X_f(w^{(k)}) = X_f(w^{(k-1)}) \end{cases} \quad (8)$$

如果 $\Delta w^{(k)} < 1 \text{ MW}$, 停止迭代, 取上次迭代计算结果 $w^{(k)}$ 为最终解;

4) 如果 $X_u(w^{(k)}) = 1$ 且 $X_f(w^{(k)}) < 1$, 或 $X_f(w^{(k)}) = 1$ 且 $X_u(w^{(k)}) < 1$, 则 $w^{(k)}$ 为最终解;

5) 重复步骤 2)~4), 直到求得最终解。

3 算例分析

基于上述给出的模型和算法, 采用 EPRI-36 节点系统作为算例进行验证, 系统主接线图如图 1 所示。该系统除风电场外其余发电机发出的总有功率为 2 645 MW, 系统最大负荷为 2 568 MW, 功率基值为 100 MVA。在算例系统中, 风电场通过节点 33 接入系统, 假设风电场的初始容量占总负荷的 5% 左右, 即设风电场初始容量为 125 MW。

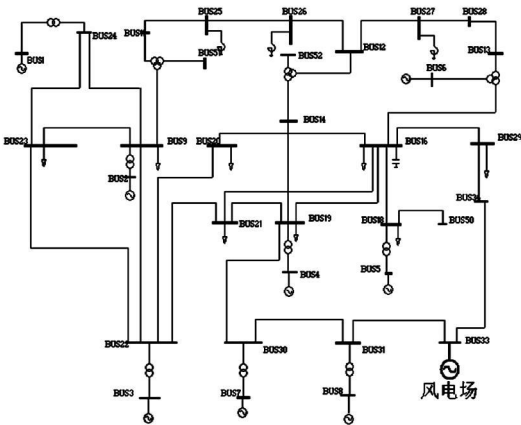


图 1 EPRI-36 节点系统主接线图

对系统而言, 在以下三种扰动方式下风电场的并网运行对系统运行的冲击最大, 只要在这三种暂态情况下能够保证系统稳定, 就可以保证系统在其他方式下也能稳定运行^[7]。

- (1) N-1 故障。风电场由于故障与电网解列。
- (2) 风速扰动 1。风速在短时间内由停机风速上升至额定风速。
- (3) 风速扰动 2。风速在短时间内由额定风速下降至停机风速。

稳定判据:

(1) 对于系统发生故障的情况, 稳定判据为系统中发电机最大功角差第一摆和第二摆衰减振荡, 中枢节点电压恢复稳定。

(2) 风电场正常运行时风速是波动的, 因此系统各节点电压和频率也随之波动。当各节点暂态电压标幺值不低于 0.95, 不高于 1.1, 频率偏差在 ± 0.2

Hz 内时, 则为稳定运行。

计算工具采用电力系统分析综合程序 (PSASP), 风电场模型用 UD (用户自定义模型) 进行建模。将暂态稳定分析结果与近似线性规划算法求得的结果相结合, 通过仿真、分析、修正, 求得满足一定稳定约束的风电场容量的最大值, 进而得到风电场穿透功率极限。

(1) N-1 故障。在风电场运行时, 由于故障导致风电场与系统解列。故障时间为 1~10 s。在此种方式下的暂态稳定分析结果和优化结果如表 1 所示。

表 1 故障运行方式下的计算结果

仿真次数 /k	风电场容量 /MW	节点电压最小值 /p.u	系统频率最小值 /p.u	X_u	X_f	风电场容量修正值 /MW
0	0	0.978 88	1	0	0	125
1	125	0.967 11	0.997 42	0.407 5	0.645 0	193.8
2	193.8	0.961 42	0.996 73	0.604 6	0.817 5	266.51
3	266.51	0.957 85	0.996 27	0.728 2	0.932 5	309.23
4	308.33	0.956 46	0.996 07	0.776 3	0.982 5	324.745
5	322.74	0.955 60	0.996 03	0.805 4	0.992 5	335.81
6	337.15	0.955 10	0.996 00	0.822 2	1	

(2) 风速扰动 1。考虑到风速的扰动, 最极端的情况使风速在短时间内 (10 s), 由停机风速增至额定风速。此种方式下暂态稳定分析结果及优化结果如表 2 所示。

表 2 风速扰动 1 下的计算结果

仿真次数 /k	风电场容量 /MW	节点电压最大值 /p.u	系统频率最大值 /p.u	X_u	X_f	风电场容量修正值 /MW
0	0	1.039 10	1	0	0	125
1	125	1.051 30	1.002 55	0.200 3	0.637 5	196.08
2	196.08	1.052 70	1.003 74	0.223 3	0.935 0	211.61
3	211.61	1.052 90	1.003 93	0.226 6	0.982 5	213.88
4	217.79	1.052 96	1.003 96	0.233 1	0.99	216.90
5	225.93	1.053 73	1.004	0.240 3	1	

(3) 风速扰动 2。考虑到风速的扰动, 最极端的情况使风速在短时间内 (10 s), 由额定风速降至停机风速。此种方式下暂态稳定分析结果及优化结果如表 3 所示。

综合上述三种扰动方式下的暂态稳定分析结果及优化结果知, 当风电场通过节点 33 接入系统时, 风电场的最大容量为 216.90 MW。由式 (1) 得风电场穿透功率极限值为 8.5%。

将风电场分别通过节点 23、24、29 接入系统, 暂态稳定分析结果及优化结果如表 4 所示。

表 3 风速扰动 1 下的计算结果

仿真 次数 /K	风电 场容 量 /MW	节点电 压最小 值 /p u	系统频 率最小 值 /p u	X_u	X_f	风电场 容量修 正值 /MW
0	0	0.978 88	1	0	0	125
1	125	0.966 67	0.997 84	0.422 8	0.540 0	231.48
2	231.48	0.965 19	0.996 86	0.474 0	0.785 0	324.92
3	324.92	0.960 44	0.996 38	0.638 5	0.905 5	398.18
4	398.18	0.954 00	0.996 09	0.857 7	0.977 5	421.07
5	421.07	0.953 30	0.996 05	0.883 2	0.987 5	421.10
6	421.10	0.9528 0	0.996 00	0.900 6	1	

表 4 不同系统接入点的计算结果

风电场 接入节点	风电场容量 /MW			仿真迭 代次数	风电场穿 透功率极限
	故障运行	风速扰动	风速扰动 2		
23	142.78	237.65	221.09	5	5.56%
24	298.75	221.88	330.91	6	8.64%
29	229.32	323.48	401.09	5	8.93%

4 风电场穿透功率极限影响因素分析

通过上述三种方式的暂态仿真结果可以看出,在第 1、3 种扰动方式下,系统因失去大量有功功率,导致系统节点电压、频率降低;在第 2 种扰动方式下,系统因短时间内有功功率激增,导致系统节点电压、频率上升。通过优化计算可知,电压、频率上升的幅度,直接影响了风电场容量的值。因此,电压和频率对风电场穿透功率极限值有较大影响。

同时,在系统中风电场容量达到穿透功率极限时,多数情况下是系统的频率偏差达到界限。说明,系统频率的偏差是决定风电场穿透功率极限的主要因素。所以,为了能够充分利用风能,增加风电场容量,就需要采取措施,平缓风电场输出功率的变化,减小频率的波动。

当风电场接入节点选择不同时,风电场的最大容量也是不同的。由表 1~4 可以看出,当风电场接入系统节点离发电厂越近时,它的穿透功率极限越小。反之,越大。因此,风电场穿透功率极限与系统的网络结构也密切相关。

5 结 论

通过对常用两种求取风电场穿透功率极限方法

的分析,提出了一种基于近似线性规划和暂态稳定分析相结合的风电场穿透功率极限计算方法。将近似线性规划法与暂态稳定分析相结合,充分考虑了三种极端扰动方式下系统的风电场可接入容量。这种方法本质上是一种仿真、分析、修正交替进行的方法,避免了单纯暂态稳定分析繁琐的仿真过程,能够对每次风电场的取值进行精确的定位,从而能在较短的时间内得到满意的结果,并且保证了结果的最优性。

应用 PSASP 中自带的 EPRI-36 节点系统对该方法进行了验证,并对仿真优化结果进行了分析,总结了影响风电场穿透功率极限的几方面因素。

参考文献

[1] 龚钟明.从世界能源发展趋势探索未来中国能源战略(上)[J].能源战略,2005,25(3):33—36.
[2] 杨秀媛,梁贵书.风力发电的发展及其市场前景[J].电网技术,2003,27(7):78—79.
[3] 陈树勇,戴慧珠,白晓民,等.风电场的发电可靠性模型及其应用[J].中国电机工程学报,2000,20(3):26—29.
[4] 陈树勇,申洪,张洋,等.基于遗传算法的风电场无功偿及控制方法的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(8):1—6.
[5] Schlueter R A, Park G. A Modified Unit Commitment and Generation Control for Utilities with Large Wind Generation Penetrations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems 1985, 104(7): 1630—1636.
[6] 郑国强,鲍海,陈树勇.基于近似线性规划的风电场穿透功率极限优化的改进算法[J].中国电机工程学报,2004,24(10):68—71.
[7] 申洪,梁军,戴慧珠.基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J].电网技术,2002,26(8):8—11.

作者简介:

廖 萍 (1982—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制。

李兴源 (1945—),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE 高级会员,从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作。

(收稿日期:2010—03—29)

空载热备用输电线路电能计量分析

熊晓岚¹, 李琦²

(1 自贡电业局客户服务中心, 四川 自贡 643000; 2 自贡电业局大安供电局, 四川 大安 643010)

摘 要:在中性点直接接地系统中的空载热备用线路, 对其计量电表进行分析, 由于输电线路相对地、相相之间存在分布电容, 会形成容性充电电流, 通过 TA、TV 及 TV 二次回路传递到电能表进行计量时相位发生了偏移, 造成有功电能反计。

关键词:电容电流; 电能表; 互感器; 相位

Abstract: The measuring kilowatt-hourmeter of no-loaded standby heat lines in neutral point directly earthed system is analyzed. Because of distributed capacitance between phase to ground and phase to phase of transmission line, the capacitive charging current would come into being and its phase will deviate when it is measured in kilowatt-hourmeter through current transformer, potential transformer and secondary circuit of potential transformer, which causes that the active power is measured incorrectly.

Key words: capacitance current; kilowatt-hourmeter; transformer; phase

中图分类号: TM933 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0027-03

近年来随着电子式多功能电表的普遍推广使用, 大大地提高了电力企业贸易结算计量表计的准确度。电子式多功能电表相比传统的电磁感应式机械表, 除了在准确等级上差别较大外, 它还具有一表多用的特点, 能精确地计量正、反向有功、四象限无功、最大需量等数值。但在实际电能计量工作中, 多次在现场工作中发现当 35 kV 及以上线路空载热备用运行时, 该线路安装的多功能电子式电能表存在着计量反向有功电量的现象, 由于该部分电量存在, 特别对于专线客户计量点出现的有功反向电量, 供用双方对此电量的争议也较大。现结合具体案例, 分析原因。

1 现场案例

某电业局 A 变电站 35 kV 321 开关出线是该局供 B 厂的 35 kV 专用供电线路, 线路全长 18.27 km。B 厂作为该电业局的售电大户, 每月电量在 10 000 MW·h 左右, 供电方式采用 35 kV 双回路供电。该专线做为其备用电源, 线路长期处于热备用运行状态。该计量点安装的是红相公司 MK6 型三相四线电子式电能表, 计量人员在现场校表时发现, 当 A 变电站侧 321 开关合闸运行、B 厂降压站侧开关处于断开时, 该计量点电能表计量着反向的有功电量。上述线

路已累计的有功电量达数万 kWh。B 厂就此部分电量提出异议, 要求供电方按反向有功电量退还其电量电费。经供电方向客户做出解释后, 客户表示认可, 并表示不再要求退还其电量电费。

2 反向电能量产生的原因

由电能表的原理可知, 有功电能表反计电能的可能性有以下几种情况。

① 电能潮流方向发生改变。

② 电能表的接线有误。

③ 大型电动机超速运行变为发电机。

④ 在三相三线装置中, 当功率因素低于 0.5, 且 A 相电流远大于 C 相电流时会出现反计有功电能。

首先经过技术人员的认真检查, 确认电能表接线正确无误, 且客户方也不存在大型电动机超速运行变为发电机的情况, 另外由于是三相四线计量回路, 也不存在出现④点中提的情况。那么出现有功电能反计的原因则确认为电能潮流方向的改变。

为搞清情况, 技术人员利用电能表现场校验仪对现场实际电流、电压、有功功率、无功功率、相角等进行测量 (现场相量图如图 1 所示), 测量结果显示该电能表三相电流均为 100 mA 左右, $\cos\varphi = -0.015$,

即 $\varphi = -91^\circ$, $P = 3UI\cos\varphi$, $Q = 3U\sin\varphi$, 容性负载, 无功功率远大于有功功率, 电表实际运行的相电流超前该相电压大于 90° (其值约为 91° 左右)。从理论中可知即使是一个纯容元件在理想情况下, 流过该元件中的电流也只可能超前电压 90° 。而这出现的大于 90° 的角度从何而来的呢?

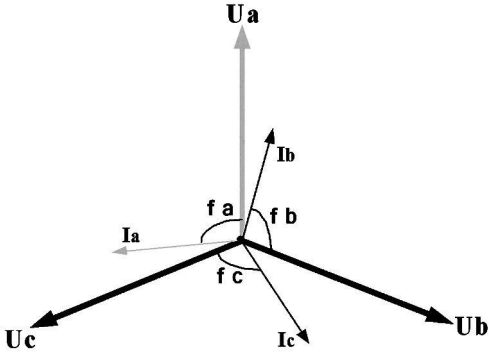


图 1 B 厂计量电能表现场相量图

技术人员对线路电流进行了分析。因该线路是空载热备用运行, 所以其产生的电流应为电力架空线路对地及架空线路间、相与相之间的电容电流, 其电流方向应为线路侧对地 (见图 2), 又因为相地之间的电容比相与相间的电容要大得多, 若忽略相与相间的电容电流的影响, 只考虑线路对地电容电流, 可得出其值可按式进行估算。

$$I_C = (2.7 \sim 3.3)UL \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中, U 为线路的额定电压 (kV); L 为线路长度 (km)。由于该专线有架空地线所以系数取 3.3 可算出单相对地电容电流 $I_c = 3.3 \times 35 \times 18.27 \times 10^{-3} = 21.1 \text{ A}$, 该线路 TA 变比为 1000/5 A, 折算到二次约为 105 mA, 与现场校验仪所测值基本一致。

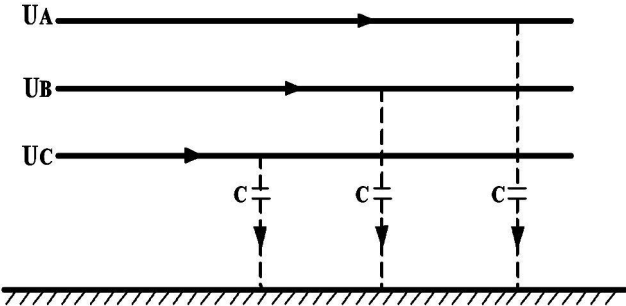


图 2 电流方向

初步判断, 由于空载热备用线路在电压作用下存在容性充电电流是客观存在的, 其值大小与电压等级及线路长度成正比, 在理论上即使是纯容性电流也只会引起无功计量, 有功电能应为零, 且由于纯容性元件并不存在, 所以此时其有功电量应为微小的正

值。但由于电能计量用电压、电流分别取自母线电压和线路电流, 电网的一次电压、电流通过电压互感器、电流互感器感应到二次侧, 再通过二次回路到电能表进行计量, 由于受电压互感器、电流互感器、电能表本身原因及二次回路压降的影响在传递电流、电压过程中可能会产生相位误差, 出现大于 90° 的角度, 造成有功电能计量在反向侧。

检定人员在实验室里对电能表进行试验, 并模拟现场电流负载情况 (通常只有几十毫安, 电流大小与该线路长短成正比), 对现阶段四川电网普遍采用的电子式电能表 (试验室做试验用表为红相公司生产的 K3 和 K6 型号的电能表) 的情况进行试验, 结果证实了红相表在相角上的测量误差很小, 即使在功率因数很低的时候其相角误差也基本为零。

3 原因确定

电能表的原因被否定了, 最后问题被锁定到了电流互感器和电压互感器身上, 互感器角差大小主要受 TA、TV 本身及 TV 二次回路的影响。

由于激磁电流和绕组阻抗的存在, 电流互感器二次电流与一次电流间也会产生相位偏移, 空载时其角差的大小和正负由空载电流的大小和性质决定, 当一次电流较小时, 由于此时空载电流所占比例较大, 电流互感器的角差将向正方向增大 (电流互感器二次电流相量反向后超前一次电流相量相位时角差为正, 滞后时为负), 查阅互感器有关技术资料, 可以看出 TA 相位差随电流变化的曲线十分陡峭, 当一次电流很小时, 二次电流超前一次电流的相位差可能大于 2° 。

由于激磁电流和绕组阻抗的存在, 电压互感器二次电压与一次电压间会产生相位偏移, 其相角差的大小与正负受电压变化、二次负载及功率因数的影响 (电压互感器二次电压反向后超前一次电压时相位时角差为正, 滞后一次电压时相位时角差为负)。因电压互感器工作电压取自母线电压, 角差受电压变化影响不大。由于该计量装置安装于变电站侧, 其 TV 二次出线端与电能表间连有较长导线, TV 二次负载电流流过导线时会产生电压降, 造成电能表端电压与 TV 二次出口电压产生相位偏移, 其值大小与二次回路负载的功率因数和接线方式有关。对于电能表而言, 这因部分引起的误差有时要比 TV 本身的误差大得多。

将以上理论结合现场情况,可以看出,因线路空载时一次电流很小,将会使计量用电流互感器相角误差朝正方向发展,且值较大,这是造成电表反计的主要原因。TV 二次回路过长,会使其二次压降增大,二次压降引起的二次电压相角误差也会引起计量表端电压相位的偏差,以上 2 点原因的合成相角误差,最终造成了电表端电流超前电压超过 90° ,导致有功电能表将电量计于反向。

综合以上分析,计算反向有功功率。由于 TA、TV 及 TV 二次回路压降对电能表电流、电压相位的影响,使该线路一次侧有功功率与表计所计二次功率不一致。结合图 1 及公式 1 对该线路在热备用时三相四线多功能电能表有功功率表达式进行推导:

$$P = I_a U_a \cos \varphi_a + I_b U_b \cos \varphi_b + I_c U_c \cos \varphi_c \quad (2)$$

由于此时电流超前电压 91° $I_a = I_b = I_c = 100 \text{ mA}$, $U_a = U_b = U_c = 100 \text{ V}$

所以其有功功率 $P = -0.017 \times 100 \times 100 \text{ mA} = -0.17 \text{ kW}$ 。

4 结论与建议

4.1 结论

输电线路空载热备用运行时,由于线路对地及相间分布电容引起的容性充电电流是客观存在的,电容电流的大小与线路长度成正比,又因电流互感器、电压互感器及电压互感器二次回路对电能表电流、电压相位的影响,会造成合闸侧电能表有功计量,计量的正向或反向与相位差相关。

当线路带负载运行时,由于线路两端均合闸,与负荷电流相比,电容电流占的比例很小,并同时向两端流入,通过电流互感器感应到二次侧,分别记入两端的电能表中。空载热备用状态下,线路只有容性充电电流,流入合闸一侧,有功电能表计量,引起了计量争议。

针对于不存在的 35 kV 及以上专线供电用户,电

能表反向的有功电量会使部分客户误解,部分客户会以此为依据要求供电企业退还该部分电量电费(若按举例的这条专线计算,按现行的平水期、平段大工业电价计算,这部分电量电费将达数万元)。但产生该部分损耗电量的原因是因为客户方需要保证双电源供电的要求所造成的,所以这部分“反向”电量供电企业无义务来承担。

4.2 建议解决的办法

要减小有功电能计量必须减小合成相位差,通过配置 0.2S 级电流互感器减小小电流情况下相位误差值,同时减小 TV 二次回路负载,提高二次负载功率因数也能减小相位差。

对于 35 kV 及以上的专线用户(不含上网用户),建议采取技术手段,屏蔽多功能电表反向有功电量记录,避免误抄后带来的争议。

对于 35 kV 及以上线路中的关口表及有并网电厂的专线客户,建议电力调度部门及线路两侧供用电双方变电站运行人员,记录好线路空载热备用运行时的起止电量、功率因数、时间等相关数据,并在电量结算时将这部分电量剔除。

参考文献

- [1] 赵修民. 测量用互感器 [M]. 北京:机械工业出版社, 1986.
- [2] 钟新华. 配电网电容电流估算公式的修正 [J]. 供用电, 2004, (1): 32—34.
- [3] 伍叶凯, 邹车霞. 电容电流对差动保护的影响及补偿方案 [J]. 继电器, 1997, 25(4): 4—8.
- [4] 能源部电力司组编. 电能计量录象教材配套讲义 [Z]. 1990.

作者简介:

李 琦 (1981—)男,自贡电业局大安供电局营销科,助理工程师,用电检查管理专责。

熊晓岚 (1981—)女,自贡电业局客户服务中心,助理工程师,大客户经理。

(收稿日期: 2010—05—13)

(上接第 14 页)

- [3] 周伟涛,刘会金,等. 10 kV 配电网基波无功负序综合补偿装置的研制 [J]. 电力建设, 2003, 24(3): 52—55.
- [4] 彭辉,黄亦农. 配电网中三相不平衡负荷补偿 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1): 32—34.
- [5] Fan Ruixiang, Zhou Lawu, Xiao Hongxia. The Reactive Power and Negative Sequence Compensation Algorithm of

SVC Based on Instantaneous Value [J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(4): 247—252.

作者简介:

林 峰,男,浙江缙云人,工程师,主要从事电网调度自动化工作及无功补偿研究。

(收稿日期: 2009—11—09)

不受波速和噪声影响的雷击定位模式识别法

唐启红¹, 汪 颖^{1,2}, 肖先勇^{1,2}

(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 成都 610065)

摘 要: 基于行波传输理论, 提出了不受噪声和波速影响的雷击定位模式识别新方法。按实际中经常出现的故障性和非故障性雷击, 将雷击分为故障性与非故障性两种模式, 并利用采集到的故障波形的首波头、故障点反射波和对端母线透射波 3 波头间关联关系建立隶属度函数与定位公式。对含噪声的行波信号经小波变换得到含噪声出现时刻的 n 个波达时刻, 对其种组合计算两种模式的隶属度, 然后以隶属度最小对应模式的定位公式计算雷击点位置, 输出雷击模式。对某 500 kV 输电系统的仿真结果证明, 所提出的方法定位精度高, 不受波速和噪声影响。

关键词: 雷击定位; 小波变换; 模式识别; 隶属度函数; 隶属度; 波速; 噪声干扰

Abstract: According to the traveling wave theory, a lightning stroke location method based on wavelet transform and pattern recognition is proposed. First of all, the lightning strokes are divided into two modes, that is, faulty lightning and non-faulty lightning. The membership functions and lightning stroke location formulas of these two modes are established based on association relation of the initial traveling wave head and wave head reflected from lightning stroke point and remote bus. Then the wavelet transform is used to analyze the traveling wave current signal which contains noises, and the one-to-one corresponding relationship between wavelet transform modulus maxima and the catastrophe point of traveling wave signal is used to obtain the traveling wave arrival time, which is used to calculate the membership degree of the two modes. Finally, based on location formula of the mode which has the minimum membership degree, the position of lightning stroke on transmission line is calculated. The result of location is not affected by noise interference and the uncertainty of wave velocity.

Key words: lightning stroke location; wavelet transform; pattern recognition; membership function; membership; wave velocity; noise interference

中图分类号: TM866 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0033-05

0 前 言

超、特高压输电线路距离长、分布广, 跨越地理环境复杂, 易受雷击影响。按强度不同, 雷电可分为故障性雷击和非故障性雷击, 一方面, 故障性雷击将引起绝缘闪络导致线路故障跳闸, 运行资料表明, 线路跳闸多数是由雷击所引起, 是线路故障的主要原因之一^[1]; 另一方面, 非故障性雷击干扰可能引起线路保护误动作造成线路非故障性跳闸, 对电力系统造成不必要的损失。无论故障性或非故障性雷击势必都会影响到电力系统的正常运行, 对经济生活造成损失。雷击的快速准确定位, 找到雷击点, 是加快恢复供电, 减少停电损失的重要途径, 但现有定位法易受行波波速和噪声等多种因素影响, 因此迫切需要对此开展深入研究。

国内外对行波测距理论及应用已做了大量研究,

其中, 准确捕捉行波波头到达时刻 (以下简称波达时刻) 是关键。小波变换具有一定时频分辨率, 能分析信号局部化特征, 适合于检测行波波头这样的突变信号^[2], 通过小波变换可提高故障定位准确度和可靠性^[3-5]。

采集到的行波信号往往含有噪声, 需进行消噪, 但消噪方法均难以做到真实信号不丢失而噪声完全消除^[6], 未被消除的噪声干扰将影响定位正确性。

噪声干扰^[7]、波头识别 (故障点反射波头与对端母线透射波头的识别)^[8-9]以及波速^[9-10]是影响定位准确性的重要因素, 但现有文献大多并未对这三个因素全面考虑, 尤其对噪声干扰考虑较少。如文献^[9-10]提出了不受波速影响的测距方法, 但均未考虑噪声干扰的影响。文献^[9]利用小波变换模极大值幅值和极性进行波头识别, 也可能因噪声干扰而出错。文献^[7]提出了故障定位的模式识别法, 但其噪声是在行波经小波变换后人为加入的脉冲, 带有一定

主观性,且其定义的模式繁多,模式一与模式四(或模式二与模式三)定义的隶属度为同一函数,定位精度同样受波速影响。因此,从满足工程实用化要求的角度,需要研究一种综合考虑噪声、波速及波头识别等多种因素的定位方法。

因此,基于文献 [7] 模式识别的思想,提出了雷击单端定位的改进模式识别方法。该方法考虑了噪声干扰影响,避免了利用波速进行定位,无需单独算法进行波头识别。根据雷击是否造成故障,将雷击定义为两种模式:模式一,故障性雷击;模式二,非故障性雷击;选取能列写波速和定位距离为求解变量的两组独立方程的 3 个波头的波达时刻,根据三者间行波传输关联关系建立两种模式的隶属度函数与定位公式。利用隶属函数可进行波头识别,无需额外算法;定位公式为只含波达时刻与线路总长的函数,定位结果不受波速影响。对检测到的含噪声行波信号进行小波变换,得到含噪声干扰出现时刻的 n 个波达时刻数据,将其种组合输入模式识别程序,求取每种组合对于两种模式的隶属度,最后以隶属度最小对应模式的定位公式确定雷击点,含噪声的组合则因不满足行波传输理论隶属度较大被排除。

1 信号的小波奇异性检测及消噪

若信号(函数)在某处间断或某阶导数不连续,则称该信号在此处有奇异性。用小波法分析信号奇异性需引入小波变换模极大值点同信号突变点之间的关系。

定义:在某尺度 a_0 下,若存在点 (a_0, b_0) 使得
$$\frac{\partial W_f(a_0, b_0)}{\partial b} = 0 \tag{1}$$
 则称点 (a_0, b_0) 为局部极值点,且 $\frac{\partial W_f(a_0, b_0)}{\partial b}$ 在 $b=b_0$ 上有一过零点。如果对 b_0 的某一邻域内任意点 b 有 $|W_f(a_0, b)| \leq |W_f(a_0, b_0)|$ 则称 (a_0, b_0) 为小波变换的模极大值点。

当小波函数看作某一平滑函数的一阶导数时,信号小波变换模局部极大值点对应于信号突变点,模极大值点与信号突变点一一对应。输电线路遭受雷击产生的暂态行波信号具有明显的奇异性,包含有雷击点的信息,因此可用雷击后暂态行波小波变换模极大值,实现雷击点的准确定位。根据检测信号奇异性的

特点,采用了 Biorthogonal 双正交小波 [5] 对其进行分析。

利用小波变换第 1 层分解的细节系数经小波阈值消噪,并适当降低阈值,允许少量噪声干扰存在,以保证真实行波信号不丢失。然后利用消噪后得到的包含噪声干扰出现时刻的波达时刻数据进行雷击定位。

2 模式识别雷击定位原理

为列写两组独立方程解得不受波速影响的定位公式,则选用首波头、雷击故障点反射波头和对端母线透射波头 3 个波头的波达时刻进行雷击定位。但雷击未造成故障时不存在故障点反射波,雷击定位利用首波头和 2 个对端母线透射波头。

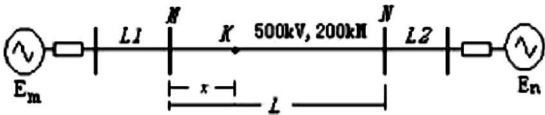


图 1 500 kV 仿真系统模型

设 L 为遭受雷击的线路长度, M 、 N 为两端母线,如图 1,行波传播速度为 v 当雷击发生在距 M 端 x km 的 K 处,按到达时刻先后,在 M 端检测到的上述三个波头到达时刻依次记为 t_m 、 t_m 和 t_m 。不同的雷击模式 and 对应不同的行波传输路径,据此建立两种模式的隶属度函数,实现雷击的模式识别定位。

模式一:故障性雷击

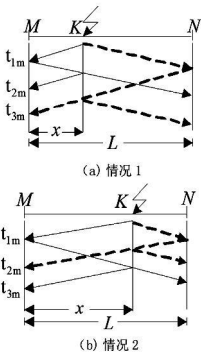


图 2 模式一行波网络图

情况一:当 $0 \leq x \leq L/2$ 时, t_m 、 t_m 和 t_m 分别对应首波头、故障点反射波头和对端母线透射波头,行波网络图如图 2(a)。根据行波传输理论,有
$$\begin{cases} v(t_m - t_m) = 2x_1 \\ v(t_m - t_m) = 2(L - x_2) \end{cases} \quad x_1, x_2 \in [0, L/2] \tag{2}$$
 情况二:当 $L/2 < x \leq L$ 时, t_m 、 t_m 和 t_m 分别对应

首波头、对端母线透射波头和故障点反射波头, 行波网络图如图 2(b)。根据行波传输理论, 有

$$\begin{cases} v(t_m - t_m) = 2(L - x_1) \\ v(t_m - t_m) = 2x_2 \end{cases} \quad x_1, x_2 \in [L/2, L] \quad (3)$$

令 $\mu(x) = |x_2 - x_1|$ 将式 (2)、(3) 代入 $\mu(x)$ 可知, 情况一和情况二求得的 $\mu(x)$ 相等。因此定义模式一的隶属度函数为

$$\mu(x) = |x_2 - x_1| \quad (4)$$

其中 x_1, x_2 满足

$$\begin{cases} v(t_m - t_m) = 2x_1 \\ v(t_m - t_m) = 2(L - x_2) \end{cases} \quad x_1, x_2 \in [0, L] \quad (5)$$

但仅利用式 (4)、(5) 无法确定雷击发生在距离 M 端的 x 或 $L - x$ 处, 这是因为利用式 (4)、(5) 定义的隶属度函数 $\mu(x)$ 无法识别故障点反射波和对端母线透射波的缘故, 因此引入 $\mu'(x)$ 对模式一的两种情况进行识别。

情况一: 根据图 2 有

$$v(t_m + \frac{t_m - t_m}{2}) = 2L \quad (6)$$

定义隶属度函数为

$$\mu'(x) = \left| v(t_m + \frac{t_m - t_m}{2}) - 2L \right| \quad (7)$$

情况二: 根据图 3 可得

$$v(t_m + \frac{t_m - t_m}{2}) = 2L \quad (8)$$

定义隶属度函数

$$\mu'(x) = \left| v(t_m + \frac{t_m - t_m}{2}) - 2L \right| \quad (9)$$

模式二: 非故障性雷击

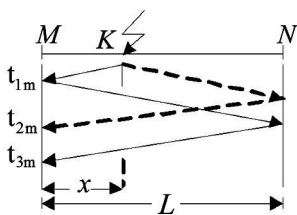


图 3 模式二行波网络图

根据图 3 可得

$$\begin{cases} v(t_m - t_m) = 2(L - x_1) \\ v(t_m - t_m) = 2x_2 \end{cases} \quad x_1, x_2 \in [0, L] \quad (10)$$

定义其隶属度函数为

$$\mu(x) = |x_2 - x_1| \quad (11)$$

假设雷击后, M 端检测到 $n(n \geq 3)$ 个波头, 波达

时刻依次记为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 其中可能含有干扰波头 (当 $n > 3$ 时, 除定义的模式一和模式二定位利用的三个波头, 其余波头皆视为干扰波头, 包括噪声干扰和无用波头), 它们有 C_n^3 种组合。对每种组合计算两种模式的隶属度 $\mu(x)$, 找出所有 C_n^3 种组合中隶属度最小的组合, 应用隶属度 $\mu(x)$ 最小的组合对应模式的雷击定位公式计算雷击点位置, 并输出该组合及对应的模式。若隶属度 $\mu(x)$ 最小的为模式一, 则应利用隶属度 $\mu'(x)$ 对模式一的两种情况进行识别, 应用隶属度 $\mu'(x)$ 最小对应的定位公式计算雷击点位置。定位公式如下。

模式一情况一, 令 $x_2 = x_1 = x$ 代入式 (2) 解得, 雷击点距离 M 端的距离

$$x = \frac{(t_m - t_m)L}{t_m + t_m - 2t_m} \quad (12)$$

行波波速

$$v = \frac{2L}{t_m + t_m - 2t_m} \quad (13)$$

模式一情况二, 令 $x_2 = x_1 = x$ 代入式 (3) 解得, 雷击点距离 M 端的距离

$$x = \frac{(t_m - t_m)L}{t_m + t_m - 2t_m} \quad (14)$$

行波波速

$$v = \frac{2L}{t_m + t_m - 2t_m} \quad (15)$$

模式二, 令 $x_2 = x_1 = x$ 代入式 (10) 解得, 雷击点距离 M 端的距离

$$x = \frac{(t_m - t_m)L}{t_m + t_m} \quad (16)$$

行波波速

$$v = \frac{2L}{t_m - t_m} \quad (17)$$

计算雷击点位置的式 (12)、(14) 和 (16) 均不含波速 v 因此该方法定位精度不受波速影响。

3 模式识别雷击定位步骤

为验证该方法的有效性, 在行波信号中加入了噪声。含噪声的行波信号小波变换第 1 层分解的细节系数经小波阈值消噪后各局部模极大值反映了雷击行波的波达时刻, 也包含噪声干扰。将含噪声出现时刻的波达时刻数据输入模式识别程序进行雷击点定位, 其步骤如下。

步骤 1: 设置行波波速初始值 v_0 和迭代次数 k

步骤 2: 运用式 (4) 和 (5)、(10) 和 (11) 计算波达时刻所有组合的隶属度 $\mu(x)$, 确定 $\mu(x)$ 最小值 $\min \mu$ 及对应的波达时刻组合;

步骤 3: 判断 $\min \mu$ 对应的模式, 若为模式一转到步骤 4; 若为模式二, 运用式 (16)、(17) 计算雷击点位置 x 及行波波速 v 转到步骤 6;

步骤 4: 运用式 (7)、(9) 计算 $\mu'(x)$, 确定 $\mu'(x)$ 最小值 $\min \mu'$;

步骤 5: 判断 $\min \mu'$ 对应模式一的哪种情况, 若为情况一, 运用式 (12)、(13) 计算雷击点位置 x 及行波波速 v 若为情况二, 运用式 (14)、(15) 计算雷击点位置 x 及行波波速 v

步骤 6: 比较 v 和 v_0 , 若 $\epsilon = |v - v_0| < 10^{-3}$ 或达到迭代次数 k 输出雷击点位置及相应的雷击模式; 否则, 令 $v_0 = \frac{v + v_0}{2}$, 转到步骤 2。

4 仿真及算例分析

4.1 仿真系统

采用典型 500 kV 超高压输电系统, 见图 1, 仿真输电线路 M-N 段为全长 $L=200\text{ km}$, 电压等级 500 kV 的三相有损传输线, 采用频率相关模型, EMTDC 采样频率为 1 MHz。

国际电工委员会 (IEC) 将波头 $t_f=1.2\text{ }\mu\text{s}$ 波长 $t_r=50\text{ }\mu\text{s}$ 作为雷电冲击实验的标准波形, 记为 1.2/50 μs 其波形定义如式 (18)。采用此波形模拟雷击线路时产生的雷电流波形, 采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行雷击仿真。

$$i = A I_L (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \tag{18}$$

在母线 M 处装设测量元件, 检测仿真波形, 将测得的数据用 MATLAB 编程实现第 2 节介绍的模式识别方法进行雷击点的定位。

4.2 仿真结果分析

采用电流行波信号经 Clark 变换后的线模分量作为测量信号, 根据文献 [7], 其波速为 299 739 777 m/s 但雷击点定位公式 (12)、(14) 和 (16) 均不利用波速 v 在模式识别中设置 v_0 不需要精确值, 波速可经过迭代不断进行修正, 直到与定位输出波速满足一定误差要求 ϵ , 因此近似取 $v_0 = 2.997 \times 10^8\text{ m/s}$ 在如下的算例中均以雷击发生时刻为零时刻, 选取雷击

2 ms 后的样本点, 每两个采样点间隔为 1 μs , 共 2 000 个采样点。

算例一: 模式一的第一种情况

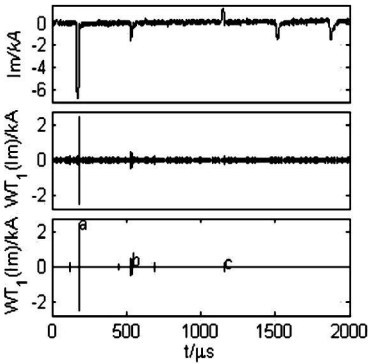


图 4 算例一行波信号及其小波变换

图 4 给出了距 M 端 54 km 处发生故障性雷击的行波信号及其小波变换结果。其中, 图 4(上) 为加入噪声的行波电流线模信号 (M 端检测); 图 4(中) 为小波变换第 1 层分解细节系数; 图 4(下) 为第 1 层分解细节系数经小波阈值消噪后含干扰的波达时刻脉冲波形 (以下算例相同)。

将图 4(下) 的波达时刻导入第 2 节的模式识别定位程序, 输出为“模式一的情况一”, 定位波头为 a、b、c (其余为干扰波头), 对应的波达时刻 $t_{m1}=182\text{ }\mu\text{s}$, $t_{m2}=542\text{ }\mu\text{s}$, $t_{m3}=1\text{ }157\text{ }\mu\text{s}$ 代入式 (12) 得雷击点与 M 端距离 x 为 53.933 km, $\Delta x = 53.933 - 54 = -0.067\text{ km}$, 定位误差 $\epsilon = (-0.067 \div 200) \times 100\% = -0.034\%$ 。

算例二: 模式一的第二种情况

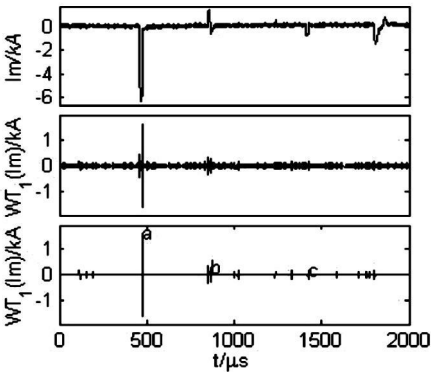


图 5 算例二行波信号及其小波变换

图 5 给出了距 M 端 142 km 处发生故障性雷击的行波信号及其小波变换结果。将图 5(下) 的波达时刻导入模式识别定位程序, 输出为: “模式一的情况二”, 定位波头为 a、b、c 即 $t_{m1}=476\text{ }\mu\text{s}$, $t_{m2}=863\text{ }\mu\text{s}$, $t_{m3}=1\text{ }424\text{ }\mu\text{s}$ 代入式 (14) 得 $x=142.022\text{ km}$, Δx

=0.022 km, 定位误差 $\epsilon=-0.011\%$ 。

算例三：模式二

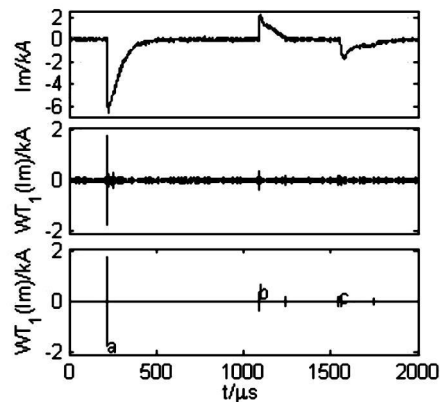


图 6 算例三行波信号及其小波变换

图 6 给出了距 M 端 70 km 处发生非故障性雷击的行波信号及其小波变换结果。将图 6(下)的波达时刻导入模式识别定位程序,输出为:“模式二”,定位波头为 a、b、c 即 $t_{im}=220\mu s$ $t_{bm}=1\ 088\mu s$ $t_{cm}=1\ 555\mu s$, 代入式 (16) 得 $x=69.963\ km$, $\Delta x=-0.037\ km$, 定位误差 $\epsilon=-0.019\%$ 。

类似地,对不同长度输电线路不同位置发生雷击的情况进行了仿真,定位结果见表 1(其中 x 为 X 的计算值),从表 1 可知,定位误差均小于 200 m,满足雷电定位精度要求。若不将噪声干扰与实际雷击行波波头加以识别,错误的利用噪声干扰波头进行雷击定位,则精度无法确定。

表 1 定位结果

线路全长 L/km	雷击		定位结果及误差			
	模式	X/km	x/km	$\Delta x/km$	$\epsilon/\%$	
150	模式一	40	39.940	-0.060	-0.040	
		97	97.103	0.103	0.069	
	模式二	60	59.850	-0.150	-0.100	
300	模式一	100	100.050	0.050	0.017	
		224	224.139	0.139	0.046	
	模式二	88	87.874	-0.126	-0.042	
400	模式一	143	142.975	-0.025	-0.006	
		301	300.934	-0.066	-0.016	
	模式二	267	267.112	0.112	0.028	

5 结 论

综合考虑噪声干扰、波速及波头识别对定位的影响,提出了雷击单端定位的改进模式识别方法。该方法仅利用波达时刻和线路总长求解雷击点位置,不受行波波速影响。定位精度高,定位误差小

于 200 m,满足雷电定位精度要求。
所提出的模式识别方法可有效排除噪声干扰对定位的影响,可对故障点反射波和对端母线透射波进行识别,保证定位的正确性。
雷击定位模式识别法对雷击是否造成故障进行了模式分类,模式一对应故障性雷击;模式二对应非故障性雷击。雷击定位输出的模式可作为输电线路保护中雷电干扰识别的参考。

参考文献

[1] 董杏丽,葛耀中,董新洲.行波保护中雷电干扰问题的对策[J].中国电机工程学报,2002,22(9):74-78.
[2] 范春菊,张兆宁,郁惟镛.小波方法在超高压输电线路行波故障测距中的应用[J].电网技术,2003,27(8):50-53.
[3] Dipankar Chanda N K Kishore Avinash K Sinha A Wavelet Multiresolution-based Analysis for Location of the Point of Strike of a Lightning Overvoltage on a Transmission Line[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1727-1733.
[4] 吴昊,肖先勇.基于小波变换和行波理论的输电线路雷击定位[J].高电压技术,2007,33(1):86-90.
[5] Cansin Y Evrenosoglu Ali Abur Travelling Wave Based Fault Location for Teed Circuits[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1115-1121.
[6] 马延凯.基于小波分析的输电线路行波故障测距的研究[D].济南:山东大学,2006.
[7] 李学鹏.高压直流输电线路行波保护及其故障定位的研究[D].北京:华北电力大学,2005.
[8] 陈平,朱瑾,徐丙垠,等.利用重合闸暂态行波的输电线路故障测距[J].电力系统自动化,2009,33(11):76-80.
[9] 蒋涛,陆于平.不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究[J].电力自动化设备,2004,24(12):29-32.
[10] 李泽文,曾祥君,姚建刚,等.不受波速影响的输电线路双端行波故障测距算法[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2006,3(4):68-71.

作者简介:

唐启红 (1985—),男,硕士研究生,研究方向:电力系统过电压与电磁暂态。
汪 颖 (1981—),女,硕士,讲师,研究方向:电能质量及其控制技术、大气过电压。
肖先勇 (1968—),男,副教授,硕士导师,长期从事电能质量及其控制、大气过电压与绝缘配合的教学研究。

(收稿日期:2010-01-07)

110 kV 线路覆冰防范措施及对策

魏长喜

(西昌电业局, 四川 西昌 615000)

摘 要:通过对输电线路覆冰的形成、表现形式及其危害的分析研究, 结合对凉山地区多年来 110 kV 输电线路覆冰事故治理经验的总结, 提出了在经常发生覆冰事故的地区需采取的防范、治理措施, 逐步减少了输电线路覆冰事故的发生, 减少覆冰事故的危害, 保证电网的安全稳定运行。

关键词: 110 kV 线路; 覆冰; 防范措施; 对策

Abstract: Firstly, the formation, manifestation and harms of ice accretion in transmission line are analyzed and studied. Then based on the experiences of dealing with the ice accretion accidents of 110 kV transmission lines in Liangshan area, the precautionary and control measures are proposed for the areas with frequent frost covering. These measures can gradually reduce the accidents of ice accretion and its harms, and guarantee the safe and stable operation of power grid.

Key words: 110 kV transmission line; ice accretion; precautionary measures; countermeasure

中图分类号: TM862 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0030-03

西昌电业局地处的凉山州地区水利资源十分丰富, 金沙江、雅砻江、大渡河“三江”水能资源储量在西南地区乃至全国位居第一, 目前已建成发电的二滩电站装机 3 300 MW, 在建的溪洛渡电站装机 13 000 MW, 锦屏电站装机 8 400 MW, 瀑布沟电站 3 300 MW, 拟建的电站装机达 20 000 MW 以上, 再过 10 年, 凉山将成为中国乃至世界著名的水电王国, 庞大的电能输出网络也将遍布大小凉山。但是, 凉山特殊的自然环境十分恶劣, 表现在海拔高、气候恶劣、地形复杂、地质破碎、输电线路覆冰严重, 针对这种情况, 多年来西昌电业局在防覆冰方面进行了探索, 实施了一些防范、治理措施, 取得了一些成效。

1 输电线路覆冰的形成及其危害

输电线路覆冰是一种常见的自然现象, 绝大多数发生在初冬和初春时节, 或者是在降雪、雪雨交加或有浓雾的天气里; 在输电线路附近若有持续 3 至 4 级风的雨雪天气, 特别是浓雾加小雨雪天气, 气温在 -5°C $\sim 5^{\circ}\text{C}$ 时, 在导线、避雷线、绝缘子串等处均会有冰、霜和湿雪等混合形成附着水滴的冰水层, 当气温持续较低时, 这些水滴凝结成冰, 不停有水滴附着在载体上, 冰就越凝越厚, 形成输电线路覆冰。在导、地线上形成的覆冰有雪凇、雾凇、和雨凇。中国中部地

区是容易形成输电线路覆冰的地区, 历年都有覆冰事故的发生, 但正常情况下的覆冰并不会对输电线路造成危害。西昌电业局地处的大小凉山地区, 多年来输电线路覆冰事故也比较多。

当输电线路的覆冰较大时, 就会造成较大的影响, 当覆冰很大时, 就会对输电线路造成很大的危害, 并造成电网事故。2008 年 1 月中旬至 2 月上旬, 华中、华东电网遭遇历史罕见的长时间低温雨雪冰冻天气, 造成输变电设施大量停运, 架空线路大面积倒杆(塔)断线, 局部电网甚至遭到毁灭性破坏, 停运变电站 884 座, 输电线路 15 284 条, 停电用户 2 705.78 万户, 直接经济损失 104.5 亿元。同时四川地区也出现了历史罕见的持续强降温雨雪天气, 导致全省各级电网遭受严重破坏, 2008 年 1 月 14 日起, 冷空气进入四川省境内, 四川盆地普降大雪, 尤其是大凉山、小凉山、小相岭、岷山、夹金山、大雪山、马边、峨边、沐川等边远山区, 雨夹雪天气持续 20 余天, 最低气温达 -7°C 。大范围、长时间降雪, 使四川电网输电线路发生大面积覆冰、舞动, 覆冰厚度普遍超过 30 mm, 局部地区最大覆冰厚度达到 80 mm, 远远超过 30 年一遇的输电线路 15 mm 覆冰厚度的设计水平, 导致多条输电线路因覆冰倒塔、断线, 被迫停运。宜宾和泸州等地部分电网也因覆冰导致 220 kV 和 110 kV 线路发生倒塔断线事故而停运, 其中泸州的古蔺、叙永地区

曾一度停电长达 10 日以上,对当地人民的生产生活造成了较大的影响。特别是从 2008 年 1 月 21 日到 27 日,短短一周时间内包括跨区电网在内的 500 kV 普天线、普洪一线、普洪二线、普叙线因覆冰严重,线路相继故障跳闸,致使装机容量达 3 300 MW 的二滩电站电力外送 4 个通道全部中断。这是二滩送出工程自 1998 年 7 月投入运行以来最为严重的受损事件。500 kV 二自线凉山段运行 10 年来曾多次发生覆冰事故。

西昌电网地处大小凉山地区、多年来 110 kV 输电线路覆冰事故就比较多;2002~2007 年 110 kV 喜乐线发生多次跳闸,并造成线路导地线断股、断线。经查找分析原因,都是因严重覆冰导致弧垂严重下垂,导地线不均匀覆冰,有时边相导线比中相导线还低,架空地线比导线低,在风力作用下造成导线对避雷线放电从而引发跳闸。因覆冰严重、脱冰跳跃造成导线断股、断线。通过导线断股的部位分析,这些断股的原因一是由于严重的覆冰超过了普通导线的承载能力,造成导线断股;二是覆冰脱落时导线跳跃、振荡造成过度疲劳断股;也可能是这两种原因的综合造成断股。

2 输电线路覆冰事故的表现形式

经过多年的总结分析,一般情况下,覆冰直接导致事故有三类。

第一类:覆冰超过设计值引起的事故,在覆冰事故中占的比重最大。

2008 年的冰雪灾害后,国家电网公司经过大量的现场取证,试验检测和设计校核证明,覆冰厚度大大超过设计水平是冰灾导致电网设施损失的直接原因;组织专家分析严重覆冰的原因是受中国中部地区大气层的环流移动和大气温差的影响,产生了空气冷热相互交替而形成雪凇、雾凇和雨凇的“过冷却”现象,使得物体表面持续严重覆冰,线路结冰直径达 30~60 mm。2008 年四川省的 500 kV 线路受灾主要集中在重冰区和中冰区的交界地,按照 10 mm 设计的地区受灾较重;220 kV 和 110 kV 线路主要发生在轻冰区,据现场统计,泸州地区的 110 kV 叙古线是按照 5 mm 冰区设计的,而实际覆冰厚度达 60 mm 左右,局部地区导线上的覆冰直径达 80 mm 以上。

2006 年 1 月 7 日 110 kV 喜乐线路跳闸后故障巡

视时观察估计导、地线覆冰直径在 200 mm 左右,通过对拉线的覆冰情况观察,覆冰结构主要为雾凇夹雪,相对密度为 0.4~0.6,折算覆冰厚度为 40~60 mm。通过多年的运行观察,附近的 110 kV 新乐线沙玛拉达梁子段导地线每年都会出现 50 mm 左右的覆冰。但是新乐线的最大设计覆冰为 20 mm。

当覆冰超过设计值时会导致金具如悬垂线夹断裂、U 型环断裂、绝缘子串脱落造成导地线脱落、拉线线夹断裂造成倒杆、地线弧量增大、风吹摆动造成与导线相碰,烧伤导线、导地线横担弯曲变形、折断等设备损坏、停运事故。

第二类:不均匀覆冰或不同期脱冰引起的事故,在电网覆冰事故中也比较常见。

不均匀脱冰使导地线跳跃、引起闪络烧断导地线。由于覆冰溶脱,导线跳动上翻,悬垂绝缘子串翻转到横担上,绝缘子被打坏,悬垂线夹擦伤,防振锤压弯。

导地线不均匀覆冰及不同期脱冰产生的不平衡张力差。这张力差会引起悬垂绝缘子严重偏移,严重时可引起塔身变形,或横担及地线支架拉坏。张力差还会使悬垂绝缘子串发生很大的偏移,碰撞横担,造成绝缘子损坏。张力差还会使导线横扭转动,碰拉线,拉线烧断造成倒杆。

第三类:不同期脱冰造成导地线间或导线之间碰撞放电。由于导线有电流,往往首先脱冰,而地线较不易脱冰,弧垂仍大,地线反而低于导线,稍有摆动,就会发生导地线烧伤或烧断地线。导地线严重覆冰和不同期脱冰时产生很大的冲击力,冲击力使杆塔机械荷重超过设计条件,造成倒杆(塔)。

3 输电线路覆冰防范措施及对策

因西昌电业局地处大小凉山地区,多年来 110 kV 输电线路覆冰事故就比较多,经过不断的整治和总结,并结合中国其他地区的治理经验,在经常发生覆冰事故的地区要防范覆冰事故,需采取以下一些措施。

(1)结合所辖输变电设备的地域灾害性天气特点、电网状况,制定防覆冰事故应急抢险预案,建立防覆冰抢险救灾组织机构,明确职责,建立应急抢险队伍,进行应急演练,作好材料、工器具和备品备件等物资的准备工作,防止发生大面积覆冰倒杆、断线事故,

尽快恢复供电,减少冰雪灾害对电网造成的破坏,防止事故范围的扩大。

(2)在覆冰事故多发季节,要采取以下具体措施。

①每日向当地气象部门了解天气变化情况和趋势,及时准确地掌握天气预报,并做好记录;

②向各变电站、开关站、护线站交待近期工作重点,并要求各站及时上报当地气象具体情况及突变情况,并做好记录;特别是在重冰区段要重点做好设备的巡视检查及消缺工作。

③当气温突降、设备严重覆冰、连续低温、暴风雪等灾害性天气时,运行人员应及时掌握设备运行情况,对可能出现事故迅速作出反应,并根据设备状况及时申请调整运行方式;并及时申请停电进行除冰等应急处理措施,保证系统的稳定和安全运行。

④根据本地区输变电设备的地域灾害性天气特点,依据设计资料和通过覆冰特巡、覆冰观测等方式积累的运行资料,确定需重点巡视检查的线路段和塔位,建立冰区档案,加强覆冰监视;对处于重冰区的线路要进行覆冰特巡,进行观测,有条件或危及重要线路运行的区域要建冰观测站,建立覆冰在线监测系统,研究覆冰性质、特点。覆冰季节前应对线路做全面检查,消除设备缺陷,落实除冰和防止导、地线跳跃、舞动的措施,检查各种观测、记录设施,并对除冰装置要经常进行检查、试验,保障必要时能投入使用。在覆冰季节中,应有专门观测维护组织,加强巡视、观测,配合覆冰在线监测系统的资料,做好覆冰和气象资料记录及分析,研究覆冰和舞动的规律,随时了解冰情,为覆冰改造提供准确的数据支撑,以便适时采取相应治理措施。对重点覆冰区应安排专人监视,发现线路覆冰、舞动等险情及时报告处理。对发现有影响安全运行的缺陷及时处理。

⑤当发生覆冰事故时,要严格按照防覆冰事故应急抢险预案的要求进行抢险工作,尽快恢复设备的正常运行,并根据现场实际情况采取有效措施防止事故范围的扩大。同时要注意收集现场的各种录像、图片、资料,因为发生覆冰事故时一般都是恶劣天气,能

见度低,不容易看清情况,天气好转后覆冰又很快脱落,平时收集很难。

(3)通过多年对覆冰事故时的微地形气候,覆冰结构和厚度的观察、设备损坏的程度、相关覆冰录像、图片、资料的分析,覆冰治理后的效果的跟踪,国内外治理覆冰的经验运用,对西昌电业局的 110 kV 线路覆冰事故进行了科学分析、研究,分别情况采取不同的治理措施。

① 2002 年发现 110 kV 喜乐线 N41 号塔由于脱冰时导线跳跃跳线绝缘子串翻上横担,通过在 N41、N42、N45 号塔加装重锤后,类似故障情况没有再发生。

② 2006 年发现 110 kV 喜乐线 N79~N84 不均匀覆冰造成导线对地、导线距离不够,2006 年已进行了防覆冰改造:将 N78~N82(1.39 km)的 GJ-35 地线换成 GJ-50 地线,调整地线弧垂,增加导线距离,在 N77~N78 间增加一基铁塔提高抗冰能力,在 N81 直线塔绝缘子串增加 2 片, N82 直线塔绝缘子串增加 1 片绝缘子,避免地线与导线非同期脱冰发生地线弧垂低于导线弧垂的情况,目前运行效果良好。

③ 多年运行发现 110 kV 新乐线 N36~N42 段地线覆冰设计值小于实际值,长年覆冰使导线弧垂逐步增大,造成地线对导线放电引起线路跳闸。2008 年通过增加铁塔减小档距,设计覆冰改为 30 mm 等措施提高抗冰能力进行了改造,改造段共更换导线 2.14 km,更换、新建铁塔 7 基。

④ 2009 年完成 110 kV 完成喜乐线 N67~N78 段改造:更换不宜在重冰区采用的拉门塔 5 基,设计覆冰改为 30 mm,将该段已部分损坏的导线全部进行了更换。

目前正准备按照四川省电力公司的要求逐步对其他微地形地易严重覆冰段进行改造。今后要密切跟踪掌握国内外防覆冰、特别是除冰、融冰技术的研究成果,并以最快速度将研究成果在防覆冰工作中应用,逐步减少输电线路覆冰事故的发生,保证电网的安全稳定运行。

(收稿日期:2010-02-24)

欢迎投稿

欢迎订阅

小电网负荷低谷时段谐波电压问题的研究

马志远¹, 贺建闽²

(1 铁道第三勘察设计院集团有限公司电化电信处, 天津 300251;
2 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:对多个变电所实测数据进行了统计分析,总结了小电网在负荷低谷时段谐波电压的一些特征,并对影响变压器谐波电流的因素进行了仿真分析。

关键词:小电网;谐波;负荷低谷时段;变压器

Abstract: The statistical analysis of measured data is carried out for a lot of substations. Some characteristics of the harmonic voltage when small power grid is in valley period of load, and the factors influencing the harmonic current of transformer are simulated and analyzed.

Keywords: small power grid; harmonic; valley period of load; transformer

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)03—0042—05

0 引言

随着电力电子工业的迅速发展,人们研究谐波的热点都倾向于电力电子这类非线性用电设备所产生的谐波,但作为传统的谐波源之一——变压器,在某些特殊的运行条件下,其产生的谐波电流同样不容忽视,虽然单台变压器的额定励磁电流较小,其谐波含量亦很小,但电网中变压器的总容量为发电机总容量 6~8 倍,其谐波电流总值是相当可观的,特别是现代变压器都考虑经济运行,都把额定磁密选在变压器磁化曲线的膝点附近,当变压器工作在一些特殊条件下,例如在电网负荷低谷时段电网电压有比较大幅度的提高时,变压器所产生的谐波电流将急剧增大,由此反映的是电网在负荷低谷时段谐波电压过高的现象,这种现象在小电网中尤为突出。通过实测数据统计分析,找出影响变压器谐波电流的一些因素,对电网电压的升高和影响变压器空载电流的一些因素进行了全面的仿真分析。

1 牵引变电所测试数据分析

1.1 测试电网负荷背景情况

成都铁路局、西南交通大学和云南供电局在内昆

线铁路试运行之前完成对铜鼓溪等牵引变电所进行测试,铜鼓溪牵引变电所隶属于云南昭通电网,处于云贵川三省交界处,属于薄弱的小电网。变电所进线电压为 110 kV。记录当日铜鼓溪牵引变电所当日 0~9 时只有所内自用电,17~24 时并联电容器投运,这两个时段线路上没有列车取流。

绥中北牵引变电所位于秦沈客运专线,在其正式开通之前,西南交通大学电气工程学院对其进行多日测试,该所高压侧引入单相 220 kV 电源。其电网供电能力较好。记录当日只有 12~18 时有一列交—直—交型列车在试运行,其他时刻只有所内的自用电。

1.2 数据分析

各个牵引变电所电压总谐波畸变率和各次谐波电压含有率趋势图如图 1 统计情况见表 1。

表 1 各个变电所 A 相电压总谐波畸变率和各次谐波电压含有率 95% 大值

变电所	THD _U /%	HRU ₃ /%	HRU ₅ /%	HRU ₇ /%
铜鼓溪	9.659 1	1.546 5	8.909 0	2.902 6
绥中北	2.254 2	0.495 4	2.035 6	0.912 1

由图 1、表 1 中可以看到铜鼓溪牵引变电所电压综合畸变率严重超标,而绥中北牵引变电所也有所超标,各个变电所都是 5 次谐波电压为电网谐波的主要成分,基本上是 5 次谐波电压决定了电压总谐波畸变率 THD_U 的变化趋势及幅值,7 次谐波电压变化趋势与 5 次谐波电压变化趋势一致。两个牵引变电所在电网负荷低谷时段基本上都是在空载运行。铜鼓溪

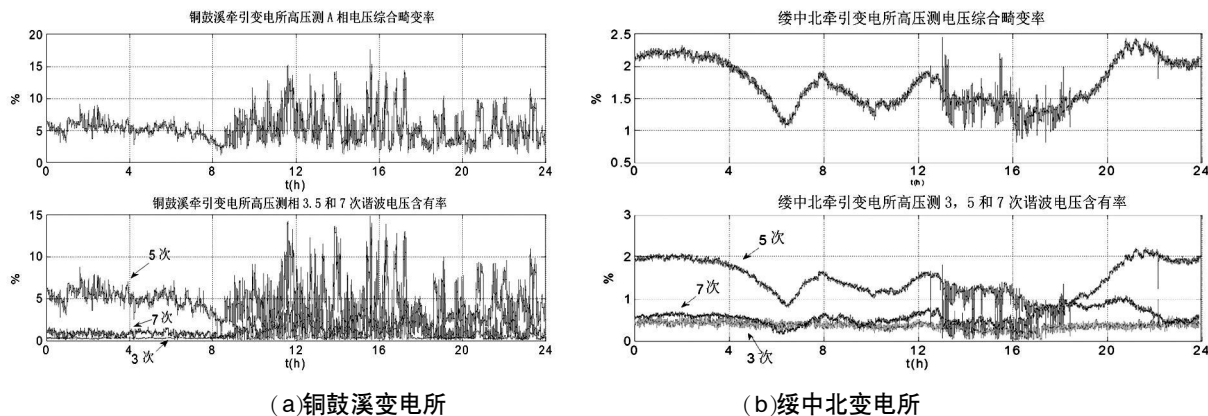


图 1 各个变电所电压总谐波畸变率和各次谐波电压含有率趋势图

变电所谐波电压远远大于绥中北牵引变电所,电压总谐波畸变率为 9.96%,这与电网的供电能力有关,前面提到铜鼓溪变电所处于云南昭通电网的末端,比起绥中北变电所,其电网的供电能力较弱。电网在空载或轻载情况下,其末端电压会升高,通过测试数据统计分析,在电网轻载情况下,部分 110 kV 电网变电所超出额定电压的 10%,部分 220 kV 电网变电所超过额定电压的 6%,可见负荷低谷时段时电网电压抬升比较大,尤其是在小电网中。由多个波动的非线性负荷产生的背景谐波具有一个明显的特征,那就是其幅值随时间作剧烈变化,波动的谐波源越多,谐波电压幅值分布越杂乱^[1]。由图 1 可以看到 5 次谐波电压变化的幅度不是很大,这就说明牵引变电所背景谐波来源主要为大型电力变压器所产生的谐波。文献[2-3]提到西北电研院多次测试表明,西北电网的背景谐波主要来源于变压器群。另外 20 时至 22 时这个时段是居民用电高峰,尤其是电视机、洗衣机等家用电器用电高峰,这些众多家用电器也会产生可观的谐波。

文献[4]的测试数据显示,在农村电网中在负荷低谷时比负荷高峰时,10 kV 母线电压的基波电压提高了约 5%,但是谐波电压却提高得较多,尤其是 5 次谐波电压提高了 1 倍,谐波电压综合畸变率也提高了近 1 倍,使 10 kV 母线谐波电压超过了电能质量标准中的谐波限制值。并且 5 次谐波电压为负序电压,负序电压过高导致继电器误动,文献[5]提到在夜间 22 点至凌晨 1 点左右,变电站 66 kV 母线负序电压滤过器偶尔动作,发出了电网负序电压偏高的信号。

由上面分析可以得知,在电网负荷低谷时段,谐波电压过高的问题不容忽视,这种情况在小电网尤为突出,这时电网中的主要谐波源为变压器,变压器产

生的谐波电流影响电网谐波电压大小,现代变压器考虑经济运行,设计在额定电压时的磁密已接近磁化曲线的拐点,电网在这种方式运行下,就要考虑变压器铁芯的非线性特性,此时变压器已经工作在饱和区域,其谐波电流较正常工作时增大许多,同时电网的结构参数也可能对谐波电压起到放大作用。变压器产生的谐波电流的大小与变压器铁芯的饱和程度有关,而电网电压和变压器额定电压下选取的磁密直接影响着变压器工作时铁芯的饱和程度。文献[6]提出电源电压由额定电压提高到 1.1 倍额定电压时,电网中各次谐波电压都有很大程度的增加,约为在额定电压下的 2.5~3 倍,当将变压器的膝点由原来的 $\psi_k = 1.20 \text{ pu}$ 变到 $\psi_k = 1.30 \text{ pu}$ 时,5 次谐波电压和 7 次谐波电压大幅度削弱,7 次谐波电压可以忽略,而三次谐波电压没有什么变化,可见这两个因素对电网的谐波电压的影响很大。

2 电网空载末端电压升高

线路中由于存在着纵向电感,分布电容引起的电流流过这些纵向电感时就产生了电压升高。若线路中无电感则电流不会引起电压升高。此种过电压一般在高压传输线中是非常突出的问题,在一些电网短路容量较小且比较偏远地区问题也比较突出。在由电感电容组成的线路中,当容抗值大于感抗值时,回路中通过的容性电流经过电感时,容抗上的压降被抬高,这种效应称为法拉第电容效应,或者称为电容效应^[7]。

在图 2 所示无补偿空载电路中,忽略线路电阻,认为线路无损。可得空载时线路中电压 $\dot{U}_x$ 和电流 $\dot{I}_x$ 的方程为

$$\dot{U}_x = \dot{U}_1 \frac{\cosh \beta x}{\cosh \beta l} \tag{1}$$

$$\dot{I}_x = \dot{I}_1 \frac{\sinh \beta x}{Z_c \cosh \beta l} \tag{2}$$

式中， β 为传播常数； Z_c 为特性阻抗。
上述公式从理论上分析了线路各点的电压电流值与线路首端电压的关系。

另外电源电抗相当于串联在线路中的电感，故等效为线路的纵向电感增加，会加大电容效应。下面从理论上分析电源电抗对线路电压升高的影响。

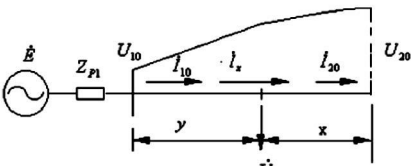


图 2 无补偿空载线路

仍然以图 2 为例，图中

$$\dot{U}_1 = \dot{E} - \dot{I}_1 Z_{p1} \tag{3}$$

只考虑电源电抗的影响，认为 $Z_{p1} \approx jX_{p1}$ ，设 $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{X_{p1}}{Z_c}$ ，
则式 (1)、(2) 成为

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{E} \cosh \beta x}{\cosh \beta l - \text{tg} \varphi \sinh \beta l} \tag{4}$$

$$\dot{I}_x = \frac{j \dot{E} \sinh \beta x}{Z_c (\cosh \beta l - \text{tg} \varphi \sinh \beta l)} \tag{5}$$

比较式 (1)、(2) 和式 (4)、(5) 知，分母多了一 $\text{tg} \varphi \sinh \beta l$ 通常线路条件下 $\text{tg} \varphi \sinh \beta l$ 为正值，换言之，电源电抗加剧了末端电压的升高。

以上情况均忽略了线路的损耗，当考虑损耗时，线路的末端电压升高幅度会有所下降，通常情况下可以忽略线路损耗对末端电压升高的影响。

下面以某线路数据为计算条件，对电压升高做仿真计算，假设为理想电源电压，且线路均匀换位，不同长度线路的末端电压仿真结果如图 3 所示，图 3 显示了末端电压随着线路长度增加的变化趋势，末端电压的升高与线路长度不成线性关系，随着线路长度的增加，末端电压急剧上升。

上面分析到电源电抗也会加剧末端电压的升高，考虑 110 kV 输电线路的实际情况分别选取线路长度 100 km 和 150 km 不同电源电抗下的仿真，仿真结果如图 4。

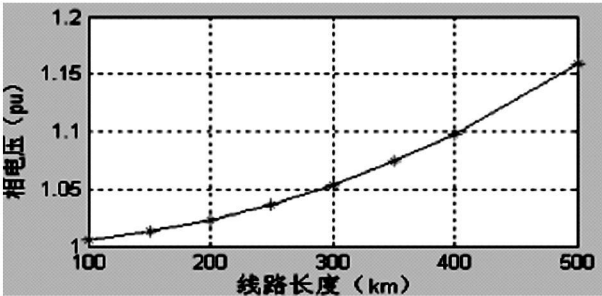


图 3 线路末端电压

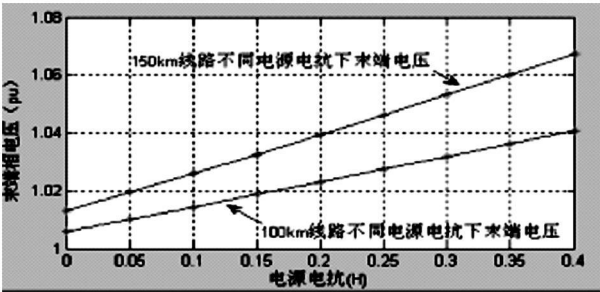


图 4 不同电源电抗下末端电压示意图

随着电源电抗的增加末端电压也随着增加，其对末端电压的升高影响较大，这种增加趋势基本是线性的，其斜率与线路长度有关，线路越长，斜率越大，这也就说明了小电网在空载或者轻载时刻电网电压抬升的比较高，而且比供电质量较好的电网抬升的幅度要大。

3 不同状况下变压器空载仿真

3.1 不同等级电压下的变压器空载仿真

在不同等级电压下的变压器空载电流的基波电流和各次谐波电流统计情况如表 2。

表 2 变压器空载电流仿真结果

额定电压倍数		谐波电流次数			
		基波	3 次	5 次	7 次
1.0	有效值 /A	1.34	0.04	0.16	0.01
	谐波含量 %	100	2.6	11.8	0.86
1.05	有效值 /A	1.88	0.22	0.34	0.10
	谐波含量 %	100	11.4	17.7	5.22
1.1	有效值 /A	2.73	0.46	0.61	0.21
	谐波含量 %	100	17.0	22.4	7.92
1.2	有效值 /A	6.27	0.03	1.83	0.71
	谐波含量 %	100	0.48	29.0	11.0

由表 2 可看出随着电压的升高空载电流急剧增大，除了 3 次谐波电流在 1.2 倍额定电压下减小外，其他各次谐波电流都随着电压的升高而急剧增大，而其中 5 次谐波电流占谐波电流主导地位。

3.2 不同额定磁密下变压器空载仿真

以一单相变压器为例,选取变压器不同膝点电压,膝点就是从不饱和状态进入饱和状态的那个点,膝点电压越小说明变压器选取的额定磁密越大,变压器铁芯越容易饱和。

在额定电压下各个膝点电压下的变压器各次谐波电流和含有率不是很大,差距也不大,但当电压升高时,其增大速度不一致。图 5 给出不同膝点电压下的 5 次谐波电流随电压升高变化的示意图,可以看出 5 次谐波电流在膝点电压为 1.2 pu 和 1.3 pu 情况下基本是线性增加的,而膝点电压为 1.15 pu 和 1.1 pu 情况下 5 次谐波电流随着电压升高是非线性升高的,特别是工作膝点电压 1.1 pu 的情况下,5 次谐波电流随着电压升高而急剧上升,变压器制造厂商考虑经济运行,都把额定磁密选的较大,在正常运行方式下,可以忽略变压器的励磁电流,但当电压升高时,励磁电流和其谐波电流都急剧升高,此时变压器已经成为一种谐波源。

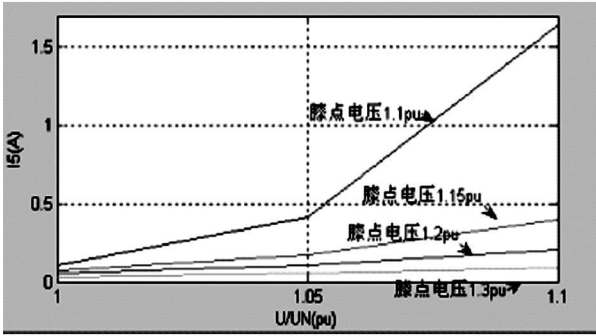


图 5 不同膝点电压下的 5 次谐波电流随电压升高变化示意图

3.3 不同阻抗特性的变压器空载仿真

讨论在电网阻抗成感性情况下对变压器空载电流的影响,在前述变压器空载仿真基础上加一电感模拟电网的感性阻抗,仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同感性阻抗变压器空载仿真统计

电压	电感值 /H	谐波电流次数			
		基波 /A	3 次谐波 /A	5 次谐波 /A	7 次谐波 /A
1.0 pu	0	1.34	0.04	0.16	0.01
	0.5	1.32	0.02	0.15	0.01
	1	1.32	0.02	0.14	0.01
1.1 pu	0	2.73	0.46	0.61	0.21
	0.5	2.68	0.38	0.56	0.19
	1	2.62	0.29	0.52	0.16
1.2 pu	0	6.27	0.03	1.83	0.71
	0.5	6.07	0.06	1.66	0.58
	1	5.95	0.1	1.53	0.47

由表 3 可以看出,当电网的阻抗呈感性的时候,变压器空载电流及各次谐波电流都有减小的趋势,而且随着感性阻抗的增大和变压器饱和程度的增加这种减小趋势愈明显。

图 6 给出了电网在不同容性阻抗值变压器空载电流的情况。

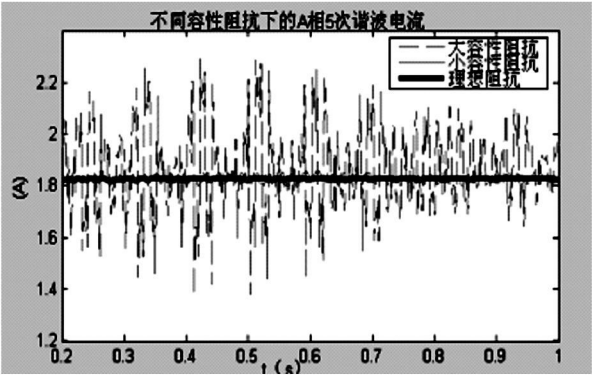


图 6 不同容性阻抗下 A 相 5 次谐波电流

由图 6 可以看出,当电网处于容性阻抗时,变压器的空载电流和谐波电流发生了复杂的畸变,5 次谐波电流都有放大的现象,在一些特定的容性阻抗时,会使变压器的谐波电流和谐波磁通倾向于互相增强。

4 结 论

通过上述实测数据和仿真分析,可得以下结论。

(1) 在电网负荷低谷时段,电网谐波电压过高的问题已经不容忽视,这种情况在小电网中更为突出。占主导地位的是 5 次谐波电压,变其化趋势与电网电压的变化趋势一致,这时电网中的主要谐波源为变压器。当变压器运行于一些特殊方式时,就要充分考虑变压器铁芯的非线性特性,对其分析应采用变压器非线性模型;

(2) 电网空载末端电压随线路长度的增加而急剧增加,随着电源电抗的增大而线性增大,这就说明在输电距离比较长,电网短路容量较小的小电网中末端电压升高幅度较大;

(3) 影响变压器铁心饱和程度主要电压大小和变压器选取额定磁密的大小,对于同一台变压器,变压器铁芯的饱和程度随着电压的升高而增加,变压器选取不同额定磁密则影响其增加的程度,选取额定磁密大的变压器将急剧的增大这种增加趋势。

(4) 电网的谐波阻抗呈感性时,变压器产生的谐

波电流在电网中引起的谐波电压倾向于减小变压器磁通的谐波含量和电流的谐波含量;而当谐波阻抗呈容性时,则变压器的谐波电流和谐波磁通倾向于互相增强。当电网在负荷低谷时段时,会有一些电容器组未切除,使电网的谐波阻抗呈容性,一方面会使电网电压升高,另一方面会引起某次谐波放大现象。

参考文献

[1] 贺建闽,黄治清,李群湛. 电网背景谐波电压测量与研究 [J]. 铁道学报, 2005(6): 28—33.
[2] 张直平主编. 城市电网谐波手册 [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
[3] 张直平. 电力系统中谐波的某些主要影响 [J]. 电网技

术, 1989(1): 8—14.

[4] 柴宇,房俊龙,高延英. 农村电网的谐波分析及治理 [J]. 农机化研究, 2006(3): 68—70.
[5] 余培岩,马卫平,界金星. 变压器 5 次谐波的产生及其对负序电压继电器的影响 [J]. 电力设备, 2004, 8(5): 27—30.
[6] Acha E, Arrillaga J, Medina A, Semlyen A. General Frame of Reference for Analysis of Harmonic Distortion in Systems with Multiple Transformer Nonlinearities [J]. Generation Transmission and Distribution [see also IEE Proceedings—Generation Transmission and Distribution], IEE Proceedings C, 1989, 36(5): 271—278.
[7] 施围. 电力系统过电压计算 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

(收稿日期: 2010—01—26)

(上接第 10 页)

5 结 语

电力系统的网损分摊方法有多种,但目前还没有一种让各国电力市场都接受的方法,大多数国家倾向于实行边际网损系数法或直接包括网损在内的实时节点定价。潮流跟踪法是一种会计学方法,许多人认为特别适合于固定成本回收,所以也很引人注目。但该方法不能提高电力系统的效益和为用户的投资决策提供有效的经济信号,而边际网损系数法则可以做到这点。由于分摊因子的存在,经典方法存在一些问题,使得原本没有有功损耗、无功损耗,分摊后却产生了有功损耗、无功损耗的不合理现象。功率线性叠加定理从网损产生的物理本质出发,经过严格的数学推导,有效解决了这一问题,体现了其优越性。

参考文献

[1] Alaywan Z, Allen J. California Electric Restructuring: A Broad Description Of the Development Of the California ISO [J]. IEEE Trans Power Syst, 1998, 13: 1445—1452.
[2] Christie R. Markets and Economic Dispatch and Transmission Losses [J]. IEEE Power System Economics, 2001.
[3] Shuttleworth G, Williams I. Allocation Transmission Losses: Methods and Criteria [A]. A Submission to the DICG Prepared by NERA. London, 1999.
[4] 曾鸣. 电力市场理论及应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 2000.
[5] Mutale J, Strbac G, Curcic S, et al. Allocation of Losses in Distribution Systems with Embedded Generation [J]. IEEE Proc on Gener, Transm & Distrib, 2000, 147(1)

: 7214.

[6] Wu Z Q, Chen G Z. MVA Power Flow and Loss Analysis for Electricity Market [J]. IEE Proc on Gener Transm & Distrib, 2001, 148(2): 153—158.
[7] 刁勤华,林济铿,倪以信,等. 博弈论及其在电力市场中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 19—23.
[8] Macqueen C N, Irving M R. An Algorithm for the Allocation of Distribution System Demand and Energy Losses [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 338—343.
[9] Slavickas R A. Allocation of Network Losses to Variable Electrical Loads [C]. The Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, (2): 391—396.
[10] 鲍海,马千. 电网线损物理分布机理 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 82—86.
[11] 王锡凡,王秀丽,郑斌. 电力市场过网费的潮流分析基础——网损分摊问题 [J]. 中国电力, 1998, 6(31): 6—9.
[12] 常乃超,郭志忠. 网损分摊问题的思考 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 4(23): 43—47.
[13] 吴政球. 有功、无功功率分摊及网损分摊的研究 (一) [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(3): 9—13.
[14] 吴政球. 有功、无功功率分摊及网损分摊的研究 (二)——有功、无功联合贡献因子及其应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(4): 9—22.
[15] 吴政球,姚建刚. 有功、无功功率分摊及网损分摊的研究 (三)——拓扑潮流分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(4): 14—22.

作者简介

董世勇 (1980—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护工作。

倪广魁 (1984—),硕士研究生,男,从事电力系统分析与控制方面的研究工作。

(收稿日期: 2009—12—17)

事故中双跳圈开关操作回路的电源分析

罗永刚¹, 薛永原², 龚在礼¹

(1 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072; 2 四川省超高压运检公司西昌中心, 四川 西昌 615000)

摘要:着重介绍了 220 kV 及以上具有双跳圈的开关操作回路, 因设计考虑不合理, 使用反向二极管隔离两路直流操作电源, 造成电气上不完全独立, 致使操作直流电源时控制回路存在互相干扰, 引起开关误动的实例。并提出了解决的方法和防止开关误动的措施, 这对提高供电的可靠性, 具有一定的指导意义。

关键词:双跳圈开关; 操作回路; 两路电源; 开关误动

Abstract: An example is described that because of the unreasonable design in the switch operating circuit with redundant trip coil in 220 kV power grid and above, using backward diodes to isolate the operational power supplies of two-way direct current will cause the incomplete independence electrically, so there are existing mutual interference in control circuit when operating DC power supply and it will lead to miss operation of switch. The solutions and measures are put forward to prevent the miss operation of switch, which is helpful for improving the reliability of power supply.

Keywords: switch of redundant trip coil; operating circuit; two-way power supply; miss operation of switch

中图分类号: TM571 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0047-03

0 引言

按照国网公司相关规程规定, 220 kV 及以上电压等级要求配置双套保护, 每套保护装置的直流电源应取自不同的直流馈线屏, 两套保护的跳闸回路也应分别作用于断路器的两个跳闸线圈, 两套保护装置之间不应有电气联系。在某些保护装置生产厂家设计开关回路时, 为了监视和操作开关的两个跳圈, 若设计不合理就会产生两个跳圈对应的两路电源之间有电的绞接 (尤其是保护动作启动出口的双跳圈和手跳启动出口的回路)。设备投运后用常规的思路去分析电路, 双跳圈操作回路不可能有什么问题, 但是在外部电源异常和违反常规的操作中就会发生和暴露出两回路间窜电的问题, 严重的可能引发开关跳闸的事故。

下面就发生在某 220 kV 变电站, 因开关操作回路电源相互干扰, 引起开关无保护动作跳闸的案例, 以此借鉴去分析其它类似回路。

1 事件经过

1.1 站用变交流电源消失引发直流电源失电

该 220 kV 变电站有两条 220 kV 出线、两台 220 kV 主变压器并联运行带 8 条 110 kV 出线、10 kV 母线运行。10 kV 一台站用变压器运行带直流充电机和一组蓄电池组供全站直流负荷。有一天, 值班人员按照每月的常规设备切换制度对直流系统进行蓄电池组的切换操作, 由运行的蓄电池切换到备用的蓄电池运行。3 小时后发生 10 kV 站用变压器跳闸, 接着全站直流系统发生直流消失 (直流消失原因是站用变跳闸后, 直流充电机因无交流输入而停止工作, 备用的蓄电池组中间有一只坏的电池, 在平时的维护中未检查出来, 当充电停运后, 蓄电池组由于开路而不能向全站直流系统正常供电。)

1.2 直流恢复后操作引发问题

现场进行紧急事故处理程序 (全站一次设备按原有方式运行), 断开全站所有保护及开关控制电源后将直流切入至另一组好的蓄电池组, 由蓄电池供电。待整个站内直流系统母线电压恢复正常, 汇报调度后立即对各元件保护、线路保护和各开关控制电源进行恢复。当恢复到 2 号主变压器总电源 II 路时, 发生 2 号主变压器 220 kV 高压侧跳闸。2 号主变压器主变压器保护装置上无任何报文和信号, 主变压器控制屏也无任何音响事故光字牌动作。

1.3 继电保护人员现场模拟再现事故

事后继保人员对 2 号主变压器模拟运行人员操作,合上用模拟断路器操作箱代替的高压侧开关,模拟当值运行人员操作顺序反复地断合 2 号主变压器总电源 I、II 电源开关 (总电源 I、II 电源开关分别在 1 号、2 号直流馈线屏上),经 10 余次试验后事故得到重演。I 路电源合上后,在合 II 路电源开关时主变压器开关发生跳闸,同样无任何音响光字。

1.4 分析事故

查阅主变压器操作回路图纸进行动作逻辑分析并对保护屏内接线核对图纸均无问题,是什么原因使跳闸线圈一端带上正电的呢? 如果是保护因拉合直

流造成保护误动,那么应有保护报文,即使没有报文,保护出口触点启动操作回路中的信号继电器也会动作发信号,实际也没任何音响光字信号? 再次实验又发现它的两个跳闸线圈 (STJ 和 2BTJ)都动作了,分析又回到图纸上,再一次推敲使两个线圈同时动作的回路。于是将保护启动双跳圈回路的联线在屏上端子解除,用指针式万用表测试两跳圈的操作回路,又经多次试验,测得第 2 跳圈启动回路对地测试有直流正脉冲出现,同时操作回路中的手跳继电器也会动作,双跳圈的电源回路在这里发生了绞接 (保护厂家为了使保护出口更可靠,出口的同时导通两只正向二

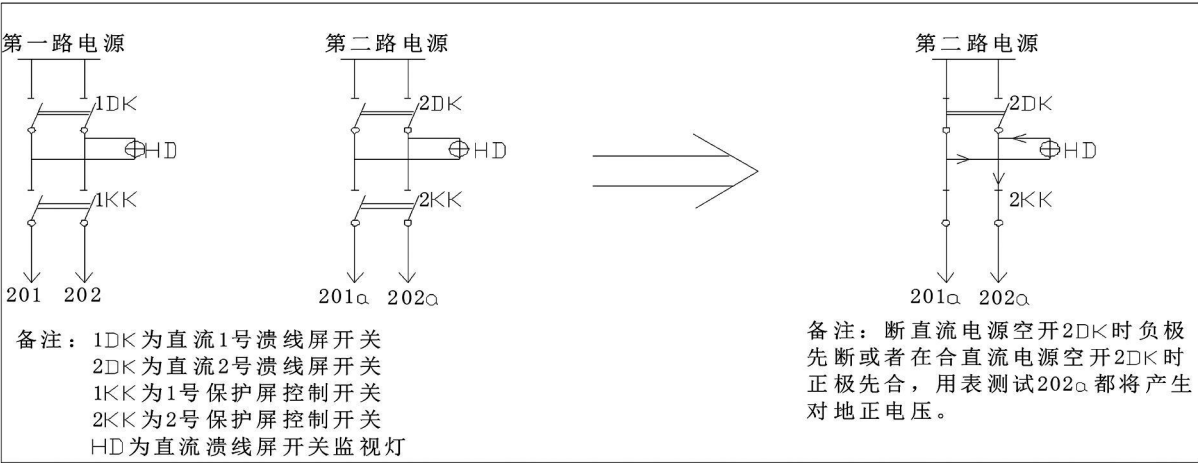
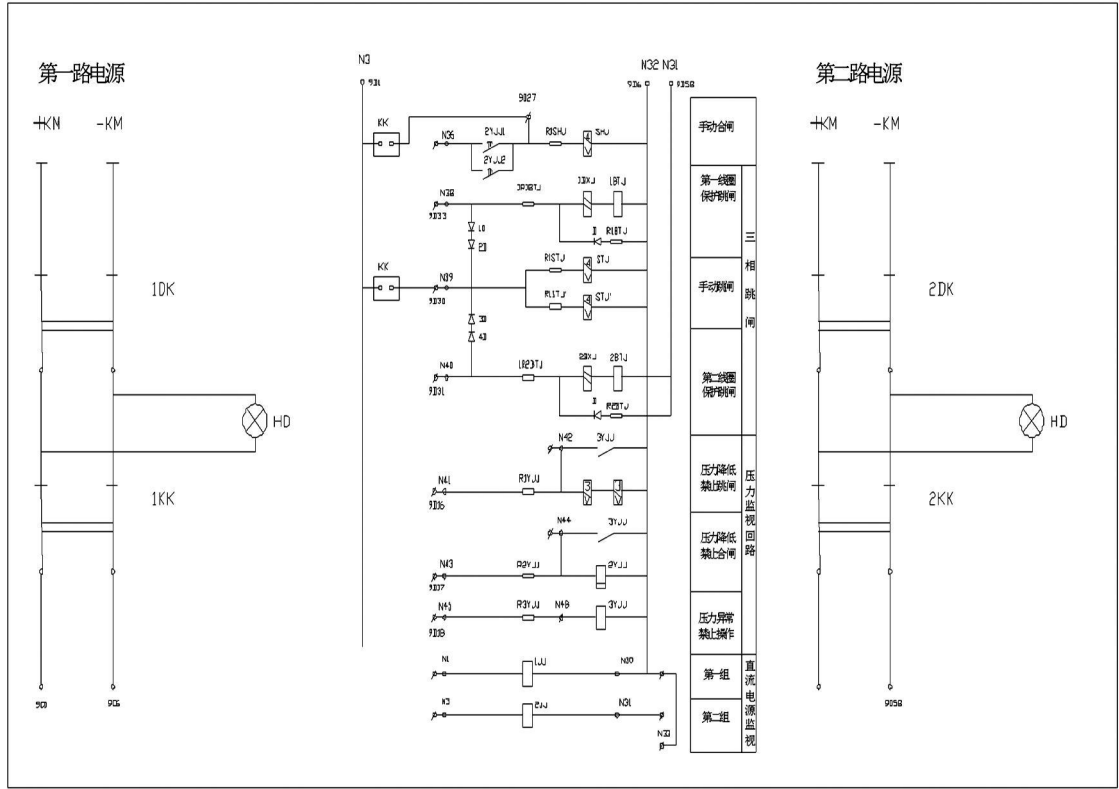
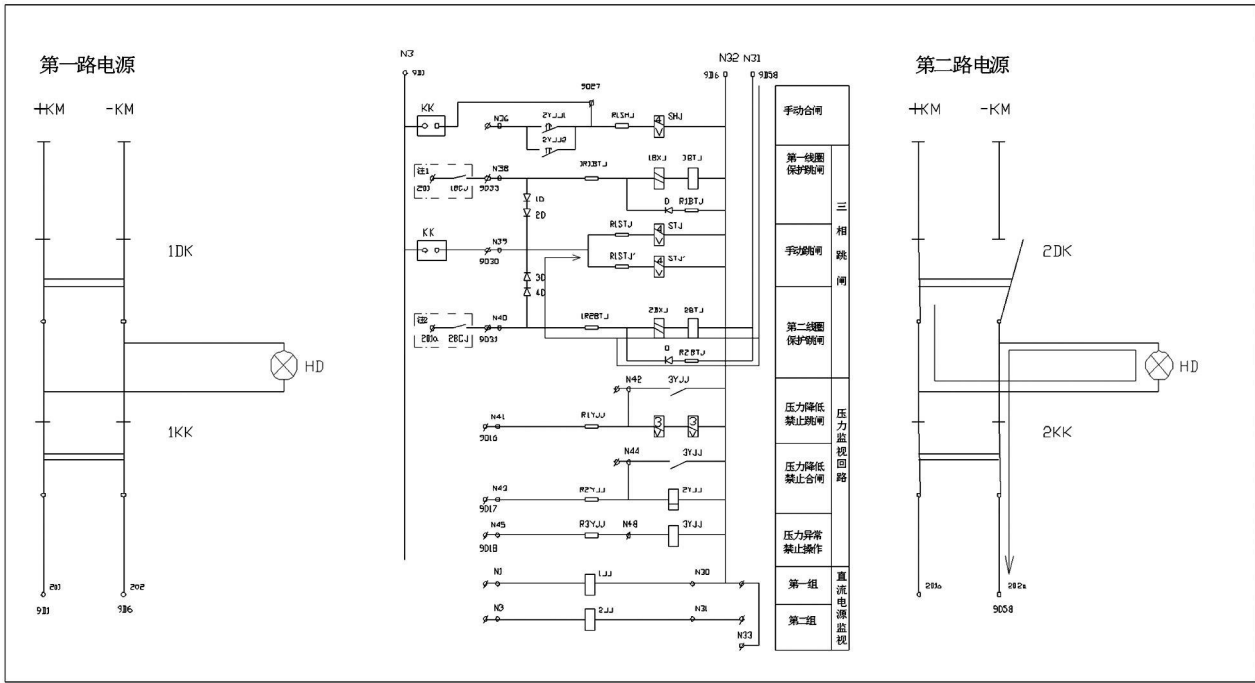


图 1 直流馈线屏与保护屏直接电源联系图





注 1: 1BCJ 表示第 1 套主变压器保护动作出口接口, 201 表示第 I 路控制正电源;
注 2: 2BCJ 表示第 2 套主变压器保护动作出口接口, 201a 表示第 II 路控制正电源。

图 3 开关误动回路故障分析图

极管去沟通开关操作箱的手跳继电器回路,两保护出口触点一端分别接 I、II 路电源。图上两路电源间连接的反向二极管从表面上看隔离了 I、II 路电源)。误动原因已有了线索。正脉冲从哪里来? 是冲击感应吗? 不可能。为什么只有在拉合 II 路电源开关时才会出现? 进一步对 II 路电源进行查找,将 II 路电源引至保护屏的电缆解开,在拉合 II 路电源开关时用指针式万用表分别测试解开处电缆芯正负极的对地电位,多次试验过程中测得解开处电缆芯正极线有时会变成负电位,负极线有时会变成正电位。经仔细检查发现问题出在直流馈线屏各支路馈线运行监视灯上(直流各支路为了监视其运行状况在每路开关的负荷端正负极间并接了一个指示灯)。以上问题完全查清了,原因就是厂家在设计保护启动双跳圈回路时在电气上没有分开,当合上 I 路操作电源正常后,操作 II 路电源时由于开关负载端正负极刀口接触不同步,正极先接触,使得正电经监视灯后回到负载负极端。同时正电又经正向二极管启动了手跳继电器回路回到了 I 路直流电源的负极,使开关跳闸。

2 总结分析

220 kV 变电站值班员在进行直流电源恢复操作时,该站 2 号主变压器高压侧(202)开关异常跳闸,

且无保护出口,现就此异常情况进行分析。该变电站 2 号主变压器保护配置许继电气股份有限公司,型号为 W BH-100 型微机变压器成套保护装置。附图 2 为厂家随屏提供的主变压器保护高压侧(220 kV)双跳圈操作回路图。其中 2 号主变压器 1 号保护屏电源、202 开关第 I 路控制电源由 1 号直流馈电屏(1DK 空开)提供;2 号主变压器 2 号保护屏电源、202 开关第 II 路控制电源由 2 号直流馈电屏(2DK 空开)提供,如图 1 所示。

变电站值班人员进行直流操作时,先合上第 I 路直流电源 1DK,再合第 II 路直流电源 2DK 时,由于 2DK 合上时正负极接触不同步,使得 2DK 正极下端头先导通,正电源通过先导通的 2DK 正极,经直流馈线监视灯窜入 2DK 负极下端头,导致第 II 路电源负极带上正电(脉冲),直接导通手跳回路,引起开关无保护跳闸,具体沟通回路:201a→TD→202a→9D58→R2B7J→1R2B7J→4D→3D→R I S7Y(R I S7Y)→S7Y(S7Y)→9D6→202,如图 3 所示。事后通过试验证明拉合 2DK 开关,正负极的确存在导通不同期现象,在 2DK 负极下端头(202a)可能出现波动,202a 波动幅值的大小与合上拉开第 II 路控制电源开关快慢有关,范围在几伏至一百伏之间,可能沟通控制回路的手跳继电器 STJ 造成 202 开关不明跳闸。进一

(下转第 55 页)

顺序,不但给安装设计带来不便,也给运行维护带来很多麻烦,因此这种方案也不可能做到。下面结合电容器、谐波以及港口用电的实际谈一点自己的认识。

3 实施对策

综合以上分析,已经了解了高次谐波对电力电容器的影响,谐波的抑制方法以及实际运行中存在的具体问题。同时也知道高次谐波并非仅对电力电容器造成危害和影响,谐波对电力系统中的其它设备同样存在危害和影响。那么如何才能解决好谐波的影响与危害问题呢,通过上面的分析已经知道,任何一种固定电抗率的电抗器都不可能多次谐波都能起到很好的抑制作用,并且谐波一旦大量流入电力系统危害其它设备,影响同样严重。因此必须综合地考虑无功电容补偿设备对谐波的抑制与对系统其它设备的影响问题。

根据国家电力电容器设计制造规范,电力电容器设计制造中已经考虑了一定谐波分量影响。综合考虑电力系统安装并联电容无功补偿设备是为了实施无功功率补偿的主要目的,因此,电力系统并联电容器的防谐、抑谐串接电抗器不必考虑,同时也不可能达到一个完全理想的状况,串接电抗器的电抗率应在保证电力电容器不受损害的情况下,尽量多吸收一些系统中的谐波电流减小谐波对系统中其它电器设备

影响。因此笔者建议电力系统的防谐、抑谐应按以下原则来实施。

(1)在保证电力电容器不受损害的前提下,并联电容器串接电抗器的电抗值宜适当选择一个下限,尽量避免注入系统的谐波电流过大,从而给系统中其它设备和电网带来不利影响。

(2)根据规范,在电容器允许过电流、过电压等范围内,允许电容器吸收一部分谐波,以减少谐波过多进入系统造成损坏。

(3)对于大型设备和主要谐波源等应实施就地治理和补偿,避免过高和超标谐波流入系统,给电容补偿设备和其它设备造成影响。

(4)对于系统中相对复杂而又难以控制流入的谐波问题,通过测试分析,可以采取滤波、抑波相结合的治理方案进行解决。

(5)对于准备购置的新设备或新建的变电所等,应参照类似或已有的成熟运行经验作好谐波的治理和抑制工作。

总之,谐波的问题比较复杂,影响也比较严重。既要做好并联电容器对谐波的抑制防范问题,同时更要解决好谐波对其它设备和电网的影响。根本办法就是从源头抓起,对系统内部影响较大的谐波源的负荷实施就地治理,减少过多的谐波电流流入系统,这是最有效也是最根本的解决途径。

(收稿日期: 2009—10—18)

(上接第 49 页)

步仔细分析该控制回路图发现:厂家设计人员为了保护动作可靠,设计第二套主变压器保护动作触点(2BCJ)启动第二跳圈,同时导通正向二极管(3D、4D)启动手跳继电器;而进行手跳操作时,用反向二极管(3D、4D)跟第 2 套保护跳闸回路隔离,因此两路控制电源不是完全独立的(两路直流电源共用负极端 9D6),在进行两路直流控制电源操作时,容易互相干扰,二极管(3D、4D)失去隔离作用。

3 改进要求

(1)将第二套主变压器保护动作触点(2BCJ)启动第二跳圈的同时,不应再启动手跳继电器,从控制回路图分析,需要将现有接线正向二极管(3D、4D)断开,将 I、II 路操作电源在电气上彻底分开。

(2)要求直流屏厂家在配置馈线监视灯时,应考虑其阻值,应尽量大(5 000 Ω)。

(3)保护在新安装时必须检查双电源供电的操作回路不能发生电气的绞接,试验方法:用万用表电阻档检查,必要时用兆欧表对两路之间进行绝缘检查,双路供电时断开一路电源用万用表直流电压档测试断开的一路正负极分别对地有无电压,彻底分开绞接回路。

参考文献

- [1] WBH—100 型微机变压器成套保护装置技术说明书 [Z]. 许继电气股份有限公司.
- [2] 国家电网公司,防止电力生产重大事故的二十五项重点要求;继电保护实施细则 [Z]. 2002.
- [3] 国家发展和改革委员会,继电保护和电网安全自动装置检验规程 [Z]. 2006.

(收稿日期: 2009—12—10)

“V”型悬垂绝缘子串设计研究

刘 然

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘要:系统地分析了“V”型悬垂串设计中应考虑的技术问题,从“V”串夹角、受力分析、电压分布、间隙取值、塔头尺寸、金具设计等多方面入手,在“V”串受压及预防球头脱落两方面归纳出较为重要的结论,使“V”型悬垂串的设计更加科学合理。

关键词:“V”型串;设计研究;受压;防脱落

Abstract: The technical problems which should be considered in the design of V-shaped suspension insulator string are analyzed systematically. As viewed from the V-shaped string angle, force analysis, voltage distribution, the gap value, tower head size and fittings design, a more important conclusion is summarized in the V-shaped string compression and avoiding the ball dropping, which makes the design of V-shaped suspension insulator string more scientific and reasonable.

Key words: V-shaped insulator string; design and research; compression; avoiding dropping

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)03—0050—03

随着中国经济持续高速发展,电力建设与城镇规划的矛盾不断显现,尤其在经济发达平原地区,线路走廊问题显得尤为突出。如何减少高压线路通道宽度,降低环境影响,是线路设计的主要责任。因此多回路紧凑型、紧缩型线路的研究显得非常重要,而“V”型串技术作为紧凑型线路中的一项关键技术,更值得深入学习和探讨。

紧凑型和紧缩型输电线路采用“V”型绝缘子串可以有效限制导线摆动幅度,从而减小塔头尺寸及走廊动静态宽度,由于三相导线距离较近,线路自然输送功率及电磁环境均优于普通线路。以下就“V”型串在本公司 500 kV 的设计应用作一总结。

1 “V”型绝缘子串的夹角选择

“V”型绝缘子串的夹角大小直接影响塔头尺寸和绝缘子串的受力情况。根据收集的大量国内外研究和设计资料,“V”型串的夹角基本处在 $70^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 之间。夹角小时,塔头中相下部尺寸增大,且在不大的风荷时,背风肢绝缘子串即处于受压。夹角大时,塔头中相上部尺寸增大,绝缘子串所受拉力增大,但背风肢绝缘子串在较大风荷时才处于受压状态。为避免最大风偏时,绝缘子串过度受压导致绝缘子损伤或脱落,“V”型绝缘子串的夹角之半宜大于或等于最

大风偏角。常规的“V”型串设计为了避免绝缘子承受压载荷,往往采用较大的“V”型夹角。根据西南电力设计院与武汉高电压研究所进行的“V”型绝缘子串受压试验研究的成果,当迎风肢绝缘子最大偏移角在 $9^{\circ} \sim 11^{\circ}$ 时,钢脚应力值与“V”型串夹角有关,夹角 110° 时应力大,夹角 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 时应力小(此时最大水平荷载仅为 110° 时的 50% 左右)。对于盘形悬式绝缘子当 V 串夹角 110° 时,考虑到钢脚安全系数不宜小于 2.5,建议其迎风肢绝缘子串的最大偏移增大角控制在 7° 以内;对于夹角 $90^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 的“V”型串,其迎风肢绝缘子串的最大偏移增大角可以增大 $9^{\circ} \sim 11^{\circ}$ 。考虑到绝缘子受压出现频率、冲击效应和电气间隙减小等问题,在保证导线摆动幅度以及受压绝缘子的最大应力限制在允许范围内的前提下,实际工程设计中可减小“V”型串的夹角 $7^{\circ} \sim 10^{\circ}$,从而进一步缩小塔头尺寸和走廊宽度。例如,500 kV 绵德线最大设计风速为 30 m/s 在 kV 系数为 0.8~0.72 时,对应风偏角为 $53^{\circ} \sim 58^{\circ}$,如不考虑“V”型串受压,则夹角将超过 110° ,荷载将明显增大,不但需要加大绝缘子的使用型号,而且增大绝缘子的劣化率。经综合考虑后,该线路最终全部采用合成绝缘子,并按受压 8° 设计,夹角取 $90^{\circ} \sim 100^{\circ}$,不但确保了线路安全,而且具有较好的技术经济性。

2 “V”型绝缘子串的荷载分析

“V”型绝缘子串的荷载复杂,不但与垂直荷重有关外,还与“V”型串的夹角、水平荷重和纵向荷重有关。“V”型绝缘子串的夹角越大,垂直、水平、纵向荷重越大。根据国外运行经验,通常在杆塔设计时,要使“V”型串挺直,即承受的最小垂直荷载 $\geq 5\text{ kN}$,且 2 个绝缘子分支的交角不小于 90° 。过去一般认为“V”型串背风肢绝缘子串不宜受压,以免绝缘子在无拉力状态下球头会在钢帽碗口脱出而造成掉串。但从实际运行和实验情况来看,是允许其中一串绝缘子受压的,其弯曲不导致绝缘子盘体之间的危险接近或破碎为条件,弯曲达 $1/10$ 是可接受的。实际运行中,绝缘子多数时间是处于无风或风速不大的环境中,所以“V”型串比悬垂串的运行荷载小,其绝缘子的劣化率也有所降低,虽然“V”型串的绝缘子数量比悬垂串增加一倍,但整串绝缘子的劣化量与悬垂绝缘子持平。据四川地区运行部门反映,采用“V”型串后,绝缘子的劣化片数并未明显增加,这与国外的运行经验是一致的。

3 “V”型绝缘子串放电特性和间隙取值

3.1 “V”型绝缘子串的电电压分布

“V”型串的两绝缘子串系倾斜布置,受铁塔横担和塔身的影响明显增强。相对于悬垂串而言,靠导线头几片绝缘子上的电压降很大,电压分布更不均匀,可采用安装均压环的措施进行改善。对于最末几片绝缘子,由于其对铁塔横担和塔身的对地电容增大,改善了这几片绝缘子的电压分布,电压分布相对较均匀。另外,由于另一绝缘子串的存在,对塔头空间的电场分布及该绝缘子串的电压分布都有影响。总体而言,“V”型串倾斜布置有利于绝缘子串的电压分布。

3.2 “V”型绝缘子串的空气间隙取值

由于“V”串工频电压统计配合系数(I串 1.4 V串 1.5)及操作过电压统计配合系数(I串 1.1 V串 1.25)均大于 I串,因此 V串工频、操作间隙值大于 I串,但因“V”串限制了导线风偏摆动,塔头尺寸仍然是明显优于 I串。例如,500 kV 绵德线,海拔 500~700 m,各工况间隙值见表 1。

根据间隙取值,规划的 ZMVA41、ZMVA42 直线塔间隙圆及塔头尺寸见图 1 和图 2。

表 1 工况间隙值				
工况(单回)	雷电过电	操作过电	工频电压	带电作业
I串空气间隙 /m	3.30	2.70	1.30	3.20
V串空气间隙 /m	3.30	3.00	1.40	3.50
同时风速 /(m·s) ⁻¹	10	15	30	10

注:带电作业间隙,对操作人员需要停留的工作部位,还应再考虑人体活动范围 0.3~0.5 m。

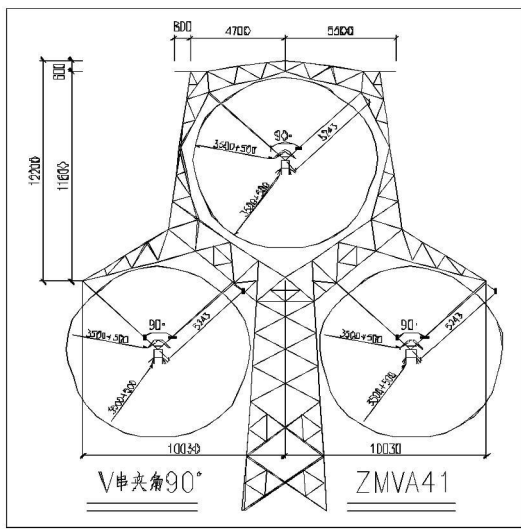


图 1 ZMVA41间隙圆及塔头尺寸

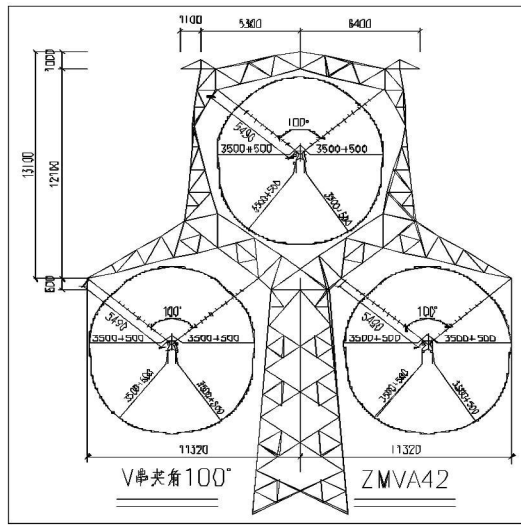


图 2 ZMVA42间隙圆及塔头尺寸

4 “V”型绝缘子串金具设计

(1)力求各部件受力合理,特别是“V”型串与铁塔接点及绝缘子两头连接金具的设计应合理。

(2)连接要紧凑,绝缘子串长与总长之比最好大于 0.85。若下部金具太长,将增大塔头尺寸并降低绝缘子串的闪络电压,其上部金具要考虑施工运行中调节方便。

(3)力求改善导线侧绝缘子电压分布,抑制无线

电干扰。

(4)适应带电检修的要求。

对于“V”型串而言,合成绝缘子与盘型绝缘子的链接不同,合成绝缘子上没有铰接点,刚性容易显现,两端球头与碗头连接处容易形成球头与 R 销的挤压,造成 R 销变形,导致绝缘子脱落。目前采取的防球头脱落措施虽然在一定程度上限制了“V”型合成绝缘子串脱落,但仍存在缺陷。若从根本上解决导线合成绝缘子“V”型串球头脱落问题,必须取消合成绝缘子上的球头、碗头联结结构,换以环、环联结形式,消除球头对 R 销的挤压问题。如果将合成绝缘子的导线侧端部修改为环,或采用单板碗头,通过两个 U 型环与联板连接,增加铰接点,使其不受弯矩影响,从根本上杜绝球头局部应力集中疲劳断裂事故。对于双联和多联绝缘子,由于导线联板和绝缘子球头间有多个铰接点不存在单联球碗联接的问题,不用进行改动,按常规设计即可。

两方案各有优缺点,修改绝缘子导线侧端部,将球头改为环形结构,其优点是不增加连接环节,“V”

型串的串长不增加,因此塔头尺寸不增加,但是合成绝缘子厂家需重新进行金具设计;在不改动绝缘子的情况下,增加铰接点,也可从受力上解决受压问题,但是需要增加绝缘子串的长度,以 210 kN 绝缘子串为例,“V”绝缘子串单肢长度需增加 220 mm,但对于超、特高压铁杆塔尺寸来说,影响很小。

5 结 论

综上所述,在同等条件下,输电线路采用“V”型串悬挂方式,铁塔结构尺寸紧凑,“V”型串受力科学合理,开角稳定,防雷性能优良,可有效防止绝缘子串污闪、冰闪、雨闪等事故,还具有节约土地资源、减少房屋拆迁、降低林木砍伐量,减少水土流失等经济效益、环境效益和社会效益。超、特高压输电线路采用“V”型串悬挂方式既体现了国网公司建设“两型三新”输电线路的设计理念,又符合节约型社会发展的需求。

(收稿日期: 2010—03—10)

(上接第 2 页)

3 讨论与结语

就工程应用而言,接地体暂态特性应注意以下几个方面。

(1)接地体散流作用应视为接地阻抗,只有在特殊条件下,如低频电流作用(工频、直流)下可将其视为接地阻抗。此外,一些学者采用瞬时接地电阻或动态接地电阻概率描述接地全暂态特性是不太合适的,因为它隐藏了接地装置的本质参数阻抗的作用。采用冲击系数概念表述冲击接地电阻的方法于工程应用是十分有效的,它既避免了现场工程应用人员去测量复杂且难以准确测量的接地阻抗,又能大概了解雷电流作用下,接地体最大电位升。

(2)接地装置等电位电路模型只适用于低频电流作用情况下散流特性分析,高频电流情况下,波传播过程及由接地体电感、电阻引起的电位降将对接地电位分布造成很大影响。

(3)接地体暂态电流作用下,接地体将呈有效散流区域,如高土壤电阻率地区采用埋设伸长接地体以降低接地电阻,这一措施对降低工频接地电阻很有效,但对降低冲击接地电阻效果甚微。因此,工程设

计时应计算接地体暂态电流作用时有效散流区域,以降低不必要的材料浪费。

参考文献

- [1] Silverio Visacro A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents[J]. IEEE Transactions On Power Delivery, 2007, 22(1).
- [2] A. M. Mousa The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes [J]. IEEE Trans Power Del, 1994, 9(3); 1669—1677.
- [3] A. C. Liew and M. Darveniza Dynamic Model of Impulse Characteristic of Concentrated Earths[J]. Proc Inst Elect Eng, 1974, 121(2); 123—135.
- [4] S. Visacro and C. Portela Soil Permittivity and Conductivity Behavior on Frequency Range of Transient Phenomena in Electric Power Systems[C]. the Symp High Voltage Engineering Braunschweig Germany 1987.
- [5] S. Visacro and C. Portela Modeling of Earthing Systems for Lightning Protection Applications Including Propagation Affects[C]. in Proc Int Conf Lightning Protection Berlin Germany 1992; 129 - 132.
- [6] 杨琳, 李建明. 冲击接地电阻测量装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11); 93—96.
- [7] 张宝平, 何金良, 康鹏, 等. 冻土冲击特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16); 143—147.

(收稿日期: 2010—01—26)

接地网地面电位分布计算分析

李欣¹, 龙辉², 戴玉松¹, 李建国³

(1. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039;

2. 四川省电力公司资阳公司, 四川 资阳 600021; 3. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:利用编写的软件计算分析恒定电流通过变电站接地网时地面的电位分布与电位梯度分布, 分析接地网的跨步电压和接触电压。

关键词:接地网; 电位分布; 跨步电压; 接触电压

Abstract: Using the edited software the potential distribution and potential gradient distribution of earth surface when constant current flowing through ground grid of substation are calculated and analyzed. The step voltage and contact voltage are also analyzed.

Key words: ground grid; potential distribution; step voltage; contact voltage

中图分类号: TM751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0056-02

过去认为接地网的接地电阻越小就越安全, 测量评估一个接地网的安全时, 常常看接地电阻是否满足要求即可。实际上, 接地电阻与安全的关系并不简单。接地电阻比较低的接地网, 在某些情况下也可能存在危险。安全与不安全主要是指发生接地故障时, 接地网流入大地的电流是否在地网内部及周围, 或者在构筑物或接地设备构架与附近地面之间产生危险的电位差, 以及是否对一次或二次设备发生反击, 产生危害。因此, 电位分布和电位梯度对分析接地网的安全性是十分重要的。

变电站接地网的接地参数由于受到接地网形状和大地结构等因素的影响, 很难得到解析解。从 1972 年以来, 国内外学者对接地系统接地参数的数值计算进行了大量的研究, 并将各种数值计算方法应用到了接地参数的计算中, 如模拟电荷法、边界元法、有限元法、矩量法和有限差分法等。在结合各种接地网数值计算方法的基础上, 编写了能用于复杂形状接地网的软件。

此前有许多文章主要针对不同土壤电阻率, 不同土壤层的接地电阻计算。在电位分布计算方面, 由于电击事故的主要类型可分为接触电击、跨步电击和转移电击这三类。之前的文章多为研究接触电击的情况, 计算出接触电位差。由于通过计算可知, 一个网格电压最低点在网格中心点, 所以之前的计算大多是计算网格中心点和节点的电位。

主要介绍采用自开发的软件对接地网通过恒定

电流时地表的电位分布进行计算, 计算出地网的接地电阻及由不同 X 值、Y 值和代表电位值的 Z 值组成的电位分布矩阵, 并把计算结果通过 ORIGIN 软件进行分析, 能够比较清晰的看到整个地网地表的电位分布, 而不像以前多是看见地表上一条线的电位分布。同时可以看到地网不同步长情况下电位梯度的分布。

1 计算原理

设恒定电流 I 由接地极网分散泄流流入大地, 土壤电阻率为 ρ 以无穷远处为电位参考点。边界条件: $V_{\infty} = C$ 式中 C 为常数。

把地网分为 n 段, 设在第 i 段上的电流为 I_i 由叠加定理可得到通过地网泄漏的电流 I 在 P 点产生的电位: $V_p = \sum_{i=1}^n R_{ij} I_i$

同时设 R_{ij} 为第 j 段施加单位电流源时在第 i 段上产生的电压, 在此定义为互电阻, 用 R_{ij} 表示; 当 $i=j$ 时, R_{ij} 为自电阻。上式变为: 根据边界条件, 设电极电位为 V_G , 则: $\sum_{j=1}^n R_{ij} I_j - V_G = 0$ 再加上 $I = \sum_{j=1}^n I_j$ 可得矩阵: $RI - AV_G = B$, 式中,

$$I = [I_1, I_2, \dots, I_n]^T \quad A = [1, 1, \dots, 1, 0]^T$$
$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [0, 0, \dots, 0, 1]^T$$

根据接地电阻的定义,即接地电阻为接地体的电位与流过接地体的电流之比,即

$$R = V_G / I$$

当 R_{ij} 两段导线间距离远大于导线长度时,可把导线作为点源处理。当距离近时可取导线两端和中点这三点,分别求解后再取平均值,以此求出 R_{ij} 。将 R_{ij} 代入矩阵就可求得 V_G 和 I_0 。

求解 R_i 时 i 导线距 P 点距离远大于 i 导线长度时,把导线作为点源处理。距离近时可将导线分为 m 段,每段电流为 d_k^i ,且 $\sum_{k=1}^m d_k^i = 1$ 。使用公式

$$V_{pk}(r, z) = \frac{\rho}{\pi^2 a b^2} \int_0^\infty \frac{K_0(\lambda r)}{K_1(\lambda a)} \cos \lambda z \sin \frac{b \lambda}{2} \frac{d \lambda}{\lambda^2} \text{ 求解。}$$

由于接地体是在半无限介质,则可采用镜像法求得 $V_{pk}(r', z')$ 。点 P 的电位为 $V_{pk}^i = V_{pk}(r, z) + V_{pk}(r', z')$ 。

$$\text{则 } R_i = \sum_{k=1}^N V_{pk}^i d_k^i.$$

得出 R_i 和 I_i 后由 $V_p = \sum_{i=1}^n R_i I_i$ 就可得到土壤中任一点的电位。

2 接地网电位分布计算分析

计算选用的是长 350 宽 250 的变电站的地网,地网分布图如图 1。

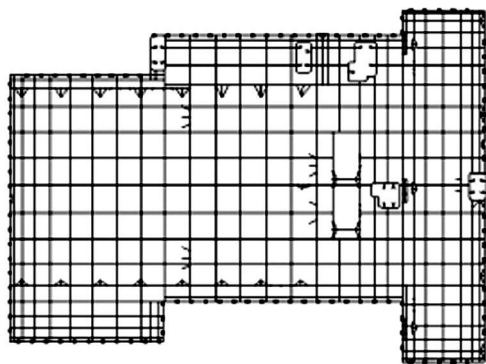


图 1 地网分布图

导体直径采用地网设计的尺寸,设土壤电阻率为 $240 \Omega \cdot m$,注入的恒定电流为 10 kA ,计算步长为 1 m 。通过软件计算,得出如图 2 的电位分布矩阵。矩阵内的数值为代表电位值的 Z 值,矩阵的行坐标为电位分布中的 X 坐标,矩阵的列坐标为 Y 坐标。通过所得的 X, Y, Z 值用 ORIGIN 就可以画出电位分布的三维图,如图 3。由图 3 可以清晰的看见地网电位分布在网格线上的电位高,节点处电位最高,在网

格中心点电位最低。但为了更准确的了解高电位点在地网的位置,可以用 ORIGIN 画出由亮度表示电位高低的电位分布平面图,如图 4。其中亮度越高的地方代表电位越高,亮度越低的地方代表电位越低。由图可看到亮度高的地方主要集中于地网中心的节点处,代表这地网中心的节点电位最高。亮度在网格的中心处比周围都低,代表网格中心处的电位比较低。最高电位与最低电位的大致位置可以从图中得到,然后在之前图 2 的数据矩阵中就可以得到最高电压值,最低电压值及代表各自位置的坐标。其中通过最低电压可以求得最大接触电压。由图 3 和图 4 可见地网边上的网格中心点电位比较低,但电位分布最高电位在 X 坐标 300, Y 坐标 250 附近,最低电位在 X 坐标 260, Y 坐标 260 附近,由此可以清晰发现地网的危险区域。

由之前软件计算出的数据还可以得到步长为 1 m 地网电位梯度的分布矩阵,同上可以画出地网电位梯度分布的三维图,如图 5。同时也可以画出由亮度代表电位梯度大小,其中亮度越大的时候电位梯度越大的地网电位梯度分布平面图,如图 6。由图 5 和图 6 可见地网周边的亮度比较高,但地网梯度最高点在 X 坐标 300, Y 坐标 250 处。通过地网分布图分析,估计是由于该区域接地过于密集导致泄流电流在该位



图 2 电位分布矩阵

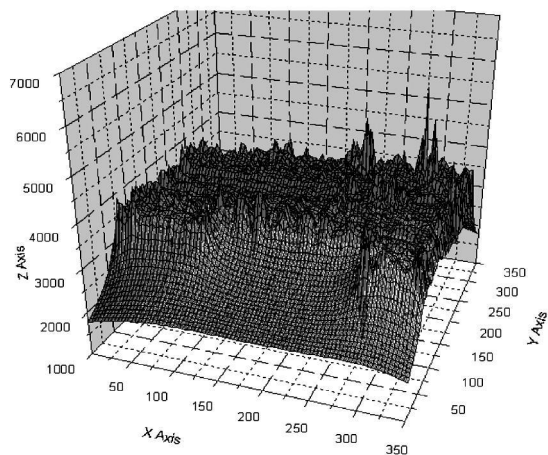


图 3 电位分布三维图

(下转第 91 页)

和农民烧山、用火情况,加强与沿线政府的沟通,加强对沿线农民的宣传,防止违规烧山、用火可能对线路造成的危害。对新投的水电送出线路要及时收集此类信息,提前作好预防工作。

(7)及时处理由于线路对档距中央边坡风偏距离不够的情况,采用增加杆塔、提高杆塔高度、对突出边坡进行开方等措施来防止由于边坡距离不够可能

引发的线路故障发生。

参考文献

[1] 陶元忠,包建强.输电线路绝缘子运行技术手册[Z].北京:中国电力出版社,2003.

[2] 胡毅.输电线路运行故障分析与防治[M].北京:中国电力出版社,2007.

(收稿日期:2010-03-02)

(上接第 57 页)

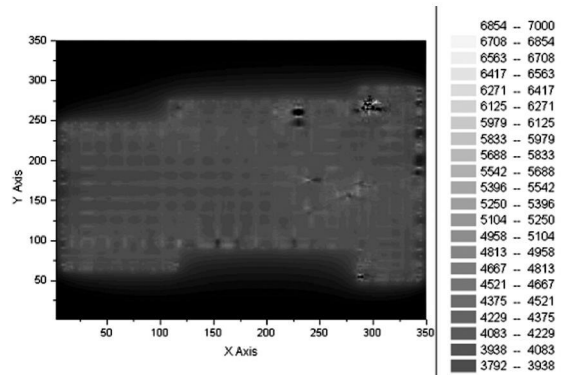


图 4 电位分布平面图

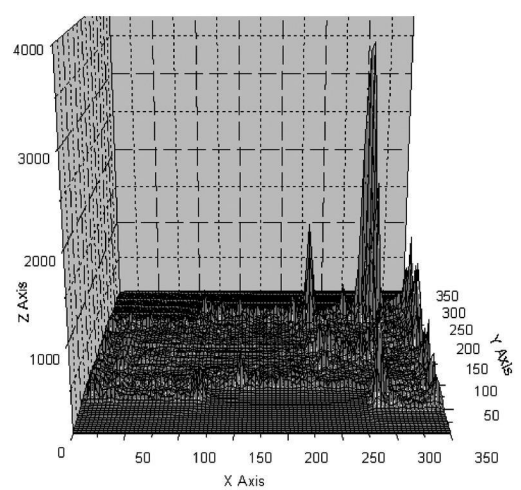


图 5 地网电位梯度分布三维图

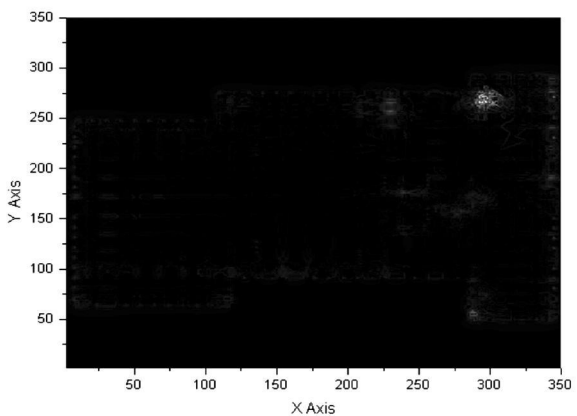


图 6 电位梯度分布平面图

置比较集中使电位升高。

为效验该软件计算的效果,计算了一个 4 乘 4 的网格,在计算所得的矩阵中取过节点和网格中心点的多条平行线,画出各条线的电位分布情况,与文献 [5] 中采用水槽中模拟测量的结果进行比较。其中计算所得的电位分布线与文献 [5] 采用水槽模拟测量所画出的电位分布线比较接近。所以可以用此软件对地面电位分布进行仿真计算。

3 结 论

运用前面提到的软件对变电站大型接地网的电位分布进行计算,计算结果通过 ORIGIN 进行分析,可以清晰地看到电位分布的三维图和用亮度代表电位值的平面图,能更方便对接地网电位分布的分析,从而找到最大的接触电压和接触电压所在位置。同时软件计算跨步电压的计算结果,通过 ORIGIN 分析得到的图可以清晰看见在地网中跨步电压高的危险区域。

所采用的方法能对各种地网分布方式进行计算,有助于对接地网电位分布的研究。同时可以对大型变电站的接地网进行计算,分析该地网的安全情况,有助于地网设计更加安全可靠。

参考文献

[1] 张丽萍.一个实际变电站接地网的计算机模拟计算与分析[J].电工技术学报,2000,15(1):72-75.

[2] 李中新.变电站接地网模拟计算[J].中国电机工程学报,1999,19(5):76-79.

[3] 何金良,曾嵘.电力系统接地技术[M].科学出版社,2007.

[4] 姚凤.变电站接地网数值计算[J].安徽水利水电职业技术学院学报.2007,7(1):1-3.

[5] 李如虎.不同布置方式的接地网的地面电位分布及计算[J].供用电,1990(3):12-15.

(收稿日期:2009-12-25)

四川特高压投运初期的问题 and 对策

朱国俊, 王 滨

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要:四川是全国特高压建设的主战场。针对四川特高压电网建设、四川电网将面临的问题,提出了相应建议。

关键词:特高压输电;四川电网;技术水平

Abstract: Sichuan is the main battlefield of UHV power grid construction in China. Aiming at the construction of Sichuan UHV power grid and the problems faced by Sichuan power grid, the corresponding suggestions are put forward.

Key words: UHV transmission; Sichuan power grid; technical competence

中图分类号: TM721 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0062-02

1 四川特高压建设现状和发展趋势

四川是全国特高压建设的主战场。按照国网公司规划,至 2020 年,四川将建成“四交八直”的特高压电网。自 2007 年以来,四川特高压建设全面推进,为四川正式步入特高压、大电网的新时代奠定了坚实的基础。

1.1 目前四川特高压建设情况

(1)向家坝—上海 ±800 kV 特高压直流输电示范工程

本工程于 2007 年 4 月 26 日获得国家发改委会的核准,2007 年 12 月 21 日开工建设。2009 年 11 月 13 日向上(向家坝—上海)线全线贯通,12 月 16 日线路工程全面竣工,12 月 26 日奉贤换流站极 I 800 kV 直流系统和直流线路 800 kV 带电成功。2010 年 1 月 26 日泸州复龙换流站 500 kV 线路成功投运,为复龙换流站调试提供了电源。目前复龙换流站站内交流场全部成功投运,正在对极 I 低端直流系统进行带电调试,极 II 的低端换流变压器正在紧张的安装,高端换流变压器正在试验和运输到宜宾途中。

(2)锦屏—苏南 ±800 kV 特高压直流输电工程

本工程于 2008 年 11 月 14 日获得国家发改委会的核准,按照国家电网公司里程碑计划,2009 年秋季全面开工建设,目前裕隆换流站“三通一平”工程已经结束,进入换流站土建阶段。裕隆换流站外接 35 kV 站用电源已经建成投运。裕隆换流站自来水供水工程也建成投入使用。配套的 500 kV 水电站送出工程

即将开工建设。

(3)雅安—南京 1 000 kV 特高压交流输电工程

按照国家电网公司特高压规划,到 2012 年要建成“两纵两横”的规模。作为“南横”的雅安—南京 1 000 kV 特高压交流输电工程目前正在办理前期核准所需的支持性文件,截至目前已经取得站址、特高压线路用地预审、地震和地灾批复,按照里程碑计划,今年争取工程获得国家发改委会的核准。

1.2 四川特高压电网发展趋势

特高压交流试验示范工程顺利投运,开启了特高压建设的新篇章。随着特高压其他项目的建设,将迎来特高压电网建设的高潮,特高压电网发展也将在新的技术上改进和提高。如研究制造更大容量的 1 500 MVA 交流变压器、更加可靠灵活的可控系统、直流 6 英寸晶闸管、更加节省土地资源的紧凑型输电线路设计、更加优化的线路走廊与变电站布局、特高压智能电网、甚至更高电压等级的甚高压电压等级序列。

四川是全国特高压建设的主战场,是“一特四大”战略中的大水电基地。随着四川电网建设与电源开发的加快发展,四川电网将日益成为联通西南大水电基地与“三华”电网的重要枢纽,不仅成为国家坚强智能电网的重要电源支撑、安全支撑,也将成为实现全国电力资源优化配置的重要平台。四川电网在国家电网中的重要支撑作用将得到全面凸显。

2010 年~2015 年,向家坝、溪洛渡、锦屏、川湘特高压直流、雅安—重庆—万县—荆门 1 000 kV 特高压交流将相继投运,四川电网将发展为特高压交直流并列系统。特高压交流或直流故障对四川电网安全

稳定性的影响较大,四川电网内部的 500 kV 系统严重故障也可能导致特高压直流闭锁或特高压交流解列,特高压直流输电需要坚强的交流输电网的支持,这样既可发挥交流联网优势,又可利用直流功率快速调节的特点改善系统的稳定特性,有利于综合发挥交流和直流输电的优势。

2 特高压投运初期四川电网面临的问题

2.1 投资模式的变化要求增大投资能力

国家电网公司在 2009 年特高压工作会议上对特高压投资方式已明确作出:今后的特高压直流工程送端由国家电网公司总部投资,受端由省公司投资;特高压交流工程送、受端均由相应的网、省公司分摊投资。四川省规划有众多的特高压工程及配套的 500 kV 工程项目,投资额巨大,投资模式的变化必然要求四川省电力公司增大对特高压工程的投资力度,以保证后续特高压工程的顺利建设,对省公司的投资能力提出了更高的要求。

2.2 管理模式的变化要求全面提高特高压技术水平

特高压直流示范工程复龙换流站由国家电网运行分公司负责运行维护,向家坝—上海特高压线路、接地极及接地极线路由四川省电力公司负责维护运行。特高压换流站送端 500 kV 线路由省调度中心调度,换流站、特高压线路、接地极及接地极线路由国家电网调度中心调度。崭新的管理模式给四川电力带来了新的机遇和挑战,四川省电力公司将面临全面接手运行维护、配合调度特高压电网的局面,这就要求省公司必须全面提高专业技术人员的特高压技术水平,为省公司运行维护、配合调度特高压电网提供智力支持和人员保证。

2.3 电网地位的提升要求提高驾驭大电网的能力

四川电网目前运行有 20 座 500 kV 变电站和约 6 500 km 500 kV 线路的庞大电网。到 2012 年四川境内特高压交流建成后,四川电网将成为国家电网系统内最大的交直流混联电网,内有特高压交流、特高压直流、±500 kV 直流及庞大的坚强的送端网络,四川电网作为西南水电基地、西电东送的送端将在整个国家电网中处于重要地位。电网地位的提升要求省公司全面提升驾驭大电网的能力,对安全生产、运行维护、检修、调度运行等提出了更高要求。

2.4 制约特高压直流外送功率和四川水电外送

2010 年复龙—上海特高压直流复龙近区电网结构薄弱,制约特高压直流外送功率,制约四川水电外送。

在向家坝机组投产初期,特高压向上直流可为四川水电提供外送通道。若 500 kV 宜宾—泸州双回线路不能与向上直流同期投运,复龙侧近区 500 kV 电网结构极为薄弱,直流输送功率 3 200 MW 主要由 500 kV 洪沟—泸州同塔双回交流线路提供,洪沟—泸州双回线正常运行时功率为 2 685 MW,当一回线路开断后另一回线路功率为 2 586 MW,复龙母线电压跌至 469 kV。泸州—复龙三回交流线路正常运行时功率为 3 232 MW,当一回线路开断后复龙站母线电压降至 460 kV。

以上分析结果表明,在 500 kV 宜宾—泸州双回线路不能同期投运的情况下,由于向家坝—上海特高压直流近区电网结构较为薄弱,难以满足 N-1 开断后系统安全稳定运行,在 500 kV 宜宾—泸州双回线路投运前无法送出 3 200 MW。而且向家坝—上海直流系统仅通过 500 kV 洪沟—泸州同塔双回线路同四川主网相联,而泸州电网通过 500 kV 洪沟—泸州双回、2 回 220 kV 线路与主网联网运行。500 kV 洪沟—泸州同塔双回故障跳闸后,向家坝换流站外送功率转移至 220 kV 系统,220 kV 线路将严重过载,泸州电网面临崩溃瓦解的可能。如果打开泸州电磁环网,影响泸州电网运行可靠性。因此,500 kV 洪沟—泸州同塔双回线路的稳定输送功率也将成为制约特高压向家坝—上海直流功率外送的主要因素之一。

500 kV 宜宾—泸州双回线路投运后,能否满足向家坝—上海特高压直流单极送出功率 3 200 MW,需要专题研究。

2.5 电网调度运行协调控制策略复杂

四川特高压交、直流输电系统故障的相互影响,电网调度运行协调控制策略复杂。

四川西部水电基地外送采用特高压交、直流并列运行的输电方案,直流闭锁故障后,大量功率转移交流系统,交流输送功率增加,稳定水平降低;交流系统故障,电源出力受阻,会引起送端机组失步。为减少特高压交、直流输电系统故障对电网的冲击,对于特高压交、直流并列运行的输电方案采用多回直流之间的协调控制是必要的。

(下转第 76 页)

互、计算能力和储存空间带来巨大的影响。通过电力云的建立,在完全不改变现有系统内部广域网和设备的情况下,最大限度挖掘、整合系统的计算和储存能力,极大提高当前系统的整体性能,为电网快速仿真建模,电网全方位实时计算分析提供“超级计算能力”;增强电网的扩展性,减小电网扩建投资,为智能电网在中国的建立和实现提供强有力的技术支持。

参考文献

- [1] 张伟,沈沉,卢强.电力网格技术初探(一)[J].电力系统自动化,2004,28(22):1—4.
- [2] 杨胜春,姚建国,杨志宏,等.网格技术在电力调度信息化中的应用的探讨[J].电网技术,2006(22):7—12.
- [3] Dikaikos M. D., Katsaros D., Mehra P., et al Cloud Computing Distributed Internet Computing for IT and Scientific Research[J]. Internet Computing IEEE, 2009, 13(5):10—13.
- [4] 李雅轩,杨春晖,田军夏.中小企业信息化建设的计算模式——云计算[J].河北企业,2009(6):70.

- [5] 辛耀中.电力信息化几个问题的探讨.电力信息化[J],2003,1(3):20—23.
- [6] 孙珂,沈沉,梅生伟,等.基于网格技术的电力企业信息资源整合方案[J].电网技术,2007,31(22):80—84.
- [7] IEC 61970—1, EMSAPI—Part 1: Guidelines and General Requirements[S].
- [8] IEC 61970—2, EMSAPI—Part 2: Glossary[S].
- [9] 杨卫东,徐政,韩祯祥.电力系统灾变防治系统:研究的现状与目标[J].电力系统自动化,2000,24(1):7—2.
- [10] 胡钧毅,房鑫炎.网格技术在电力系统事故预警中的应用[J].华东电力,2006,34(11):8—11.

作者简介:

杨旭昕(1988—),男,本科生,主要从事电力系统稳定与控制方向研究。

刘俊勇(1963—),男,教授,博士生导师。主要从事电力市场、分布式发电、灵活输电与电力系统可视化等方面的研究。

李宏亮(1970—),男,高级工程师。主要从事继电保护,自动化方向研究。

(收稿日期:2010—03—29)

(上接第 63 页)

3 建 议

(1)尽快配合研究提出适应于向家坝机组投产初期复龙—上海特高压直流大功率外送的四川电网加强方案。在向家坝机组投产初期,特高压向家坝—上海直流可为四川水电提供外送通道。根据复龙—上海±800 kV 特高压直流投运初期的系统稳定分析,四川电网不能满足向家坝—上海特高压直流投运初期送出 3 200~6 400 MW 功率要求,需要加强泸州和宜宾 500 kV 电网。

(2)需要加快深入开展四川电网对特高压电网的适应性研究。重点研究四川特高压多馈直流和交流系统之间安全性相互影响及协调控制策略、四川特高压多馈直流输电系统之间协调控制策略、四川交、直流混合输电系统动态稳定特性、特高压直流投运后与交流电网之间的无功控制策略等。

(3)开展特高压技术培训,提高驾驭特高压电网能力。向家坝—上海±800 kV 特高压直流输电示范工程计划于 2010 年 6 月底双极投运,届时四川省电力公司将管理特高压线路的运行、检修维护。随着其他特高压工程的建设投运,省公司面临更多的特高压电网管理职责。建议省电力公司加大对生产运行、变电检修、调度、仿真分析、带电作业等人员的特高压培训及人才培养储备,提高驾驭特高压电网能力。

(4)研究特高压接入对四川电网继电保护的影响。建立特高压接入后四川电网 RTDS 仿真模型,对国内外相关厂家的继电保护装置进行试验验证,研究试验过程中电气特性和保护动作行为,分析特高压接入对四川电网 500 kV 系统继电保护的影响,在相关理论研究和试验验证的基础上,制定相关对策。

(5)合理配置电网调度运行人员和特高压建设管理组织机构,以适应特高压电网的快速发展。特高压电网使各级电网之间的相互影响、相互作用增强,四川电网的安全稳定特性与区外电网运行方式相关,电网运行特性复杂。而且特高压联网运行后电网功率振荡隐患始终存在,电厂安全对电网安全运行影响更大,机网协调管理延伸至 110 kV 电网,机网协调管理工作量大,故建议依据电网规模、调度对象等,重新核定各级调度机构定员,以适应特高压电网发展要求和调度安全的可持续全面协调发展要求。

四川在未来二十年内将建设规模巨大的特高压电网,目前已经开工建设两个特高压直流工程,启动了一个特高压直流工程和一个特高压交流输变电工程前期工作,工作任务艰巨。目前特高压工程办公室只有四个人,特高压属地电业局没有相应的专门机构和专职人员,不利于特高压建设的顺利开展。建议在有特高压电网的宜宾、泸州、西昌、雅安等属地电业局设置特高压建设专门机构或专职人员,对口办理特高压相应县、市的前期手续及协调属地搞好特高压电网建设。

(收稿日期:2010—03—05)

提高电力系统稳定性综合措施效能 分析及 MATLAB 仿真

熊来红

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:从影响电力系统稳定性的各种因素出发, 综合概述了提高电力系统稳定性的主要措施, 利用 MATLAB 软件强大的计算和仿真能力, 搭建了一个典型的双机系统, 有针对性、类比性的对提高电力系统稳定性的各种措施进行了仿真类比分析, 得出了各种提高稳定性措施的影响力, 为实际运行中各种措施的综合有效应用提供了重要参考。

关键词: MATLAB; 稳定性; 功角

Abstract As viewed from the various factors which affect the stability of power system, a comprehensive overview of the main measures to improve the stability of power system is described. Because of the powerful computing and simulation capabilities of MATLAB, a typical two-machine system is set up and an analogical simulation is carried out for various measures of improving the stability of power system. The influencing force of various measures is obtained, which would provide an important reference for the actual operation.

Key words: MATLAB; stability; power angle

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0064-04

0 引 言

电力系统稳定是指电力系统受到干扰后, 不发生自发振荡或非周期性失步, 自动恢复到初始运行状态的能力。实际中有很多多种方法用于提高电力系统稳定性, 如加装快速励磁系统、加装电力系统稳定器 PSS 串联电容调压、加大发电机励磁电压等措施, 但是这些措施都有一定局限性, 应用单一的措施只能对一定范围的扰动有效果, 当扰动超出一定范围后, 单纯靠一种调节措施很难保持系统的稳定, 所以需要综合应用各种提高静态稳定性的措施, 使电力系统能在较大范围内保持稳定, 对此进行了仿真研究, 证明了综合应用各种措施提高电力系统稳定性的有效性。

1 简单电力系统功率特性及提高稳定性的措施

对简单电力系统 (图 1), 设发电机向系统输送的有功功率 P 为 $P = UI \cos \varphi$, 可得, $P = \frac{EU}{X_c} \sin \sigma$ 功角特性曲线 $P = f(\delta)$, 如图 2 所示。

图中分析可知, 系统稳态运行在不同的初始点

时, 当受到一定小扰动后, 系统将呈现出不同的功角特性曲线, 如图中 1、2、3 便是在不同的初始状态时当受到小扰动后系统表现出的电磁特性曲线和功角特性曲线。

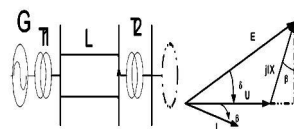


图 1 简单电力系统

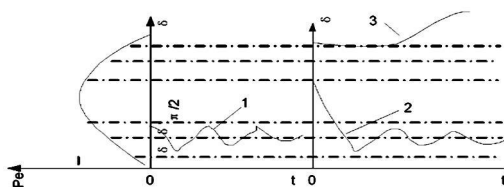


图 2 功角曲线

基于以上双机电力系统稳定性理论分析, 可知为了提高电力系统稳定性, 可以从提高电力系统电压 E_1 、 E_2 , 降低系统间联系电抗 X , 适当控制系统间功角 σ 方面入手, 现代电力系统中提高稳定性的各种措施主要有: 加装自动励磁系统 (AVR)、加装电力系统稳定器 (PSS)、提高励磁电压增益 (Gain)、串联电容器 (Series Capacitor)、在适当位置加装静止无功补偿器 (SVC)、电气制动装置 (SDR)、设置开关站、故障后进

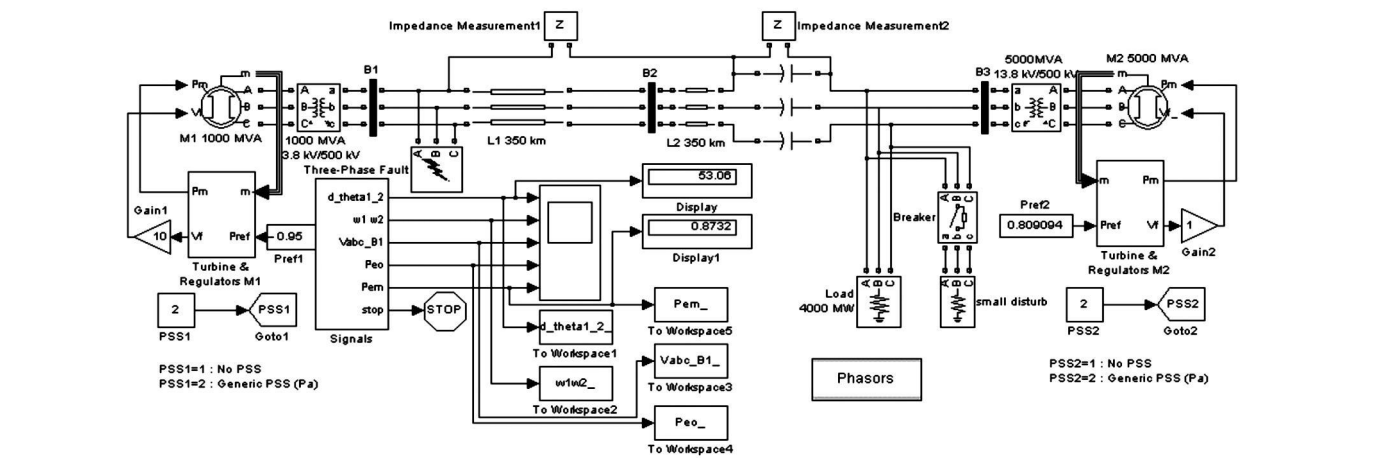


图 3 仿真系统主框图

行合理操作(如快速切除故障、自动重合闸等)、降低作用在发电机轴上的不平衡转矩、调整线路参数等;下面就建立 MATLAB 仿真模型来验证几种主要措施提高电力系统稳定性的效能。

2 系统仿真模型构建

本仿真模型基于 MATLAB 电力系统模块库 `sim-powersystem` 和 `simulink` 模块库构建一双机系统,系统电压等级为 550 kV 网络,发电机输出机端电压为 20 kV。图 3 为仿真系统主框图。

本系统仿真模型构建过程中,采取了如下技巧。

(1)励磁系统采用水轮机模块输出机械功率,稳定器 PSS 输入采用水轮机输出机械功率和发电机输出有功功率之差,以更真实模拟发电机系统。并对整个励磁系统采取封装技术,图中还对每一个稳定器 `vstab` 输入端应用多端转换开关,可以方便改变标签中数字来使励磁系统能工作在 PSS 和无 PSS 两种工况。图 4 为 AVR 和 PSS 结构仿真图。

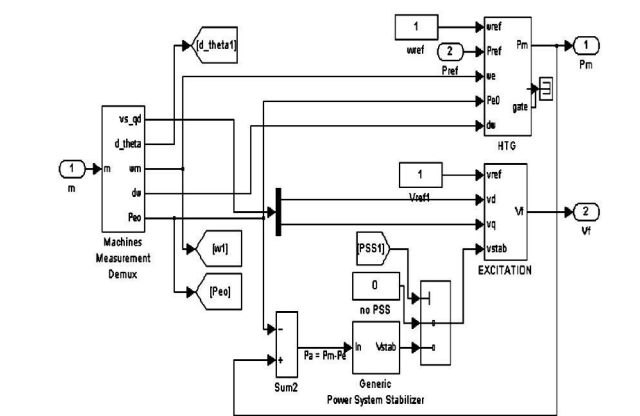


图 4 AVR 和 PSS 结构仿真图

(2)为避免失步后无谓的数值积分,图中设置了仿真的提前终止判据,如果发电机相角幅值超过规定,则认为系统已经失步从而停止仿真。

(3)将 M1、M2 励磁系统的 PSS 投入控制端用标签列出来,用常数模块控制,可以灵活控制两发电机的 PSS 投入情况。

(4)对母线电压系统进行了子系统封装,方便观测在各种运行条件下,系统母线电压变化情况

(5)通过一三相断路器,在额定负荷上并联一小负荷来模拟小干扰系统的小干扰,可以任意设置各种程度大小的负荷扰动、扰动发生时间。

(6)画图命令设计:为了使不同情况下的曲线在同一个坐标内能够形成对比,仿真过程中,将不同的仿真条件下的仿真数据用 `TO workspace` 模块传递到工作空间,并且不同数据分开存放,然后使用 MATLAB 的 `plot()`, `hold` 等命令画图命令就可以在同一张图中画出多条曲线。程序中要用到如下画图命令。

功角曲线画图命令: `plot(d_theta1_2, time d_theta1_2, signals values 'k;'), hold on`

`plot(d_theta1_2, time d_theta1_2, signals values), hold on`

`plot(d_theta1_2, time d_theta1_2, signals values 'r;'), hold on`

转速曲线画图命令:

`plot(w1w2, time w1w2, signals values 'k;'), hold on`

`plot(w1w2, time w1w2, signals values), hold on`

`plot(w1w2, time w1w2, signals values 'r;'), hold on`

母线电压画图命令:

```
plot(Vabc_B1_ . time Vabc_B1_ . signals values ' k : ' ), hold on  
plot(Vabc_B1_ . time Vabc_B1_ . signals values),  
hold on  
plot(Vabc_B1__ . time Vabc_B1__ . signals val-  
ues ' r o ' ), hold on  
电磁功率画图命令:  
plot(Peo time Peo signals values ' k : ' ), hold on  
plot(Peo_ . time Peo_ . signals values), hold on  
plot(Peo__ . time Peo__ . signals values ' r : ' ),  
hold on
```

3 仿真结果分析

仿真中的小于 20% 小扰动用投切负荷来模拟, 对于大于 20% 的较大扰动则用故障设置器来模拟如单相、两相和三相短路扰动。

3.1 自动励磁调节器 (AVR) 仿真分析

仿真参数设置: M1 的发电机稳定器 PSS1 退出, 即将常数模块 PSS1 中参数 constant=1; M1 仅有励磁调节器工作, 当系统没有扰动时, 系统能够经过一段过渡过程时间后保持稳定。但当扰动为 10% 时, 即在 20 s 时负荷突然增大 10%, 系统也能够经过一段过渡过程后稳定运行, 但当扰动继续增大到 20% 时, 系统虽然能够继续稳定运行一段时间, 但达到 50 s 左右便迅速失去稳定。同样对单相短路故障没有稳定能力。图 5 为 AVR 仿真结果。

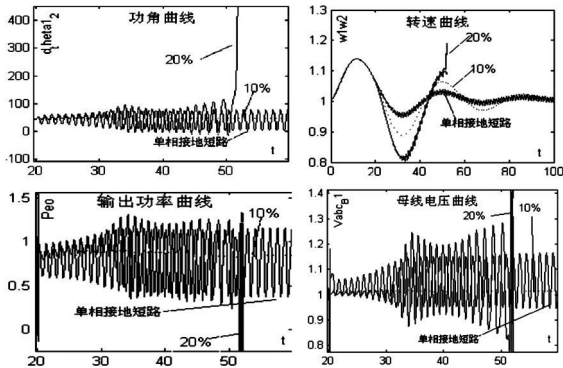


图 5 AVR 仿真结果

从以上分析可知, AVR 对小扰动有一定的稳定能力, 但当扰动较大时, 如单相短路扰动却能力显得不足。

3.2 电力系统稳定器 (PSS) 效能仿真分析

设置小扰动为 10% 时, 投入 PSS 系统能在扰动

发生后几秒之内便使系统稳定下来, 显著提高系统的稳定性。当扰动增大为 20% 时, 稳定时间相对增大, 但也仅有不到 10 s 便稳定下来, 继续逐级仿真, 用电力系统中短路故障出现最多的单相接地短路模拟 20% 以上的较大扰动, 系统出现持续振荡, 当投入 PSS 后, 系统在几秒内立即稳定下来, 仿真效果见图 6。

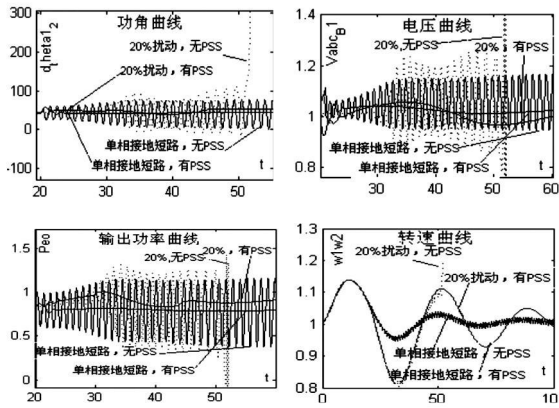


图 6 PSS 仿真结果

仿真分析可知, PSS 比 AVR 有更大范围的扰动稳定能力, 在 10% ~ 20% 范围扰动内, PSS 可以比 AVR 在更短时间内使系统稳定下来, 在 20% 以上的大扰动, 如单相短路故障这样的大扰动, PSS 也可以有效提高稳定性, 只不过时间稍长一些, 但当扰动更大时, 如单相接地短路故障持续时间超过 0.9 s 时, 即使 AVR 和 PSS 同时投入, 也难以改变系统失稳状态。因此必须采取其它措施。

3.3 励磁电压增益仿真分析

AVR 和 PSS 虽然能在一定程度上提高静态稳定性, 但是也只有一定的稳定范围, 当 AVR 和 PSS 同时加装时, 也不能稳定超过 0.9 s 的单相短路这样的较大扰动, 此时可以考虑加装励磁电压增益 Gain 仿真中, 设置了

- 20% 扰动 + AVR + Gain=1,
 - 20% 扰动 + AVR + Gain=10,
 - 0.9 s 的单相接地短路 + PSS + Gain=1,
 - 0.9 s 的单相接地短路 + PSS + Gain=10
- 四种对比仿真条件, 仿真数据如图 7。

通过仿真分析, 可知, 在加装 AVR 和 PSS 都无法稳定系统时, 则可以适当加大励磁增益可以提高系统静态稳定性。但是励磁电压增益 Gain 的效能也有一定有效范围, 过大的励磁电压增益对扰动调节效果并不明显。

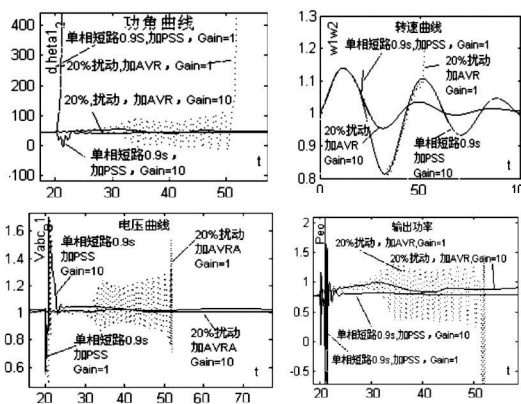


图 7 励磁电压增益仿真效果

3.4 线路容性补偿仿真分析

由公式可知,减小线路电抗,可以提高系统稳定极限功率,提高系统稳定性。在线路中串联电容可以达到此目的,现实中是用 TSCS 等装置来实现,本仿真中直接在线路中串联电容器来验证电容器补偿的效能。补偿度为 $\sigma = \frac{1/\omega C}{WL}$,仿真中用阻抗测量器分别测量补偿电容的阻抗和输电线路的阻抗,通过仿真测量得到如图 8 曲线。

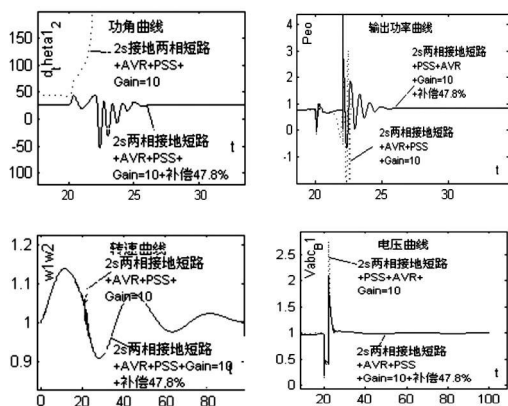


图 8 线路容性补偿仿真效果

可以看出,对 2 s 的两相接地短路这样的大扰动,即使同时加装 AVR、PSS 和 Gain=10 也不能稳定系统,当采用 47.8% 的容性补偿后,能够快速稳定系统,可见容性补偿能够大大提高系统功率极限,提高

了系统稳定性。

4 结 语

通过构建双机系统对励磁调节器 AVR、稳定器 PSS、励磁增益 Gain、串补电容等静态稳定性措施进行对比分析,观测系统稳定性参数功角曲线、电磁功率、母线电压、转速、极限功率等,得出了各种措施提高系统稳定性的影响力范围。励磁调节器虽然是现代发电系统必备设备,但是其稳定性能力较小,一般对 20% 范围内的小扰动有稳定能力;附加 PSS 后,稳定性大大提高,若扰动进一步增大,可适当提高发电机励磁电压增益 Gain;若扰动再增大,还可以采用线路串联电容进行容性补偿,以降低线路阻抗,提高系统稳定极限功率,提高抵抗扰动的能力。由此可见,实际中只要综合应用以上措施,可以大大提高系统稳定极限,抵抗更大的系统干扰,提高系统稳定性。

参考文献

- [1] 李光琦. 电力系统暂态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [2] 赵彩宏, 田立军, 邹贵彬, 等. FCL 对电力系统暂态稳定性影响的机理分析与仿真 [J]. 电力自动化设备, 2001, 21(2): 14—17.
- [3] 吴天明. MATLAB 电力系统设计与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [4] 袁宇春, 张保会. PSS 对电力系统动态及静态稳定性的影响 [J]. 中国电力, 1997, 30(12): 7—9.
- [5] 范影乐. MATLAB 仿真应用详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [6] 毛钧鑫校. 提高电力系统稳定运行的措施 [J]. 电气杂志 OHM, 1994, 2.
- [7] 周兆庆. MATLAB 电力系统工具箱在电力系统机电暂态仿真中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 51—55.

(收稿日期: 2010—01—26)

(上接第 18 页)

- [12] S H. Ling, Frank H. F. Leung, H. K. Lam, Yin—Shu Lee, Peter K. S. Tam. A Novel Genetic—A lgorithm—Based Neural Network for Short—Term Load Forecasting [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 793—799.

- [13] 梅家斌, 谢春娣. 遗传算法在神经网络权值优化中的应用 [J]. 中南民族学院学报: 自然科学版, 2001(21): 1—3.

- [14] 洪露, 马长山, 谢宗安. 基于遗传算法的神经网络权值优化 [J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2003, 32(6): 48—51.

作者简介:

刘 绚 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能及复杂网络在电力系统中的运用。

刘天琪 (1962—), 女, 博导, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。

(收稿日期: 2010—03—19)

感应电动机参数对小干扰电压稳定影响

李 林, 康积涛, 张学群, 刘永江

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:以简单经典两节点电力系统为研究对象, 采用考虑机电暂态过程的三阶感应电动机负荷模型, 建立系统的小干扰微分方程组, 应用系统状态矩阵的特征值和分岔理论来分析感应电动机参数对系统电压稳定性的影响。分析结果表明: 综合负荷中定子电阻和电抗、转子电阻、励磁电抗、感应电动机恒定转矩所占的比例较大时, 转子电阻、与机械特性有关的指数较小时的感应电动机更易出现电压失稳。

关键词: 小干扰电压稳定; 感应电动机; 鞍结分岔

Abstract The simple classic two-node power system is taken as the investigated subject the third-order model of induction motor load is used in which the electromechanical transient process is taken into account small disturbance differential equations of the system are set up and the influences of the induction motor load parameters on voltage stability are analyzed by state matrix eigenvalues of the system and bifurcation theory. The analysis results show that when there are a large proportion of stator resistance and reactance rotor resistance excitation reactance and constant torque in integrated load the voltage instability will occurs more easily in induction motor with small rotor resistance and small index related to mechanical properties

Key words small signal voltage stability; induction motor; saddle node bifurcation (SNB)

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0068-03

电力市场化改革以后, 市场参与者要求增加电网输送能力和稳定限额^[1], 将使电力系统的运行条件变得更为紧张, 容易出现电力系统电压稳定性问题。在电力系统中一些小干扰常常引起频率和电压的波动, 小干扰稳定性已成为制约电力传输容量的主要因素之一^[2]。负荷的性质也是影响电力系统稳定性的一个重要因素, 电压的稳定性主要是负荷的稳定性^[3]。电力系统中的大部分负荷都是电动机, 尤其是感应电动机组成了电力工业的主要动力^[4], 并且是引起系统发生电压失稳的重要原因^[5]。文献[6]用时域仿真的方法分析了感应电动机动态负荷特性对系统电压稳定性的影响, 文献[7]通过时域仿真分析了输电线路电抗、负荷母线并联补偿容抗和感应电动机负荷参数的变化对电力系统暂态电压稳定极限切除时间的影响。

基于以上两篇文献的思路, 采用了小干扰分析方法对一个典型两节点系统进行了分析。通过引入感应电动机的三阶模型建立系统的小干扰微分方程组, 应用系统状态矩阵的特征值和分岔理论分析了感应电动机参数对系统电压稳定性的影响。

1 系统模型

电力系统的动态行为可以用微分代数方程组的

形式来描述^[8]。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 为系统微分状态变量; y 为系统代数状态变量; μ 为系统控制参数。

当系统受到小扰动时, 可以用线性化系统的动态稳定性来近似, 在平衡点 (x_0, y_0, μ_0) 处对式 (1) 进行线性化。

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x}{dt} = D_x f(x_0, y_0) \cdot \Delta x + D_y f(x_0, y_0) \cdot \Delta y \\ 0 = D_x g(x_0, y_0) \cdot \Delta x + D_y g(x_0, y_0) \cdot \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

令 $A = D_x f(x_0, y_0)$, $B = D_y f(x_0, y_0)$, $C = D_x g(x_0, y_0)$, $D = D_y g(x_0, y_0)$ 。消去式 (2) 中的代数变量 Δy 则可以得到描述系统动力特性的微分状态方程

$$\dot{\tilde{\Delta x}} = \tilde{A} \cdot \tilde{\Delta x} \quad (3)$$

式中, $\tilde{A} = A - BD^{-1}C$ 为微分状态方程的系统状态矩阵。它包含了各种动态元件的特点和网络连接关系^[9-10]。

2 基于感应电动机小干扰的数学模型

下面主要针对图 1 所示的两节点系统进行讨论, 图中节点 1 为发电机无穷大节点, 节点 2 为感应电动

机负荷节点, r_0 为线路电阻, x_0 为线路电抗, r_s 为感应电动机定子电阻。这样的系统中只存在电压稳定, 而不存在功角稳定^[11], 并且电力系统的复杂网络都可以通过戴维南等效变换成此两节点模型。

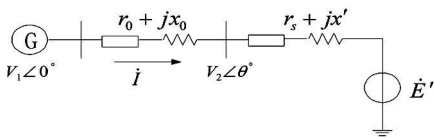


图 1 两节点示例系统

感应电动机采用三阶模型^[4], 方程如下。

$$T_{d0}' E_d' = -E_d' - (x - x') I_q + \omega_0 T_{d0}' s E_q' \tag{3}$$
$$T_{d0}' E_q' = -E_q' - (x - x') I_d + \omega_0 T_{d0}' s E_d' \tag{4}$$
$$T_j s = T_m - T_e \tag{5}$$

式中, E_d' 、 E_q' 分别为转子暂态电势的 d、q 轴分量; I_d 、 I_q 分别为定子电流的 d、q 轴分量; T_{d0}' 、 T_j 分别为定子暂态开路时间和转子惯性时间常数; ω_0 为同步转速; x 为感应电动机稳态电抗; x' 为感应电动机暂态电抗; s 为转子滑差; T_m 、 T_e 分别为机械负载力矩和电磁转矩, 在标么值下分别为机械功率 P_m 和电磁功率 P_e , 分别由式 (6)、(7) 确定。

$$T_m = k[a + (1 - a)(1 - s)^b] \tag{6}$$

$$T_e = R_e (\dot{E} \cdot I) = E_d' I_d + E_q' I_q \tag{7}$$

式中, k 为感应电动机的负荷率系数; a 为感应电动机恒定转矩所占比例; b 为与机械特性有关的指数。网络方程

$$\dot{V}_1 = \dot{E}^1 + [(r_0 + r_s) + j(x_0 + x')] \cdot I \tag{8}$$

虚实部分开得

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_0 + r_s - x_0 - x' & x_0 + x' \\ x_0 + x' & r_0 - r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \tag{9}$$

由式 (3)、(4)、(5)、(6)、(7)、(9) 就构成了形如式 (1) 的微分代数方程组。

3 仿真结果及分析

为了分析感应电动机的参数对系统电压稳定性的影响, 图 1 中感应电动机负荷模型均采用典型参数同文献 [12], 每次只改变感应电动机负荷的某一个参数大小, 保持系统其他参数不变, 观察小干扰稳定性分析结果, 以期得出参数变化对小干扰稳定性的影响。图 1 中的线路参数 $r = 0.05(\text{p.u.})$, $x_0 = 0.2(\text{p.u.})$ 。

3.1 感应电动机机械参数对系统电压稳定性的影响

随着感应电动机机械功率的增加, 其端口电压 V_2 的变化曲线如图 2 所示, 图中鼻端对应最大功率 $P_{\max} = 0.6001$; 系统状态矩阵特征值 λ 轨迹如图 3 所示, 由图可看出当感应电动机机械功率增加到一定程度时, 特征值 λ_3 的值为零, 此时系统发生鞍结分岔。感应电动机恒定转矩所占的比例 α 取不同值时, 系统的鞍结分岔点都在 PV 曲线下半支, 特征值 λ_3 与电压 V_2 的曲线如图 4, 鞍结分岔点的值如表 1。由图 4 和表 1 可看出: $\alpha = 1$ 时感应电动机的机械转矩为恒定转矩, 此时所对应的鞍结分岔点是负荷的最大功率点, 随着 α 值的减小机械功率和不稳定临界电压也减小, 此时鞍结分岔点不是负荷的最大功率点。说明 α 越大, 越不利于系统的小干扰稳定运行。

与机械特性有关的指数 b 取不同值时, 系统的鞍结分岔点也在 PV 曲线下半支, 特征值 λ_3 与电压 V_2

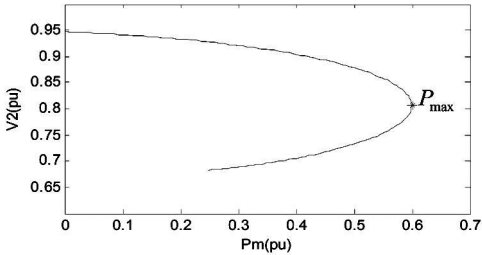


图 2 感应电动机 PV 曲线

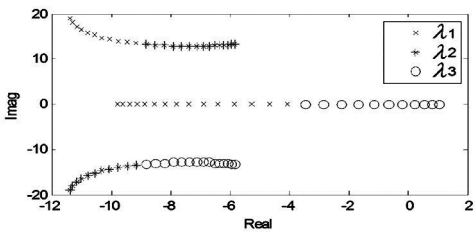


图 3 状态矩阵特征值 λ 轨迹

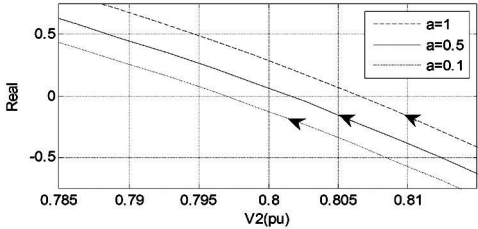


图 4 α 取不同值的 $V_2 - \lambda_3$ 曲线

表 1 α 取不同值所对应的 PV 值

α 的取值	P_m	V_2
$\alpha = 1$	0.600 1	0.805 6
$\alpha = 0.5$	0.599 3	0.799 4
$\alpha = 0.1$	0.596 9	0.792 7

的变化曲线如图 5 鞍结分岔点的值如表 2。由图 5 和表 2 可以看出： $b=0$ 时感应电动机的机械转矩也为恒定转矩，此时所对应的鞍结分岔点也是负荷的最大功率点，随着 b 值的增加机械功率和临界电压都减小，即 b 越大，越有利于系统保持小干扰稳定运行。由此可以得出：感应电动机的恒定转矩所占的比例越大越容易发生电压稳定问题，这同文献 [13] 的结论一致。

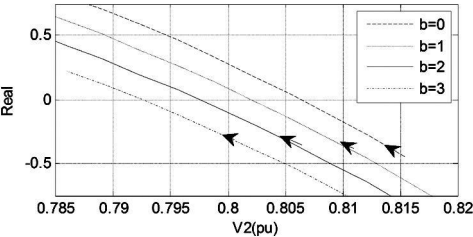


图 5 取不同值的 $V_2-\lambda_3$ 曲线

表 2 取不同值所对应的 PV 值

b 的取值	P_m	V_2
$b=0$	0.600 1	0.805 6
$b=1$	0.599 8	0.801 8
$b=2$	0.598 9	0.797 4
$b=3$	0.597 1	0.793 1

3.2 感应电动机电气参数对系统电压稳定性的影响
感应电动机定子绕组的电阻 r_1 和漏抗 x_1 分别取不同值时的 PV 曲线如图 6、图 7 所示，图中星号表示鞍结分岔点（以下所有的 PV 曲线上的星号都表示鞍结分岔点）。由图可看出，随着 r_1 、 x_1 的增加，分岔点对应的机械功率减少，不稳定临界电压增大，说明 r_1 、 x_1 越大，越不利于系统保持小干扰稳定运行。

感应电动机转子绕组的电阻 r_2 取不同值时的曲线如图 8 所示，图中星号从上到下分别对应 $r_2=0.12$ ， $r_2=0.15$ ， $r_2=0.18$ 的鞍结分岔点。由图 8 可以看出 r_2 越大，不稳定临界电压越小，越有利于系统保持小干扰稳定运行。由于大型工业电动机参数 r_2 的值比较小，大约为 0.009^[9]，所以对于综合负荷成分中含有大量大型工业电动机如水泵、鼓风机和空压机等的实际系统，负荷节点将较容易发生电压失稳。

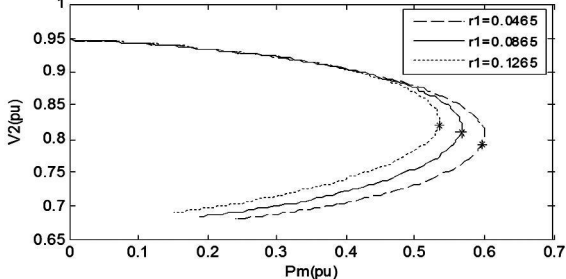


图 6 r_1 取不同值的 PV 曲线

转子绕组漏抗 x_2 和励磁电抗 x_m 取不同值时的 PV 曲线如图 9、图 10 所示。由图可看出，随着 x_2 的增加，分岔点对应的机械功率减少，不稳定临界电压增加，随着 x_m 的增加，分岔点对应不稳定临界电压也增加了。说明 x_2 、 x_m 越大，越不利于系统保持小干扰稳定运行。

4 结 论

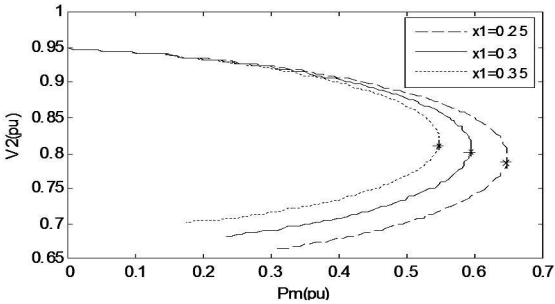


图 7 x_1 取不同值的 PV 曲线

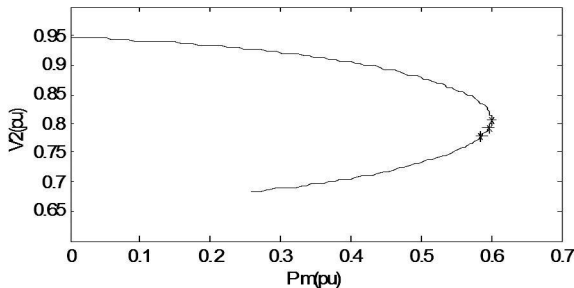


图 8 r_2 取不同值的 PV 曲线

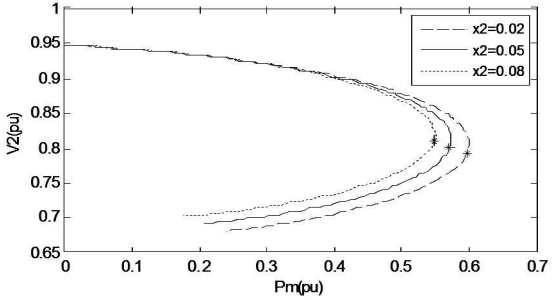


图 9 x_2 取不同值的 PV 曲线

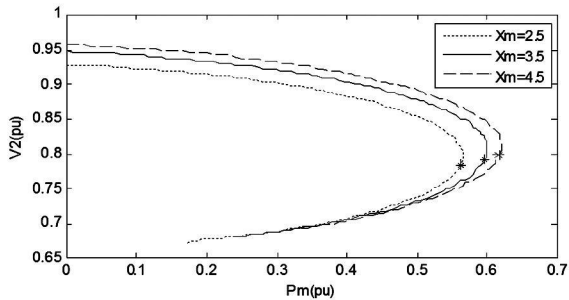


图 10 x_m 取不同值的 PV 曲线

(下转第 86 页)

表 2 走马 CVY 现场测试结果

型号: WVL110 $\sqrt{3}$ —10H, 额定电容: 10 nF				
使用仪器	E 点	二次绕组	$\lg \delta / \%$	C_x (nF)
山东泛华 AI—6000 (C)	接地	不短接	—0.327	10.18
山东泛华 AI—6000 (C)	悬空	短接	0.047	9.95
上海思源 M—2000	接地	不短接	—0.227	10.16
上海思源 M—2000	悬空	短接	0.045	9.96
根据标准的规定, CVT 介损值不大于 0.5%, 电容量偏差 不超过 —5% ~10%				

5 结 语

前面主要针对 110 kV CVT 中电容分压器整体介损值的测量, 而对于由两节组成的 220 kV 的 CVT, 上节的耦合电容采用正接线进行测量, 下节的测量方法

与 110 kV 的 CVT 试验方法一致。如果需要测量 C_1 、 C_2 两部分的介质损耗与电容量, 采用刺激法就能准确测量。由此可以看出, 现场测试方法不同, 试验结果也截然不同。特别是在预防性试验过程中, 对 CVT 的介损测试还受到很强的电场干扰, 这都对介损的测试带来了很大的影响。因此只有采取很好的测试方法, 才能使得测试结果尽量贴近被试设备的真实值。

参考文献

[1] 四川省电力公司行业标准·电力设备预防性试验规程 [S].
[2] 何伟·电容式电压互感器介质损耗角正切值的测量, 西北电力技术 [J]. 2003, 31(5): 31—32, 35.
[3] 李建明·朱康·高压电气设备试验方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001. (收稿日期: 2010—01—26)

(上接第 70 页)

总结了感应电动机的参数对小干扰电压稳定性的影响。得出了当感应电动机的机械功率为恒定转矩时才是 PV 曲线的最大功率点, 并且恒定转矩的比例 α 越大, 与机械特性有关的指数 b 越小越不利于电压的稳定; 感应电动机定子绕组的电阻 r_1 、定子绕组的漏抗 x_1 、转子绕组漏抗 x_2 、励磁电抗 x_m 越大、感应电动机转子绕组的电阻 r_2 越小越不利于电压的稳定。因此, 在实际系统的综合负荷中 r_1 、 x_1 、 x_2 、 x_m 较大, r_2 较小的感应电动机更易出现电压失稳。

参考文献

[1] 辛耀中·2006 年国际大电网会议系列报 (二) 电力系统运行与控制技术新进展 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 1—6
[2] Xiaoqing Han, Nannan Tian, Zhijing Zheng. Small Signal Stability Analysis on Power System Considering Load Characteristics [C]. Power and Energy Engineering Conference Asia—Pacific 2009: 1—4.
[3] Voumas C D, Sauer P W, Pai M A. Relationships between Voltage and Angle Stability of Power Systems [J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 1996: 493—500.
[4] Prabha Kundur. Power System Stability and Control (电力系统稳定与控制) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002
[5] John A Diaz de Leon, Carson W Taylor. Understanding and Solving Short—term Voltage Stability Problem [C]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Chicago USA, 2002: 745—752.
[6] 郭琼, 李晨辉·计及电动机动态的电压稳定问题仿真分

析 [J]. 继电器, 2005, 33(5): 12—14.
[7] 孙华东, 周孝信, 李若梅·感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2005, 29(23): 1—6
[8] Venkataramana A Jiarapu. A study of Dynamic Aspects Related to Voltage Collapse in Power Systems [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control 1989: 351—352.
[9] Wen Binwei, Li Gang, Chen Chen. Object Oriented Modeling Method for Power System Small Signal Stability Analysis [J]. Power System Technology, 2000, 24(10): 15—18.
[10] Kundur Prabhashankar, Rogers Graham J., Wong David Y. A Comprehensive Computer Program for Small Signal Stability Analysis of Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(11): 1076—1083.
[11] 余贻鑫, 王成山·电力系统稳定性的理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
[12] 章健·电力系统负荷模型与辨识 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
[13] Carson W Taylor. Power System Voltage Stability (电力系统电压稳定) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

作者简介:

李林 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。
康积涛 (1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事电力调度自动化系统, 电力系统无功优化计算、电压稳定性、工业测控的研究工作。
张学群 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。
刘永江 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。 (收稿日期: 2010—01—14)

电力系统云计算初探

杨旭昕¹, 刘俊勇¹, 季宏亮², 潘 睿¹, 贺星棋¹, 郭晓鸣¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001)

摘要:在全国电力系统互联不断发展的情况下, 电力系统对计算机处理和存储能力要求越来越高。针对目前情况提出将“云计算”引入电力系统, 利用系统内部广域网建立电力云。通过电力云最大限度的整合电力系统现有的计算能力和存储资源, 为系统提供“超级计算”能力。结合基于电力云的电网电能损耗分析、智能预警功能分析了在电力云的环境下的特点, 说明电力云对于中国电网发展的意义。

关键词:电力系统; 云计算; 电力云; 资源整合

Abstract: Under the current situation concerning the continuous development of interconnected power system, the requirements of computer processing and storage capacity by power system became higher and higher. On account of the present situation “cloud computing” is introduced to the power systems and a power cloud is set up using wide-area network within the system. According to power cloud, it can integrate the existing computing power and storage resources of power systems to the utmost extent to provide a “super-computing” capability for the system. According to the characteristics of power loss analysis and intelligent early warning function based on power cloud, it indicates the significance of power cloud for the development of power grid in China.

Key words: power system; cloud computing; power system cloud; resource integration

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0071-06

随着全国电力系统互联的发展, 现代电力系统正在演变成一个积聚大量数据和信息计算的系统。这样的发展给目前的系统运行及高级分析带来了巨大的困难^[1, 2]: 一方面, 随着互联电网的扩大和具有更快采集速率的采集装置的出现, 系统在线动态分析和控制所要求的计算能力将大大超过当前的实际配置。不断提高的数据量对信息系统的数据处理能力提出了更高的要求, 需要更加快捷的数据处理技术。另一方面, 由于各业务系统建设目标和建成年代不同, 从规划到设计往往缺乏统一性考虑, 众多的系统采集和积累了大量的电力系统运行、生产管理以及电力市场运营等方面的相关信息, 但是系统间缺乏有效的信息交互, 逐渐出现了信息交叠、信息资源浪费、信息兼容性差、重复开发、重复报表等一系列问题。

云计算是一种把分布在众多分布式计算机中的大量数据资源和处理器资源整合在一起协同工作的方法, 针对电力系统当前面对的问题, 将“云计算”引入电力系统, 建立电力系统的云计算体系, 在电力系统广域网络硬件不变的情况下, 最大限度地整合当前系统的数据资源和处理器资源, 极大提高电网数据的处理和交互能力, 为智能电网提供有效的技术支持。

1 云计算

云计算是个热度很高的新名词。由于它是多种技术混合演进的结果, 其成熟度较高, 又有大公司推动, 发展极为迅速。Amazon、Google、IBM、微软和 Yahoo 等大公司都是云计算的先行者。

“云计算”比较普遍的定义为: 云计算 (cloud computing) 是分布式处理、并行处理和网格计算的发展, 或者说是这些计算机科学概念的商业实现, 是基于网络的超级计算模式^[3]。网格的发展终极目标就是云计算。网格从应用上来说是计算层面, 而云计算更多考虑到的是用户和容错, 相比起来云更可靠。



图 1 云计算的发展

云计算的基本原理^[4]是通过使计算分布在大量的分布式计算机上, 而非本地计算机或远程服务器中, 企业数据中心的运行将更与互联网相似。这使得企业能够将资源切换到需要的应用上, 根据需求访问计算机和存储系统。它把分布在众多分布式计算机

中的大量数据资源和处理器资源整合在一起协同工作。高级的计算云通常包含一些其他计算资源,如存储区域网络、网络设备、防火墙以及其他安全设备等。云计算包括以下几个基本要素:资源聚集与共享、资源开放与统一访问、资源仿真与隔离。通过以上三种要素,用户获取各种资源,不需要关注各种资源的细节,并且能够为用户提供按需配用服务,使每个用户都感觉是以独占的形式在使用资源。

云计算是一种新的共享基础架构的方法,在云计算平台中的服务器可以是物理的服务器或者虚拟的服务器。虚拟化是云计算的本质,或者说云计算的根本属性是虚拟化。随着云计算技术和相关概念的不断深入研究和发 展,在不远的未来,还将会逐渐实现运营的虚拟化、管理的虚拟化等。

2 电力系统云计算

2.1 电力云的提出

中国现有大区电力系统的运行特点是以省级电网在结构上为一个独立单位,通过联络线互联,整个大电网协调运行,各省级电力调度中心拥有并维护着所辖电网的详细参数^[1]。各网络都针对所辖区域内的电网建立了较为详细的电力系统模型,而对相邻电网的模型则在一定程度上进行简化和等值,并在此系统模型的基础上进行计算机仿真,为电力系统调度、运行、监控、保护、营销提供重要依据。这种简化等值在加快了计算速度的同时也降低了系统仿真的复杂程度,但是简化等值模型的适用范围有限。另外,电网的扩大和具有更快采集速率的采集装置的出现,未来系统对于在线动态分析和控制所要求的计算能力将大大超过当前的实际配置,如果只是增加计算处理资源,投资过大。

为了解决上述的问题,鉴于中国电力系统内部广域网的完整性,完全可以利用其现有的广域网建立电力系统私有的云,电力云可以最大限度地整合现有的数据资源和处理器资源,为系统提供超级计算机能力,并且云储存和计算资源的访问可以完全由电力系统自己控制,而不是公用的云计算服务的提供商,完全的物理隔离,保证了数据安全性。

2.2 电力云的体系结构

电力云不是单层的服 务,而是一个多层服务的集合^[4]。底层是基础设施 (Infrastructure as a Service,

IaaS),中间层是服务平台 (Platform as a Service PaaS),上层是应用程序 (Software as a Service SaaS)。



图 2 电力云的结构层次模型

电力云体系结构层次如下。

物理储存层:是电力云的网络物理设备和储存的基础。电力云物理设备大量分布在不同的地理位置,其之间通过电力系统内部广域网物理连接。

基础管理层:通过集群和分布式系统,实现电力云中所有存储设备的协同工作,另外包括数据备份和加密,数据容灾,任务冲突机制。

应用接口层:是电力云最灵活的部分,各级电力运行管理机构可以根据需要、权限,提供不同的接口和服务。各级电网可以通过电力云公共接口来登录,获取计算需求。

高级访问层:给电力系统软件的运行提供强大的软件平台,包括电力系统基础应用和高级应用,并且可以在这个平台的基础上自由开发。

2.3 电力云的组成

电力系统是一个在空间上具有分布特性的超级系统,由于电能本身的特点,电能不能大规模储存,发、输、配、用必须同时完成,电力生产控制要求实时性强、可靠性高,具有自然分布的特性,电力的生产管理也就自然形成了一整套“分级管理、分层控制、分布处理”的体系,多年的实践表明,这是电力系统内在的本质特征的体现^[5]。电力系统云计算通过集群应用、分布式计算等系统功能将电力系统内网络中的几乎所有网络和计算应用软件集合起来协同工作,共同对各级电网和终端提供数据储存和计算服务。

目前,各级电网都拥有一定的处理器资源和储存

资源,电力云的实现关键在于不改变现有的计算机分布而能最大限度利用当前电力系统信息网络的物理架构,为当前的任务分配计算和储存资源。

电力系统结构庞大,并且分布广,如果任何一个小节点或者计算机终端的计算要求都提交到整个系统中分配,这样网络容易阻塞,并且意义不大。因为电力系统分级管理的层次很清晰,通过级别建立主云和子云来提供资源分配,从而减少系统内部不必要的资源调配,使电力云的资源使用更为合理。

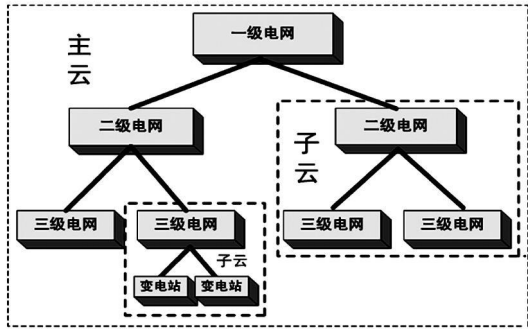


图 3 电力系统的云组成

通过电力云,极短时间内可以处理巨大的信息,达到超级计算机的服务水平。通过分布计算,电力系统数据的运行与互联网相似,电力系统智能云能根据应用切换资源,根据需求访问计算机和储存资源。

3 电力系统云计算的技术构建

3.1 电力云的公共信息

当前各个电网在进行计算建模时一般仅建立本调度管理范围内的电网模型而不考虑外网模型。省调和地调各自建设各自的数据模型库,彼此间进行模型交互十分困难,IEC 61970 标准为解决模型交互提供了技术标准。

其中在以公用信息模型 (common information model CIM) 为标准的电力系统网络模型基础上,可以通过组件接口规范 (component interface specification CIS)^[7,8] 接口实现不同电力数据库之间的数据交换,利用这一接口规范可以解决各厂家系统内部的私有化接口阻碍系统数据访问的问题。

3.2 电力云的资源整合

云计算具有动态共享能力、自组织能力、协同能力,而且还加强了支持多用户和加强网络节点内细粒度资源的应用。电力云平台的概念是将一个庞大复

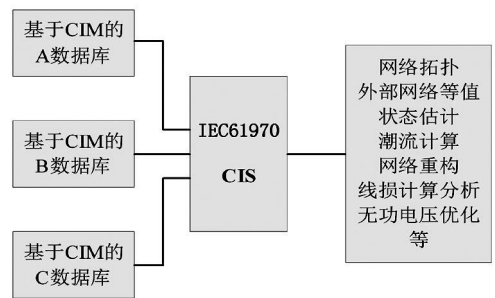


图 4 电力云公共信息架构

杂的电力系统分析任务自动分拆成无数个较小的子任务,再按需通过网络和电力云平台自动搜寻、并由多部仿真云组成仿真系统,形成与云的交互。电力云中业务应用是从云中分散的数据模型中读取相关数据生成报表。原始数据库可以为任何形式,存放统一数据模型的物理数据库以文档的形式展现。

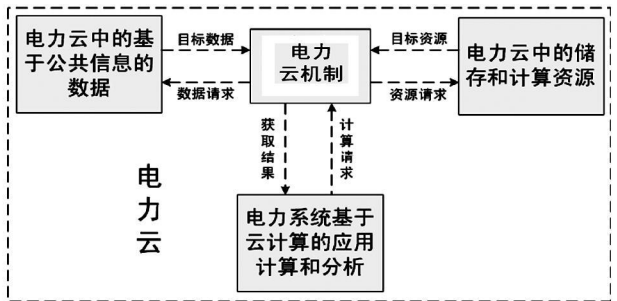


图 5 电力云的资源整合

电力云计算资源整合过程是:①位于电网某点的计算或分析应用向云提出计算或分析请求。云机制收到请求后向电力云中的公共信息提出数据请求;②云机制根据应用的要求提供云中的资源给应用进行计算、储存和分析;③将计算结果返回给提请求的点。

通过电力云机制的调节来完成电力云资源的整合,提供给系统所有节点“超级计算机”的计算和存储资源。

3.3 电力云的资源调度和管理

电力云平台的一个核心问题是资源的管理与调度。电力云必须为用户终端提供可靠的计算,而要保证可靠计算的前提就是在未知的、分布式的、动态的、异构的网络环境下能够对资源和任务进行很好的管理和调度。

首先是用户资源的表达。任何一台计算设备要进入云都要整合,整合过程记录的信息需要为后续的过程提供参考,包括:用户终端的级别、不同的用户级别赋予不同的权限、该用户本身所接入云的资源、网络连接关系以及网络状况、IP 地址。

关于计算机资源状况主要采用以下数据结构来描述: MFLOPS (million floating point operations per second), 该值可以通过实测得到, 该参数是计算资源性能的主要指标; 内存量, 该指标对于计算性能的影响仅次于上一个指标。但过大的内存量对于计算效果没有明显提高; Cache(大小、速度)的大小直接影响数据通信的速度。

这些注册得到的信息, 存储在服务器的数据库中。由于这些参数均是可能动态变化, 因此用户端计算节点在注册时, 会和云建立联系, 在发生较大变化时向云报告。由于对云资源进行了虚拟化, 云内部任意终端可以像本地资源一样访问。在实际访问中, 采用云调度来实现对云资源的管理。系统根据动态得到信息对系统中的资源进行优先排序, 从而在得到计算请求后可以很快访问到云中可用的资源。由于云计算中各计算量不均匀, 因此, 在任务映射到计算机资源, 采用加权图来表达计算资源的关系和计算能力, 从而实现资源的分配。

资源与任务的调度是该云中的关键问题之一。资源的调度来自三方面的动态平衡: 第一种是由于计算环境中受各种因素影响造成一些处理器推出或重新加入; 第二种是由于在计算任务中间产生新的任务; 第三种是由于用户的需求复杂造成任务每次分配的方案不同。因此, 资源的调度是相对静态的, 即, 云可以在比较空闲的时候对整个计算资源进行调度, 只有在计算资源发生较大变化时才重新启动调度服务。

4 电力系统云计算的技术实例

4.1 基于电力云的电网电能损耗分析

由于电力网是非常复杂的网络, 包括不同的电压等级, 多种网络结构, 而且网络及运行结构不固定, 加上电的本质特性决定了电网中各个元件相互影响, 所以电力网电能损耗的分析非常困难。又因为各个电力网的特点、条件不同, 原始数据的来源是多种形式的, 有的可能没有完备的数据, 即使有数据其种类也可能不同, 这些都给电能损耗的计算与分析增加了复杂性, 目前较精确的网损计算基本是离线的。

产生网损的主要元件是线路和变压器。从线路两端装设的电量表的测量值可得到该线路的损耗电量, 由变压器进出线端的电量表计测量值同样可得到变压器的损耗电量。全网损耗电量由全部线路和变

压器损耗电量求和得到。该方法简单明了, 但实际中往往因表计不全而难以实现, 尤其是较低电压等级的线路或变压器。由于表计的误差或不可靠等因素也会造成数据失常或缺少, 以致对所采集的测量数据通常要进行剔除不良数据并进行状态估计处理。此外, 电量表计是在某一较长时段的累计值, 现行状况一般是按月结算。要查表读取每天中各时段的测量电量, 查表工作量及数据量之大是显而易见的, 即使是远程智能型电量表, 也须作专门设计, 还须有良好的远程通道, 否则, 一旦时段范围改变, 通过逐表调整, 同步而达到改变计数范围是难以实现的。

如果要进行较精确电网电能损耗的计算, 就要在采集电度表的数据同时进行较为精确的建模, 利用 EMS 的数据进行电能损耗计算。这样精度较高, 但计算量较大, 对于现有的电网计算配置, 很难达到很快的速度。引入电力云后, 在进行复杂计算时可以调用云里大量闲置的资源, 大大提高计算速度, 进而达到实时或者准实时的网损计算水平。

4.2 基于电力云的智能预警

目前的电力系统预警主要是由变电站和调度中心进行。在变电站, 自动装置进行的本地控制, 在调度中心, 在预想事故下对系统典型运行方式进行离线计算后得到的评估预案。这样的预警不全面, 非实时。为了使得系统能够对电网进行全面、实时的事故预警, 对全网进行一体化的建模仿真十分重要。要进行全网一体实时仿真, 必须要能够进行大计算量的实时计算^[9]。

基于电力云的智能预警可以针对数据资源和计算资源广域分布、计算量大、对计算能力的要求高等特点建立电力系统的一体化仿真。在仿真过程中没有系统的简化和等值。电力云的超级计算能力足以满足实时海量数据处理的要求。基于电力云的智能预警包括^[10]: ①电压预警, 实时监测电压是否保持在规定范围之内、节点电压是否越限、无功功率分配的合理性, 预测系统的电压崩溃裕度, 确定系统电压薄弱点, 防止系统发生电压崩溃事故。②功角及潮流预警, 实时监测系统潮流, 分析判断正常运行及在规定扰动条件下功角是否将失去稳定, 预测计算当发电机功率发生变化、开合线路改变电网结构、负荷转移或切除时系统的潮流数据, 防止系统发生功角失稳及振荡事故。③频率预警, 实时监测系统频率, 分析计算当发电机有功功率发生变化、启停发电机组以及电网

结构发生变化时对系统频率的影响,保持联络线功率处于目标值,防止系统频率失稳事故。④设备预警,实时监测系统中设备情况,分析计算在正常模式及 N-1 模式下由于电网结构改变、发电机功率改变、系统潮流变化时对设备产生的影响,防止系统设备发生动、热稳定事故。⑤系统其他实时预警,从各方面实时监测系统状态,对可能发生的事故进行快速预警。

智能在线预警的目的在于实时追踪系统不同类型的故障并对其定位,找到电网主要矛盾点、告警点,使调度人员一目了然地知道电网和设备的状态,从总体上对电网安全做出评估,为调度人员采取快速准确的控制措施提供理论依据和方法。

5 电力云的特点和展望

5.1 电力云的特点

“云计算”的引入,相比当前的电力系统,提高了系统各方面的性能,根据以上关于电力云原理、体系、结构和实例的叙述,电力云主要有以下特点。

(1)强大的计算和存储能力。电力云将系统各节点和终端的计算和数据分布在大量的分布式计算机上,云海中成千上万的计算机提供强大的计算能力,针对中国巨大的电网规模和庞大的系统数据,电力云提供强大的计算和存储能力,在进行仿真时建完整的模型,较为精确地计算,并且极大地提高计算速率。基于电力云的网损计算和基于电力云的智能预警都是这个特点的表现,通过云极大地提高计算速度,实现快速建模仿真。

(2)系统具有良好的扩展性和经济性。即使建立电网中再小的节点或者计算机终端,需要配置显示器、硬盘、CPU、内存等一整套设备,并且确保其性能满足该节点或终端的计算和储存需要。但对于基于云计算的电力系统(如基于电力云的数字化变电站),可能只需要一套人机交互设备,接入电力系统广域网,就可以实现计算和存储功能,不必担心自己购置的设备被淘汰,因为电力云的硬件设备是系统中的云资源,这样电力系统在信息交互的这个层面就具有良好的扩展性和经济性。

(3)计算和储存的虚拟化。虚拟化是电力系统智能云的技术基础,它将底层的硬件,包括服务器、存储与系统内网设备,全面虚拟化,以建立起一个共享的、可以按需分配的庞大的电力系统内部资源池。

(4)资源动态扩展、分配。系统信息网的各种资源可以按需分配和自动增长,而上层的数据及应用可以根据级别和重要程度的不同,搭配出各种互相隔离的应用,形成一个服务导向的内部电力云架构。

(5)电力系统智能化。由于电力云的建立,基于系统海量数据的数据挖掘技术来获得大量的系统知识。海量的数据加上海量的分析大于知识。

5.2 电力云在电力系统中的展望

根据电力系统的基本特点,电力云的建立不能完全效仿普通的云计算,而是要构建适合电力系统现有信息网络架构的电力云。

(1)电力系统结构庞大,并且分布广,如果任何一个节点或者计算机终端的计算要求都提交到需求分配的总中心的话,中心压力很大,并且权限的判定也比较繁琐。但是电力系统分级管理的层次很清晰,通过级别建立主云和子云来限定权限和资源分配,从而减少系统内部不必要的权限管理和资源调配,是电力云的资源 and 权限更为合理。

(2)当前,电力系统的发展很快,电网扩建很迅速。以前的扩建都需要很大的投资在处理器和储存设备上。而在电力云的体系架构下扩建电网,信息设备只需要很小的投资,只需要投资人机交互设备,这样可以大大节省硬件投资。

(3)企业不可能一朝一夕间把自己所有的数据信息和计算功能都放在一个地方,企业需要保存一定规模的自己的数据中心。而如何让企业把握好外部云和企业内部数据中心的比例,就是云计算解决方案提供商们需要考虑的问题。

(4)云计算模式下,数据的存储和管理不是类似一个更大规模的虚拟数据库。传统的数据库是有组织有规律的,类似银行的机构。而云计算下的数据是半组织,甚至无组织规律的。因此,如何存储和管理就是不重要的,而如何找到这些数据才是当务之急,并且找到了之后还要进行解读以提交给相应的服务,这更重要。

(5)以上是对“云计算”引入电力系统的基本构想、体系、框架和基础应用的叙述,未来如何解决应用软件接口、电力云安全、用户权限、任务冲突机制等问题是未来研究电力系统云计算的发展方向。

6 结 论

电力系统云计算的提出,对整个电力系统信息交

互、计算能力和储存空间带来巨大的影响。通过电力云的建立,在完全不改变现有系统内部广域网和设备的情况下,最大限度挖掘、整合系统的计算和储存能力,极大提高当前系统的整体性能,为电网快速仿真建模,电网全方位实时计算分析提供“超级计算能力”;增强电网的扩展性,减小电网扩建投资,为智能电网在中国的建立和实现提供强有力的技术支持。

参考文献

- [1] 张伟,沈沉,卢强.电力网格技术初探(一)[J].电力系统自动化,2004,28(22):1—4.
- [2] 杨胜春,姚建国,杨志宏,等.网格技术在电力调度信息化中的应用的探讨[J].电网技术,2006(22):7—12.
- [3] Dikaikos M. D., Katsaros D., Mehra P., et al Cloud Computing Distributed Internet Computing for IT and Scientific Research[J]. Internet Computing IEEE, 2009, 13(5):10—13.
- [4] 李雅轩,杨春晖,田军夏.中小企业信息化建设的计算模式——云计算[J].河北企业,2009(6):70.

- [5] 辛耀中.电力信息化几个问题的探讨.电力信息化[J],2003,1(3):20—23.
- [6] 孙珂,沈沉,梅生伟,等.基于网格技术的电力企业信息资源整合方案[J].电网技术,2007,31(22):80—84.
- [7] IEC 61970—1, EMSAPI—Part 1: Guidelines and General Requirements[S].
- [8] IEC 61970—2, EMSAPI—Part 2: Glossary[S].
- [9] 杨卫东,徐政,韩祯祥.电力系统灾变防治系统:研究的现状与目标[J].电力系统自动化,2000,24(1):7—2.
- [10] 胡钧毅,房鑫炎.网格技术在电力系统事故预警中的应用[J].华东电力,2006,34(11):8—11.

作者简介:

杨旭昕(1988—),男,本科生,主要从事电力系统稳定与控制方向研究。

刘俊勇(1963—),男,教授,博士生导师。主要从事电力市场、分布式发电、灵活输电与电力系统可视化等方面的研究。

李宏亮(1970—),男,高级工程师。主要从事继电保护,自动化方向研究。

(收稿日期:2010—03—29)

(上接第 63 页)

3 建 议

(1)尽快配合研究提出适应于向家坝机组投产初期复龙—上海特高压直流大功率外送的四川电网加强方案。在向家坝机组投产初期,特高压向家坝—上海直流可为四川水电提供外送通道。根据复龙—上海±800 kV特高压直流投运初期的系统稳定分析,四川电网不能满足向家坝—上海特高压直流投运初期送出3 200~6 400 MW功率要求,需要加强泸州和宜宾500 kV电网。

(2)需要加快深入开展四川电网对特高压电网的适应性研究。重点研究四川特高压多馈直流和交流系统之间安全性相互影响及协调控制策略、四川特高压多馈直流输电系统之间协调控制策略、四川交、直流混合输电系统动态稳定特性、特高压直流投运后与交流电网之间的无功控制策略等。

(3)开展特高压技术培训,提高驾驭特高压电网能力。向家坝—上海±800 kV特高压直流输电示范工程计划于2010年6月底双极投运,届时四川省电力公司将管理特高压线路的运行、检修维护。随着其他特高压工程的建设投运,省公司面临更多的特高压电网管理职责。建议省电力公司加大对生产运行、变电检修、调度、仿真分析、带电作业等人员的特高压培训及人才培养储备,提高驾驭特高压电网能力。

(4)研究特高压接入对四川电网继电保护的影响。建立特高压接入后四川电网RTDS仿真模型,对国内外相关厂家的继电保护装置进行试验验证,研究试验过程中电气特性和保护动作行为,分析特高压接入对四川电网500 kV系统继电保护的影响,在相关理论研究和试验验证的基础上,制定相关对策。

(5)合理配置电网调度运行人员和特高压建设管理组织机构,以适应特高压电网的快速发展。特高压电网使各级电网之间的相互影响、相互作用增强,四川电网的安全稳定特性与区外电网运行方式相关,电网运行特性复杂。而且特高压联网运行后电网功率振荡隐患始终存在,电厂安全对电网安全运行影响更大,机网协调管理延伸至110 kV电网,机网协调管理工作量大,故建议依据电网规模、调度对象等,重新核定各级调度机构定员,以适应特高压电网发展要求和调度安全的可持续全面协调发展要求。

四川在未来二十年内将建设规模巨大的特高压电网,目前已经开工建设两个特高压直流工程,启动了一个特高压直流工程和一个特高压交流输变电工程前期工作,工作任务艰巨。目前特高压工程办公室只有四个人,特高压属地电业局没有相应的专门机构和专职人员,不利于特高压建设的顺利开展。建议在有特高压电网的宜宾、泸州、西昌、雅安等属地电业局设置特高压建设专门机构或专职人员,对口办理特高压相应县、市的前期手续及协调属地搞好特高压电网建设。

(收稿日期:2010—03—05)

普光气田 220 kV 变电站 35 kV 系统接地设计

刘永寿

(四川省电力设计院, 四川 成都 610072)

摘要:对具有四川电网内“两个第一”的普光气田 220 kV 变电站的 35 kV 配网接地方式进行了研究及总结。该站为四川电网内第一个主变压器 35 kV 线圈采用三角形接线的变电站,为此两台主变压器共节省设备投资约 360 万元。该站为四川电网内第一个 35 kV 中性点经中电阻接地、单相接地故障直接跳闸的配网系统,对今后类似工程的设计将起到较好的借鉴作用。

关键词:主变压器;全星形接线;三角形接线;中电阻接地

Abstract: The grounding mode of 35 kV distribution network in 220 kV substation of Puguang gas field which has "Two Firsts" in Sichuan power grid is analyzed and summarized. Puguang 220 kV substation is the first substation that uses delta connection at 35 kV side of main transformer in Sichuan power grid, therefore two main transformers have saved the investment of the equipment about 3.6 million yuan. Also, it first uses medium resistance for 35 kV neutral point grounding of distribution network in Sichuan power grid, and the protection equipment can trip as long as the single-phase ground fault happens. The design experiences can provide the reference for the design of subsequent project.

Key words: main transformer; totally star connection; delta connection; medium resistance grounding

中图分类号: TM934.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0081-03

0 概述

普光气田位于四川省达州市宣汉县普光镇境内,属于国家“十一五”重点工程,由中国石油化工股份有限公司开发建设。根据气田开发方案,普光气田全部建成后将达到年产净化气 120 亿方(混合气 150 亿方)的生产能力。

为了解决普光气田开发建设的用电需求,在普光净化厂附近建设 220 kV 变电站,作为普光气田专用变电站,根据气田开发工艺要求和负荷性质特点,普光气田专用变电站采用 220 kV 电压等级接入系统,按一级负荷供电,220 kV 独立进线电源两回。

1 变电站概况

普光气田 220 kV 变电站由于站址场地狭窄,故采用 GIS 全户内布置方案设计。两回 220 kV 线路从西南侧架空进线,35 kV 线路全部采用电缆通过电缆隧道引出站外。

1.1 主变压器容量

最终为 2×90 MVA 三相双线圈有载调压变压

器,本期一次建成。主变压器采用中山 ABB 的 SFZ10-90000/220 型自然油循环风冷变压器,电压比为 $220 \pm 8 \times 1.5\% / 36$ kV,阻抗电压 $U_d = 13.8\%$,接线组别为 YNd11,配德国 MR 有载调压开关。

1.2 220 kV 配电装置

220 kV 配电装置为单母线分段接线,采用上海西门子高压开关有限公司 8DN9-II 型六氟化硫气体绝缘金属封闭开关设备,分相式结构(主母线为三相共箱)。220 kV 出线最终 2 回,本期一次建成,分别至宣汉 220 kV 变电站及通川北 220 kV 变电站。

1.3 35 kV 配电装置

35 kV 配电装置为单母线分段接线,采用西门子中压开关技术(无锡)有限公司 8DA10-40.5 型 SF₆ 气体绝缘金属封闭开关柜,内装 3AH4 型真空断路器,配弹簧操作机构。35 kV 出线最终 22 回,本期出线 18 回(其中备用 2 回),预留 4 回。

1.4 变电站监控保护系统

普光气田 220 kV 变电站按无人值班、少人值守方式进行设计,采用分层、分布式微机综合自动化系统,变电站内设交流不停电电源(UPS)系统、图像监视及安全警卫系统、火灾探测报警系统、SF₆ 配电室环境智能监控系统以及硫化氢监测报警系统。全站

微机监控系统、220 kV 母线保护装置、主保护 B 柜及 220 kV 线路光纤电流差动保护柜采用南京南瑞继保电气有限公司产品,主保护 A 柜及 220 kV 线路光纤距离保护柜采用国电南京自动化股份有限公司产品,35 kV 测控保护装置采用西门子电力自动化有限公司产品。220 kV 及主测控、保护、计量装置等在主控室集中屏布置,35 kV 测控、保护及计量装置分散布置于各间隔开关柜上。

2 主变压器接线组别选择

普光气田 220 kV 变电站为普光气田专用的总降压变电站,出于供电可靠性的要求,该变电站以 220 kV 电压等级接入系统取得电源,降压为 35 kV 后供给普光气田净化厂、集输系统、输气首站及生产指挥中心等负荷,故本站仅有 220 kV 及 35 kV 两个电压等级,可以选用双绕组变压器,但在中国 35 kV 电网为星形接线的小电流接地系统,按照常规应选用 YNyn⁰ 全星形接线的变压器,但是对于如此电压等级及容量的中型变压器,考虑三次谐波电流及磁通的影响,不能选用全星形接法的变压器,如必须选用,则应增加三角形接线的稳定绕组,实际上就变为了 YNyn⁰ +d11 接线的三绕组变压器,如此则会增加变压器的投资。考虑到普光气田 220 kV 变电站为普光气田专用降压站,其 35 kV 电网为独立系统,不与外界联网,经与业主多次协商研究,最终确定主变压器采用 YNd11 接线的双绕组变压器,其 35 kV 侧线圈采用三角形接线,较 35 kV 侧线圈采用星形接线另加稳定绕组的常规三绕组变压器,仅两台主变压器即节省投资约 360 万元。

3 变电站 35 kV 系统接地方式选择及设计

三相交流电网中性点与大地间电气连接的方式,称为电网中性点接地方式。由于中性点接地方式直接影响到系统设备绝缘水平、系统过电压水平、过电压保护元件的选择、继电保护方式、系统的运行可靠性及通讯干扰等,因此电网中性点接地方式选择是一个综合性的、系统性的问题,既涉及到电网运行的安全可靠,也涉及到电网建设的经济性。

3.1 电网中性点接地方式选择

中国的 110 kV 及以上电压等级的电网一般都采

用中性点直接接地方式,在中性点直接接地系统中,由于中性点电位固定为地电位,发生单相接地故障时,非故障相的工频电压升高不会超过 1.4 倍运行相电压,暂态过电压水平也相对较低,继电保护装置能迅速断开故障线路,设备承受过电压的时间很短,这样就可以使电网中设备的绝缘水平降低,从而使电网的造价降低。

中国 6~35 kV 配电网中性点的接地方式主要分为不接地、经消弧线圈接地及经电阻接地三种方式。接地方式的选择与电网发生单相接地故障时流经故障点的电容电流有关,不同接地方式下发生单相间歇性电弧接地故障时,最大过电压一般不超过下列数值。

不接地	3.5 p.u
消弧线圈接地	3.2 p.u
电阻接地	2.5 p.u

电网中性点接地方式的选择主要取决于在电网中出现单相接地故障时,故障线路是否立即跳闸。对于不接地及消弧线圈接地的电网,线路发生单相接地故障时,不瞬间跳闸,一般允许 2 h 持续运行,以便寻找和处理故障,其供电可靠性较高,但也带来工频过电压高、操作过电压水平高、易产生谐振过电压、要求电气设备绝缘水平高及氧化锌避雷器事故率高等缺点。

中性点不接地系统适用于单相接地故障电容电流较小(3~6 kV 电网 $I_c \leq 30$ A、10 kV 电网 $I_c \leq 20$ A、35 kV 电网 $I_c \leq 10$ A)、以架空线路为主的配电网,此类型电网瞬时性单相接地故障占故障总数的 60%~70%,希望瞬时性单相接地故障时不马上跳闸。

消弧线圈接地方式适用于单相接地故障电容电流较大且瞬时性单相接地故障多的以架空线为主构成的电网,接地故障时可带故障运行 2 h。

在电气设备的绝缘水平较低或较弱、瞬时性单相接地故障少而永久性单相接地故障多的以电缆为主构成的电网的场合,宜采用单相接地故障瞬时跳闸的接地方式,如中、低电阻接地。

3.2 系统接地方式设计

普光变电站 35 kV 系统为独立系统,不与外界联网,其两台主变压器 35 kV 侧均采用三角形接线,35 kV 配电装置为单母线分段接线,采用 SF₆ 气体绝缘金属封闭开关柜户内双列三通道布置,35 kV 出线最终 22 回,本期出线 18 回。由于 35 kV 出线较多且多为电缆出线(本期电缆线路总长度约 18.53 km,架空线路长度约 109.7 km),经计算其单相接地电容电流

约为 118.134 A, 远远超过 10 安的标准。由于单相接地电容电流较大, 加装消弧线圈可能产生谐振过电压, 同时考虑本变电站 35 kV 主要为电缆出线, 其单相接地故障多为永久性故障, 带故障运行将会使其进一步发展为相间短路故障进而引发更大事故。为了确保供电安全, 故普光变电站 35 kV 系统采用中电阻接地方式, 单相接地短路保护直接跳闸。本变电站重要负荷的供电回路皆为双回路供电, 单一回路跳闸不影响其供电的连续性, 电缆线路单相接地多为永久性故障, 单相接地跳闸可有效防止故障进一步扩大, 对于架空线路采用重合闸以提高供电的可靠性。之所以选择中电阻接地, 主要是考虑在满足零序保护动作灵敏度的前提下降低单相接地短路电流以尽量减轻对电缆屏蔽层、金属外皮等的影响。

3.3 系统接地装置设计

普光变电站 35 kV 系统采用中电阻接地方式, 由于其两台主变压器 35 kV 侧均采用三角形接线, 无接地所用的中性点, 为此需设置接地以引出中性点, 结合站用电源本期工程一次建成两段 35 kV 母线的接地兼站用 (1 000/250 kVA, ZNyn11 接线) 及接地电阻器装置 (230 Ω , 90 A)。

3.3.1 接地电阻选择

每段 35 kV 母线接地电容电流约为 $118.134 \div 2 = 59.07$ (A)

接地电阻值选择如下。

① 阻性电流: 取 $R = (1.1 \sim 1.5)$

$I_c = 1.5 \times 59.07 = 88.61$ (A)

② 电阻阻值: 取运行电压 36 kV

$36 \sqrt{3} / 88.61 = 234.56$ (Ω)

③ 电阻功率: $I^2 R = 88.61^2 \times 234.56 = 1\,841.7$ (kW)

④ 工作时间: 最大 10 s

⑤ 电阻热容量: $I^2 R t = 1\,841.7 \times 10 = 18\,417$ (kJ)

⑥ 电阻材质: 碳素非金属

⑦ 电阻片数选择: 每片 5 Ω , 先 2 瓶 92 串, 共 184 片。

阻值为 $92 \times 5 / 2 = 230$ (Ω)

满足要求

⑧ 电阻热容量校核: 每片允许热容量 200 (kJ)

允许热容量总合 $184(\text{片}) \times 200 = 36\,800$ (kJ)

允许热容量 (36 800 kJ) > 实际发热量 (18 417 kJ), 满足要求。

3.3.2 接地变压器选择

根据前述计算, 接地变压器通过功率为 1 841.7 kW, 考虑到在 10 s 工作时间内, 干式变压器有 3 倍以上的过负荷能力, 故其容量选择为: $1\,841.7 / 3 + 250$ (站用连续负荷) = 863.9 (kVA)。选择接地变容量为 1 000 kVA, 接地变压器型式为干式, 高压侧绕组为 Z 型接地。

4 结 语

普光气田属于国家“十一五”重点工程, 出于政治、经济、生产工艺及安全等要求, 对其供电的普光气田 220 kV 变电站要求具有非常高的供电可靠性。

普光气田 220 kV 变电站主变压器是四川电网内第一个采用 YN、d11 接线的 220/35 kV 双绕组变压器, 为此两台主变压器共节约设备投资约 360 万元; 普光气田 220 kV 变电站是四川电网内第一个采用 35 kV 中性点经中电阻接地、单相接地故障直接跳闸的配网系统, 该接线降低了单相接地故障时的过电压, 解决了该站以电缆出线为主的 35 kV 配网系统接地电容电流过大的问题, 电缆线路单相接地多为永久性故障, 单相接地跳闸有效防止了故障进一步扩大发展为相间短路故障进而引发更大事故的可能, 变电站重要负荷采用分别取自两段母线的双回路供电方式, 单一回路跳闸不影响其供电的连续性, 确保了供电的安全及可靠。

普光气田 220 kV 变电站于 2008 年 9 月 28 日通过了四川省电力公司组织的验收并投入运行, 该站自投运以来的安全可靠运行对普光气田的顺利投产、对“川气东送”工程的顺利实施发挥了重要的作用, 该变电站在四川电网内的“两个第一”也将对今后类似工程的设计起到较好的借鉴作用。

参考文献

- [1] 电力工程电气设计手册 [Z]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [2] 电力系统设计手册 [Z]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] DL/T 620—1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合.

作者简介:

刘永寿 (1963—), 男, 电气高级工程师, 长期从事输变电工程项目的设计及技术管理工作。

(收稿日期: 2010—01—15)

电容式电压互感器负介损值现象分析与解决措施

李 辉, 姚龙泉

(泸州电业局修试所, 四川 泸州 646000)

摘 要: 电容式电压互感器在现场的介质损耗测试过程中, 由于方法不当, 介质损耗值往往出现负介损值, 不能得到正确的数据。针对现场测试过程中出现负介损值的原因和改进测量方法进行详细说明, 希望能够对现场试验人员选择正确的测量方法有所帮助。

关键词: 电磁单元; 介质损耗; 电容量

Abstract: During the measurement of dielectric loss of capacitor voltage transformers in the site because of the improper method the value of dielectric loss sometimes appears to be negative so it can not get the correct data. The causes why negative value of dielectric loss occurs during the field measurement and the improved measuring method are described in detail which is helpful for the testing personnel in the site to choose the correct measuring method.

Key words: electromagnetic unit; dielectric loss; capacitance

中图分类号: TM934.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0084-03

0 引 言

电容式电压互感器 (以下简称 CVT) 是作为电力系统测量、保护以及载波通信用设备, 由于其独特的性质而区别于电磁式电压互感器, 不易与系统构成铁磁谐振, 因此 CVT 整体介损的准确测量是保证电力系统安全、稳定运行非常重要的条件。

1 110 kV CVT 的结构原理

110 kV CVT 结构原理是由电磁单元和电容分压器两部分组成, 其中的电容分压器由高压电容 C_1 和分压电容 C_2 两部分构成, 电磁单元由中间变压器、谐振电抗器、阻尼器、接线端子箱组成。在电力系统中常常用到的 CVT 一般是叠装式, 无中间抽压端子, 因此, 在测量的过程中很难办到将电磁单元同电容分压器分开进行。

2 以往的测试方法

在对 CVT 电容分压器进行整体介质损耗测试时, 通常的方法是拆除电容分压器低压接地端 N 点, 在电容分压器低电压端接上测量线 C_x 从而在一次

加压进行测量, 测量出 C_1 、 C_2 的整体介损和电容量值, 其测出的介损值往往是负值。本来测量 C_1 、 C_2 的整体介损和电容量是反映没有电磁单元存在时, 流过 C_1 、 C_2 电流 $\dot{I}_{C_1}$ 的有功分量 $\dot{I}_{C_1} \cos \delta$ 与无功分量 $\dot{I}_{C_1} \sin \delta$ 的夹角 δ 由于现在有了电磁单元的存在, 就存在有一电流 $\dot{I}_g$ 通过它并对地构成回路, 实际上反映的是流过 C_2 电流 $\dot{I}_{C_2}$ 的有功分量 $\dot{I}_{C_2} \cos \delta'$ 与无功分量 $\dot{I}_{C_2} \sin \delta'$ 的夹角 δ' , 因此对测量结果造成了影响。

图 1 中包含了不同情况下电磁单元电流 $\dot{I}_g$ 的影响, $\dot{I}_g$ 的大小与相位是由电磁单元的阻抗特性决定的, 如果 $\dot{I}_g$ 落在了 1 象限区域, 根据电流与电压的相位关系可以知道, 此时的电磁单元呈容性; 如果 $\dot{I}_g$ 落在了 4 象限区域, 此时的电磁单元呈感性。

在现场测试出来的介损值往往都是负值, 其原因是由于电磁单元高压绕组的末端串有谐振电抗器, 其感抗值近似等于电容分压器高、中压电容并联时 ($C_1 + C_2$) 的容抗值, 而向厂家咨询后得知, 电磁单元一次侧对二次侧及地的电容量是小于 600 pF 的, 因此在测量介损值的时候, 电磁单元主要还是呈感性的。

当电磁单元呈感性的时候, $\dot{I}_g$ 的相位滞后 $\dot{I}_{C_2}$, $\delta' < \delta$, $\delta' < \delta''$, 即 $\lg \delta' < \lg \delta$, $\lg \delta' < 0$, 电磁单元的介损值为负值, 由于这种情况下 δ' 与 δ 之间的角差最大,

测量出来的介损值远远小于真实值,甚至会出现负值,测量出来的介损值小于真实值;对纵坐标的分量大于对纵坐标的分量,所以实测电容量大于真实值。

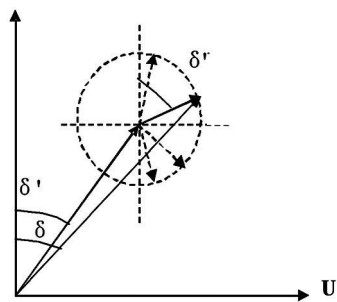


图 1 影响介损角分析图

3 问题分析

在以往的测试过程中,由于无中间抽压端子,对 CVT 整体介损的测试就不得不考虑电磁单元的影响了。如何不让电磁单元在测试过程中呈感性,如何减小电磁单元对整体介损的影响,是改进测量方法的重点。

由于电磁单元中的交变磁场在二次侧感应电势 $E=4.44fN\Phi_m$,二次侧的感应电动势反过来又对一次侧产生影响,因此造成了在 A 点电压的大小与相位是变化的, N 点测量出来的电流的相位与大小也是变化的;同时如果短接二次侧绕组,电磁单元中有功电流会大大降低,这样电磁单元高压绕组对低压绕组及地呈现容性,流向电磁单元的电流仅为很小的耦合电容电流。

4 改进后的测量方法

根据以上分析,在充分进行测试实验、验证基础上,由此得出如下的测试方法。图 2 为测量示意图。

在对 CVT 进行介损测试时,拆除电磁单元高压绕组尾端的接地点 E 并悬空(如果 CVT 是日新电机出厂的 WVL 或 WVB 系列产品时,拆除包括二次接线端子盒里面的避雷器在内;对于型号是 TYD 系列的产品,由于避雷器设置在内部,所以不需要进行拆除),并短接二次所有绕组(不接地),在一次加压,电容分压器低电压端接上测量线 C_x 进行测量。

流向电磁单元的电流记为 I_g ,此时的电磁单元呈现容性,以 C_m 、 I_m 表示电磁单元一次侧尾端对地

电容、电流;以 C_m 、 I_m 表示电磁单元高压绕组对低压绕组的等效电容、电流。

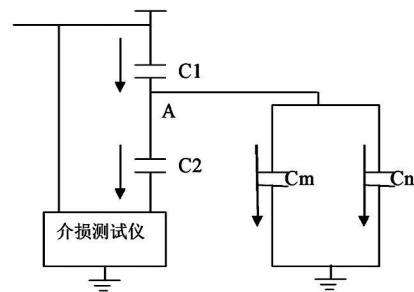


图 2 测量示意图

在脱开 E 点并悬空、短接二次所有绕组后,流向电磁单元的电流大小已经很小了,此时电磁单元的介损值是很小的。

当电磁单元呈容性的时候:

当 I_g 的相位超前 I_{C_2} 时, $\delta' > \delta > \delta''$, 即 $\lg \delta' > \lg \delta > \lg \delta''$, 电磁单元的介损小于 C_1 、 C_2 的整体介损值,那么就会出现测量出来的介损值大于真实值;同时由于 I_{C_2} 对纵坐标的分量小于 I_{C_1} 对纵坐标的分量,所以实测电容量小于真实值。

从上述的分析可以知道,此时电磁单元在很大程度上呈现容性,同时由于 I_g 的大小很小,因此 $\delta \approx \delta'$ 即 $\lg \delta' = \lg \delta$ 流向电磁单元的电流 I_g 对测量结果的影响已经很小了,测量出来的介损值更加接近真实值。虽然电磁单元存在一次绕组对二次绕组及地的电容,但电容值小于 600 pF,在电容量测量上影响不大。

根据现场的测试结果,对上述两种测试方法的结果进行比较,以泸州电业局 220 kV 震东变电站 110 kV 的线路 CVT 现场的测试为例,其测试结果见表 1。

表 1 震东变电站 CVT 现场的测试结果

型号: TYD ₂ 110 $\sqrt{3}$ -0.01H, 额定电容: 10 nF					
使用仪器	E 点	二次绕组	$\lg \delta / \%$	C_x (nF)	
山东泛华 AI-6000 (C)	接地	不短接	-0.458	10.26	
山东泛华 AI-6000 (C)	悬空	短接	0.029	9.86	
上海思源 M-2000	接地	不短接	-0.374	10.21	
上海思源 M-2000	悬空	短接	0.027	9.88	

注:根据标准的规定, CVT 介损值不大于 0.5%,电容量偏差不超过 -5% ~ 10%

根据上述测试结果的比较,电容量都在合格范围内,但明显看出以往的测试方法不能准确得出介损值;采用改进方法后,介损值更加贴近真实值,能较好地反映 CVT 的绝缘性能。

表 2 走马 CVY 现场测试结果

型号: WVL110 $\sqrt{3}$ —10H, 额定电容: 10 nF				
使用仪器	E 点	二次绕组	$\lg \delta / \%$	C_x (nF)
山东泛华 AI—6000(C)	接地	不短接	—0.327	10.18
山东泛华 AI—6000(C)	悬空	短接	0.047	9.95
上海思源 M—2000	接地	不短接	—0.227	10.16
上海思源 M—2000	悬空	短接	0.045	9.96
根据标准的规定, CVT 介损值不大于 0.5%, 电容量偏差 不超过 —5% ~10%				

5 结 语

前面主要针对 110 kV CVT 中电容分压器整体介损值的测量, 而对于由两节组成的 220 kV 的 CVT, 上节的耦合电容采用正接线进行测量, 下节的测量方法

与 110 kV 的 CVT 试验方法一致。如果需要测量 C_1 、 C_2 两部分的介质损耗与电容量, 采用刺激法就能准确测量。由此可以看出, 现场测试方法不同, 试验结果也截然不同。特别是在预防性试验过程中, 对 CVT 的介损测试还受到很强的电场干扰, 这都对介损的测试带来了很大的影响。因此只有采取很好的测试方法, 才能使得测试结果尽量贴近被试设备的真实值。

参考文献

[1] 四川省电力公司行业标准·电力设备预防性试验规程 [S].
[2] 何伟·电容式电压互感器介质损耗角正切值的测量, 西北电力技术 [J]. 2003, 31(5): 31—32, 35.
[3] 李建明·朱康·高压电气设备试验方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001. (收稿日期: 2010—01—26)

(上接第 70 页)

总结了感应电动机的参数对小干扰电压稳定性的影响。得出了当感应电动机的机械功率为恒定转矩时才是 PV 曲线的最大功率点, 并且恒定转矩的比例 α 越大, 与机械特性有关的指数 b 越小越不利于电压的稳定; 感应电动机定子绕组的电阻 r_1 、定子绕组的漏抗 x_1 、转子绕组漏抗 x_2 、励磁电抗 x_m 越大、感应电动机转子绕组的电阻 r_2 越小越不利于电压的稳定。因此, 在实际系统的综合负荷中 r_1 、 x_1 、 x_2 、 x_m 较大, r_2 较小的感应电动机更易出现电压失稳。

参考文献

[1] 辛耀中·2006 年国际大电网会议系列报 (二) 电力系统运行与控制技术新进展 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 1—6
[2] Xiaoqing Han, Nannan Tian, Zhijing Zheng. Small Signal Stability Analysis on Power System Considering Load Characteristics [C]. Power and Energy Engineering Conference Asia—Pacific 2009: 1—4.
[3] Voumas C D, Sauer P W, Pai M A. Relationships between Voltage and Angle Stability of Power Systems [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1996, 493—500.
[4] Prabha Kundur. Power System Stability and Control (电力系统稳定与控制) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002
[5] John A Diaz de Leon, Carson W Taylor. Understanding and Solving Short—term Voltage Stability Problem [C]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Chicago USA, 2002, 745—752.
[6] 郭琼, 李晨辉·计及电动机动态的电压稳定问题仿真分

析 [J]. 继电器, 2005, 33(5): 12—14.
[7] 孙华东, 周孝信, 李若梅·感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2005, 29(23): 1—6
[8] Venkataramana A Jiarapu. A study of Dynamic Aspects Related to Voltage Collapse in Power Systems [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control 1989: 351—352.
[9] Wen Binwei, Li Gang, Chen Chen. Object Oriented Modeling Method for Power System Small Signal Stability Analysis [J]. Power System Technology, 2000, 24(10): 15—18.
[10] Kundur Prabhashankar, Rogers Graham J., Wong David Y. A Comprehensive Computer Program for Small Signal Stability Analysis of Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(11): 1076—1083.
[11] 余贻鑫, 王成山·电力系统稳定性的理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
[12] 章健·电力系统负荷模型与辨识 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
[13] Carson W Taylor. Power System Voltage Stability (电力系统电压稳定) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

作者简介:

李林 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。
康积涛 (1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事电力调度自动化系统, 电力系统无功优化计算、电压稳定性、工业测控的研究工作。
张学群 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。
刘永江 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。 (收稿日期: 2010—01—14)

四川电网输电线路近年一季度故障原因分析及防治措施

李龙江

(四川省电力公司生产技术部, 四川 成都 610041)

摘 要:四川电网由于盆地周边线路有较大部分穿越高山区、少数民族地区,线路覆冰情况严重,沿线农民春耕前烧荒情况突出,再加上近年森林植被恢复较好,鸟类活动更加活跃,由于覆冰、烧荒、鸟害导致的线路故障已成为四川电网一季度的主要故障类型,对一季度四川电网的安全运行威胁较大。主要对近年四川输电线路一季度故障情况进行了深入分析,摸索一季度线路故障规律,从而提高四川电网输电线路安全运行水平奠定基础,为下步制定相应切实可行的针对措施提供条件。

关键词:输电线路;故障;分析

Abstract Sichuan transmission lines go through many mountain area and minority area around the basin, so ice accretion of line happens a lot. Also straw burning is serious in the spring and since the recovery of the forests, the birds are more active which cause the damages. Those are the main types of faults in the first quarter and are a great threaten to the safe operation of Sichuan power grid. The fault situation of Sichuan transmission lines in the first quarter of recent years are analyzed deeply and it is tried to find out the regularity of the fault in the first quarter, thus it can lay a foundation for the safe operation of Sichuan transmission line and be a great help to work out the practical measures.

Key words: transmission line; fault; analysis

中图分类号: TM732 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003—6954(2010)03—0087—05

0 引 言

四川水电资源非常丰富,丰富的水电资源需长距离输送到成都平原或华中以及东部沿线地区,而水电主要集中在甘、阿、凉三州地区,水电送出通道条件相当恶劣,水电送出输电线路必须经过高海拔、重冰区、无人区、森林区等自然条件恶劣地区,线路运行条件很差,各种灾害频发;而盆地内却由于经济发达,外力破坏以及线路沿线污秽情况较为严重,外力破坏和污秽闪络已成为威胁盆地内线路安全运行的重要因素。为提高四川电网安全运行水平,切实加强应对各类故障的能力,在深入分析了一季度四川电网的故障类型和特点,对各类故障进行了有针对性的统计分析,从统计分析中寻求故障发生的特性和规律,根据故障特点和规律,提出四川电网一季度运行维护工作的重点和要求,为下步改善线路运行情况,减轻线路故障对电网安全的影响提供条件。

1 近年四川电网一季度输电线路故障分析

1.1 故障类型分析

2005年以来一季度四川电网 220 kV 及以上输电线路故障类型统计见表 1。

表 1 2005—2009 年一季度四川电网输电线路故障统计表

年度	覆冰	山火	鸟害	污闪	产品质量	外力破坏	原因不明	其他	合计
2005	2	3	1	3	2	0	1	0	12
2006	1	3	5	0	0	2	2	0	13
2007	7	0	4	0	0	0	0	0	11
2008	29	2	1	0	1	3	0	0	36
2009	1	4	4	2	0	1	1	5	18
合计	40	12	15	5	3	6	4	5	90
比例/%	44	13	17	6	3	7	4	6	100

2005年至 2009 年一季度共计发生线路故障跳闸 90 次,其中覆冰 40 次(2008 年冰雪灾害占了 29 次)、鸟害 15 次、山火 12 次、外力破坏 6 次、污闪 5 次,分别占总量的 44%、17%、13%、7%、6%,故障中占前三位的分别是覆冰、鸟害和山火故障。

1.2 故障跳闸区域统计分析

对 2005—2009 年一季度故障跳闸按区域划分, 具体见表 2。

表 2 2005—2009 年一季度四川电网输电线路故障区域统计表									
年度	西昌	乐山	雅安	成都	广元	达州	攀枝花	其他	合计
2005	5	2	2	0	1	0	1	1	12
2006	3	0	1	2	3	0	2	2	13
2007	3	4	0	2	0	2	0	0	11
2008	9	10	6	3	0	0	0	8	36
2009	10	3	1	0	0	1	0	3	18
合计	30	19	10	7	4	3	3	14	90
比例 /%	34	21	11	8	4	3	3	16	100

从故障的区域划分来看, 2005 年至 2009 年一季度故障数量占前四位的分别为西昌、乐山、雅安、成都地区, 西昌、乐山地区主要故障发生二滩送出线线路上, 雅安地区故障主要集中在石雅崇水电送出通道, 成都故障全部集中在 220 kV 线路上, 主要由于成都地区鸟类活动和外部施工活跃, 其中鸟害 5 次、外力破坏 2 次。

1.3 故障跳闸重合情况分析

表 3 2005—2009 年一季度输电线路跳闸重合成功率统计表 (动作次数 / 重合成功次数)								
年度	覆冰	山火	鸟害	污闪	产品质量	外力破坏	原因不明	其他
2005	2 / 0	3 / 3	1 / 1	3 / 2	2 / 1	0	1 / 1	0
2006	1 / 1	3 / 2	5 / 5	0	0	2 / 1	2 / 2	0
2007	7 / 3	0	4 / 4	0	0	0	0	0
2008	29 / 10	2 / 1	1 / 1	0	1 / 0	3 / 0	0	0
2009	1 / 0	4 / 0	4 / 3	2 / 2	0	1 / 0	1 / 1	5 / 3
合计	40	12	15	5	3	6	4	5
重合成功	14	6	14	4	1	1	4	3
重合成功率 /%	35	50	93	80	33	17	100	60

通过表 3 可以看出, 220 kV 及以上输电线路故障跳闸后, 鸟害和污闪重合成功率较高, 分别为 93% 和 80%, 而外力破坏、覆冰和山火重合成功率较低, 分别为 17%、35%、50%。

2 鸟害专题分析

2.1 鸟害故障发生的季节性

鸟类的活动受季节的影响很大, 所以线路的鸟害故障也带有明显的季节性。四川电网 2005~2008 年期间鸟害故障统计见表 4。

从表 4 可以看出, 冬春季是鸟害故障的多发期,

表 4 2005—2008 年度四川电网输电线路鸟害故障发生的季节特点

季度	次数	所占比例 /%
春季	6	24
夏季	4	16
秋季	4	16
冬季	11	44

主要的原因是: 在冬季, 由于鸟类的自然界栖息环境变坏, 而导致电力线路杆塔落鸟的概率增加, 再加之冬季雨水少, 落在绝缘子表面的鸟粪不易被清洗掉, 从而加大了鸟粪污闪的概率。而春季则正是鸟类繁殖的旺季, 电力线路杆塔上的鸟巢此伏彼起, 发生鸟害故障的概率自然大大增加。

2.2 鸟害故障发生的时间性

从四川电网 2005—2008 年度鸟害时间特点 (见表 5) 可见夜间到凌晨发生鸟害的故障率很高, 主要因为这期间内往往易形成晨雾, 空气湿度大, 电网运行电压高, 易形成击穿放电的有利条件, 同时杆塔上栖息的各种鸟类, 它们白天觅食, 夜间休息, 经过消化, 夜间到清晨是它们排泄粪便较集中且数量最大的时间, 这也是鸟类污闪事故集中发生在这个时间段的原因。

表 5 2005—2008 年度四川电网输电线路鸟害故障发生的时间特点

时间	次数	所占比例 /%
0~8	16	64
10~18	6	24
20~24	3	12

2.3 鸟害故障相别分析

从统计的数据来看, 鸟害主要发生在中相 (B 相), 统计 25 次鸟害中 B 相故障为 20 次, 占鸟害故障的 80%, 这主要是因为鸟害故障多发生在直线杆塔上, 由于中相便于鸟类歇息, 鸟害在此活动频繁, 也是凌晨鸟类排泄的主要场所。

2.4 四川鸟害特点

2.4.1 四川电网鸟害多发生在盆地周边森林植被茂盛地区

因为这类地区一方面环境较好, 有适合鸟类生存的条件和环境, 受人类活动影响较小, 有鸟类生存需要的丰富食物。

2.4.2 鸟害多发生冬春季节

冬春季节北方候鸟南迁导致四川省鸟类活动频繁, 再加上春节正值鸟类繁殖的旺季, 而四川盆地冬春季节大雾天气多、湿度大, 易发生鸟粪闪络。

2.4.3 鸟害多发生在夜间 0~8 时

鸟害多发生在夜间 0~8 时, 此时间段的鸟害约占 60%。主要是由于鸟类白天觅食, 经过夜间消化, 凌晨排泄集中、量大, 再加上此时电网系统运行电压较高和四川盆地湿度大, 极易发生鸟粪闪络。

2.4.4 鸟害主要发生在线路中相

鸟害主要发生线路中相 (B 相), 中相故障约占 80%。这是因为鸟害多发生在直线杆塔上, 而直线杆塔由于中相位置和结构适合鸟类歇息, 中相成了鸟类的主要活动场所, 鸟巢也主要筑在中相横担上, 中相也是鸟类排泄的主要场所, 所以中相较边相更易发生鸟害故障。

3 二滩送出输电线路山火专题分析

二滩送出输电线路共有 7 回 500 kV 线路, 分别为二普一、二、三线、普洪一、二线、普叙线、普天线, 山火灾害频繁, 从投运到现在为此, 已相继发生山火引发的线路故障达 17 次, 现对 2005 年以来的山火情况进行分析如下。

3.1 山火原因统计分析

表 6 2005—2009 年度二滩送出输电线路山火故障统计表

时间/年	政府烧荒	农民违规用火	风偏不够	其他	合计
2005	3	0	4	1	8
2006	1	2	0	0	3
2007	0	0	1	0	1
2008	0	2	0	0	2
2009	1	2	0	0	3
合计	5	6	5	1	17
所占比例/%	30	35	30	5	100

从表 6 可以看出, 在二滩送出 500 kV 线路近年发生山火的原因主要有政府组织烧荒、农民违规用火和风偏距离不够三类, 三类已占山火原因的 95%。

3.2 山火故障分线路统计分析

表 7 2005—2009 年度二滩送出输电线路山火故障分线路统计表

时间/年	二普一线	二普二线	二普三线	其他	合计
2005	0	2	5	1	8
2006	0	2	1	0	3
2007	0	0	1	0	1
2008	1	1	0	0	2
2009	1	0	1	1	3
合计	2	5	8	2	17
所占比例/%	12	29	47	12	100

通过对近年来二滩送出输电线路山火进行统计

分析, 山火主要集中在二普一、二、三线, 特别是二普三线特别明显, 其发生的山火已占总量的 47%。

3.3 山火故障区段分析

表 8 2005—2009 年度二普三线山火故障分区段统计表

时间/年	120~130 号	二滩~120 号	130 号~普提站	合计
2005	3	1	1	5
2006	1	0	0	1
2007	0	1	0	1
2008	0	0	0	0
2009	0	0	1	1
合计	4	2	2	8
所占比例/%	50	25	25	100

500 kV 二普三线山火主要发生在 120~130 号段, 占二普三线山火总量 50%, 120~130 号位于西昌德昌县境内, 由于德昌县政府组织烧山和当地农民违规用火引起。

表 9 2005—2009 年度二普一、二线山火故障分区段统计表

时间/年	80~90 号	二滩~80 号	90 号~普提站	合计
2005	1	1	0	2
2006	1	1	0	2
2007	0	0	0	0
2008	1	0	1	2
2009	1	0	0	1
合计	4	2	1	7
所占比例/%	57	29	14	100

二普一、二线基本为平行走线, 从表 9 分析可以看出, 二普一、二线山火主要集中在 80~90 号段, 80~90 号位于德昌县境内, 由于德昌县政府组织烧山和当地农民违规用火引起。

3.4 山火发生时间区域分析

表 10 2005—2009 年度二滩送出线路山火故障分时间区域统计表

时间	二普一线	二普二线	二普三线	其它	合计	所占比例/%
00:00~08:00	0	0	0	0	0	0
08:00~12:00	0	0	1	1	2	12
12:00~14:00	0	1	1	1	3	18
14:00~16:00	0	0	1	0	1	5
16:00~20:00	2	4	5	0	11	65
20:00~24:00	0	0	0	0	0	0
合计	2	5	8	2	17	100

二滩送出输电线路山火故障时间性较强, 主要集中在下午 16~20 时之间, 约占 65%, 夜间未曾发生过山火, 下午发生山火故障的概率较大, 主要是由于山火大部分为政府组织的烧荒和农民违规用火导致,

而烧荒和烧山也多白天,而至线路跳闸时,往往山火都经过了一段长时间的燃烧和发展,山火火势较大时导致线路跳闸。

3.5 山火故障季度特点

(1)导致输电线路山火故障跳闸的主要因素一是政府组织统一烧荒,二是农民春耕前的违规烧荒用火,三是由于线路对山坡风偏不够导致,这三类故障原因已占总量的 95%。

(2)二滩送出输电线路山火主要集中在 1~4 月份。主要是由于当地政府每年会在 1~4 月组织进行烧山工作,防治森林病虫害,另外当地农民在春耕前会对山坡进行烧荒,由于控制不好,扩大成山林大火,从而引发故障。

(3)山火主要集中在下午 16~20 时。

主要是由于山火大部分为政府组织的烧荒和农民违规用火导致,而烧荒和烧山也多白天,而至线路跳闸时,往往山火都经过了一段长时间的燃烧和发展,山火火势较大时导致线路跳闸。

4 四川输电线路一季度故障特性

4.1 输电线路故障季节性突出

四川电网输电线路一季度故障类型主要以覆冰、山火、鸟害故障类型为主,外力破坏和污闪故障次之,多年统计分析发现:一季度覆冰、鸟害、山火引发的故障分别占到一季度故障总量的 40%、20%、15% 左右。覆冰灾害主要是由于二滩、石棉等水电送出通道路经高海拔、重覆冰地区,运行条件恶劣,极易受天气变化而发覆冰故障;山火灾害主要是由于二滩送出输电线路沿线政府有组织的烧山防森林病虫害和沿线农民烧荒违规用火导致,多在 1~4 月间发生;鸟害主要是由于四川盆地周边环境较好,适应鸟类生存,北方候鸟南下迁徙越冬,又加上盆地内冬春季节雾大、湿度大,一季度易发生鸟害故障。

4.2 季度故障区域性明显

西昌、乐山、雅安地区一季度故障问题突出,上述三个地区一季度的故障已占四川电网一季度故障总量的 70%,这主要是由于此三个地区是二滩、石棉水电的主要送出通道,其沿线覆冰、山火、鸟害情况较为突出,特别是西昌地区德昌县境内一季度山火问题较为严重,西昌地区一季度天气暖和、食物丰富,是候鸟理想的越冬地区之一,鸟害情况较其他地区更为严

重。随着四川甘、阿、凉三地大型水电的开发,大量水电送出输电线路将投入运行,而覆冰、山火、鸟害仍然成为威胁水电送出通道的安全,如何及早采取有效措施,加强线路分析和运行维护,是保证四川主网安全的关键所在。

4.3 线路重合成功与否与故障类型关系密切

从统计分析的数据来看,鸟害和污闪故障跳闸后重合成功率较高,约达到 90% 左右,而外力破坏、覆冰、山火故障后重合闸装置重合成功率较低,其中外力破坏最低,不到 20%。这主要是由于鸟害、污闪多为瞬时故障,线路跳闸放电结束后,线路较快恢复了原有的绝缘水平,而外力破坏和覆冰对线路的破坏往往造成了线路本体严重损伤,不具备自恢复能力,多以倒杆、断线等形式为主,其故障多以永久故障为主。

5 应对故障的措施与对策

(1)加强对甘、阿、凉三地水电送出通道的运行维护,认真分析线路沿线情况,对易覆冰、易发生山火、易发生鸟害的区段进行重点分析,加强一季度上述区域的特巡工作,加强群众护线力度。

(2)在防覆冰方面,逐步提高线路自身防护能力,对不满足覆冰条件的线段进行差异化改造,提高其抗覆冰的能力。

(3)加强鸟害情况分析,掌握鸟类活动规律,了解鸟类活跃区域、候鸟越冬地区或外候鸟南迁路线。对易发生鸟害的杆段防放电通道形成为主,加装大盘径绝缘子,提高绝缘水平为主。适当在鸟害易发生杆塔中相上安装防鸟刺等可改变中相横担结构的装置,阻止鸟类在中相活动的机率。适度降低凌晨电网运行电压。

(4)在防外力破坏方面,一是提高线路自身防护能力,适度加高线路杆塔高度,减小上述地区耐张段长度,适度提高杆塔强度,对跨越电气化铁路、高速公路、城市核心区的线路要作为重点进行改造,减小由于外力破坏带来的不良后果和影响。二是加大打击外力破坏电力设施的力度,加大宣传,加强线路巡视维护。

(5)根据新的污源分析情况和盐密监测点的监测情况,对不满足污秽等级要求的输电线路进行绝缘化改造,防止由于绝缘水平不够造成污闪事故发生。

(6)在防山火故障方面,掌握输电线路沿线政府

和农民烧山、用火情况,加强与沿线政府的沟通,加强对沿线农民的宣传,防止违规烧山、用火可能对线路造成的危害。对新投的水电送出线路要及时收集此类信息,提前作好预防工作。

(7)及时处理由于线路对档距中央边坡风偏距离不够的情况,采用增加杆塔、提高杆塔高度、对突出边坡进行开方等措施来防止由于边坡距离不够可能

引发的线路故障发生。

参考文献

[1] 陶元忠,包建强.输电线路绝缘子运行技术手册[Z].北京:中国电力出版社,2003.

[2] 胡毅.输电线路运行故障分析与防治[M].北京:中国电力出版社,2007.

(收稿日期:2010-03-02)

(上接第 57 页)

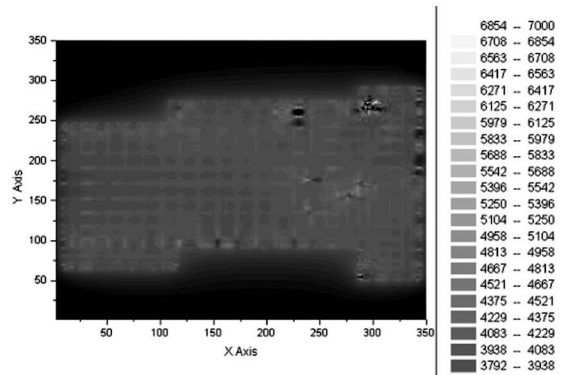


图 4 电位分布平面图

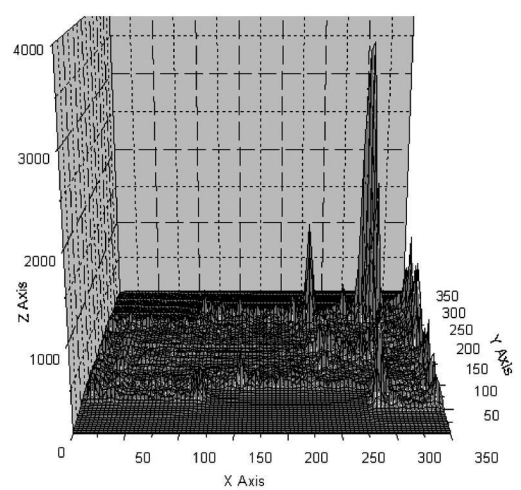


图 5 地网电位梯度分布三维图

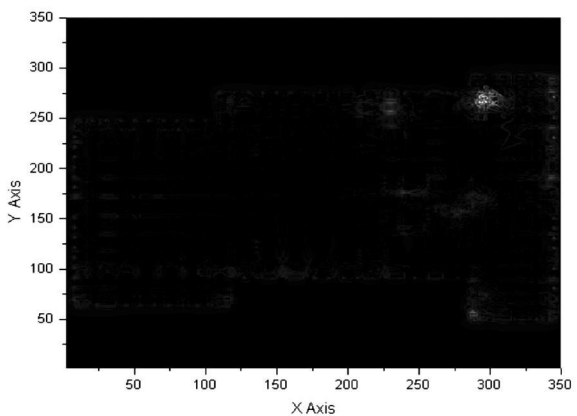


图 6 电位梯度分布平面图

置比较集中使电位升高。

为效验该软件计算的效果,计算了一个 4 乘 4 的网格,在计算所得的矩阵中取过节点和网格中心点的多条平行线,画出各条线的电位分布情况,与文献 [5]中采用水槽中模拟测量的结果进行比较。其中计算所得的电位分布线与文献 [5]采用水槽模拟测量所画出的电位分布线比较接近。所以可以用此软件对地面电位分布进行仿真计算。

3 结 论

运用前面提到的软件对变电站大型接地网的电位分布进行计算,计算结果通过 ORIGIN 进行分析,可以清晰地看到电位分布的三维图和用亮度代表电位值的平面图,能更方便对接地网电位分布的分析,从而找到最大的接触电压和接触电压所在位置。同时软件计算跨步电压的计算结果,通过 ORIGIN 分析得到的图可以清晰看见在地网中跨步电压高的危险区域。

所采用的方法能对各种地网分布方式进行计算,有助于对接地网电位分布的研究。同时可以对大型变电站的接地网进行计算,分析该地网的安全情况,有助于地网设计更加安全可靠。

参考文献

[1] 张丽萍.一个实际变电站接地网的计算机模拟计算与分析[J].电工技术学报,2000,15(1):72-75.

[2] 李中新.变电站接地网模拟计算[J].中国电机工程学报,1999,19(5):76-79.

[3] 何金良,曾嵘.电力系统接地技术[M].科学出版社,2007.

[4] 姚凤.变电站接地网数值计算[J].安徽水利水电职业技术学院学报.2007,7(1):1-3.

[5] 李如虎.不同布置方式的接地网的地面电位分布及计算[J].供用电,1990(3):12-15.

(收稿日期:2009-12-25)

水电厂励磁系统数学建模中存在的问题及解决方法

毕 坚¹,夏 潮²

(1 四川省电力工业调整实验所,四川 成都 610016; 2 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘 要:准确的模型和参数的精确,是进一步提高电网安全稳定分析准确度的必要条件。在对电网中运行的部分水电厂励磁系统模型参数辨识中遇到模型或参数不准确的现象。分析了这些问题产生的原因,提出了几种有效的解决方法,解决了仿真结果和实测结果不一致的问题。

关键词:励磁;模型;问题;方法

Abstract: The accurate model and parameters are a necessary condition to enhance the analysis accuracy of power system security and stability. However, in some small power plants running in power grid, the excitation system model and parameters are inaccurate. The causes of these problems are analyzed and several effective solutions are put forward which is helpful to establish an accurate mathematical model of excitation system.

Key words: excitation; model; problem; method

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)03—0092—03

励磁系统模型作为电力系统“四大模型”之一,模型参数的准确性直接关系到系统稳定分析工作的正确性。随着电网规模的不断扩大,分析使用的模型、参数对计算结果的影响越来越大。模型的完整和参数的精确,是进一步提高电网安全稳定分析准确度的必要条件^[1-3]。励磁系统模型参数一般根据调节器、发电机及励磁变压器等厂家提供的资料,由试验院(所)通过现场试验进行校验或测试获得。厂家提供的资料是否准确,测试方法是否正确都将影响励磁系统模型和参数的准确性。

四川某水电厂的励磁系统模型按现场采集的数据建立后,仿真结果和实测结果之间出现了较大的偏差,分析了偏差产生的可能原因,提出了对模型参数的修改办法,修改后,模型的计算结果和实测结果基本吻合。

1 某水电厂 1 号机组励磁系统简介

某水电厂 1 号机组为 21 MW 水轮发电机,发电机采用自并激励磁方式,励磁调节器为数字式励磁调节器,采用并联 PID 控制,其传递函数如图 1。图 1 中 K_p 为 PID 比例环节系数, K_i 为积分环节系数, K_d 为微分环节系数。发电机励磁模型选用中国版 BPA 暂态稳定程序中的 FV 型^[4]、或 PSASP 程序包中的

12 型,作为电力系统稳定计算用励磁系统模型^[5-7]。在图 1 所示的传递函数中, $K_p=3$, $K_i=6$, $K_d=0$ 。

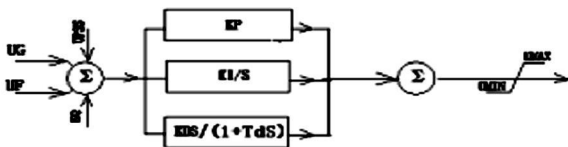


图 1 励磁调节器 PD 传递函数

2 励磁系统数学建模中存在的问题

按励磁调节器厂家提供的 PID 参数建立发电机励磁系统数学模型,在 PSASP 仿真程序中对机端电压做 5% 阶跃仿真试验。发电机空载 5% 机端电压阶跃响应各项指标的仿真结果与现场实测结果见表 1。

由表 1 可见,上升时间和峰值时间两项重要指标的偏差超出了励磁系统建模导则的允许偏差^[8-9]。

3 仿真计算存在较大偏差的原因分析

3.1 PD 放大倍数设置不一致

目前国内电网中运行的励磁调节器,其 AVR 调节器的主环 PID 参数中的放大倍数,有的已经将可控硅放大倍数 K_a 折算进去了,有的则没有包括 K_a 。因此进行仿真试验时,如果已经确认 K_a 包含在 PID 的

放大倍数中,模型中通常将 K_a 设置为 1。相反,则要对 K_a 的值进行实测并设置为实测值。因此,在情况不明确的情况下,当阶跃曲线的仿真与实测结果之间的误差超过相关的行业标准时,通常首先考虑的是对 AVR 放大倍数进行调整^[10]。

表 1 发电机空载 5% 机端电压阶跃响应仿真结果与实测结果比较

5% 阶跃响应	实测结果	仿真结果	偏差	允许偏差
超调量 / %	4.76	2.9	1.86	±5
上升时间 / s	0.38	0.68	-0.3	±0.1
峰值时间 / s	0.81	1.72	-0.91	±0.1
调整时间 / s	1.55	1.14	0.41	±2
振荡次数 / 次	0.5	0.5	0	≥1

3.2 PD 环节中的参数设置和实测值不吻合

部分调节器厂家的程序设计人员根据产品的特点在 PID 的环节中设置一些系数,这样导致调节器参数库中的参数值与 PD 环节实测的参数值不吻合,这给现场参数的测量带来很大的困难。通常对于这种情况,可以采用频域法对 PID 的各个环节进行现场测量^[11],求取环节实际的参数值。由于该电站调节器没有信号叠加点,无法采用频域法进行测量,只能采用拟合的办法估计 PD 的参数。一般来说,利用拟合得出的参数会有很好的仿真效果,但得到的结果往往不是唯一的,一般都可以拟合出多组参数,因此通常只有拟合的参数与厂家提供的参数差别很小且有一定依据的情况下才值得采信。

3.3 发电机转子绕组时间常数 T_{D0} 出厂值和实测值不相同

发电机出厂资料中一般都会有转子绕组的时间常数 T_{D0} ,建模试验时一般会对该时间常数进行校验,但有些调节器装置无法做校验性的试验项目,或由于发电机出厂参数测量时的环境与现场环境不同,例如从转子绕组到调节器装置之间的这段电缆是在安装后才有的,从而引起转子绕组的阻抗值与出厂值不一致,另外,转子绕组的电阻值也因为工况的变化而变化,这些因素都会引起转子回路时间常数的变化。

4 解决方法

4.1 对 PD 放大倍数进行调整

按同步发电机励磁系统建模导则的要求,实测结果和仿真结果的差异较大时可以调整可能产生偏差的数据,如励磁机时间常数、励磁系统总的静态增益、

励磁机励磁绕组电阻值、由纯延时特性推出的等效惯性环节时间常数参数等。这里首先考虑励磁系统总的静态增益不包括可控硅的放大倍数 K_a 的情况。通过现场的试验数据,利用式 (1),可计算出 K_a 。

$$K_a = 1.35 \frac{U_{d1}}{U_{FD}} \frac{U_1}{U_N}$$
$$= 1.35 \frac{204}{92.9} \frac{8\,081}{10\,500} \approx 2.28$$

式 (1) 中, U_{d1} 为发电机励磁电压; U_{FD} 为发电机励磁电压的基准值; U_1 为发电机端电压; U_N 为发电机端电压额定值。

将仿真程序中 K_a 的值由 1 改为 2.28,仿真结果见表 2。

表 2 发电机空载 5% 阶跃响应试验仿真结果与实测结果比较

5% 阶跃响应	实测结果	仿真结果	偏差	允许偏差
超调量 / %	4.76	3.72	1.04	±5
上升时间 / s	0.38	0.52	-0.14	±0.1
峰值时间 / s	0.81	1.02	-0.21	±0.1
调整时间 / s	1.55	1.94	-0.39	±2
振荡次数 / 次	0.5	0.5	0	≥1

由表 2 可见,仿真结果中的上升时间 T_{up} 与峰值时间 T_p 与实测结果的偏差分别为 0.14 s、0.21 s 依然没有满足行标要求的 0.1 s 说明调节器厂家提供的 PID 参数不完整。

4.2 对 PD 环节中的参数进行拟合

在该水电厂数学模型中,缺少的资料可采用 PSASP 经典参数。对可控硅放大倍数和发电机转子时间常数进行了实测,并对实测数据进行了仿真,仿真结果都不理想,可采用拟合的方法对 PID 参数进行调整,调整后的数据如下: $K_P=6$, $K_I=6$, $K_D=0$ 。

根据拟合的参数进行仿真计算,结果见表 3。阶跃曲线的仿真结果和实测结果如图 2 所示。

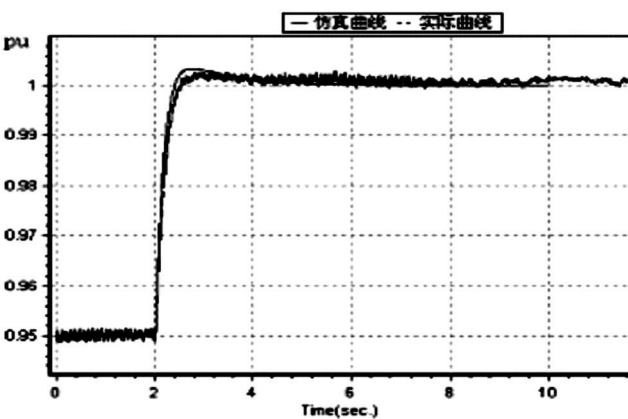


图 2 发电机空载 5% 阶跃响应曲线及仿真曲线

表 3 根据拟合的 PD 参数仿真结果与实测结果比较

5%阶跃响应	实测结果	仿真结果	偏差	允许偏差
超调量 /%	4.76	4.95	-0.19	±5
上升时间 /s	0.38	0.32	0.06	±0.1
峰值时间 /s	0.81	0.76	0.05	±0.1
调整时间 /s	1.55	2.35	-0.80	±2
振荡次数 /次	0.5	0.5	0	≠1

表 3 中横坐标为时间,单位为秒,纵坐标为机端电压的标么值。由表 3 可见,仿真结果和实测结果之间的偏差在允许偏差范围内。由图 1 可见,仿真曲线与实测曲线基本吻合。

5 结 论

实测结果和仿真结果的差异较大时可以调整实际可能产生偏差的数据,如励磁机时间常数、励磁系统总的静态增益、励磁机励磁绕组电阻值、由纯延时特性推出的等效惯性环节时间常数参数等。通过对这些参数的调整后,如果仿真结果与实测结果偏差满足行业标准的要求,可以认为模型参数基本准确,可以作为系统仿真计算使用。

参考文献

[1] 贾善杰,苏刚,郑吉成,等. 励磁系统建模方法及应注意的问题[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2006, 9(5): 51—54

(上接第 80 页)

[9] 关天祺,梅生伟,卢强,等. 超导储能装置的非线性鲁棒控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17): 1—6

[10] 姚涛,唐跃进,石晶,等. 针对系统暂态稳定性的超导磁储能装置容量研究[J]. 低温物理学报, 2005, 27(5): 1096—1100

[11] Kinjo T, Senjyu T, Urasaki N, et al. Terminal-voltage and Output-power Regulation of Wind-turbine Generator by Series and Parallel Compensation Using SMES[J]. Proceedings of the IEEE Generation Transmission and Distribution, 2006, 153(3): 276—282

[12] 余运佳,惠东. 中大型超导储能装置的研制与应用[J]. 中国电力, 1997, 30(3): 57—59

[13] 郭文勇,赵彩宏,张志丰,等. 电压型超导储能系统的统一直接功率控制方法[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 58—63

[14] 李艳,程时杰,潘垣. 超导磁储能系统的自适应单神经元控制[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 57—61

[15] 樊冬梅,雷金勇,甘德强. 超导储能装置在提高电力系统暂态稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 37—42

[16] 林姿峰,闵勇. 基于超导储能的电力系统静态安全性在线评估[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 40—44, 48

[17] 西安交通大学. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994

[2] 窦赛,刘南平. 励磁控制系统的实时仿真研究[J]. 广西电力, 2005, 28(1): 5—8, 26

[3] 彭波,赵勇,苏寅生,等. 南方电网励磁系统实测与建模技术及其应用[J]. 南方电网技术, 2008, 2(5): 51—54

[4] 黄梅,郝满江. 励磁系统模型可辨识性研究[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(2): 101—103

[5] 肖洋. 四川宝兴东风水电站 2 号机励磁系统模型参数测试报告[R]. 中国电力科学研究院, 2009

[6] 贺文. 大坝电厂 4 号机励磁系统数学模型参数测试[J]. 宁夏电力, 2005(5): 22—26

[7] 袁训奎,刘世富,赵义术. 山东电网励磁系统模型参数确认试验的分析[J]. 电力建设, 2008, 29(7): 32—34

[8] 夏潮. 四川宝兴东风水电站 1 号机励磁系统模型参数测试报告[R]. 中国电力科学研究院, 2008

[9] 国家电网公司. Q/GDW 142—2006 国家电网公司企业标准[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006

[10] 吴涛,苏为民,刘永奇,等. 华北电网开展发电机励磁系统参数辨识工作综述[J]. 华北电力技术, 2003(9): 24—26

[11] 贺仁睦,沈峰,韩冬,等. 发电机励磁系统建模与参数辨识综述[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 63—67

作者简介:

毕 坚 (1966—),男,工程师,研究方向为水电厂机网协调。

夏 潮 (1974—),男,工程师,研究方向为励磁控制系统研究与电力系统稳定分析。(收稿日期: 2009—12—03)

版社, 1998

[18] 赵静波,甘德强,雷金勇. 电池储能装置在抑制电力系统低频振荡中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 93—99

[19] 王少荣,彭晓涛,唐跃进,等. 电力系统稳定控制用高温超导磁储能装置及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 44—50

[20] 文劲宇,程时杰,李刚,等. 一种增强电力系统稳定性的多功能柔性功率调节器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(25): 6—11

[21] Mathur R M, Vama R. Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems [M]. New York: IEEE Press, 2002

[22] Wang H F. Interactions and Multivariable Design of Multiple Control Functions of a Unified Power flow Controller [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(7): 591—600

作者简介:

李 勇 (1983—),男,硕士研究生,主要从事电力系统稳定与控制的研究。

刘俊勇 (1963—),男,教授,博士生导师,主要从事电力市场、电力系统可视化及电力系统稳定与控制等方面的研究。

(收稿日期: 2010—01—26)