

四川電力技術

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

電力投資30億

真情川電 支持德陽災後重建

2009-2012

“康橋工程” 助推德陽奔小康



情義德電

ISSN 1003-6954



9 771003 695005

四川省電機工程學會 四川電力試驗研究院

Vol.32

2009
No.5

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 邬小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN 1003-6954
CN 51-1315/TM

2009年第 32卷第 5期(总 202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:cdscdlj@163.com

E-mail:wxdl_zss@scpc.com.cn

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* ¥6.00* 4300* 24 *

2009-05

目 次

·基金栏目·

FD法和故障树法在高压直流输电直流输电系统可靠性评估中的比较分析

..... 谢开贵 夏 天 胡 博 等(1)

考虑多时段 CVAR的供电公司购电优化模型..... 吴 薇 刘俊勇(5)

全桥 DC/DC(H桥)变换电路的设计与实施

..... 贾 周 王金梅 封俊宝(10)

·抗冰融冰·

南方地区电网覆冰事故分析及应对措施研究

..... 赵永生 王富荣 赵德奎 等(13)

220 kV变电站中建设融冰配电变压器的设想..... 邓 健(17)

·专题研究·

SVC安装对四川电网的影响研究..... 杜新伟 丁理杰 周惟婧(21)

特高压电流差动保护方案研究..... 桑丙玉 喻 奇(24)

基于改进 PSO算法的 PID参数优化研究..... 李凌舟 陈 利(29)

模拟五防系统设计..... 周慧莹(32)

含有 SMES电力系统次同步谐振的抑制研究

..... 秦浩庭 刘 燕 徐根厚 等(35)

10 kV配电线路防雷措施研究与应用..... 黄兰英 吴广宁 曹晓斌 等(39)

谐波响应特性对接地电极设计的影响研究..... 张凤鸣(42)

基于 D-S证据理论的变压器诊断系统研究..... 曹 海(46)

大型电机局部放电在线监测的方法研究..... 崔东君 刘 念(50)

一种新的三端电气量行波测距方案..... 焦征南 吕飞鹏 胡亚平等(54)

基于改进蚁群神经网络的短期负荷预测..... 周 曲 邱晓燕(58)

基于 WAMS的互联电网联络线定功率控制系统设计..... 李 强(62)

·经验交流·

配电网合环安全性分析系统的应用及改进

..... 冯小萍 戚红艳 樊国伟 等(67)

区域电网低频振荡主导模式的检测方法..... 白 洋 邓集祥(71)

高频通道异常情况的现场特殊处理..... 唐明亮 赵玉忠(75)

接地模块接地工频电阻计算及在送电线路中的应用..... 徐宏宇(78)

10 kV系统 TV高压保险频繁熔断事故的分析与仿真

..... 董家读 黄 庆 何 跃 等(83)

CAN在 110 kV变电站综合自动化系统的应用..... 刘朝毅 曾绍成 雷明亮(86)

对 220 kV龙丰东线线路保护更换工程的认识..... 罗永刚 高锦锋(89)

Y/Yn接线变压器带单相负载的计量原理分析..... 张 蕾(92)

CONTENTS

Comparisons of FD Method and Fault Tree Method in Reliability Evaluation of HVDC Transmission System	Xie Kaigui Xia Tian Hu Bo et al(1)
Optimal Model of Power Purchasing for Power Supply Company Considering Multi-Period CVaR	Wu Wei Liu Junyong(5)
Design and Implementation of Full-bridge DC/DC (H-bridge) Converter Circuit	Jia Zhou Wang Jimen Feng Junhao(10)
Analysis on Icing Accident of Power Grid in South China and Its Countermeasures	Zhao Yongsheng Wang Furong Zhao Dekui et al(13)
Assumption of Building Ice-Melting Distribution Transformer in 220 kV Substation	Deng Jian(17)
Research of Influence of SVC Installation on Sichuan Power Grid	Du Xinwei Ding Lijie Zhou Weijiang(21)
Scheme of Current Differential Protection in UHV Transmission Lines	Sang Bingyu Yu Qi(24)
Research on PID Parameter Optimization Based on Improved Particle Swarm Optimization	Li Lingzhou Chen Li(29)
Design of Computer-based Five-Proof Simulation System	Zhou Huiping(32)
Research on Subsynchronous Resonance Suppression of Power System with SMES	Qin Haoting Liu Yan Xu Genhou et al(35)
Research on Protection Measures against Lightning for 10 kV Distribution Line and Its Application	Huang Lanying Wu Guangning Cao Xiaohui et al(39)
Influence of Harmonic Response Characteristic on Design of Grounding Electrode	Zhang Fengming(42)
Research on Transformer Diagnosis System Based on Dempster-Shafer Theory of Evidence	Cao Hui(46)
Research on Online Partial Discharge Monitoring Method of Large-scale Electrical Machine	Cui Dongjun Liu Nian(50)
A New Scheme of Three-terminal Travelling Wave Fault Location Based on Mathematical Morphology	Jiao Zhengnan Lv Feipeng Hu Yaping et al(54)
Short-term Load Forecasting Based on Improved Ant Colony Neural Network	Zhou Qu Qiu Xiaoyan(58)
Design of Inter-area Tie-lines Scheduled Power Control System Based on WAMS	Li Qiang(62)
Application of Security Analysis System to Closed Loop of Distribution System and Its Improvement	Feng Xiaoping Qi Hongyan Fan Guowei et al(67)
Detection Method of Dominant Low-frequency Oscillation Modes in Regional Power Grid	Bai Yang Deng Jixiang(71)
Special On-site Treatment under Abnormal Situation of High-frequency Channel	Tang Mingliang Zhao Yuzhong(75)
Calculation of Earthing Power-frequency Resistance of Earthing Module and Its Application to Transmission Line Engineering	Xu Hongyu(78)
Analysis on Frequent Fusing Accident of HV Fuse of Voltage Transformer in 10 kV System and Its Simulation	Dong Jiadu Huang Qing He Yue et al(83)
Application of CAN to Integrated Automation System in 110 kV Substation	Liu Chaoyi Zeng Shaocheng Lei Mingliang(86)
Understanding of Line Protection Replacement Project of 220 kV Long-Feng East Line	Luo Yonggang Gao Jinfeng(89)
Measurement Principle Analysis of Y/yn Transformer with Single-Phase Load	Zhang Lei(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2009 Vol.32 No.5

(Ser. No. 202)

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

FD法和故障树法在高压直流输电系统 可靠性评估中的比较分析

谢开贵, 夏 天, 胡 博, 曹 侃

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:详细比较了高压直流输电系统可靠性评估中常用的频率和持续时间(FD)法和故障树法,分别给出了各自的优缺点。在子系统划分的基础上分别建立各子系统的状态空间图和故障树图,并加以层层组合,得到整个直流输电系统的状态空间模型和故障树模型。分别采用FD法和故障树法对一单12脉接线高压直流输电系统进行了算例对比分析,计算的可靠性指标包括双极运行、单极停运、双极停运对应的概率、频率、平均持续时间等。

关键词:高压直流输电系统; FD法; 故障树法; 可靠性评估

Abstract: A detailed comparison of frequency and duration (FD) method and fault tree method in the reliability evaluation of HVDC transmission system is presented and the differences between these two methods are proposed. Based on the sub-system division, the state space diagram and fault tree diagram for individual components, sub-systems and the whole HVDC transmission system are established step by step. A HVDC transmission system of single 12-pulse is used as an example to demonstrate these two methods and the reliability indices for calculation includes the probability, the frequency, the duration and so on.

Key words: HVDC transmission system; frequency and duration (FD) method; fault tree method; reliability evaluation

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0001-04

0 引 言

随着高压直流输电技术的不断发展和实际工程的日益增多,高压直流输电系统的可靠性已成为影响整个电力系统可靠性的重要因素,其可靠性的改善也将给整个电力系统的安全、可靠和经济运行带来巨大的效益。因此准确评估高压直流输电系统的可靠性是一项十分重要的工作^[1]。

文献[2]作为可靠性评估的早期著作,将 Markov理论和状态空间法引入电力系统可靠性评估;文献[3~6]将 Markov理论和状态空间法应用于直流输电系统,建立了高压直流输电系统可靠性评估的状态空间模型;文献[7、8]采用结合确定性和概率性的混合方法进行高压直流输电系统可靠性评估;文献[9]以在交流系统可靠性评估中模拟直流输电系统三状态模型的方式建立起交直流系统可靠性评估的数学

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA02A21);国家自然科学基金(50777067);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0762);重庆市自然科学基金重点项目(CSTS2008BC7031)

模型;文献[10]利用故障树分析的相关理论,根据直流输电的基本原理,从引起直流输电系统故障的原因入手,建立了高压直流输电系统的故障树模型。上述文献都针对单一的计算方法进行研究,没有比较不同计算方法间的优劣,下面针对目前高压直流输电系统中常用的频率和持续时间(FD)法和故障树法,详细阐述两者的数学模型,在子系统划分的基础上分别建立各子系统的状态空间图和故障树,并加以层层组合,最终得到整个高压直流输电系统的可靠性模型,并采用算例进行了对比分析。

1 FD法可靠性评估模型

1.1 FD法概述

FD法着眼于建立系统各子系统的状态空间图并获得相应的等效模型,通过组合各等效模型进而建立整个高压直流输电系统的状态空间图。在建立状态空间图及对各子系统等效模型进行组合的过程中,可以考虑实际高压直流输电系统复杂的技术条件^[1~3]。

1.2 状态空间图

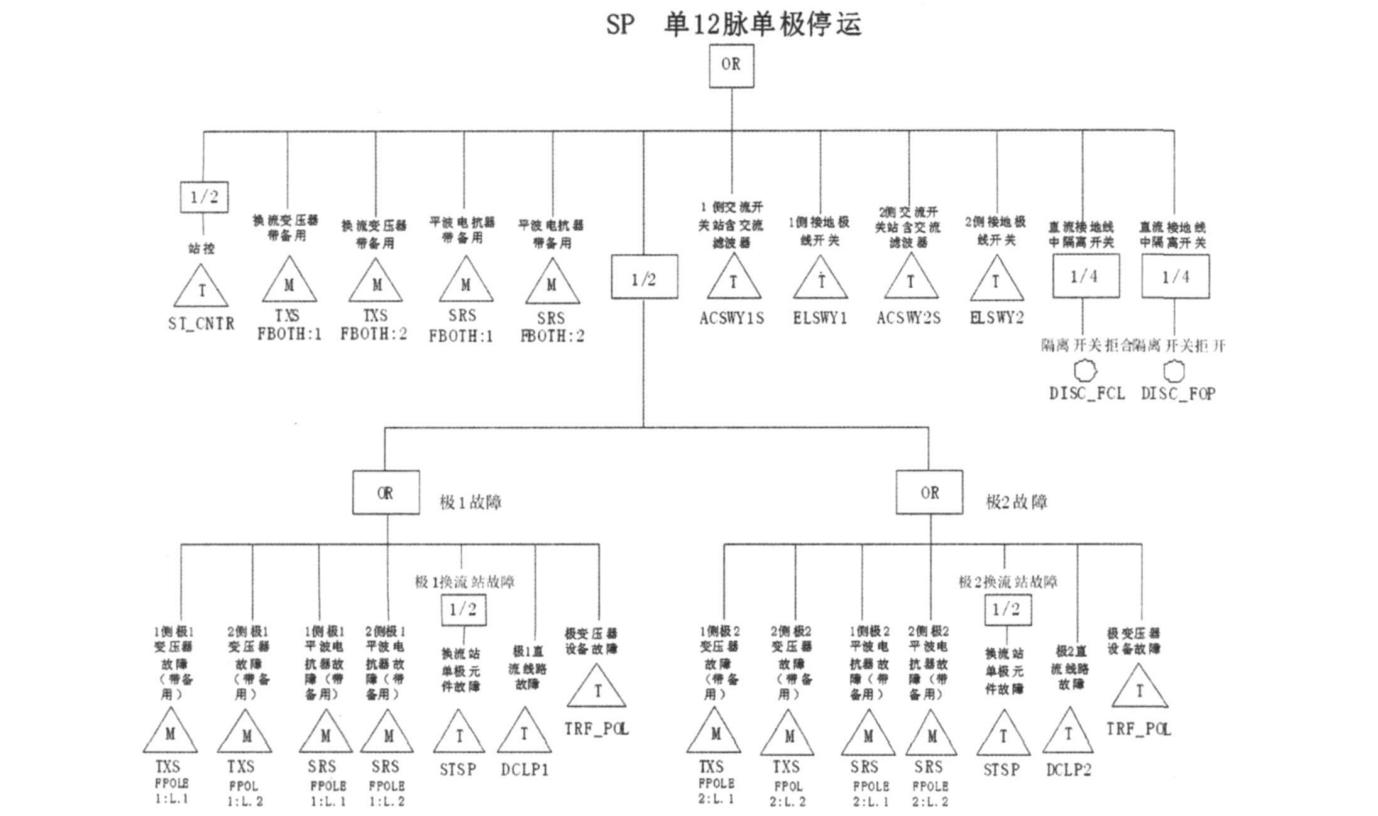


图 3 单极停运的故障树图

故障的诸因素之间逻辑关系的过程,并且用故障树的图形符号(事件符号与逻辑符号),抽象表示实际系统故障组合和传递的逻辑关系。

根据直流输电系统各元件间故障的逻辑关系,建立各子系统的故障树图,从底事件开始层层组合最终得到整个高压直流输电系统可靠性指标。限于篇幅,这里只给出高压直流输电系统单 12 脉接线引起单极停运的故障树图,如图 3 所示。

2.3 故障树法数学模型^[1,2,10]

- 在进行故障树定量计算时,一般要作以下几个假设:
- ①底事件之间相互独立;
 - ②底事件和顶事件只考虑 2 种状态,即正常或故障 2 种状态;
 - ③采用最小割集求顶事件发生的概率。

设故障树有 k 个最小割集 $K_i (1 \leq i \leq k)$, 故障树的结构函数表示为

$$T = \Phi(X) = K_1 + K_2 + \dots + K_k \quad (6)$$

其中,每个最小割集 $K_i (1 \leq i \leq k)$ 是底事件 $x_j (1 \leq j \leq n, n$ 为底事件数目)的积事件。

一般情况下,最小割集彼此相交,根据相容事件的概率计算公式,顶事件发生概率为 $P(T)$ (系统不可靠度为 F_s) 为:

$$\begin{aligned} F_s &= P(T) = P(K_1 + K_2 + \dots + K_k) \\ &= \sum_{i=1}^k P(K_i) - \sum_{i < j=2}^k P(K_i K_j) + \\ &\quad \sum_{i < j < k=3}^k P(K_i K_j K_k) + \dots \\ &\quad + (-1)^{k-1} P(K_1 K_2 \dots K_k) \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) 具有 $(2^k - 1)$ 个项,当最小割集数目 k 达到一定程度时,会产生组合爆炸问题。

3 算例分析

分别采用 FD 法和故障树法对单 12 脉接线高压直流输电系统进行可靠性评估,系统接线图如图 4 所示,在进行可靠性评估时,采用的原始参数主要来源于贵广 I 超高压直流输电系统,各元件的可靠性参数如表 1 所示。表 2 分别列出了这 2 种方法的计算结果,主要包括双极运行、单极停运、双极停运对应的概率、频率、平均持续时间、总持续时间、总等值停运时间、能量可用率、能量不可用率。

从表 2 中可以看出这 2 种方法的计算结果基本一致,部分可靠性指标有一定差别,主要是由于故障树法不能考虑系统各状态间的随机转移情况以及由此引起的影响,与 FD 法相比必然会带来误差。

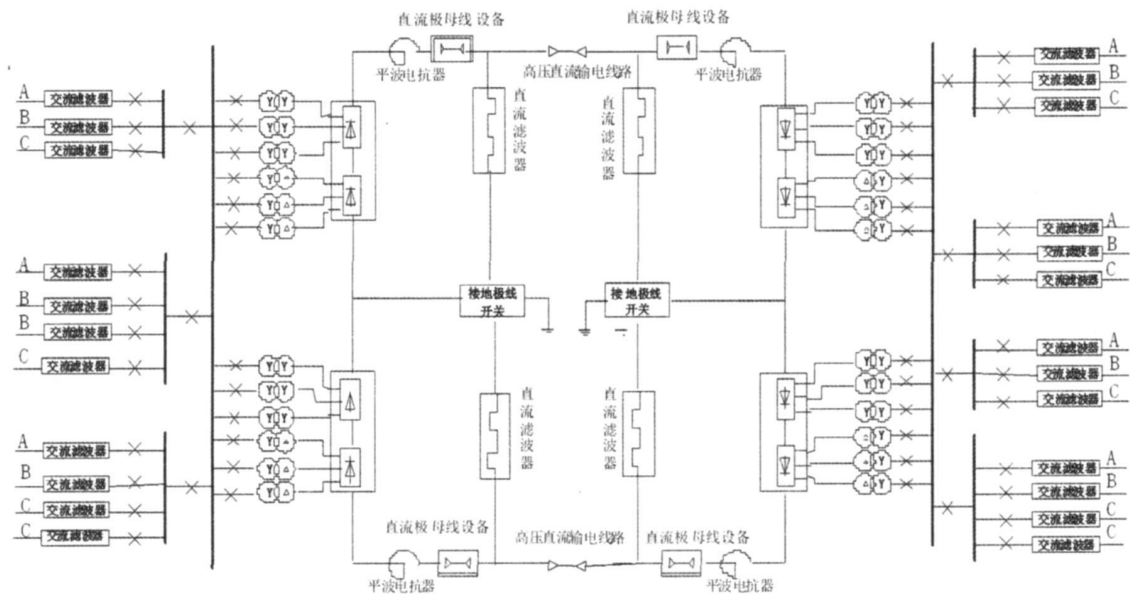


图 4 单 12 接线 HVDC 系统示意图

表 1 直流输电系统主要元件可靠性原始参数

组合元件	故障率 (次/a)	修复率 (次/a)	安装时间 (h)
阀臂	0.137 4	1 460.000 0	6
换流变压器	0.012 6	290.500 8	48
极设备	0.005 6	761.068 7	
控制保护	0.088 0(阀控) 0.010 0(站控)	1 158 120 0(阀控) 1 179 030 0(站控)	—
交流滤波器	0.200 0	876.000 0	

表 2 单 12 脉接线直流输电系统可靠性计算结果

基本指标 (FD 法)	双极运行	单极停运	双极停运
发生概率	0.996 710 25	0.003 279	0.000 010 533
发生频率 (次/a)	3.959 619 093	3.944 808 85	0.038 545 26
平均持续时间 (h)	2 205.056	7.282	2.394
总持续时间 (h)	8 721.728 2	28.802 7	9.469 06
基本指标 (FD 法)	双极运行	单极停运	双极停运
发生概率	0.996 772 00	0.003 212	0.000 003 096
发生频率 (次/a)	3.329 938 00	3.295 8	0.03 413 8
平均持续时间 (h)	2 622.187	8.537	4.106
总持续时间 (h)	8 717.965 9	28.382 9	13.6512
系统总指标	总等值停运时间 (h/a)	能量可用率 EA	能量不可用率 EU
FD 法	14.455 3	99.834 9%	0.165 00%
故障树法	14.208 3	99.839 1%	0.160 90%

4 结 论

由于高压直流输电系统传输容量大、元件多、结构复杂、故障率高且运算条件复杂,将使故障树分析法的计算量变得十分巨大,由于不能考虑系统在各种状态之间的随机转移情况以及由此而引起的影响,因此,计算结果必然会带来误差。同时,使用该方法建立故障树是一项十分繁琐的工作。此外,该方法的实现对图形化、微机化等计算机软件方面有较高的要求,必然加大了算法实现的难度和经济成本,不及 FD 法来得有效方便。

对 FD 法而言,由于直流输电系统本身较复杂,状态空间维数较多,虽然可以通过建立直流输电系统各子系统及整个系统的等效模型来降低维数,但状态空间图的绘制仍然较为繁琐并且很容易出错,通用性也有待进一步提高。

因此,可以看出这 2 种方法都存在各自的优缺点,如何找到一种可靠有效的计算方法也是当前高压直流输电系统可靠性评估方法研究的重点。

参考文献

[1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
[2] Billinton R, Allan R N. Reliability Evaluation of Engineering Systems[M]. New York: Plenum Press 1992.

(下转第 38 页)

可以清楚地看到,原动机低压段 A 与低压段 B 轴系间的扭矩 T_3 以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩 T_2 比采用固定串补的情况下明显地减小,并使其振荡波形趋于平缓,这说明系统采用了 SMES 方案后,次同步谐振现象得到了很好的抑制。而且可以同时得到输电线路相电压的标幺值,如图 6 所示。

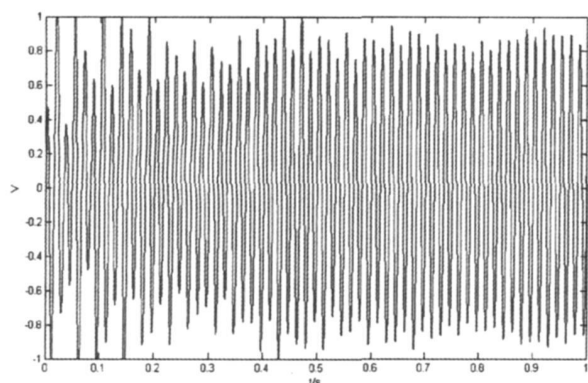


图 6 系统 A 相电压 (P.U.)

5 结 论

通过以上算例的仿真分析,可以看出采用 SMES 方案进行电力系统的无功补偿,既可以稳定电力系统的电压,提高电压的峰值,而且还可以对电力系统发电机轴系之间的扭振现象有很好的抑制作用,阻尼次同步谐振现象的产生。对于不同的运行工况和需要解决的问题,SEMS 方案的控制策略可以根据需要作一些变化。

综上所述,应用 SEMS 方案,进行电力系统的无功补偿以及次同步谐振的阻尼具有极高的经济实用价值。

参考文献

- [1] 钟胜. 与超高压输电线路加串补装置有关的系统问题及其解决方案 [J]. 电网技术, 2004, 28(6): 26—29.
- [2] 赵贺. 电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] 何大愚. 柔性交流输电的定义、机遇及局限性 [J]. 电网技术, 1996, (20): 18—24.
- [4] 曹路, 陈衍. 可控串联补偿抑制次同步谐振的机理 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 25—30.
- [5] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] 张文涛. 次同步谐振问题及防止措施 [J]. 电网技术, 1989, (2): 59—65.
- [7] IEEE Committee Report. Countermeasures to Sub-synchronous Resonance Problems, IEEE Trans on PAS, 1980, 99(5): 1810—1817.
- [8] R. G. Farmer, A. L. Svchwalb, E. kvate Navajo project report on Sub-synchronous Resonance Analysis and Solutions, IEEE Trans on PAS, 1977, 1266—1232.
- [9] R. F. Wolff. Stop Sub-synchronous T/G—Shaft Damage, Electrical World, 1981, 129—133.
- [10] 李岩松. 基于同意潮流控制器的阻尼次同步谐振的研究 [M]. 北京: 华北电力大学, 2000.
- [11] Xing K, Kusio G. L. Damping subsynchronous resonance by phase shifters, IEEE Tran on Energy Conversion, 1989, 4(3): 344—350.

作者简介:

秦浩庭 (1981—), 男, 西南交通大学在读硕士。

(收稿日期: 2009—05—15)

(上接第 4 页)

- [3] 任震, 黄雯莹, 冉立. 高压直流输电系统可靠性评估 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [4] 陈永进, 任震. 模型组合及其在直流输电系统可靠性评估中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(13): 18—22.
- [5] Kunuganty S. HVDC Transmission System Models for Power System Reliability Evaluation [C]. IEEE WESCANEX '95 Conference proceedings Wescanex 1995, 5: 501—507.
- [6] Billinton R, Aboreshaid S. A Hybrid Deterministic/Probabilistic Technique for HVDC System Reliability Evaluation [A]. 1997 Conference on Communications Power and Computing [C]. WESCANEXPII Proceedings Winnipeg MB, 1997, 5: 35—40.
- [7] Billinton R, Fotuhi-Firuzabad M, Faried S O. Reliability

Evaluation of Hybrid Multi-terminal HVDC Substation Systems [J]. IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 571—577.

- [8] 刘海涛, 程林, 孙元章. 交直流系统可靠性评估 [J]. 电网技术, 2004, 28(23): 27—31.
- [9] 张静伟, 任震, 黄雯莹. 直流输电系统可靠性故障树评估模型及应用 [J]. 电力系统自动化, 2005, 25(6): 62—65.
- [10] 金星, 洪延姬. 工程系统可靠性数值计算方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

作者简介:

谢开贵 (1972—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电力系统规划与可靠性、电力系统优化运行、电力系统并行计算及电力市场等方向的研究和教学工作。

(收稿日期: 2009—07—09)

考虑多时段 CVaR 的供电公司购电优化模型

吴 薇, 刘俊勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 电力市场环境, 由于市场价格的不确定性和负荷需求的随机性, 供电公司面临在多个市场间购电时需要综合考虑风险和收益的权衡问题。单时段条件风险价值 (conditional value at risk, CVaR) 可以衡量单时段购电的风险和收益, 但购电过程是一个动态的优化问题, 因此将多时段 CVaR 风险收益模型应用于供电公司的购电组合中, 建立以风险最小化为目标的多市场购电组合优化模型。应用该模型, 对供电公司在多个时段多个市场的购电分配进行计算, 并利用该模型分析不同置信水平和期望收益对购电分配决策的影响。考虑到风险对未来投资收益率的长期影响, 引入转移影响率, 将上一时段的风险转移到下一时段, 从而降低整体风险。算例结果表明了该方法的有效性, 从而为供电公司的购电决策及其风险评估提供新的思路。

关键词: 电力市场; 供电公司; 购电策略; 多时段条件风险价值; 风险转移

Abstract: In the power market for the uncertainty of market price and the randomness of load demand, the power supply companies need synthetically consider the balance between risks and revenues when purchasing electricity in a number of markets. Single-period conditional value at risk (CVaR) can only measure the risks and revenues of single period, but the process of purchasing electricity is a dynamic optimal problem. So the multi-period CVaR model is applied to the portfolio and optimal power purchasing portfolio model for multiple markets in which the minimum risk is the objective function is proposed. Using the model, the allocation in different periods and different markets can be calculated. Furthermore, the effect of different confidence level and expected revenues on purchasing strategy is analyzed. Taking into account of the long-term impact of risks on the future investment income, the risk-transferring rate is introduced in order to transfer the risks of one period to the next period and reduce the overall risks. The calculation results show the validity of the multi-period CVaR model and provide a new way for purchasing strategy and risk evaluation.

Key words: power market; power supply company; purchasing strategy; multi-period conditional value at risk; risk-transferring

中图分类号: F407.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0005-05

0 引 言

随着电力市场化改革的深入, 中国电力市场运营正由发电竞争的模式发展并过渡到输配分开的模式。在输配分开的市场环境中, 供电公司将从垄断运营的电力工业体制中解捆并作为独立的市场主体参与竞争。供电公司代表用户先在电力批发市场购电, 再以受到管制的价格卖给用户, 承担着购电价格波动的风险。为了满足用户的电能需求同时又要规避风险, 供电公司需要综合考虑在不同时段不同市场的购电决策, 合理分配在各个交易市场中的电量, 以取得最大收益并分散风险。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973 项目) (2004CB217905)

当前有多篇文献涉及电力市场的投资决策及风险管理, 但大部分研究都是针对发电商进行的, 而对于供电公司的购电决策及风险评估问题的研究还不多。文献 [6] 建立了购电的单目标规划, 讨论了购电量为确定量和随机量两种情况下的最优购电组合方案, 但未计及购电商在进行购电决策时所面临的决策风险。事实上, 电价及其相应的购电费用都是随机变量, 这些不确定性因素使得购电决策具有风险, 因此在构造电能分配策略时应计及风险。文献 [7] 针对作为价格接受者的购电商, 构造了其在计及风险时的购电分配策略方法, 兼顾收益和风险这两个有冲突的目标, 但是该方法采用方差来度量风险, 在计及风险时需要凭经验在期望值和方差值之间做适当加权折中, 无法得到对风险的显式描述, 而且用方差来描述

风险需要其收益服从正态分布,具有局限性。近年来,提出了大量计量风险的新方法^[8],如风险价值(VaR, value at risk)和条件风险价值(CVaR)方法,以便更准确地反映风险的本质特征。文献[9~10]利用期货、期权风险管理工具的风险价值 VaR 评估方法来分析发电报价过程中的风险,该方法的优点是克服了均值-方差模型的两个缺陷,但 VaR 在投资组合收益不服从正态分布时,不满足一致性风险度量。CVaR 模型目前被广泛地用于组合投资问题的风险度量与控制,研究表明了 CVaR 模型要比 VaR 模型对组合投资的风险度量更有效。文献[11]以 CVaR 为风险度量指标,建立了供电公司电能分配问题的均值-CVaR 模型。该方法有效地克服了 VaR 投标组合的缺陷,但单时段 CVaR 模型一般用于研究单期静态风险变化情况,即只考虑某一时段的风险。事实上,购电决策过程是一个动态的优化问题,决策过程中常常呈现多期风险,因而对风险的度量也应该是动态的。

在上述研究的背景下,提出一种动态风险度量,考虑到风险对未来投资收益波动的长期影响,应用多时段 CVaR 来度量购电的动态风险,建立了在不同市场条件下供电公司多时段组合市场购电优化模型。采用规划软件 LINGO 编程实现,算例分析表明了所建立的购电模型的基本特征。

1 多时段动态风险度量

1.1 静态风险度量

VaR 作为金融领域广泛应用的一种风险度量指标,是指在正常的市场波动和给定的置信水平下,某一资产组合在未来特定时间段内的最大可能损失。VaR 之所以被广泛地应用,在于它用一个简单可以理解的数字来描述评估对象可能面临的风险程度,便于对风险管理结果做出直观判断。尽管 VaR 是目前风险管理的主流方法,但研究表明,将其应用在投资组合优化的问题上仍然存在很多缺陷。例如,它不满足一致性公理、缺乏次可加性,因此不能用于组合优化。作为对 VaR 不足的修正,文献[15]首次提出了基于条件风险价值 CVaR 的风险度量技术,它是指损失超过 VaR 的条件均值,代表了超额损失的平均水平,反映了损失超过 VaR 临界值时可能遭受的平均潜在损失的大小,更能体现潜在的风险价值。与 VaR 一样,

CVaR 不要求市场因子服从正态分布,且仅以减少下方损失为目标,因而在理论上被认为是优于方差的风险度量指标。同时,它是一致性风险计量,并且具有凸性。但是 CVaR 只考虑某一时间段的资产组合,一种基于固定投资期限的静态一致性风险度量。

1.2 多时段动态风险度量

单期静态风险度量只考虑单一时段资产的变化情况,即只考虑资产从 0 到 T 时刻的变化。现将固定期限分为 k 时段,设资产在 n 个市场中进行分配,对第 t 个时段进行分析,其基本原理如下。

设 $x_t = (x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tn})^T$ 为 n 种资产的投资比例向量,而 $y_t = (y_{t1}, y_{t2}, \dots, y_{tm})^T$ 为 m 维随机变量,表示市场的随机因素(如市场收益率),其分布密度函数为 $p(y)$ 。对于时段 t 设 $f_t(s_t, x_t, y_t)$ 为在决策变量 x_t 状态变量 s_t 下由 y_t 引起的损失函数。设 $x_t(s_t)$ 是在状态变量 s_t 下可能的决策变量的集合, s_t 的状态转移方程为

$$s_{t+1} = g_t(s_t, x_t) \quad (1)$$

式中, $t=1, 2, \dots, k-1, s_1=0$ 。

为方便计算,一种简单的状态转移方程是

$$s_{t+1} = x_t \quad (2)$$

设 $\psi(s_t, x_t)$ 为损失函数 $f_t(s_t, x_t, y_t)$ 的分布函数,则其不超过临界值 α 的分布函数为

$$\begin{aligned} \psi(s_t, x_t) &= P\{f_t(s_t, x_t, y_t) \leq \alpha\} \\ &= \int_{f_t(s_t, x_t, y_t) \leq \alpha} p(y) dy \end{aligned} \quad (3)$$

以 β 表示置信水平, $\alpha_\beta(x)$ 表示当投资组合为 x_t 时损失 $f_t(s_t, x_t, y_t)$ 所对应的 VaR 的值,其计算公式为

$$\alpha_\beta(s_t, x_t) = \min\{\alpha \in R \mid \psi_t(s_t, x_t, \alpha) \geq \beta\} \quad (4)$$

又以 $\Phi_\beta(x)$ 表示资产损失 $f_t(s_t, x_t, y_t)$ 不小于 $\alpha_\beta(x)$ 时的 CVaR 值。

$$\begin{aligned} \Phi_\beta(s_t, x_t) &= E[f_t(s_t, x_t, y_t) \mid f_t(s_t, x_t, y_t) \geq \alpha_\beta(s_t, x_t)] \\ &= \frac{1}{1-\beta} \int_{f_t(s_t, x_t, y_t) \geq \alpha_\beta(s_t, x_t)} f_t(s_t, x_t, y_t) p(y) dy \end{aligned} \quad (5)$$

由于上式中含有 VaR 函数 $\alpha_\beta(s_t, x_t)$ 项,而 $\alpha_\beta(s_t, x_t)$ 的解析表达式难以求出,文献[17~19]引入一个相对简单的函数。

$$F_\beta(s_t, x_t, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1-\beta} \int_{y \in R_m} [f_t(s_t, x_t, y_t) - \alpha]^+ p(y) dy \quad (6)$$

式中, $[f_t(s_t, x_t, y_t) - \alpha]^+$ 表示 $\max\{0, f_t(s_t, x_t, y_t) - \alpha\}$ 。

因此在实际计算中,通常基于上式确定资产的最

优组合系数向量 x_t 及相应的 CVaR 和 VaR 的值。

2 基于多时段 CVaR 的购电组合优化模型

市场环境下电力批发价格时有波动,但需求侧售电价格相对固定。供电公司一方面要进入批发市场购电,将面临现货市场价格的急剧变化;另一方面要为用户提供可靠的电力,却面对着固定的合同价格和零售价格以及不确定的负荷需求。发电侧和需求侧的相互影响和两侧电力价格的差异给供电公司带来很大的市场风险。对供电公司而言,在各个市场不同时时段购电会有不同的收益率,因此,供电公司总资产分配到各个市场,采取不同的购电组合策略,将会获得不同的总收益,同时面临不同的损失风险。

将供电公司用户负荷需求看作总资产^[11],将其在各类市场购电并向用户销售后获得的利润看作投资回报,用动态风险度量的方法来建立供电公司的最优购电模型。在计及风险情况下的投资组合优化问题属于多目标随机优化问题,必须权衡利润最大化和风险最小化这两个冲突的目标。根据多目标优化理论,可将其中的一个目标(如总利润)约束在某一水平,求另一目标(如风险)的最优化,从而转化为单目标最优化问题,此时获得的最优解为原问题的有效解。这样,就以利润作为约束条件之一,最小化 CVaR 风险水平,建立基于 CVaR 风险度量指标的供电公司最优购电模型。

设 $x_t = (x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{nt})^T$ 为供电公司在 t 时段的购电组合策略,其中:分量 x_{it} 表示在 i 市场所分配的比例; n 为市场数,满足 $x_{ij} \geq 0 (i=1, 2, \dots, n)$, 且 $\sum_{i=1}^n x_{it} = 1$ 。设 y_{it} 表示第 i 个市场的收益率,则多元随机向量 $y_t = (y_{1t}, y_{2t}, \dots, y_{nt})^T$ 表示供电公司的组合收益率向量, $s_t = (s_{1t}, s_{2t}, \dots, s_{nt})^T$ 表示 t 时段的状态向量。 t 时段购电组合的平均回报率为 $\sum_{i=1}^n x_{it} y_{it}$, 其相反数 $-\sum_{i=1}^n x_{it} y_{it}$ 即为平均损失率,则 t 时段 s 状态下购电组合的损失函数为

$$f_t(s_t, x_t, y_t) = \sum_{i=1}^n f_t(s_{it}, x_{it}, y_{it}) = -\sum_{i=1}^n (x_{it} + \lambda s_{it})^T y_{it} = (x_t + \lambda s_t)^T y_t \quad (7)$$

式中, $\lambda \in (0, 1)$ 为转移影响率; $-\lambda s_t^T y_t$ 为转移损失,则 $\lambda s_t^T y_t$ 为转移利润。将上一时段的投资组合作为下一时段的状态,一种简单的状态转移方程为

$$s_{t+1} = x_t \quad t = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

定义 t 时段购电组合的收益函数 $R(s_t, x_t, y_t)$, 则 $R(s_t, x_t, y_t) = (x_t + \lambda s_t)^T y_t$, 组合收益的均值为

$$E[R(s_t, x_t, y_t)] = E[(x_t + \lambda s_t)^T y_t] = (x_t + \lambda s_t)^T E[y_t] \quad (9)$$

取市场收益 y_t 的样本值 $y_t^1, y_t^2, \dots, y_t^q$, 式(9)的估计式为

$$\hat{F}_\beta(s_t, x_t, \alpha) = \alpha + \frac{1}{q(1-\beta)} \sum_{j=1}^q [- (x_t + \lambda s_t)^T y_t^j - \alpha]^+ \quad (10)$$

式中, α 为一定置信水平和风险水平约束下的 VaR 值,即供电公司的单位最大可能损失;设虚拟变量 $z_j = [- (x_t + \lambda s_t)^T y_t^j - \alpha]^+ (j=1, 2, \dots, q)$, 则基于多时段风险度量的供电公司最优购电模型如下。

$$\hat{F}_\beta(s_t, x_t, \alpha) = \alpha + \frac{1}{q(1-\beta)} \sum_{j=1}^q z_j \quad (11)$$

$$s_t \quad x_{it} \geq 0 \quad \sum_{i=1}^n x_{it} = 1 \quad (12)$$

$$z_j \geq 0 \quad z_j \geq - (x_t + \lambda s_t)^T y_t^j - \alpha \quad (13)$$

$$s_{t+1} = x_t \quad t = 1, 2, \dots, k \quad (14)$$

$$E[R(s_t, x_t, y_t)] \geq e \quad (15)$$

式中, e 为收益下界,且 $0 \leq e \leq 1$ 。

3 算例分析

在电力市场中,不同时段不同市场往往具有不同的价格波动特性和收益率随机波动的特性,下面将以供电公司在年度合约市场、月度合约市场、日前市场和实时市场这 4 个市场中购电为例,进行算例分析。同时将购电过程分为 4 个时段,当然也可以计算任意时段的优化分段电量。设 x_{1t}, x_{2t}, x_{3t} 和 x_{4t} 分别为 t 时段购电电量在 4 个市场的分配比例。模拟市场历史数据,根据优化模型(式(11)~式(15))进行计算。表 1 给出 4 个市场的收益率分布数据。

收益率 指标	实时 市场 y_1	日前 市场 y_2	月度合约 市场 y_3	年度合约 市场 y_4
均值	0.433 3	0.333 3	0.133 3	0.066 7
标准差	0.700 0	0.500 0	0.320 0	0.086 7

按正态分布随机产生了收益率的 100 组样本,作为模拟的市场历史数据: $y_t^q = (y_{1t}^q, y_{2t}^q, y_{3t}^q, y_{4t}^q)$, 其中 $q=1, 2, \dots, 100, t=1, 2, 3, 4$ 。采用规划软件 LINGO 对 $t=1$ 以及 $t=4$ 分别进行计算,结果如下。

1) $t=1$ 时,当置信水平 β 分别取 0.90 和 0.95,期望收益率下限取 0.2 和 0.3 将各项数据带入模型中分别进行计算,结果如表 2 所示。

由表 2 得到的是 1 个时段 4 个市场购电组合的比例和条件风险值,从结果中可以得出:

(1)当期望收益下限 e 固定时,随着 β 从 0.90 增大到 0.95(风险规避程度的增加),CVaR 随之增大,风险大的实时市场的份额减少,但日前和合同份额增大,说明供电公司希望增加在风险小的市场的投资来规避风险。

(2)当置信水平 β 固定时,随着期望收益下限从 0.2 增大到 0.3(风险容忍程度的增加),实时市场的份额增大,合同市场的份额减少,说明供电公司为了获得高额回报,必须承受更大的风险。

(3)当期望收益下限 e 和置信水平 β 都固定时, CVaR 的值都大于 VaR 的值,这是因为 CVaR 度量的是超过 VaR 的平均损失,它比 VaR 更加稳健。

2) $t=4$ 时,当置信水平 β 取 0.95,期望收益率下限分别取 0.2 和 0.3 时,重复上述计算,结果如表 3 所示。

由表 3 得到的是 4 个时段 4 个市场购电组合的比例和条件风险值,与表 2 相比,分 4 个时段的投资风险显然要比 1 个时段的投资风险小几倍。由表 3 可见,当 $e=0.2$, $\beta=0.95$ 时, CVaR 值由单时段的 0.122 2 降为多时段的 0.045 5,整体风险水平降低。多时段 CVaR 的组合优化模型可以对不同时段、不同市场情况对购电组合决策进行调整,通过改变在不同市场分配的电量比例来使风险最小。

考虑到风险对未来投资收益的长期影响,引入转移影响率 λ , $\lambda s^T y_t$ 为转移利润。若上个阶段的利润

增加,则下个阶段的转移利润也随着增加;若上个阶段的利润减少,则下个阶段的转移利润也随之减少。因此,每个阶段的投资会影响到下一个阶段的投资,通过在每一时段的期末改变各个市场的投资比例,将上一时段的风险转移到下一时段,从而使风险得到有效的控制。基于上述数据,代入式 (11)~式 (15) 进行计算,得到表 4 所示的计算结果。比较表 3 和表 4 可见,在相同的置信水平 $\beta=0.95$ 和期望收益 $e=0.2$ 下,随着转移影响率的增大,风险明显减小。供电公司在实时市场的份额减少,而在其他市场的总量增加,即供电公司可以通过改变电能分配策略来适应市场环境变化,满足期望收益约束的同时实现风险最小化。同时转移影响率的变化,也会引起投资比例发生变化。通过计算结果可知,不同时段组合投资的比例不一样,这表明多时段 CVaR 优化模型能够反映不同的外部市场环境,给出相应的最优电能分配策略。可以通过组合投资和多时段投资来分散控制风险,从而获得更大的收益。

为了得到组合期望收益率随风险值变化的曲线,改变约束中的期望收益率下限,重复上述计算,可得到如图 1 所示的有效前沿曲线。

由图 1 可以得到如下的结论。

1)有效前沿以下的区域为供电公司购电组合的可行域,域中的任意一点对应 1 组可行的购电组合。从图 1 可以看出,在相同期望收益下,有效前沿上的点对应的风险水平低于可行域其他点对应的风险水平;在相同风险水平下,有效前沿上的点对应的期望

表 2 单一时段的 VaR 和 CVaR 的值

收益下限 e	置信水平 β	x_{1t}	x_{2t}	x_{3t}	x_{4t}	VaR	CVaR
0.2	0.90	0.123 6	0.250 0	0.320 7	0.305 8	0.058 7	0.09 41
	0.95	0.118 0	0.264 4	0.293 3	0.324 2	0.073 4	0.122 2
0.3	0.90	0.271 9	0.425 7	0.302 4	0	0.128 5	0.205 7
	0.95	0.261 7	0.440 9	0.297 4	0	0.183 7	0.263 3

表 3 多时段的 VaR 和 CVaR

收益下限 e	时段 t	x_{1t}	x_{2t}	x_{3t}	x_{4t}	VaR	CVaR
0.2	1	0.298 6	0.066 7	0.090 6	0.544 0	0.157 6	0.158 0
	2	0.121 8	0.251 3	0.324 9	0.301 9	0.062 7	0.063 9
	3	0.113 1	0.267 0	0.310 2	0.309 7	0.077 7	0.079 4
	4	0.140 9	0.300 4	0.023 2	0.535 5	0.043 5	0.045 5
0.3	1	0.418 0	0.206 5	0.375 5	0	0.202 7	0.272 6
	2	0.188 4	0.550 9	0.260 7	0	0.225 8	0.226 2
	3	0.097 6	0.687 1	0.215 3	0	0.226 3	0.227 0
	4	0.282 8	0.486 3	0	0.231 0	0.146 1	0.148 3

表 4 转移率对 VaR 和 CVaR 的影响

转移率 λ	时段 t	x_{1t}	x_{2t}	x_{3t}	x_{4t}	VaR	CVaR
0.3	1	0.296 6	0.068 8	0.094 5	0.540 1	0.157 8	0.157 8
	2	0.175 0	0.197 1	0.249 1	0.378 8	0.042 9	0.090 7
	3	0.132 6	0.244 4	0.293 4	0.329 6	0.055 1	0.057 9
	4	0.146 3	0.269 8	0.116 2	0.467 7	0.025 3	0.040 0
0.5	1	0.288 3	0.077 0	0.106 1	0.528 5	0.154 5	0.161 8
	2	0.198 6	0.180 1	0.209 9	0.411 4	0.033 6	0.046 2
	3	0.164 6	0.202 1	0.286 4	0.346 9	0.036 3	0.052 6
	4	0.156 4	0.245 7	0.157 1	0.440 8	0.017 5	0.028 9

收益大于可行域其他点对应的期望收益,即最优组合点在有效前沿上。

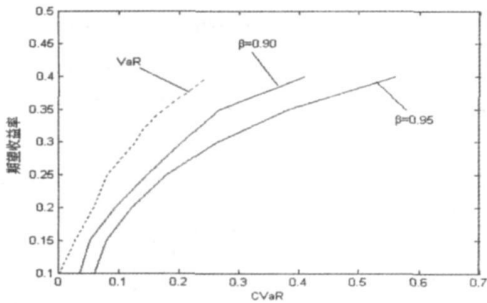


图 1 VaR 和 CVaR 的有效前沿

- 2)有效前沿曲线是单调递增的,说明在有效前沿曲线上,风险随期望收益的增加而变大。
- 3)当置信水平 β 增大时,有效前沿曲线右移。说明提高置信水平,在相同的期望收益水平下,风险就越大。

4 结 论

以多时段 CVaR 为风险度量指标,综合考虑风险和收益的均衡问题,研究了供电公司不同时段在年度合约市场、月度合约市场、日前市场和实时市场之间的购电分配方案,建立了在一定期望收益下风险最小的最优购电组合优化模型。供电公司可以根据其风险的承受能力以及市场波动情况,在一定的置信水平及期望收益下限下,确定其在不同时段、不同市场的购电比例。计算结果表明:

1)供电公司针对风险的态度不同(置信水平不同),其收益也不同。对于厌恶风险的购电商来说,可以选择较高的置信水平,增大合同市场的分配比例,以便能锁定风险;而对于喜好风险的购电商来说,可以设置较低的置信水平,使得实时市场比例加大,获得更大的收益回报。

2)一般的 CVaR 模型只用于研究单期资产的变

化情况,是基于固定投资期限的风险度量。然而供电公司购电过程中常常呈现多期风险,即动态风险。多时段 CVaR 是动态风险度量,它不断调整影响风险的因数,从而控制风险。多时段 CVaR 值低于单期 CVaR,这是由于上一段投资的风险被有效地转移到下一时段,明显地降低了风险。

因此,所提的模型和方法可行有效,可以为供电公司在不同时段及不同市场购电比例优化分配和风险评估提供新的工具和思路。

参考文献

[1] Daniel S Kirschen. Demand-side view of electricity markets[J]. IEEE Trans on Power Systems 2003, 18(2): 520—527.

[2] 张显,王锡凡. 电力金融市场综述 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 1—10.

[3] 赵豫,于尔铿. 电力零售市场研究: (一) 充满竞争的电力零售市场 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 20—24.

[4] 张钦,王锡凡,王建学,等. 电力市场下需求响应研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97—106.

[5] 国家电力监管委员会. 输电监管 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[6] Yan H, Yan H, Zhang H. Demand allocation analysis for energy purchasers in deregulated energy markets[C]. In: International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies Proceedings London, UK, 2000: 344—348.

[7] 刘亚安,管晓宏,薛禹胜. Price-taker在两个电力市场中的交易决策 (一) 购电商的策略 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 13—15.

[8] 乔瑞·菲利普. VaR: 风险价值——金融风险管理新标准 [M]. 张海鱼,译. 北京: 中信出版社, 2000.

[9] Dahlgren R, Liu C C, Lawarree J. Risk assessment in energy trading[J]. IEEE Trans on Power Systems 2003, 18

(下转第 28 页)

6 结 论

对稳态补偿差动判据、时域补偿差动判据和贝瑞隆差动判据在 1000 kV 特高压输电线上的应用进行了研究。结果表明:

稳态补偿判据能有效地补偿稳态电容电流,但对暂态电容电流不能补偿;时域补偿判据对稳态和暂态电容电流都有较好的补偿,由于基于集中参数 Π 模型,对暂态电容电流不能完全补偿;贝瑞隆差动判据基于分布参数模型,能完全补偿稳态和暂态电容电流。

稳态补偿判据和时域补偿判据在区内故障时带过渡电阻能力不高;贝瑞隆差动判据带过渡电阻能力很强。

时域补偿判据只需传送经补偿后的电流值,对通信要求不高;贝瑞隆差动判据要用相邻的两个采样点数据进行计算,所以对采样频率要求很高,而且需要传送两端的电压电流采样值,对通信的要求也很高,在采样和通信都满足要求的情况下,采用贝瑞隆差动判据是一个很好的选择。

参考文献

[1] 陈德树,唐萃,尹项根,等.特高压交流输电继电保护及

相关问题[J].继电器,2007,35(5):1—3.

[2] 李瑞生,索南加乐.750 kV 输电线路的特殊问题及其对线路保护的影响[J].继电器,2006,34(3):1—4.

[3] 伍叶凯,邹东霞.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] 索南加乐,张恽宁,齐军,等. Π 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J].中国电机工程学报,2006,26(5):12—18.

[5] 吴通华,郑玉平,朱晓彤.基于暂态电容电流补偿的线路差动保护[J].电力系统自动化,2005,29(12):61—67.

[6] 郭征,贺家李.输电线纵联差动保护新原理[J].电力系统自动化,2004,28(11):1—5.

[7] 和敬涵,范瑜,薄志谦等.基于对称分量变换的暂态电流极性方向比较保护算法[J].电工技术学报,2007,22(2):116—120.

[8] Z. Y. Xu, Z. Q. Du, L. Ran et al. A Current Differential Relay for a 1000—kV UHV Transmission Line[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2007, 22(3).

作者简介:

桑丙玉(1983—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

喻 奇(1984—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期:2009—06—10)

(上接第 9 页)

(2):503—511.

[10] Canuso E, Diconato M, Minoia A, et al. Supplier risk analysis in the day-ahead electricity market[J]. IEEE Trans on Power Systems 2006, 153(3):335—341.

[11] 谢俊,陈星莺.构造供电公司最优电能分配策略的 CVaR 方法[J].现代电力,2007,24(2):44—48.

[12] 刘嘉佳,刘俊勇.计及动态一致性风险度量的水电短期优化调度[J].中国电机工程学报,2008,28(10):94—99.

[13] 张富强,周浩.电力市场金融风险分析——分析法[J].电力系统及其自动化学报,2004,16(3):23—28.

[14] 林辉,何建敏.VaR 在投资组合应用中存在的缺陷与 CVaR 模型[J].财贸经济,2003,12:46—69.

[15] Rockafellar R T, Uryasev S. Optimization of conditional value at risk[J]. Journal of Risk 2000, 2(3):21—41.

[16] 孟志青,虞晓芬,蒋敏,等.基于动态 CVaR 模型的房地产组合投资的风险度量与控制策略[J].系统工程理

论与实践,2007,27(9):69—76.

[17] 陈金龙,张维.CVaR 与投资组合优化统一模型[J].系统工程理论方法应用,2002,11(1):68—71.

[18] 蒋敏,胡奇英,孟志青.基于权值的多阶段风险值证券组合问题研究[J].管理工程学报,2006,20(3):38—40.

[19] 张兴平,陈玲,武润莲.加权 CVaR 下的发电商多时段投标组合模型[D].中国电机工程学报,2008,28(16):79—83.

[20] 王壬,尚金成,冯畅,等.基于 CVaR 风险计量指标的发电商投资组合策略及模型[J].电力系统自动化,2005,29(14):5—9.

作者简介:

吴 薇(1986—),女,硕士研究生,研究方向为电力市场。

刘俊勇(1963—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力市场、灵活交流输电及电力系统可视化等。

(收稿日期:2009—06—10)

全桥 DC/DC(H 桥)变换电路的设计与实现

贾 周,王金梅,封俊宝

(宁夏大学物理电气信息工程学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:在对桥式可逆斩波电路作出理论分析的基础上,建立基于 MATLAB/Simulink/Power System 工具箱的桥式可逆斩波电路的仿真模型,给出了电阻电感性负载及电动机负载时的仿真结果,并对其进行分析,同时也验证了所建模型的正确性。

关键词:直流斩波;全桥变换;正弦脉宽调制;仿真

Abstract: The theory of reversible bridge chopper circuit is introduced. A technique is presented in setting up the models based on MATLAB/Simulink/Power System software and the voltage and current timing waveforms support this technique. The simulation results of the electric circuit with resistance-inductance load or motor load are also presented. At last the models of this full-bridge DC/DC converter circuit are proved correct.

Key words: DC chopper; full-bridge conversion; sinusoidal pulse width modulation (SPWM); simulation

中图分类号: TN702; TM464; TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0010-03

0 引 言

桥式可逆斩波电路在电力电子技术、电力拖动和电力系统及其他领域应用最为广泛。对于具有摩擦负载的直流调速系统需要能在四象限内运行的直流变换电路,从而发展出了桥式可逆斩波电路。传统的四象限直流电源是由两组反并联相控式整流电路实现的,因此具有和其他相控式电源一样的固有缺点:网侧功率因数随着调压加深而变得很低;系统惯性大无法满足诸如伺服系统类要求快速响应的场合。以 DC/DC 变换原理为基础的直流电压变换电路由于在交流侧采取不控整流方式,故网侧功率高,且不随输出电压变化;由于采用开关频率较高的斩控方式,故系统惯性小,快速响应性能好。因此调试桥式可逆斩波电路的相关参数并对负载的工作情况进行对比分析与研究对工程实践具有较强的预测和指导作用。

1 电压型单相桥式逆变电路原理

电压型单相桥式逆变电路如图 1 所示,采用 IGBT 开关管作为开关器件,负载为电感性,对晶体管的控制按如下进行:在正半周期时让晶闸管 VT₁ 保持导通而让晶闸管 VT₄ 交替通断。两管同时导通时,

基金项目:宁夏回族自治区自然基金项目——基于 PFC 和开关的大功率开关电源研究(NZ0724)

负载两端所加电压为直流电源电压 u_d ,电动机工作于第 1 象限;当 VT₁ 导通 VT₄ 关断时,直到使 VT₄ 再一次导通之前由 VD₃ 续流。若负载电流衰减较快则在 VT₄ 再一次导通之前负载电压为零。这样负载上的输出电压就可以得到零和 $+u_d$ 两种电平。同样在负半周让晶体管 VT₂ 保持导通,当 VT₃ 导通时负载被加上负电压 $-u_d$,电动机工作于第 3 象限;当 VT₃ 关断时 VD₁ 续流,负载电压为零,负载电压可以得到 $-u_d$ 和零两种电平。这样在一个周期内逆变器输出的 PWM 波形就由 $\pm u_d$ 和零三种电平组成^[1]。二极管用于逆变电路的续流。从某种意义上来说,四象限直流变换电路是输入信号频率趋于零的逆变电路。

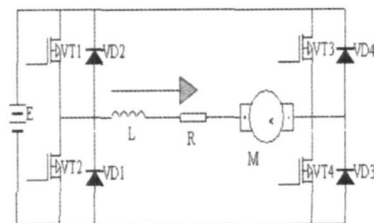


图 1 电压型单相桥式逆变电路原理

负载在不同工作状态下参与导通的管子及输出逆变电压的情况如表 1 所示。

2 双极性控制电路仿真

波形调制方法如下:载波 u_c 在调制信号 u_r (正弦

表 1 单相桥式逆变电路工作情况

负载状态	正向电动	正向制动	反向电动	反向制动
超前桥臂	VT ₁	VT ₁	VT ₂	VT ₂
滞后桥臂	VT ₄	VD ₃	VT ₃	VD ₄
输出电压	+u _{di}	0	-u _{di}	0

波)的正半周为正极性的三角波,在负半周为负极性的三角波。在 u_c 与 u_r 的交点时刻控制 VT_3 和 VT_4 的通断。在 u_r 的正半周 VT_1 保持导通, $u_r > u_c$ 时 VT_4 导通,负载电压 $u_0 = u_{di}$, $u_r < u_c$ 时使 VT_4 关断, $u_0 = 0$ 。在 u_r 的负半周 VT_1 关断 VT_2 保持导通, $u_r < u_c$ 时 VT_3 导通,负载电压 $u_0 = -u_{di}$, $u_r > u_c$ 时使 VT_3 关断, $u_0 = 0$ 。这样就得到 PWM 波形 u_0 [4]。

双极性控制电路是指在一个斩波周期中输出电压 u_0 的极性将有一次改变,即

$$u_0 = \begin{cases} U_d & (0 < t < DT) \\ -U_d & (DT < t < T) \end{cases} \quad (1)$$

平均值

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_0 dt = (2D - 1)U_d \quad (2)$$

式中, T 是斩波周期, DT 是功率器件的载流时间, D 是占空比。式 (2) 表明 U_0 的幅值和极性均取决于 D 值。比如: $D = 0.5$ 则 $U_0 = 0$ 。双极性电路电流脉动大,但不会出现电流断续。

双极性 PWM 控制发生电路模型如图 2 所示。相应参数设置:①三角波模块输出电压 $[-1, 1]$;②正弦波模块频率 1 Hz 电压 0.5 V ;③关系运算模块关系类型“ $>$ ”;④信号增益模块增益“ -1 ”。

双极性 PWM 控制电路仿真结果如图 3 所示。

3 单极性触发方式电路实现

本系统的主电路采用单极性 PWM 控制方式,其中主电路由 4 个 IGBT 管构成 H 桥, $VT_1 \sim VT_4$ 分别由 PWM 产生的信号经过驱动电路放大后触发 [4]。控制方式为:图 1 中超前臂两个管子的驱动脉冲 $u_{g1} = -u_{g2}$ 使 VT_1 和 VT_2 交替导通;右边两个管子因电机转向不同而施加不同的直流控制信号,在输出正电压时 u_{g4} 恒正 u_{g3} 恒负,使得 VT_3 导通 VT_4 截止;在输出负电压时, VT_3 截止 VT_4 导通。

单极性电路则指在一个斩波周期中, u_0 仅有幅值的变化而无极性的变化,即

$$u_0 = \begin{cases} U_d & (0 < t < DT) \\ 0 & (DT < t < T) \end{cases} \Big|_{u_s > 0} \quad (3)$$

$$-u_0 = \begin{cases} U_d & (0 < t < DT) \\ 0 & (DT < t < T) \end{cases} \Big|_{u_s < 0} \quad (4)$$

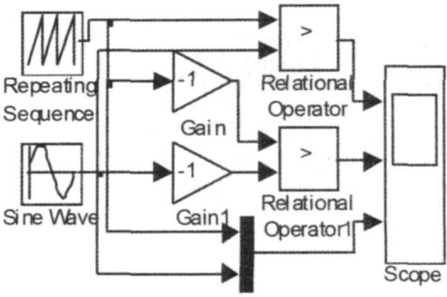


图 2 双极性 PWM 控制发生电路模型

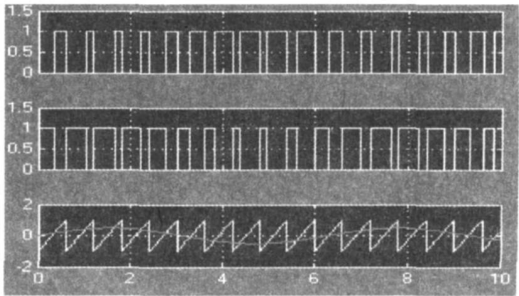


图 3 双极性 PWM 控制电路仿真结果

上两式表明, u_0 的输出极性与控制电压的极性 u_c 有关。单极性电路的电流脉动小,在轻载下会出现电流断续。

单极性 PWM 控制触发电路模型如图 4 所示。使用了双极性触发电路(即图 2 所示电路)作为一个子系统来使用,为实现单极性触发选用了关系运算模块来实现与门输出。相应的参数设置:①关系运算模块关系类型“ $<$ ”;② pulse 模块周期 0.1 s 振幅 1 V ,脉冲宽度 50% 。仿真结果如图 5 所示。

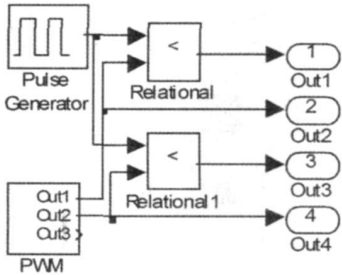


图 4 单极性 PWM 控制触发电路模型

与双极性控制输出的 PWM 波只有 $\pm u_{di}$ 两种电平不同,单极性控制输出的是 $\pm u_{di}$ 和 0 三种电平。单相桥式电路既可以采用双极性调制也可以采用单极性调制,由于两种方式对开关器件通断电控制规律不同,从而输出波形有较大的差异。不管是双极性电路还是单极性电路,在触发脉冲形成过程中都要加上

适当的逻辑延时,以防止触发信号产生竞争冒险。呈现在仿真结果中就是一种“毛刺”现象,一般影响实验的准确性,严重时甚至导致实验失败。

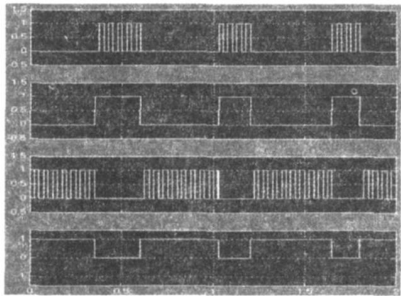


图 5 单极性 PWM 控制触发电路仿真结果

4 H 桥 DC /DC变换系统的电路仿真模型建立与实现

H 桥 DC /DC变换系统的电路仿真模型如图 6 所

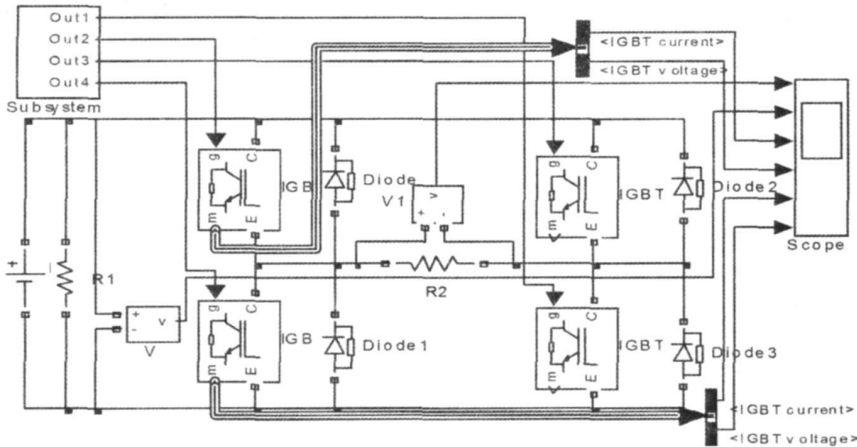


图 6 H 桥 DC /DC变换系统电路模型

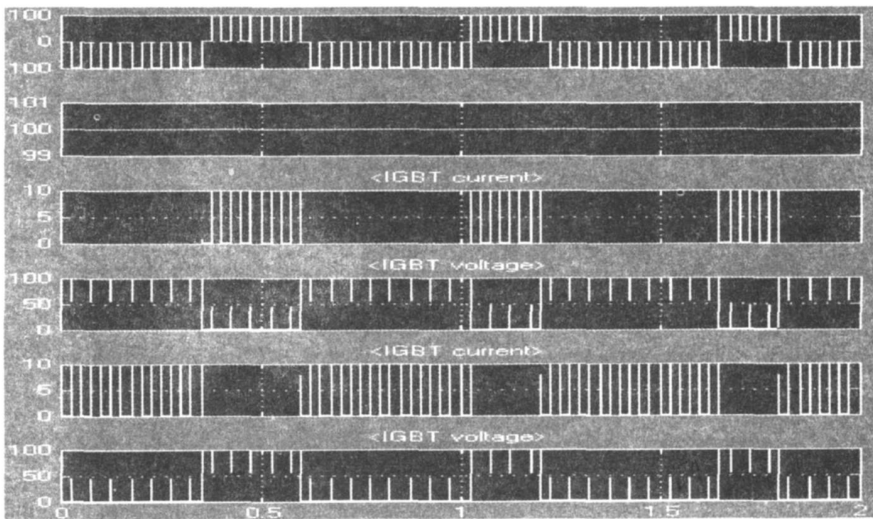


图 7 H 桥 DC /DC变换系统仿真结果

示^[3]。
相应的参数设置:①直流电压源参数 $U=100\text{ V}$;
② IGBT 参数 $R_{on}=0.001\text{ }\Omega$, $L_{bn}=1\text{e}^{-6}\text{ H}$, $V_f=1\text{ V}$, $R_s=1\text{e}^5\text{ }\Omega$, $C_s=\text{inf}$ ③负载参数 $R_L=1\text{ }000\text{ }\Omega$, $R_2=10\text{ }\Omega$, $L=0\text{ H}$, $C=\text{inf}$ 此时的仿真结果如图 7 所示。

根据以上设计而成的图 6 所示 H 桥 DC /DC 变换系统电路模型和图 7 所示仿真结果可以看出:仿真开始后晶体管 VT2 保持导通,电动机工作于第 3 象限,随后依次工作于 4、1、2 象限。

在设计以上电路模型时,应按照如下顺序:先做好最小的子系统并进行调试仿真,得到满意的仿真结果之后再组成较大的子系统,以此类推,最后完成整个系统的设计。在调试过程中发现问题可以逐步缩小问题所在的范围,确定其最可能存在于那个子系统,从而迅速判断解决,提高处理问题的效率。

(下转第 20 页)

表 7 湘潭电网部分 110 kV 线路单一线路融冰的相关数据

序号	线路名称	起止地点	导线型号 长度 /km	融冰电压 等级	融冰短路 电流 /A	融冰有功 /MW	融冰无功 /Mvar	融冰时间 T1	融冰时间 T2
1	白易线	白 516—易 502	LGJ—185 /9. 937	3. 5	459. 1	1. 07	2. 57	70	170
2	荷易线	荷 524—易 504	LGJ—185 /9. 976	3. 5	457. 3	1. 06	2. 56	69	168
3	茶五线	茶 506—五 502	LGJ—240 /9. 026	4. 0	549. 1	1. 71	3. 40	67	144
4	荷五线	荷 516—五 504	LGJ—185 /7. 541	3. 0	518. 6	1. 03	2. 49	44	67
5	茶瓦线	茶 508—瓦 508	LGJQ—300 /8. 286	4. 0	671. 1	1. 21	4. 49	59	110
6	荷瓦线	荷 514—瓦 504	LGJ—240 /2. 964	1. 5	692. 6	0. 56	1. 71	35	46
7	野霞线	野 512—霞 504	LGJ—240 /2. 485	1. 0	550. 8	0. 30	0. 91	67	147
8	茶霞线	茶 526—霞 502	LGJ—240 /3. 920	2. 0	698. 3	0. 75	2. 30	32	44
9	茶潭线	茶 516—潭 500	LGJ—240 /5. 093	2. 5	671. 8	0. 90	2. 77	38	52
10	茶野线	茶 502—野 508	LGJ—300 /2. 270	1. 5	923. 6	0. 62	2. 32	27	36

从经济上考虑, 110 kV 线路大部分是从 220 kV 变电站出线。随着电网的发展, 110 kV 线路均从 220 kV 变电站出线是发展的趋势, 220 kV 变电站的一个融冰配电变压器就可满足多条 110 kV 线路单一线路融冰的需要, 可减少或取消在 110 kV 变电站建设融冰间隔, 在 110 kV 变电站只需要考虑融冰短路点的建设问题, 使得融冰建设的整体成本将更低。

4 融冰适用的电压等级及相关计算

根据上面的计算和分析, 根据湘潭电网 110 kV 输电线路的实际情况, 确定了每一条线路的适用电压等级, 并计算了单一线路融冰的相关理论数据。经计算证明在 220 kV 变电站中装设融冰配电变压器能够满足湘潭电网绝大多数 110 kV 输电线路单一线路融冰的需要。部分相关数据见表 7。

5 结 论

110 kV 线路大多是长度不超过 10 km 的短

线路, 而且随着电网的发展, 线路的长度将越来越短。目前针对 110 kV 线路融冰的融冰电压等级已不适用单一线路融冰需要。因此, 提出了在 220 kV 变电站装设 10 kV 的特殊变比配电变压器的设想, 以满足 110 kV 线路单一线路融冰的需要。并经理论计算, 证明装设该变压器能够可以实现对绝大多数 110 kV 线路单一线路融冰。

参考文献

[1] 邓健, 肖顺良, 姚璞, 等. 220kV 线路融冰方案的改进 [J]. 电网技术, 2008, 32(4): 29—30.
[2] 姚璞, 易炜溟, 邓健, 等. 35kV 线路融冰方案的改进 [J]. 电网技术, 2008, 32(7): 100—102.
[3] 湖南省电力公司. 湖南电网主网线路融冰方案 (2007—2008 年度) [Z].

作者简介:

邓 健 (1978—), 男, 汉族, 湖南湘乡人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电网调度工作。

(收稿日期: 2009—06—01)

(上接第 12 页)

5 结 论

对 H 桥 DC /DC 变换系统电路进行了理论分析, 建立了基于 MATLAB /Simulink /Power System 工具箱的 H 桥 DC /DC 变换系统电路的仿真模型, 其仿真结果与理论分析十分吻合, 达到了电动机负载在四象限运行的目的, 验证了所建模型的正确性, 完成本课题——基于 PFC 和软开关的大功率开关电源研究所指定的科研任务。

参考文献

[1] 易卫东, 张建峡, 谢静. 一种新型全桥 DC /DC 开关电源的仿真研究 [J]. 现代机械, 2009, (2): 23—26.

[2] 刘福鑫. 高压直流电源中 DC /DC 变换器的研究 [D]. 南京航空航天大学硕士学位论文, 2004.
[3] 李传琦. 电力电子技术计算机仿真实验 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
[4] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

作者简介:

贾 周 (1981—), 男, 江苏徐州人, 在读研究生, 学士学位, 研究方向为电力电子与电力传动。

王金梅 (1968—), 女, 宁夏大学物电学院教授, 博士学位, 研究领域为电力电子与电力传动。

封俊宝 (1982—), 男, 河南南阳人, 在读研究生, 学士学位, 研究方向为电力电子与电力传动。

(收稿日期: 2009—07—09)

南方地区电网覆冰事故分析及应对措施研究

赵永生, 王富荣, 赵德奎, 张鹏远

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:根据 2008 年初中国南方地区电网遭受冰害事故统计和调研情况,从覆冰机理、电网设施本身出发,分析了造成这次大面积冰害事故的原因。将国内外有关输电线高度订正系数的算法进行了比较分析,并对高度、线径系数进行了细化以便实现较好的经济技术效应。结合本次电网冰害事故所反映出的问题,提出了输电线路覆冰事故防治措施。

关键词:电网;输电线路;覆冰计算;防冰

Abstract: According to the statistics and investigation of the icing accident afflicted South China in the beginning of 2008, the causes of the icing in large area are analyzed as viewed from the mechanism of ice coating and the facilities of power grid. The algorithms about the revised coefficient of the height of transmission lines are compared, and the coefficients of height and wire diameter are refined for getting a better economic-technological effect. In combination with the problem reflected from the icing accident, some anti-icing measures are presented for transmission lines.

Key words: power grid; transmission line; ice coating calculation; anti-icing

中图分类号: TM731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0013-04

0 引 言

2008 年 1—2 月的持续低温、雨雪冰冻天气对中国南方地区电网造成极其严重的破坏,给国民经济造成极大的损失。这次冰灾持续时间之长、影响范围之广、覆冰强度之大、危害程度之深实属历史罕见。这次冰灾的直接原因是罕见的大范围长时间低温、雨雪冰冻天气,同时也暴露出电网抵御恶劣天气能力的不足。应对这次覆冰事故进行总结和分析,在正确认识电网覆冰灾害特点和深入分析其形成原因的基础上,积极采取措施,预防和治理电网覆冰,把灾害造成的损失降低到最低限度。

1 输电线路覆冰的物理过程

导线覆冰首先是由气象条件决定的,是受温度、湿度、冷暖空气对流、环流以及风等因素决定的综合物理现象。导线覆冰的必要气象条件是:①具有足可冻结的气温,即 0℃以下;②具有较高的湿度,即空气相对湿度一般在 85%以上;③具有可使空气中水滴运动之风速,即大于 1 m/s 的风速^[1]。

当具备了以上气象条件,导线覆冰的基本物理过

程是:严冬或初春季节,当气温下降至 -5~0℃,风速为 3~15 m/s 时,如遇大雾或毛毛雨,首先将在导线上形成雨淞;如气温升高,例如天气转晴,雨淞则开始融化;如天气继续转晴,则覆冰过程终止;如天气骤然变冷,气温下降,出现雨雪天气,冻雨和雪则在粘结强度很高的雨淞冰面上迅速增长,形成密度大于 0.6 g/cm³ 的较厚的冰层;如温度继续下降至 -15~-8℃,原有冰层外则积覆雾淞。这种过程将导致导线表面形成雨淞—混合淞—雾淞的复合冰层。如在这种过程中,天气变化,出现多次晴—冷天气,则融化加强了冰的密度,如此往复发展将形成雾淞和雨淞交替重叠的混合冻结物,即混合淞。

在这次冰害事故中,受大气环流异常的影响,来自北方的冷气团与南方的暖气团交汇,在南方地区形成准静止锋,在 1 500 m 至 3 000 m 上空形成一个温度高于 0℃ 的暖空气层(逆温层),再往上 3 000 m 以上温度又低于 0℃^[2]。如此,从高空冰晶层掉下来的雪花通过暖层融化成雨滴,接着进入靠近地面的冷气层时,雨滴便迅速冷却,虽还没有来得及结成冰,但温度已降至 0℃ 以下,便形成了冻雨。当冻雨落在地面及树枝、电线等物体上时,便集聚起来布满物体表面,由于物体温度都低于零度,所以立即冻结成冰凌,冻结在电线上,并不断积累,超出输电线路的设计抗

冰厚, 电线最终断裂。高压线的杆塔都也是这样被厚厚的冰块严严实实地包裹起来, 严重时造成杆塔倒塌。这种情况主要就发生在湿度极高、温度较低的南岭山脚下, 造成郴州、衡阳一线的 70 多座高压线铁塔有近 $1/3$ 都被压垮。

北方地区气团寒冷干燥, 降雪不易结冰, 所以电线上虽然有落雪, 但一旦积累到体积过大、无法保持平衡时, 就会自动从电线上落到地面上, 所以电线表面只会留有少部分积雪, 对电线的强度影响并不大。

2 输电线路覆冰事故统计分析

覆冰造成大量线路跳闸、杆塔变形、倒塌、断线、金具和绝缘子损坏、导线舞动等。通过观测和调研分析, 此次由覆冰引起的电网冰害事故主要有 4 种形式。

2.1 严重覆冰引起过荷载

由于冰厚设计值与线路实际覆冰厚度相差较大, 机械荷载超过了铁塔、导地线的结构、材料的屈服强度, 导致铁塔倒塌、变形、导地线断线; 塔间跨度不同, 加大了铁塔两侧水平不平衡张力, 造成铁塔扭曲、折倒; 导地线融冰时间不一致, 导致架空地线弧垂下降后与导线之间发生放电, 造成多条 500 kV、220 kV 线路跳闸和架空地线断线。据统计, 国家电网公司系统因覆冰造成的高压线路杆塔倒塌 17.2 万基, 受损 1.2 万基, 低压线路倒塔断杆 51.9 万基, 受损 15.3 万公里, 变电站停运 884 座; 南方电网公司系统杆塔损毁 12 万基, 受损线路 7 000 多条, 变电站停运 859 座。在发生倒塌的杆塔中, 有 90% 以上的杆塔覆冰设计值在 15 mm 及以下, 而据现场实测许多线路的覆冰厚度折算到标准厚度已超过 30 mm, 远远超过了线路设计标准。

此次事故中倒塔主要是由覆冰时两侧不平衡张力造成, 因此常常出现多基塔连环顺线倒塌的情况。在一些地形起伏较大的地区, 线路上相邻杆塔高差较大, 未覆冰时就形成了较大的两侧不平衡张力。当导、地线上覆有大量密度较大的雨淞覆冰时, 杆塔两侧的不平衡张力加剧或不同期脱冰, 当杆塔不能承受此荷载时, 杆塔的薄弱部件开始损坏变形, 最终导致导、地线掉落或杆塔倒塌。另外, 对于一些转角塔, 同样由于不平衡张力会使得导线在严重覆冰时发生倒塌。因此, 在线路设计和改造时, 应尽量避免大高差

和大转角, 对覆冰严重地区应多加几基耐张塔, 增大杆塔的过载能力。

2.2 绝缘子串覆冰闪络

绝缘子覆冰或被冰凌桥接后, 绝缘强度下降, 泄漏距离缩短; 融冰过程中冰体表面的水膜会溶解污秽物中的电解质, 提高融冰水或冰面水膜的导电率, 引起绝缘子串电压分布的畸变, 从而降低覆冰绝缘子串的闪络电压, 形成闪络事故。据统计在此次冰灾中, 仅湖南电网从 2008 年 1 月 20 日至 29 日, 500 kV 线路共发生跳闸 73 条次, 220 kV 线路发生跳闸 408 条次, 这些跳闸均是冰闪造成的。

冰闪的发生与绝缘子串型有很大关系。统计表明, 冰闪基本上发生在悬垂串, 很少发现耐张和 V 型串绝缘子发生冰闪。其原因是: ①耐张串和 V 型串上冰凌不容易桥接伞间间隙; ②该串型本身自清洗效果好, 串上积污量少; ③融冰时该串型上难以形成对冰闪发生至关重要的贯通性水膜。另外, 冰闪还具有明显的阶段性, 一般都发生在融冰期。

2.3 覆冰导线舞动

不均匀覆冰会使导线产生自激振荡和舞动, 而造成金具损坏、导线断股及杆塔倾斜或倒塌等现象。此次冰灾发生的导线舞动是由于不均匀覆冰在风的激励下, 导线产生低频率 (0.1~3 Hz)、大振幅自激振动。长时间的舞动导致导线、绝缘子、金具和铁塔受到异常不平衡冲击而疲劳损伤, 以及造成导线相间和相对地闪络, 严重威胁电网的安全运行。

2.4 变电站设备损坏

在变电站设备表面产生不均匀覆冰, 会在设备局部产生不均匀电场, 显著降低设备沿面的闪络电压。此次冰灾对变电站设备也造成严重影响, 耦合电容器、母线支撑绝缘子、刀闸支柱绝缘子等设备均有冰闪发生。

3 对覆冰计算设计的研究

鉴于此次冰灾中线路设备受损严重, 有必要对线路的抗冰设计进行深入研究, 包括确定合理的覆冰计算参数, 在设计环节提高线路本体抵御自然灾害的能力。

中国《电力规程气象勘测技术规程》(DL/T 5158—2002)(下称《规程》)6.3.4 给出不具备实测覆冰资料的地区, 设计冰厚可选用式 (1) 计算。

$$B = K_h K_T K_\Phi B_0 \tag{1}$$

- B——设计冰厚, mm;
- K_h ——高度订正系数;
- K_T ——重现期换算系数;
- K_Φ ——线径订正系数;
- B_0 ——标准冰厚, mm.

式 (1) 中各订正系数应按实测覆冰资料计算分析确定, 无实测覆冰资料的地区, 《规程》规定了确定 K_h 和计算方法 K_Φ 。

(1) 高度修订系数

$$K_h = (\frac{Z}{Z_0})^b \tag{2}$$

- 式中, Z——设计导线离地高度, m;
- Z_0 ——实测或调查覆冰附着物高度, 气象台实测电线离地高度为 2 m;
- b——指数, 应由实测覆冰资料计算分析确定, 无资料地区可采用 0.22。

中国建立的专门为解决输电线路覆冰问题的观测站不多, 较缺乏覆冰观测数据。参考了国外一些观测站的数据, 进行分析和比较。

捷克建立特殊的观测站, 以观测冰重与导线高度的联系^[6]。对多年观测的结果进行处理, 绘制了冰重垂直梯度式中与幂函数的概率分布, 如图 1。

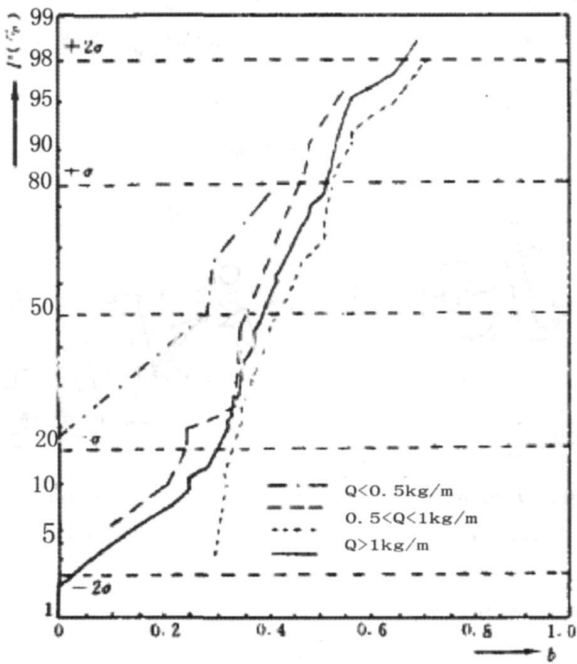


图 1 幂函数 b 的概率分布

由图 1 可知, 在不同的覆冰周期, 幂指数 b 的平均值其实是不同的, 随冰重的增大而增大, 且相差比

较明显。设单位长度导线上的冰重为 Q, 则有

$$\begin{aligned} Q < 0.5 \text{ kg/m} & \quad b = 0.2 \\ 0.5 \leq Q \leq 1 \text{ kg/m} & \quad b = 0.37 \\ Q > 1 \text{ kg/m} & \quad b = 0.45 \end{aligned}$$

幂指数 b 的平均值为 0.41, 与之相比较, 《规程》中规定的 0.22 要小的多。

(2) 线径订正系数

$$K_\Phi = 1 - 0.1261 \ln(\frac{\Phi}{\Phi_0}) \tag{3}$$

- 式中, Φ ——设计导线直径, mm, $\Phi \leq 30 \text{ mm}$;
- Φ_0 ——覆冰导线直径, mm.

现场观测结果表明: 在常见的小于或等于 8 m/s 的风速下, 对于直径小于或等于 4 cm 的不太粗的导线, 相对较粗的导线的单位长度覆冰量比相对较细的导线重, 对于直径大于 4 cm 的较大导线, 单位长度导线覆冰重量反比较细的导线轻; 在大于 8 m/s 的较大风速时, 对于任何直径的导线, 导线越粗覆冰越重, 但覆冰厚度是随导线直径的增加而减小的。

实际工程中, 输电线路经过山谷、垭口时, 风速与气象站的观测值有很大不同。因此在订正线径系数时, 应考虑风速的影响, 以及公式使用的线径范围。

根据中国电力系统多年观测资料^[1,7,8], 考虑温度范围、不同线径和风速的影响, 利用冰重与冰厚的换算关系^[5], 把线径订正系数细化如表 1。覆冰厚度线径订正系数随风速的增大和气温的升高而增加, 随导线直径的增大而减小。

表 1 不同气温、导线直径下覆冰厚度的直径订正系数

气温 t_a /℃	$-2 < t_a < -1$		$t_a < -2$	
风速 v /(m/s)	< 10	> 10	< 10	> 10
直径 Φ /mm				
5	1.0	1.1	1.0	1.1
20	0.9	1.1	0.9	1.0
30	0.8	1.1	0.8	0.9
50	0.5	0.8	0.5	0.7

在覆冰计算设计时, 选取合适的计算系数, 保证电网能抵御恶劣气候的同时, 降低工程造价, 以达到较好的技术经济效应。

4 输电线路覆冰的防治

由于近年电网覆冰灾害不断加剧, 覆冰影响范围日益扩大, 造成的危害越来越严重, 而导致电网覆冰的原因又是多种多样, 电网企业和社会各方面, 应该在正确认识电网覆冰灾害特点和深入分析其形成原因的基础上, 积极采取措施, 预防和治理电网覆冰灾

害,把灾害造成的损失降低到最低限度。

(1) 加快完成全国各地覆冰的概率分布统计以及进行冰区划分。中国目前尚缺乏对输电线路覆冰概率分布进行必要的统计和分析。冰区划分直接关系到线路设计参数的合理取值。应在冰害多发生地区建立冰情监测站,冰灾杆塔设置覆冰监测点,对不同天气、电压等级、线径以及不同类型绝缘子下的覆冰状况进行长期监测,结合气象资料和数据,为划分冰区提供第一手资料。

(2) 设计规划阶段,认真调查气象条件,避开不利的地形,加强重冰区输电线路抗冰设计。防止输电线路冰害事故的最重要方法是在设计阶段采取有效措施。对重冰区输电线路采取加强抗病设计的措施,往往比融冰以及其他后期措施更为合理和有效。

当线路通过重覆冰区成为不可避免时,应力求“避重就轻”。即进行路径选择时,应尽量做到避开最严重的覆冰地段,线路宜沿起伏不大的地形走线,尽量避免横跨垭口、风道和通过湖泊、水库等容易覆冰的地带;翻越山岭时应避免大档距、大高差,沿山岭通过时,宜沿覆冰季节背风或向阳面走线,应避免使转角点架设在开阔的山脊上,且转角角度不宜过大,如遇台地宽窄不一、不连续时,则注意选取云雾不连续地段,达到减少覆冰概率和减轻覆冰程度的目的。

(3) 合理采用防冰、除冰措施。在设计阶段无法做到有效抗冰时,考虑采用防冰和除冰技术措施。

① 热力除冰法。利用附加热源或导线自身发热,使冰雪在导线上无法积覆,或是使已经积覆的冰雪熔化。不带负荷短路加热导线融冰方法最为完善,在中国应用较为广泛。

② 机械除冰法。中国最常用的是人工除冰方法。用木棍、竹竿等最原始的工具对最严重的覆冰线路进行敲击,除去线路上的覆冰。另一种方法是利用起重机、绝缘作业工具车或带电直接作业方式除冰。由人力在地面操作拉动滑轮在线路上滑动来铲除线路覆冰的方法,在中国并不经常采用。

③ 被动法。依靠风、地球引力、随机散射和温度变化等脱冰。现已经在输电线路得到应用的有线夹、除冰环、阻雪环、憎水憎冰涂料、风力锤等来减少输电线路的覆冰。

④ 其他方法。除上述几种方法外,还有利用电磁脉冲、气动脉冲、电晕放电、电子冻结、碰撞前颗粒加热等防冰除冰方法,但很多还处于理想或试验阶

段。

(4) 绝缘子串冰闪防治。冰闪频发线段宜采用 V 型串、倒 V 串等合适的绝缘子串型布置;覆冰不太严重的区段也可采用大小盘径相间的插花串布置;双联串应增大串间距。重覆冰区线路不宜采用玻璃绝缘子串,以减少或防止因玻璃绝缘子覆冰后长时间的局部电弧使其烧伤或引起炸裂等情况。

(5) 输电线路舞动防治。在多次发生舞动的区段,合理安装防舞装置,包括使用防舞器、偏心重锤、失谐摆、相间隔棒等来达到防舞目的。

(6) 建立电网覆冰灾害应急处理体系。在冬季来临之前,加强导线、绝缘子、杆塔的清扫工作;确定线路巡检制度;制定发生电网覆冰事故时可能采用的多套应急处理预案,其中包括多套电网运行方式预案、可能发生的拉闸限电序列案、电厂发电机组开停预案、抢修救灾预案等。多年的实践证明,灾害发生时临时搞新的运行方式计算往往会延误抢修时机。

5 结 语

(1) 重新考量覆冰计算参数,并针对不同的应用范围进行计算系数的细化。

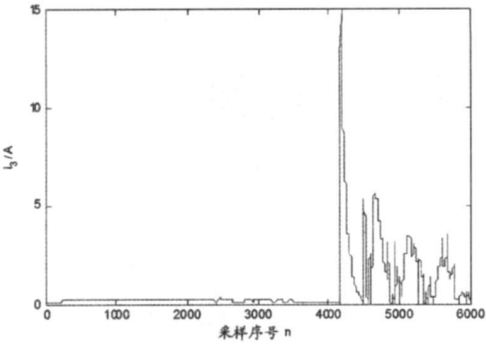
(2) 从规划、设计、运行、防冰、除冰等各个环节采取相应对策,构筑电网抵御冰害的多道防线。

(3) 建立科学的电网覆冰灾害应急处理预案机制。

参考文献

- [1] 蒋兴良,易辉.输电线路覆冰及防护[M].北京:中国电力出版社,2002
- [2] 中国南方特大冻雨雪灾成因的多学科研讨会——第 24 次天地生人学术会议《汇编》[C].北京:2008
- [3] Daisuke Kuroiwa. Icing and snow accretion [R]. Monograph series of the research institute of applied electricity 1958
- [4] Lahti K, Lahtinen M, et al. Transmission line corona losses under hoar frost conditions [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12 (2): 928—933
- [5] 西南电力设计院. 电力工程气象勘测技术规程 [S]. 北京:中国电力出版社,2002
- [6] International conference on Large High Voltage Electric Systems 1992, 22—35

(下转第 57 页)



(c) 3端故障波形变换后结果

图 4 三端故障波形经综合数学形态梯度变换后结果

由图 4 可见,经综合形态梯度变换能够准确检测出故障行波波头到达时刻。故障发生时,测得采样样本序号 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为 5 000、4 339、4 173,带入式 (11) 中,求得故障距离为 100.341 4 km,相对误差为 0.34%。不同故障距离仿真结果见表 1,不同故障类型仿真结果见表 2,不同接地电阻仿真结果见表 3。

表 1 A相接地不同故障距离时仿真结果

故障点位置 /km	测距结果 /km	相对误差 /%
20	19.955 5	0.22
40	39.888 9	0.27
80	79.748 8	0.31
100	100.341 4	0.34
120	119.592 6	0.33

表 2 100 km处不同故障类型时仿真结果

短路类型	测距结果 /km	相对误差 /%
AG	100.341 4	0.34
BC	99.962 2	0.03
ABG	99.962 2	0.03
ABCG	99.962 2	0.03

表 3 100 km处不同接地电阻时仿真结果

接地电阻	测距结果 /km	相对误差 /%
20	100.341 4	0.34
50	100.341 4	0.34
100	100.341 4	0.34
200	100.341 4	0.34

通过表 1~3 可以看出,运用提出的故障测距方案可以准确检测出故障点,且不受故障距离、故障类型和接地电阻的影响。

7 结 论

所提出的基于数学形态学的三端电气量行波测距方案,可以有效分离故障信号与噪声和脉冲信号,快速准确找出故障点,适用于复杂环境下故障测距。这种故障测距方案与结构元素的选取密切相关,为了得到更准确的检测精度,如何选择一种更有效的结构元素,有待进一步研究。

参考文献

[1] 林湘宁,刘沛,刘世明,等. 电力系统超高速保护的形态学——小波综合滤波算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 19—24.

[2] 全玉生,李学鹏,杨俊伟,等. 数学形态学算子在电力系统突变信号检测中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(3): 1—4.

[3] 吴青华,张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 45—49.

[4] 崔屹. 图形处理与分析——数学形态学方法及应用 [M]. 北京:北京科学出版社, 2000.

[5] Heijmans H J A M. Morphological Image Operators [M]. New York: Academic Press, 1994.

[6] 束洪春,李义,宣映霞,等. 对不受波速影响的输电线路单端行波法故障测距的探讨 [J]. 继电器, 2006, 34(8): 1—6.

[7] 张峰,梁军,张利,等. 基于三端行波测量数据的输电线路故障测距新方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8).

[8] 艾斌,吕艳萍. 基于小波模极大值极性的行波信号识别 [J]. 电网技术, 2003, (5): 55—57.

[9] 欧阳森,王建华,宋政湘,等. 基于数学形态学的电力系统采样数据处理方法 [J]. 电网技术, 2003, 27(9): 61—65.

作者简介:

焦征南 (1985—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究;

吕飞鹏 (1968—),男,博士,教授,从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究。

(收稿日期: 2009—06—10)

(上接第 16 页)

[7] 电力工业局,贵州省气象科研所编著. 覆冰文集 [C]. 贵州电力技术, 1992.

[8] 云南省气象科学研究所编著. 云南高海拔地区电线覆冰问题研究 [C]. 云南:云南科技出版社, 1993.

[9] 戚大安,刘星灿. 多措并举,积极防治电网覆冰灾害 [J]. 国家电网, 2007, (1): 53—55.

[10] 苑吉河,蒋兴良,易辉等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状 [J]. 高电压技术, 2004, (1): 6—9.

作者简介:

赵永生 (1982—),男,硕士,从事高电压技术、输电技术的研究。

王富荣 (1952—),男,副教授,长期从事高电压技术、输电线路运行维护的研究。

(收稿日期: 2009—10—29)

220 kV 变电站中建设融冰配电变压器的设想

邓 健

(湘潭电业局, 湖南 湘潭 411102)

摘 要: 2008 年 1 月的冰灾中融冰实例证明, 传统串接多线路的融冰方法存在对系统影响大、操作复杂等缺点。用合适的电压等级对单一线路进行融冰优点明显。针对地区电网 110 kV 线路的长度等特点, 提出了在 220 kV 变电站中建设融冰配电变压器的设想, 并经计算证明该配电变压器能够实现对绝大多数的 110 kV 线路的单一线路融冰。

关键词: 110 kV 线路; 融冰; 配电变压器

Abstract: The ice-melting experiences in ice and snow disaster in January 2008 prove that the traditional ice-melting method of series multiline has some drawbacks such as having a great influence on the system and complex operation. It has many obvious advantages to adopt the suitable voltage grade in ice-melting method of single power line. According to the features of local 110 kV transmission line such as length, the assumption of building ice-melting distribution transformer in 220 kV substation is put forward, which has been proved by calculations.

Key words: 110 kV transmission line; ice-melting; distribution transformer

中图分类号: TM417 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0017-04

0 引 言

随着社会经济的发展, 变电站的布点越来越密集, 各个电压等级的输电线路越来越短。经过今年的冰冻、融冰实践证明传统串接多线路的融冰方法存在对系统运行影响大、融冰操作复杂等缺点, 使之在短线路融冰中无法实施, 而用合适的电压等级对单一线路进行融冰的优点明显^[1,2]。地区电网以 110 kV 线路为主, 线路相对比较短, 针对单一 110 kV 输电线路进行融冰的合适电压等级如何确定和获取是一个值得探索的问题。根据不同电压等级融冰电压对不同型号的线路融冰有效范围和 110 kV 输电线路长度特点, 提出了在 220 kV 变电站中建设融冰配电变压器的设想。

1 常用融冰电压等级对各型号 110 kV 线路融冰的有效长度

不同型号的线路由于受最大允许融冰电流和融冰所需最小电流的限制, 不同电压等级的融冰电源对不同型号的线路融冰有其最大和最小有效长度。在一定电压等级融冰电源下, 被融冰线路长度超过其最大有效长度, 则融冰电流达不到融冰所需最小电流, 无法实现融冰。被融冰线路长度未达到其最小有效

长度, 则融冰电流超过了线路最大允许融冰电流, 则被融冰线路将因过载而受损。

现根据常见 110 kV 线路的型号及线路最大允许融冰电流和融冰所需最小电流, 计算出了在 T1 和 T2 两个气象条件下, 用常用的 6 kV、10.5 kV 融冰电压等级融冰电源对不同型号 110 kV 线路融冰最大和最小的有效长度。其结果见表 1、2 (T1 气象条件为被融冰线路附近气温 -3°、风速 3 m/s; T2 气象条件为被融冰线路附近气温 -5°、风速 5 m/s)^[3]。

2 110 kV 输电线路适用融冰电压等级的探索

地区电网以 110 kV 输电线路为主, 其长度一般为 10 km 以内的短线路, 导线型号以 LGJ-185 和

表 1 在 T1 条件下不同型号 110 kV 线路融冰的
最大和最小有效长度

导线型号	6 kV		10.5 kV	
	最大 /km	最小 /km	最大 /km	最小 /km
LGJ-95	31.5	10.7	55.1	18.6
LJG-120	29.4	9.9	51.4	17.3
LGJ-150	27.8	9.4	48.6	16.3
LGJ-185	24.4	8.2	42.8	14.4
LGJ-240	21.6	7.3	37.9	12.7
LGJ-300	17.8	6.0	31.3	10.4
LGJQ-300	20.9	6.3	36.7	11.0

表 2 在 T2条件下不同型号 110kV线路融冰的
最大和最小有效长度

导线型号	6 kV		10.5 kV	
	最大 /km	最小 /km	最大 /km	最小 /km
LGJ—95	22	9.1	38.5	16.0
LJG—120	20.5	8.5	35.9	14.9
LGJ—150	19.4	8.0	34.0	14.0
LGJ—185	17.1	7.1	29.9	12.3
LGJ—240	15.1	6.2	26.5	10.9
LGJ—300	12.5	5.1	21.8	9.0
LGJQ—300	13.1	5.4	23.0	9.4

LGJ—240两种居多。以湘潭电网为例，湘潭电网目前共有 110 kV 输电线路 44 条，线路导线型号为 LGJ—185 和 LGJ—240 的有 32 条，导线长度有 30 条在 10 km 以内，主要分布在 2.5~10 km 之间。从目前电网存在可以利用来融冰的电压等级来看，一般是 10.5 kV 和 6 kV 两种电压等级。从表 1 和表 2 中可以看出这两个融冰电压等级无法实现对大部分 110 kV 线路进行单一线路融冰。而且随着社会经济的发展，220 kV 变电站布点的增加，110 kV 输电线路长度将越来越短，目前采用的融冰电压等级将无法满足 110 kV 线路单一线路融冰的需要。因此，如何实现从目前电网获取合适的更低电压等级的融冰电源显得非常重要。考虑到线路应在 T1、T2 两种气象情况下均能可靠融冰，且融冰范围不和目前常用融冰电压等级的融冰范围冲突。根据测算，将更低一级的融冰电压等级定为 5 kV、2.5 kV、1.25 kV 便可以满足需要。为了使 T1、T2 气象条件下都能实现融冰，不同型号的线路融冰范围由 T1 条件下导线最大允许融冰电流和 T2 条件下导线融冰所需最小电流为限制条件来计算。此三种电压等级融冰电源对不同型号 110 kV 线路的融冰范围计算如表 3。

表 3 5 kV、2.5 kV、1.25 kV 电压等级对 110 kV 线路融冰的
最大及最小有效长度

导线型号	5 kV		2.5 kV		1.25 kV	
	最大 /km	最小 /km	最大 /km	最小 /km	最大 /km	最小 /km
LGJ—95	18.3	8.9	9.1	4.5	4.5	2.3
LJG—120	17.1	8.3	8.5	4.2	4.2	2.1
LGJ—150	16.2	7.8	8.1	3.9	4.0	2
LGJ—185	14.2	6.9	7.1	3.5	3.5	1.8
LGJ—240	12.6	6.1	6.3	3.1	3.1	1.6
LGJ—300	10.4	5.0	5.2	2.5	2.6	1.3
LGJQ—300	10.9	5.2	5.4	2.6	2.7	1.3

3 在 220 kV 变电站中建设融冰配电变压器的设想

由于 110 kV 线路相对比较短，目前常用的融冰电压等级无法满足单一线路融冰的要求，如何获取合适的融冰电压成为实现对 110 kV 线路单一线路融冰的关键。考虑到大部分 110 kV 线路是从 220 kV 变电站出来的出线，特提出在 220 kV 变电站的 10 kV 融冰间隔装设融冰配电变压器，通过此融冰配电变压器的变压，获取适合 110 kV 线路单一线路融冰所需电压等级的融冰电源，其接线如图 1。

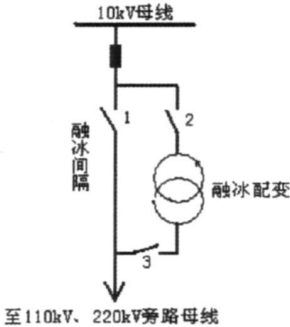


图 1 融冰配电变压器接线图

此融冰配电变压器为无载调压变压器，其高压侧为 10.5 kV，低压侧为 5、2.5、1.25 kV 三个可调电压等级，经测算该融冰配电变压器的容量要配置为 12 MV·A。为了减少融冰配电变压器的容量，降低融冰配电变压器的制造成本，可以将该配电变压器的低压侧电压等级增加为 5、4.5、4、3.5、3、2.5、2、1.5、1 kV 九个电压等级，配电变压器容量可以配置为 6.5 MV·A。该融冰变压器和融冰出线并联接线，能够实现 10、5、4.5、4、3.5、3、2.5、2、1.5、1 kV 十个融冰电压等级。为了进一步减少融冰配电变压器的容量，可在融冰配电变压器低压侧并联一个融冰无功补偿电容器，电压等级为 5 kV，容量为 3 Mvar 融冰配电变压器容量可降为 3.5 MV·A，接线如图 2。

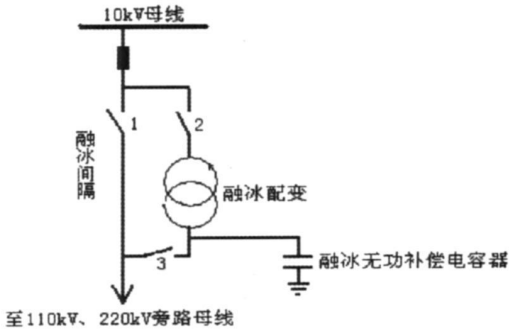


图 2 融冰配电变压器 + 融冰无功补偿电容器接线图

以 LGJ—300、LGJ—240、LGJ—185 三种型号的导线为例, 计算用该融冰配电变压器融冰的条件下每一个融冰电压等级融冰的有效融冰范围及所需最大融冰容量及融冰电流, 其数据见表 4、5、6。

为了进一步减少投资成本, 降低融冰配电变压器的容量, 可以利用 220 kV 变电站内现有的电容器作为融冰时专用电容器, 以湘潭电网 220 kV 茶园变电站为例, 其接线如图 3 所示。

在茶园变电站四台电容器上引出线至 10 kV 融冰间隔。这四台电容器在平常时 7 隔离开关在断开位置, 仍然是做补偿系统无功用。当在线路融冰时, 四台电容器可以任意组合切换至融冰间隔侧做融冰无功补偿用。在 5 kV 电压等级下, 茶园变电站每组电容器容量为 1 500 kvar 融冰无功补偿可以是 1 500、3 000、4 500、6 000 kvar 四个补偿等级。经计算,

这样融冰配电变压器的容量可设置为 2 MV·A, 且无需为融冰单独配置电容器。在用 10.5 kV 电压等级去融冰的时候同样可以通过 7 隔离开关直接补偿电容, 避免了 312 开关及 TA 容量问题。

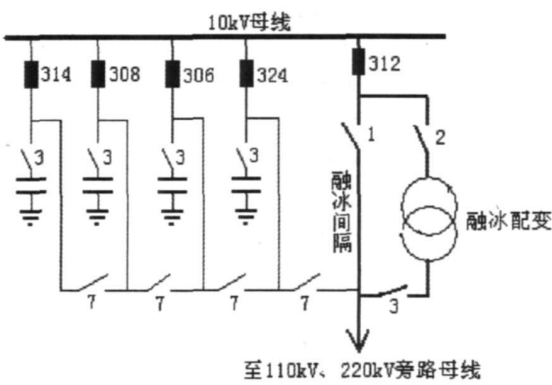


图 3 利用 220 kV 变电站内电容器的 10 kV 配电变压器融冰系统接线图

表 4 融冰配电变压器对 LGJ—300 型导线融冰的相关数据

融冰电压等级 /kV	融冰范围 /km	所需最大融冰容量 /MV·A	所需最大融冰电流 /A
5.0	9.3~10.4	6.51(1.69+j5.29)	751.4
4.5	8.3~9.3	5.91(1.53+j5.7)	757.8
4.0	7.2~8.3	5.38(1.39+j5.2)	776.5
3.5	6.2~7.2	4.78(1.24+j4.62)	789.0
3.0	5.2~6.2	4.19(1.09+j4.05)	806.3
2.5	4.1~5.2	3.69(0.96+j3.56)	852.2
2.0	3.1~4.1	3.12(0.81+j3.02)	901.7
1.5	2~3.1	2.72(0.71+j2.63)	1048.2
1.0	1.5~2	1.61(0.42+j1.56)	931.8

表 5 融冰配电变压器对 LGJ—240 型导线融冰的相关数据

融冰电压等级 /kV	融冰范围 /km	所需最大融冰容量 /MV·A	所需最大融冰电流 /A
5.0	11.3~12.6	5.24(1.63+j4.99)	605.6
4.5	10~11.3	4.8(1.49+j4.56)	615.9
4.0	8.8~10	4.31(1.34+j4.1)	622.1
3.5	7.5~8.8	3.87(1.2+j3.68)	638.7
3.0	6.3~7.5	3.39(1.05+j3.22)	651.7
2.5	5~6.3	2.96(0.92+j2.82)	684.3
2.0	3.7~5	2.56(0.8+j2.44)	739.8
1.5	2.5~3.7	2.13(0.66+j2.03)	821.2
1.0	1.5~2.5	1.58(0.49+j1.5)	912.4

表 6 融冰配电变压器对 LGJ—185 型导线融冰的相关数据

融冰电压等级 /kV	融冰范围 /km	所需最大融冰容量 /MV·A	所需最大融冰电流 /A
5.0	12.8~14.2	4.41(1.69+j4.07)	509.2
4.5	11.4~12.8	4.01(1.54+j3.7)	514.6
4.0	9.9~11.4	3.65(1.4+j3.37)	526.7
3.5	8.5~9.9	3.25(1.25+j3)	536.8
3.0	7.1~8.5	2.86(1.1+j2.64)	550.8
2.5	5.7~7.1	2.48(0.95+j2.29)	571.7
2.0	4.2~5.7	2.15(0.83+j1.99)	620.7
1.5	2.8~4.2	1.81(0.7+j1.68)	698.3
1.0	1.5~2.8	1.51(0.58+j1.39)	869.0

表 7 湘潭电网部分 110 kV 线路单一线路融冰的相关数据

序号	线路名称	起止地点	导线型号 长度 /km	融冰电压 等级	融冰短路 电流 /A	融冰有功 /MW	融冰无功 /Mvar	融冰时间 T1	融冰时间 T2
1	白易线	白 516—易 502	LGJ—185 /9. 937	3. 5	459. 1	1. 07	2. 57	70	170
2	荷易线	荷 524—易 504	LGJ—185 /9. 976	3. 5	457. 3	1. 06	2. 56	69	168
3	茶五线	茶 506—五 502	LGJ—240 /9. 026	4. 0	549. 1	1. 71	3. 40	67	144
4	荷五线	荷 516—五 504	LGJ—185 /7. 541	3. 0	518. 6	1. 03	2. 49	44	67
5	茶瓦线	茶 508—瓦 508	LGJQ—300 /8. 286	4. 0	671. 1	1. 21	4. 49	59	110
6	荷瓦线	荷 514—瓦 504	LGJ—240 /2. 964	1. 5	692. 6	0. 56	1. 71	35	46
7	野霞线	野 512—霞 504	LGJ—240 /2. 485	1. 0	550. 8	0. 30	0. 91	67	147
8	茶霞线	茶 526—霞 502	LGJ—240 /3. 920	2. 0	698. 3	0. 75	2. 30	32	44
9	茶潭线	茶 516—潭 500	LGJ—240 /5. 093	2. 5	671. 8	0. 90	2. 77	38	52
10	茶野线	茶 502—野 508	LGJ—300 /2. 270	1. 5	923. 6	0. 62	2. 32	27	36

从经济上考虑, 110 kV 线路大部分是从 220 kV 变电站出线。随着电网的发展, 110 kV 线路均从 220 kV 变电站出线是发展的趋势, 220 kV 变电站的一个融冰配电变压器就可满足多条 110 kV 线路单一线路融冰的需要, 可减少或取消在 110 kV 变电站建设融冰间隔, 在 110 kV 变电站只需要考虑融冰短路点的建设问题, 使得融冰建设的整体成本将更低。

4 融冰适用的电压等级及相关计算

根据上面的计算和分析, 根据湘潭电网 110 kV 输电线路的实际情况, 确定了每一条线路的适用电压等级, 并计算了单一线路融冰的相关理论数据。经计算证明在 220 kV 变电站中装设融冰配电变压器能够满足湘潭电网绝大多数 110 kV 输电线路单一线路融冰的需要。部分相关数据见表 7。

5 结 论

110 kV 线路大多是长度不超过 10 km 的短

线路, 而且随着电网的发展, 线路的长度将越来越短。目前针对 110 kV 线路融冰的融冰电压等级已不适用单一线路融冰需要。因此, 提出了在 220 kV 变电站装设 10 kV 的特殊变比配电变压器的设想, 以满足 110 kV 线路单一线路融冰的需要。并经理论计算, 证明装设该变压器能够可以实现对绝大多数 110 kV 线路单一线路融冰。

参考文献

[1] 邓健, 肖顺良, 姚璞, 等. 220kV 线路融冰方案的改进 [J]. 电网技术, 2008, 32(4): 29—30.
[2] 姚璞, 易炜溟, 邓健, 等. 35kV 线路融冰方案的改进 [J]. 电网技术, 2008, 32(7): 100—102.
[3] 湖南省电力公司. 湖南电网主网线路融冰方案 (2007—2008 年度) [Z].

作者简介:

邓 健 (1978—), 男, 汉族, 湖南湘乡人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电网调度工作。

(收稿日期: 2009—06—01)

(上接第 12 页)

5 结 论

对 H 桥 DC /DC 变换系统电路进行了理论分析, 建立了基于 MATLAB /Simulink /Power System 工具箱的 H 桥 DC /DC 变换系统电路的仿真模型, 其仿真结果与理论分析十分吻合, 达到了电动机负载在四象限运行的目的, 验证了所建模型的正确性, 完成本课题——基于 PFC 和软开关的大功率开关电源研究所指定的科研任务。

参考文献

[1] 易卫东, 张建峡, 谢静. 一种新型全桥 DC /DC 开关电源的仿真研究 [J]. 现代机械, 2009, (2): 23—26.

[2] 刘福鑫. 高压直流电源中 DC /DC 变换器的研究 [D]. 南京航空航天大学硕士学位论文, 2004.
[3] 李传琦. 电力电子技术计算机仿真实验 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
[4] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

作者简介:

贾 周 (1981—), 男, 江苏徐州人, 在读研究生, 学士学位, 研究方向为电力电子与电力传动。

王金梅 (1968—), 女, 宁夏大学物电学院教授, 博士学位, 研究领域为电力电子与电力传动。

封俊宝 (1982—), 男, 河南南阳人, 在读研究生, 学士学位, 研究方向为电力电子与电力传动。

(收稿日期: 2009—07—09)

SVC 安装对四川电网的影响研究

杜新伟, 丁理杰, 周惟婧
(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:从系统动态稳定、川电外送能力、特高压无功电压支撑等 3 个方面研究了在四川电网装设静止无功补偿器 (SVC) 的影响, 并通过仿真分析探讨了具体 SVC 安装方案, 具有一定的工程意义。

关键词: SVC; 动态稳定; 外送能力; 特高压

Abstract: The influences of static var compensator (SVC) on Sichuan power grid are analyzed in terms of dynamic stability, transmission capacity and dynamic voltage support of UHV. And the locations of SVC are also researched by simulation which is of actual significance.

Key words: SVC; dynamic stability; transmission capacity; UHV

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0021-03

0 引 言

四川电网处于全国联网、西电东送的始端, 是全国最大的送端电网。目前四川电网已经基本形成覆盖全省的 220 kV 电网, 随着成都 500 kV 双环网和一批 500 kV 变电站的建设, 及瀑布沟等大型水电电源的接入, 四川 500 kV 网架将初具规模; 另外, 德宝直流、特高压交流示范工程的投运, 以及未来川内交流特高压线路、向家坝溪洛渡等特大型水电及其特高压直流送出线路的建设, 都将给四川电网带来深刻的影响。研究四川电网的动态稳定、川电外送、特高压输电及大电网安全等问题, 对应于各种新技术、新问题带来的挑战, 保证全国联网系统的安全稳定运行都具有重要的意义。

静止无功补偿器 (static var compensator SVC) 是典型的并联补偿装置, 可实现无功补偿的快速和连续平滑调节。在系统主要站点装设 SVC, 除可灵活补偿电网无功^[1~3]、调整节点电压外, 对增强系统阻尼抑制功率振荡^[4~7]、提升输电线路输送功率^[8, 9]、改善系统静态和暂态稳定性、降低系统过电压等也都具有一定的作用。因此, 有必要对 SVC 在四川电网中安装的影响和方案进行深入研究。

下面从系统动态稳定、川电外送能力、特高压无功电压支撑等 3 个方面研究了 SVC 安装对四川电网的影响, 并通过仿真分析探讨了具体安装方案, 具有

一定的工程意义。

1 SVC 对系统动态稳定的影响

1.1 四川电网的低频振荡现象

中国电力系统正在步入大区电网互联、全国统一联网的阶段, 而四川电网正处于西电东送的始端, 由于输电距离长、结构薄弱, 动态稳定水平较低。其主要表现为仿真中较多 500 kV 线路 N-1 三相短路故障将引发系统功率振荡失稳, 以洪沟至板桥双回线和尖山站附近的线路 N-1 故障最为明显, 如图 1 所示。进一步分析得到功率振荡摇摆曲线发现, 四川水电机组与河南大功率火电机组间均存在低频振荡模式, 而四川电网内部机组间未发生振荡。

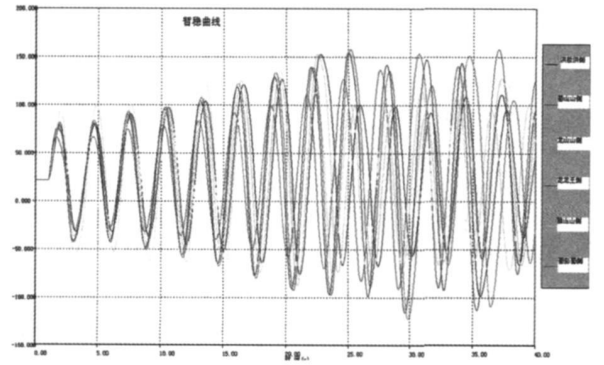


图 1 部分 500 kV 线路 N-1 故障, 二滩与豫姚孟机组的功角摇摆曲线

对四川电网进行频域小干扰分析,得到与该振荡失稳主导频率(0.33 Hz)一致的特征值 $-0.14047 \pm j 161.155$,对应模态图如图 2 所示。

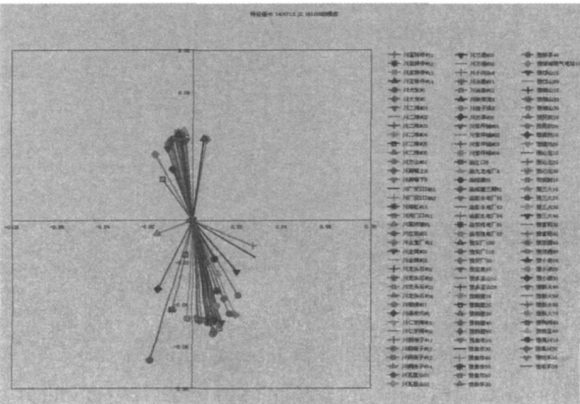


图 2 特征值 $-0.14047 \pm j 161.155$ 的模态图

1.2 关键站点安装 SVC 对抑制低频振荡的作用

通过仿真的方法研究在四川电网关键站点安装 SVC 对抑制低频振荡的作用,考虑到分析的有效性,在仿真中适当降低川西水电出力及华中—华北特高压北送功率,保证线路 N—1、N—2 故障暂态功角不失稳,以便于分析 SVC 安装对低频振荡的抑制效果。设置相对较严重的尖山出线 N—2 故障,分别选取尖山、龙王、黄岩、蜀州、丹景、谭家湾、雅安等站装设 SVC。容量选用 120 Mvar 和 180 Mvar (SVC 容量不参与正常运行调压,完全用作动态无功支撑),单台或两台,记录各种情况下的系统阻尼比和最大振幅,如表 1 所示。

表 1 各种 SVC 安装方案下的阻尼比和最大振幅

SVC 方案	阻尼比	最大振幅
无新增 SVC	0.007 14	94.183 0
尖山 180 Mvar	0.010 46	92.230 3
龙王 180 Mvar	0.011 28	91.965 7
黄岩 180 Mvar	0.009 98	90.454 1
蜀州 180 Mvar	0.010 26	92.340 2
丹景 180 Mvar	0.009 61	92.001 8
谭家湾 180 Mvar	0.011 45	91.712 0
雅安 180 Mvar	0.009 43	91.437 6
尖山 2×180 Mvar	0.024 87	93.711 4
龙王 2×180 Mvar	0.026 49	93.478 1
黄岩 2×180 Mvar	0.020 76	90.270 7
蜀州 2×180 Mvar	0.024 52	93.653 7

由表 1 可以看出,没有装设 SVC 时,故障将引起阻尼比小于 1% 的低频振荡(区间振荡);各站点加装 SVC 后,阻尼比均可以得到一定程度的改善,且各站加装 SVC 的效果差别不太明显,相比较而言,以在成

都下半环网 500 kV 变电站安装 SVC 效果相对较好。另外,随着各站点安装 SVC 容量的增加,阻尼比将有较大幅度提升,能有效改进系统的动态稳定性。

2 SVC 对川电外送能力的影响

四川水电资源丰富,未来几年内将形成三通道六回 500 kV 交流线路,及与西北网互联的德宝直流进行川电与外网的交互。

经分析得到,川电外送能力受到华中—华北特高压潮流、川西水电出力、鄂豫断面功率、及河南机组 PSS 装设情况的影响较大。如第 1 节中所示,在华中—华北特高压联网后的某些运行方式情况下,电网故障引起的动态稳定性问题较为突出,川电外送能力受此影响明显。

为考察 SVC 安装对川电外送的提高能力,选择与第 1 节中相同的边界,以 500 kV 洪沟—板桥线路洪侧三相短路故障可以不采取切机等安全措施为条件进行仿真研究,可得到川电外送极限如表 2 所示。

表 2 SVC 对川电外送能力的影响 (单位: MVar 万千瓦)

SVC 方案	总容量	川渝断面	川渝提高	单位提高
无新增 SVC	0	3 200	—	—
尖山 180 Mvar	180	3 260	60	0.330
龙王 180 Mvar	180	3 260	60	0.330
尖山 120 Mvar 黄岩 120 Mvar	240	3 290	90	0.375
龙王 120 Mvar 蜀州 120 Mvar	240	3 290	90	0.375
黄岩 2×180 Mvar	360	3 350	150	0.420
蜀州 2×180 Mvar	360	3 350	150	0.420
尖山 120 Mvar 黄岩 120 Mvar 谭家 120 Mvar	360	3 350	150	0.420
尖山 120 Mvar 黄岩 180 Mvar 谭家 120 Mvar	420	3 368	168	0.400
尖山 120 Mvar 黄岩 180 Mvar 谭家 120 Mvar 蜀州 180 Mvar	600	3 431	231	0.385
平均				0.384

由表 2 中可以看出:① SVC 的安装对于川电外送能力的提高又一定作用,但提高的程度对 SVC 安装地点不是特别敏感,主要与总的安装容量有关;② 每 Mvar 的 SVC 平均可以提高外送功率 0.384 MW。

3 SVC对特高压无功电压支撑的影响

3.1 尖山站附近故障对特高压电压的冲击

通过对四川电网的仿真计算发现,在丰水期华中向华北特高压线路大功率送电,而川渝和河南分别大功率向湖北送电时,如尖山附近线路发生三相短路故障,特别是尖山—龙泉线路尖山侧发生三相短路故障,极易引起系统动态失稳和特高压母线电压大幅度降落。

究其原因,主要在于尖山为川西水电外送的枢纽,同时又向成都负荷中心供电,是四川电网主要的功率汇集点,且通过短路计算可知,尖山 500 kV 母线的短路电流在全网所有 500 kV 母线中也是最高的,因此,一旦尖山侧发生短路故障,对整个四川 500 kV 网架及川电外送通道的冲击最大,将引起明显的电压振荡和功率波动。试图通过仿真计算,研究增设大容量 SVC 装置对特高压电压的支撑能力。

3.2 SVC对特高压无功电压支撑的能力

为考察 SVC 对在大规模功率外送时对输电通道的动态电压支撑作用,适当增加川电外送,特高压输电的功率大小,恶化仿真条件,设置对电压稳定影响最为严重的尖山—龙泉线路尖山侧故障,依次在龙王、谭家湾、丹景、蜀州、雅安、尖山、龙泉、黄岩等 500 kV 变电站加装一台或两台 180 Mvar 的 SVC,考察 SVC 安装地点和容量对电压稳定的影响;同样在仿真中 SVC 容量暂不参与正常运行调压,完全用作动态无功支撑,可得到计算结果如表 3 和图 3 所示。

表 3 SVC安装地点对特高压无功电压支撑的影响

SVC 安装点	SVC 容量	特高压电压最低降落
无新增	0	0.056 5
龙王	180	0.433 8
	2×180	0.554 5
谭家湾	180	0.404 0
	2×180	0.542 8
丹景	180	0.453 9
	2×180	0.555 1
蜀州	180	0.475 8
	180	0.072 5
雅安	2×180	0.517 9
	180	0.534 58
尖山	2×180	0.616 3
	180	0.514 27
龙泉	2×180	0.597 7
	180	0.067 5
黄岩	2×180	0.512 4

由仿真结果可以看出:①若系统不新装 SVC, 山龙山侧故障可能引起特高压母线电压大幅降落;②在安装单 180 Mvar 的 SVC 时,在成都环网上安装会起到比较明显的作用,其中以尖山、龙泉、蜀州加装效果最好,且其他站越靠近尖山效果越好;③当安装两台 180 Mvar 的 SVC 时,各个站安装都会起到比较明显的作用,仍以龙泉、尖山、蜀州效果最好;④对比安装一台和两台的效果,安装两台效果好于一台的效果,还可在故障后提升电压 0.1 p.u 左右;而由于黄岩、雅安等站安装一台效果不明显,安装两台后才可能起到动态电压支撑的作用;⑤另外,在仿真中发现,分散安装 SVC 的效果要好于集中安装的效果,如图 4 所示。

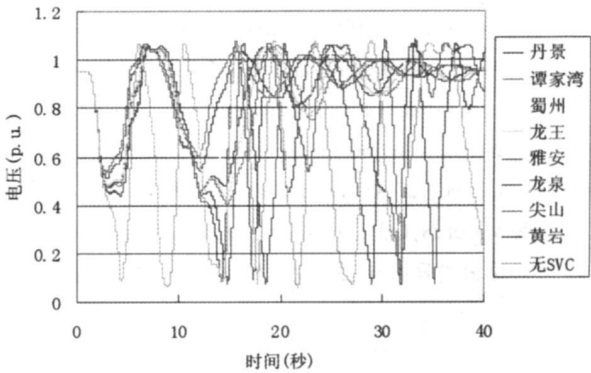


图 3 各站安装单 180 Mvar 特高压电压曲线

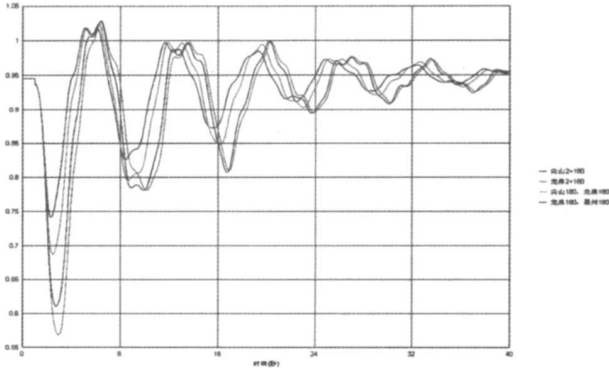


图 4 SVC分散安装与集中安装效果对比

4 结 论

(1)在全国大联网背景下,四川机组参与的网省间振荡模式阻尼较弱。通过仿真分析可得,在四川各 500 kV 站点,特别是成都下半环网站点加装 SVC 后,阻尼比将可得到一定程度的改善,且随着 SVC 容量的增加,阻尼比将有较大幅度提升。

(下转第 53 页)

(2) 电机局部放电在线监测与常规的离线绝缘测试相比,具有方便、灵敏、有效、无损伤的优点,能尽早发现电机绝缘内部故障,有利于有计划、合理地安排维修,因此局部放电在线监测是诊断大型电机定子绕组绝缘故障、进行大型电机预知维修的有效方法。

(3) 根据电机的特点选择适合的在线监测局部放电的方法,监测的关键在于把局部放电信号与噪声信号区别开来,尽可能地把噪声抑制或消除。这涉及到两个方面:一是耦合器(或传感器)的研制与设置,要有利于局部放电信号的提取,便于区分和消除噪声;二是信号的处理,首先是分离与消除噪声,然后对局部放电信号作进一步处理,对定子绕组绝缘状况做出诊断。

参考文献

[1] 王旭红. 高压电机的局部放电及其在线监测方法 [J].

(上接第 23 页)

(2) 安装 SVC 对川电外送能力的提高有一定作用,但提高的程度对 SVC 安装地点不是特别敏感,主要与总的安装容量有关,根据仿真分析,每 Mvar 的 SVC 约可提高外送功率 0.384 MW。

(3) 尖山 500 kV 站附近线路发生三相短路故障易引起特高压母线电压大幅度降落,在成都环网上安装 SVC 对特高压无功电压能起到比较明显的作用,其中以尖山、龙泉、蜀州加装 SVC 效果最好。另外,在仿真中可以看出,分散安装 SVC 的效果要优于集中安装。

参考文献

[1] M. Moghavvemi, M. O. Farique. Effects of FACTS Devices on Static Voltage Stability. ENCON Proceedings 2000, (2): 357—362.

[2] 吴国红, 贺家李, 余贻鑫, 等. FACTS 装设最佳设置点的选择指标 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 57—60.

长沙电力学院学报(自然科学版), 2002, 17(1): 23—25.

[2] 李武峰. 大型发电机定子局部放电在线监测技术的研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2002.

[3] 刘立生, 邱阿瑞. 高压电机局部放电在线监测方法 [J]. 电工电能新技术, 1999, (3): 23—27.

[4] 刘辉. 发电机定子绕组局部放电监测技术 [J]. 河北电力技术, 2007, 26(1): 8—9.

[5] 陈卓. 大型发电机定子绝缘局部放电在线监测的研究 [D]. 四川大学硕士学位论文, 2005.

作者简介:

崔东君 (1984—), 硕士生, 研究方向电力系统安全监控和故障诊断技术。

刘念 (1956—), 博士, 四川大学教授, 研究方向电力系统安全监控和故障诊断技术、过电压保护等。

(收稿日期: 2009—05—23)

[3] 包黎昕, 段献忠, 陈峰, 等. SVC 和 TCSC 提高电压稳定性作用的动态分析 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 21—25.

[4] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖, 等. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[5] 艾欣, 蔡国伟, 徐兴伟, 等. 伊敏—大庆 500kV 系统采用 SVC 提高稳定水平的研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(3): 54—57.

[6] 刘宪林, 王鑫. 单机—SVC—无穷大系统机电模式阻尼特性分析. 郑州大学学报(工学版), 2007, 28(3): 87—90.

[7] 王海风, 李乃湖, 陈珩, 等. 静止无功补偿器阻尼电力系统振荡 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 190—195.

[8] 张鹏飞, 付红军, 鄢安河, 等. 应用 SVC 提高电网输电能力的研究 [J]. 电力设备, 2007, 8(3): 28—31.

[9] 高文建, 马世英. 动态无功补偿技术在西电东送通道中的应用研究 [J]. 广西电力, 2008, (4): 6—10.

(收稿日期: 2009—05—12)

欢迎订阅《四川电力技术》

特高压电流差动保护方案研究

桑丙玉, 喻 奇

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:特高压 1000 kV 输电线路分布电容更大, 由分布电容引起的暂态电容电流对线路的保护影响更大, 因此研究 1000 kV 输电线路的特点及暂态过程对保护的影响很重要。分析了 1000 kV 输电线路的特殊性, 给出了暂态电压电流的仿真波形, 介绍了基于不同电容电流补偿方法的线路差动保护判据, 通过分析和大量的仿真验证了几种判据在 1000 kV 输电线路中应用的优缺点及需要注意的问题, 为特高压输电线路电流差动保护方案提供一定的参考。

关键词:特高压; 暂态; 电容电流; 差动判据

Abstract: The 1000 kV UHV transmission line has a bigger distributed capacitance and the transient capacitance current caused by distributed capacitance influences the line current differential protection greatly. So it is important to research the characteristics of 1000 kV transmission line and the influence of transient process on the protection. The particularity of 1000 kV transmission line is analyzed, and the transient V/I simulation waveform is presented. The differential protection criterions based on different capacitance current compensation are introduced. The strong points and disadvantages of each criterion are validated as well as the problems needing attention in a 1000 kV simulation model through the analyses and simulations. The results give a reference for the current differential protection scheme of UHV transmission line.

Key words: UHV; transient; capacitance current; differential criterion

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0024-05

0 引 言

超(特)高压长线的分布电容电流一直是影响电流差动保护性能的主要因素^[1,2], 随着中国晋东南—荆门 1000 kV 特高压线路的出现, 这个问题更突出。许多文献^[3,4,5,6]提出了电容电流补偿方法和差动保护判据, 这些方法在 1000 kV 特高压输电线路中的应用需要进一步研究。

文章分析了 1000 kV 输电线路的特点, 用 EMT-DC 建立了 1000 kV 分布参数线路模型, 仿真分析了线路的暂态过程。对几种典型的电流差动保护判据进行分析和仿真比较, 指出各自的优缺点和实际应用中要注意的问题, 为研究特高压输电线路电流差动保护提供一定的参考价值。

1 1000 kV 特高压输电线路的特殊性

1000 kV 特高压输电线路阻抗角与分布电容显著增大, 使得 1000 kV 输电线路故障时暂态过程更加严重。电感和电容都是储能元件, 当线路故障或是系统

操作使其工作状态发生改变时, 其储存能量将释放、转换即产生过渡过程。如若电源继续供电, 暂态电流将由工频分量和以系统自振频率振荡的自由分量叠加而成。图 1、2 给出了线路空载合闸和区外故障的暂态电流波形; 图 3 给出了区内故障的暂态电流波形。

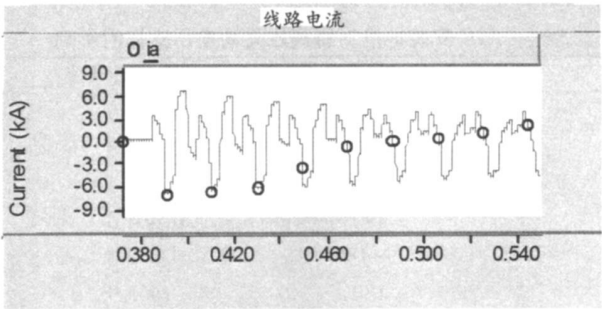


图 1 空载合闸时暂态电流

特高压线路暂态电流中谐波含量高, 非周期分量且衰减缓慢, 会影响工频量的正确提取, 从而影响基于工频量保护的可靠性和动作速度。

2 基于稳态补偿的差动判据

特高压长线若只研究线路两端电流、电压关系

时,可以利用二端口集中参数模型。图 4所示为特高压长线 π 型等效网络图。

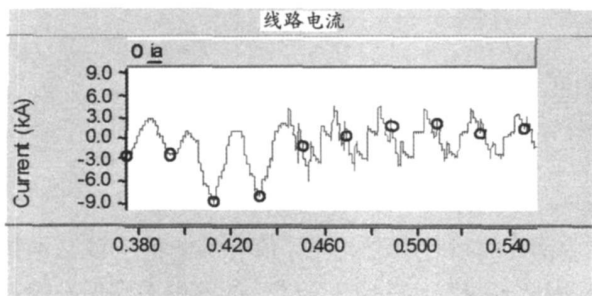


图 2 区外故障暂态电流

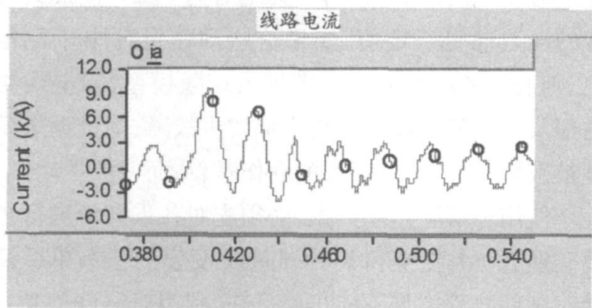


图 3 区内故障暂态电流

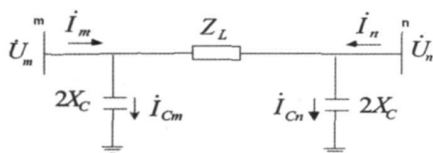


图 4 特高压长线 π 型等效网络

稳态补偿的电容电流计算如式 (1)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{Cm} = \frac{\dot{U}_m - \dot{U}_{m0}}{-jX_{C1}} + \frac{\dot{U}_{m0}}{-jX_{C0}} \\ \dot{I}_{Cn} = \frac{\dot{U}_n - \dot{U}_{n0}}{-jX_{C1}} + \frac{\dot{U}_{n0}}{-jX_{C0}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\dot{U}_m$ 、 $\dot{U}_n$ 为线路两端电压; $\dot{U}_{m0}$ 、 $\dot{U}_{n0}$ 为零序电压; X_{C1} 、 X_{C0} 为线路的正序和零序容抗。

常规相量差动经稳态补偿后的判据为

$$|(\dot{I}_m - \dot{I}_{Cm}) + (\dot{I}_n - \dot{I}_{Cn})| > I \quad (2)$$

$$|(\dot{I}_m - \dot{I}_{Cm}) + (\dot{I}_n - \dot{I}_{Cn})| > k \quad (3)$$

$$|(\dot{I}_m - \dot{I}_{Cm}) - (\dot{I}_n - \dot{I}_{Cn})|$$

式中, $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$ 分别为线路两端 m 侧、n 侧的分相电流相量 (以母线流向线路为正); I 是动作门槛值,按躲过区外故障时可能产生的最大不平衡差流整定;

k 是制动系数,一般取 $0 < k < 1$ 。式 (2) 为辅助判据,式 (3) 为主判据,两式同时成立时,保护动作为跳闸。

稳态补偿法在稳态时补偿效果很好,但由于忽略了暂态分量,不能补偿暂态电容电流。为防止暂态过程中保护误动,常见的做法是采用定值高低不同的两套辅助判据,高定值判据可切除过渡电阻较小的严重故障,低定值判据带有几个周期的延时,用以提高保护反应过渡电阻的能力^[3],但这种做法是以牺牲保护的速动性为代价的。

3 基于时域电容电流补偿的差动判据

电容电流和电压之间存在以下关系。

$$i_c = \frac{du_c}{dt} \quad (4)$$

电容电流时域补偿的原理是在时域下根据输电线等值电路列出满足基尔霍夫电流定律的微分方程,然后根据式 (4) 对每个采样数据进行逐点微分计算,实现对暂态和稳态电容电流的有效补偿。时域法 π 型网络等效电路如图 5 所示。

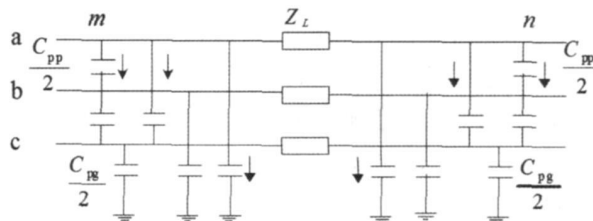


图 5 时域法 π 型等效电路

根据式 (4),可求得线路两侧 a 相需补偿的电容电流瞬时值为

$$\begin{cases} i_{Cm}^a = \frac{C_{pg}}{2} \frac{du_m^a}{dt} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{du_m^{ab}}{dt} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{du_m^{ac}}{dt} \\ i_{Cn}^a = \frac{C_{pg}}{2} \frac{du_n^a}{dt} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{du_n^{ab}}{dt} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{du_n^{ac}}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式中, C_{pg} 为线路对地电容; C_{pp} 为相间电容,对于三相对称线路,它们与线路正序、零序电容的关系为 $C_{pp} = 1/3(C_1 - C_0)$, $C_{pg} = C_0$ 。

方程求解时,利用数值微分近似求解导数,即:

$$\frac{du_c(t)}{dt} \approx \frac{u_c(t) - u_c(t - \Delta t)}{\Delta t}, \text{ 则式 (5) 可化为}$$

$$\left\{ \begin{aligned} i_m^a(t) &= \frac{C_{pg}}{2} \frac{u_m^a(t) - u_m^a(t-\Delta t)}{\Delta t} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{2[u_m^a(t) - u_m^a(t-\Delta t)] -}{\Delta t} \\ &\quad \frac{C_{pp}}{2} \frac{u_m^b(t) - u_m^b(t-\Delta t) + u_m^c(t) - u_m^c(t-\Delta t)}{\Delta t} \\ i_n^a(t) &= \frac{C_{pg}}{2} \frac{u_n^a(t) - u_n^a(t-\Delta t)}{\Delta t} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{2[u_n^a(t) - u_n^a(t-\Delta t)] -}{\Delta t} \\ &\quad \frac{C_{pp}}{2} \frac{u_n^b(t) - u_n^b(t-\Delta t) + u_n^c(t) - u_n^c(t-\Delta t)}{\Delta t} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

类似可求得 b、c 相需补偿的电容电流瞬时值。线路两侧经时域补偿后的差动电流和制动电流瞬时值为

$$\left\{ \begin{aligned} i_{dm}^{\Phi}(t) &= [i_m^{\Phi}(t) - i_{cm}^{\Phi}(t)] + [i_n^{\Phi}(t) - i_{cn}^{\Phi}(t)] \\ i_r^{\Phi}(t) &= [i_m^{\Phi}(t) - i_{cm}^{\Phi}(t)] - [i_n^{\Phi}(t) - i_{cn}^{\Phi}(t)] \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中, $\Phi = a, b, c$ 。通过滤波得到差动电流和制动电流的幅值后, 采用类似相量差动的判据形式进行判断。

时域法考虑了电容和电压的真实关系, 能够对暂态电容有效补偿。但仍基于集中参数 π 模型, 不能对暂态电容电流完全补偿。

4 基于贝瑞隆模型的差动保护判据

对于一条双端 (m 侧、n 侧) 三相线路, m 侧保护装置通过采样得到本侧各时刻三相电压、电流的采样值: $u_m^a, u_m^b, u_m^c, i_m^a, i_m^b, i_m^c$; 通过光纤或微波通道, 得到对侧 (n 侧) 经过采样同步化后各相同时刻的电压电流采样值: $u_n^a, u_n^b, u_n^c, i_n^a, i_n^b, i_n^c$ 。用 m 侧当前时刻 t 的 3 个电压量和前 (t- τ) 时刻 m 侧三相的 6 个电压、电流量和 n 侧三相的 6 个电压、电流, 用贝瑞隆公式^[6]可以计算得到 m 侧当前时刻 3 个电流量的计算值 $i_{cm}^a, i_{cm}^b, i_{cm}^c$ 。然后用滤波算法对 3 个电流实测值和 3 个计算值进行滤波得到各自的基波矢量 $i_m^a, i_m^b, i_m^c, i_{cm}^a, i_{cm}^b, i_{cm}^c$ 。同理可求得对侧电流的基波矢量 $i_n^a, i_n^b, i_n^c, i_{cn}^a, i_{cn}^b, i_{cn}^c$ 。将实测值和计算值进行比较, 构成基于贝瑞隆模型的差动判据。

$$|i_{dm}^{\Phi}| = |i_m^{\Phi} - i_{cm}^{\Phi}| > I \quad (8)$$

$$|i_{dn}^{\Phi}| = |i_n^{\Phi} - i_{cn}^{\Phi}| > I \quad (9)$$

式中, $\Phi = a, b, c, I$ 为定值, 按大于外部故障时可能产生的最大不平衡动作量给定。

因为贝瑞隆模型真实地反映了两端母线之间线路内部无故障的稳态运行或外部故障的暂态过程, 故

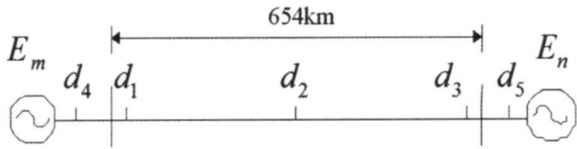
在内部无故障时理论上计算值和实测值应该基本相等, 因此有: $i_m^{\Phi} = i_{cm}^{\Phi}, i_n^{\Phi} = i_{cn}^{\Phi}$ 。故两侧差动保护的動作量 $i_{dm}^{\Phi}, i_{dn}^{\Phi}$ 都应该等于 0。但考虑到各种误差和简化考虑损耗的影响, 它们不会绝对为 0。可按最大可能的误差规定一定值, 如果这些动作量都小于此定值, 则表示电压电流关系满足贝瑞隆模型, 输电线路内部没有故障。如果线路内部发生故障, 则贝瑞隆模型被破坏, 必然产生很大的动作量, 从而使保护动作。

使用贝瑞隆差动判据, 必须先对各采样值进行相模变换, Clark 变换和 Karrenbauer 变换的任一单一模量对某些故障类型不能正确反映, 利用对称分量变换矩阵做相模变换能够反映各种故障类型^[7], 所以采用对称分量变换矩阵求模分量, 对称分量相模变换与反变换矩阵如下。

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}, S^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, a = e^{j20}$$

5 仿 真

用 EMTDC 建立 1 000 kV 双电源单回输电线路仿真模型, 线路模型采用分布参数的贝瑞隆模型, 线路参数来自晋东南—荆门特高压示范工程试验参数^[8], 具体参数见图 6。



线路参数: $r_1 = 0.0758 \Omega / \text{km}, r_0 = 0.1542 \Omega / \text{km}$
 $l_1 = 0.83922 \text{ mH} / \text{km}, l_0 = 2.6439 \text{ mH} / \text{km}$
 $c_1 = 0.01397 \mu\text{F} / \text{km}, c_0 = 0.009296 \mu\text{F} / \text{km}$

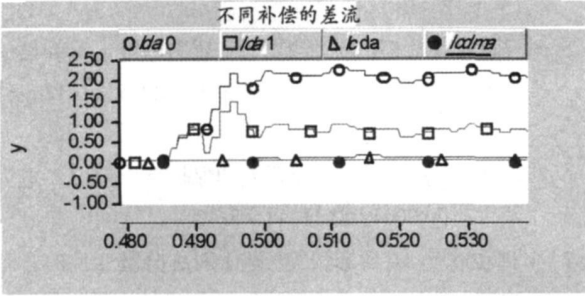
图 6 1 000 kV 系统模型

两端电源角度差为 26° , 负荷电流由 m 端流向 n 端, 每种情况均对稳态补偿差动、时域补偿差动和贝

瑞隆差动判据进行对比。数据采用全周傅立叶算法滤波,每个周期采样 64 点。

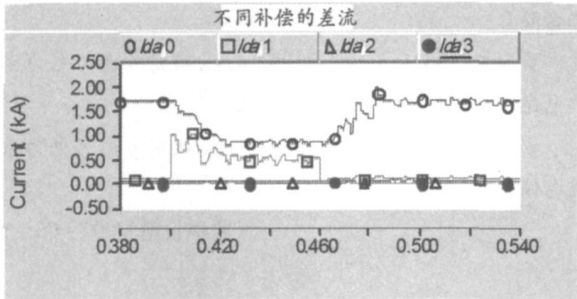
5.1 空载合闸、区外故障及切除

图 7 和图 8 分别为空载合闸和区外故障及切除时各判据的差流幅值。可以发现稳态时 3 种补偿法效果均很好,差流都很小。



I_{bla0} ——未补偿差流; I_{bla1} ——稳态补偿差流;
 I_{bda} ——时域补偿差流; I_{bda3} ——贝瑞隆补偿差流

图 7 线路 m 侧空载合闸时 a 相各判据的差流幅值



I_{bla0} ——未补偿差流; I_{bla1} ——稳态补偿差流;
 I_{bda} ——时域补偿差流; I_{bda3} ——贝瑞隆补偿差流

图 8 区外 (d₁ 点) a 相金属性接地故障相差流幅值

在暂态过程中尤其是空载合闸和区外故障时,稳态补偿的效果较差,差流变大,有的时刻甚至接近于未补偿的差流;时域补偿的效果较好,但差流仍比贝瑞隆法的大,这是因为时域补偿仍基于集中参数模型,对暂态量不能完全补偿;贝瑞隆差动判据的差流几乎为零,说明贝瑞隆模型能够精确反应输电线路内部无故障的暂态过程。表 1 是各判据在两种暂态过程中的最大差流幅值。

表 1 空载合闸和区外故障时各判据最大差流幅值

差动判据	空载合闸	区外故障及切除
未补偿	2.296	1.925
稳态补偿	1.478	1.13
时域补偿	0.372	0.196
贝瑞隆法	0.029	0.015

各判据中的门槛电流 I_b 都要按躲过空载合闸、

区外故障及切除的最大不平衡差流整定,参照表 1,差流越大的动作门槛就越高,灵敏度也就越低。

稳态补偿高定值辅助判据和时域补偿判据通常取可靠系数 $k=1.5$ 躲空载合闸和区外故障的暂态过程;贝瑞隆差动判据取 $k=5$,不但能完全躲过区外故障最大不平衡差流,且动作门槛比前两种都低。稳态补偿低定值辅助判据一般取延时 2~3 个周波动作切除区内故障,降低了保护的動作速度。

5.2 区内故障

区内故障主要讨论各判据的灵敏度和带过渡电阻的能力。未补偿、稳态补偿和时域补偿差动分别按照各判据形式求出制动电流的值,贝瑞隆差动的制动电流按完全能够躲过区外故障的最大差流整定,取 5 倍的可靠系数, $I_b=0.145$ kA。将各判据差动电流和制动电流的比值设为 K (动作系数)。以出现概率最高的单相接地故障为例,表 2 (a)、(b)、(c) 分别给出了区内不同地点且带不同过渡电阻故障时各判据的 K 值。

表 2 区内故障时各判据的制动系数 K (a) d₁ 点故障

差动判据	过渡电阻 /Ω		
	100	300	500
未补偿	0.790	0.631	0.607
稳态补偿	0.741	0.449	0.341
时域补偿	0.731	0.408	0.282
贝瑞隆法	31.911	11.435	6.714

(b) d₂ 点故障

差动判据	过渡电阻 /Ω		
	100	300	500
未补偿	1.318	0.753	0.648
稳态补偿	1.322	0.599	0.398
时域补偿	1.335	0.589	0.368
贝瑞隆法	3.633	3.580	2.820

(c) d₃ 点故障

差动判据	过渡电阻 /Ω		
	100	300	500
未补偿	3.455	1.424	0.885
稳态补偿	3.725	1.060	0.525
时域补偿	2.765	1.030	0.493
贝瑞隆法	24.516	5.739	2.728

由表 2 可看出,稳态补偿判据和时域补偿判据在区内故障时带过渡电阻能力反而不如未补偿的,且在送电端带过渡电阻能力很弱;贝瑞隆差动判据区内故障的灵敏度很高,带过渡电阻的能力也很强,而且能解决送电端带过渡电阻能力弱的问题。

6 结 论

对稳态补偿差动判据、时域补偿差动判据和贝瑞隆差动判据在 1000 kV 特高压输电线上的应用进行了研究。结果表明:

稳态补偿判据能有效地补偿稳态电容电流,但对暂态电容电流不能补偿;时域补偿判据对稳态和暂态电容电流都有较好的补偿,由于基于集中参数 Π 模型,对暂态电容电流不能完全补偿;贝瑞隆差动判据基于分布参数模型,能完全补偿稳态和暂态电容电流。

稳态补偿判据和时域补偿判据在区内故障时带过渡电阻能力不高;贝瑞隆差动判据带过渡电阻能力很强。

时域补偿判据只需传送经补偿后的电流值,对通信要求不高;贝瑞隆差动判据要用相邻的两个采样点数据进行计算,所以对采样频率要求很高,而且需要传送两端的电压电流采样值,对通信的要求也很高,在采样和通信都满足要求的情况下,采用贝瑞隆差动判据是一个很好的选择。

参考文献

[1] 陈德树,唐萃,尹项根,等.特高压交流输电继电保护及

相关问题[J].继电器,2007,35(5):1—3.

[2] 李瑞生,索南加乐.750 kV 输电线路的特殊问题及其对线路保护的影响[J].继电器,2006,34(3):1—4.

[3] 伍叶凯,邹东霞.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] 索南加乐,张恽宁,齐军,等. Π 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J].中国电机工程学报,2006,26(5):12—18.

[5] 吴通华,郑玉平,朱晓彤.基于暂态电容电流补偿的线路差动保护[J].电力系统自动化,2005,29(12):61—67.

[6] 郭征,贺家李.输电线纵联差动保护新原理[J].电力系统自动化,2004,28(11):1—5.

[7] 和敬涵,范瑜,薄志谦等.基于对称分量变换的暂态电流极性方向比较保护算法[J].电工技术学报,2007,22(2):116—120.

[8] Z. Y. Xu, Z. Q. Du, L. Ran et al. A Current Differential Relay for a 1000—kV UHV Transmission Line[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2007, 22(3).

作者简介:

桑丙玉(1983—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

喻 奇(1984—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期:2009—06—10)

(上接第 9 页)

(2):503—511.

[10] Canuso E, Diconato M, Minoia A, et al. Supplier risk analysis in the day-ahead electricity market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 153(3):335—341.

[11] 谢俊,陈星莺.构造供电公司最优电能分配策略的 CVaR 方法[J].现代电力,2007,24(2):44—48.

[12] 刘嘉佳,刘俊勇.计及动态一致性风险度量的水电短期优化调度[J].中国电机工程学报,2008,28(10):94—99.

[13] 张富强,周浩.电力市场金融风险分析——分析法[J].电力系统及其自动化学报,2004,16(3):23—28.

[14] 林辉,何建敏.VaR 在投资组合应用中存在的缺陷与 CVaR 模型[J].财贸经济,2003,12:46—69.

[15] Rockafellar R T, Uryasev S. Optimization of conditional value at risk[J]. Journal of Risk, 2000, 2(3):21—41.

[16] 孟志青,虞晓芬,蒋敏,等.基于动态 CVaR 模型的房地产组合投资的风险度量与控制策略[J].系统工程理

论与实践,2007,27(9):69—76.

[17] 陈金龙,张维.CVaR 与投资组合优化统一模型[J].系统工程理论方法应用,2002,11(1):68—71.

[18] 蒋敏,胡奇英,孟志青.基于权值的多阶段风险值证券组合问题研究[J].管理工程学报,2006,20(3):38—40.

[19] 张兴平,陈玲,武润莲.加权 CVaR 下的发电商多时段投标组合模型[D].中国电机工程学报,2008,28(16):79—83.

[20] 王壬,尚金成,冯畅,等.基于 CVaR 风险计量指标的发电商投资组合策略及模型[J].电力系统自动化,2005,29(14):5—9.

作者简介:

吴 薇(1986—),女,硕士研究生,研究方向为电力市场。

刘俊勇(1963—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力市场、灵活交流输电及电力系统可视化等。

(收稿日期:2009—06—10)

基于改进 PSO 算法的 PID 参数优化研究

李凌舟, 陈 利

(四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

摘 要: 针对 PID 控制器的参数整定问题, 提出一种改进微粒群优化算法 (improved particle swarm optimization, IPSO)。算法是在基本 PSO 算法的惯性权重部分加入一个调节因子项, 通过调节因子的调节, 改善了算法的收敛性。仿真结果表明, IPSO 算法可以更好地优化 PID 控制器的参数, 使控制系统具有更好的控制性能。

关键词: PID 参数优化; 微粒群优化算法; 改进微粒群优化算法

Abstract: In view of the parameter setting of PID controller, an improved particle swarm optimization algorithm (IPSO) is presented. The proposed method expands the basic PSO to add a regulatory factor to the inertia weight, which significantly improves the convergence of PSO by regulating the factor. Simulation results indicate that the proposed approach can optimize the PID parameter and improve the performance of control system primarily.

Key words: PID parameter optimization; particle swarm optimization (PSO); improved particle swarm optimization (IPSO)

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0029-03

0 引 言

PID 控制具有结构简单、易于实现的优点, 能够满足多数工业控制的性能要求, 是目前广泛采用的一种控制方式。PID 控制器设计的关键之一就是其参数的整定问题。基于进化计算的参数整定方法是目前 PID 控制的研究热点。文献 [1] 采用蚁群算法对 PID 参数进行优化, 文献 [2] 采用遗传算法优化 PID 参数, 文献 [3] 提出一种基于改进遗传算法的 PID 参数整定策略。

微粒群 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法是由 Kennedy 和 Eberhart 博士于 1995 年受鸟类群体行为研究结果的启发, 而提出的一种基于群体智能的进化计算技术^[4]。PSO 算法是一种高效、简单的并行搜索算法, 其优点在于概念简单、实现容易、鲁棒性好, 并且能以较大概率收敛到全局最优。在参数优化、多目标优化、约束问题优化、机组优化组合、负荷预测、无功优化等方面引起了广泛的关注。文献 [5] 提出一种基于线性递减惯性权重策略的 PID 参数整定方法, 然而由于控制对象的非线性, 线性递减关系可能只对某些问题有效, 对于大多数问题显然不是最佳的。

提出了一种改进 PSO 算法 (IPSO 算法), IPSO 算

法通过对惯性权重的改进, 改善了算法的收敛性。利用该算法优化 PID 控制器的参数, 可使优化后的控制系统具有更好的控制性能。

1 IPSO 算法

1.1 PSO 算法描述

PSO 算法是一种基于种群全局搜索的自适应进化算法, 其数学描述如下。

在 D 维搜索空间中有 s 个微粒, 设 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 为微粒 i 的当前位置; 设 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 为微粒 i 的当前速度; 设 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ 为微粒 i 所经历的最好位置。

设 $f(x)$ 为最小化的目标函数, 对于每一代粒子都根据下式进化。

$$v_{id}^{t+1} = \omega \cdot v_{id}^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{id}^1 - x_{id}^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{gd}^1 - x_{id}^t) \quad (1)$$

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1} = v_{max}, & \text{if } v_{id}^{t+1} > v_{max} \\ v_{id}^{t+1} = -v_{max}, & \text{if } v_{id}^{t+1} < -v_{max} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (3)$$

微粒 i 的当前最好位置 p_i^{t+1} 由下式确定。

$$p_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^t & f(x_i^{t+1}) \geq f(x_i^t) \\ x_i^{t+1} & f(x_i^{t+1}) < f(x_i^t) \end{cases} \quad (4)$$

若群体中所有微粒所经历的最好位置为 p_g , 则

所有微粒的最好位置由下式确定。

$$p_g = \min \{ f(p^1), f(p^2), \dots, f(p^t) \} \quad (5)$$

式中, t 或 $t+1$ 表示迭代次数, $v_{\max}$ 为设定的最大飞行速度。 ω 为惯性权重, c_1 和 c_2 为加速常数, 通常取 $c_1 = c_2 = 2$, r_1 和 r_2 为两个在 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数。

1.2 PSO 算法

微粒群算法中微粒的飞行速度相当于搜索步长, 其大小直接影响着算法的全局收敛性。当微粒的飞行速度较大时, 可以保证微粒以较快的速度飞向全局最优解所在的区域。但是当逼近最优解时, 由于微粒的飞行速度过快, 又很容易飞越最优解。由式 (1) 可知, 惯性权重 ω 是影响算法收敛性和收敛速度重要参数。在算法的初期, 希望算法有较快的收敛速度, 此时 ω 值不能太小。在算法的后期, 希望算法有较好的收敛精度, 即需要较小的变化步长, 此阶段 ω 值应相应取小, 易于算法收敛。

基于以上分析, 提出一种 IPSO 算法。算法按照式 (6) 实现惯性权重的非线性调整, 从而保证在算法的前期有较大的收敛速度, 而在后期能以较大概率收敛到全局最优。式中 α 称为调节因子, t 及 $t+1$ 表示迭代次数。

$$\omega(t+1) = \alpha \cdot \omega(t) \quad (0 < \alpha < 1) \quad (6)$$

1.3 PSO 算法流程

IPSO 算法的流程如下。

1) 初始化所有微粒, 在允许范围内随机设定微粒的初始位置和速度, 每个微粒的 p_{best} 设为其初始位置, p_{best} 中最好的值设为 g_{best}

2) 评价每个微粒的适应值, 计算每个微粒的目标函数;

3) 按照式 (4) 将每个微粒的适应值与其经历过的最好位置 p_{best} 的适应值进行比较, 如果优于 p_{best} 则将其作为当前的最好位置 p_{best}

4) 对每个微粒, 将其适应值与群体所经历过的最好位置 g_{best} 进行比较, 如果优于 g_{best} 则将其作为群体最优位置, 并重新设置 g_{best} 的索引号;

5) 根据方程 (1)、(2)、(3)、(6) 调整当前微粒的速度、位置和惯性权重;

6) 检查算法是否满足最大迭代次数或者所有微粒均已收敛, 若条件满足终止迭代, 否则返回 2)。

2 PID 控制

PID 控制器分为模拟和数字两种, 前者主要用于连续系统, 后者用于离散系统和采样控制系统。图 1 所示为单位负反馈 PID 控制系统原理图。

PID 控制器是一种线性控制器。图 1 所示系统的偏差信号为

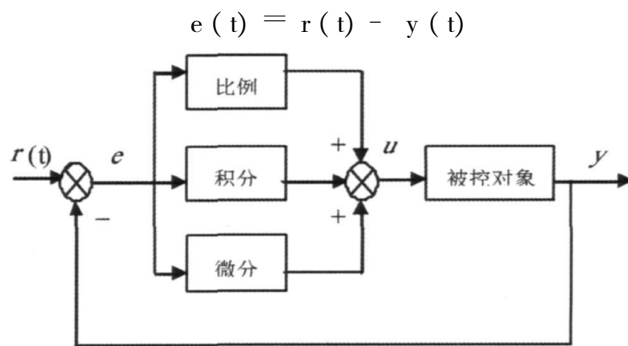


图 1 单位负反馈 PID 控制系统原理图

PID 控制器是将偏差信号 $e(t)$ 进行比例放大 (P)、积分 (I)、微分 (D) 运算后, 再将它们进行线性组合, 构成控制量 $u(t)$, 进而对被控对象进行控制。

PID 控制器的数学描述为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

令 $K_i = \frac{K_p}{T_i}$, $K_p = K_p T_d$, 式 (7) 的传递函数形式可被表述为

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (8)$$

3 仿真实例

本仿真实例是利用 IPSO 算法对工业用的采用 PID 控制器的风机进行控制器参数优化。

3.1 数学模型及仿真模型的建立

式 (9) 为控制对象的数学模型, 在 MATLAB 环境下建立的仿真模型如图 2 所示。

$$G(s) = \frac{400}{s^2 + 50s + 5} \quad (9)$$

3.2 IPSO 算法优化 PD 参数

PID 控制器中需要优化的参数有三个即: K_p 、 K_i 、 K_d , 故 IPSO 算法的维数 D 取 3; 选择种群数 $m = 30$;

最大迭代次数 100 代;初始化 $\omega=1.2$ 调节因子 α 取值 0.98。文献 [6] 依据 ZN 法将 PID 参数整定为: $K_p=0.25$ 、 $K_i=0.01$ 、 $K_d=0.0025$ 。以 ZN 法整定的 K_p 、 K_i 、 K_d 值为中心,对种群初始化。

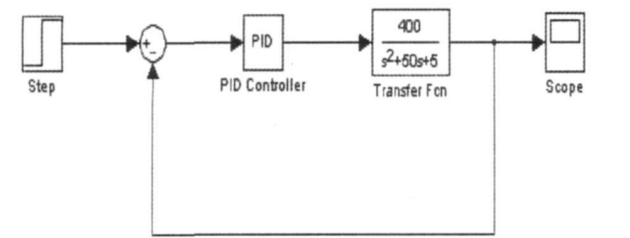


图 2 采用 PD 控制的仿真模型

目标函数采用误差绝对值积分 (IAE)。

$$f(x) = \int_0^\infty |e(t)| dt$$

其中, $e(t)$ 定义为输入信号与输出信号之差。

3.3 仿真实验分析

ZN 法整定的 K_p 、 K_i 、 K_d 值的单位阶跃响应曲线如图 3 所示,可以看出其输出响应是有差的,表明利用 ZN 法整定的 PID 参数并不理想。

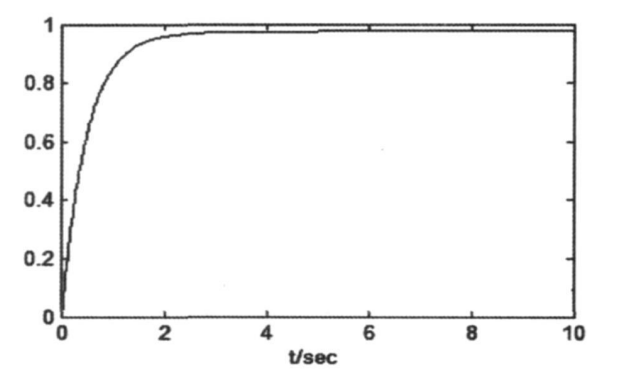


图 3 ZN 法整定参数的 PD 控制响应曲线

为了对比说明,下面的仿真实验采用了三种 PSO 算法,即:惯性权重取恒定值 ($\omega=0.8$) PSO 算法、线性递减惯性权重 PSO 算法 (SPSO 算法) 及所提出的 IPSO 算法。三种 PSO 算法优化后的 K_p 、 K_i 、 K_d 参数值如表 1 所示,优化过程曲线如图 4 所示,优化后控制系统的单位阶跃响应曲线如图 5 所示。

表 1 三种 PSO 算法优化结果

算法	K_p	K_i	K_d
PSO ($\omega=0.7$)	0.271 05	0.029 50	0.014 10
SPSO	0.384 66	0.039 41	0.002 75
IPSO	0.629 72	0.053 11	0.000 13

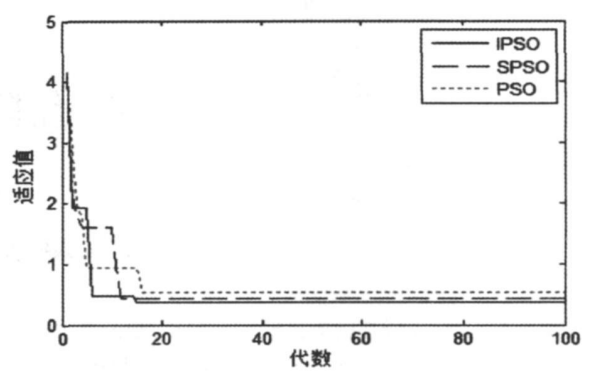


图 4 三种 PSO 算法优化过程

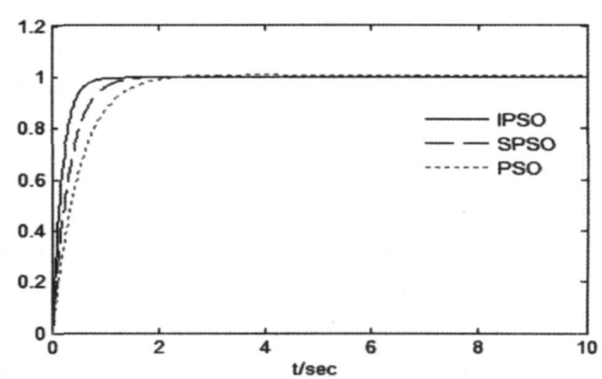


图 5 优化后 PD 控制响应曲线

4 结 论

通过仿真分析可以看出, PSO 算法是一种有效的优化算法。与基本 PSO 算法及 SPSO 算法相比,根据提出的 IPSO 算法,可以更好地优化 PID 控制器参数,使得优化后的控制系统具有更好的控制性能。

参考文献

[1] 段海滨,王道波,黄向华.基于蚁群算法的 PID 参数优化[J].武汉大学学报(工学版),2004,37(5):97—100.

[2] 周凯汀,郑力新.进化算法的 PID 参数最优设计[J].华侨大学学报(自然科学版),2005,26(1):85—88.

[3] 孙建平,闫蕾,李妍.基于改进遗传算法的模糊 PID 控制器设计[J].仪器仪表学报,2006,27(6):1991—1992.

[4] Kennedy J Eberhart R. Particle swarm optimization[A]. Proc IEEE Int Conf on Neural Networks [C]. Perth, 1995. 1942—1948.

[5] 王介生,王金城,王伟.基于粒子群算法的 PID 控制器参

(下转第 91 页)

I_a 、 I_b 、 I_c 为本侧电流, I_{ar} 、 I_{br} 、 I_{cr} 为本侧装置采对侧电流 (实际相序是 BCA)。

根据余玄定理 $I_a - I_{ar}$ 的幅值 (A 相差流) 应为:

$$\sqrt{I_a^2 + I_{ar}^2 - 2I_a I_{ar} \cos 120^\circ} \approx 0.7; \text{BC 两相同理。}$$

故该线路停运后将相序按照 ABC 相序调回后, 差流消失, 该线路恢复正常运行。

5 对其他问题的认识

5.1 危险性应充分考虑

在继电保护装置更换中, 应当考虑到由于继电保护装置接线复杂, 拆除及接入容易出问题, 造成危害。在进行更换前, 必须解决此类事故隐患, 保证更换工作顺利。由于拆除屏箱及重新安装屏箱时, 双母线等主接线保护屏存在启动母线保护失灵, 启动故障录波器、远动信号等, 二次电压短路、二次电流开路也存在十分大的危险性。为保证安全, 在施工中找出更换保护优选法、拆线、测量与被测量接入的方法, 提高了质量与效益。在更换屏的过程中, 应当确保继电保护的可靠性。

5.2 带电更换时优先考虑减少带电操作

在更换保护时, 应当尽量减少带电操作, 这样减少出错的概率。由于本次保护屏的更换, 附件没有空余的地方, 因此不能采用先安装后停电的方案, 在调度负荷转移并停电后进行了操作。在更换时, 在拆除屏前, 首先检验在没有电压的情况下进行, 然后拆除相关连接回路 (失灵、联跳等), 再进行新屏的安装。在安装时, 对于失灵等危险点的部分则可考虑暂不接入, 在投运前接入。

5.3 更换保护屏应注意电缆

为保证质量, 设计要求 $<100\text{m}$ 的电缆, 既屏与屏的联系电缆重新敷设新电缆, 对于长距离的电缆从节约材料、人力出发, 检查结果合格后使用。重新使用的电缆必须符合以下要求:

电缆型号应符合设计。屏蔽线用 4mm^2 的多股铜线安装好。

电缆外观检查无锈蚀、老化, 用钩刀 (做电缆专用工具) 剥开 0.5m 钢铠后检查电缆钢铠、塑料护层、导线芯崭新如故。

对于电缆绝缘电阻对地、相对相之间 $>100\text{M}\Omega$, 即可使用。号头、号牌使用专用微机烫印机。在进行更换过程中, 可采用新旧电缆结合, 节约了人力及物力。

5.4 保护对调

由于南自厂 PSL602U 主保护为光纤转高频保护, 在全川也是第一套新上。在调试过程中应该特别注意其中的一个重要逻辑, 即平时光纤通道正常时主保护为光纤保护, 当光纤通道出现异常时, 主保护应该自动切换到高频保护。

5.5 传动试验

根据调试要求, 通过断路器联动检查回路正确, 信号发出无误。有时发现断路器的回路不正确, 可拆除断路器跳合闸回路的连线, 接上分相操作模拟试验箱, 再带断路器联动, 以减少断路器开合闸次数。在调试时, 还应检验断路器合闸线圈的压降不小于额定值的 90% 。

更换后的保护屏经过 12 个月的运行, 据绵阳电业局继保班的调查核实, 2 套保护屏的继电保护装置动作正确率达 100% , 满足了系统对继电保护装置的基本要求。

(收稿日期: 2009—07—10)

(上接第 31 页)

数自整定 [J]. 控制与决策, 2005, 20(1): 73—77.

[6] 陈卫国. 基于微粒群算法的智能控制系统研究与应用 [C]. 湖南大学硕士学位论文, 2006.

作者简介:

李凌舟 (1973—), 女, 讲师, 研究方向为电力系统及其自动化。

陈利 (1971—), 女, 讲师, 研究方向为电力系统自动化及故障诊断。

(收稿日期: 2009—09—10)

模拟五防系统设计

周慧莹

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:微机五防系统是变电站操作过程中防误闭锁的主要手段。介绍了四川 500 kV 变电站仿真系统中微机五防系统的基本设计思想, 阐述了五防闭锁设计、电脑钥匙、操作票专家系统、操作票预演和设备查找以及五防解锁功能的仿真实现指导原则。重点介绍了仿真变电站推理机的防误流程的设计, 举例演示了推理机的防误功能, 为微机五防在模拟系统中的设计和实现提供了思路。

关键词:微机五防系统; 模拟系统; 500 kV 变电站

Abstract: The computer-based five-proof system are the main means to prevent maloperating in the substation operation. The basic design ideas of the computer-based five-proof system for the simulation system of 500 kV substation are introduced in Sichuan province. The guidelines of the simulation system are described for the design of the computer-based five-proof system: the electronic key, the operating ticket expert system, the preview of operating ticket, the equipment searching and the five-proof unlock function. Another substation simulation focuses on the design of anti-false process of inference engine, and the anti-false function of inference engine is demonstrated by examples, which provides the ideas for the design and realization of computer-based five-proof system in a simulation system.

Key words: computer-based five-proof system; simulation system; 500 kV Substation

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0032-03

"五防"即:防止误分、误合断路器;防止带负荷拉、合隔离开关;防止带电装设接地线;防止带接地线合闸;防止误入带电间隔。变电站微机五防系统是为了防止变电站系统误操作的一种闭锁装置,可打印操作票,同时对所有一次设备实行强制闭锁,满足"五防"要求,是变电站操作过程中防误闭锁的主要手段。四川 500 kV 变电站仿真系统很好地完成了对微机五防系统的模拟,为利用仿真机对变电站运行值班员进行培训提供了一种行之有效的手段。

1 程序设计的基本思想

1.1 概述

按照 500 kV 变电站的工作程序和习惯,变电运行人员的几乎所有操作都离不开五防装置的操作。首先必须在微机防误装置上进行模拟操作,操作完全正确后打印出操作票,并取得操作电脑钥匙后,才能在真实设备上进行操作。同时通过自动化系统和微机五防闭锁系统之间的通讯联系,将允许解锁信号传送到控制后台,运行人员就可以在自动化控制系统中完成电气操作任务。每完成一步电气操作,工控机根

据自动化系统发送上来的断路器、隔离刀闸、接地刀闸的位置信息,对本次操作的电气设备重新进行闭锁,并将下一步电气操作解锁。由此可见五防闭锁装置是运行人员接触最多的设备之一。因此变电站仿真系统对五防闭锁装置进行全仿真,根据"五防"要求和现场设备的状态打印出操作票。运行人员可按照五防闭锁装置已通过的操作票来进行操作。这样既符合现场的操作程序和习惯,也使运行人员感到更加真实从而达到较好的仿真效果。

根据设计研究的总体要求,变电站微机五防系统以珠海优特 UT2000 微机防误闭锁与操作票专家系统为模拟对象。该系统是用于电力系统防误倒闸操作,实现变电站综合自动化的一种新型装置。实现了监控系统、五防闭锁系统和操作系统的统一,具备相当强大的功能。UT2000 微机防误闭锁与操作票专家系统由工控机、电脑钥匙、机械编码锁、电气编码锁等几部分组成,具有技术先进、功能完善、操作简单等优点。其与站内的监控系统和调度局的调度系统有机地结合起来,可以充分利用已有信息。仿真系统通过模拟电脑钥匙采集到的虚遥信,可以使监控系统增加信息量、同时转发服务器使用。它的应用使整个系统

更具灵活性、真实性和可靠性。

1.2 微机五防闭锁设计

四川 500 kV 变电站仿真系统将计算机及网络通信技术应用与微机五防闭锁系统。它通过软件将现场大量的二次闭锁回路变为电脑中的五防闭锁规则库,实现了防误闭锁的数字化,并可以实现以往很难实现的防误功能。以下为部分微机五防闭锁设计条件。

5011 边开关合条件为其两侧隔离开关在合位。
表示为 5011 H; 50111=1 50112=1

5011 边开关拉条件为其两侧隔离开关在合位。
表示为 5011 L; 50111=1 50112=1

50111 隔离开关合条件为母线地刀、开关所属地刀、开关在合位。表示为 50111 H; 5117=0 501117=0 501127=0 5011=0

1.3 电脑钥匙

电脑钥匙是微机五防闭锁系统中重要的组成部分,对其模拟的程度直接关系到整个系统能否正常运行。为此对电脑钥匙以下性能进行了全面仿真。

(1)能按操作票内容开启各种机械编码锁和电气编码锁;

(2)具有验电功能;

(3)具有全字库液晶汉字显示;

(4)按照操作票内容依次进行解锁操作、中止操作、检修操作和非正常跳步操作等功能;

(5)具有操作票浏览、操作追忆等功能。

1.4 操作票专家系统

在整个微机五防闭锁系统中,核心内容是操作票专家系统。操作票专家系统是倒闸操作票的智能处理系统。四川 500 kV 变电站仿真系统实现了图形开票、预存操作票开票、典型票开票、手工输入开票等多种开票方式,该系统能对各种系统方式改变按照规则进行判断、推理。如果运行人员在开操作票时违反了预设的设备操作顺序的逻辑关系,系统会立刻有报警提示,并自动闭锁往后的操作。仿真系统重点模拟了图形开票,在图形开票中可自动或手工插入二次操作和提示性操作,并可根据实际情况对操作票进行修改和整理。操作人员不仅可以看到全站的电气主接线图及一次设备和二次设备,还可以在电气主接线图上改变任何一次、二次设备状态,通过一系列的操作,完成倒闸任务。用户在改变各元器件状态的同时,系统已经自动将各元器件状态的改变转换成操作票的操作项,操作人员无需输入一个字便可使用图形开

票开出一张完整合格的操作票。操作票的自动生成,减少了由于人为因素而产生的误差,增强了倒闸操作直观性和可靠性。

1.5 操作票预演和设备查找功能

根据实际培训的需要,新的操作票系统除了可以严格对现场操作进行监控和限制之外,还首创了操作票预演功能,这一功能加强了操作人员对操作票的熟悉。操作票预演可以读取当前的操作票里面的内容并进行分析,系统会筛选出需要执行的指令,并根据指令的先后顺序进行排列。然后系统会根据指令的先后顺序先找到该操作指令的操作对象所在的位置,用一个箭头标记予以提示,并在其上方将要执行的指令显示出来,用户可以一目了然地了解到要执行的指令。待提示完毕后,系统将根据指令对操作对象执行相应的操作,比如开关的分/合操作等。操作成功后,系统将发出蜂鸣声提示操作成功,设备状态也进行相应的变化。整个操作票的预演跟在现场操作完全相同,能够真实地预演出来,使操作人员更直观地了解将要执行的操作,有效提升了培训效果。

为了能让操作人员在短时间内尽快熟悉仿真系统,新设计的五防操作票系统还添加了设备查找功能。设备查找可以方便地根据设备的名称进行设备的模糊查询,在确定设备名称后系统会自动定位,并提示该设备具体所在的位置。

1.6 五防解锁

"五防"闭锁装置在教学培训中也有一些局限性,例如:培训人员进行故障培训和对学员进行考核时,由于五防装置的闭锁作用就不容易出现误操作,也就无法对他们进行某些故障培训和考试,无法真正对受训人员的操作能力进行了解和使之进一步提高。为此仿真系统增加了五防闭锁解除功能,让他们能随意操作并对其每一步操作进行记录,然后再根据其操作步骤进行评价和总结。在进行操作训练时,其误操作造成的损害和现象可以通过多媒体画面的声光效果生动地表现出来,让受训人员能深刻感受到错误操作对变电站的严重危害性,从而提高受训人员工作责任心和提高反事故能力。

2 专家系统推理机设计

2.1 推理机的防误流程

仿真变电站在图形开票中,设备的操作规则被分

成一次设备操作规则和二次设备操作规则两个部分,因而相应的推理也分成两个层次:先推出一次设备的操作项,再把二次设备操作项(包括检查验电等项)插入到一次设备的操作序列中。由于采用了逻辑表示一次设备操作规则,因而一次设备的推理转化成基于逻辑控制的从初始状态到目标状态的状态空间转移。初始状态就是系统的当前状态,目标状态由操作任务指定。一张完整的操作票的生成过程就是上述一、二次设备推理的交叉、组合的过程。

电气设备的操作主要涉及三个方面的内容:一是状态变化,单元设备由运行→热备用→冷备用→检修这四类状态自身的变化(设定运行为最高状态等级,检修为最低状态等级);二是保护的定值及状态变化;三是合、解环的操作,主要目的是转移当前的负荷,引发设备的自身状态变化。不考虑设备本身性能与设备的特定规定,对电气设备的操作应遵守以下 4 类规则。

1)电压等级控制规则:一般情况下,设备单元状态变化由最高等级向最低等级状态变化时,低电压等级设备状态优先变化;逆向时,高电压等级设备状态优先变化,形成按电压等级控制的操作票编辑制度。

2)设备状态控制规则:由高状态等级向同电压等级的低状态等级转化的单元设备,应按运行→热备用→冷备用→检修顺序依次进行,设备单元状态不能突变。

3)设备当时状态控制规则:主要是根据当时设备的状态决定保护状态与定值在何时改变。也就是说,一次状态变化将控制二次状态变化,即电力系统常说的“二次跟着一次走”。

4)最佳路径控制选择控制规则:无状态变化的设备单元称为路径,有状态变化的设备称为路标。对于单元设备,路标的状态变化决定路径的最佳选择,引发合、解环的操作过程。路标的状态变化由给定的最终运行方式导出。

仿真变电站推理机常用的网络操作规则如下。

1)停电规则:一般线路停电时,先断掉开关,然后拉开负荷侧刀闸,再拉开电源侧刀闸,最后合上地刀及装设接地线等其他的安全措施。

2)送电规则:与停电规则相反,首先拆除所有地线和其他安全措施,拉开接地刀闸,再合上电源侧刀闸,再合上负荷侧刀闸,最后才合上开关。

3)倒负荷规则:热倒负荷先合电源侧一把刀闸合环,后拉电源侧另一把刀闸解环;冷倒负荷先拉负

荷侧刀闸,后合电源侧刀闸送电。

以下为仿真变电站推理机的防误流程图。

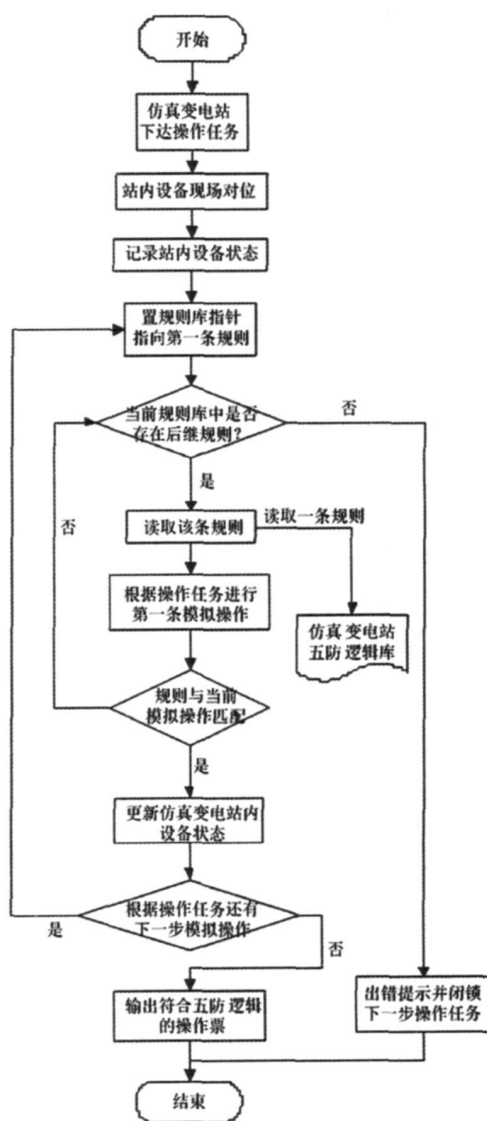


图 1 仿真变电站推理机的防误流程图

2.2 仿真实例

仿真变电站的图形开票在一次模拟过程中, 5011 开关带电运行的情况下, 误合 501117 接地刀闸, 系统发出警告, 闭锁下一步模拟操作, 并给出错误的相关提示。

3 结束语

目前四川已经建好的 500 kV 综合自动化站有德阳潭家湾 500 kV 站、华阳尖山 500 kV 站、南充 500 kV 站、眉山东坡 500 kV 站等。变电站综合自动化已是大势所趋, 微机五防系统如何与之相适应显得非常重要。四川 500 kV 综合自动化变电站仿真系统对微

(下转第 49 页)

4 结 论

利用该方法进行故障诊断,不但可以克服 BP 网络的缺点,又能利用 BP 网络获得 D-S 证据理论的基本概率赋值,解决了 D-S 证据理论难以获得基本概率赋值的弊端。使用 D-S 证据理论合成法则进行信度合成,可以提高局部诊断网络的诊断能力,提高了诊断准确度,降低了诊断的不确定性。通过变压器故障诊断实验证明,神经网络与 D-S 证据理论相结合的融合诊断算法能够提高诊断精度,并能满足复杂系统实时诊断的要求。

参考文献

[1] 靳蕃等. 神经网络与神经计算机 [M]. 成都:西南交通大学出版社, 1991.

[2] 史忠植. 神经计算 [M]. 电子工业出版社, 1993.

[3] 焦李成. 神经网络理论 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1990.

[4] 夏虹. 基于数据融合技术的设备故障诊断方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学博士论文, 2000.

[5] 臧宏志. 基于信息融合的大型电力变压器故障诊断 [D]. 山东大学硕士论文, 2002.

[6] 张兆礼. 神经网络数据融合算法研究 [D]. 哈尔滨工业大学博士论文, 2001.

[7] 吴艳. 多传感器数据融合算法研究 [D]. 西安电子科技大学博士论文, 2003.

[8] 刘宜平, 沈毅. 一种基于多级信息融合技术的系统故障诊断方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(12): 97—100.

(收稿日期: 2009—07—22)

(上接第 34 页)

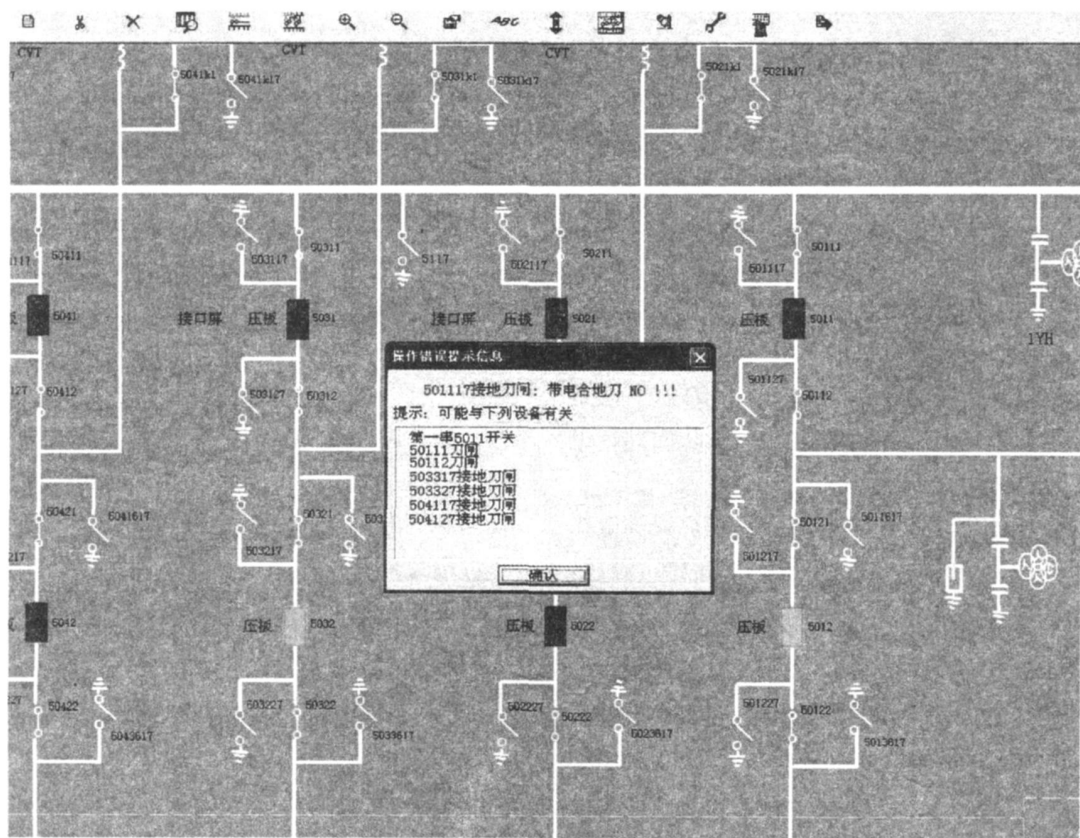


图 2 仿真变电站防误演示

机五防进行了全面的模拟,其在电力数学模型、五防等方面的创造性贡献已为变电运行人员的培训迈上新台阶提供了可靠的技术支持和保障。

参考文献

[1] 防止电力生产重大事故的二十五项重点要求 [M]. 北

京:中国电力出版社, 2000.

[2] DL/T 687—1999. 微机型防止电气误操作装置通用技术条件 [S].

[3] 游景玉主编. 仿真控制论文集 [M]. 珠海出版社, 1999.

(收稿日期: 2009—07—10)

含有 SMES 电力系统次同步谐振的抑制研究

秦浩庭¹, 刘 燕², 徐根厚¹, 张永祥¹

(1 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

摘 要:随着中国社会主义市场经济日趋深化, 国民经济日益迅速的发展, 用电负荷迅速增长, 电网的输送容量也在不断地增大, 输电距离不断加长。在这样的发展背景下串联补偿作为提高线路输电能力的手段在电网规划中越来越受到关注, 但是在超高压远距离输电系统中采用串联电容补偿后, 在某种运行方式或补偿度的情况下, 会发生电力系统的次同步谐振 (SSR) 现象。柔性交流输电技术在电力系统中有广阔的应用前景, 是近年来电力系统研究的前沿课题之一。而超导磁储能系统 (SMES) 是 FACTS 家族的新型重要成员, 是储能补偿装置的代表。采用扫频—复转矩法分析系统的次同步谐振, 摒弃传统的 PID 控制策略, 设计多目标控制算法实现对 SMES 装置的系统级控制, 使其在进行无功补偿的同时可以阻尼电力系统次同步谐振现象, 这既有理论又有现实意义。

关键词:次同步谐振; 超导磁储能; 柔性交流输电技术

Abstract: With the deep development of socialistic market economy in China and the rapid development of the national economy, the customers' load is growing rapidly, the transmitting capacity of power grid is also increasing continuously and the transmission distance is continually lengthened. Under such background, more and more attention is paid to the series capacitor compensation, which is an important measure to improve the transmission capacity of transmission lines. But after the series capacitor compensation is used in the extra-high voltage long-distance transmission system, sub-synchronous resonance (SSR) will occur in a certain operation mode or compensation degree. Flexible AC transmission system (FACTS) will be widely used in power system, and it is one of the advanced subject of power system in recent years. And the superconducting magnetic energy storage (SMES) is the important elements of FACTS family. The SSR adopts the analyzing system of frequency scanning—complex torque coefficient, abandons the traditional PID control strategy, and designs the multi-objective control algorithm to realize the system-level control of SMES. It can damp the SSR of power system during its reactive power compensation, which has not only the theoretic meaning but the practical value as well.

Key words: sub-synchronous resonance (SSR); superconducting magnetic energy storage (SMES); flexible AC transmission system (FACTS)

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0035-04

0 引 言

电力系统次同步谐振^[1] (sub-synchronous resonance SSR) 是由于电力系统中串联入电容补偿的输电系统时, 处于平衡状态下的系统受到扰动后, 电力网络与汽轮发电机组之间可能以系统的一个或数个低于同步频率的自然频率交换数量相当可观的能量, 而产生的一种危害性极大的现象。在次同步谐振状态下, 发电机内会产生次同步的旋转磁场, 它与旋转磁场相互作用, 产生差频振荡转矩, 有可能在机械与电气系统之间发生谐振, 损坏发电机的轴系统。迄今

为止, 已有许多 SSR 抑制措施相继提出, 其中以 FACTS 原件^[2,3] 尤其引起大家的重视。目前在次同步抑制方面研究最多的 FACTS 元件是串联电容补偿器 (TSCS)^[4], 下面以 IEEE 次同步谐振第二标准测试系统, 介绍了一种新的引入超导磁储能装置 (superconducting magnetic energy storage SMES) 进行无功补偿并且同时抑制次同步谐振的方法。

SMES^[5] 是一种新型的 FACTS 装置, 是一种高效、快速的储能装置, 在电力系统中具有广泛的应用。它利用超导线制成的线圈将交流电网供电励磁所产生的磁场能量储存起来, 在需要时再将储存的磁场能量送回交流电网或用作它用。

1 系统模型

1.1 待研究系统模型

这里研究的系统为如图 1 所示的 IEEE 第一标准模型,即机械系统轴系由 6 个转子串联而成。它们依次为汽轮机的高压段 (HP)、中压段 (IP)、低压段 A (LPA)、低压段 B (LPB)、发电机 (GEN) 和励磁机 (EXC)。电气系统包括发电机、变压器、输电线路、固定串补电容、SMES 和无限大系统。

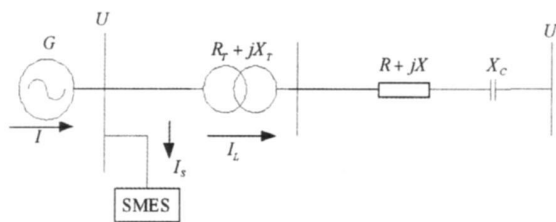


图 1 待研究系统模型

1.2 超导磁储能装置

SMES 装置的基本结构如图 2 所示。由于超导储能线圈是 DC 或准 DC 装置,而其充放电通常又是通过 AC 电网来完成的,因此,就需要一种称为功率调节系统 (power conditioning system, PCS) 的装置来连接 DC 超导线圈和 AC 电网。这里的采用电压源型 PCS 其主要由电压源型变换器和 DC/DC 斩波器构成,如图 2 所示。

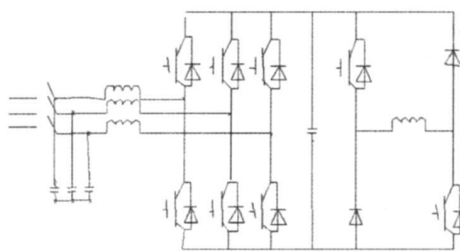


图 2 电压源型 PCS 原理图

配合图 2 中 PCS 的 DC/DC 斩波器对超导线圈电流的斩波,同时调节电压源变换器对 AC 电网输出电压的幅值和相位,就可以实现四象限控制 SMES 装置与 AC 电网之间的有功功率和无功率交换。

2 控制设计

设系统为三相基波正序系统,电压有效值为 V_s ,其领先 V_{SMES} 相角为 δ 通过分析可以得到,若保持脉宽 θ 不变只调整相位角 δ 则即可改变 SMES 向系统

输入的无功功率,同时电容器电压也将随之改变。

目前 SSR 分析通常采用频域分析法和时域分析法两大类^[6~9]。通过分析 SSR 系统的线性化模型可以发现,机械部分和电气部分的线性化方程之间,除了通过发电机转子的角度关系式 $\Delta \delta = \Delta \delta_s$ 和电磁转矩的关系式 $\Delta T_e = -\Delta T_s$ (质量块 5 为发电机转子, $\Delta \delta_s$ 、 ΔT_s 为发电机的转子角度与发电机的电磁转矩) (符号说明) 相互联系外,其他变量之间并无直接联系。再考虑到次同步谐振频率与轴系的自然扭振频率互补,将采用扫频—复转矩^[10,11]系数辨别法来分析和阻尼次同步谐振。该方法是 Canay 于 1982 年提出的一种用于电力系统次同步谐振的分析方法,其基本思想是:令 $\Delta \delta$ 在轴系自然扭振频率附近作等幅振荡,分别求出机械部分和电气部分的转矩对这一振荡的响应,通过在次同步频率范围内对机械和电气复转矩系数进行扫描,根据使得机械和电气弹性系数之和为零的频率下机械和电气阻尼之和的正负来判别 $\Delta \delta$ 的振荡是否被阻尼,从而判别系统是否会发生次同步谐振。而且根据扫频—复转矩系数判别法的思想,可以得知只要通过采取适当措施以改变全系统的电气复转矩系数中的电气阻尼系数,使得电气阻尼系数和系统中的机械阻尼系数之和大于零,就可以实现对电力系统次同步谐振的阻尼。

为了使 SMES 具有更好的稳定性和灵活性,采用模糊控制策略通过改变 SMES 的控制角 δ_{SMES} 来实现抑制电力系统次同步谐振的目的。通过分析便可以知道要增大发电机的阻尼必须产生一个类似于 $D \frac{d\Delta \delta_s}{dt}$ 的项,设原动机输出功率 P_m 不变,那么只有改变发电机电磁功率 P_e , 因为 $\Delta P_e \propto \Delta I_{SMES} \propto \int \delta_{SMES} dt$ 因此要 $\Delta P_e \propto \frac{d\Delta \delta_s}{dt}$ 则有 $\delta_{SMES} \propto \Delta \dot{w}$, 所以 SMES 的控制角 δ_{SMES} 中加入与 $\Delta \dot{w}$ 成正比的项才能增大系统的阻尼,抑制次同步谐振。

3 控制策略

将 SMES 等效地看成一个相角和幅值均可变的电流源,根据 SMES 并联输出电流的可控性,在 dq 坐标下,可以设计 SMES 并联输出的电流 I_s 与发电机定子电流之间满足以下关系。

$$\begin{cases} i_d = k_i i_{d0} \\ i_q = k_q i_{q0} \end{cases} \quad (1)$$

其中, i_{d0} 、 i_{q0} 为 I_s 的 dq 分量; k_i 、 k_q 是控制因子, 通过控制 k_i 、 k_q 就可以改变 i_d 、 i_q , 从而控制 I_s 的幅值和相角。

对式 (1) 线性化, 并进行拉普拉斯变换为

$$\begin{cases} \Delta i_d = \Delta k_i i_{d0} \\ \Delta i_q = \Delta k_q i_{q0} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta i_d = \Delta i_{d0} - \Delta k_i i_{d0} \\ \Delta i_q = \Delta i_{q0} - \Delta k_q i_{q0} \end{cases} \quad (3)$$

对图 1 中的带串联电容补偿的电力系统, 对外电路方程进行 dq 坐标变换及其线性化, 可得

$$\begin{cases} \Delta u_d - \Delta u_{cd} = (R_L + pX_L) \Delta i_d - X_L \Delta i_q - X_L i_{q0} \Delta \omega \\ \Delta u_q - \Delta u_{cq} = (R_L + pX_L) \Delta i_q - X_L \Delta i_d - X_L i_{d0} \Delta \omega \end{cases} \quad (4)$$

其中, $R_L = R_T + R$, $X_L = X_T + X_c$ 。

对串联电容进行进一步计算, 可得

$$p(u_c - u_s) = X_c i \quad (5)$$

对式 (5), 同样可以进行 dq 变换并线性化, 然后再与线性化后的同步发电机运算电抗形式的磁链方程、电压方程一起代入式 (4), 消去中间变量可得

$$\begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} = Z^{-1} \left(A \Delta \delta + B \begin{bmatrix} \Delta k_i i_{d0} \\ \Delta k_q i_{q0} \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

$$\text{其中, } Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}。$$

各矩阵元素的定义为

$$Z_{11} = X_L p^2 + (R_L + R_a) p - X_L + X_c + (p^2 - 1) X_d(p)$$

$$Z_{12} = -2X_L p - (R_L + R_a) - 2pX_q(p)$$

$$Z_{21} = 2X_L p + (R_L + R_a) + 2pX_d(p)$$

$$Z_{22} = X_L p^2 + (R_L + R_a) p - X_L + X_c + (p^2 - 1) X_q(p)$$

$$A_1 = (X_L i_{q0} - \Phi_{q0}) p^2 + (X_L i_{q0} - u_{cq0} - \Phi_{q0}) p - u_{sd0}$$

$$A_2 = (-X_L i_{d0} + \Phi_{d0}) p^2 + (X_L i_{d0} + u_{cd0} - \Phi_{d0}) p - u_{sq0}$$

$$B_{11} = B_{22} = X_L p^2 + R_L p - X_L + X_c$$

$$B_{21} = -B_{12} = 2X_L p + R_L$$

且对于电磁力矩方程进行线性化处理得

$$\Delta T_e = \Phi_{d0} \Delta i_q + i_{q0} \Delta \Phi_d - \Phi_{q0} \Delta i_d - i_{d0} \Delta \Phi_q \quad (7)$$

忽略励磁电压的变化, 将运算电抗形式的磁链方程线性化后代入上式, 可得

$$\Delta T_e = (-i_{q0} X_d(p) - \Phi_{q0}) \Delta i_d + (i_{d0} X_q(p) + \Phi_{d0}) \Delta i_q \quad (8)$$

可以看出, 在含有 SMES 的系统中, 外电路的电流增量 Δi_d 、 Δi_q 均是 $\Delta \delta$ 和控制因子 Δk_i 、 Δk_q 的函数, 因此可以通过控制 Δk_i 、 Δk_q 来控制电流增量

Δi_d 、 Δi_q , 从而使全系统的电气和机械阻尼系数之和大于零, 达到阻尼 SSR 的目的, 控制框图见图 3。

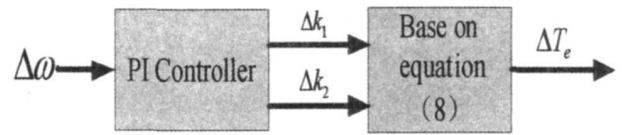


图 3 SEMS 控制策略框图

4 MATLAB/SMULINK 仿真

这里研究的 IEEE SSR 第二标准测试系统, 所用的超导磁储能系统 (SMES) 主电路采用电压源型 PCS 的模型结构。

通过仿真实验可以得到, 当系统采用 55% 串联电容补偿时, 发生次同步谐振, 原动机低压段 A 与低压段 B 轴系间的扭矩 T_3 以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩 T_2 如图 4 所示。

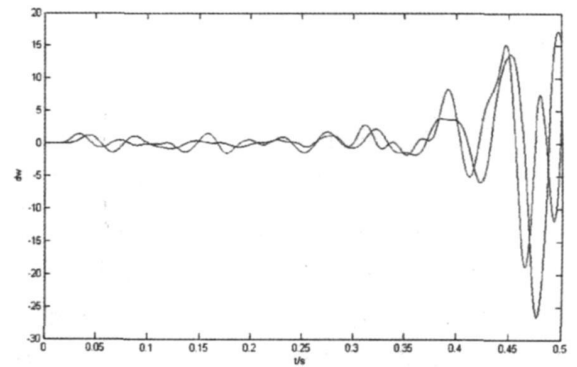


图 4 无 SEMS 低压缸 A 和低压缸 B 之间的扭矩 (P.U)

由图 4 可以看出轴系之间的扭矩较大, 且有发散振荡迹象, 说明此时发电机发生了次同步谐振现象, 这正是采用古典串补而引发的问题。

而当系统采用 SMES 方案时系统原动机轴系间的扭矩 T_2 、 T_3 如图 5 所示。

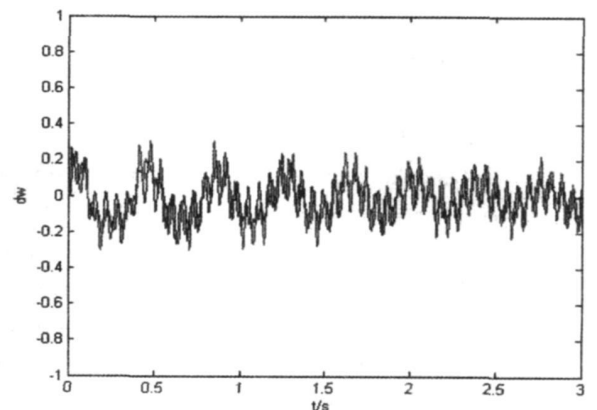


图 5 有 SEMS 低压缸 A 和低压缸 B 之间的扭矩 (P.U)

可以清楚地看到,原动机低压段 A 与低压段 B 轴系间的扭矩 T_3 以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩 T_2 比采用固定串补的情况下明显地减小,并使其振荡波形趋于平缓,这说明系统采用了 SMES 方案后,次同步谐振现象得到了很好的抑制。而且可以同时得到输电线路相电压的标幺值,如图 6 所示。

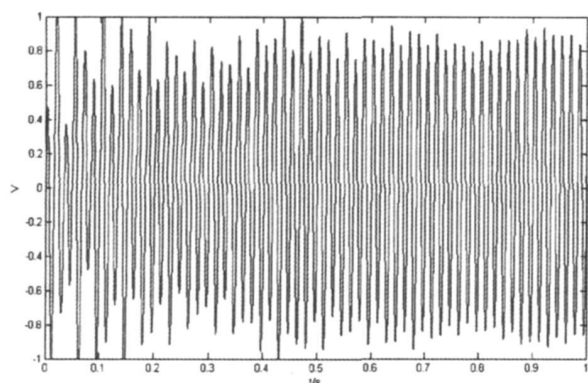


图 6 系统 A 相电压 (P.U.)

5 结 论

通过以上算例的仿真分析,可以看出采用 SMES 方案进行电力系统的无功补偿,既可以稳定电力系统的电压,提高电压的峰值,而且还可以对电力系统发电机轴系之间的扭振现象有很好的抑制作用,阻尼次同步谐振现象的产生。对于不同的运行工况和需要解决的问题,SEMS 方案的控制策略可以根据需要作一些变化。

综上所述,应用 SEMS 方案,进行电力系统的无功补偿以及次同步谐振的阻尼具有极高的经济实用价值。

参考文献

- [1] 钟胜. 与超高压输电线路加串补装置有关的系统问题及其解决方案 [J]. 电网技术, 2004, 28(6): 26—29.
- [2] 赵贺. 电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] 何大愚. 柔性交流输电的定义、机遇及局限性 [J]. 电网技术, 1996, (20): 18—24.
- [4] 曹路, 陈衍. 可控串联补偿抑制次同步谐振的机理 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 25—30.
- [5] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] 张文涛. 次同步谐振问题及防止措施 [J]. 电网技术, 1989, (2): 59—65.
- [7] IEEE Committee Report. Countermeasures to Sub-synchronous Resonance Problems, IEEE Trans on PAS, 1980, 99(5): 1810—1817.
- [8] R. G. Farmer, A. L. Svchwalb, E. kvate Navajo project report on Sub-synchronous Resonance Analysis and Solutions, IEEE Trans on PAS, 1977, 1266—1232.
- [9] R. F. Wolff. Stop Sub-synchronous T/G—Shaft Damage, Electrical World, 1981, 129—133.
- [10] 李岩松. 基于同意潮流控制器的阻尼次同步谐振的研究 [M]. 北京: 华北电力大学, 2000.
- [11] Xing K, Kusio G. L. Damping subsynchronous resonance by phase shifters, IEEE Trans on Energy Conversion, 1989, 4(3): 344—350.

作者简介:

秦浩庭 (1981—), 男, 西南交通大学在读硕士。

(收稿日期: 2009—05—15)

(上接第 4 页)

- [3] 任震, 黄雯莹, 冉立. 高压直流输电系统可靠性评估 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [4] 陈永进, 任震. 模型组合及其在直流输电系统可靠性评估中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(13): 18—22.
- [5] Kunuganty S. HVDC Transmission System Models for Power System Reliability Evaluation [C]. IEEE WESCANEX '95 Conference proceedings Wescanex 1995, 5: 501—507.
- [6] Billinton R, Aboreshaid S. A Hybrid Deterministic/Probabilistic Technique for HVDC System Reliability Evaluation [A]. 1997 Conference on Communications Power and Computing [C]. WESCANEX'97 Proceedings Winnipeg MB, 1997, 5: 35—40.
- [7] Billinton R, Fotuhi-Firuzabad M, Faried S O. Reliability

Evaluation of Hybrid Multi-terminal HVDC Substation Systems [J]. IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 571—577.

- [8] 刘海涛, 程林, 孙元章. 交直流系统可靠性评估 [J]. 电网技术, 2004, 28(23): 27—31.
- [9] 张静伟, 任震, 黄雯莹. 直流输电系统可靠性故障树评估模型及应用 [J]. 电力系统自动化, 2005, 25(6): 62—65.
- [10] 金星, 洪延姬. 工程系统可靠性数值计算方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

作者简介:

谢开贵 (1972—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电力系统规划与可靠性、电力系统优化运行、电力系统并行计算及电力市场等方向的研究和教学工作。

(收稿日期: 2009—07—09)

10 kV 配电线路防雷措施研究与应用

黄兰英¹, 吴广宁², 曹晓斌², 马御棠²

(1. 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘 要:介绍了 10 kV 配电线路雷击过电压的形式及其危害, 对防雷措施进行分析研究, 并将研究结果应用到实际配电线路中, 给出了提高线路防雷水平的措施。

关键词:配电线路; 雷击过电压; 防雷措施; 防雷水平

Abstract: The form of lightning-stroke overvoltage of 10 kV distribution line and its harms are introduced. The protection measures against lightning are studied and analyzed, and the research results are applied to the actual distribution line. The measures to improve protection level against lightning are given.

Key words: distribution line; lightning-stroke overvoltage; protection measures against lightning; protection level against lightning

中图分类号: TM866 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0039-03

据电网故障分类统计表明, 在配电线路运行的总跳闸次数中, 由于雷击引起的跳闸次数约占总跳闸次数的 70%~80%^[1], 尤其在多雷、土壤电阻率高、地形复杂、档距大的地区, 雷击配电线路引起的故障率更高。10 kV 配电线路是配电网的重要组成部分, 其分布广、绝缘水平低, 连接着变电站和众多用户, 在雷雨季节, 经常因雷害事故导致配电设备和用户设备的损坏, 造成大面积停电, 严重的情况下甚至造成人员伤亡, 给工农业生产带来损失。研究 10 kV 配电线路防雷措施, 提高线路耐雷水平, 降低雷击跳闸率, 减少配电设备雷击损坏率, 确保配电网的安全可靠运行。

1 10 kV 配电线路雷击过电压形式

1.1 直击雷过电压

直击雷过电压是雷云击中杆塔、电力装置等物体时, 强大的雷电流流过该物体泄入大地, 在该物体上产生的很高的电压降。

1.2 感应雷过电压

感应雷过电压是雷电击线路附近的大地时, 在导线上由于电磁感应产生的过电压。感应雷过电压由静电分量和电磁分量构成。静电分量是由先导通道中雷电荷所产生的静电场突然消失而引起的感应电压, 其值可以达到很高。电磁分量是由先导通道中雷电流所产生的磁场变化所引起的感应电压。由于主

放电通道是和导线相互垂直的, 所以两者间的互感不大, 即电磁感应不大, 因此电磁分量要比静电分量小得多。在感应雷过电压幅值的构成上, 静电分量起主要作用。

研究表明, 10 kV 架空配电线路由雷击引起线路闪络或故障的主要因素不是直击雷过电压而是感应雷过电压, 配电线路遭受直接雷过电压的概率很小, 约占雷害事故的 20%, 感应雷过电压导致的故障比例超过 80%。因此 10 kV 配电线路的防雷研究主要针对感应雷过电压。

2 感应雷过电压的危害

绝大多数 10 kV 线路为 1~2 片绝缘子, 由于绝缘水平低, 感应雷过电压易导致绝缘子闪络。感应雷过电压同时存在于三相导线, 相间不存在电位差, 故只能引起对地闪络。目前中国配电网大多采用中性点不直接接地方式, 其优点是发生单相接地故障后, 允许继续运行 0.5~2 h 不致于引起用户断电, 提高了供电可靠性, 但随着配电网的扩大, 电缆和架空线路的增多, 这种方式显示出弊端。当配电网发单相接地故障后, 接地电弧不能自行熄灭必然发展成相间短路, 造成用户停电和设备损坏事故; 当发生断续性弧光接地时, 会引起较高的弧光过电压, 一般为 3.5 倍相电压甚至更高, 波及到整个配电网致使绝缘薄弱的

设备放电击穿,引起设备损坏和停电事故,还可能引发火灾和爆炸事故。感应雷过电压沿配电线路侵入变电所(站)或配电室内,侵入波过电压易造成设备和人员遭受雷击,若窜入低压系统,将威胁广大的低压用电设备和人员。

3 感应雷过电压的计算

由于静电分量是架空线路感应雷过电压防护的主要影响因素,因此在感应雷过电压计算中,应以静电感应电压的计算为主。在过电压计算中可假设:(1)先导通道中的电荷均匀分布;(2)空间电场由先导电荷形成;(3)先导通道中的电荷在主放电时是全部瞬时被中和,主放电通道是垂直向上,不考虑分支。

图 1 是应用电磁场分析计算感应雷过电压示意图。设雷击点 O 距架空线正下方地 C 点的水平距离为 S 导线离地高度为 h_d 。

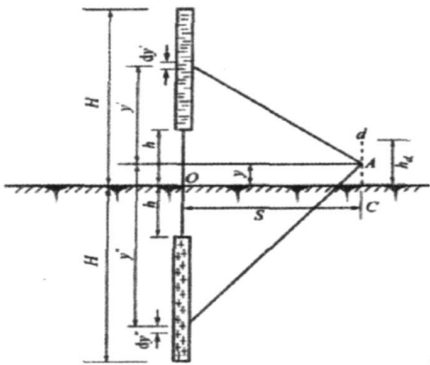


图 1 电磁场分析感应雷过电压示意图

通过电磁分析可得^[2],线路感应雷过电压为

$$U_g = 25 I_{in} \ln \left[\frac{h_d}{S} + \sqrt{1 + \left[\frac{h_d}{S} \right]^2} \right] \tag{1}$$

上面计算的是杆塔正对雷电处导线上的感应雷过电压。导线上距离杆塔中心点为 x 处的过电压与中心点的感应雷过电压的计算方法相同,只需将式(1)中的 S 换为 $\sqrt{S^2 + x^2}$ ^[3],即

$$U_g = 25 I_{in} \ln \left[\frac{h_d}{\sqrt{S^2 + x^2}} + \sqrt{1 + \left[\frac{h_d}{\sqrt{S^2 + x^2}} \right]^2} \right] \tag{2}$$

对于导线平均高度为 10 m 的配电架空线路,若雷击点距离此线路 50 m,雷电流幅值为 100 kA,无任何保护措施时,感应雷过电压的最大值约为 500 kV^[2]。由于 10 kV 配电线路的绝缘水平较低,在如此高的过电压下,极易发生绝缘击穿、闪络、断线等事

故。因此,必须采取有效措施来抑制感应雷过电压,确保配电网的安全运行。

4 引起线路闪络的雷电流与雷击点的关系

设线路杆塔高度为 15 m,线路对地平均高度 $h_d = 11$ m,根据规程,在 $2h_d = 22$ m 宽范围内的落雷均被视为直击雷。当感应雷过电压 U_g 超过线路绝缘子 50% 放电电压,即 $U_g \geq U_{50\%}$ 时,绝缘子将发生闪络,根据式(2),引起线路闪络的雷电流应满足

$$I_{in} \geq \frac{U_{50\%}}{25 \ln \left[\frac{h_d}{\sqrt{S^2 + x^2}} + \sqrt{1 + \left[\frac{h_d}{\sqrt{S^2 + x^2}} \right]^2} \right]} \tag{3}$$

当线路采用 S-210/Z 瓷横担,其 50% 放电电压 $U_{50\%} = 210$ kV,则在导线高度一定的情况下,最小闪络电流 I_{in} (简称闪络电流) 为

$$I_{in} = \frac{8.4}{\ln \left[\frac{11}{\sqrt{S^2 + x^2}} + \sqrt{1 + \left[\frac{11}{\sqrt{S^2 + x^2}} \right]^2} \right]} \tag{4}$$

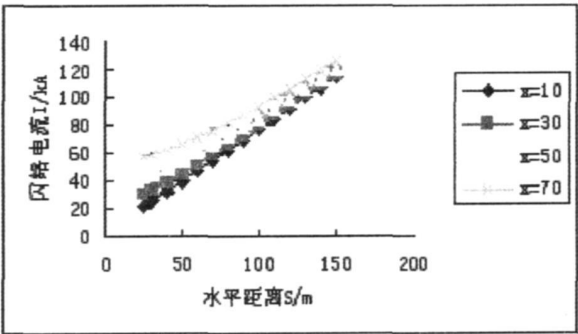


图 2 闪络电流与击距 S 的关系图

闪络电流与 S 及 x 的关系曲线如图 2 所示。可见,当 x 一定时,随着 S 的增大,引起线路闪络的雷电流幅值增大。当 S 一定时,随着 x 的增大,线路发生闪络的雷电流幅值增大。即雷击点越远,击距 $\sqrt{S^2 + x^2}$ 越大,引起线路闪络的雷电流幅值越大。

由于式(4)中 S 和 x 的对称性,闪络电流仅与雷击点与杆塔中心的相对距离有关,与雷击点的具体位置无关。

5 10 kV 配电线路防雷措施研究

5.1 线路防雷水平与电杆高度关系

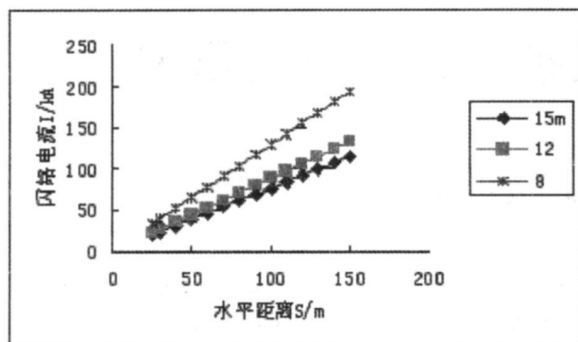


图 3 闪络电流与电杆高度关系图

当线路采用不同高度的电杆时,线路的防雷水平见图 3 所示。可见,电杆高度越高,同样的击距下,闪络电流将越小。因此要提高线路的防雷性能,在满足电网安全运行的条件下,应尽量选择高度小些的电杆。

5.2 线路防雷水平与线路绝缘水平的关系

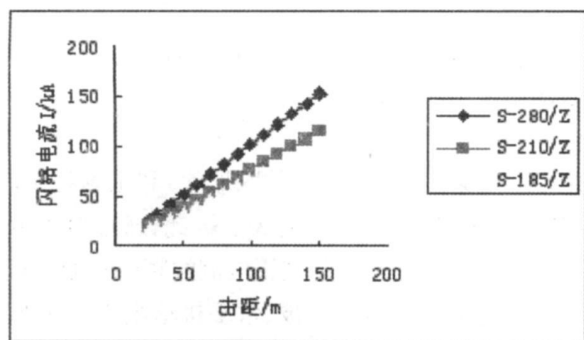


图 4 闪络电流与绝缘水平关系图

当线路分别采用不同等级的绝缘子 S-280/Z、S-210/Z、S-185/Z 时,线路的防雷水平见图 4 所示。可见,线路绝缘水平越低,同样的击距下,闪络电流越小。因此,要提高线路的防雷水平,应加强线路的绝缘水平。

5.3 避雷器的作用

在配电线路上安装避雷器来防护雷电过电压是世界各国广为采用的一种方法。线路安装避雷器后,当雷击杆塔,雷电流产生分流,一部分雷电流通过杆塔流入大地,当雷电流超过一定值后,避雷器加入分流,大部分雷电流通过避雷器流入导线,传播到相邻杆塔。若线路遭受感应雷过电压,雷电流沿线路向导线两侧传播,当雷电流超过一定值后,线路避雷器加入分流,大部分雷电流通过避雷器流入大地。线路避雷器与绝缘子并联,具有良好的钳位作用,避雷器的

残压低于绝缘子串 50% 放电电压,即使雷击电流增大,避雷器的残压仅稍有增加,绝缘子仍不致发生闪络。这也是线路避雷器防雷的重要特点。雷电流过后,流过避雷器的工频续流仅为微安级,流过避雷器的工频续流在第一次过零时熄灭,线路断路器不会跳闸,系统恢复到正常状态。

6 提高 10 kV 东城线防雷水平的措施

6.1 东城线基本参数

东城线为东广供电所的一条重要供电线路,接线方式为放射式。该线路从 957 号 110 kV 东管变电站出线,在第 1 基直线杆分为伏龙线和东城线,于 14 号杆处 T 接石夹支线,东城线采用 LJ-70 导线,总长 5.06 km,所经路段为平坝地区,共 48 基杆,其中转角杆和耐张杆 3 基,为 3 号、6 号和 16 号杆,直线杆 45 基,除 11 号杆因跨 106 公路而采用 15 m 杆外,其余杆均为 12 m,跨距较大,全线采用 S-210/Z 瓷横担。该线路 6 号杆上安装柱上油开关 1 组、线路氧化锌避雷器 6 只,23 号杆处 110 kV 线路跨越该线路,安装氧化锌避雷器 3 只,4 号杆和 7 号杆处该线路跨越 220 V 线路。

6.2 东城线遭受雷击情况

2007 年 8 月 22 日,东城线黄峰 8 组支线 10 kV 高压跌落式开关被雷击损坏,望苏 9 组支线配电室遭受雷击,空气开关损坏。2007 年 8 月 24 日,东城线 11 号杆和 12 号杆之间的线路被雷击断,东城线东馆 4 组支线 50 kVA 配电变压器被雷击坏。2008 年 8 月 11 日,石夹支线 4 号杆与 5 号杆之间导线被雷击断。

6.3 提高 10 kV 东城线防雷水平的措施

10 kV 配电线路一般采用 8 m 或 9 m 杆,东城线使用的电杆较高,能引起线路闪络的最小雷电流仅为 19 kA,该线路每 100 km 年闪络次数达到 18.18。因此需要提高线路的防雷水平,特别是 11 号杆处曾发生过雷击断线,更应加强防雷,以降低该线路的雷击跳闸率。

6.3.1 更换线路绝缘子

将现有线路绝缘子 S-210/Z 更换为高一级的绝缘子 S-280/Z 见表 1 所示。可见,更换以后,无论何种击距,线路防雷水平均可提高 33%。

(下转第 66 页)

行实时、优化控制,将 WAMS 系统应用于互联电网联络线控制,以实时控制、在线应用为目标,提出了合理的系统构架方案,并在后期继续深化研究、协调,典型系统对核心计算程序测试表明,算法具有较高的精度、方便快捷、有工程应用前景,具有以下特点。

(1)与常规控制算法相比,采用 GSDF 法作为联络线控制算法,原理简单,只需要本区域的网络和运行参数,此外,可随时修改联络线计划值,程序编制简单,收敛速度快,与 WAMS 系统结合,可在线计算。

(2)对所构建的系统进行了合理的功能划分,将其分解为子模块,各模块之间既独立又相互协调,提高实时性。

(3)线程分解和并行处理设计、参数数据库的建立,大大缩短了数据在程序中的等待时间,从总体上提高了计算应用程序的性能,使在线计算成为可能。

(4)改进了其他在线算法将“数据过滤与处理单元”置前常规做法,将其置于较后环节,使其仅对有效数据进行过滤和处理,提高了算法的实时性和效率。

(5)由于 WAMS 系统投资大,因此仅在网络中中枢节点、重要电厂布置了 PMU,在这些有限的 PMU 节点情况下,其算法该如何改进和所构建的系统模块之间如何有效协调,是今后进一步研究的重点。

所提出的思想在工程中有一定的应用价值。

参考文献

[1] 邱夕兆,于占勋,雷鸣,等.山东电网基于 WAMS 的低频振荡统计与评估[J].电力系统自动化,2008,32(6):1-2

[2] 陈树恒,李兴源.基于 WAMS 的低频振荡模式在线辨识算法[J].继电器,2007,35(20):1-5.

[3] 李大路,李蕊,孙元章,等.计及广域测量信息的状态估计错误参数识别与修正[J].电力系统自动化,2008,32(14):1-4.

[4] 薛禹胜,徐伟,等.关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J].电力系统自动化,2007,31(15):1-5.

[5] 宋方方,毕天姝,杨奇逊.基于 WAMS 的电力系统受扰轨迹预测[J].电力系统自动化,2006,30(23):1-5.

[6] 刘道伟.基于广域测量系统(WAMS)的电压稳定在线监测[D].吉林:东北电力学院电力系统及其自动化系,2005.31-39.

[7] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等.基于 WAMS 的潮流转移识别算法[J].电力系统自动化,2006,30(14):1-5.

[8] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,1996.204,216-219.

[9] 王祖佑.电力系统稳态运行计算机分析[M].北京:水利电力出版社,1987.58-60.

[10] 胡学浩,李汉香.潮流计算中区域联络线功率控制的模拟计算方法初探[J].电网技术,1989,(4):1-2.

[11] 孙莹,王葵.电力系统自动化[M].北京:中国电力出版社,2004.165-166.

[12] Prabha Kunder Power System Stability and Control[M]. McGraw-Hill Companies Inc 1994.525-529.

作者简介:

李强(1984—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制。

(收稿日期:2009-05-12)

(上接第 41 页)

表 1 更换绝缘子前后线路的防雷水平

击距 /m	线路防雷水平 /kA	
	S-210 /Z	S-280 /Z
30	27	36
50	44	59
70	62	83

6.3.2 11 号杆更换为 12 m 杆

将原 15 m 的 11 号杆更换为 12 m 杆,更换前后线路的耐雷水平如表 2 所示。可见,更换以后,无论何种击距,11 号杆处防雷水平均可提高 15%。

表 2 11 号杆高度更换前后防雷水平的变化

击距 /m	防雷水平 /kA	
	杆高 15 m	杆高 12 m
30	23	27
50	38	44
70	54	62

6.3.3 安装线路避雷器

东城线避雷器安装数量很少,每相隔 15~17 基安装一组 MOA,不能很好地对线路起到防雷保护作用。建议在原有安装避雷器的基础上,在特别高的杆塔 11 号杆、带拉线的杆塔 16 号杆及终端杆处各安装一组 MOA,在其余线路每隔 6~7 基杆增加一组线路避雷器,以提高该线路的防雷水平。

参考文献

[1] 曾海涛,邹嘉嘉,黄少先.高压配电网 10 kV 大企线路的防雷[J].机电工程技术,2008,37(6):110-112.

[2] 陈中明,郑楚韬.配电网架空线路感应雷过电压产生机理与防护[J].广东电力,2008,21(5):19-22.

[3] 赵莲清,李月乔,刘向军.传输线路感应雷防护计算方法的研究[J].现代电力,2004,21(6):51-55.

(收稿日期:2009-06-10)

谐波响应特性对接地电极设计的影响研究

张凤鸣

(四川电力物流集团公司, 四川 成都 610016)

摘 要:接地的目的是提供故障电流和雷电流泄流通道, 保证系统、设备和人员安全。接地功能通过接地装置或接地系统实现, 其中接地电极是最常见的接地装置之一。接地电极的接地特性通常以接地电阻来衡量, 分工频电阻和冲击电阻, 在实际系统运行过程中, 关于接地电极的特性的认识还远远不够。从实际出发, 并结合接地电极的谐波响应特性, 对考虑电极谐波响应特性的设计思想和原则进行研究, 研究成果证明, 考虑谐波响应特性以后, 在特定环境下, 接地电极均有一临界长度, 在进行工程设计和施工时应该考虑这些特性, 可作为施工和设计人员的参考。

关键词:接地电极; 泄流通道; 帕斯瓦尔定理; 谐波响应; 施工与设计

Abstract: The aim of grounding is to provide the discharging channels for fault current and lightning current and ensure the safety of the system, the equipment and the personnel. The characteristics of grounding electrode are usually presented by grounding resistance which includes power-frequency resistance and impulse resistance, but in fact the existing understanding is not enough. Based on the practical application, considering the harmonic response characteristics of grounding electrode, the design idea and principle of electrode are researched. The results show that there is a critical length under special circumstance and this may be helpful for the practical application.

Key words: grounding electrode; discharging channel; Parseval's theorem; harmonic response; construction and design

中图分类号: TM7862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0042-04

0 引 言

接地装置就是包括引线在内的埋设在地下的一个或一组金属体(包括金属水平埋设或垂直埋设的金属网、金属构件、金属管道、钢筋混凝土构筑物基础、金属设备等), 或金属导体组成的金属网, 其功能是用来泄放故障电流、雷电流或其他冲击电流等。这类装置在系统中很多, 如何保证可靠接地, 提高接地装置的保护性能是电力系统非常关注的重要课题。

接地电极在冲击电流和工频电流作用下的响应特性不同, 地极将呈现电感效应, 阻碍电流向地极远端流动。如果接地电极过长, 在冲击电流作用下, 只有部分被利用, 接地电极存在有效长度或临界长度问题。在实际工程中, 接地电极的这一特性往往被忽视, 造成实际运行过程中不必要的设备损坏或绝缘破坏, 其原因在于没有考虑接地电极的谐波响应特性。

在输电线路的防雷接地系统中, 雷电流时间短、电流幅值高、高频成分丰富(频率高至数兆赫兹), 接地电极的电抗部分对整个响应的影响不能忽略, 接地电阻不能再是简单的纯电阻, 而变成了接地阻抗。接

地阻抗与接地电极特征(尺寸、形状)和土壤特性(电阻率、介电常数、磁导率)有关。因此, 通过对雷电流信号进行傅立叶变换, 得到雷电流的频谱和能量频率分布, 通过对垂直接地电极、水平接地电极的 T 型模型分析, 得到用接地电极特征和土壤特性表示的接地阻抗表达式, 再给出了考虑雷电流高次谐波响应特性时, 不同土壤特性的接地电极设计中, 接地电极应该满足的电极基本特征和要求。最后在 PSCAD/EMT-DC 环境下建立雷电流信号模型和接地电极模型进行了仿真, 并对仿真结果进行分析。

立足实际工程中存在的现象和问题, 提出考虑谐波响应特性的情况下, 对接地电极的特性进行研究, 通过理论分析和数字仿真, 提出了一种考虑谐波响应特性的接地电极设计方法和基本思路, 希望对实际工程中接地电极的设计和施工有一定的指导意义。

1 非周期信号的傅立叶变换

在周期信号的傅立叶级数中, 当周期增加时基波频率减小, 各谐波分量在频率上愈趋靠近。当周期变成无穷大时, 这些频率分量就形成了一个连续域, 从

而傅立叶级数的求和也就变成了一个积分。为了说明对非周期信号建立傅立叶表示的基本思想,考虑信号 $x(t)$, 它有有限持续期, 即对某个 T_1 , 当 $|t| > T_1$ 时, $x(t) = 0$, 如图 1(a)。这样可构建一周期信号 $\tilde{x}(t)$, 使 $x(t)$ 是 $\tilde{x}(t)$ 的一个周期, 如图 1(b)所示。当把 T 选较大时, $\tilde{x}(t)$ 在更长的时段上与 $x(t)$ 一致, 并且随着 $T \rightarrow \infty$, 对任意有限时间 t 值而言 $\tilde{x}(t)$ 等于 $x(t)$ 。

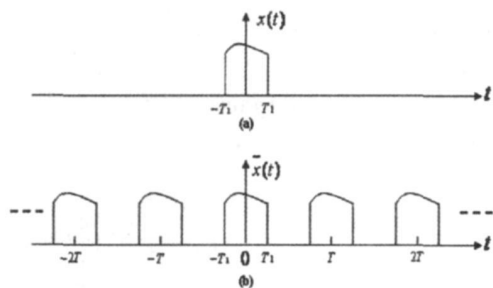


图 1 非周期信号扩展成周期信号

$\tilde{x}(t)$ 及其傅立叶级数表示式如下。

$$\tilde{x}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} \quad (1)$$

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \tilde{x}(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (2)$$

式中, $\omega_0 = 2\pi/T$ 。由于在 $|t| < T/2$ 内, $\tilde{x}(t) = x(t)$, 而在其余地方 $x(t) = 0$, 所以系数 a_k 为

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (3)$$

定义

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

则系数 a_k 可以写为

$$a_k = \frac{1}{T} X(jk\omega_0) \quad (5)$$

将 a_k 代入式 (1) 得

$$\tilde{x}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{T} X(jk\omega_0) e^{jk\omega_0 t} \quad (6)$$

当 $T \rightarrow \infty$, $\tilde{x}(t)$ 趋于 $x(t)$, 式 (6) 的极限即为 $x(t)$ 。再者, $T \rightarrow \infty$ 时, 有 $\omega_0 \rightarrow 0$, 式 (6) 右边就过渡为一个积分, 得

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (7)$$

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (8)$$

函数 $X(j\omega)$ 称为 $x(t)$ 的傅立叶变换或傅立叶积分, 而式 (7) 称为傅立叶反变换。

式 (7) 对非周期信号所起的作用与对周期信号的作用是相同的。两者都把信号表示为一组复指数

信号的线性组合。对周期信号来说, 这些复指数信号的幅度为 $\{a_k\}$, 并且在成谐波关系的一组离散点 $k\omega_0$, $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 上出现。对非周期信号而言, 这些复指数信号出现在连续频率上且根据式 (7), 其“幅度”为 $X(j\omega) d\omega/2\pi$ 。与周期信号傅立叶级数系数所用的术语类似, 非周期信号 $x(t)$ 的变换 $X(j\omega)$ 通常称为 $x(t)$ 的频谱。

2 基于帕斯瓦尔定理的雷电流模型

2.1 帕斯瓦尔定理

连续时间非周期信号的帕斯瓦尔定理: 若 $x(t)$ 和 $X(j\omega)$ 是一对傅立叶变换, 则

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |X(j\omega)|^2 d\omega \quad (9)$$

该式称为帕斯瓦尔定理。式 (9) 的左边是信号 $x(t)$ 的总能量。该定理指出, 总能量既可按每单位时间内的能量 ($|x(t)|^2$) 在整个时间内积分计算, 也可按每单位频率内的能量 ($|X(j\omega)|^2$) 在整个频率范围内积分而得。因此, $|X(j\omega)|^2$ 常称为信号 $x(t)$ 的能谱密度。

2.2 雷电流模型及其能量谱

雷电流波形广泛采用双指数函数波形。

$$i(t) = I(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (10)$$

式中, α 为波前衰减系数; β 为波尾衰减系数。

根据国际电工委员会提供的 $1.2/50 \mu s$ 雷电流参数及相应 α, β 取值, 见表 1。

表 1 $1.2/50 \mu s$ 雷电流参数

波形	波头 (μs)	半值 (μs)	$\alpha (s^{-1})$	$\beta (s^{-1})$
双指数	1.2	50	$1.4e+04$	$4.5e+06$

2.3 雷电流频谱

对雷电流进行傅立叶变换, 得到电流幅值随频率的分布, 即频谱。对双指数曲线信号进行傅立叶变换^[6]得

$$\begin{aligned} i(j\omega) &= \int_0^{\infty} I(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) e^{-j\omega t} dt \\ &= I \left(\frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega} \right) \\ &= \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) + j \left(\frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \right] \\ &= I(A + jB) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{令 } A = \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2}, B = \frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2}$$

双指数模型的幅频响应为

$$\begin{aligned} i(j\omega) &= I \sqrt{A^2 + B^2} \\ &= I \frac{\beta - \alpha}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2) + (\beta^2 + \omega^2)}} \end{aligned} \quad (12)$$

2.4 基于帕斯瓦尔定理的雷电流能量谱

根据帕斯瓦尔定理^[5], 信号能量^[7]为

$$\begin{aligned} W &= \int_{-\infty}^{+\infty} |i(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |i(\omega)|^2 d\omega \\ &= \frac{I^2 (\beta - \alpha)}{\pi (\beta + \alpha)} \left(\frac{1}{\alpha} \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{\omega}{\beta} \right) \Big|_0^\infty \end{aligned} \quad (13)$$

W 称为比能, 反映电流通过单位电阻时产生的能量消耗。

代入参数 α, β 得总能量为

$$W = 3.5382e-05 I^2$$

同样可得 $(0, \omega_0)$ 频率范围内的能量为

$$\begin{aligned} W' &= \frac{I^2 (\beta - \alpha)}{\pi (\beta + \alpha)} \left(\frac{1}{\alpha} \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{\omega}{\beta} \right) \Big|_0^{\omega_0} \\ &= \frac{I^2 (\beta - \alpha)}{\pi (\beta + \alpha)} \left(\frac{1}{\alpha} \tan^{-1} \frac{\omega_0}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{\omega_0}{\beta} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

雷电流 $(0, \omega_0)$ 频率范围内的能量如表 2。

表 2 雷电流能量频率分布

频率 f (Hz)	能量 ($\times I^2 R$)	百分比 (%)
0~1.0e+01	1.0141e-007	0.29
0~1.0e+02	1.0134e-006	2.86
0~1.0e+03	9.5319e-006	26.94
0~1.0e+04	3.0538e-005	86.31
0~1.0e+05	3.4980e-005	98.86
0~1.0e+06	3.5376e-005	99.98
0~1.0e+07	3.5382e-005	100.00

注: 雷电流总能量 = $3.5382e-005 \times I^2 R$

从表 2 可见, 100 Hz 以下能量百分比只有 2.86%, 大部分能量 (59.37%) 集中在 1~10 kHz 范围内。频率范围 0~0.1 MHz 内时, 能量百分比已经达到了 98.86% 了。这样, 对雷电流可以取上限频率为 0.1 MHz 并认为雷电流的能量几乎全部在上限频率以内。

3 接地电极数学模型

考虑雷电流谐波响应时的接地电极模型不再是单一纯电阻, 须引入接地电极自感和电极至土壤零电势面的电容。当用集中参数时, 垂直和水平接地电极的接地阻抗均可用 T 型表示。

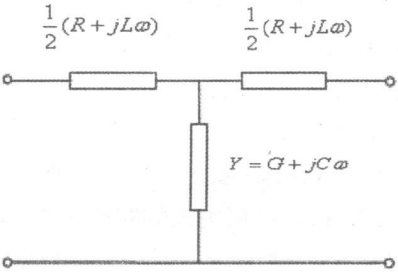


图 2 接地电极阻抗 T 型模型

忽略电阻, 接地阻抗为

$$\begin{aligned} Z &= \frac{j\omega}{2} + \frac{1}{Y} = \frac{j\omega}{2} + \frac{Re}{1 + Re^2 C^2 \omega^2} \\ &= \frac{j\omega}{2} + \frac{Re(1 - Re^2 C^2 \omega^2)}{1 + Re^2 C^2 \omega^2} \\ &= \frac{Re}{1 + Re^2 C^2 \omega^2} + j\omega \frac{(\frac{L}{2} - Re^2 C + \frac{Re^2 C^2 L \omega^2}{2})}{1 + Re^2 C^2 \omega^2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{令, } R = \frac{Re}{1 + Re^2 C^2 \omega^2},$$

$$X = \omega \frac{(\frac{L}{2} - Re^2 C + \frac{Re^2 C^2 L \omega^2}{2})}{1 + Re^2 C^2 \omega^2},$$

则

$$Z = R + jX \quad (16)$$

令 X 为零, 可得临界角频率 ω_c 和临界频率 f_c 为

$$\omega_c = \sqrt{\frac{2Re^2 C - L}{Re^2 C^2 L}}, \quad f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2Re^2 C - L}{Re^2 C^2 L}} \quad (17)$$

阻抗角为

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \frac{X}{R} \\ &= \tan^{-1} \frac{\omega \frac{(\frac{L}{2} - Re^2 C + \frac{Re^2 C^2 L \omega^2}{2})}{1 + Re^2 C^2 \omega^2}}{\frac{Re}{1 + Re^2 C^2 \omega^2}} \\ &= \tan^{-1} \frac{\omega (\frac{L}{2} - Re^2 C + \frac{Re^2 C^2 L \omega^2}{2})}{Re} \\ &= \tan^{-1} \omega \left(\frac{L}{2Re} - Re^2 C + \frac{Re^2 C^2 L \omega^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

4 垂直电极与水平电极仿真

基于上述方法, 对垂直和水平接地体在不同参数下的谐波响应特性进行了仿真, 限于篇幅, 仅给出一

种情况下的仿真结果。

垂直接地电极参数： $\epsilon_r=10$ ， $L_e=1.2\text{ }\mu\text{H/m}$ ，
 $d=0.014\text{ m}$ ， $\omega_c=2\pi\times10^5\text{ rad/s}$
水平接地电极参数： $\epsilon_r=10$ ， $L_e=1.2\text{ }\mu\text{H/m}$ ，
 $d=0.014\text{ m}$ ， $h=0.6\text{ m}$ ， $\omega_c=2\pi\times10^5\text{ rad/s}$
仿真结果如图 3、图 4 所示。

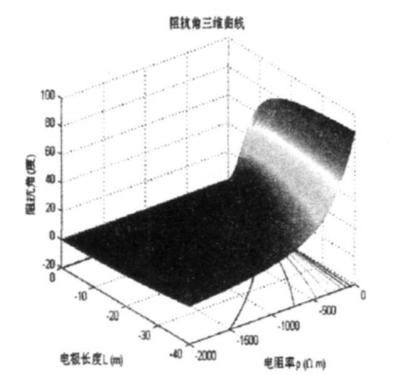


图 3 垂直接地电极 $\theta = f(\rho, L)$ 曲线

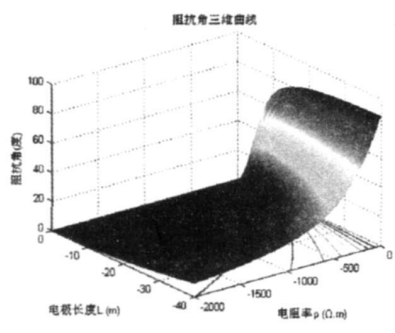


图 4 水平接地电极 $\theta = f(\rho, L)$ 曲线

接地电极临界频率与土壤、电极特性的关系和雷电流的上限频率值。如果雷电流的上限频率电流流过接地电极时，电极都能保持在阻性甚至容性，那么接地电极对整个雷电流的所有高频电流成分都不会产生感性响应。为此，接地电极的设计应满足临界频率不小于雷电流的上限频率。由于考虑接地电极的谐波响应特性以后，接地电极有一个临界长度，仿真结果如图 5。

5 结 论

从仿真结果 (图 5) 可以直接得出结论：当电极长度 $L < l_c$ 时接地电极对流过信号呈容性； $L = l_c$ 时接地电极对流过信号呈纯阻； $L > l_c$ 时接地电极对流过信号呈感性。也就是说，接地电极在考虑谐波响应特性的情况下存在一个临界长度，在进行工程设计和施工时应该考虑该因素。

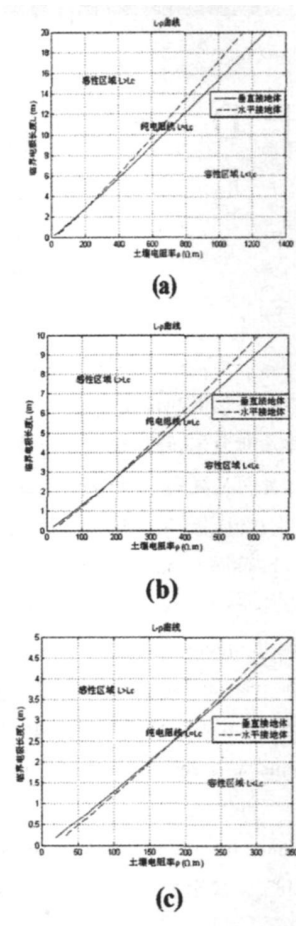


图 5 垂直接地电极与水平接地电极的临界长度比较

参考文献

[1] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术 (第一版) [M]. 北京:科学出版社, 2007.

[2] 何金良. 接地导体的设计 [J]. 电力建设, 1995(6).

[3] GB 50057—94,建筑物防雷设计规范 [S]. 2000.

[4] [日]川濑太郎 [著]. 接地技术与接地系统. 冯允平 [译] [M]. 北京:科学出版社, 2001.

[5] Alan V. Oppenheim, Alan S Willsky等 [著]. 刘树棠 [译]. 信号与系统 (第二版). 西安交通大学出版社, 1998.

[6] 叶根. 雷电流特性研究与频谱分析 [D]. 云南师范大学硕士论文, 2006.

[7] 罗仕乾. 雷电波的频谱及能量分布 [J]. 高电压技术, 1995, (1): 85—86.

[8] Aguado M.; Hemoso B.; Senosiain V.; Martinez—cid P. eds. Lightning earthing electrodes harmonic response [J]. High Voltage Engineering 1999. Eleventh International Symposium on (Conf Publ No 467) Volume 2, 23—27 Aug 1999, 262 — 266.

(下转第 88 页)

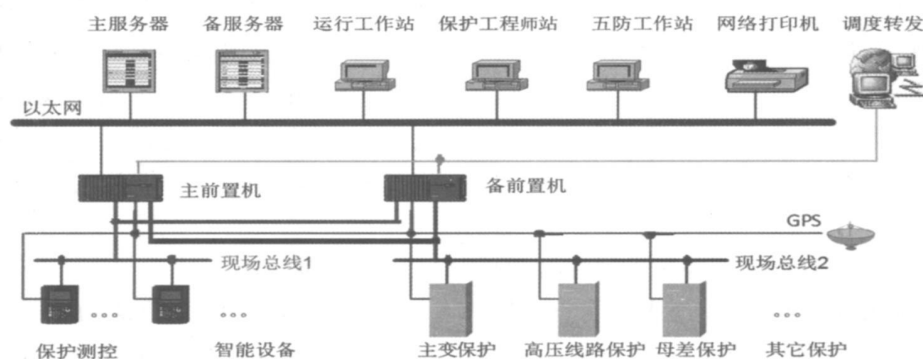


图 2 110 kV 变电站典型系统配置

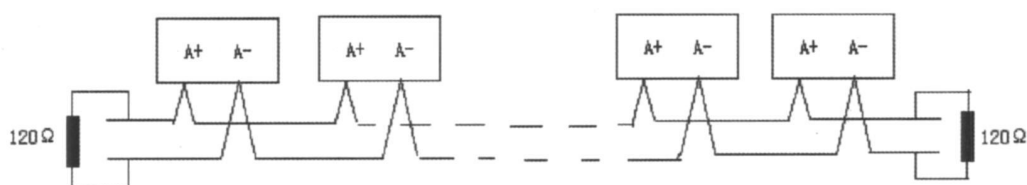


图 3 CAN 网匹配电阻的连接

和 RS485 难以胜任,应考虑选择现场总线网络。现场总线网将所有节点连接在一起,可以方便地增减节点,一般可连接 110 个节点;具有点对点、一点对多点 and 全网广播传送数据的功能。

由于以上原因,目前自贡电业局 110 kV 变电站的综合自动化系统中相当部分采用 CAN 通信,总的情况运行稳定可靠。CAN 组网结构见图 2。

CAN 通讯方式虽比 RS485 具备较强优势,但在具体的运用中也可能遇到一定的问题,需要在实践中不断摸索、掌握,并加以改进。特别要注意的是 CAN 的抗干扰问题和带负荷能力的问题。在自贡电业局 110 kV 沿滩变电站 1 号主变压器综合自动化改造时,站内共有 26 保护测控装置,经过比较选用了 CAN 组网。在运行中出现总控单元与测控单元通信时断时通的现象,经查是由于通讯电缆较长、且 CAN 网两端电阻不匹配引起反射驻波,后在 CAN 网两端各并了一个 $120\ \Omega$ 的电阻后问题得到解决(见图 3)。

在 110 kV 沿滩变电站 2 号主变压器扩建工程中,保护测控装置的数量增加到了 36 个,都接在 CAN1 口,在调试中发现远传遥测量数据丢失了一部分,经过

反复检查,最后发现是由于 CAN1 口带的设备超过了 32 个引起的,后将部分装置接入 CAN2 口后故障消失。

4 结 论

通过以上对综合自动化系统通信方式介绍,知道了各种通信方式的优缺点和适用范围。知道了 CAN 在 110 kV 变电站综合自动化通信中重要作用和应该注意的问题,对以后在变电站综合自动化系统组网选择和故障处理方面有一定的帮助。

参考文献

- [1] DL/T 634—1997, 远动设备及系统(第 5 部分:传输规约)[S].
- [2] DL/T 634. 5104—2002, IEC 60870—5—104—2000. 远动设备及系统(第 5—104 部分:传输协议)[S].
- [3] 赵渊,沈智健. 基于 TCP/IP 的 IEC60870—5—104 远动规约在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2003, (10): 56—60.

(收稿日期: 2009—06—30)

(上接第 45 页)

- [9] 孙宇瑞. 非饱和土壤介电特性测量理论与方法的研究[D]. 中国农业大学. 博士论文, 2000.
- [10] [美]爱·弗·万斯[著]. 高攸纲, 吕英华[译]. 电磁场对屏蔽电缆的影响[M]. 人民邮电出版社, 1988.
- [11] Rakotmalala A.; Auriol Ph.; Rousseau A. eds

Lightning distribution through earthing systems IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 1994, 419.

- [12] 张三慧. 大学物理学—电磁学(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.

(收稿日期: 2009—06—22)

基于 D—S 证据理论的变压器诊断系统研究

曹 海

(四川电力物流集团公司, 四川 成都 610061)

摘 要:以 Dempster—Shafer 证据理论为基础, 给出了基于神经网络的基本概率分配构造方法和诊断决策规则, 提出了一种神经网络初步诊断和证据理论融合决策诊断相结合的集成神经网络故障诊断方法, 建立了相应的功能模型。并以变压器故障诊断为例, 详细说明了该方法的具体步骤。结果表明, 使用 D—S 证据理论合成法则进行信度合成, 诊断结论的可信度明显提高, 不确定性明显减小, 充分显示了该方法的有效性。

关键词:证据理论; 变压器; 信息融合; 故障诊断

Abstract: On the basis of Dempster—Shafer (D—S) theory of evidence, the basic probability distribution construction method and diagnostic decision-making rules based on neural network are given. The integrated neural-network fault diagnosis method combining the preliminary diagnosis of neural network with a mix of evidence theory and decision-making diagnosis is proposed, and the relevant functional model is set up. Taking the fault diagnosis of transformer for example, the detailed steps of the method are described. The results show that using D—S theory of evidence to do the belief combination, the reliability of diagnosis conclusion is enhanced and the uncertainties is significantly reduced, which fully demonstrates that the method is effective.

Key words: evidence theory; transformer; information fusion; fault diagnosis

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)05—0046—04

1 D—S 证据理论

D—S 证据理论是由 Dempster 于 1967 年提出的, 后由 Shafer 加以扩充和发展, 所以证据理论又称为 D—S 证据理论。证据理论是 Bayes 方法的推广, 但比 Bayes 方法具有更多优点。Bayes 方法需要先验概率, 而在 Dempster—Shafer 形式中可以巧妙地解决这一问题, 它是一种在不确定条件下进行推理的强有力的方法。它用先验概率分配函数去获得后验的证据区间, 证据区间量化了命题的可信程度和似然概率。D—S 证据理论比传统的概率论能更好地把握问题的未知性和不确定, 从而在多传感器信息融合中得到了广泛的应用。

1.1 证据理论的基本概念

在故障诊断问题中, 每一种可能的故障都为假设, 各种可能故障的集合为识别框, 故障的每一症状为证据。

在某个条件 E (或证据) 下所有假设的有限集合 $U = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 为识别框, U 表示 X 所有可能

取值的一个论域集合, 且所有在 U 内元素间是互不相容的, 则称 U 为 X 的识别框架。 U 的所有子集构成的集合就是 U 的幂集, 记为 2^U 。

D—S 理论的基本策略是把证据集合划分为若干不相关的部分 (独立的证据), 并分别利用它们对识别框独立进行判断。每一证据下对识别框中每个假设都存在一组判断信息 (概率分布), 称之为该证据的信任函数, 其相应的概率分布为该信任函数所对应的基本概率分配函数。根据不同证据下对某一假设的判断, 按照某一规则进行组合 (或称为信息融合), 即对该假设进行各信任函数的综合, 可形成综合证据 (信任函数) 下对该假设的总的信任程度, 进而分别求出所有假设在综合证据下的信任程度。

1.2 D—S 证据理论的组合规则

证据理论中的组合规则是把证据集合划分为若干个不相关的部分, 并分别利用它们对识别框独立进行判断, 然后利用组合规则把它们组合起来。设 $BE1, BE2, \dots, BE_n$ 为论域 U 上的 n 个独立证据的信任函数, 其相应的基本概率赋值分别为 $m_1, m_2, \dots, m_n$ 。

那么组合后的基本概率赋值如下。

设焦点元素分别为

$A_1, A_2, \dots, A_k, B_1, B_2, \dots, B_p, \dots, C_1, C_2, \dots, C_q$

$$K_1 = \sum_{A \cap B \cap \dots \cap C_p = \Phi} m(A_i)m(B_i) \cdots m(C_p)$$

如果 $K_1 < 1$, 则 $A, B, \dots, C$ 融合后的可信度分配为

$$m(x) = \frac{\sum_{A \cap B \cap \dots \cap C_p = \Phi} m(A_i)m(B_i) \cdots m(C_p)}{1 - K_1} \quad (1)$$

如果 $K_1 = 1$, 则表示 $A, B, \dots, C$ 互相矛盾, 无法对其基本概率赋值进行融合。由式 (1) 所给出的证据组合规则称为 Dempster 组合规则。

2 BP神经网络法分析

BP网络是一种采用了误差反向传播 (error back propagation, BP) 算法的单向传播的多层前馈网络, 该算法由 Rumelhart 等人于 1986 年完整地提出, 系统地解决了权值调整的问题。BP网络有明显的输入、隐含和输出层, 隐含层可以有多层, 相邻层采用全互连方式连接, 同层节点之间没有连接, 输出层与输入层之间也没有直接的联系。BP网络可以看作是一个从输入空间到输出空间的高度非线性映射。

BP网一般是对采用 BP 算法的前向无反馈神经网络的简称, 它可以实现输入到输出的非线性映射。由 BP 网络理论可知, 如果 BP 网络的隐含层可以根据需要自由设定, 那么一个三层网络能以任意精度逼近任何连续函数。利用 DGA 法的检测数据进行故障判断, 实际上是完成气体组份到故障类型的一个复杂的非线性映射, 而 BP 网络恰好能完成这类复杂的映射问题。BP 网络能存贮任意连续的模式对 $(X_k, T_k, k = 1, \dots, m)$, 完成输入 $\{X_k\}$ 到期望输出 $\{Z_k\}$ 的映射。所以, 在油中溶解气体分析法中采用 BP 网进行故障诊断是比较恰当的。

将 BP 网络理论学习算法转化为实际的学习过程是一个典型的前馈层次网络, 在结构上有如下特点^[1~3]: ①网络分为输入层、隐含层和输出层。根据 BP 网络理论, 隐含层可以为一层或多层, 但是有一个隐含层的 BP 网络能够以任意精度完成任何连续函数的映射, 为了避免训练速度过慢, 只采用一个隐含层。BP 网络分为三层, 输入层 I、隐含层 H 和输出层

O。② I 层有 n 个节点, 对应网络的 n 个征兆输入 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$; O 层含有 q 节点, 与 BP 网络的 q 种故障输出 $(z_1, z_2, \dots, z_q)$ 响应。H 层节点 $(y_1, y_2, \dots, y_p)$ 数目根据具体模拟的每一诊断标准和方法来的需要来设置。③同层节点无关联, 异层节点前向连接。

令 I 层节点到 H 层节点间的连接权为 v_{hi} , $V = V_{n \times p}$; 令 H 层节点到 O 层节点间的连接权为 w_{ij} , $W = W_{p \times q}$ 。 k ($k = 1, 2, \dots, m$) 为给定的样本数。 θ_i 为 H 层节点的域值, γ_i 为 O 层节点的域值。

BP 网络根据样本的期望输出与实际输出之间的总体误差, 通过学习过程, 从输出层开始, 逐层修正权系数, 使两者之差小于规定的数值。经过学习训练的 BP 网络, 输入故障征兆向量后, 其输出 T_k 与期望输出 Z_k 在允许误差下是近似相等的。因此, BP 网络的输出就是实际故障模式的近似, 从而获得故障问题的近似诊断解。

3 变压器故障诊断实例

证据理论的基本可信度分配, 是专家在所获证据的基础上, 根据个人的经验对识别框架中不同命题的支持程度的数字化表示, 主观性很强。因此不同的专家由同一个证据对同一个命题会给出不同的信度分配, 有时差别很大。为了更客观地得到一证据对不同的命题的信度分配, 可以将各个独立的低维的神经网络作为证据理论的一个证据, 并把低维神经网络的输出值处理后作为辨识框架上命题的基本可信度。经过证据理论的再次融合, 类似于神经网络对信号层面数据的特征提取后的特征值再加以融合, 充分利用证据源的信息, 将大大提高识别的准确率, 消除单一数据源包含信息的不全面和信息的模糊性, 因为证据理论可以对多个证据都支持的判断进行加强。神经网络和证据理论融合的故障诊断方法的基本原理描述如下: 每个测点的传感器 (或传感器组), 对应一个局部神经网络进行局部诊断。这样可以简化各个网络, 避免了单一诊断神经网络复杂的结构形式, 以及某一传感器故障或数据源错误对整个诊断系统带来的不良影响, 诊断系统的容错性能增强。

为了验证神经网络和证据理论集成的故障诊断方法的有效性, 下面以某变电站 220 kV 主变压器的局部放电检测结果作为试验对象, 采用变压器高能量放电故障作为被诊故障。选择变压器常发故障——

高能量放电、绕组围屏破损、硅钢片间短路、电屏蔽装置松动放电作为诊断的故障域。采集变压器正常运行和发生高能量放电故障时正交小波神经和油中溶解气体信号作为诊断数据。

选择正交小波神经和油中溶解气体两个局部诊断网络 A 和 B 并对网络结构进行了构造和对网络进行了训练。对正交小波神经诊断网络 A，取 50 组数据作为诊断数据，其余 150 组数据作为诊断网络训练数据。同样，对油中溶解气体诊断网络 B，取 50 组数据作为诊断数据，其余 150 组数据作为诊断网络训练数据。选取变压器高能量放电时的 3 组数据作为诊断数据，诊断结果见表 1~表 3。

在变压器高能量放电故障下的正交小波神经和油中溶解气体各 3 组数据分别通过两个诊断网络进行独立诊断，结果表明，正交小波神经网络 A 对第 2 组数据的诊断结果，变压器处于高能量放电状态的置信区间为 (0.415 343 7, 0.575 343 7)，变压器处于正常状态的置信区间为 (0.387 536 2, 0.507 536 2)，无法确定变压器的状态，难以正确判断变压器的实际状

态，见表 1。由于高能量放电故障对变压器总烃量变化影响比较明显，因此变压器油中溶解气体网络 B 很好地确诊了故障。但未知信度仍然比较高，达到了 0.04，见表 2。分析表 2 独立诊断结果可以发现，如果其他故障发生或多个故障同时发生时，同样会像网络 A 那样出现难以判断变压器的实际状态。传感器由于安放位置的不同和自身监测性能的限制，不同传感器采集的不同故障的数据蕴涵的故障信息有很大的差异，所以任何诊断网络都存在诊断结果的模糊性。

为了提高诊断准确率，运用数据融合技术，充分利用网络 A 和网络 B 诊断信息，将两者分别作为证据理论融合的两个证据，使用 D—S 证据理论合成法则进行信度合成，合成信度见表 3。可以发现，由于充分利用了不同证据的冗余和互补故障信息，实现了变压器状态的精确识别。网络的未知信度明显减小，最大的未知信度仅有 0.009 197，A、B 网络支持度均高的状态的信度相对上升，支持度均低的状态的信度相对降低，诊断的能力明显增强。

表 1 正交小波神经网络对高能量放电诊断的结果

	数据 1	数据 2	数据 3
绕组围屏破损	(0.005 950 5, 0.165 904 8)	(0.005 851 2, 0.165 851 2)	(0.006 018 5, 0.166 018 5)
硅钢片间短路	(0.005 954 2, 0.165 954 2)	(0.005 854 6, 0.165 854 6)	(0.006 023 1, 0.166 023 1)
电屏蔽松动放电	(0.005 950 7, 0.165 950 7)	(0.005 863 3, 0.165 863 3)	(0.006 020 2, 0.166 020 2)
高能量放电	(0.766 557 7, 0.966 557 7)	(0.415 343 7, 0.575 343 7)	(0.779 199 4, 0.979 199 4)
正常状态	(0.155 868 8, 0.355 868 8)	(0.387 536 2, 0.507 536 2)	(0.002 438 7, 0.202 438 7)
未知信度	0.16	0.16	0.16
诊断结果	高能量放电	不确定	高能量放电

表 2 油中溶解气体诊断网络对高能量放电诊断的结果

	数据 1	数据 2	数据 3
绕组围屏破损	(0.005 856 4, 0.045 856 4)	(0.005 753 3, 0.045 753 3)	(0.005 816 7, 0.045 816 7)
硅钢片间短路	(0.005 831 2, 0.045 831 2)	(0.005 632 5, 0.045 632 5)	(0.005 863 4, 0.045 863 4)
电屏蔽松动放电	(0.005 864 5, 0.045 864 5)	(0.005 718 6, 0.045 718 6)	(0.005 857 3, 0.045 857 3)
高能量放电	(0.824 135 2, 0.864 135 2)	(0.823 559 5, 0.863 559 5)	(0.823 812 1, 0.863 812 1)
正常状态	(0.001 808 6, 0.041 808 6)	(0.001 879 0, 0.041 879 0)	(0.001 835 7, 0.041 835 7)
未知信度	0.04	0.04	0.04
诊断结果	高能量放电	高能量放电	高能量放电

表 3 两个独立诊断网络信度融合后诊断的结果

	数据 1	数据 2	数据 3
绕组围屏破损	(0.000 059 3, 0.000 979 0)	(0.000 072 8, 0.001 431 4)	(0.000 057 2, 0.000 980 3)
硅钢片间短路	(0.000 058 7, 0.000 978 4)	(0.000 075 6, 0.001 434 2)	(0.000 056 8, 0.000 979 9)
电屏蔽松动放电	(0.000 057 9, 0.000 977 6)	(0.000 078 1, 0.001 436 7)	(0.000 054 6, 0.000 977 7)
高能量放电	(0.742 434 1, 0.743 353 8)	(0.659 873 2, 0.661 231 8)	(0.742 568 9, 0.743 492 0)
正常状态	(0.000 386 3, 0.001 305 9)	(0.000 869 2, 0.002 227 8)	(0.000 379 8, 0.001 302 9)
未知信度	0.009 197	0.013 586	0.009 231
诊断结果	高能量放电	高能量放电	高能量放电

4 结 论

利用该方法进行故障诊断,不但可以克服 BP 网络的缺点,又能利用 BP 网络获得 D-S 证据理论的基本概率赋值,解决了 D-S 证据理论难以获得基本概率赋值的弊端。使用 D-S 证据理论合成法则进行信度合成,可以提高局部诊断网络的诊断能力,提高了诊断准确度,降低了诊断的不确定性。通过变压器故障诊断实验证明,神经网络与 D-S 证据理论相结合的融合诊断算法能够提高诊断精度,并能满足复杂系统实时诊断的要求。

参考文献

[1] 靳蕃等.神经网络与神经计算机[M].成都:西南交通大

学出版社,1991.

[2] 史忠植.神经计算[M].电子工业出版社,1993.
[3] 焦李成.神经网络理论[M].西安:西安电子科技大学出版社,1990.
[4] 夏虹.基于数据融合技术的设备故障诊断方法研究[D].哈尔滨工程大学博士论文,2000.
[5] 臧宏志.基于信息融合的大型电力变压器故障诊断[D].山东大学硕士论文,2002.
[6] 张兆礼.神经网络数据融合算法研究[D].哈尔滨工业大学博士论文,2001.
[7] 吴艳.多传感器数据融合算法研究[D].西安电子科技大学博士论文,2003.
[8] 刘宜平,沈毅.一种基于多级信息融合技术的系统故障诊断方法[J].系统工程与电子技术,2000,22(12):97—100.

(收稿日期:2009—07—22)

(上接第 34 页)

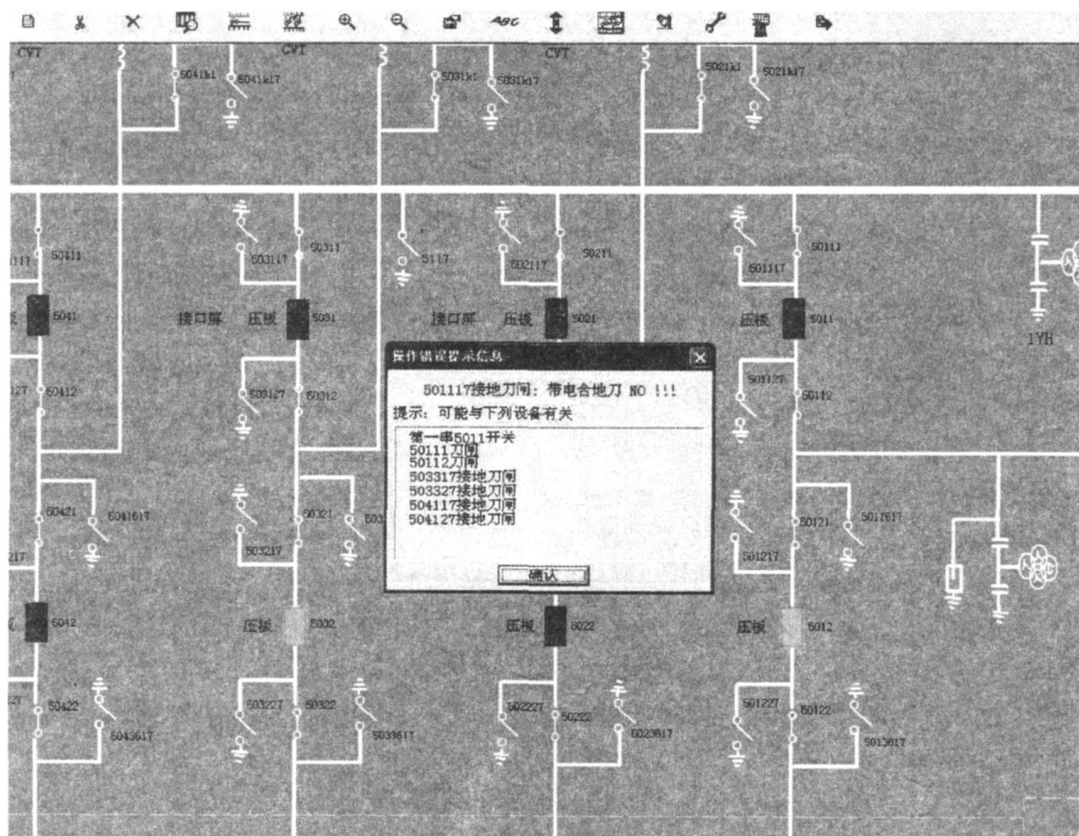


图 2 仿真变电站防误演示

机五防进行了全面的模拟,其在电力数学模型、五防等方面的创造性贡献已为变电运行人员的培训迈上新台阶提供了可靠的技术支持和保障。

参考文献

[1] 防止电力生产重大事故的二十五项重点要求[M].北

京:中国电力出版社,2000.

[2] DL/T 687—1999.微机型防止电气误操作装置通用技术条件[S].
[3] 游景玉主编.仿真控制论文集[M].珠海出版社,1999.

(收稿日期:2009—07—10)

大型电机局部放电在线监测的方法研究

崔东君, 刘 念

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:大型电机在电力系统各个生产部门起着关键的作用。而局部放电是发生在电机定子绕组上的常见故障,会造成绝缘的劣化,最终导致绝缘的击穿和短路事故。对局部放电的监测方法进行了整体概述,具体介绍了几种常用的在线监测局部放电的方法:成对耦合器监测法、中线射频监测法、定子槽耦合器监测法、引出线上耦合器监测法,同时介绍了各种方法的传感器设置,噪声的抑制情况。

关键词:局部放电;在线监测;大型电机

Abstract: Large-scale electrical machine plays a key role in power system and each production department. Partial discharge is one of the common failures of stator winding and it can lead to deterioration of the insulation, resulting in insulation breakdown and short circuit. The methods of partial discharge monitoring are described. five commonly used methods in online partial discharge monitoring of electrical machine are introduced. at the same time the sensor establishment for each partial discharge monitoring method and the situation of the noise suppression are introduced too.

Key words: partial discharge; online monitoring; large-scale electrical machine

中图分类号: TM930.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0050-04

由于大型电机的定子绝缘结构工艺流程长,在制造中不可避免地形成一些空穴。这些绝缘结构被安装在电机定子结构中的不同位置,在电机运行过程中,这些定子绝缘结构在电压、热应力及环境等因素的综合作用下势必会产生放电。电机损坏事故,有相当一部分是电机定子绕组绝缘损坏引起的,而定子绕组绝缘的损坏则很多是由于局部放电造成的,所以希望对检测到的局部放电进行有效的分析,从而判定绝缘状态,以免造成严重的后果。

通过对大型电机局部放电的监测,可以提高电机的运行效率,逐步由“计划检修”向“状态检修”过渡,大大提高了电机安全、稳定运行水平。

1 局部放电的原因及放电类型

1.1 局部放电的原因

大型电机定子绝缘材料主要是沥青云母或者是环氧云母。由于绝缘材料是充填和浇注的,会不同程度地包含一些杂质、水分、小气泡等异物,所以不可避免地会形成一些空穴,它们由不同或相同材料层组成,层间经常会有一些小的滑动,可能有的地方绝缘与导体粘着不牢,或者定子绕组中预先经过绝缘处理的导条在槽中放置不当,或者可能槽楔松动了,或者

负载下的电磁力将造成微小的移动,擦掉了线圈在槽内部分的漆。长期受热、电、机械应力及环境影响,绝缘中这些薄弱环节在局部场强作用下,空穴内产生局部放电,这样最终导致绝缘击穿,引起电机损坏^[1]。

1.2 局部放电的类型

大型电机定子主绝缘局部放电可以归纳为三种类型:内部放电、端部放电、槽间放电。

(1) 内部放电:内部放电可以发生在绝缘层中间、绝缘层与线棒导体间或绝缘层和防晕层的气隙或气泡中。电机线棒在制造过程中由于工艺上的原因不可避免地会存在微小的气隙,而且电机在运行过程中由于温度、冷热循环及其他原因使这些气隙在纵向方向上逐渐扩大,尤其是主绝缘的许多气隙,常常连成一片,形成所谓脱壳。在这些气隙内部,在强电场的作用下,当工作电压达到气隙的起始放电电压时,就会发生局部放电。由于局部放电的热效应、化学效应以及带电粒子的高速碰撞都会使绝缘层表面侵蚀或使表面绝缘损坏,使绝缘的有效厚度降低,绝缘的电气强度降低,最后导致匝间绝缘或主绝缘的击穿。

(2) 端部放电:大型电机的端部很容易发生局部放电,在很多绝缘事故中,端部放电的比重很高。电机绕组端部的出槽口处属于套管型绝缘结构,一般要采取防止电晕放电的措施,即分段涂刷半导体防晕

层。在实际运行中,由于电机的端部振动、振动引起的固定部件的松动、槽口机械应力集中等原因会使防晕层部分脱落,从而使端部发生局部放电。端部放电比内部放电更剧烈,破坏作用更大,甚至可能发生更为危险的滑闪放电。

(3) 槽间放电:在电机的运行过程中,由于铁芯的振动,导致线棒的固定部件如槽楔、垫条的松动和防晕层的损害。线棒和铁芯接触点过热造成的应力作用,会损伤防晕层。由于这些原因使得定子线棒的低阻层和槽壁或槽底接触不紧密而存在气隙,从而产生高能量的电容性放电。槽间放电就是发生在线棒防晕层和槽壁或槽底之间的放电,放电形式可能是电晕放电、火花放电甚至是电弧放电^[2]。

2 局部放电的监测方法

由于制造工艺的限制,电机在运行中可以存在一定量的局部放电现象,当局部放电的幅值超过一定的限度,就会损坏电机的绝缘系统。电机的绝缘系统从发生异常的局部放电到最终的绝缘系统破坏要经过数月,甚至一年的时间。适时监测出局部放电的异常,及时安排维修,可以延长电机的使用寿命。

局部放电的监测可以分为离线监测和在线监测两大类。以前都是在离线的情况下监测局部放电,为能够准确测出各种电机的局部放电现象,需要花费很大的精力设计实验电路。20 世纪 50 年代,国外学者开始对在线监测进行研究,并取得了一定的成果。主要的在线监测方法有以下几种。

2.1 成对耦合器监测法

这种方法是在电机定子绕组上安装高压耦合电容器,每相各有一对耦合电容器,并将耦合器安装在电机各相汇流环的合适位置上,用以消除来自电机外部的干扰。假设一个来自电机外部的干扰脉冲,从某一相的接线端进入,如图 1(a)所示,这时干扰脉冲将分成两路,分别沿该相的汇流环两边传送至两个耦合电容器,若汇流环两边等长,而且由这两个耦合电容器联接到电机外部的局部放电分析仪的同轴电缆线也等长,这样干扰脉冲沿该相汇流环两边通过耦合电容器和同轴电缆传送至电机外部监测点时的信号是相同的,这两路相同的脉冲信号送入局部放电分析仪前级的高速差动放大器后,其结果是输出为零,即来自电机外部的干扰脉冲将不产生输出。另一方面,发

生在电机内部的局部放电脉冲,例如图 1(b)中的靠近 A 处局部放电脉冲将使差动放大器产生非零输出,因为靠近 A 处的局部放电脉冲很快被 A 处的耦合器监测到并先送到差动放大器的正输入端,而局部放电脉冲沿汇流环要经一定时间才被另一耦合器监测到并后送到差动放大器的负输入端,于是差动放大器会有输出电压。

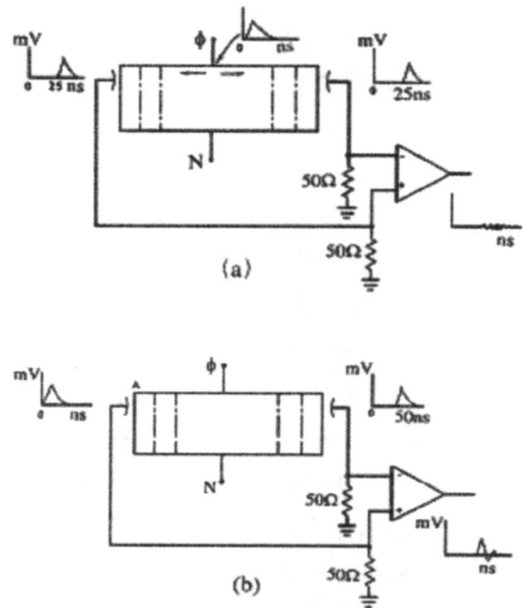


图 1 成对耦合电容器监测原理图

这种监测法适用于水轮发电机,因水轮发电机相对体积大,便于耦合器安装,汇流环母线相对较长,使得有可能识别出局部放电脉冲传播时间的差别。此法是以成对耦合器上的两并联支路完全对称来消除干扰的,实际上使两支路参数完全对称是很难的,因此应尽可能减少这种不对称或采用延时线进行补偿,以提高抑制干扰的能力^[3]。

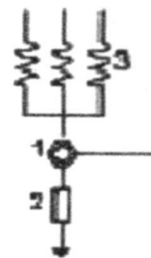


图 2 中线 RF 监测原理图

2.2 中线射频监测法

该方法是通过高频电流传感器、罗科夫斯基线圈或 RC 阻容高通滤波器来监测电机中性点上电弧的高频信号,以发现定子线圈内部放电现象(图 2)。目前已在多台发电机和大型高速电机上采用,取得了较

好的效果。由于大型电机运行时具有相当强的背景噪声,而且其励磁绕组滑环上、轴承接地电刷或电机高压母线上也会产生电弧,通过电磁干扰产生假局部放电信号。所以必须采用较高精度的消除或抑制干扰信号的技术。

这种监测法的优点是中性线对地电位低,传感器制作与安装相对容易;缺点是对信号处理技术要求较高。必须采用较高精度的消除或抑制干扰信号的技术和局部放电信号识别方法^[4]。

2.3 定子槽耦合器监测法

不同的电机有不同种类的噪声干扰。有些来自电机外部,有些则来自内部。为了能使大型汽轮发电机有效地检测到局部放电脉冲,Stone G. C. 等人提出了在定子槽内安装耦合器的办法。这种定子槽耦合器(SSC)是一种用于检测局部放电信号的“天线”,它装在靠近相端的定子槽的槽楔下面,如图 3 所示。每个 SSC 大约是 50 cm 长、1.7 mm 厚,与定子槽等宽,其材料为环氧玻璃层压薄板。薄板的上平面固定一根检测线,其两端各接有一根输出同轴电缆;薄板的下平面为接地面。定子槽耦合器在频率从 10~1 000 MHz 范围内有相当好的频率响应,因此它能检测出沿定子槽的任何高频信号的真实脉冲波形,每台电机通常装 6 个 SSC。

定子槽耦合器的重要特点是对局部放电和电噪声能产生不同的脉冲响应。理论研究与实际测量表明,定子绕组产生的局部放电脉冲宽度明显小于噪声脉冲的宽度,这是因为噪声经绕组传播时定子绕组起自然滤波作用的结果。脉冲宽度的差别很容易把定子局部放电和所有的噪声区别开来。大约 150 台发电机与重要的电动机(如核反应堆的冷却泵用电机)已经装有这种 SSC。

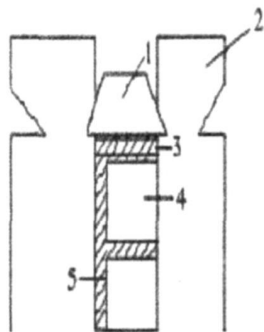


图 3 定子槽安装耦合器方法

这种方法适用于大型汽轮发电机的监测,其优点

是便于把局部放电和所有噪声区别开来;但此法要求在电机内部槽楔下面埋设特制的 SSC,故在耦合器的制作与埋设上所付代价较大。

2.4 引出线上耦合器监测法

这种方法是把每相两个耦合器(每台电机装 6 个耦合器)安装在电机接线端与电源引线上,如图 4 所示,靠近电机的耦合器记为 N,远离电机的耦合器记为 F。这种耦合器一般采用高压耦合电容器(80 pF, 15 kV),两个耦合器之间至少相距 2 m。而在电机监测中,有时是采用高频电流互感器。

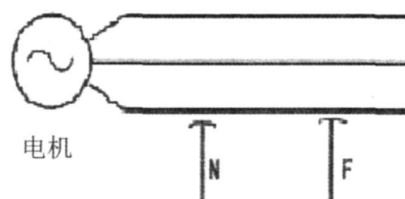


图 4 电机引出线一相所装的耦合器

由图 4 可以看出,当定子绕组产生局部放电脉冲时,耦合器 N 先检测到局部放电信号,经过一定延时后,耦合器 F 才检测到局部放电信号;反之,来自电机外部的噪声,则耦合器 F 比耦合器 N 先检测到。因此,根据装于同一相上的哪一个耦合器先检测到脉冲信号,就能区别是定子的局部放电还是外部噪声。这种方法已应用于大约 500 台电机上^[5]。

在实际应用中耦合器 N 通常装在电机的出线端的接线盒内,耦合器 F 则装在开关柜内或 TV 箱内。而对于高压电动机耦合器 F 有时就不装了,即每相只装一个耦合器 N 于出线端盒内,因为多数电动机与开关柜之间的电缆线很长,长电缆线对电机外部噪声起到了滤波的作用。当然,如果外部噪声太强,对监测还是有影响。

这种监测方法适用于高压电动机、水轮发电机、同步调相机和容量较小的汽轮发电机,也就是说适用于那些噪声源于外部的高压电机。此法优点是耦合器不用安装在电机内部,局部放电信号与外部噪声信号便于区别;缺点是不便识别源于电机内部的噪声,因此不适用于大型汽轮发电机的监测。

3 结 论

(1) 电机中的局部放电是由于绝缘材料中的空穴在局部场强的作用下产生的,电机局部放电分为三种类型:内部放电、端部放电、槽间放电。

(2) 电机局部放电在线监测与常规的离线绝缘测试相比,具有方便、灵敏、有效、无损伤的优点,能尽早发现电机绝缘内部故障,有利于有计划、合理地安排维修,因此局部放电在线监测是诊断大型电机定子绕组绝缘故障、进行大型电机预知维修的有效方法。

(3) 根据电机的特点选择适合的在线监测局部放电的方法,监测的关键在于把局部放电信号与噪声信号区别开来,尽可能地把噪声抑制或消除。这涉及到两个方面:一是耦合器(或传感器)的研制与设置,要有利于局部放电信号的提取,便于区分和消除噪声;二是信号的处理,首先是分离与消除噪声,然后对局部放电信号作进一步处理,对定子绕组绝缘状况做出诊断。

参考文献

[1] 王旭红. 高压电机的局部放电及其在线监测方法 [J].

(上接第 23 页)

(2) 安装 SVC 对川电外送能力的提高有一定作用,但提高的程度对 SVC 安装地点不是特别敏感,主要与总的安装容量有关,根据仿真分析,每 Mvar 的 SVC 约可提高外送功率 0.384 MW。

(3) 尖山 500 kV 站附近线路发生三相短路故障易引起特高压母线电压大幅度降落,在成都环网上安装 SVC 对特高压无功电压能起到比较明显的作用,其中以尖山、龙泉、蜀州加装 SVC 效果最好。另外,在仿真中可以看出,分散安装 SVC 的效果要优于集中安装。

参考文献

[1] M. Moghavvemi, M. O. Farique. Effects of FACTS Devices on Static Voltage Stability. ENCON Proceedings 2000, (2): 357—362.

[2] 吴国红, 贺家李, 余贻鑫, 等. FACTS 装设最佳设置点的选择指标 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 57—60.

长沙电力学院学报(自然科学版), 2002, 17(1): 23—25.

[2] 李武峰. 大型发电机定子局部放电在线监测技术的研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2002.

[3] 刘立生, 邱阿瑞. 高压电机局部放电在线监测方法 [J]. 电工电能新技术, 1999, (3): 23—27.

[4] 刘辉. 发电机定子绕组局部放电监测技术 [J]. 河北电力技术, 2007, 26(1): 8—9.

[5] 陈卓. 大型发电机定子绝缘局部放电在线监测的研究 [D]. 四川大学硕士学位论文, 2005.

作者简介:

崔东君 (1984—), 硕士生, 研究方向电力系统安全监控和故障诊断技术。

刘念 (1956—), 博士, 四川大学教授, 研究方向电力系统安全监控和故障诊断技术、过电压保护等。

(收稿日期: 2009—05—23)

[3] 包黎昕, 段献忠, 陈峰, 等. SVC 和 TCSC 提高电压稳定性作用的动态分析 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 21—25.

[4] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖, 等. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[5] 艾欣, 蔡国伟, 徐兴伟, 等. 伊敏—大庆 500kV 系统采用 SVC 提高稳定水平的研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(3): 54—57.

[6] 刘宪林, 王鑫. 单机—SVC—无穷大系统机电模式阻尼特性分析. 郑州大学学报(工学版), 2007, 28(3): 87—90.

[7] 王海风, 李乃湖, 陈珩, 等. 静止无功补偿器阻尼电力系统振荡 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 190—195.

[8] 张鹏飞, 付红军, 鄢安河, 等. 应用 SVC 提高电网输电能力的研究 [J]. 电力设备, 2007, 8(3): 28—31.

[9] 高文建, 马世英. 动态无功补偿技术在西电东送通道中的应用研究 [J]. 广西电力, 2008, (4): 6—10.

(收稿日期: 2009—05—12)

欢迎订阅《四川电力技术》

一种新的三端电气量行波测距方案

焦征南, 吕飞鹏, 胡亚平, 周 鑫

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:在现有的行波测距基础上,提出了基于数学形态学的三端电气量行波测距方案,先利用广义形态滤波器滤除现场信号中的噪声和脉冲信号,再利用综合数学形态梯度提取行波模板大值,快速准确检测出故障点。通过仿真验证了在选取合适的结构元素下,此方案是有效可行的。

关键词:数学形态学;广义形态滤波;综合数学形态梯度;行波测距

Abstract On the basis of the existing travelling wave fault location, a new scheme of three-terminal travelling wave fault location based on mathematical morphology is proposed. Firstly, the general mathematical morphology is used to filter the noise and pulsing signal mixed in the wave signal, and then, the modulus maxima of synthetic mathematical gradient transform is used to find the fault location. The results of simulation verify this scheme is effective and feasible by selecting appropriate structural element.

Key words mathematical morphology; general mathematical morphology filter; synthetic mathematical gradient; travelling wave fault location

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)05—0054—04

0 引 言

在行波测距中,为了准确捕获故障行波波头到达时刻,采样频率往往取得很高,采样信号很容易受到各种噪声信号的干扰,此时需要运用较高灵敏度的检测工具,但高灵敏度的检测工具在准确检测行波波头的同时也放大了噪声信号。通常采用低通滤波方法抑制噪声信号。各种低通滤波算法虽然可以较好地滤除白噪声,但在抑制脉冲噪声方面显得无能为力,且他们在滤除噪声的同时会衰减行波波头的陡度^[1]。目前将小波理论应用于行波测距的研究较多,但小波变换在处理脉冲噪声时同样不理想,其结果相对于输入信号还会带来相位偏移和幅值衰减^[3]。

数学形态学是从集合论和积分几何学发展起来,作为一种新型的信号分析手段,已经在电力系统故障行波信号分析中得到应用^[2],文献[1]证明形态学滤波算法能有效滤除白噪声和脉冲噪声,而且不影响行波波头的陡度。形态变换只做一些逻辑运算和少量加减运算,相比傅立叶、小波变换具有更快的计算速度。

在现有行波测距基础上,提出了基于数学形态学

的三端电气量行波测距方案。利用广义形态滤波后,通过综合形态梯度变换提取故障行波波头模板大值,找出畸变点,确定故障位置。

1 数学形态学基本概念

数学形态学是一门建立在积分几何以及随机集论的基础之上的学科^[4],相对傅立叶和小波等积分变换而言,数学形态学是一种非线性分析方法,其对信号波形特征的研究不是将信号变换到频域空间处理,而是完全在时域中进行,它通过改变输入信号波形的几何特征对信号进行识别、重构及增强。数学形态学的优点在于他只做一些逻辑运算和少量加减运算,和傅立叶变换和小波变换相比具有更快的计算速度,其线性相位上的良好表现取得更好的滤波效果^[3]。在电力系统中,数学形态学用集合描述目标信号,在考察信号时设计一种结构元素的探针,通过该探针在信号中的不断移动,提取有用的信息进行特征分析和描述。

形态学的基本变换包括腐蚀、膨胀、形态开和形态闭等以及形态开、闭的级联组合^[5]。因为电力信号一般为—维信号,所以下面只介绍—维情况下的形态变换即灰度形态变换。设 $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别表示—

维原始信号和一维结构元素,一维欧基里德空间记为 E 两个函数的定义域分别为 $D_f \subseteq E$ 和 $D_g \subseteq E$ 则结构元素 $g(x)$ 对数据 $f(x)$ 的灰度膨胀和腐蚀定义为

$$(\oplus g)(x) = \max\{f(x-z) + g(z) \mid (x-z) \in D_f \text{ 且 } z \in D_g\} \quad (1)$$

$$(\ominus g)(x) = \max\{f(x+z) - g(z) \mid (x+z) \in D_f \text{ 且 } z \in D_g\} \quad (2)$$

在灰度腐蚀和膨胀的基础上定义的形态开、闭运算为

$$f \circ g(x) = (\ominus g \oplus g)(x) \quad (3)$$

$$(f \bullet g)(x) = (\oplus g \ominus g)(x) \quad (4)$$

利用上述四种基本运算,可进一步推导出用于行波测距的广义形态滤波器和综合形态梯度算子。广义形态滤波器能够对强干扰下的电力信号进行有效滤波处理,综合形态梯度算子可以用于突变信号检测。

2 广义形态滤波

开运算和闭运算都具有低通特性,开运算能够使图像边缘光滑,抑制信号中的峰值(正脉冲和噪声),闭运算能够弥补裂缝,滤除信号中的低谷(负脉冲和噪声)。但是形态开滤波器输出幅度偏小,而形态闭滤波器的输出幅度偏大,在具体的滤波过程中,为得到更好的滤波效果,可考虑对开运算和闭运算采用不同的级联方式,构成形态开—闭和形态闭—开滤波器。

$$OC(f(x)) = (f \circ g \bullet g)(x) \quad (5)$$

$$CO(f(x)) = (f \bullet g \circ g)(x) \quad (6)$$

形态开—闭和闭—开滤波器可同时滤除信号中的正、负脉冲噪声,但由于开运算的扩展性和闭运算的反扩展性,它们均存在统计偏移现象,此时开—闭滤波器输出幅度偏小,而闭—开滤波器的输出幅度偏大,在很多情况下,单独使用它们并不能取得最好的滤波效果。采用了形态开—闭和形态闭—开平均组合形式的广义数学形态滤波器。

$$H(f(x)) = \frac{OC(f(x)) + CO(f(x))}{2} \quad (7)$$

3 综合数学形态梯度

在腐蚀和膨胀的基础上定义基本数学形态梯度

(MG)。

$$G_{\text{md}} = (\oplus g)(x) - (\ominus g)(x) \quad (8)$$

由上式可知, MG 是原始信号 $f(x)$ 经结构元素 $g(x)$ 膨胀、腐蚀后的数学差分,是由结构元素定义域内的极大和极小值之差决定的,所以形态梯度的运算受结构元素的大小和原点位置的影响。

MG 运算是突现边缘信息的有效工具,可用来检测加于稳态信号之上的暂态信息。为了提高检测的灵敏度,文献 [3] 给出了一种多分辨形态梯度 (MMG),采用一种斜线型结构元素分别提取上升和下降边沿,利用多分辨思想逐层提取暂态信号。然而,利用多分辨形态梯度提取暂态分量,需选取多层不同的结构元素进行分析,此时要综合考虑这些层之间结构元素的方向、高度和窗宽的配合,因此其适应能力将会受到影响。

从理论上说,对原始信号进行一次综合形态梯度运算,形态膨胀和开运算的结果保留了负奇异信号,形态腐蚀和闭运算的结果保留了正奇异信号,两者进行差分,平稳输出部分抵消,就能得到全部的奇异信号。根据式 (1)、(2)、(8) 定义综合形态梯度检测算子如下:

$$G_{\text{mg}} = (f \circ g \oplus g)(x) - (f \bullet g \ominus g)(x) \quad (9)$$

4 结构元素选取

除了运算方式的组合外,结构元素 (SE) 的选取对形态滤波和信号检测结果有很大的影响。与小波分析的基函数选取类似,形态学分析的结构元素选取同样还没有针对具体应用背景的选择原则,要根据滤波后要保持的信号和要去除的噪声而设计,从而,对于何种 SE 比较适合处理何种具体的问题,需要一次次的试探和证明。在实际应用中,一维信号宜采用非封闭曲线,如直线 SE、斜线 SE、三角折线 SE 等。与此同时还应注意 SE 的长度,因为长度越长,形状越复杂,需要的计算量会快速的增加。经过反复试探,应用长度为 6 的菱形 SE 进行滤波;采用长度为 4、角度为 90 的直线 SE 进行行波模极大值提取,取得较好的结果。

5 三端电气量行波测距方法介绍

如图 1 所示电力系统。

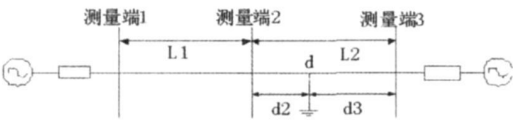


图 1 仿真模型

行波故障测距装置分别装于母线 1、2、3 端，测量端 1 与 2 之间距离为 L_1 ，测量端 2 与 3 之间距离为 L_2 。设故障点距测量端 2 的距离为 d_2 ，距测量端 3 的距离为 d_3 ，采样频率为 f ，时刻对应的采样样本序号为 n ，故障发生时刻为 t_0 ，当故障发生在 L_2 上 d 点时，测量端 1、2、3 分别测到故障行波波头到达时间为 t_{n1} 、 t_{n2} 、 t_{n3} ，设 L_1 、 L_2 线路参数基本相同，则行波在两条线路上的传播速度 $v_{11} \approx v_{12} = v$ 有

$$\begin{cases} (t_{n1} - t_0) v = L_1 + d_2 \\ (t_{n2} - t_0) v = d_2 \\ (t_{n3} - t_0) v = d_3 \\ d_2 + d_3 = L_2 \end{cases} \quad (10)$$

解方程得故障距离为

$$d_2 = \frac{(n_2 - n_3) L_1}{2(n_1 - n_2)} + \frac{L_2}{2} \quad (11)$$

由上式可知，故障距离只与故障行波波头到达测量端 1、2、3 的采样样本序号有关。

6 仿真研究

用 Matlab 建立如图 1 所示双电源 500 kV 系统模型。设距测量端 2 为 100 km 处发生 A 相接地故障，故障发生时刻为 $t = 0.004$ s 加入正负脉冲和噪声情况下，用所提滤波和检测方法进行计算。采样频率 $f = 1$ MHz 线路 L_1 、 L_2 分别为 200 km、150 km。线路结构参数为

- $R_1 = 0.026 \Omega / \text{km}$
- $R_0 = 0.1946 \Omega / \text{km}$
- $X_1 = 0.279 \Omega / \text{km}$
- $X_0 = 0.650 \Omega / \text{km}$
- $C_1 = 0.0127 \mu\text{F} / \text{km}$
- $C_0 = 0.0085 \mu\text{F} / \text{km}$

以测量端 1 处检测波形为例，对比图 2、3 可见通过广义形态滤波，掺杂在故障行波中的脉冲和噪声信号被有效去除，行波波头的陡度保持不变。

测量端 1、2、3 处故障行波滤波后，经综合数学形态梯度变换结果如图 4 所示。

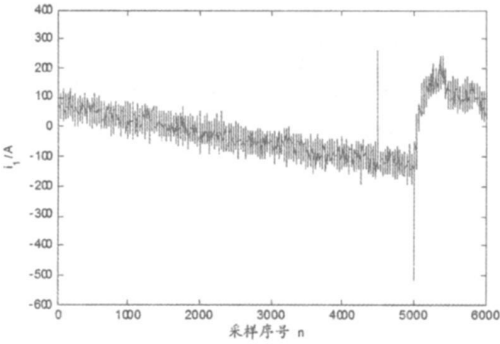


图 2 1 端原始故障波形

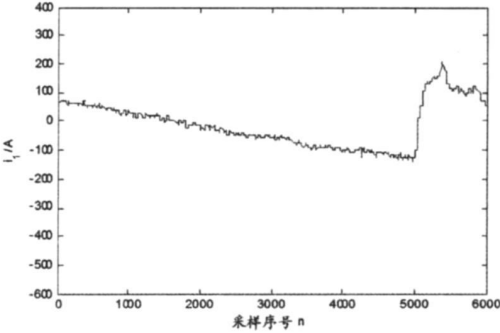
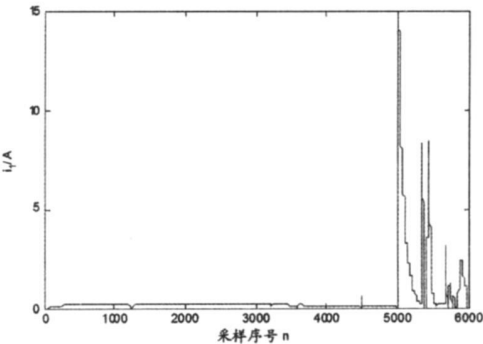
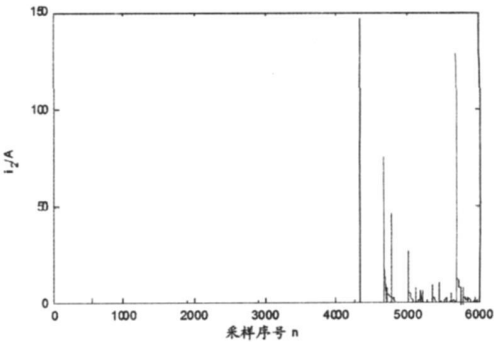


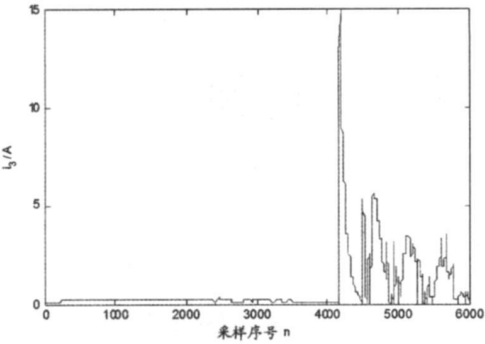
图 3 图 2 信号经广义形态学滤波后波形



(a) 1 端故障波形变换后结果



(b) 2 端故障波形变换后结果



(c) 3端故障波形变换后结果

图 4 三端故障波形经综合数学形态梯度变换后结果

由图 4 可见,经综合形态梯度变换能够准确检测出故障行波波头到达时刻。故障发生时,测得采样样本序号 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为 5 000、4 339、4 173,带入式 (11) 中,求得故障距离为 100.341 4 km,相对误差为 0.34%。不同故障距离仿真结果见表 1,不同故障类型仿真结果见表 2,不同接地电阻仿真结果见表 3。

表 1 A相接地不同故障距离时仿真结果

故障点位置 /km	测距结果 /km	相对误差 /%
20	19.955 5	0.22
40	39.888 9	0.27
80	79.748 8	0.31
100	100.341 4	0.34
120	119.592 6	0.33

表 2 100 km处不同故障类型时仿真结果

短路类型	测距结果 /km	相对误差 /%
AG	100.341 4	0.34
BC	99.962 2	0.03
ABG	99.962 2	0.03
ABCG	99.962 2	0.03

表 3 100 km处不同接地电阻时仿真结果

接地电阻	测距结果 /km	相对误差 /%
20	100.341 4	0.34
50	100.341 4	0.34
100	100.341 4	0.34
200	100.341 4	0.34

通过表 1~3 可以看出,运用提出的故障测距方案可以准确检测出故障点,且不受故障距离、故障类型和接地电阻的影响。

7 结 论

所提出的基于数学形态学的三端电气量行波测距方案,可以有效分离故障信号与噪声和脉冲信号,快速准确找出故障点,适用于复杂环境下故障测距。这种故障测距方案与结构元素的选取密切相关,为了得到更准确的检测精度,如何选择一种更有效的结构元素,有待进一步研究。

参考文献

[1] 林湘宁,刘沛,刘世明,等. 电力系统超高速保护的形态学——小波综合滤波算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 19—24.

[2] 全玉生,李学鹏,杨俊伟,等. 数学形态学算子在电力系统突变信号检测中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(3): 1—4.

[3] 吴青华,张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 45—49.

[4] 崔屹. 图形处理与分析——数学形态学方法及应用 [M]. 北京:北京科学出版社, 2000.

[5] Heijmans H J A M. Morphological Image Operators [M]. New York: Academic Press, 1994.

[6] 束洪春,李义,宣映霞,等. 对不受波速影响的输电线路单端行波法故障测距的探讨 [J]. 继电器, 2006, 34(8): 1—6.

[7] 张峰,梁军,张利,等. 基于三端行波测量数据的输电线路故障测距新方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8).

[8] 艾斌,吕艳萍. 基于小波模极大值极性的行波信号识别 [J]. 电网技术, 2003, (5): 55—57.

[9] 欧阳森,王建华,宋政湘,等. 基于数学形态学的电力系统采样数据处理方法 [J]. 电网技术, 2003, 27(9): 61—65.

作者简介:

焦征南 (1985—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究;

吕飞鹏 (1968—),男,博士,教授,从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究。

(收稿日期: 2009—06—10)

(上接第 16 页)

[7] 电力工业局,贵州省气象科研所编著. 覆冰文集 [C]. 贵州电力技术, 1992.

[8] 云南省气象科学研究所编著. 云南高海拔地区电线覆冰问题研究 [C]. 云南:云南科技出版社, 1993.

[9] 戚大安,刘星灿. 多措并举,积极防治电网覆冰灾害 [J]. 国家电网, 2007, (1): 53—55.

[10] 苑吉河,蒋兴良,易辉等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状 [J]. 高电压技术, 2004, (1): 6—9.

作者简介:

赵永生 (1982—),男,硕士,从事高电压技术、输电技术的研究。

王富荣 (1952—),男,副教授,长期从事高电压技术、输电线路运行维护的研究。

(收稿日期: 2009—10—29)

基于改进蚁群神经网络的短期负荷预测

周 曲, 邱晓燕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 在传统神经网络负荷预测的基础上, 采用蚁群算法优化神经网络的权值, 同时再用模糊逻辑对影响负荷的随机因素进行修正, 提出了改进的蚁群神经网络算法。对四川某 500 kV 变电站进行短期负荷预测, 结果表明这一算法能获得较高的预测精度, 是一种行之有效的短期负荷预测方法。

关键词: 短期负荷预测; 蚁群算法; BP 神经网络; 模糊逻辑

Abstract: Based on the traditional NN (neural network) load prediction, ant colony algorithm is used to optimize the weights of NN. Then, the fuzzy logic is used to modify the random factor which influences the load, and an ant colony neural network (ACONN) algorithm is proposed. Practical example indicates that the application is feasible and effective, which can obtain more accurate result than the conventional methods.

Key words: short-term load forecasting; ant colony algorithm; BP neural network; fuzzy logic

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0058-04

0 引 言

电力系统短期负荷预测是调度中心制订发电计划及发电厂报价的依据, 也是能量管理系统 (EMS) 的重要组成部分, 对电力系统的运行、控制和计划都有着非常重要的影响。

目前电力系统短期负荷预测方法大致可以分为两类^[1]。一类是以时间序列法为代表的传统方法, 例如时间序列法、回归分析法、状态空间法等, 这些方法算法简单, 速度快, 应用广泛, 但由于电力负荷变化受天气情况 (如季节更替、天气因素突然变化等) 和人们的社会活动 (如重大文体活动、节假日等) 等因素的强烈影响, 存在大量非线性关系, 使得这些方法的模型很难准确描述预测负荷的实际, 故精度较差。另一类是以人工神经网络^[2, 3]为代表的新型人工智能方法, 该算法具有很强的记忆能力、非线性映射能力以及强大的自学习能力, 因而能够迅速地拟合出负荷变化曲线。然而网络的训练通常是一个复杂的大规模优化问题, 随着训练样本集和网络初始权值的变化, 网络的训练结果随机性较大, 存在着收敛速度慢和容易陷入局部极值等缺点, 这给实际建模带来了一定的困难。针对神经网络的不足, 应用蚁群优化算法对其进行改进, 提出蚁群神经网络 (ACONN) 算法, 并

将其运用于电力系统短期负荷预测。

1 蚁群优化算法的基本原理

蚁群优化算法 (ACO)^[4] 是受到蚂蚁群搜索食物过程的启发而产生的, 通过对蚂蚁群行为的研究, 发现蚂蚁个体行为虽然非常简单, 但由简单个体所组成的群体却表现出极其复杂的行为。蚂蚁个体之间通过一种称之为外激素的物质进行信息传递, 即蚂蚁在运动过程中在它所经过的路径上撒播该种物质; 而且蚂蚁能够通过感知这种物质来指导它们运动方向。因此, 由大量蚂蚁组成的蚁群的集体行为便表现出一种信息正反馈过程: 即某一路径上走过的蚂蚁越多, 则后来者选择该路径的概率就越高。蚂蚁个体之间就是通过不断的信息交流来实现搜索食物的目的, 为清晰起见, 该过程可以用图 1 来描述^[5, 6]。

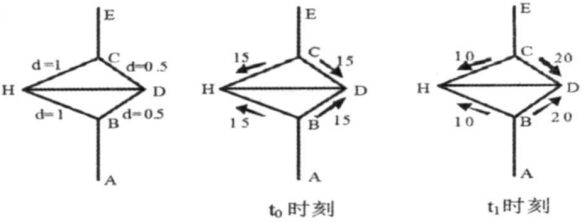


图 1 蚂蚁搜索食物示意图

设 A 是蚁巢, E 是食物源, HD 为障碍物。由于

障碍物的存在, 蚂蚁只能由 A 经 H 或 D 到达 E 或由 E 经 H 或 D 到达 A, 各点之间的距离如图所示。设每个时间单位有 30 只蚂蚁由 A 到达 B, 有 30 只蚂蚁由 E 到达 C, 每只蚂蚁过后留下的激素量 (一般称为信息素, Information Element IE) 为 1。

在初始时刻 t , 由于路径 BH、BD、CH、CD 上均无信息素存在, 位于 B 和 C 的蚂蚁可以随机选择路径。从统计的角度可认为是以相同的概率选择这四条路径。经过一个时间单位后, 由于 BHC 的长度是 BDC 长度的两倍, 假设个体撒播的 IE 是相等的, 则 BDC 上的信息素量是 BHC 上的两倍。因此 t 时刻, 将有 20 只蚂蚁由 B 和 C 到达 D, 有 10 只蚂蚁由 B 和 C 到达 H。随着时间的推移, 蚂蚁将会以越来越大的概率选择路径 BDC, 最终完全选择路径 BDC, 从而找到由蚁巢到食物源的最短路径。

ACO 算法是一种具有通用目的的内启发式算法, 可适用于求解大规模的组合优化问题。在 ACO 算法中设了一个代理集, 在代理集中每个成员都像是相互协作的人工蚂蚁一样工作, 通过撒播在“搜索路径”上的 IE 来交换信息, 最终实现问题的解。人工蚂蚁移动时, 表现为一边建立问题的解, 一边又通过加入新的 IE 不断修改问题的描述。必须指出, ACO 算法中的人工蚂蚁与实际蚂蚁是有某些区别的^[7], 人工蚂蚁是作为一种最优工具来运作, 并不是自然界中实际蚂蚁的模拟。由此可见, ACO 算法的主要特征是: 正反馈作用有助于快速发现较好的解; 分布式的计算可避免迭代过程中的早熟现象; 启发性收敛则使搜索过程中更早发现可接受解成为可能。

2 基于蚁群算法的改进神经网络系统 ACONN 的短期负荷预测

2.1 短期负荷预测的神经网络模型

应用人工神经网络进行负荷预测, 就是要依靠负荷的历史记录, 对未来的负荷做出预测。电力系统的负荷变化具有随机性、连续性、周期性、波动性和非线性, 同时受很多因素的影响。对于负荷的非线性, 用 3 层神经网络可以任意地逼近它^[8]。3 层神经网络结构如图 2 所示。

第一层是输入层, 有 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 个输入单元; 第二层是隐单元层, w_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k$) 是第一层与第二层间的连接权, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ 是阈值; 第三层是输出层, $y_1, y_2, \dots, y_m$ 是输出单元, q_{jl} ($j=1, 2, \dots, k; l=1, 2, \dots, m$) 是第二层与第三层间的连接权, $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$ 是阈值。

$\dots, k; l=1, 2, \dots, m$) 是第二层与第三层间的连接权, $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$ 是阈值。

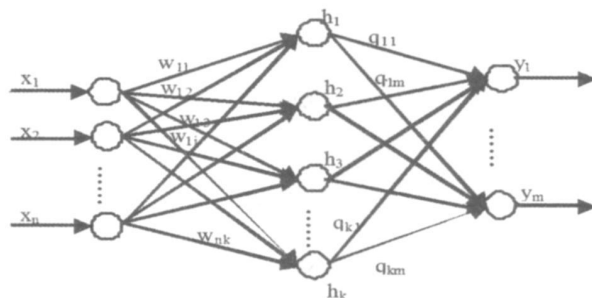


图 2 三层 BP 神经网络模型

$$h_j = f\left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij} \times x_i - \theta_j\right) \quad j=1, 2, \dots, k \quad (1)$$

$$y_l = f\left(\sum_{j=1}^k q_{jl} \times h_j - \delta_l\right) \quad l=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

由于建模的困难和计算的复杂性, 在实际预测的神经网络的输入问题上, 根据对历史负荷数据规律的分析, 可把负荷分为基本负荷分量和变动负荷分量, 采用蚁群算法优化神经网络的权值来对负荷的基本分量进行预测, 即 ACONN 系统, 然后用模糊逻辑对影响负荷变化的变动分量进行模糊修正。根据负荷变化的周期性, 选取如下负荷输入变量作为神经网络的输入: 6 个输入数据 (前一天同一时刻前后 3 个历史负荷数据, 上一星期当日同时刻前后 3 个历史负荷数据)。

$$x(d, t) = f(x(d-1, t-1), x(d-1, t), x(d-1, t+1), x(d-7, t-1), x(d-7, t), x(d-7, t+1)) \quad (3)$$

由 Kolmogorov 定理及经验, 选取具有 7 个神经元的隐含层, 包含 $6 \times 7 + 7 \times 1 + 7 + 1 = 57$ 个权值和阈值; 1 个输出神经元 (预测点), 其中所有输入、输出量都要进行归一化处理。

2.2 ACONN 系统的短期负荷预测的具体步骤

假定神经网络中有 m 个待优化的参数, 其中包括所有的权值和阈值。首先, 对这些参数进行排序, 记为 $p_1, p_2, \dots, p_m$, 对于任一参数 p_i ($1 \leq i \leq m$), 将其设置为 N 个随机非零值, 形成集合 I_i , 然后定义蚂蚁的数目为 S 这些蚂蚁从蚁巢出发去寻找食物。每只蚂蚁从第 1 个集合出发, 根据集合中每个元素的信息素状态, 随机地从每个集合 I_i 中选择一个元素。当蚂蚁在所有集合中完成元素的选择后, 它就到达了食物源, 并按原路径返回蚁巢, 同时调节集合中所选元素的信息素。这一过程反复进行, 当全部蚂蚁收敛到

同一路径时,也就意味着找到了网络参数的最优解。

蚁群算法的主要步骤如下。

1)初始条件:令集合 $I_i (1 \leq i \leq m)$ 中的元素 j 的信息素 $\tau_j(I_i)(t) = C (1 \leq j \leq N)$, 蚂蚁的数目为 S 全部蚂蚁置于蚁巢, 设置最大迭代次数为 NC_{max} 。

2)启动所有蚂蚁, 每只蚂蚁从集合 I_i 开始, 按照下述规则依次在每个集合中选择一个元素, 直到蚁群全部到达食物源。

路径选择规则: 对于集合 I_i , 任意一只蚂蚁 $k (1, 2, \dots, s)$, 根据下式计算的概率随机地选择它第 j 个元素。

$$Prob(\xi(I_i)) = (\tau_j(I_i)) / \sum_{u=1}^N \tau_u(I_i) \quad (4)$$

3)当所有蚂蚁在每个集合中都选择了一个元素, 计算用各蚂蚁所选权值作神经网络参数时训练样本的输出误差, 记录当前所选参数中的最优解。设该过程经历的时间为 m 个时间单位, 对所有集合 $I_i (1 \leq i \leq m)$ 中各元素的信息素按下式做调节。

$$\tau_j(I_i(t+m)) = \rho \tau_j(I_i(t)) + \Delta \tau_j(I_i) \quad (5)$$

其中, 参数 $\rho (0 \leq \rho \leq 1)$ 表示信息素的持久性, 即残余信息的保留部分, $1 - \rho$ 则表示 t 时刻与 $t+m$ 时刻之间信息素的消逝程度。

$$\Delta \tau_j(I_i) = \sum_{k=1}^S \Delta \xi_k(I_i) \quad (6)$$

$\Delta \tau_j(I_i)$ 表示在本次循环中第 k 只蚂蚁在集合 I_i 的第 j 个元素 $P_j(I_i)$ 留下的信息素, 可用下式来计算。

$$\Delta \tau_j^k(I_i) = \begin{cases} Q / e^k & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中} \\ & \text{选择了 } I_i \text{ 中的第 } j \text{ 个元素} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

式中, Q 是常数, 用来表示蚂蚁完成一次循环后所释放的信息素总数。它用于调节信息素的调整速度; e 是以蚂蚁 k 选择的元素作为神经网络的权值时各训练样本的最大输出误差, 定义为

$$e^k = \max_{n=1}^h |O_n - O_q| \quad (8)$$

式中, h 是样本数目, O_n 和 O_q 是神经网络的实际输出和期望输出。由此可见, 误差越小, 信息素增加的就越多。

4)重复上述步骤 2、3 直到所有蚂蚁全部收敛到一条路径或达到最大迭代次数, 输出最优解, 算法结束。

网络权值训练完成后, 将这个最优的权值作为 BP 网络的权值, 进行基本负荷的预测。

2.3 模糊修正

负荷的变化受温度、日期、及节假日的影响较大。一般来说负荷需求随气温升高而升高, 随着气温的降低, 由于取暖设备的使用, 负荷需求也会升高; 工作日负荷比周末大, 节假日负荷比正常日小, 而这些影响因素是模糊的、不确定的概念, 现在还没有足够准确的预报方法可以作为负荷变化的依据。模糊理论就是用来解决这种不确定性的有力工具。而实际生活中的温度不是以模糊集合的形式给出的, 对于这种输入为非模糊集合的推理过程, 需要构造特有的隶属函数, 并引入模糊化的处理过程, 把准确的数值转换成模糊集合^[9]。使用预测日的平均温度 T 作为输入模糊变量, 例如温度取 7 个模糊语言变量: NB(负大), NM(负中), NS(负小), ZE(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大); 类型日 D 定义为星期一到星期五为工作日(WD), 星期六, 星期天为周末节假日(WE); H 为 4 个模糊语言变量即春节(C)、五一(W)、国庆(G)、元旦(Y)。I 作为输出变量定义为对基本分量修正的百分比数。该输出变量取 7 个模糊语言变量值: NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB。根据已知的输入和输出对应的隶属函数, 考虑专家及工作人员的经验, 采用模糊条件语句即“if... and... then...”推理方法, 建立模糊规则库, 根据经验有

Rule1: if T is PM and D is WD and H is none then I is ZE;

Rule2: if T is PS and D is WE and H is G then I is PM; ...

通过模糊规则库把温度、类型日和节假日对负荷曲线的影响被考虑到负荷预测中, 再通过解模糊获得一天中各时段变动性负荷分量相对于真实负荷值产生的相对误差 σ , 可以得到最终的预测负荷值为

$$Lf(i) = Lb(i) + Lb(i) \frac{\sigma(i)}{100} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, 23) \quad (9)$$

其中, L_f 为最终预测值; L_b 为 ACONN 网络输出的基本负荷分量; σ 为模糊矫正误差值; i 表示一天的 24 个小时。

3 预测实例

通过四川某变电站的 4 月 24 日到 5 月 30 日的历史负荷数据, 预测 5 月 31 日的负荷。对于神经网

络,采用有监督的学习方式,让 6 个输入样本对应 1 个输出样本,一共 24 组,隐含层采用 7 个神经元构造,误差收敛因子为 0.02,隐含层和输出层的激励函数为非线性 Sigmoid 函数。该网络的连接权数目 $m=57$ 。蚁群算法参数选为 $\rho=0.7$, $S=25$, $Q=30$,神经网络参数为 $[-1, 1]$ 之间的随机数, N 取 30。

预测值与实际值的比较如表 1 和图 3 所示。

表 1 预测结果及误差

预测时刻	实际值 /MW	ACONN 算法预测值 /MW	ACONN 算法误差 /%	BP 算法预测值 /MW	BP 算法误差 /%
0	852.58	860.59	0.94	867.67	1.77
1	818.87	821.08	0.27	831.97	1.60
2	787.34	781.67	-0.72	800.88	1.72
3	759.01	756.13	-0.38	776.77	2.34
4	775.77	764.91	-1.40	796.10	2.62
5	809.20	811.22	0.25	817.86	1.07
6	777.96	782.47	0.58	760.14	-2.29
7	805.61	799.97	-0.70	787.56	-2.24
8	755.01	756.67	0.22	745.87	-1.21
9	744.02	744.39	0.05	726.68	-2.33
10	808.52	806.09	-0.03	795.02	-1.67
11	838.51	835.24	-0.39	827.36	-1.33
12	902.07	898.64	-0.38	913.17	1.23
13	854.62	842.66	-1.40	858.81	0.49
14	826.32	828.39	0.25	836.40	1.22
15	833.89	838.73	0.58	814.63	-2.31
16	842.48	836.58	-0.70	819.82	-2.69
17	878.20	880.13	0.22	863.71	-1.65
18	964.67	965.15	0.05	979.24	1.51
19	905.32	905.05	-0.03	910.30	0.55
20	946.78	943.09	-0.39	926.90	-2.10
21	977.52	974.78	-0.28	958.17	-1.98
22	948.47	951.88	0.36	937.75	-1.13
23	933.62	936.14	0.27	924.47	-0.98
平均相对误差 /%		0.45		1.67	

由表 1 可以看出所提出的 ACONN 预测方法预测的平均误差为 0.45%,最大误差为 1.40%。而采用梯度下降训练权值的传统 BP 算法预测的平均相对误差为 1.67%,最大误差为 2.69%。因此,提出的预测方法可以得到较高的负荷预测精度。

从图 3 可以很直观的看出,应用蚁群算法优化后的神经网络预测出的负荷更接近于实际的输出,而传统的 BP 算法相对来说精度要低一些。

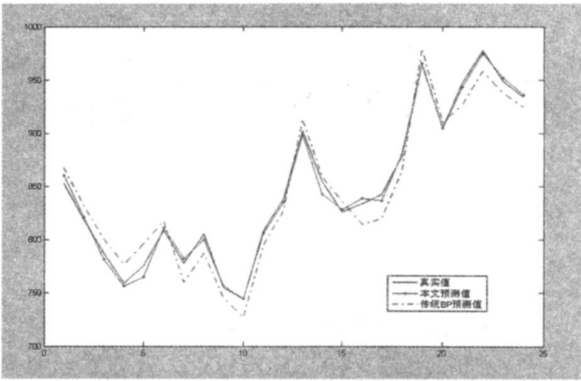


图 3 预测曲线与实际负荷曲线

4 结 论

应用蚁群算法优化神经网络的连接权值,克服了传统 BP 网络容易陷入局部最优的缺陷,同时又将变动负荷分量用模糊逻辑修正,明显地提高了网络的预测精度,更能显示负荷的整体综合特性。实际算例表明,所提出的改进蚁群神经网络算法是进行电力系统短期负荷预测的一种行之有效的方法,在工程上具有一定的应用价值。

参考文献

[1] 康重庆,夏清,张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 1—11.

[2] 李林川,夏道止. 应用人工神经网络进行短期负荷预测 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1994, 6(3): 33—40.

[3] 姜勇,卢毅. 基于相似日的神经网络短期负荷预测方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(6): 35—40.

[4] 李士勇,陈永强,李研,等. 蚁群算法及其应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.

[5] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics Part B, 1996, 26(1): 29—41.

[6] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. An investigation of some properties of an ant algorithm. Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature Conference (PPSN '92) [A]. Brussels Belgium: Elsevier Publishing, 1992: 509—520.

[7] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53—66.

[8] 孙增圻. 智能控制理论与技术 [M]. 北京: 清华大学出版

(下转第 94 页)

可见,经互感器、变压器变比折算后,忽略变压器损耗,电能表反应的功率和低压侧的 B 相负载功率一致,故能正确计量低压侧的电量。

3 低压侧只接入 C 相负载

3.1 折算后高压侧的二次电流

同 A 相接入负载一样,利用对称分量法,分解出低压侧 C 相电流的正序、负序、零序三组分量,将正序、负序分量叠加,得到高压侧的二次电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_c &= \frac{2}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_1}; \dot{I}_a = -\frac{1}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_1}; \\ \dot{I}_b &= -\frac{1}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_1} \end{aligned}$$

3.2 电能表计量原理分析

根据以上结论,可以得出高压侧计量装置的相量图,见图 5。

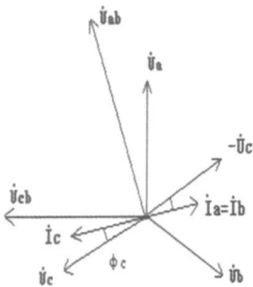


图 5 接入 C 相负载时高压侧计量装置的相量图

$$P_2 = P_a + P_c = U_{ab} I_a \cos(90^\circ + \varphi_c) + U_{cb} I_c \cos(30^\circ - \varphi_c)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{U_{ab} \times \frac{1}{3} I \times \cos(90^\circ + \varphi_c) + U_{cb} \times \frac{2}{3} I \times \cos(30^\circ - \varphi_c)}{K_b \times K_1} \\ &= \frac{U_c I \cos \varphi_c}{K_b \times K_1} \end{aligned}$$

一次功率为

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 \times K_y \times K_1 = \frac{U_c I \cos \varphi_c}{K_b \times K_1} \times K_y \times K_1 = \frac{U_c \times K_y \times K_1 \cos \varphi_c}{K_b} \\ &= U_c I \cos \varphi_c \end{aligned}$$

其中, $\frac{U_c \times K_y}{K_b} U_c$ (低压侧 C 相电压)。

可见,经互感器、变压器变比折算后,忽略变压器损耗,电能表反应的功率和低压侧的 C 相负载功率一致,故能正确计量低压侧的电量。

4 结 论

Y/yn 接线的 10 kV 变压器,在 0.4 kV 侧接入单相负载时,通过互感器、变压器变比折算后,忽略变压器损耗,电能表反应的功率和低压侧的单相负载功率一致,因此,这种极端不对称运行方式下,电能表能正确计量低压侧的电量。同时,当接入单相负载时,负载相电压降低,另外两相电压增高,但线电压仍然对称,此时如果客户在另外两相接入负载,很容易因电压过高烧坏设备,所以 Y/yn 变压器不宜单相负载运行。

参考文献

[1] 孙铁民. 电能计量 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992
[2] 刘万顺. 电力系统故障分析 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1986
(收稿日期: 2009-04-23)

(上接第 61 页)
社, 2000.
[9] 庄媛媛. 基于粒子群的电力系统短期负荷预测 [J]. 微机计算机信息, 2007, (3): 9-11.

作者简介: 周 曲 (1977—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析计算及稳定。
邱晓燕 (1964—), 女, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制, 电力系统电压稳定。
(收稿日期: 2009-06-10)

中国风电装机容量仅次于美、德、西

中国计划今后 10 年建造 7 座大型风力发电基地。中国目前的风电装机容量位列世界第四, 达 12 GW · h, 相当于 24 座平均规模的燃煤电厂的发电量。中国的风电装机容量仅次于美国、德国和西班牙, 但不是所有风电机组都并入了电网。事实上, 目前中国只有 0.4% 的电力来自风力发电。

位于伦敦的新能源财经公司的分析师贾斯汀·吴称, 装机容量与风力发电量之间的差距并非无足轻重。他说, 将风电厂并入国家电网非常困难和昂贵, 因为风电的不稳定性会给电网增加负担。他表示, 要克服这项困难, 电网需要进行昂贵的升级改造, 研究报告没有考虑这些因素。凭现有的技术, 一个国家的能源需求不可能全部来自风电, 因为这需要先进的电网技术。

基于 WAMS 的互联电网联络线定功率控制系统设计

李 强

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:随着全国联网和电力市场的逐步推进,迫切要求对互联系统间的联络线输送功率进行有效控制。选择发电机输出功率转移分布因子法 (GSDF) 做控制算法,设计了基于 WAMS 平台的联络线定功率控制系统及其实现方案。采用功能划分、线程分解、并行处理、存储静态参数库等方法,使系统实时在线应用成为可能。算例研究表明,算法具有较高的精度,功率调整方便快捷,为在线监视、调整、控制联络线潮流提出了广阔的工程应用前景。

关键词:WAMS 互联系统;联络线控制;发电机输出功率转移分布因子法

Abstract: With the development of the nationwide power grid interconnection and power market, the effective control of inter-area tie-line power transmission is strongly demanded. Generation shifted distribution factor (GSDF) is selected as the control algorithm. The tie-line scheduled power control system and its implementation scheme are designed based on WAMS platform. The methods such as function division, thread decomposition, parallel processing and storage static parameter library are used to realize the real-time online application of the system. The examples indicate that it has a high accuracy and can be easily adjusted, which provides a bright future of online monitoring and controlling of tie-line power flow.

Key words: wide area measurement system (WAMS); interconnected system; tie-line control; generation shifted distribution factor (GSDF)

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0062-05

0 引 言

随着“西电东送、全国联网、南北互供”战略的实施,电网互联正逐步进行。目前,除了大区内各省间电网与周边省互联外,大区电网之间也都通过交流或直流线路实现了互联,如华中与华北电网、川渝电网实现交流联网;通过直流与西北电网、华东电网进行了联网。电网互联主要效益之一是通过联络线进行区域间功率互换,优化资源配置,这就需要进行联络线定功率控制,维持联络线功率在给定值、避免非协议内功率在联络线流动。

此外,随着联网工程的实施,电力市场也被逐步提上日程,华东、华中、南方电网正模拟交易。电力市场环境下,各利益方都想通过联络线尽可能多的输送功率,由于联络线控制复杂,目前大区间的联络线交换功率一般都是定值,如西北电网通过灵宝直流送电华中 360 MW,华中电网通过三广直流送电南方电网 3 000 MW。如何在系统安全稳定运行的基础上,通过联络线进行优化控制,提高输送功率,也是电力市场改革顺利进行的關鍵。

广域测量系统 (wide area measurement system, 以下简称 WAMS) 是以 PMU 装置为基本组成元件构成的新一代全网监测系统,目前已被应用于系统分析多个领域,如低频振荡分析与控制^[1,2]、状态估计^[3]、广域保护^[4]、受扰轨迹预测^[5]、电压稳定性分析^[6]等多个领域,将 WAMS 系统引入联络线定功率控制的研究还鲜有所见,仅文献 [7] 做了基于 WAMS 的潮流转移识别算法。因此,进行了基于 WAMS 的联络线定功率控制研究。在介绍 GSDF 控制算法基础上,提出了基于 WAMS 的联络线定功率控制系统构建方案,并进行了算例测试,为在线监视和控制联络线有功潮流维持在恒定值提供了新思路。

1 发电机输出功率转移分布因子法

发电机输出功率转移分布因子 (generate shifted distribution factor GSDF)^[8] 的含义是当发电机节点 i 的有功功率改变单位值时,支路 k 的有功潮流变化量。因此可根据联络线功率给定值和实际值的差值,由 GSDF 反过来调整各发电机有功出力,达到联络线功率的控制。

若电网中联络线 l 的有功功率需要控制。调整前联络线 l 的有功潮流是 P_l , 调整后要控制到 P_l^* , 调整量是 ΔP_l , 则有

$$\Delta P_l = P_l^* - P_l \quad (1)$$

若原网络中有 r 个发电机节点有功输出功率可调, 这些节点的有功输出功率改变量是 ΔP_G 时可使支路 l 的有功潮流改变 ΔP_l 。则 ΔP_l 由式 (2) 计算。

$$\Delta P_l = G_{l-G} \Delta P_G \quad (2)$$

灵敏度系数矩阵 G_{l-G} 为

$$G_{l-G} = \frac{X_{l-G}}{x_l} = \frac{M_l^T X_{G_l}}{x_l} \quad (3)$$

式 (3) 中, G_{l-G} —— $1 \times r$ 维行矢量, 它是 r 个发电机节点有功输出功率变化引起支路 l 有功潮流变化的灵敏度系数;

M_l —— 支路 l 的关联列矢量, n 维;

X_{G_l} —— $n \times r$ 阶矩阵, 由单位列矢量组成, 共 r 列, 每列对应一个发电机节点, 该列只在所对应的发电机节点位置处有一个非零元素 1, 其余都为 0;

X —— 直流潮流方程中矩阵 B_0 的逆矩阵, 而 B_0 是用 $1/x$ 为支路参数建立的 $n \times n$ 阶电纳矩阵;

在 G_{l-G} 和 ΔP_l 分别求得后, 理论上根据式 (2) 就可求出可调有功节点的 ΔP_G , 但可调发电机较多, 而被控联络线只有一条 (若联络线有多回, 可进行等效), 即只有一个方程, 但却有 r 个待求量, 数学上可以有无穷多组解, 可利用拉格朗日乘数法求得一组使控制量 (ΔP_G) 最小的解, 经数学推导后, 可得到满足控制量最小的一组解为

$$\Delta P_G = G_{l-G}^T (G_{l-G} G_{l-G}^T)^{-1} \Delta P_l \quad (4)$$

因此, 利用发电机输出功率转移分布因子法控制联络线潮流的步骤如下: ①在潮流迭代接近收敛时, 检查支路 l 的有功潮流, 如果该支路潮流没有达到给定的控制值, 则利用式 (1) 计算该支路潮流所需的调整量 ΔP_l ; ②计算 G_{l-G} 。用 $-B_0$ 的因子表对列矢量 M_l 前代回代一次, 然后在其中取出发电机节点所对应的元素即组成了 X_{l-G} , 然后由式 (3) 求得 G_{l-G} , 也可由式 (3) 直接求取; ③利用式 (4) 计算发电机输出功率的调整值 ΔP_G , 修正发电机节点的给定有功功率, 继续进行潮流迭代直到潮流计算收敛, 支路 l 的有功潮流达到控制值时为止。

与常规的联络线控制算法如逐次迭代修正^[9, 10]、改进的迭代修正算法^[9]相比, 采用发电机输出功率转移分布因子法 (GSDF) 控制联络线潮流到给定值,

原理简单, 且只需要本区域的网络参数和联络线计划值。此外, 可随时修改联络线给定值, 修改后, 只需经过简单的计算就可达到控制值, 而前两种常规算法, 若修改联络线计划值, 则还需修改边界条件, 增加迭代的次数, 为在线应用带来不利因素。可见, 若采用发电机输出功率转移分布因子法控制联络线有功潮流, 结合 WAMS 系统平台, 具有广阔的在线监视和控制联络线潮流的工程前景。

2 控制系统设计

WAMS 系统以 GPS 技术为基础, 利用计算机技术和现代高速数字化通信网络实现全网数据的同步采集、实时记录、远距离实时传递和对数据的实时分析处理, 从而达到对电网动态过程的在线监测。整个 WAMS 体系由 PMU 子站、调度中心站 (即主站)、电力通讯网组成, 其中的 PMU 子站由 GPS、测量、监控、通信 4 个主要功能模块组成, PMU 将不同厂站的数据精确同步的传送到主站, 从而在实时数据库中就能取得同一时标下的系统动态数据, 进而可供各种显示、分析模块实时使用。此外, 主站系统还按照一定的时间间隔, 将历史数据存入历史数据服务器保存, 可供后期离线分析。

因此, WAMS 系统为在线监视、控制联络线潮流提供了平台, 将在以上讨论的算法基础上, 构建基于 WAMS 的联络线定功率控制系统, 提出系统结构设计和实现方案, 并用算例进行测试。

2.1 系统结构设计

其设计思想是: 将整个系统进行功能分解和划分, 除了 WAMS 系统外, 还由三个模块构成: 有效数据预处理单元、GSDF 计算应用程序、参数数据库。将各模块进行线程分解, 组成并列式结构, 模块之间也进行有效地衔接和协调。整个系统的结构设计如图 1 所示。

2.2 各子系统功能介绍

2.2.1 WAMS 中心站和子站

由 PMU 子站、通信通道、调度中心站组成。子站主要经由通信信道上传各子站状态数据、监控数据到 WAMS 中心站; WAMS 中心站接受子站上传的数据, 并将其按照一定的时间间隔写入实时数据库或历史数据库, 以供实时或离线分析。同时接受计算应用程序计算的调整机组出力命令, 并将其下达给相关电厂

的机组执行。该部分由已建好的 WAMS 系统执行，只是加上相应的应用程序接口。

2.2.2 有效数据预处理

该模块是整个系统的基础部分，主要为应用程序提供机组投运、出力、备用，网络结构，传输极限等实时状态数据。该模块先从实时数据库读取数据，然后由启动单元判断联络线功率是否等于计划值，考虑到数据可能存在的一定波动和分散性，采用以下判据：

$$|P_{act} - P_{sch}| \leq C \tag{5}$$

- P_{act} ——联络线支路实际功率值；
- P_{sch} ——联络线计划给定值；
- C ——联络线考虑数据分散性允许的最大偏差。

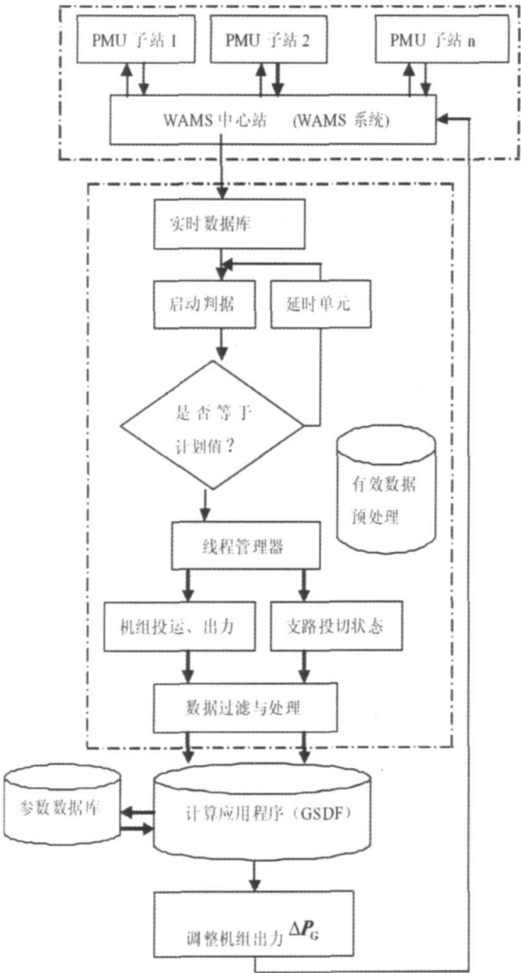


图 1 基于 WAMS 的联络线定功率控制系统结构设计

由以上判据执行相应的命令，延时单元根据系统设定的时间间隔读取联络线数据，循环执行，避免频繁调整。线程管理器利用线程分解和并行处理技术，快速、有效的提取计算应用程序所需的数据。在实际工程应用中，WAMS 系统可能出现数据帧丢失、信号包含高频杂散分量、冗余数据包，为提高定功率控制

效果的精确性和可靠性，需要设置数据过滤和处理单元，从而对信号做插值、低通滤波、去除直流分量、去冗余等处理。许多文献中的系统设计流程都是将该单元置于从数据库读取数据后等较前的环节。这里则做了改进，将其置后，还是为了快速获取有效数据、提高控制的实时性。因为 WAMS 中心站上传的数据包含电厂和变电站两大类，除包含有功、无功功率外，还有正序电压幅值、相角、机组电气内电势幅值、频率、频率变化率等信息。这些海量的数据量以每秒几十帧的频率上传到主站，若按照常规的先滤波再提取的做法，有些电气量不会被使用，却仍要进行数据过滤，大大耗费了 CPU 时间，影响了实时性。改进后，只需对特定类数据做滤波处理，提高了算法的实时性和效率。

2.2.3 参数数据库

建立参数数据库的目的是存储系统静态参数，便于实时、快速的修改网络结构、参数、运行方式。其实质还是基于并行式处理思想，因为对于一个确定的系统，其网络结构和参数在一段时间内（指系统未扩建）是固定的，仅运行方式改变才改变潮流，且在某基础典型运行方式（如丰大运行方式）下，改变运方只是少数机组、支路的改变，很容易修改。基于此思想，参数数据库的建立就为实时计算潮流提供了很大的便利。

系统的运方都是由某时段内的典型方式构成，如丰大、丰小、枯大、枯小、检修方式。参数数据库中存储的就是系统的这些基础典型方式，例如对于丰大方式，存储了网络结构、参数、无功补偿设备的投运及补偿容量、各机组的容量、出力、备用容量、大负荷等系统静态参数，在丰大基础方式下，运方的修改就非常方便，使实时计算潮流成为可能。

2.2.4 计算应用程序

该部分是整个系统的核心计算模块，需要和其它各模块有效的衔接和协调。其具体的实现流程如图 2 所示。如 2.2.3 所述，参数数据库建立后，结合 2.2.2 有效数据预处理模块提供的机组状态、出力、支路状态等实时数据，就可方便、快捷的修改系统的运行参数、网络结构；快速潮流计算主要是为了实时性，可采用直流潮流法、P-Q 分解法、等值网络法等算法^[11]，可结合实时性、计算精度具体选用；判别单元仍可采用 2.1.2 中的判据，只是将联络线实际值换成联络线潮流计算值即可，并根据相应的逻辑值执行相

表 1 联络线定功率控制方式下机组出力调整结果

调整前						调整后				
区域	发电机	有功出力	联络线 实际值 P_{act}	联络线 偏差 ΔP_l	可调机组	调整量 ΔP_G	发电机	有功出力	联络线 实际值 P_{act}	联络线 偏差 ΔP_l
区域 1	G1	729.8	485.4	85.4	可调	16.1	G1	745.9	401.7	1.7
	G2	750			可调	-101	G2	649		
区域 2	G3	643	-480.9	80.9	可调	67	G3	710	-398.7	1.3
	G4	685			不可调		G4	695		

注：以上各功率单位均为 MW。负值表示减出力，增值表示增出力，区域流出联络线功率为正，流入为负，联络线偏差取绝对值，下同。

表 2 改变联络线计划值控制方式下机组出力调整结果

协议功率 400 MW						协议功率 500 MW				
区域	发电机	有功出力	联络线 实际值 P_{act}	联络线 偏差 ΔP_l	可调机组	调整量 ΔP_G	发电机	有功出力	联络线 实际值 P_{act}	联络线 偏差 ΔP_l
区域 1	G1	745.9	401.7	1.7	可调	-28.5	G1	717.4	501.9	1.9
	G2	649			可调	130	G2	779		
区域 2	G3	710	-398.7	1.3	可调	58	G3	768	-497.1	2.9
	G4	695			不可调		G4	695		

应的程序；该模块和其他模块联系紧密、互为依存，需做好各模块间的信息交换和协调工作。

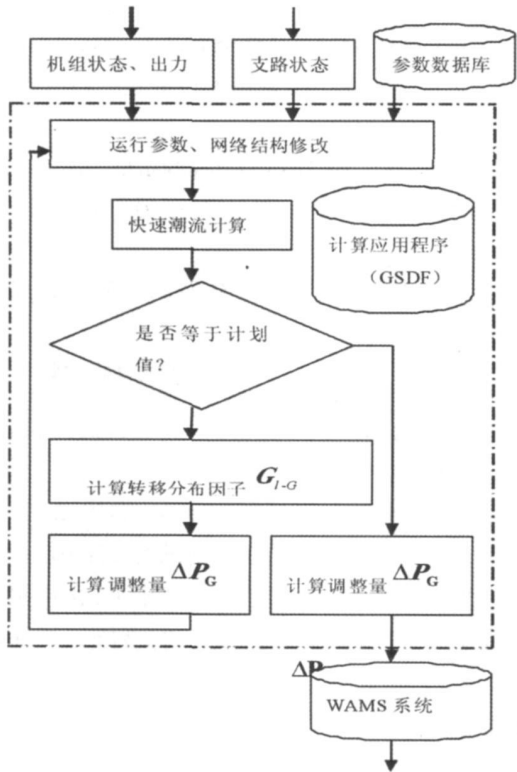


图 2 GSDF 法计算应用程序实现流程

3 算例研究

基于以上算法和设计，则编写了核心计算程序，并以四机两区域系统为算例，以仿真数据代替 WAMS 采集数据作为数据源，进行了算例研究，系统接线图如图 3 所示，系统参数见文献 [12]。

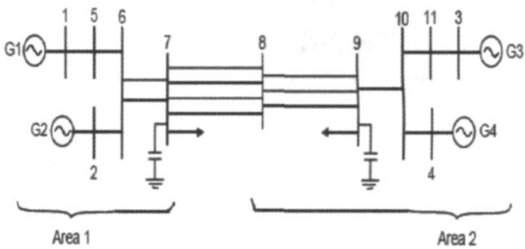


图 3 四机两区域系统接线图

母线 7 和 8 之间线路为联络线。对以下两种方式进行测试：联络线定功率控制；改变联络线计划值。

3.1 联络线定功率控制

电力市场构架下，常需要区域间联络线传输功率维持为计划值，以避免非协议内功率在联络线上流动，符合交易双方的利益。为模拟这一场景，设图 3 区域 1 计划由联络线向区域 2 输送功率 400 MW，由于区域 2 出现扰动，使联络线输送功率偏离计划值，为保持联络线功率为给定值，两区域分别进行调整，程序计算结果如表 1 所示。

3.2 改变联络线计划值

设区域 2 的有功负荷增加 8%，增加 140 MW，改变联络线计划值到 500 MW，即联络线在原协议基础上多输送 100 MW，剩余不足由本区域机组增出力平衡。调整后各机组出力如表 2。

从以上两个工程情景的计算，说明所提算法具有较高精度，能充分利用系统备用容量，区分可调节出力机组，功率调整方便快捷，具有良好的工程前景。

4 结束语

电网互联和电力市场改革迫切需要对联络线进

行实时、优化控制,将 WAMS 系统应用于互联电网联络线控制,以实时控制、在线应用为目标,提出了合理的系统构架方案,并在后期继续深化研究、协调,典型系统对核心计算程序测试表明,算法具有较高的精度、方便快捷、有工程应用前景,具有以下特点。

(1)与常规控制算法相比,采用 GSDF 法作为联络线控制算法,原理简单,只需要本区域的网络和运行参数,此外,可随时修改联络线计划值,程序编制简单,收敛速度快,与 WAMS 系统结合,可在线计算。

(2)对所构建的系统进行了合理的功能划分,将其分解为子模块,各模块之间既独立又相互协调,提高实时性。

(3)线程分解和并行处理设计、参数数据库的建立,大大缩短了数据在程序中的等待时间,从总体上提高了计算应用程序的性能,使在线计算成为可能。

(4)改进了其他在线算法将“数据过滤与处理单元”置前常规做法,将其置于较后环节,使其仅对有效数据进行过滤和处理,提高了算法的实时性和效率。

(5)由于 WAMS 系统投资大,因此仅在网络中中枢节点、重要电厂布置了 PMU,在这些有限的 PMU 节点情况下,其算法该如何改进和所构建的系统模块之间如何有效协调,是今后进一步研究的重点。

所提出的思想在工程中有一定的应用价值。

参考文献

[1] 邱夕兆,于占勋,雷鸣,等.山东电网基于 WAMS 的低频振荡统计与评估[J].电力系统自动化,2008,32(6):1-2

[2] 陈树恒,李兴源.基于 WAMS 的低频振荡模式在线辨识算法[J].继电器,2007,35(20):1-5.

[3] 李大路,李蕊,孙元章,等.计及广域测量信息的状态估计错误参数识别与修正[J].电力系统自动化,2008,32(14):1-4.

[4] 薛禹胜,徐伟,等.关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J].电力系统自动化,2007,31(15):1-5.

[5] 宋方方,毕天姝,杨奇逊.基于 WAMS 的电力系统受扰轨迹预测[J].电力系统自动化,2006,30(23):1-5.

[6] 刘道伟.基于广域测量系统(WAMS)的电压稳定在线监测[D].吉林:东北电力学院电力系统及其自动化系,2005.31-39.

[7] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等.基于 WAMS 的潮流转移识别算法[J].电力系统自动化,2006,30(14):1-5.

[8] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,1996.204,216-219.

[9] 王祖佑.电力系统稳态运行计算机分析[M].北京:水利电力出版社,1987.58-60.

[10] 胡学浩,李汉香.潮流计算中区域联络线功率控制的模拟计算方法初探[J].电网技术,1989,(4):1-2.

[11] 孙莹,王葵.电力系统自动化[M].北京:中国电力出版社,2004.165-166.

[12] Prabha Kunder Power System Stability and Control[M]. McGraw-Hill Companies Inc 1994.525-529.

作者简介:

李 强 (1984—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制。

(收稿日期:2009-05-12)

(上接第 41 页)

表 1 更换绝缘子前后线路的防雷水平

击距 /m	线路防雷水平 /kA	
	S-210 /Z	S-280 /Z
30	27	36
50	44	59
70	62	83

6.3.2 11 号杆更换为 12 m 杆

将原 15 m 的 11 号杆更换为 12 m 杆,更换前后线路的耐雷水平如表 2 所示。可见,更换以后,无论何种击距,11 号杆处防雷水平均可提高 15%。

表 2 11 号杆高度更换前后防雷水平的变化

击距 /m	防雷水平 /kA	
	杆高 15 m	杆高 12 m
30	23	27
50	38	44
70	54	62

6.3.3 安装线路避雷器

东城线避雷器安装数量很少,每相隔 15~17 基安装一组 MOA,不能很好地对线路起到防雷保护作用。建议在原有安装避雷器的基础上,在特别高的杆塔 11 号杆、带拉线的杆塔 16 号杆及终端杆处各安装一组 MOA,在其余线路每隔 6~7 基杆增加一组线路避雷器,以提高该线路的防雷水平。

参考文献

[1] 曾海涛,邹嘉嘉,黄少先.高压配电网 10 kV 大企线路的防雷[J].机电工程技术,2008,37(6):110-112.

[2] 陈中明,郑楚韬.配电网架空线路感应雷过电压产生机理与防护[J].广东电力,2008,21(5):19-22.

[3] 赵莲清,李月乔,刘向军.传输线路感应雷防护计算方法的研究[J].现代电力,2004,21(6):51-55.

(收稿日期:2009-06-10)

配电网合环安全性分析系统的应用及改进

冯小萍², 戚红艳², 樊国伟¹, 常喜强¹, 喻 锋³, 朴宗华²

(1. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 乌鲁木齐电业局, 新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 南瑞继保电气有限责任公司, 广东 深圳 211012)

摘 要:为了保证重要用户的不间断供电,提高城市配电网的供电可靠性,10 kV 配电线路能否带电倒负荷操作这一问题日益突出,为此联合科研院校共同开发了配电网合环安全性分析系统。详细介绍了配电网合环安全性分析系统的原理及功能,并以乌鲁木齐电业局 110 kV 铁西变多条 10 kV 配电线路合环倒负荷操作进行了实际验证,将配电网合环安全性分析系统的计算结果、电力系统分析综合程序 PSASP 计算结果与实际电流分别进行了比较,找出了差异,分析了原因,提出了配电网合环安全性分析系统的改进方向,使该系统更接近与实际系统,为电网 10 kV 配电线路合环操作的优化和安全奠定了基础。

关键词:配网;合环操作;分析系统

Abstract In order to guarantee the uninterrupted power supply of the important consumers and increase the reliability of urban power grid, the problem of closed-loop operation has been prominent in 10 kV distribution networks. The closed-loop analyzing system for distribution network is developed by Urumqi Electricity Company and the cooperation colleges. The principle and the function of the system are introduced, and it is verified by the closed-loop operation in several 10 kV distribution lines of Tiexi substation. By comparing the calculation results of the closed-loop analyzing system and the calculation results of PSASP with the actual current, the differences are found out and the reasons are analyzed. The improvement direction of the closed-loop analyzing system is proposed, which can make the closed-loop operation safer and more excellent.

Key words distribution network; closed-loop operation; analyzing system

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0067-04

0 引 言

随着经济的飞速发展和人民生活水平的不断提高,用户对供电可靠性的要求越来越高,对停电甚至是短时停电都十分的敏感。在配网运行过程中由于检修、施工、负荷调整等原因,经常会出现配网倒负荷操作,目前多数情况下是先断开再合上,避免电磁环网,安全性考虑较多,但造成用户短时停电,供电可靠性降低。如果在操作过程中能实现合环转移负荷,将进一步提高供电可靠性及服务质量。

目前乌鲁木齐配电网结构复杂,10 kV 配电线路之间大多加装了联络开关,形成了配网“手拉手”的供电方式,实现了不同线路之间负荷转供,为合环操作奠定了网架基础。由于合环开关两侧母线或线路存在电压差等原因,可能使合环操作过程中产生过大的环流,这将直接影响到电网的安全稳定运行。乌鲁木齐电网目前也采取“先断后合”的方式。

如果采取不断开直接合环的方式,将大大减少对用户的停电时间,但是需要保证安全性。因此,操作前提前预知相关问题,采取措施满足不断环,合环操作就可将安全性和供电可靠性有机结合起来。通过预先相关计算对配网线路合环进行分析,判断线路能否进行合环倒负荷操作,使运行人员能够提前决策,并对地区电力网络的运行方式进行适当的调整,从而能够进行操作,即保证用户利益,避免停电损失,又保证了电网安全。基于此,乌鲁木齐电业局开展了配电网合环安全性分析系统的研究工作,开发了相关的系统,并进行了有关的理论、实际比对分析,进一步优化和改进分析系统。

1 配电网合环安全性分析系统概述

配电线路能否进行合环操作的关键因素在于计算出来的合环电流是否小于相应线路的保护定值,如果计算结果小于保护定值一定的值时,即可进行合环

倒负荷操作。如果结果相反则可以通过改变运行方式或变压器抽头位置、电容器的投切,馈线负荷分布等来满足带电合环的条件。

配电网合环倒负荷安全性分析系统能根据 10 kV 配电网的实时运行方式将网络物理模型转化为潮流计算用的数学模型,并能与配网调度管理系统接口获得实时的配网运行参数。在现场合环操作前,可以根据配网调度管理系统采集或人工录入的实时运行参数计算合环潮流,并根据该潮流值与保护间的差值判断能否进行实时合环操作。此外该系统具备良好的维护、修改、扩充功能。运行调度人员在合环操作前,根据合环操作的需要,运用分析系统进行分析,根据提示和结果进行操作。

1.1 基本原理

配电网合环分析系统的基础是潮流计算。常规潮流计算的任务是根据给定的电力网络结构及运行条件求出整个网络的运行状态,包括系统各节点(母线)的电压、线路上的功率分布以及功率损耗等。由于潮流计算的已知量与待求量之间是非线性关系,所以,潮流计算问题在数学上是多元非线性代数方程组的求解问题,一般采用迭代方法计算。

而配网合环计算既涉及地区电网,又涉及配电网。由于不易获得实时完整的电网运行参数,配电网合环安全性分析系统将合环计算中的上一级电网采用等值阻抗的方式来进行等效,并利用前推回代法和叠加法一起求得最后的合环电流。其核心为外部等值阻抗的求取、计算分析。

1.2 外部等值阻抗的求取

两个变电站的两条 10 kV 出线与上一级电压等级电网共同形成环网,在这两个变电站 10 kV 母线之间加一个可变的虚拟等值阻抗来代替上一级电网,如图 1 所示。

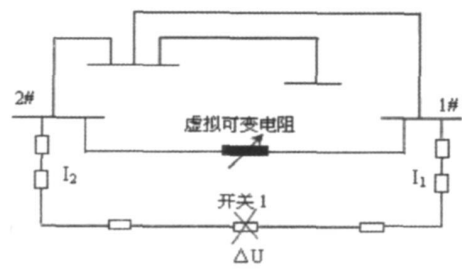


图 1 等效电网图

其等值阻抗的计算步骤如下:由于两条母线的电压和两条 10 kV 出线的电流的遥测值 U_1 、 U_2 、 I_1 、 I_2 都是已知的,取 1 号母线的电压遥测值 U_1 为平衡电压,设其间的虚拟阻抗为某一值,并指定步长为 $1/2Z$ 迭代精度为 ϵ 。

应用前推回代法求出 2 号母线的电压 U'_2 ,把求出的 2 号母线的电压值 U'_2 跟已知 2 号母线的电压遥测实时值 U_2 进行比较,若求出的 2 号母线电压比 2 号母线遥测实时值 U'_2 小,则说明先前假定的虚拟阻抗的值过大,令虚拟阻抗值为原值的 $1/2$ 。

利用前推回代法再次计算 2 号母线的电压值 U''_2 ,若求出的 2 号母线的电压值 U''_2 比 2 号母线电压遥测值 U_2 大,则说明先前假定的虚拟阻抗的值过小,令虚拟阻抗的值为前次值的 $(1+1/2)Z$ 。

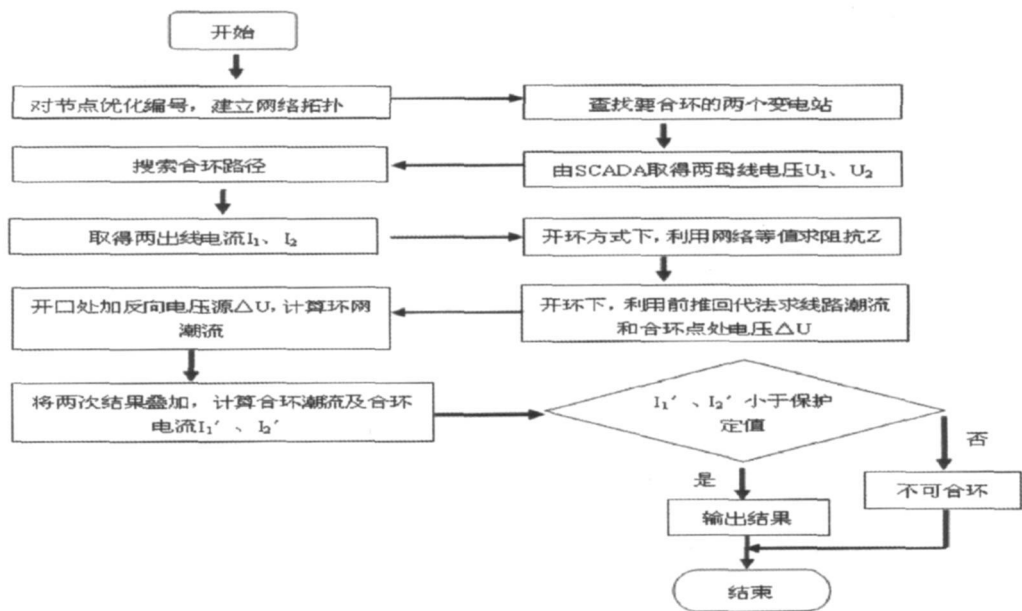


图 2 计算流程图

按照上述的方法迭代计算,每次设步长为上次的 $1/2$ 通过迭代来计算虚拟阻抗的值,直到计算出的 2 号母线的电压值 U_2' 与 2 号母线的电压遥测值 U_2 的差值 $|U_2 - U_2'| < \epsilon$, 则停止计算,此时的可变虚拟阻抗值即为所求的上一级电网的等值阻抗值。

1.3 合环电流的计算

求出等值阻抗后,根据叠加法,先应用前推回代法开环计算一次,求出两支路电流 I_1 、 I_2 和开口电压 ΔU ,再在开口处加反向开口电压 ΔU 再算一次环网环流,二次叠加后,可以算出新的 I_1' 和 I_2' ,根据得到的合环潮流计算结果,以此来判断是否允许合环操作。具体计算流程如图 2 所示。

2 算例分析

铁西变电站是一座 110 kV 变电站,其多条 10 kV 出线加装了联络开关,具备负荷灵活转代条件,能够进行不停电合环操作,其负荷很重要,一般不允许停电。2009 年在配电网合环安全性分析系统建立后,恰好铁西 1 号主变压器停电消缺,需要停电转移负荷,为了理论结合实际,达到理论指导实际,切实为生产服务的目的,2009 年 3 月,以 10 kV 铁木线、铁局线、铁统线、铁指线为试点进行了合环倒负荷操作试验。验证了配电网合环安全性分析系统的实用性和不足,指出改进方向。

此次试验为了保证电网的安全,制订了详细的操作方案,并同时启动了不同的仿真分析计算。分别进行了配电网合环安全性分析系统计算以及电力系统综合仿真分析软件 PSASP 离线仿真分析计算,并将结果进行了比对分析。

2.1 网架结构

本次合环操作,运行方式为上一级电网按 220 kV、110 kV 正常方式,10 kV 联络线路联络路径如表 1 所示。

2.2 配电网合环安全性分析系统与 PSASP 离线仿真分析计算结果、实际操作结果比较

合环前后配电网合环安全性分析系统计算数据、综合程序 PSASP 计算数据以及两侧 10 kV 线路实际电网运行参数如表 2、表 3 所示。

2.3 数据分析

通过分析以上计算结果,配电网合环安全性分析系统和综合程序 PSASP 计算出来的合环电流值均小

表 1 联络路径			
序号	名称	所接 10 kV 母线	主网架结构
1	铁木线	铁西 I 母	220 kV 昌吉—110 kV 铁西—110 kV 开发区—220 kV 三宫
	经河一线	开发区 I 母	
2	铁局线	铁西 I 母	220 kV 昌吉—110 kV 铁西—110 kV 开发区—220 kV 老满城
	经河二线	开发区 II 母	
3	铁统线	铁西 II 母	220 kV 头屯河—110 kV 铁西—110 kV 开发区—220 kV 老满城
	经宾二线	开发区 I 母	
3	铁指线	铁西 II 母	220 kV 头屯河—110 kV 铁西—110 kV 九家湾—220 kV 老满城
	九泰二线	九家湾 II 母	

表 2 合环前后对应变电站母线电压及主变有功、无功实际测量值统计表

序号	线路名称	10 kV 母线		主变 10 kV		主变 10 kV	
		电压 /kV		有功 /MW		无功 /Mvar	
合环前合环后合环前合环后合环前合环后							
1	铁木线	10.35	10.27	17.3	18.5	1.3	3
	经河一线	10.34	10.33	26.2	24.4	2.8	0.9
2	铁局线	10.31	10.26	22.8	21.1	1.5	3
	经河二线	10.34	10.34	12.7	13.3	3.8	3.1
3	铁统线	10.24	10.21	13.7	10.6	4.7	0.8
	经宾一线	10.31	10.34	22.6	24.9	1.5	6.9
4	铁指线	10.52	10.47	14.5	13.3	5.8	6.9
	九泰二线	10.44	10.48	10.8	12.3	2.2	1.2

于相应线路的过流保护定值,上述几条线路均可以进行合环倒负荷操作;但两种程序计算出的结果与实际测量值之间均存在着一定误差。有些值比实际小,有些值比实际大,无一定的规律,综合分析误差来源包含多个方面。

(1)变压器分抽头位置:由于在实际运行操作中有载变压器分接头经常变动,对于合环馈线来说,若变压器抽头位置改变一个挡位,会引起几十安的电流变化,如果仿真分析系统不及时更新,将造成误差。因此,进行分析时应尽量更新为操作前的实际位置,并在操作时段不同调度、变电站不应改变相关变压器的分抽头,以免引起误差。

(2)电容器的投切:在实际运行中,电容器的投切往往是成组进行的,而一组电容器的容性电流与感性电流合成后形成一个矢量值,这才是参与计算的合环变压器其他线路负荷。系统无功补偿装置的影响也会产生误差。

(3)功率因数:由于在实际运行时,测得的大多是电流值,不是 P、Q 值,这样就需要用电流值和功率因数推导出 P、Q 的大小,而功率因数也非实测值,所

表 3 配电网合环安全性分析系统与 psasp 离线仿真分析计算结果

序号	线路名称	过流保护定值	出线实际电流		配网合环安全性分析系统计算值		综合程序 PSASP 计算值	
			合环前	合环后	合环前	合环后	合环前	合环后
1	铁木线	480	0	62	0	62.32	0	-46.8(反向)
2	经河一线	480	375.68	333	375.68	314.66	376.2	423.6
3	铁局线	440	0	-62(反向)	0	30.26	0	-121.8(反向)
4	经河二线	480	157	182	157	130.03	157.2	282
5	铁统线	400	0	-176(反向)	0	24.77	0	-102.6(反向)
6	经宾一线	420	122	277	122	91.38	123	228
7	铁指线	330	0	-87(反向)	0	30.55	0	-85.2(反向)
8	九泰二线	400	138	204	138	109.09	139.2	227.4

以,功率因数的准确与否对合环计算的误差有一定影响。

(4)配网馈线负荷分布:配电网运行中负荷节点多,往往呈梳状结构,而且一般无表计实时记录各点负荷,为了计算方便,配电网负荷往往简单地归结于一点,这样虽简化了计算,但模型不够精确,合环对潮流分布影响显著,会导致合环电流变化或改变方向。

3 相关结论

从此次对比分析看出影响合环潮流的实际因素较多,即:合环馈线所在变压器高压侧及低压侧电压,合环馈线电网当时的运行工况(线路参数、负荷、变压器分抽头位置),合环馈线所在变压器的总负荷,合环前馈线所属母线电压,合环线路参数及负荷等。因此,在实际中应注意修正和注意以下几个方面的问题。

3.1 系统中应改进的方面

(1)应列出环网内所有变压器的分抽头位置及变更信息,在操作时发现变压器分抽头变动,给出提示及修订值。

(2)给出合环电流的相关因素灵敏性排队,给出敏感关键点提示。

(3)对所有监测点的误差原因提示,便于分析决策。

(4)对于决策后及操作时间段进行预测性再滚动修正分析,包括负荷不同增长方式、不同增长点影响结果的预测分析,便于再决策。

3.2 操作运行注意方面

(1)由于合环时主变所带无功的变化对母线电压有一定的影响,应尽量在合环前对无功进行就地平衡,并保证合环线路两侧的母线电压满足要求。

(2)配电网是直接面对用户的电力网络,实际负荷位置处在靠前或靠后的地方,计算中对负荷分布不同情况进行对比,有助于合环分析;但仍然需要运行人员对实际的运行情况有所了解,从而得到较为准确的负荷位置,才能得到更为准确的计算结果。

(3)尽量缩短操作时间,并与相关上级电网进行沟通。

(4)尽量选择在小负荷时期,并减少相关设备的电气量的变更(如相关上级电网无操作等),减少采集量的误差。

4 结束语

配网线路合环倒负荷操作已成为提高供电可靠性、电网经济运行、提高服务质量的重要手段,准确计算合环电流是配电线路合环倒负荷操作的前提条件。

配电网合环安全性分析系统为调度人员判断配电线路是否能进行合环倒负荷操作提供了依据。本次实验合环电流计算值与实际值之间存在着一些差异,应进一步结合乌鲁木齐地区电网结构特点,对其计算模型、算法、界面、使用性进行优化改进,继续进行深入的研制和开发,进一步完善配电网合环安全性分析系统,为配电网能够更加安全、经济地运行提供依据。

参考文献

[1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002.
[2] 应夏曦,纪良.常州电网分区运行对地区配网跨区合解环操作的影响及其对策[J].电力设备,2008,9(1):65—68.
[3] 幸荣霞,姚爱明.环网合环操作的分析[J].浙江电力,

(下转第 77 页)

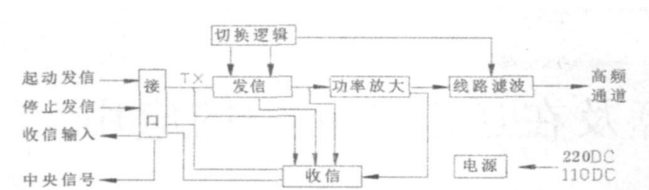


图 4 收发信机功能框图

由图 4 可见,“线路滤波”插件为连接到高频通道的直接关口,“线路滤波”(FLT7)插件主要提供发信谐波抑制和线路阻抗匹配。

参见图 5 的原理框图,该插件有四组低通滤波器,其截止频率分别为 400 kHz、230 kHz、130 kHz 及 70 kHz 并且可以根据工作频率的不同由“切换逻辑”送来的信号,控制其切换继电器,自行切换工作滤波器。当工作频率确定时,其所选用的滤波器是高于该工作频率的最小截止频率的滤波器。例如,工作频率是 50 kHz 则滤波器选择为 70 kHz 工作频率为 140 kHz 则滤波器自动选择为 230 kHz 其滤波器的选择由“切换逻辑”根据工作频率自动执行。

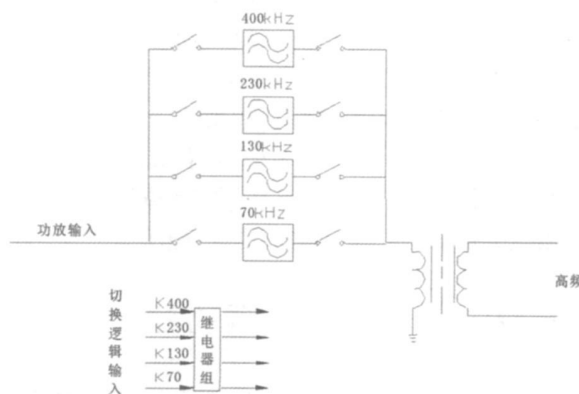


图 5 “线路滤波”插件原理框图

在本次故障中,由于该插件频率切换故障,引起高频信号的严重衰减。

所以,当对侧试验发信时,虽然对侧的信号已经发送到本侧,但由于“线路滤波”插件的衰减,本侧接收电平太低,故认为对侧并未发信,所以本侧也不会进入连续向对侧发信 5 s 的过程。在对侧表现出来的故障现象就是按下“试验”按钮后,“收信插件”上所有收信灯都只是闪亮一下(此时实际上是收到的本侧启动 200 ms 的发信信号)后熄灭。

而在本侧试验发信时,由于本侧的高频信号在经

过“线路滤波”插件后已经严重衰减,根本就不能通过高频通道送到对侧的收发信机,同理,对侧也不会进行发信 5 s 的过程。

5 结 论

高频保护涉及面较广,通道的任何一个环节出现问题或不匹配,都可能影响其正常工作。高频通道上各加工设备和收发信机元件的老化和故障都会引起衰耗,都会影响高频保护的正常运行。当高频保护因故不能投运时,只能逐个环节进行检查。在本起高频通道故障的现象中,如果按照常规方法,即厂家的装置说明书中所说:“起动装置发信,发信时,若“正常”灯灭,并且收信回路的有关指示灯(收信起动”、“收信输出”等)不亮,说明“收信”插件可能有故障。”将误导检查方向。因此,在现场的处理中需要灵活掌握方法,善于利用有限的检查工具,比如能测频率的万用表、示波器等常规工具,在保证安全的前提下,也可以不依靠选频电平表等专业工具(在现场突发故障情况下,这些专用工具往往都没有在现场),而采取“另类”处理方法及时地发现异常,消除缺陷,控制异常,预防故障,这是高频通道设备维护工作中的难点,也是运行检修人员日常工作中的重点,更是保障电力系统安全生产的重要途径。

参考文献

- [1] 南瑞继保电气有限公司. LFX-912 型收发讯机原理与调试 [R]. 2005.
- [2] 葛耀中. 高压输电线路高频保护 [M]. 北京:水利电力出版社, 1986.
- [3] 继电保护丛书 输电线路高频保护 [M]. 北京:水利电力出版社, 1987.
- [4] 张国珠,邵玉槐. WXB-15 型微机高频保护误动作分析 [J]. 继电器, 2005, 36(1): 79-81.

作者简介:

唐明亮 (1975—),男,重庆市人,映秀湾水力发电总厂,工程师,工程硕士。主要从事电力系统电气二次工作。

赵玉忠 (1964—),男,四川省大邑县人,映秀湾水力发电总厂,高级工程师,工程硕士。主要从事电力系统电气二次工作。

(收稿日期: 2009-05-31)

(上接第 70 页)

2007, (1): 66-68.

- [4] 李江华. 浅析 10 kV 配网合环产生环流的原因及预防措施 [J]. 电网技术, 2006, 30(8): 199-201.

- [5] 于建辉,周浩,陆华. 杭州 10 kV 配电网合环问题的研究 [J]. 机电工程, 2007, 24(10): 54-57.

- [6] 杨志栋,刘一,张建华,等. 北京 10 kV 配网合环试验与分析 [J]. 中国电力, 2006, 39(3): 66-69.

(收稿日期: 2009-06-12)

区域电网低频振荡主导模式的检测方法

白 洋¹, 邓集祥²

(1 新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2 东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘 要:提出了一种基于实测的功角曲线检测区域间低频振荡模式的新方法,这种方法能有效检测出互联系统的区域间主导低频振荡模式,因此可以对扰动下的系统进行有效的分析。大系统算例结果表明,所提方法能准确的检测识别出系统主导区域间低频振荡模式,其结果与综合稳定程序 (PSASP) 计算出的结果一致,从而验证了所提新方法的正确性和有效性。

关键词:低频振荡; 功角曲线; 主导低频振荡模式

Abstract: Based on the measured power angle curve, a new method of detecting inter-regional low-frequency oscillation (LFO) mode is presented. It can effectively detect inter-regional LFO mode, so the power system with disturbance can be effectively analyzed. The results of large power grids show that the proposed method can accurately identify the dominant mode of inter-regional LFO, they are the same as the result that is calculated by PSASP, thereby the proposed method proved to be correct and effective.

Key words: low-frequency oscillation; power angle curve; dominant low-frequency oscillation modes

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0071-07

0 前 言

为了提高发电和输电的可靠性与经济性,大电网互联已成为必然的趋势。目前,中国已经形成了 7 个跨省电网,这必然使系统的稳定性问题变得更加突出。大区电网的弱连接会严重降低系统间的阻尼,使区域间低频振荡模式成为影响系统稳定的关键因素^[1~3]。

一个稳定的系统首先应该是在小干扰稳定的,而小干扰下,弱阻尼低频振荡模式是影响系统稳定的主要因素^[4],区域间低频振荡模式有时表现为弱阻尼模式,当区域间模式即为弱阻尼模式时,应予以足够的重视。区域间模式往往表现为一个区域的发电机群对另一区域的其他发电机群之间的摇摆,由于系统阻尼较小,振荡时间较长,所以对系统稳定性威胁较大,若抑制此模式,就需要找出相关的发电机,并在其上装设 PSS^[5]。

现阶段计算系统特征根的方法主要是应用 QR 法求出系统的全部特征根,然后找出弱阻尼模式和相关发电机,但 QR 法工作量大且丢根严重。PSASP 提供了基于稀疏的系统增广矩阵 J 的特征值算法 (迭代转 Rayleigh 商迭代法),此法可以求解出所关心的

部分特征值和特征向量,但需按虚部划分特征值搜索区间,这样使工作量变大,效率降低,也不能解决丢根的问题^[6]。准确有效地找出小干扰下的区域间主导低频振荡模式及其相关发电机成为了电网互联后亟需解决的问题。

系统受扰动后,发电机的功角曲线中含有丰富的系统动态特征信息^[7],发电机的功角 δ 反映了发电机转子的相对运动,是进行发电机稳定分析的重要数据。应用 EMD 分解和连续小波变换的方法可以对系统的主导模式进行鉴别,可以从功角曲线中提取出振荡的频率、衰减等信息^[8]。不同的故障情况下,在不同的功角曲线所提取的主导振荡模式也不相同,因此,可以在特殊的地点施加扰动,激发出小干扰下的主导低频振荡模式。此外,如何激发并检测到主导模式外的其他模式也是有实际意义的问题。

基于实测的功角曲线提出了一种小干扰下区域间主导低频振荡模式及其相关发电机的检测方法,该方法计算量少、实用、有效,且适用于任何复杂的电力系统,分析大区域电网低频振荡时更具优越性。应用本方法,准确的检测到了 8 机 36 结点系统主导低频振荡模式,并通过与正则理论研究低频振荡模式间的非线性相关作用的结果相比较,得到了相同的结果,从而验证了所提新方法的正确性和检测识别大千

扰下主导低频振荡模式的有效性。

1 低频振荡的产生机理

对于单机无穷大系统,发电机采用二阶模型时,转子运动方程为

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

式中, $P_e = \frac{E'U}{X_\Sigma} \sin\delta_0$

在工作点处线性化,并忽略 P_m 的变化,则

$$\begin{cases} M \frac{d\Delta\omega}{dt} = -K\Delta\delta - D\Delta\omega \\ \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega \end{cases} \quad (2)$$

$K = \frac{E'U}{X_\Sigma} \cos\delta_0$ 为同步力矩系数。求得 (2) 式的特征根为

$$p_{1,2} = \frac{-D \pm \sqrt{D^2 - 4MK}}{2M} = \alpha \pm j\Omega \quad (3)$$

由式 (3) 可知,当 X_Σ 较大时, K 较小,振荡频率比较低,这表明机组间电气距离较大时相应的机组间振荡频率较低^[9]。因此,当两台机组的电气距离较大且容量相差很多时,在这两台发电机的功角曲线上易检测到小干扰下的区域间主导低频振荡模式。

2 小干扰下区域间主导低频振荡模式的检测

在此基础上提出了一种检测小干扰下区域间主导低频振荡模式的方法。

(1) 假设有 A、B 两区域,在 A 区选定一台机组 P_n 小的发电机 A,在 B 区选定一台相对 A 机机组 P_n 大的发电机 B; A、B 两机组的电气距离应尽可能大。

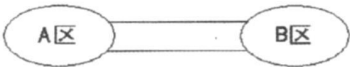


图 1 2 区域系统

(2) 在 A 机附近施加一小扰动 (一般为持续时间 0.01 s 的三相瞬时短路)。

(3) 在功角曲线 δ_{AB} 上检测到的主导模式即为该区域间主导低频振荡模式。

3 算例分析

以电力系统分析软件包中的 8 机系统和四川电网数据为算例。

3.1 8 机系统

3.1.1 模式的检测

8 机系统参数来自文献 [6], 系统拓扑图如图 2。

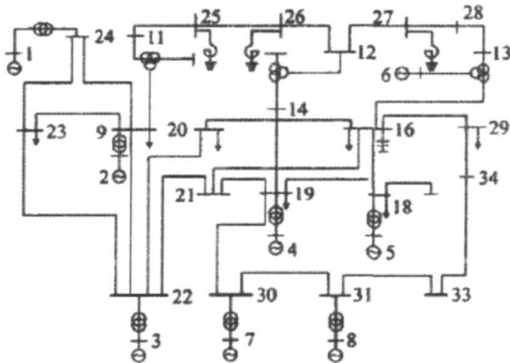


图 2 8 机系统

小干扰下,实部离虚轴最近的模式为主导低频振荡模式,而大干扰下,其中被激励得最强、作用最大的为主导低频振荡模式。采用 QR 法求出 $\min |\alpha_i|$ 对应的模式及其相关发电机。

表 1 系统主导低频振荡模式

模式	频率 /Hz	衰减阻尼比 %
$-0.054\ 87 \pm j\ 885\ 371$	0.777 531	1.123 1

8 机系统存在 7 对低频振荡模式,结果表明, $\lambda = -0.054\ 870 + j\ 885\ 371$ 为系统的主导低频振荡模式,其振荡频率是 0.777 531 Hz 衰减阻尼比是 0.012 3,阻尼相当弱;从模态图中可以明显看出该模式为小干扰下区域间振荡模式,参与此模式的机组主要有

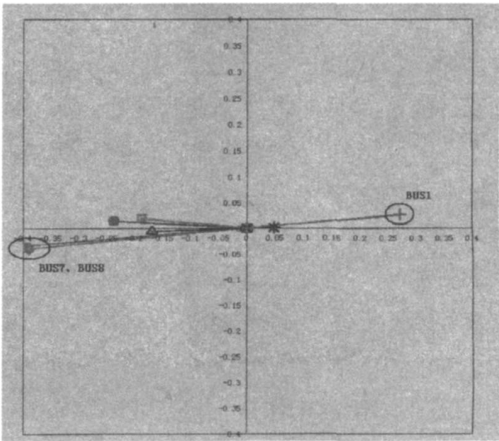


图 3 特征值 $-0.054\ 870 \pm j\ 885\ 371$ 的模态图

1、7 号发电机, 1 区 (1 号机) 相对 3 区 (7、8 号机) 振荡, 振荡角度为 180° 。

从图 2 可以看出, G1 相对于 G7、G8 的电气距离较大, 在综合稳定程序中, 电气距离为标么值。

其中 G1、G8 间 $X_{\Sigma 18}=1.4804$ 为最大; G1、G7 间 $X_{\Sigma 17}=1.4803$; G1、G4 间 $X_{\Sigma 14}=1.2433$ 。

表 2 8 机系统各机容量				
发电机	G1	G4	G7	G8
P_n	1 500	220	250	340
所属区域	1	2	3	3

由表 2 可知, P_{n1} 远大于 P_{n4} 、 P_{n7} 、 P_{n8} , P_{n1} 比 P_{n8} 大 116Q, 为 P_{n8} 的 4.4 倍。

在 G8 出口变压器高压侧施加持续时间为 0.01 s 的小扰动, 得到功角曲线 δ_{18} 。

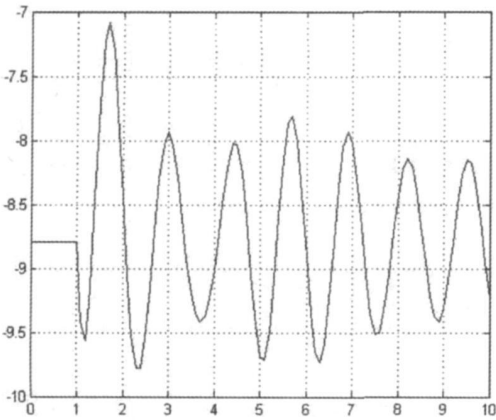


图 4 功角曲线 δ_{18}

对功角曲线 δ_{18} 的分析结果如表 3。

表 3 δ_{18} 的分析结果			
模式	衰减阻尼比 /%	频率 /Hz	小波能量系数
1	1.257 3	0.772 5	2.826 5
2	0.957 4	0.983 7	0.856 315

可见, 频率为 0.772 5 Hz 的模式对应的能量最大, 该模式在功角曲线中占主要成分, 主导 1 号机相对 8 号机的功角振荡特性。

从前面的分析可知, $f=0.7725\text{ Hz}$ 的模式为小干扰下区域间主导低频振荡模式, 与在功角曲线 δ_{18} 上检测到的主振模式相同。这说明在特定的扰动下, 可以通过特殊机组间的功角曲线检测到小干扰下区域间主导低频振荡模式。

G1、G7 间电气距离也较大, 在 G7 出口变压器高压侧施加持续时间为 0.01 s 的小扰动。

对功角曲线 δ_{17} 分析, 可知频率为 0.776 4 Hz 的模式对应的能量最大, 该模式在功角曲线 δ_{17} 中占主要成分, 因此, 在功角曲线 δ_{17} 中也可检测到。

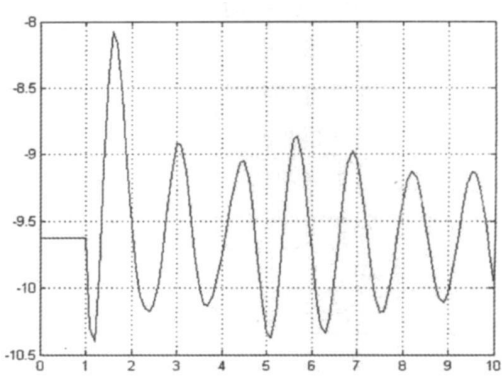


图 5 功角曲线

表 4 δ_{17} 的分析结果

模式	衰减阻尼比 /%	频率 /Hz	小波能量系数
1	1.584 3	0.776 4	1.13
2	1.192 5	1.186	0.628 1

用同样的方法对 4 号机施加扰动, 也可在功角曲线 δ_{14} 中激发出该小干扰下区域间主导低频振荡模式。

3.1.2 算例结果再分析

前面分析可知, 与 $f=0.777531\text{ Hz}$ 的模式相关的发电机为 1、8、7 号机。在 1 号机出口变压器高压侧施加小扰动时, 可以在功角曲线 δ_{14} 、 δ_{16} 、 δ_{17} 、 δ_{18} 上检测到于区间模式 0.777 531 Hz 非常接近的低频振荡模式, 而且该模式在这些曲线中均占主要成分; 在 δ_{13} 、 δ_{15} 上也可检测到 $f=0.777531\text{ Hz}$ 的模式, 但该模式在这两条曲线上不是主导模式; 在 δ_{12} 上检测不到这个区间模式。所以, 1 号机与其他大多数 (约 86%) 发电机的功角曲线上都能检测到 $f=0.777531\text{ Hz}$ 的模式, 可判断 1 号机是该模式下的强相关发电机。

可以得出结论, 在某扰动下, 若机组 A 号与其他大多数机组的功角曲线上都能检测到模式, 则机组 A 号是某一模式的强相关发电机。需要说明的是, 大量算例表明, 在小系统中, 其他大多数的发电机为 80% 以上的发电机; 在百台机组的大系统中, 其他大多数的发电机为 65% 以上的发电机。

功角曲线 δ_{18} 、 δ_{28} 、 δ_{38} 、 δ_{48} 、 δ_{58} 、 δ_{68} 、 δ_{78} 上都能检测到 $f=0.777531\text{ Hz}$ 的模式, 所以 8 号机是该模式的强相关发电机; 同样的方法也可以判断 7 号机也是该区间模式的强相关发电机。

在 8 号机附近施加扰动时, 在另一区域中与 1 号机电气距离最近的 4 号机 ($X_{\Sigma}=0.2371$) 功角曲线 δ_{48} 上可以检测到模式 6, 它在 δ_{48} 中的能量系数最大; 在 7 号机附近施加扰动时, 在 δ_{78} 上可以检测到模式

3;在 6 号机附近施加扰动时,在 δ_{61} 上可以检测到模式 1;在 5 号机附近施加扰动时,在 δ_{81} 上可以检测到模式 5;在 4 号机附近施加扰动时,在 δ_{81} 上也可以检测到模式 5;在 3 号机附近施加扰动时,在 δ_{81} 上可以检测到模式 2;在 2 号机附近施加扰动时,在 δ_{24} 上可以检测到模式 4;在 1 号机附近施加扰动时,在 δ_{41} 上可以检测到模式 7。

表 5 8 机系统模式表				
序号	模式	频率 /Hz	衰减	阻尼比 %
1	$-5.781\,522 \pm j4.485\,227$	2.305 396		37.069 6
2	$-0.792\,395 \pm j1.473\,279$	1.826 029		6.89
3	$-0.911\,462 \pm j1.034\,605$	1.647 032		8.773 6
4	$-0.617\,969 \pm j.859\,373$	1.250 858		7.838 6
5	$-0.673\,874 \pm j.157\,278$	1.139 116		9.373 8
6	$-0.268\,055 \pm j.158\,588$	0.980 17		4.348 4
7	$-0.054\,870 \pm j.885\,371$	0.777 531		1.123 1

因此,对系统施加特殊的扰动,可以激发出系统的全部模式。

3.2 四川电网

大规模电力系统中,尤其在长条形结构的弱互联电网中,低频振荡问题尤为严重。

四川电网南北比较狭长,有 145 台本地机组,大多数为水电机组,最南端的二滩机组与最北端的黑河塘距离在 1 000 km 以上。

2001 年 8 月至今,四川二滩水电站的 6 台 550 MW 机组向川渝和华中电网送电的运行中多次发生低频振荡现象。研究表明,这是在一定条件下,重负荷、长距离输电造成的,二滩向川渝和华中输电需经过 1 100 多公里的 3 回 500 kV 输电通道 [10]。

二滩 01 号 ($P_n=550\text{ MW}$) 在攀枝花地区,黑河塘 81 ($P_n=80\text{ MW}$) 在川西北地区;两机组距离很远。

Prony 方法可以直接求出各振荡模式的幅值、频率、与衰减因子;基于 Prony 方法计算模式的能量系数易于实现,适合在工程实际中应用 [10]。

1 s 时在黑河塘 81 出口变压器附近施加小扰动,1.01 s 故障消失,得到相应功角曲线。

在黑河塘 81~二滩 01 号机功角曲线上用 Prony 分析法检测出曲线中的主要振荡模式见表 6。

表 6 黑河塘 81~二滩 01 功角曲线分析结果				
模式	幅值	阻尼	振荡频率 /Hz	能量系数
1	140.95	-5.218	1.104	8 300.84
2	0.39	-0.394	0.811	0.51

从表 6 可以看出,黑河塘 81~二滩 01 功角曲线的主导模式频率为 1.104 Hz

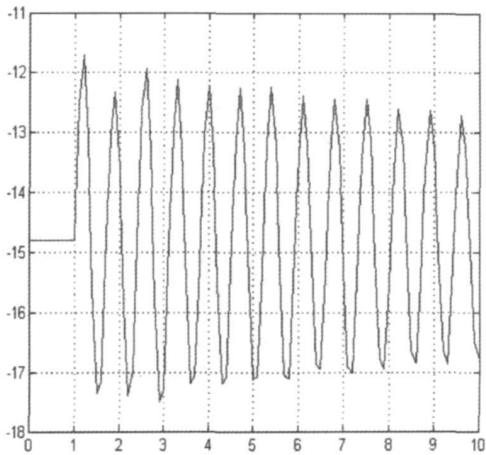


图 6 黑河塘 81~二滩 01 功角曲线

在文献 [11] 中,四川本地小区域间主导低频振荡模式是 $\lambda=-0.071\,3 \pm j.927$,振荡频率是 1.102 Hz 而且阻尼很弱。

由图 7 可知,振荡是川西水电(冷竹关、小关子)相对川西北水电(自一里)机群的振荡。其中,川小沟头 8、川小关子、川冷竹关相对川自一里、川水牛家振荡振荡方向基本成 180°。

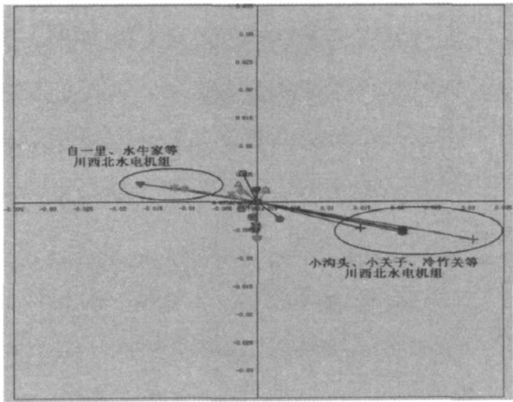


图 7 特征值 $-0.071\,3 \pm j.927$ 的模态图

与这个模式相关性最强的是:川小沟头,然后依次是川小关子、川冷竹关、川自一里。

表 7 模式的特征向量表			
特征值: $-0.0713 + j.927$			
母线名	实部	虚部	相关因子
川小沟头 8	0.008 933	-0.010 573	0.094 875
川小关子 81	0.004 909	-0.004 379	0.041 826
川小关子 82	0.004 909	-0.004 379	0.041 826
川冷竹关 02 号	-0.008 909	-0.010 573	0.038 751
川冷竹关 03 号	-0.008 909	-0.010 573	0.038 751
川冷竹关 01 号	-0.008 909	-0.010 573	0.038 751
川自一里 01 号	-0.005 422	0.001 886	0.023 766
川自一里 02 号	-0.005 422	0.001 886	0.023 766

(下转第 82 页)

⑤ 接地电阻测试应在接地模块吸湿 72 h 后进行;

⑥ 实测接地电阻不合格时,可采取增加接地模块的方法,在已敷设好的接地装置上补接接地模块直至合格为止。

4 总 结

综上所述,接地模块作为近年来出现的一种特殊结构的长效物理降阻剂,对于位于山区或城市规划区等复杂地形和缺水地区的塔位,接地模块的使用可有效降低接地工频电阻,同时具有耐腐蚀、无污染、运输

和施工简单、使用寿命长的鲜明特点。

参考文献

- [1] 东北电力设计院编. 电力工程高压架空送电线路设计手册 (第二版) [S]. 1999.
- [2] DL/T 621—1997, 交流电气装置的接地 [S].
- [3] DL/T 5092—1999, 110~500kV 架空送电线路设计技术规程 [S].

作者简介:

徐宏宇 (1972—), 工程师, 从事高压送电线路设计。

(收稿日期: 2009—03—05)

(上接第 74 页)

检测川小沟头 8 与其他所有发电机的功角曲线, 78% 的功角曲线都能检测到频率为 1.104 Hz 的模式, 川小沟头 8 只与 32 台发电机的功角曲线上检测不到这个模式。

其他相关性强的发电机, 如川小关子、川冷竹关、川自一里与其他所有发电机的功角曲线, 也有 65% 以上的能检测到这个模式。

川水牛家 ($P_n = 35 \text{ MW}$) 出口变压器附近施加小扰动时, 在它与二滩 01 ($P_n = 550 \text{ MW}$) 的功角曲线上也能检测到 1.104 Hz 的模式, 且能量最大。

应用的方法检测小干扰下的主导低频振荡模式可以得到与文献 [10] 一致的结果, 从而验证了所提方法在研究主导低频振荡模式对系统动态特性和稳定性问题上的正确性。

4 结 论

(1) 提出了一种新的检测小干扰下区域间主导低频振荡模式及其相关发电机方法, 所提方法可有效用于电力系统仿真曲线研究主导低频振荡模式中, 也可用于实际的功角曲线。所提出的方法, 无需对全网进行计算, 只获取系统的功角振荡波形, 算例结果表明, 所提方法有着较高的准确性, 且计算量小, 为实际系统的检测提供了有效途径。

(2) 对中国电力科学院 8 机 36 节点系统进行研究, 发现并不是在所有功角曲线都能, 而且任一条功角振荡曲线也不能检测到所有模式; 在特定故障下, 可以在特定的功角曲线上检测到小干扰下区域间主导低频振荡模, 此模式外, 还存在其它模式, 这些模式在系统振荡中虽然未能起主导作用, 但可以在某些条件下被

强烈激发出来, 也可以在特定的振荡曲线上检测到这些模式。

参考文献

- [1] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1—4.
- [2] 郑宝森, 郭日彩. 中国互联电网的发展 [J]. 电网技术, 2003, 27(2): 1—3.
- [3] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6—11.
- [4] 邓集祥, 华瑶, 韩雪飞. 大干扰稳定中低频振荡模式的作用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 60—64.
- [5] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21—25.
- [6] 中国电力科学研究院, 《电力系统分析综合程序》(PSASP6.24) 用户手册 [Z].
- [7] 穆钢, 王宇庭, 安军, 等. 根据受扰轨迹识别电力系统主要振荡模式的信号能量法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 7—11.
- [8] 邓集祥, 欧小高, 姚天亮. 基于小波能量系数的电力系统主导低频振荡模式的检测 [J]. 电工技术学报. (已录用)
- [9] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [10] 邓集祥, 涂进, 陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36—41.
- [11] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78—83.

作者简介:

白 洋 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析;

邓集祥 (1947—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—06—10)

高频通道异常情况的现场特殊处理

唐明亮, 赵玉忠

(映秀水力发电总厂, 四川 都江堰 611830)

摘 要: 高频通道是线路纵联保护中高频信号传输通道。通过一起实例, 对超高压线路运行中的高频通道现场突发故障情况进行分析, 并探讨了针对现场特殊情况的一些“特殊”处理方法。

关键词: 高频通道; 故障; 处理

Abstract: High-frequency channel is the transmission channel of high-frequency signal in the pilot protection. The sudden failures of high-frequency channel of EHV transmission line which is in operation are analyzed by an example and some special treatments for the special situation are discussed.

Key words: high-frequency channel; failure; treatment

中图分类号: TM773 **文献标志码:** 3 **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0075-03

0 前 言

高压线路的纵联保护是当线路全长范围内发生短路或接地故障时, 能快速动作, 使两侧开关同时快速跳闸的一种保护装置, 是线路的主保护。对高压电网, 其稳定性要求比较突出, 所以要求继电保护实现全线速动。目前实现保护全线速动的唯一办法是将线路两侧的保护装置的故障信息进行快速交换。对于短线路, 可用敷设辅助导线的方法来实现, 但长线, 因受外界环境干扰和线路本身衰耗等影响, 只能使用高频通道或者光纤传输。而在实际运行中高频通道由于种种原因会出现各种通道异常的情况, 严重时将导致保护误动或拒动, 引起严重的电网事故。

1 载波通道的基本构成及简介

四川甘孜洲金康电站 220 kV 线路“金小线”配备了两套高频保护, 其中 1 号高频保护屏的高频信号来至“金小线”A 相通道, 通道的阻塞频率为 178 kHz。保护屏内采用的收发信机为南瑞继保电气有限公司生产的 LFX-912 继电保护专用收发信机。该收发信机具有体积小、重量轻、使用维护方便、抗干扰性强、收信工作范围宽, 收信裕度从 4~36 dB 均能正常工作等优点, 是一款比较适合继电保护用的收发信机。收发信机和电力线、阻波器、结合滤波器、耦合电

容等共同组成高频信号的传输通道, 它的构成如图 1。

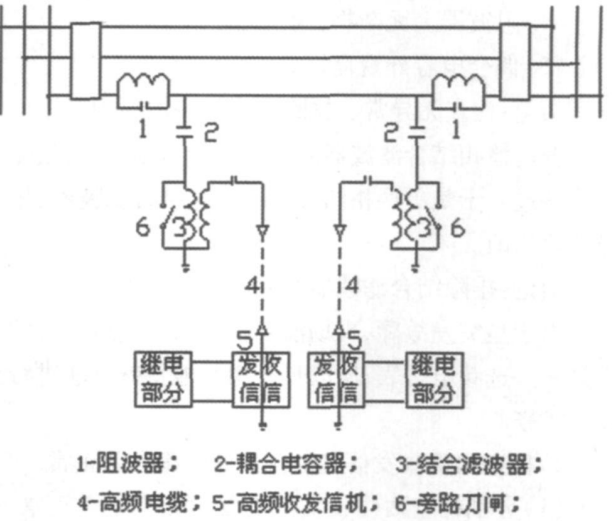


图 1 高频通道构成

图 1 为结合加工设备的构成图, 也即电力线路载波通道的构成图, 主要包括电力线、高频阻波器、耦合电容器、结合滤波器、高频电缆和高频收发信机, 这就是在中国电网中得到了广泛应用的相一地制电力线高频通道的构成图。

2 现场故障情况

2009 年 3 月, 220 kV 线路“金小线”一次线路常规停电后, 运行人员进行复电操作, 发现保护装置告警: 通道异常。由于系统需要, 接调度命令, 暂时将 1 号保护屏的主保护退出运行, 线路投入运行。为确保

线路运行的安全,立即对 1 号保护屏的高频通道进行了全面的检查。

故障现象:收发信机在试验发信时,收信灯瞬间闪亮一次后熄灭。联系线路对侧试验发信,故障现象一样。保护装置报“通道异常”。显然高频通道存在严重衰耗。

3 检查分析及现场处理

1)首先进行阻波器的目测检查和结合滤波器的检查。由于线路已经投运带电,所以只能在安全距离内用望远镜进行目测外观检查。检查结果如下。

(1)导线无断股,接头无发热现象,阻波器无异常响声;

(2)高频阻波器与线路导线接头安装牢固;

(3)高频阻波器与导线间的绝缘子安装牢固,外观良好;

(4)阻波器上无杂物,构架无变形;

(5)耦合电容外观良好。

结论:检查无异常。排除一次设备的原因。

查询该相结合滤波器的检修记录,曾经因为故障而更换过。于是更换相同参数的该相结合滤波器,故障现象依旧。

结论:排除结合滤波器的原因。

由于是突发故障,现场没有检查高频通道必备的工具——选频电平表,所以只有用其他特殊方法进行逐级排查。

2)检查两侧收发信机工作发信频率是否正常。

(1)分别检查两侧收发信机发信频率是否正常。联系线路对侧检修人员,试验发信。本侧用 FLUKE189 型数字万用表(四位半的高精度万用表,测量速度是其它万用表速度的两倍,测频范围最大可达 1 MHz)的“频率”挡位结合滤波器和耦合电容器之间对地测量。在对侧试验发信的同时,本侧测量到的信号频率为 178 kHz 表明对侧收发信机发信频率正常。

(2)用相同方法,本侧试验发信,对侧测量。频率也为 178 kHz 误差小于 10 Hz

结论:至此可以排除收发信机发信插件故障,也能初步断定高频通道无开断点故障。

3)检查两侧收发信机工作发信电平是否正常:

由于现场没有选频电平表,无法直接测量发信电平。只能采用数字示波器读数。

首先检查本侧:短接背板上“本机”、“负载”插孔。示波器选择高阻输入测量,短接背板 T10、T12(起动发信)端子,测试点为“接线滤波”插件面板上的“负载”与“公共”测试孔。

发信状态下,用示波器测“滤波”插件面板上的“负载”与“公共”测试孔处波形,调节电压档和时间档位,将波形固定下来。检查结果,波形为正弦波,无明显畸变,电压值为 $U_x=3.1$ V 左右,测试波形现场拍照如图 2。

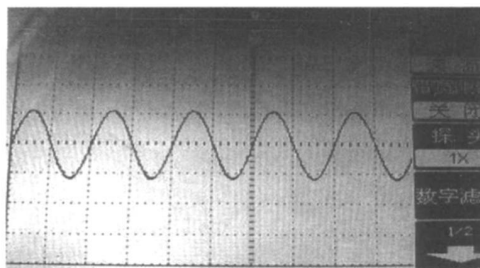


图 2 本侧示波器测试波形图

计算本侧的发信电压电平 $L_{ux}=20\lg(U_x/U_0)$ 分贝 (dBV) = 11.7 dBV, 换算成功率电平约 40 dBm 左右。

其中 U_0 为标准电压 0.775 V (1 mW 的功率在 600 负载上的电压为 0.775 V)。

结论:本侧发信电平在正常范围内。

排除本侧收发信机电平低的原因后,驱车到线路对侧,用相同方法检查对侧收发信机的发信电平。在短接背板 T10、T12(起动发信)端子后,示波器显示发信电平只有 0.2 V 左右。现场测得波形图如图 3。

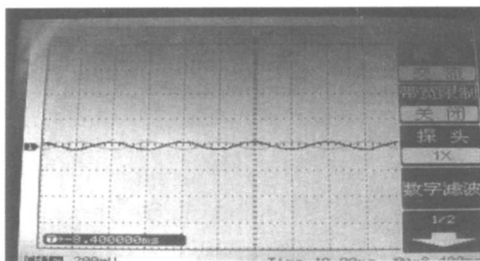


图 3 对侧示波器测试波形

至此,故障点锁定在对侧收发信机的范围内。

4)通过更换插件的方法进一步缩小故障点,后发现对侧“线路滤波”插件故障,导致通道异常。经更换相同中心频率的插件后,通道恢复正常。

4 故障原因分析

收发信机的功能框图如图 4 所示。

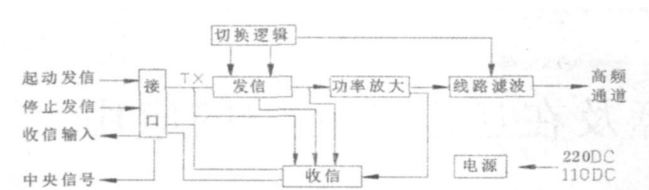


图 4 收发信机功能框图

由图 4 可见,“线路滤波”插件为连接到高频通道的直接关口,“线路滤波”(FLT7)插件主要提供发信谐波抑制和线路阻抗匹配。

参见图 5 的原理框图,该插件有四组低通滤波器,其截止频率分别为 400 kHz、230 kHz、130 kHz 及 70 kHz 并且可以根据工作频率的不同由“切换逻辑”送来的信号,控制其切换继电器,自行切换工作滤波器。当工作频率确定时,其所选用的滤波器是高于该工作频率的最小截止频率的滤波器。例如,工作频率是 50 kHz 则滤波器选择为 70 kHz 工作频率为 140 kHz 则滤波器自动选择为 230 kHz 其滤波器的选择由“切换逻辑”根据工作频率自动执行。

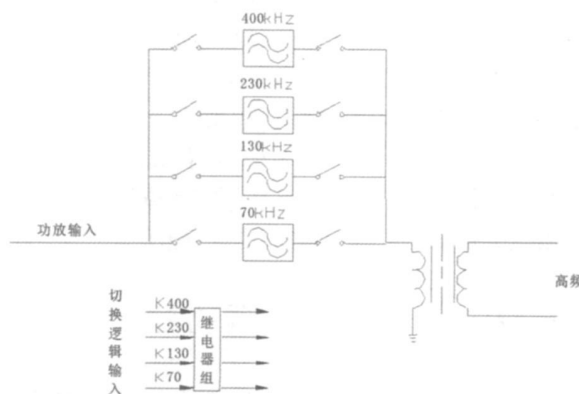


图 5 “线路滤波”插件原理框图

在本次故障中,由于该插件频率切换故障,引起高频信号的严重衰减。

所以,当对侧试验发信时,虽然对侧的信号已经发送到本侧,但由于“线路滤波”插件的衰减,本侧接收电平太低,故认为对侧并未发信,所以本侧也不会进入连续向对侧发信 5 s 的过程。在对侧表现出来的故障现象就是按下“试验”按钮后,“收信插件”上所有收信灯都只是闪亮一下(此时实际上是收到的本侧启动 200 ms 的发信信号)后熄灭。

而在本侧试验发信时,由于本侧的高频信号在经

过“线路滤波”插件后已经严重衰减,根本就不能通过高频通道送到对侧的收发信机,同理,对侧也不会进行发信 5 s 的过程。

5 结 论

高频保护涉及面较广,通道的任何一个环节出现问题或不匹配,都可能影响其正常工作。高频通道上各加工设备和收发信机元件的老化和故障都会引起衰耗,都会影响高频保护的正常运行。当高频保护因故不能投运时,只能逐个环节进行检查。在本起高频通道故障的现象中,如果按照常规方法,即厂家的装置说明书中所说:“起动装置发信,发信时,若“正常”灯灭,并且收信回路的有关指示灯(收信起动”、“收信输出”等)不亮,说明“收信”插件可能有故障。”将误导检查方向。因此,在现场的处理中需要灵活掌握方法,善于利用有限的检查工具,比如能测频率的万用表、示波器等常规工具,在保证安全的前提下,也可以不依靠选频电平表等专业工具(在现场突发故障情况下,这些专用工具往往都没有在现场),而采取“另类”处理方法及时地发现异常,消除缺陷,控制异常,预防故障,这是高频通道设备维护工作中的难点,也是运行检修人员日常工作中的重点,更是保障电力系统安全生产的重要途径。

参考文献

- [1] 南瑞继保电气有限公司. LFX-912型收发讯机原理与调试 [R]. 2005.
- [2] 葛耀中. 高压输电线路高频保护 [M]. 北京:水利电力出版社, 1986.
- [3] 继电保护丛书 输电线路高频保护 [M]. 北京:水利电力出版社, 1987.
- [4] 张国珠,邵玉槐. WXB-15型微机高频保护误动作分析 [J]. 继电器, 2005, 36(1): 79-81.

作者简介:

唐明亮 (1975—),男,重庆市人,映秀湾水力发电总厂,工程师,工程硕士。主要从事电力系统电气二次工作。

赵玉忠 (1964—),男,四川省大邑县人,映秀湾水力发电总厂,高级工程师,工程硕士。主要从事电力系统电气二次工作。

(收稿日期: 2009—05—31)

(上接第 70 页)

2007, (1): 66-68.

- [4] 李江华. 浅析 10 kV 配网合环产生环流的原因及预防措施 [J]. 电网技术, 2006, 30(8): 199-201.

- [5] 于建辉,周浩,陆华. 杭州 10 kV 配电网合环问题的研究 [J]. 机电工程, 2007, 24(10): 54-57.

- [6] 杨志栋,刘一,张建华,等. 北京 10 kV 配网合环试验与分析 [J]. 中国电力, 2006, 39(3): 66-69.

(收稿日期: 2009—06—12)

接地模块接地工频电阻计算及在送电线路中的应用

徐宏宇

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘 要:送电线路的接地装置是导泄雷电流入地,保持线路耐雷水平的重要措施。就常规接地方式难以施工及难以满足接地工频电阻的问题,对接地模块的接地电阻计算及应用做了分析。

关键词:接地模块;接地工频电阻计算;送电线路

Abstract: The earthing device in transmission line is a very important measure to lead the thunderstorm electricity to the earth and to maintain the lightning impulse withstand level of the transmission line. The calculation of earthing resistance of the earthing module and its application are analyzed in order to solve the problems that the conventional earthing mode is difficult to be constructed and it is hard to meet the requirements of the earthing resistance at the same time.

Key words: earthing module; earthing power-frequency resistance calculation; transmission line

中图分类号: TM862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0078-05

0 概 述

处于山区地段的送电线路,其塔位受到地势所限常常选择在狭窄的山脊上、陡坡边,而塔位多为高土壤电阻率地质,常规的水平敷设式的接地装置施工难度大,且部分塔位根本就无法实施。

为解决此问题,以往采用的手段通常是使用降阻剂,但降阻剂有几个不利之处:①施工难度大,效果不好;②采用降阻剂后,由于水土流失和降阻剂性能变化,经过一定时间运行后,接地电阻难以保持施工验收时的要求值,给运行维护带来困难;③降阻剂存在腐蚀性,降阻效果越好的腐蚀性越大,而腐蚀性较小的降阻效果较差。现在部分厂家开发了新型的物理降阻剂,不含有腐蚀性的盐酸盐,但降阻效果持续时间还需要在工程中观察。

多年来,众多工程证明降阻剂的使用可以降低接地电阻。但是存在很多问题。而接地模块克服了上述问题,使降阻剂成为标准产品,而不是半成品,大大减少了对施工的依赖性。接地模块是选用性能稳定的低阻材料,科学配以多种防腐、保水、扩散、胶凝材料,经几十吨机械压力成型。它比凝固后的降阻剂更密实,导电率更高,防腐性更好,施工更方便,更环保。

1 接地工频电阻计算方法

接地工频电阻是接地装置安装后,能否满足设计要求的量化标准。接地工频电阻计算方法如下。

1.1 建立接地装置布置形式

接地工频电阻与接地装置的布置形式是密切相关的,因此需在接地装置的布置形式已建立的基础上计算相应的接地工频电阻。

型 号	甲-1	乙-1	丙-1	丁-1
土 壤 电 阻 率 (欧·米)	100及以下	100~300	300~500	500~1000
杆 塔 型 式	自 立 塔	自 立 塔	自 立 塔	自 立 塔
接地沟开挖示意图 (单位: 米)				
最大允许工频电阻 (欧)	5	10	12	15

图 1 500 kV 线路接地装置安装图

以 500 kV 线路为例, 工程中常用的接地装置形式如图 1 所示。

1.2 计算方法

对接地工频电阻的计算有两种方法, 一种是利用系数法, 一种是电阻系数法。

1.2.1 利用系数法

①对甲—1 典型的引下线结合接地环的接地形式见图 2。

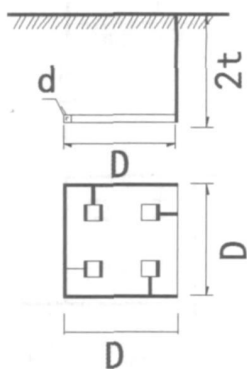


图 2 甲—1 接地装置布置图

工频电阻 R_m 计算式为

$$R_m = \frac{R_A \times \frac{R_B}{n}}{R_A + \frac{R_B}{n}} \times \frac{1}{\eta} (\Omega) \quad (1)$$

式 (1), R_A ——深埋环的工频电阻值, 其计算式见式 (2);

R_B ——引下线的工频电阻值, 其计算式见式 (3);

n ——引下线的数量;

η ——工频利用系数, 取值范围 0.55~1。

深埋环的工频电阻值 R_A 计算式为

$$R_A = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \times \left(1n \frac{8D}{d} + \frac{\pi D}{4t} \right) (\Omega) \quad (2)$$

式 (2), ρ ——计算用土壤电阻率, $\Omega \cdot m$;

D ——环的直径, m;

d ——接地体的直径, m;

t ——地面至接地体的半间距离, m。

引下线的工频电阻值 R_B 计算式为

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi l} \times \left(1n \frac{8l}{d} - 1 \right) (\Omega) \quad (3)$$

式 (3) 中, l ——引下线的埋深, m

其余参数同式 (2)。

②对乙—1 典型的在引下线和接地环的基础上再使用水平射线的接地形式见图 3。

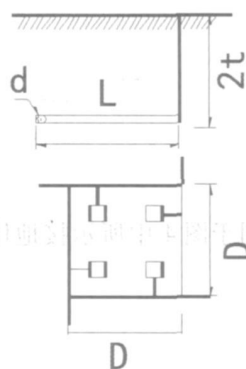


图 3 乙—1 接地装置布置图

工频电阻 R_n 计算式为

$$R_n = \frac{R_c \times \frac{R_D}{n}}{R_c + \frac{R_D}{n}} \times \frac{1}{\eta} (\Omega) \quad (4)$$

式 (4), R_c —— n 根水平射线的工频电阻值, 其计算式见式 (5);

R_D ——引下线和接地环组合后的工频电阻值,

R_D 即 R_m , 其计算式见式 (1);

n ——引下线的数量;

η ——工频利用系数, 取值范围 0.55~1。

水平射线的工频电阻值 R_c 为

$$R_c = \frac{R_E}{n} \times \frac{1}{\eta} (\Omega) \quad (5)$$

式 (5) 中 R_E 见式 (6), 其余各项参数同前。

R_E 为单根水平接地体的工频电阻值, 其计算式为

$$R_E = \frac{\rho}{2\pi l} \times 1n \frac{8l}{td} (\Omega) \quad (6)$$

式 (6) 中, l 为单根水平接地体长度 (m), 其余参数同前。

1.2.2 电阻系数法

①对甲—1 型的接地形式, 其接地示意图同图 2。

工频电阻 R_m 计算式为

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \times \left(1n \frac{L}{td} + A \right) (\Omega) \quad (7)$$

式 (7), ρ ——计算用土壤电阻率, $\Omega \cdot m$;

L ——水平接地体的总长度, m;

d ——水平接地体的直径或等效直径, m;

t ——水平接地体的埋深距离, m;

A ——水平接地体的形状系数, 其取值见图 4。

②对丁—1 型的接地形式见图 5。

接地体的形状										
A	-0.6	-0.18	0	0.89	3.03	5.65	1	0.48	2.19	4.71

图 4 水平形状系数 A 值取值图

式 (7) 仅适用于图 4 中所示接地体形状的接地电阻计算, 而对如丁 -1 式的典型风车式接地装置则按式 (8) 计算。

$$R_n = \frac{\alpha_{11} + \alpha'_{11} + 4\alpha_{12} + 2\alpha_{13}}{4} (\Omega) \tag{8}$$

式 (8) 中各项参数为

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{11} &= \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{d} \\ \alpha'_{11} &= \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{1}{2t} \\ \alpha_{12} &= \frac{\rho}{4\pi l^2} \left[D \operatorname{sh}^{-1} \frac{1}{D} + \operatorname{ls}^{-1} \frac{D}{1} + \right. \\ &\quad \left. \ln \operatorname{sh}^{-1} \frac{1}{l} + \operatorname{ls}^{-1} \frac{l}{1} \right] \\ \alpha_{13} &= \frac{\rho}{4\pi l^2} \left[(1+l) \times \right. \\ &\quad \left. \ln \frac{(1+l) + \sqrt{(1+l)^2 + D^2}}{l + \sqrt{l^2 + D^2}} + \right. \\ &\quad \left. D \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + D^2}}{D(\sqrt{2}-1)} + 2\sqrt{l^2 + D^2} - \right. \\ &\quad \left. D\sqrt{2} - \sqrt{(L_b+l)^2 + D^2} \right] \end{aligned} \right\} (\Omega) \tag{9}$$

式 (9) 中, α_{11} 为当 $e \geq 2$ 时的计算式。

2 接地模块的接地工频电阻计算

2.1 建立使用接地模块的接地装置布置形式

带接地模块的接地装置其适用范围多为山区地段场地狭小的塔位, 根据图 1 所示的常规接地装置安装图, 接地模块同甲 -1 式的接地装置结合使用是最为符合现场实际情况的, 其接地装置布置见图 6。

2.2 对使用模块的集中接地装置的基地工频电阻计算方法

对图 6 所示的甲 -A 型接地装置布置形式, 可视为接地闭合环网同接地模块并联, 因此可分别计算各自的工频电阻后, 再计算其并联后的工频电阻。

① 对甲 -A 接地装置的接地工频电阻计算方法如下。

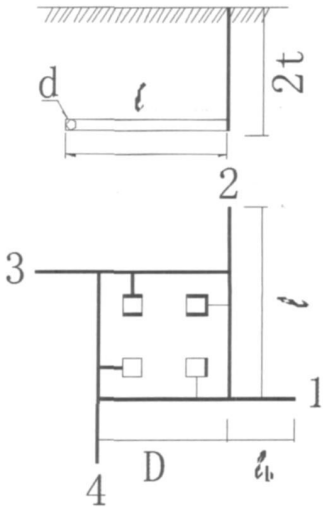


图 5 丁 -1 接地装置布置图

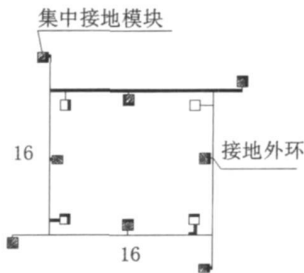


图 6 甲 -A 集中接地装置布置图

对闭合网的计算公式为式 (7), $R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \times (1_n$

$$\frac{L}{td} + A) (\Omega);$$

单个接地模块的接地工频电阻为 R_e (由接地模块生产厂家给出);

n 个接地模块组合后的接地工频电阻为

$$R_{\text{总}} = \frac{R_e}{n \times \eta} (\Omega) \tag{10}$$

则甲 -A 型接地工频电阻为

$$R = \frac{R_m \times R_e}{R_m + R_e} (\Omega) \tag{11}$$

② 计算实例

以代号 GD-04F44 低阻模块作为计算用接地模块, 接地土壤电阻率 $\rho=1\,000$, 接地水平体采用 D10 圆钢, 其埋设深度为 0.6 m。

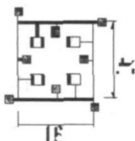
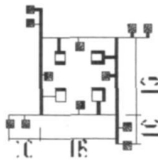
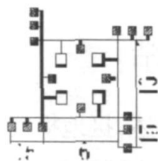
型 号	甲-A	乙-A	丙-A
土 壤 电 阻 率(欧·米)	500~1000	1000~2000	2000及以上
杆 塔 型 式	自 立 塔	自 立 塔	自 立 塔
接地沟开挖示意图 (单位: 米)			
最大允许工频电阻(欧)	15	20	27
集中接地模块(套)	8	12	16

图 7 500 kV 线路集中接地装置安装图

甲-A 型闭合网接地工频电阻为

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \times (1n \frac{L^2}{4d} + A)$$
$$= \frac{1\,000}{2 \times \pi \times 64} \times (1n \frac{64^2}{0.6 \times 0.01} + 1) = 35.9\,(\Omega)$$

GD-04F44 单个接地模块的接地工频电阻为

$$R_e = 0.158 \rho = 158\,(\Omega)$$

8 个接地模块组合后的接地工频电阻为

$$R_{\text{组}} = \frac{R_e}{n \times \eta} = \frac{158}{8 \times 0.7} = 28.2\,(\Omega)$$

则甲-A 型接地工频电阻为

$$R = \frac{R_m \times R_e}{R_m + R_e} = \frac{35.9 \times 28.2}{35.9 + 28.2} = 15.8\,(\Omega)$$

计算结果满足规程要求。

3 接地模块的应用

3.1 使用接地模块的集中接地装置布置形式

随着接地模块在工程中越来越多的使用,通过不断的总结与改进,目前工程实际中常用的集中接地装置布置图如图 7。接地模块主要形式如图 8、图 9。

3.2 接地模块的主要性能特点

- ① 接地模块与大地接触面积较大;
- ② 接地模块拥有极强的吸湿、保湿的作用,可降低附近土壤的电阻率;
- ③ 接地模块耐腐蚀性能很强,其理论使用寿命大于 50 年,且无污染;
- ④ 接地模块在经历多次大电流冲击后,模块电阻值不增大,也无变硬、发脆,无断裂现象;
- ⑤ 接地模块以固定状态“块”或“棒”为单位,运输及施工均较方便,可根据现场实际情况选择安装位置,并灵活选择安装方式为水平或垂直。



图 8 圆柱状接地模块

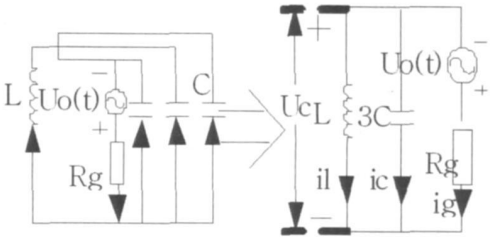


图 9 块状接地模块

3.3 接地模块施工要求

- 为充分发挥接地模块的作用,实现设计指标,对接地模块施工应作如下要求。
- ① 接地模块与水平接地圆钢的连接需扁钢焊接,元件连接处的焊接不得虚焊、漏焊。焊后应清除焊接处的焊渣,并涂上沥青或防腐漆;
 - ② 接地模块的敷设坑须比接地模块大 200 mm;
 - ③ 接地模块敷设前,应在坑底填约 200 mm 厚的粘土层,再放入模块并压实,可浇水使模块下沉与土壤紧密接触,然后逐层回填压实,最后再一次浇水使回填土下沉;
 - ④ 接地模块敷设间距须大于 3 m,以减小接地模块相互间的屏蔽效应;

⑤ 接地电阻测试应在接地模块吸湿 72 h 后进行;

⑥ 实测接地电阻不合格时,可采取增加接地模块的方法,在已敷设好的接地装置上补接接地模块直至合格为止。

4 总 结

综上所述,接地模块作为近年来出现的一种特殊结构的长效物理降阻剂,对于位于山区或城市规划区等复杂地形和缺水地区的塔位,接地模块的使用可有效降低接地工频电阻,同时具有耐腐蚀、无污染、运输

和施工简单、使用寿命长的鲜明特点。

参考文献

- [1] 东北电力设计院编. 电力工程高压架空送电线路设计手册 (第二版) [S]. 1999.
- [2] DL/T 621—1997, 交流电气装置的接地 [S].
- [3] DL/T 5092—1999, 110~500kV 架空送电线路设计技术规程 [S].

作者简介:

徐宏宇 (1972—), 工程师, 从事高压送电线路设计。

(收稿日期: 2009—03—05)

(上接第 74 页)

检测川小沟头 8 与其他所有发电机的功角曲线, 78% 的功角曲线都能检测到频率为 1.104 Hz 的模式, 川小沟头 8 只与 32 台发电机的功角曲线上检测不到这个模式。

其他相关性强的发电机, 如川小关子、川冷竹关、川自一里与其他所有发电机的功角曲线, 也有 65% 以上的能检测到这个模式。

川水牛家 ($P_n = 35 \text{ MW}$) 出口变压器附近施加小扰动时, 在它与二滩 01 ($P_n = 550 \text{ MW}$) 的功角曲线上也能检测到 1.104 Hz 的模式, 且能量最大。

应用的方法检测小干扰下的主导低频振荡模式可以得到与文献 [10] 一致的结果, 从而验证了所提方法在研究主导低频振荡模式对系统动态特性和稳定性问题上的正确性。

4 结 论

(1) 提出了一种新的检测小干扰下区域间主导低频振荡模式及其相关发电机方法, 所提方法可有效用于电力系统仿真曲线研究主导低频振荡模式中, 也可用于实际的功角曲线。所提出的方法, 无需对全网进行计算, 只获取系统的功角振荡波形, 算例结果表明, 所提方法有着较高的准确性, 且计算量小, 为实际系统的检测提供了有效途径。

(2) 对中国电力科学院 8 机 36 节点系统进行研究, 发现并不是在所有功角曲线都能, 而且任一条功角振荡曲线也不能检测到所有模式; 在特定故障下, 可以在特定的功角曲线上检测到小干扰下区域间主导低频振荡模, 此模式外, 还存在其它模式, 这些模式在系统振荡中虽然未能起主导作用, 但可以在某些条件下被

强烈激发出来, 也可以在特定的振荡曲线上检测到这些模式。

参考文献

- [1] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1—4.
- [2] 郑宝森, 郭日彩. 中国互联电网的发展 [J]. 电网技术, 2003, 27(2): 1—3.
- [3] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6—11.
- [4] 邓集祥, 华瑶, 韩雪飞. 大干扰稳定中低频振荡模式的作用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 60—64.
- [5] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21—25.
- [6] 中国电力科学研究院, 《电力系统分析综合程序》(PSASP6.24) 用户手册 [Z].
- [7] 穆钢, 王宇庭, 安军, 等. 根据受扰轨迹识别电力系统主要振荡模式的信号能量法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 7—11.
- [8] 邓集祥, 欧小高, 姚天亮. 基于小波能量系数的电力系统主导低频振荡模式的检测 [J]. 电工技术学报. (已录用)
- [9] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [10] 邓集祥, 涂进, 陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36—41.
- [11] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78—83.

作者简介:

白 洋 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析;

邓集祥 (1947—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—06—10)

10 kV 系统 TV 高压保险频繁熔断事故的分析与仿真

董家读¹, 黄 庆², 何 跃³, 张红涛¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 绵阳电业局, 四川 绵阳 621000;

3. 四川省电子技术研究中心, 四川 成都 610031)

摘 要:在中性点不接地系统中,经常发生电磁式电压互感器(TV)高压保险熔断现象,严重影响了电力系统的安全性,以往把 TV 高压保险熔断的原因归结为铁磁谐振,通过对一起 TV 高压保险熔断事故的分析,得出 TV 保险熔断的根本原因是故障恢复时电容放电引起的低频振荡电流,在 Matlab/Simulink 上的仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词:电压互感器; 高压保险熔断; 铁磁谐振; 低频振荡电流

Abstract In non-ground neutral system, high-voltage fuse breaking of electromagnetic voltage transformer (TV) often takes place which may severely influence the security and reliability of the power system. In the past, the reason for high-voltage fuse breaking of TV comes down to the ferragnetic resonance, but through analyzing a fuse breaking case, it is found that the real reason for high-voltage fuse breaking of TV is the low-frequency oscillation current when the failure recovers. The simulation results validate the correctness of theory analysis on Matlab/Simulink.

Key words voltage transformer (TV); high-voltage fuse breaking; ferragnetic resonance; low-frequency oscillation current

中图分类号: TM764 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0083-03

在中压配电网中,为了提高系统可靠性,中性点一般采取不接地的方式。为了监视三相对地电压,变电站母线上接有接线的 TV。在正常情况下,TV 励磁绕组感抗远远大于对地电容,TV 三相基本平衡,中性点位移电压很小,系统不会发生谐振。但单相接地故障消失或断路器非同期合闸等情况可引发 TV 饱和,使 TV 励磁感抗大大降低,在系统电感电容的配合下从而产生铁磁谐振。铁磁谐振产生的过电压和过电流将会引起 TV 损坏和停电事故,不仅影响供电可靠性,而且造成设备的损坏,严重威胁电网的安全稳定运行^[1,2]。在某些配电网中,单相接地消失后并不引起设备损坏,而是经常引起 TV 高压保险的熔断,这不仅影响电费的计量,而且容易造成工作人员的误判。

长期以来,人们把 TV 保险熔断的原因归结为铁磁谐振引起的过电流。然而,现场的运行实践表明,各种消谐措施对这种故障基本不起作用,这使人们对这一故障原因的解释产生了怀疑。经过进一步的研究,人们逐渐认识到,当系统的对地电容达到一定的数值后,单相接地消失后并不产生铁磁谐振,对地电容通过 TV 高压绕组放电产生的低频振荡电流才是保险熔断的根本原因^[3]。

分析了一起 TV 高压保险熔断的原因,通过理论分析计算得出故障的初步原因,然后建立了系统的数学模型,仿真验证了理论分析的正确性。

1 事故概述

2008 年 8 月 6 日,西南某 110 kV 变电站 10 kV 1 号母线 TV 在雷雨天气后出现 TV 高压保险两相熔断。历年来,此站经常出现 TV 高压保险熔断事故。

该 10 kV 1 号母线安装了 3 支全绝缘单相 TV,型号为 JDZX-10 25/30/100VA,由大连北方互感器厂生产,二次开口三角侧安装 WXZ196 型微机消谐装置,于 2001 年 12 月投运。

系统故障时的电路如图 1 所示。

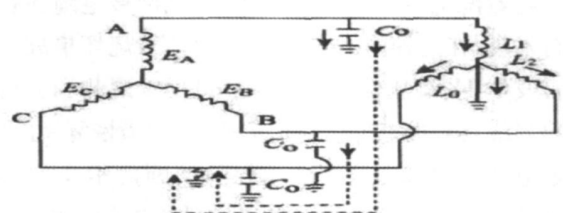


图 1 系统故障时的电路图

2 故障原因分析

2.1 TV 高压保险熔断的原因不是铁磁谐振

根据 Peterson 谐振分布原理,电力系统中发生谐振的频率与基频时系统对地电容的容抗 X_C 和互感器的感抗的 X_L 比值有直接关系^[4~6],即

1) 当比值为 0.01~0.08 时,发生分频谐振,表现为:过电压倍数较低,一般不超过相电压的 2.5 倍,二相电压表的指示数值同时升高,而且有周期性的摆动,线电压指示数正常。

2) 当比值为 0.08~0.8 时,发生基频谐振,表现为:三相电压两相高、一相低,线电压正常;产生很大的过电流,有时甚至会烧毁电压互感器;过电压倍数在 3.2 倍相电压以内,伴有接地动作或告警,即虚假接地现象。

3) 当比值为 0.8~3.0 时,发生高频谐振,表现为:过电压倍数较高;三相电压同时升高,最大值达相电压的 4~5 倍,线电压基本正常且稳定;谐振时过电流较小。

4) 当比值在上述范围以外时,不发生谐振。

根据对同类型 TV 的励磁阻抗测量实验,在线电压下故障 TV 的励磁阻抗为 $X_L = 2.96 \text{ M}\Omega$,该母线上共有 2 台 TV,则 $X_{Le} = 1.48 \text{ M}\Omega$ 。该系统大量使用电缆,架空线并不多,故忽略架空线的对地电容,电缆的对地电容取为 $3.01 \times 10^{-7} \text{ F/km}$,则该系统的对地电容为 $6.18 \text{ }\mu\text{F}$ 。因此,系统对地容抗为

$$X_{C0} = \frac{1}{314 \times 6.18 \times 10^{-6}} = 5.15 \times 10^{-4} \text{ M}\Omega \quad (1)$$

则系统的容抗与感抗之比为

$$k = X_{C0} / X_{Le} = 3.48 \times 10^{-4} < 0.01 \quad (2)$$

从式 (2) 可以看出,基频时系统对地电容的容抗与励磁绕组感抗之比不在铁磁谐振的范围之内,由此可判断引起 TV 高压保险熔断的原因并不是铁磁谐振。

2.2 TV 高压保险熔断的原因是低频振荡电流

随着配电网的发展,架空线路逐渐被电缆代替。运行发现,在这种网络中,较少发生 TV 烧坏事故,但经常发生 TV 高压保险熔断。经过反复观测和分析,得出当线路对地电容达到一定值后,故障恢复后的电容放电冲击电流是 TV 高压保险熔断的根本原因。下面从系统三相对地电容在接地过程中的充放电过程来分析产生这一现象的原因。

在不接地系统中, Y_0 接线的 TV 是系统三相对地的唯一金属通道。系统正常运行时,系统对地电容所带的总电荷为零。系统单相接地有两个过渡过程。一是接地时,二是接地消失时。当一相接地时,另两相的相电压升高为线电压,它们的对地电容上便冲上了和线电压对应的电荷,电荷以接地点为通路在导线和大地间流动,TV 高压绕组不会产生涌流。当接地消失时,情况就不同了。此时,非故障相的电压恢复为相电压,其对地电容上多余的电荷要流入大地,而原来接地通路已被切除,则此时电荷只有通过 TV 高压绕组流入大地。如果系统对地电容大,自由电荷多,在流入大地的过程中就要引起铁芯的饱和,在工频电源的作用下将会出现很大的冲击电流,造成熔断器熔断。

因此,TV 高压保险熔断的主要原因不是铁磁谐振,而是故障恢复时电容放电引起的冲击电流。

3 仿真分析

3.1 故障原因仿真

为了验证上述理论分析的正确性,在 Simulink 上建立了仿真模型。仿真中使 A 相单相接地,此时流过 C 相 TV 高压绕组的电流如图 2 所示。在上述实验的基础上,通过在故障后短接 TV 开口三角绕组来模拟消谐器,此时 C 相 TV 高压绕组的电流如图 3 所示。

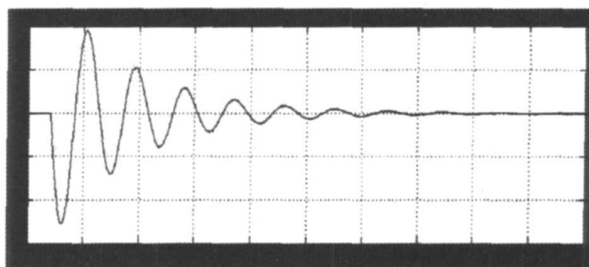


图 2 C 相 TV 高压绕组电流波形

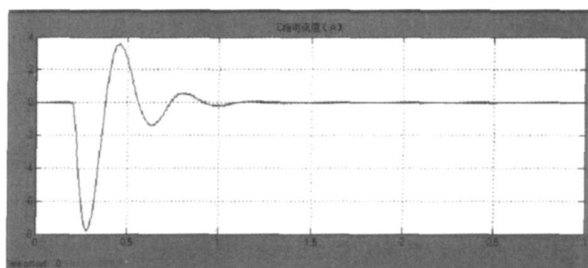


图 3 加装消谐器后 C 相高压绕组电流波形

从图 2 可以看出,流过 C 相 TV 高压绕组的电流

最高达十几安,而与 JDZJ 型电压互感器配套使用的 RN2 型保险的额定电流是 0.5 A,实际流过的电流远大于其额定值,如此高的电流必然会引起保险熔断。从图中还可以看出,此电流的频率很低,约 3 Hz 左右,故称为低频振荡电流。

从图 3 可以看出,安装消谐器后流过 TV 的电流并没有降到熔断器的额定值以下,这就是为什么现场安装了消谐器但仍然事故频发的原因。同时,这也充分说明了保险熔断的原因并不是铁磁谐振,从而验证了上述理论分析的正确性。

3.2 抑制措施仿真

对于 TV 高压保险熔断的防治,根本方法是减小故障恢复后的电容放电造成的冲击电流,为此可从两个方面考虑^[7]。一是系统中性点经电阻或消弧线圈接地,二是改变 TV 的接线方式,常用的包括 4TV 接线方式和 TV 中性点经电阻接地。由于改变系统中性点的接地方式是一项系统工程,虽然它可以抑制 TV 高压保险的熔断,但它有可能引发新的问题而使改进措施变的得不偿失,因此,重点考虑第二种方式。当采用 4TV 接线和 TV 中性点经 10 k Ω 电阻接地后 TV 高压绕组的电流如图 4 和图 5 所示。

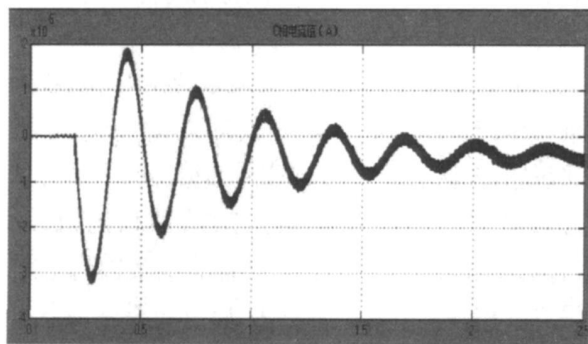


图 4 采用 4TV 接线方式后的电流

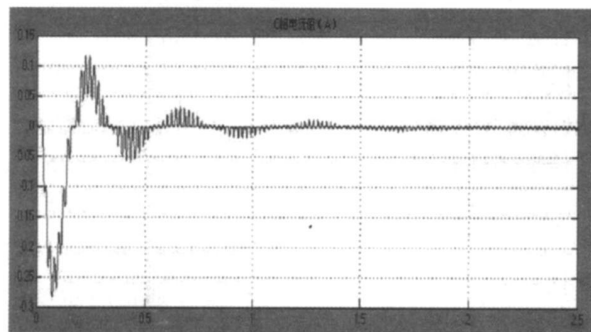


图 5 TV 中性点经电阻接地后的电流

从上图可以看出,当采用以上 2 种方法后,流过 TV 高压绕组的电流均小于熔断器的额定电流,显然

熔断器不会再熔断,从而证明了上述方法的有效性。同时,上述方法对铁磁谐振也有一定的抑制作用。需要指出的是,不管采用那种方式,一定要先进行技术经济比较,综合考虑各种因素,通过系统的调查研究和分析计算,提出完整的技术改造方案,然后循序渐进,以保证配电网的安全运行,提高供电可靠性。

4 结 论

分析了一起 TV 高压保险熔断的原因,并在 Matlab/Simulink 上建立了系统的仿真模型,仿真验证了理论分析的正确性,并给出了抑制措施。随着配电网的发展,TV 高压保险熔断的事故越来越多,以往把事故原因归结为铁磁谐振是不正确的,只有走出这个误区才能防止此类事故不再发生,从而提高配电网的安全可靠性。

参考文献

- [1] 方瑜. 配电网过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [2] 陈慈萱. 过电压保护原理与运行技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] 温新康. 10~35 kV 中性点不接地系统中防止 TV 高压熔断器熔断的方法 [J]. 高压电器, 2002, 38(2): 52—53.
- [4] 孙增杰, 王铁强, 王海荣. 电力系统铁磁谐振分析综述 [J]. 电力设备, 2007, 8(12): 62—64.
- [5] 黄文韬. 一例电磁式电压互感器“虚幻接地”现象的原因分析 [J]. 继电器, 2004, 32(24): 66—68.
- [6] 卢国伟, 罗凯. 中性点不接地系统的铁磁谐振 [J]. 湖北电力, 2008, 31(1): 30—32.
- [7] 葛栋, 鲁铁成, 王平. 配电网铁磁谐振消谐机理仿真计算研究 [J]. 高电压技术, 2003, 29(11): 15—17.

作者简介:

董家读 (1985—), 男, 硕士, 主要从事配电网自动化方面的研究工作;

黄 庆 (1969—), 男, 工程师, 主要从事电力系统的运行工作。

(收稿日期: 2009—06—10)

CAN 在 110 kV 变电站综合自动化系统的应用

刘朝毅, 曾绍成, 雷明亮

(自贡电业局, 四川 自贡 643000)

摘 要:对变电站综合自动化系统的几种通信方式进行了比较, 结合实际情况浅谈了 CAN 在 110 kV 变电站综合自动化系统中的应用和注意事项。

关键词:综合自动化; 串行通信; 现场总线

Abstract: Several communication methods of integrated automation system in substation are compared. According to the actual situation, the application of CAN to integrated automation system in 110 kV substation is discussed as well as the points needing attention.

Key words: integrated automation; serial communication; field bus

中图分类号: TM76 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0086-03

数据通信网络是变电站综合自动化系统的关键组成部分, 它是变电站综合自动化系统中各种信息传输的通道, 数据通信网络的性能直接影响变电站综合自动化的整体性能。借助于通信, 各断路器间隔中保护测控单元、变电站计算机系统、电网控制中心自动化系统得以相互交换信息和信息共享, 提高了变电站运行的可靠性, 减少了连接电缆和设备数量, 实现变电站远方监视和控制。

1 变电站综合自动化系统对通信网络的要求

经济、可靠的数据通信是变电站综合自动化系统的技术核心, 变电站的特殊环境使得变电站自动化系统内的数据通信网络应满足以下要求: 快速的实时响应能力、高可靠性、优良的抗干扰能力。

在电力工业标准中对系统的数据传输都有严格的实时性指标, 网络必须保证数据通信的实时性。变电站是一个具有强电磁干扰的环境, 存在雷电、电源、跳闸等强电磁干扰和地电位差干扰通信环境恶劣, 数据通信网络必须采取相应的措施消除这些干扰的影响, 提高通信的可靠性。

2 综合自动化系统常用几种通信方式的比较

2.1 串行数据通信组网技术

串行通信是数据一位一位顺序地传送, 串行通信

有以下特点。

串行通信的最大优点是串行通信数据的各不同位, 可以分时使用同一传输线, 这样可以节约传输线, 减少投资, 并且可以简化接线。特别是当位数很多和远距离传送时, 其优点更为突出。但串行通信的速度慢, 且通信软件相对复杂。因此特别适合于远距离传输, 数据串行传输距离可达数千公里。

在变电站综合自动化系统内部, 各种自动装置间或继电保护装置与监控系统间, 为了减少连接电缆, 简化接线, 降低成本, 常采用串行通信。

(1) RS232 的优点是通讯为全双工可以用于任何规约。在平时工作中可以通过测量 TX 和 RX 端子的电压来快速判断接线是否正确, 可以通过短接 TX 和 RX 端子快速检查接口的好坏。缺点是接口的信号电平值较高, 易损坏接口电路的芯片; 传输速率较低, 在异步传输时, 波特率为 20 Kbps 接口使用一根信号线和一根信号返回线而构成共地的传输形式, 这种共地传输容易产生共模干扰, 所以抗噪声干扰性弱; 传输距离有限, 最大传输距离标准值为 15.25 m, 实际上也只能用在 50 m 左右, 并多只能点对点通讯。现在主要用来和直流屏、五防、以及一些保护装置进行点对点通信, 通过 Modem 与调度端通信时也要通过 RS232 接口。

(2) RS485 接口信号电平低, 不易损坏接口电路的芯片, 且该电平与 TTL 电平兼容, 可方便与 TTL 电路连接; RS485 的数据最高传输速率为 10 Mbps 比

RS232 高, RS485 接口是采用平衡驱动器和差分接收器的组合, 抗共模干扰能力增强, 即抗噪声干扰性好; RS485 最大的通信距离约为 1 219 m, 比 RS232 远。RS485 总线一般最大支持 32 个节点, 如果使用特制的 485 芯片, 可以达到 128 个或者 256 个节点, 最大的可以支持到 400 个节点。

因 RS485 接口具有良好的抗噪声干扰性, 长的传输距离和多站能力等上述优点就使其成为首选的串行接口。因为 RS485 接口组成的半双工网络, 一般只需二根连线, 所以 RS485 接口均采用屏蔽双绞线传输, 缺点是只能半双工通信。

(3) RS422 与 RS485 比较相近, 优点是四线全双工通信, 且抗干扰能力强, 但由于要占用两个串口, 所以一般使用较少。

2.2 现场总线技术

先场总线是当今自动化领域技术发展的热点之一, 被誉为自动化领域的计算机局域网。它的出现为分布式控制系统实现各节点之间实时、可靠的数据通信提供了强有力的技术支持。

常用的有 LonWorks 网和 CAN 网两种, 两个网络均为中速网络。CAN 网是一种多主总线, 采用串行数据通信协议, 通信介质可以是双绞线、同轴电缆或光纤。CAN 属于现场总线的范畴, 它是一种有效支持分布式控制或实时控制的串行通信网络。较之目前许多 RS485 基于 R 线构建的分布式控制系统而言, 基于 CAN 总线的分布式控制系统在以下方面具有明显的优越性: 首先, CAN 控制器工作于多主方式, 网络中的各节点都可根据总线访问优先权 (取决于报文标识符) 采用无损结构的逐位仲裁的方式竞争向总线发送数据, 且 CAN 协议废除了站地址编码, 而代之以对通信数据进行编码, 这可使不同的节点同时接收到相同的数据, 这些特点使得 CAN 总线构成的网络各节点之间的数据通信实时性强, 并且容易构成冗余结构, 提高系统的可靠性和系统的灵活性。而利用 RS485 只能构成主从式结构系统, 通信方式也只能以主站轮询的方式进行, 系统的实时性、可靠性较差; 其次, CAN 总线通过 CAN 控制器接口芯片 82C250 的两个输出端 CANH 和 CANL 与物理总线相连, 而 CANH 端的状态只能是高电平或悬浮状态, CANL 端只能是低电平或悬浮状态。这就保证不会出现现象在 RS485 网络中, 当系统有错误, 出现多节点同时向总线发送数据时, 导致总线呈现短路, 从而损

坏某些节点的现象。而且 CAN 节点在错误严重的情况下具有自动关闭输出功能, 以使总线上其他节点的操作不受影响, 从而保证不会出现现象在网络中, 因个别节点出现问题, 使得总线处于“死锁”状态。另外, CAN 总线通信速率高 (CAN 网在小于 40 m 时达 1 Mb/s)。

2.3 以太网技术

以太网是一种标准开放式的网络, 由其组成的系统兼容性和互操作性好, 资源共享能力强, 可以很容易实现将控制现场的数据与信息系统上的资源共享; 数据的传输距离长、传输速率高; 它具有高可靠性、高传输速率 (一般可达 10~100 Mbps), 并可以在网内任意增加节点而不影响数据通信, 灵活性好。另外, 以太网技术实用性强, 软、硬件支持性好。以太网组网结构见图 1。

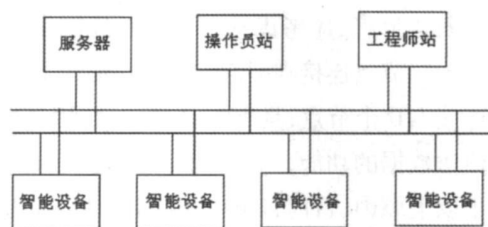


图 1 以太网应用模式

以太网虽然优点很多, 但也有一些缺点。以太网采用的是带有冲突检测的载波侦听多路访问协议 (CSMA/CD), 无法保证数据传输的实时性要求, 是一种非确定性的网络系统; 安全可靠性问题, 以太网采用超时重发机制, 单点的故障容易扩散, 造成整个网络系统的瘫痪, 且以太网组网成本更高。所以一般多用于 220 kV 及以上等级变电站。

3 CAN 在自贡电业局 110 kV 变电站中的应用

通过以上介绍可以知道在小规模的 35 kV 变电站和 110 kV 终端变电站, 以及老站改造中可考虑使用 RS422 和 RS485 组成的网络。RS422 和 RS485 网络的不足在于接点数目比较少, 无法实现多主冗余, 有瓶颈问题。RS422 的工作方式为点对点, 上位机一个通信口最多只能接 10 个节点, RS485 串口构成一主多从, 只能接 32 个节点, 此外有信号反射、中间节点问题。

当变电站规模较大时, 站内节点数较多, 一般在 40 个以上, 多主冗余要求和节点数量增加使 RS422

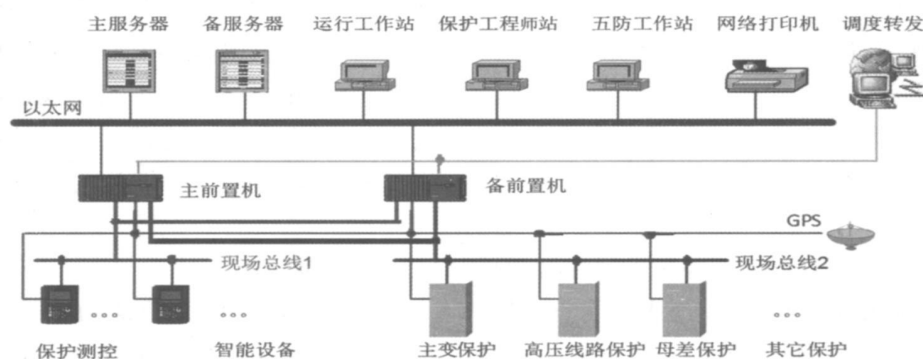


图 2 110 kV 变电站典型系统配置

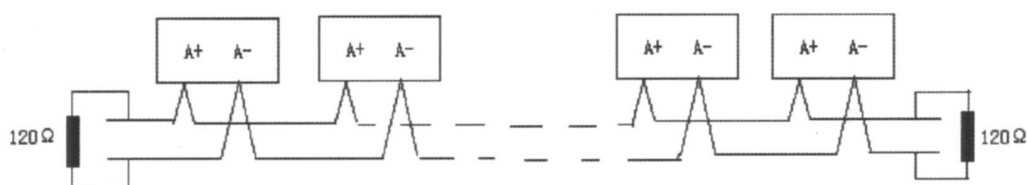


图 3 CAN 网匹配电阻的连接

和 RS485 难以胜任,应考虑选择现场总线网络。现场总线网将所有节点连接在一起,可以方便地增减节点,一般可连接 110 个节点;具有点对点、一点对多点 and 全网广播传送数据的功能。

由于以上原因,目前自贡电业局 110 kV 变电站的综合自动化系统中相当部分采用 CAN 通信,总的情况运行稳定可靠。CAN 组网结构见图 2。

CAN 通讯方式虽比 RS485 具备较强优势,但在具体的运用中也可能遇到一定的问题,需要在实践中不断摸索、掌握,并加以改进。特别要注意的是 CAN 的抗干扰问题和带负荷能力的问题。在自贡电业局 110 kV 沿滩变电站 1 号主变压器综合自动化改造时,站内共有 26 保护测控装置,经过比较选用了 CAN 组网。在运行中出现总控单元与测控单元通信时断时通的现象,经查是由于通讯电缆较长、且 CAN 网两端电阻不匹配引起反射驻波,后在 CAN 网两端各并了一个 $120\ \Omega$ 的电阻后问题得到解决(见图 3)。

在 110 kV 沿滩变电站 2 号主变压器扩建工程中,保护测控装置的数量增加到了 36 个,都接在 CAN1 口,在调试中发现远传遥测量数据丢失了一部分,经过

反复检查,最后发现是由于 CAN1 口带的设备超过了 32 个引起的,后将部分装置接入 CAN2 口后故障消失。

4 结 论

通过以上对综合自动化系统通信方式介绍,知道了各种通信方式的优缺点和适用范围。知道了 CAN 在 110 kV 变电站综合自动化通信中重要作用和应该注意的问题,对以后在变电站综合自动化系统组网选择和故障处理方面有一定的帮助。

参考文献

- [1] DL/T 634—1997, 远动设备及系统 (第 5 部分: 传输规约) [S].
- [2] DL/T 634. 5104—2002, IEC 60870—5—104—2000. 远动设备及系统 (第 5—104 部分: 传输协议) [S].
- [3] 赵渊, 沈智健. 基于 TCP/IP 的 IEC60870—5—104 远动规约在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2003, (10): 56—60.

(收稿日期: 2009—06—30)

(上接第 45 页)

- [9] 孙宇瑞. 非饱和土壤介电特性测量理论与方法的研究 [D]. 中国农业大学. 博士论文, 2000.
- [10] [美] 爱·弗·万斯 [著]. 高攸纲, 吕英华 [译]. 电磁场对屏蔽电缆的影响 [M]. 人民邮电出版社, 1988.
- [11] Rakotmalala A.; Auriol Ph.; Rousseau A. eds

Lightning distribution through earthing systems IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 1994, 419.

- [12] 张三慧. 大学物理学—电磁学 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

(收稿日期: 2009—06—22)

对 220 kV 龙丰东线线路保护更换工程的认识

罗永刚¹, 高锦锋²

(1 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072; 2 绵阳电业局, 四川 成都 621000)

摘 要:着重介绍了 220 kV 线路保护更换时的危险点、保护预试的过程, 分析了保护预试、带负荷测试中所出现的问题及解决的方法, 这对提高 220 kV 线路保护的更换技术水平具有一定的指导意义。

关键词:220 kV 线路; 保护更换; 危险点分析; 保护预试; 负荷测试

Abstract: The dangerous points when replacing the protection of 220 kV line and the process of the pre-test of protection are introduced emphatically. The problems occurring in the pre-test of protection and load test are analyzed, and the solutions are suggested. It is an important guidance for enhancing the technical level of protection replacement of 220 kV line.

Key words: 220 kV line; protection replacement; dangerous point analysis; pre-test of protection; load testing

中图分类号: TM773 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0089-03

220 kV 录波器及 220 kV 母差保护按原有间隔回路接入。

1 工程特点及主要内容

220 kV 丰谷站 220 kV 龙丰东线 263 号开关保护原为南瑞的 LFP900 型保护, 由于德阳 220 kV 电网改造, 需将 220 kV 丰谷站 220 kV 龙丰东线 263 号开关保护拆除更换。按改造计划, I 号屏换为南瑞继保 PRC31A-06 保护, II 号屏换为南自 GPSL602U-121P 保护。以往进行线路保护的典型配置为双重化的同厂家的保护, 保护调试相对简单些, 而这次涉及到两站相互间的配合, 因此相对于以往的保护更换工程更加困难。

工程内容主要包括以下内容: 拆除原有 263 号开关保护屏两面及屏顶小母线; 新安装南自厂 GPSL602U-121P 保护屏一面及南瑞继保公司 PRC31A-06 保护屏一面; 将所有盘间电缆更换为屏蔽电缆, 如场地电缆不是屏蔽电缆也应一起更换; 增加操作箱电压切换的常闭接点和双跳圈回路; 检查阻波器及结合滤波器是否满足新线路高频保护对频率的要求。注意阻波器和结合滤波器都应是宽频, 同时结合滤波器的一次接地和二次接地应分开; PSL602U 及 RCS931A 保护的调试; 收发讯机的调试 (耦合 C 相, 频率: 134 kHz); 在载波室增加 MUX-2M、GXC-64/2M 通讯接口各一套 (与光纤保护配合); 高频、光纤保护与德阳中江变电站侧对调及开关的传动试验; 安装完毕后还应与远动联调控制、信号、测量回路;

2 工程的主要危险点分析

在本次工程中主要考虑的特殊危险点如下。

1) 对带电运行的考虑: 撤除该保护屏电压小母线时, 应采取相邻运行屏不失压的技术措施。用临时电缆将相邻运行屏电压桥接, 桥接时应用万用表测量对接线之间的电压, 防止电压回路短路。

2) 在做变比试验时, 应在母差保护屏上将该线路电流二次回路连接片断开并在电流端子外侧短接, 避免升一次电流时, 母差保护误动。

3) 由于该站已经按反措要求进行了直流双重化改造, 应特别注意 I 号、II 号保护屏用的直流电源应该取自不同的直流馈线屏, 双套直流回路严禁出现迂回回路。

4) 对线路加工设备阻波器、结合滤波器应该进行严格的测试, 特别是阻波器中的避雷器、调谐电容检查。

3 保护装置预试中所出现的问题及解决办法

本次工程中的一个特殊的地方在于线路保护的通道采用光纤和高频通道的切换方式, 因此如何保障通道切换功能的正常工作是本次工程的重点之一。

光纤通道和高频通道的调试方法及切换通道的试验,模拟高频保护区外故障对侧开关在合位,本侧加正向故障,保护不动作。原因是本侧正方向元件虽然停信,但对侧收发信机被启信后,无停信元件,长发 10 s 本侧收发信机收到闭锁信号,故保护不出口。模拟高频保护区内故障对侧开关在跳位,本侧加正向故障,保护动作。原因为本侧正方向元件停信,对侧开关在跳位延迟 100 ms 发信,本侧收发信机收不到信号,故保护出口。

在做传动试验时,采用每块屏单跳单重的试验方法,检查二次回路连线。由于该线路原保护配置为单操作箱,本次增加为双操作箱,原开关副跳圈未启用,故试验时应将副跳圈回路重点检查。试验时发现了副跳圈由于长期未启用, A 相跳圈动作时产生的电磁力不够,不能保证开关可靠跳闸,更换跳圈后,恢复正常,开关可靠跳闸。

4 带负荷测试中出现的问题及解决的办法

在进行了线路保护更换后,非常重要的一点在于保证二次回路的正确性,尤其是交流回路,因此应该进行带负荷测试,在本次工程中,通过带负荷测试发现了一些问题,下面进行详细介绍。

线路与系统合环后,应立即用伏安相位表检查,以 U_a 为准,检查各个电流互感器二次作出的六角图应正确。同时观察微机保护屏的液晶在线测量数值相符,特别是 RCS931A 的差流计算值。在测试过程中应当根据潮流情况,需核实 TA 变流比和极性。在本次投运过程中出现了对侧由于一次线路改接错误造成相序变为 CAB 的问题,通过带负荷试验发现差流计算值超过误差范围,及时进行了分析,并且通知对侧改接相序,保证了差动回路的正确性,将隐患消除,保证了该线路的可靠运行。

2007 年 9 月 23 日,四川省一条 220 kV 线路甲丙线开 II,在投运时发生这样的现象,两侧保护装置均为南瑞继保 RCS931AM 光纤差动保护,甲站侧保护人员做带负荷试验 A 相电流 0.40 A、 190° , B 相电流 0.40 A、 311° , C 相电流 0.40 A、 72° ,功率方向为受有功、受无功。乙站侧保护人员做带负荷试验 A 相电流 0.41 A、 8° , B 相电流 0.41 A、 127° , C 相电流 0.40 A、 247° ,功率方向为送有功、送无功。但是两侧 RCS931AM 保护装置均出现告警现象,经过保护人员

检查是差流告警,在保护状态菜单里面发现两侧保护装置所测三相差流均为 0.7 A 左右,在相角显示菜单中两侧电流夹角为 $I_a - I_{ar}$ 298° , $I_b - I_{br}$ 298° , $I_c - I_{cr}$ 298° 。刚开始保护人员判断为线路容性电流造成,认为随着负荷的增加差流会逐渐的减小,但负荷增加到 0.5 A 时,差流也增加到 0.86 A 左右。是怎样造成此种情况见图 1 所示。

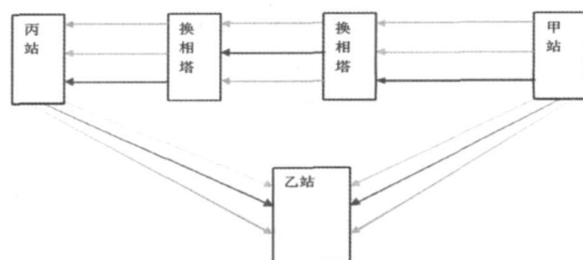


图 1 网络框架图

甲站是已经投运的变电站,乙站是一个新投运的变电站,丙站是已经投运的变电站,原来甲丙线是连接甲站和丙站的联络线,因为电网建设甲丙线在乙站处开 II 变为丙乙线和甲乙线。最初甲丙线线路在乙站附近有一级换相塔,甲站出去的线路相序为 ABC,但到换相塔时变成了 BCA,进入丙站时施工人员又在另一级换相塔处改回到 ABC,故原甲丙线运行正常。本次工作后,施工人员未注意到换相塔的相序,还是将甲丙线在乙站处按照 BCA 相序接入,造成甲站和丙站进乙站的相序都为 BCA。当时调度命令由丙站向乙站 I 母充电,甲站向乙站 II 母充电,通过母联开关检同期合环成功。由于 BCA 也是一个正相序,保护装置未发 TV 断线信号,乙站保护人员在做带负荷试验时按照二次回路的编号测试,本来基准电压应该用 A 相电压,其实此时用的是系统 B 相电压,系统的 B 相电流也就成为乙站的 A 相电流,故带负荷试验的结论和系统的功率送受情况一致。经过两侧的保护人员配合,从保护装置测试的数据,画出矢量图判断为线路上的相序错误造成差流过大。如图 2 所示。

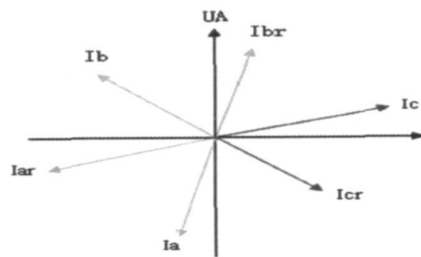


图 2 相量图

I_a 、 I_b 、 I_c 为本侧电流, I_{ar} 、 I_{br} 、 I_{cr} 为本侧装置采对侧电流 (实际相序是 BCA)。

根据余玄定理 $I_a - I_{ar}$ 的幅值 (A 相差流) 应为:

$$\sqrt{I_a^2 + I_{ar}^2 - 2I_a I_{ar} \cos 120^\circ} \approx 0.7; \text{BC 两相同理。}$$

故该线路停运后将相序按照 ABC 相序调回后, 差流消失, 该线路恢复正常运行。

5 对其他问题的认识

5.1 危险性应充分考虑

在继电保护装置更换中, 应当考虑到由于继电保护装置接线复杂, 拆除及接入容易出问题, 造成危害。在进行更换前, 必须解决此类事故隐患, 保证更换工作顺利。由于拆除屏箱及重新安装屏箱时, 双母线等主接线保护屏存在启动母线保护失灵, 启动故障录波器、远动信号等, 二次电压短路、二次电流开路也存在十分大的危险性。为保证安全, 在施工中找出更换保护优选法、拆线、测量与被测量接入的方法, 提高了质量与效益。在更换屏的过程中, 应当确保继电保护的可靠性。

5.2 带电更换时优先考虑减少带电操作

在更换保护时, 应当尽量减少带电操作, 这样减少出错的概率。由于本次保护屏的更换, 附件没有空余的地方, 因此不能采用先安装后停电的方案, 在调度负荷转移并停电后进行了操作。在更换时, 在拆除屏前, 首先检验在没有电压的情况下进行, 然后拆除相关连接回路 (失灵、联跳等), 再进行新屏的安装。在安装时, 对于失灵等危险点的部分则可考虑暂不接入, 在投运前接入。

5.3 更换保护屏应注意电缆

为保证质量, 设计要求 $<100\text{m}$ 的电缆, 既屏与屏的联系电缆重新敷设新电缆, 对于长距离的电缆从节约材料、人力出发, 检查结果合格后使用。重新使用的电缆必须符合以下要求:

电缆型号应符合设计。屏蔽线用 4mm^2 的多股铜线安装好。

电缆外观检查无锈蚀、老化, 用钩刀 (做电缆专用工具) 剥开 0.5m 钢铠后检查电缆钢铠、塑料护层、导线芯崭新如故。

对于电缆绝缘电阻对地、相对相之间 $>100\text{M}\Omega$, 即可使用。号头、号牌使用专用微机烫印机。在进行更换过程中, 可采用新旧电缆结合, 节约了人力及物力。

5.4 保护对调

由于南自厂 PSL602U 主保护为光纤转高频保护, 在全川也是第一套新上。在调试过程中应该特别注意其中的一个重要逻辑, 即平时光纤通道正常时主保护为光纤保护, 当光纤通道出现异常时, 主保护应该自动切换到高频保护。

5.5 传动试验

根据调试要求, 通过断路器联动检查回路正确, 信号发出无误。有时发现断路器的回路不正确, 可拆除断路器跳合闸回路的连线, 接上分相操作模拟试验箱, 再带断路器联动, 以减少断路器开合闸次数。在调试时, 还应检验断路器合闸线圈的压降不小于额定值的 90% 。

更换后的保护屏经过 12 个月的运行, 据绵阳电业局继保班的调查核实, 2 套保护屏的继电保护装置动作正确率达 100% , 满足了系统对继电保护装置的基本要求。

(收稿日期: 2009—07—10)

(上接第 31 页)

数自整定 [J]. 控制与决策, 2005, 20(1): 73—77.

[6] 陈卫国. 基于微粒群算法的智能控制系统研究与应用 [C]. 湖南大学硕士学位论文, 2006.

作者简介:

李凌舟 (1973—), 女, 讲师, 研究方向为电力系统及其自动化。

陈利 (1971—), 女, 讲师, 研究方向为电力系统自动化及故障诊断。

(收稿日期: 2009—09—10)

Y/yn 接线变压器带单相负载的计量原理分析

张 蕾

(成都电业局锦江供电公司, 四川 成都 610061)

摘 要:在 10 kV 供电系统中, Y/yn 变压器运用相当广泛, 在 10 kV 侧采用三相三线计量方式的用电客户较多, 运行中 0.4 kV 侧可能接入单相负载, 出现极端不对称运行情况, 主要运用对称分量法分析这种运行状态下, 10 kV 侧三相三线制计量装置的计量原理。

关键词: Y/yn 变压器; 单相负载; 三相三线; 计量原理

Abstract: Y/yn transformer is widely used in 10 kV power supply system. Most consumers adopt the three-phase three-wire measurement on its 10 kV side. In this way, the 0.4 kV side of such transformer may connect to single-phase load and bring on the extreme asymmetric operation. Under such operating condition, the measurement principles of three-phase three-wire metering are analyzed by symmetrical component.

Key words: Y/yn transformer; single-phase load; three-phase three-wire; measurement principle

中图分类号: TM744 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0092-03

1 变压器低压侧接入 A 相负载

1.1 低压侧电流的各序分量

当低压侧的 A 相接入单相感性负载时, $\dot{I}_A = \dot{I}$ (负载电流), $\dot{I}_B = \dot{I}_C = 0$ 。如果 A 相的电压用 U_A 表示, 相位角用 Φ_a 表示, 则低压侧的有功功率为 $U_A \times I \times \cos\Phi_a$ 。

运用对称分量法, 可以将负载电流分解为三组对称的正序、负序、零序分量, 分解过程如下。

根据对称分量表达式

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{A+} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_A + A \dot{I}_B + a^2 \dot{I}_C) \\ \dot{I}_{A-} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_A + a^2 \dot{I}_B + A \dot{I}_C) \\ \dot{I}_{A0} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ}$ 和边界条件方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_B = 0 \\ \dot{I}_C &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

求得 A 相的各序分量为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{A+} &= -\frac{1}{3} \dot{I} \\ \dot{I}_{A-} &= -\frac{1}{3} \dot{I} \\ \dot{I}_{A0} &= \frac{1}{3} \dot{I} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据式 (3), 绘出低压侧电流各序分量的相量图见图 1。

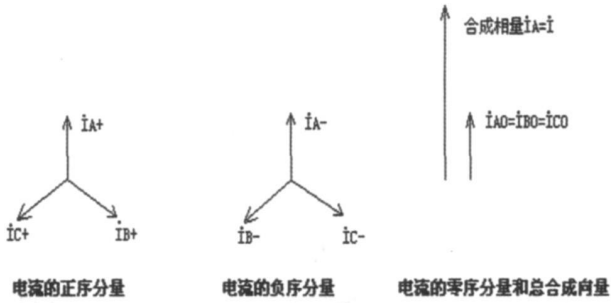


图 1 Y/yn 变压器低压侧接入 A 相负载时电流的各序分量

1.2 高压侧的一次电流

由于变压器高压侧的中性点不接地, 所以低压侧的零序电流不能在高压侧通过, 只有正序、负序电流才能感应到高压侧, 将低压侧电流的正序、负序分量叠加后, 绘出高压侧电流各序分量和合成电流的相量图见图 2。

从图 2 可以得知高低压侧电流的关系为

$$\dot{I}'_A \times K_b = -\frac{2}{3} \dot{I}$$

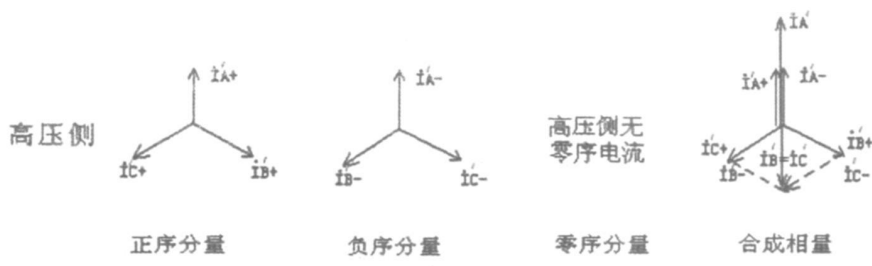


图 2 接入 A 相负载时高压侧电流的各序分量和合成相量
注: 电流符号带 " ' " 的均代表高压侧。

$$\dot{I}'_b \times K_b = \dot{I}'_c \times K_b = -\frac{1}{3} \dot{I}$$

上式中 K_b 为变压器的变比。

1.3 高压侧三相三线制计量装置的计量原理

设高压侧电流互感器变流比为 K_i , 电压互感器变流比为 K_v 。

$$\dot{I}'_a = -\frac{2}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_i}; \quad \dot{I}'_b = -\frac{1}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_i}; \quad \dot{I}'_c = -\frac{1}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_i}.$$

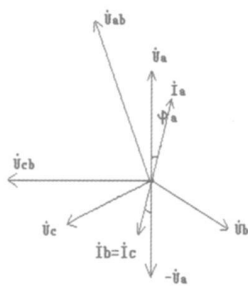


图 3 接入 A 相负载时高压侧计量装置的相量图

$$P_2 = P_a + P_c = U_{ab} I_a \cos(30^\circ + \varphi_a) + U_{cb} I_c \cos(90^\circ - \varphi_a)$$

$$= \frac{U_{ab} \times \frac{2}{3} I \times \cos(30^\circ + \varphi_a) + U_{cb} I_c \cos(90^\circ - \varphi_a)}{K_b \times K_i}$$

$$= \frac{U_a I \cos \varphi_a}{K_b \times K_i}$$

一次功率为

$$P_1 = P_2 \times K_v \times K_i = \frac{U_a I \cos \varphi_a}{K_b \times K_i} \times K_v \times K_i$$

$$= \frac{U_a \times K_v \times K_v \times I \cos \varphi_a}{K_b} = U_a I \cos \varphi_a$$

其中, $\frac{U_a \times K_v}{K_b} = U_A$ (低压侧 A 相电压)。

可见, 经互感器、变压器变比折算后, 忽略变压器损耗, 电能表反应的功率和低压侧的 A 相负载功率一致, 故能正确计量低压侧的电量。

2 变压器低压侧接入 B 相负载

2.1 折算后高压侧的二次电流

同 A 相接入负载一样, 利用对称分量法, 分解出低压侧 B 相电流的正序、负序、零序三组分量, 将正序、负序分量叠加, 得到高压侧的二次电流。

$$\dot{I}'_b = -\frac{2}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_i}; \quad \dot{I}'_a = -\frac{1}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_i}; \quad \dot{I}'_c = -\frac{1}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_i}$$

1.2 电能表计量原理分析

由于高压侧的计量装置采用三相三线制, 可以得到计量装置的相量图, 见图 4。

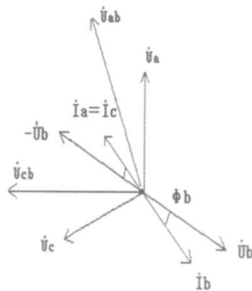


图 4 接入 B 相负载时高压侧计量装置的相量图

由图 4 的向量图可以得出电能表接收的二次功率。

$$P_2 = P_a + P_c = U_{ab} I_a \cos(30^\circ - \varphi_a) + U_{cb} I_c \cos(30^\circ + \varphi_b)$$

$$= \frac{U_{ab} \times \frac{1}{3} I \times \cos(30^\circ - \varphi_a) + U_{cb} \times \frac{1}{3} I \times \cos(30^\circ + \varphi_b)}{K_b \times K_i}$$

$$= \frac{U_b I \cos \varphi_b}{K_b \times K_i}$$

一次功率为

$$P_1 = P_2 \times K_v \times K_i = \frac{U_b I \cos \varphi_b}{K_b \times K_i} \times K_v \times K_i = \frac{U_b \times K_v \times K_i \cos \varphi_b}{K_b}$$

$$= U_b I \cos \varphi_b$$

其中, $\frac{U_b \times K_v}{K_b} = U_b$ (低压侧 B 相电压)。

可见,经互感器、变压器变比折算后,忽略变压器损耗,电能表反应的功率和低压侧的 B 相负载功率一致,故能正确计量低压侧的电量。

3 低压侧只接入 C 相负载

3.1 折算后高压侧的二次电流

同 A 相接入负载一样,利用对称分量法,分解出低压侧 C 相电流的正序、负序、零序三组分量,将正序、负序分量叠加,得到高压侧的二次电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_c &= \frac{2}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_1}; \quad \dot{I}_a = -\frac{1}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_1}; \\ \dot{I}_b &= -\frac{1}{3} \times \frac{\dot{I}}{K_b K_1} \end{aligned}$$

3.2 电能表计量原理分析

根据以上结论,可以得出高压侧计量装置的相量图,见图 5。

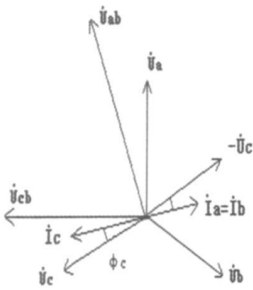


图 5 接入 C 相负载时高压侧计量装置的相量图

$$P_2 = P_a + P_c = U_{ab} I_a \cos(90^\circ + \varphi_c) + U_{cb} I_c \cos(30^\circ - \varphi_c)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{U_{ab} \times \frac{1}{3} I \times \cos(90^\circ + \varphi_c) + U_{cb} \times \frac{2}{3} I \times \cos(30^\circ - \varphi_c)}{K_b \times K_1} \\ &= \frac{U_c I \cos \varphi_c}{K_b \times K_1} \end{aligned}$$

一次功率为

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 \times K_y \times K_1 = \frac{U_c I \cos \varphi_c}{K_b \times K_1} \times K_y \times K_1 = \frac{U_c \times K_y \times K_1 \cos \varphi_c}{K_b} \\ &= U_c I \cos \varphi_c \end{aligned}$$

其中, $\frac{U_c \times K_y}{K_b} U_c$ (低压侧 C 相电压)。

可见,经互感器、变压器变比折算后,忽略变压器损耗,电能表反应的功率和低压侧的 C 相负载功率一致,故能正确计量低压侧的电量。

4 结 论

Y/yn 接线的 10 kV 变压器,在 0.4 kV 侧接入单相负载时,通过互感器、变压器变比折算后,忽略变压器损耗,电能表反应的功率和低压侧的单相负载功率一致,因此,这种极端不对称运行方式下,电能表能正确计量低压侧的电量。同时,当接入单相负载时,负载相电压降低,另外两相电压增高,但线电压仍然对称,此时如果客户在另外两相接入负载,很容易因电压过高烧坏设备,所以 Y/yn 变压器不宜单相负载运行。

参考文献

[1] 孙铁民. 电能计量 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992
[2] 刘万顺. 电力系统故障分析 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1986
(收稿日期: 2009-04-23)

(上接第 61 页)
社, 2000.

[9] 庄媛媛. 基于粒子群的电力系统短期负荷预测 [J]. 微机计算机信息, 2007, (3): 9-11.

作者简介: 周 曲 (1977-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析计算及稳定。
邱晓燕 (1964-), 女, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制, 电力系统电压稳定。
(收稿日期: 2009-06-10)

中国风电装机容量仅次于美、德、西

中国计划今后 10 年建造 7 座大型风力发电基地。中国目前的风电装机容量位列世界第四, 达 12 GW · h, 相当于 24 座平均规模的燃煤电厂的发电量。中国的风电装机容量仅次于美国、德国和西班牙, 但不是所有风电机组都并入了电网。事实上, 目前中国只有 0.4% 的电力来自风力发电。

位于伦敦的新能源财经公司的分析师贾斯汀·吴称, 装机容量与风力发电量之间的差距并非无足轻重。他说, 将风电厂并入国家电网非常困难和昂贵, 因为风电的不稳定性会给电网增加负担。他表示, 要克服这项困难, 电网需要进行昂贵的升级改造, 研究报告没有考虑这些因素。凭现有的技术, 一个国家的能源需求不可能全部来自风电, 因为这需要先进的电网技术。