

《四川电力技术》 编辑委员会

主任委员 刘 勇
副主任委员 王 平
刘俊勇
委 员 (按姓氏笔画笔形为序)
丁理杰 邓亚军 甘德刚
田立峰 李镇义 朱国俊
朱 康 刘天琪 苏少春
杨子辛 肖 红 吴广宁
余 熙 邹见效 陈 缨
胡 灿 袁邦亮 徐 波
董秀成 韩晓言 曾嘉志
秘 书 李世平
程文婷

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2019 年第 42 卷第 1 期(总 259 期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:陈 缨

副 主 编:程文婷

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院

地 址:成都市锦晖西二街 16 号

邮政编码:610041

电话:(028)69995169,69995168,69995165

E-mail:cdscdljs@163.com

印 刷:四川科锐得文化传播有限公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00 元

[期刊基本参数]CN51-1315/TM*1978*
b*A4*94*zh*P*¥6.00*3000*20*
2019-2

目 次

· 电网技术研究 ·

基于回溯迭代搜索-粒子群算法的配电网无功优化研究

..... 杨春生,周巍巍,魏海春,赵希宝,黄浩军(1)

MMC-MTDC 输电系统频率协调控制策略

..... 杨 林,邓鸿强,邓云仁,陈 浩(6)

基于 MMC 的柔性直流系统控制策略研究 梁 明,孟 鑫,薛一鸣,王军成(14)

基于光伏-蓄电池-超级电容的微电网协调控制策略

..... 张 谦,蒋永梅,丁 敏,金武杰,金晨星(19)

考虑分布式再生能源和储能的主动配电网可靠性评估

..... 刘旭娜,魏 俊,周瑜璐,张景瑞,张 伟(23)

基于云计算平台实现电网短期负荷预测算法的研究

..... 王 帅,赵建平,王志远,谢 广(29)

地铁牵引供电系统接入对电网电能质量影响分析 王宇飞,徐 琳(33)

新电改下发电偏差最小的水电中长期调度模型研究

..... 白智丹,余 熙,朱燕梅,武云霞,黄天意,谢荻雅(37)

· 高电压技术研究 ·

特高压线路瓷绝缘子污秽分布特性研究

..... 李世平,范 超,郭裕钧,张血琴,肖 章,王耀振(41)

220 kV MOA 带电测量相间干扰的研究与分析 何大猛,王仲奕(47)

输电线路硬质管母线发热分析

..... 赵 强,刘 意,邱中华,陈 波,马志方,王 鸿,周 静,郭定海(52)

· 新能源发电技术研究 ·

基于 GA-SVR 数据融合的风机噪声预测

..... 余 金,宋新甫,高 明,张增强,李海峰(57)

V²C 控制 Buck 变换器输出电容 ESR 临界值研究 游志昆(63)

· 经验交流 ·

LTB245E1 型断路器机构缺陷的分析

..... 熊 攀,王嘉易,李 辉,李逢兵,贾志杰,董汉彬(68)

采用带间隙避雷器降低 10 kV 架空线路跳闸率的应用

..... 刘起钟,张剑平,杨万波,梁 伟,吴开良,罗 丹(72)

基于声电联合检测技术的高压开关柜局部放电缺陷分析及整改措施研究

..... 王嘉易,李 刚,贾志杰,丁 澄,罗 洋,董汉彬(75)

北京经济技术开发区电缆双环网与电缆直配双射网的运行对比分析 刘保全(79)

一种新型防窃电策略的研究与实现 任燕康,杜立斐,宋 剑,李 剑,甯 锐(83)

基于 PMS-ERP 流程管理的大修技改项目精益化提升研究 庄秋月,李凡红(90)

CONTENTS

• Research on Power Grid Technology •

Research of Reactive Power Optimization in Distribution Network Based on Particle Swarm Optimization Algorithm Integrated with Backtracking Iterative Search	Yang Chunsheng, Zhou Weiwei, Wei Haichun, Zhao Xibao, Huang Haojun(1)
Frequency Coordinated Control Strategy for MMC – MTDC Transmission System	Yang Lin, Deng Hongqiang, Deng Yunren, Chen Hao(6)
Research on Flexible HVDC System Control Strategy Based on MMC	Liang Ming, Meng Xin, Xue Yiming, Wang Juncheng(14)
A Coordinated Control Strategy of Micro – grid Based on PV, BES and SC	Zhang Qian, Jiang Yongmei, Ding Min, Jin Wujie, Jin Chenxing(19)
A Reliability Evaluation Method of Active Distribution Network Considering Distributed Generations and Batteries	Liu Xuna, We Jun, Zhou Yulu, Zhang Jingrui, Zhang Wei(23)
Research on Short – term Load Forecasting Algorithm Based on Cloud Computing Platform	Wang Shuai, Zhao Jianping, Wang Zhiyuan, Xie Guang(29)
Analysis on Integration Effect of Metro Traction Power Supply System on Grid Power Quality	Wang Yufei, Xu Lin(33)
Research on Mid – longTerm Dispatching Model of Hydropower Based on Minimization of Power Generation Deviation Under New Situation of Electricity System Reform	Bai Zhidan, Yu Xi, Zhu Yanmei, Wu Yunxia, Huang Tianyi, Xie Diya(37)

• Research on High – voltage Technology •

Research on Pollution Distribution Characteristics of Ceramic Insulators in UHV Transmission Lines	Li Shiping, Fan Chao, Guo Yujun, Zhang Xueqin, Xiao Zhang, Wang Yaozhen(41)
Research and Analysis on Interphase Interference of On – line Measurement for 220 kV Metal Oxide Arrester	He Dameng, Wang Zhongyi(47)
Analysis on Overheating of Hard Tube Bus of Transmission Line	Zhao Qiang, Liu Yi, Qiu Zhonghua, Chen Bo, Ma Zhifang, Wang Hong, Zhou Jing, Guo Dinghai(52)

• Research on New Energy Generation Technology •

Noise Prediction of Wind TurbineBased on Data Fusion of GA – SVR	Yu Jin, Song Xinfu, Gao Ming, Zhang Zengqiang, Li Haifeng(57)
Research on Critical ESR of Output Capacitor for V ² C Controlled Buck Converter	You Zhikun(63)

• Experience Sharing •

Analysis on Fault of Operating Mechanism in LTB245E1 – BLK222 Circuit Breaker	Xiong Pan, Wang Jiayi, Li Hui, Li Fengbing, Jia Zhijie, Dong Hanbin(68)
Reducing Trip – out Rate of 10 kV Overhead Line by Application of Arrester with Gaps	Liu Qizhong, Zhan Jianping, Yang Wanbo, Liang Wei, Wu Kailiang, Luo Dan(72)
Partial DischargeDefect Analysis of High – voltage Switchgear Based on Detection Technology Combined Ultrasonic and Electrical and Research on Its Improvement Measures	Wang Jiayi, Li Gang, Jia Zhijie, Ding Cheng, Luo Yang, Dong Hanbin(75)
Comparison and Analysis on Operation of Cable Double Ring Network and Cable Direct – attached Dual – beam Network in Beijing Economic and Technological Development Zone	Liu Baoquan(79)
Research and Realization of A New Electricity – stealing Prevention Strategy	Ren Yankang, Du Lifei, Song Jian, Li Jian, Ning Rui(83)
Research on Lean Improvement of Overhaul and Technical Reform Project Based on PMS – ERP Process Management	Zhuang Qiuyue, Li Fanhong(90)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2019 Vol. 42 No. 1

(Ser. No. 259)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 16, 2ND Jinhui West Street, Chengdu, Sichuan,
China

Postcode: 610041

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Chen Ying

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

基于回溯迭代搜索-粒子群算法的配电网无功优化研究

杨春生,周巍巍,魏海春,赵希宝,黄浩军

(中海石油(中国)有限公司天津分公司工程建设中心,天津 300459)

摘要:在考虑配电网电压质量和无功补偿设备容量限制的条件下,以有功网损最小为优化目标、网络拓扑结构为约束条件建立了无功优化模型。针对粒子群算法存在着早熟现象、收敛速度慢和易陷入局部最优解的特点,提出了一种基于回溯迭代的粒子群算法(BPSO)。该算法采用回溯迭代的“0-1”特性,在寻优过程中通过剪枝函数避免无效搜索,改善了优化的路径,从而提高了PSO全局寻优性能。通过IEEE 30节点配电网算例的仿真,验证了BPSO算法的优越性,并与常规PSO算法对比证明所提算法的优越性。

关键词:配电网;回溯迭代;粒子群算法;无功优化

中图分类号:TM761 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0001-05

Research of Reactive Power Optimization in Distribution Network Based on Particle Swarm Optimization Algorithm Integrated with Backtracking Iterative Search

Yang Chunsheng, Zhou Weiwei, Wei Haichun, Zhao Xibao, Huang Haojun

(Engineering Construction Center, CNOOC (China) Co., Ltd. (Tianjin Branch), Tianjin 300459, China)

Abstract: A comprehensive optimization model of distribution network is established which takes active power loss minimization as the optimization objective and network topology as constraint conditions, under considering the voltage quality of distribution network and the capacity limitation of reactive power compensation equipment. According to the characteristics of particle swarm algorithm (PSO), that is, premature phenomenon, slow convergence and easily getting the local optimal solution, a particle swarm algorithm based on backtracking iteration (BPSO) is proposed. The algorithm adopts the "0-1" characteristic of backtracking iteration, avoids the invalid search by pruning function in the process of optimization, and improves the optimization path, thus the global optimization performance of PSO is improved. The simulation of IEEE 30 node distribution network example verifies the optimal solution of BPSO algorithm, and the comparison results with the conventional PSO algorithm show the superiority of the proposed algorithm.

Key words: distribution network; backtracking iteration; particle swarm optimization algorithm; reactive power optimization

0 引言

无功优化是实现电网经济调度的重要手段之一,对保障电网的电压质量,降低系统网损有着重大意义^[1]。无功优化过程具有多目标、多约束、同时含有连续变量和离散变量等特点^[2,3],是典型的非线性规划问题。传统的无功优化算法(如线性规划法、非线性规划法、内点法^[4-6]等)对于离散变量的

处理存在一定的局限性。因此,近年来国内外学者对于智能算法在无功优化中的应用研究层出不穷,如遗传算法、蚁群算法、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)^[7-8]等。其中,粒子群算法相比其他的优化算法具有优化效率高、收敛速度快、鲁棒性强的特点,但是标准的粒子群算法容易受当前最优位置的影响,易陷入局部最优解^[9]。

为了克服容易陷入局部最优解这个缺点,许多文献提出了改进的粒子群算法。文献[10]针对粒子群算法容易陷入局部最优和收敛速度较慢的缺点,提出了一种改进的粒子群优化算法,以达到降低

项目名称:“十三五”国家科技重大专项“海上油田区域供电工程技术研究及应用(2016ZX05058-004-008)”

配电网有功网损的目的。文献[11]采用多种群协同优化的方法,同时兼顾了算法全局搜索和局部搜索的能力,与常规粒子群算法相比稳定性较好。文献[12]将邻居学习策略融入粒子群优化算法的速度更新中,使用“最坏替换”策略来更新群,群中最差粒子的位置被更好的新生成的位置所取代,比传统的群更新方案具有更好的性能。文献[13]通过阿尔及利亚西部电力系统中无功功率控制为背景,提出了基于 PSO 的启发式算法,且算法在最小功率损耗方面有优越的表现。

回溯迭代算法作为一种类似枚举法的选优搜索法,在搜索区域缩减确定和搜索速度提升上都有良好的性能,多用于解决较为复杂、规模庞大的问题。下面利用回溯迭代算法的优点,对常规的 PSO 算法进行改进:将回溯迭代算法融合于粒子群速度和位置更新策略,得到一种改进的粒子群优化算法。通过在 IEEE 30 节点配电网进行无功优化仿真,验证该算法具有较好的全局收敛性,且可以快速准确地搜索到最优值。对比常规 PSO 算法,所采用的改进粒子群算法的收敛速度和精度更好,优化后有功网损值也得到改善。

1 配电网无功优化的数学模型

1.1 目标函数的构造

为了提高配电网的供电可靠性和经济性,传统无功优化通常有以下几种目标函数:1)电网有功网损最小;2)电压质量最好;3)电容器和变压器分接头投切次数最少;4)电网无功补偿容量最小;5)系统总的费用最少。

对配电网进行无功优化时,考虑全网有功网损最小,建立无功优化数学模型的目标函数为

$$f = \min P_{\text{Loss}} \quad (1)$$

式中, P_{Loss} 为系统有功网损。

考虑电压质量和无功补偿设备的容量限制,目标函数可改写为

$$f = \min P_{\text{Loss}} + \lambda_1 \sum \left(\frac{V_i - V_{i\text{lim}}}{V_{i\text{max}} - V_{i\text{min}}} \right)^2 + \lambda_2 \left(\frac{Q_{Ci} - Q_{Ci\text{lim}}}{Q_{Ci\text{max}}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: V_i 为节点*i*的运行电压; $V_{i\text{max}}$ 、 $V_{i\text{min}}$ 为节点运行电压的允许上、下限; Q_{Ci} 为节点*i*的无功补偿容量;

$Q_{Ci\text{max}}$ 为节点无功补偿上限值; λ_1 、 λ_2 分别为节点电压越限与节点无功补偿容量越限的惩罚因子。

$$V_{i\text{lim}} = \begin{cases} V_{i\text{max}} & (V_i > V_{i\text{max}}) \\ 0 & (V_{i\text{min}} < V_i < V_{i\text{max}}) \\ V_{i\text{min}} & (V_i < V_{i\text{min}}) \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_{Ci\text{lim}} = \begin{cases} Q_{Ci\text{max}} & Q_{Ci} > Q_{Ci\text{max}} \\ Q_{Ci} & Q_{Ci} < Q_{Ci\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 约束条件的建立

配电网无功优化时,各节点处于功率平衡状态,其等式约束为

$$\begin{cases} P_{Gi} = P_{Di} + V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} + \Delta Q_{Ci} = Q_{Di} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点*i*处发电机的有功功率和无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为节点*i*处负荷的有功功率和无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 和 θ_{ij} 分别为节点*i*和*j*之间的电导、电纳和相角差; V_i 、 V_j 分别为节点*i*、*j*的电压。式(5)也是潮流计算的基础。

配电网中,配电网各节点电压不等式约束为

$$V_{i\text{min}} \leq V_i \leq V_{i\text{max}} \quad (6)$$

各补偿点补偿容量的不等式约束为

$$Q_{Ci\text{min}} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci\text{max}} \quad (7)$$

2 改进的粒子群算法

PSO 作为一种启发式智能算法,它源于对鸟类捕食行为的研究^[14]。其基本思想是通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解^[15]。基于 PSO 的寻优算法流程如图 1 所示。

回溯迭代算法是一种选优搜索法,按选优条件向前搜索,以达到目标^[16-17]。回溯迭代算法实际上是一个类似枚举法的搜索尝试过程,回溯迭代寻优过程如图 2 所示。图 2 中:A、B、C、D 为步骤名称;1 和 0 分别表示满足条件与否,当发现不满足求解条件时,就“回溯”返回,尝试别的路径。许多较为复杂、规模庞大的问题都可以使用回溯法去解决^[18]。其基本思想包括以下 3 个特征:

- 1) 为要解决的问题定义了解决方案;
- 2) 确定易于搜索的解空间结构;
- 3) 以深度优先方式搜索空间,并在搜索过程中

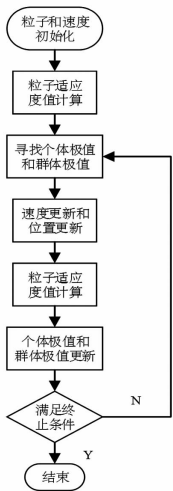


图 1 标准 PSO 算法寻优流程

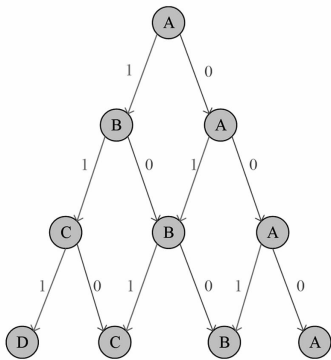


图 2 回溯迭代剪枝搜索数枝

通过剪枝函数避免无效搜索。

将回溯迭代算法融合于粒子群速度和位置更新策略,可以得到一种改进的粒子群优化算法即基于回溯迭代的粒子群算法(backtracking particle swarm optimization, BPSO)。该算法具有较好的全局收敛性,且可以快速准确地搜索到最优值。应用基于回溯迭代的粒子群算法解决无功优化问题,将电容器容量 Q_c 对应粒子群中粒子的位置,即 $X_i = Q_c$,可行域的边界由 Q_c 的上下限确定。

3 基于回溯迭代的粒子群算法无功优化流程

运用 BPSO 算法求解无功优化问题的流程如图 3 所示,图中: X_i 、 X_n 为每个粒子的适应值;pbest 是粒子 i 个体经历过的最好位置;gbest 是种群所经历过的最好位置。其算法具体步骤描述如下:

1) 输入系统数据(系统的结构、网络数据和控制参数);

- 2) 初始化粒子群;
- 3) 计算目标函数值;
- 4) 评价每一个粒子;
- 5) 更新每一个粒子的速度和位置;
- 6) 检验是否符合结束条件;

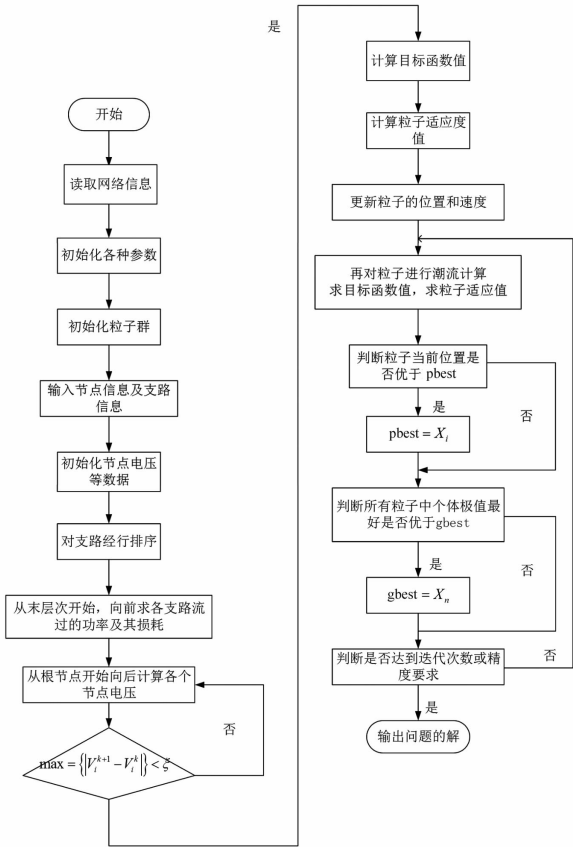


图 3 BPSO 算法无功优化流程

7) 如果当前迭代次数达到最大预定次数(或最小误差要求),则停止迭代并输出最优解,否则将转到步骤 2);

8) 输出问题的解,包括系统网损值及系统最高电压值和最低电压值。

4 算例分析

采用 IEEE 30 算例,该系统是一个额定电压为 23 kV 的实际配电网系统。将系统的变电站设为 0 号节点,实际上该系统是一个包含 31 个节点、30 条支路和 5 个无功补偿点(分别为节点 13、15、19、23、24)的配电系统。系统的接线如图 4 所示。系统的网络参数如表 1 所示。

4.1 BPSO 算法目标函数选取

利用 Matlab7.0 编写了基于 BPSO 的配电网无

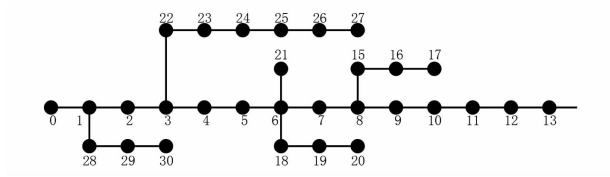


图 4 IEEE 30 算例系统接线

表 1 系统网络参数

支路 序号	支路电阻 /Ω	支路电抗 /Ω	有功负荷 /kW	无功负荷 /kVA
0-1	0.196	0.655	0	0
1-2	0.279	0.015	522	174
2-3	0.444	0.439	0	0
3-4	0.864	0.751	936	312
4-5	0.864	0.751	0	0
5-6	1.374	0.774	0	0
6-7	1.374	0.774	0	0
7-8	1.374	0.774	0	0
8-9	1.374	0.774	189	63
9-10	1.374	0.774	0	0
10-11	1.374	0.774	336	112
11-12	1.374	0.774	657	219
12-13	1.374	0.774	783	261
13-14	1.374	0.774	729	243
8-15	0.864	0.774	477	159
15-16	1.374	0.774	549	183
16-17	1.374	0.774	477	159
6-18	0.864	0.751	342	114
18-19	0.864	0.751	672	224
19-20	1.374	0.774	495	165
6-21	0.864	0.751	207	69
3-22	0.444	0.439	522	174
22-23	0.444	0.439	1917	639
23-24	0.864	0.751	0	0
24-25	0.864	0.751	1116	372
25-26	0.864	0.751	579	183
26-27	1.374	0.774	792	264
1-28	0.279	0.015	882	294
28-29	1.374	0.774	882	294
29-30	1.374	0.774	882	294

功优化计算程序。在程序中,将节点电压的上、下限设置为额定值的 0.9 和 1.1,粒子群体规模取 $M=30$,最大和最小惯性常数分别设置为 $\omega_{\max}=0.9$ 、 $\omega_{\min}=0.4$ 。将学习因子 c_1 、 c_2 的取值设置为 $c_1=c_2=2$,粒子的速度限定分别为 $V_{\max}=0.6$ 、 $V_{\min}=-0.6$ 。

首先计算出算例优化前系统的有功网损为 1.059 9 MW,最低电压为 19.283 5 kV,出现在 14 号节点。配电网采用改进的粒子群无功优化算法后,其具体结果如分析如下:

1) 先不考虑罚函数影响,即不考虑节点电压越限和无功补偿容量越限的问题,取 $\lambda_1=\lambda_2=0$ 。

表 2 BPSO 算法无功优化结果($\lambda_1=\lambda_2=0$)

迭代次数	$P_{\text{loss}}/\text{MW}$	V_{min}/kV	$\Sigma Q_c/\text{MVA}$
20	0.903 8	20.060 4	4.957 1
30	0.903 7	20.146 3	4.944 3
50	0.903 6	20.163 3	4.983 7
100	0.903 6	20.190 7	4.981 3
150	0.903 6	20.192 1	4.981 2
200	0.903 6	20.192 1	4.981 2

表 2 中: P_{loss} 为系统的有功网损值; V_{min} 为在完成迭代时(即系统达到有功网损最小时)系统节点电压的最低值; ΣQ_c 为系统在达到有功网损最小时补偿装置向系统提供的总的补偿容量。

通过分析可得,当迭代次数设为 50 时,系统有功网损已到达最低值,即粒子已经寻得全局最优解;随着迭代次数的增加,系统的节点电压有所改善,同时补偿容量有所增加。由表 2 可看出,当迭代次数为 100 时,系统已有较好的电压,并且随着迭代次数的增加对系统节点电压的改善变小。可得出当迭代次数设为 100 时,系统有较好的优化结果。

2) 取最大迭代次数 $T_{\max}=100$,不考虑补偿容量越限的限制,即将罚因子 λ_2 设为 0,考虑罚因子 λ_1 取不同的值对优化结果的影响。

表 3 BPSO 算法无功优化结果($\lambda_2=0$, λ_1 任意取值)

λ_1	$P_{\text{loss}}/\text{MW}$	V_{min}/kV	$\Sigma Q_c/\text{kVA}$
20	0.932 5	20.592 4	6.647 6
30	0.940 1	20.642 0	6.860 1
50	0.943 6	20.662 0	6.954 2
100	0.946 8	20.680 7	7.032 2
200	0.948 4	20.689 6	7.074 6

由表 3 可以看出,当罚因子 λ_1 的取值越来越大

时,系统的节点电压越来越好,但是系统的有功网损也越来越高,同时补偿容量也越来越大。综合考虑,当 $\lambda_1=10$ 时系统可以获得比较好的解。

3)取最大迭代次数 $T_{\max}=100$,不考虑节点电压越限的限制,即将罚因子 λ_1 设为0,考虑罚因子 λ_2 取不同的值时对优化结果的影响。

表4 BPSO 算法无功优化结果($\lambda_1=0, \lambda_2$ 任意取值)

λ_2	$P_{\text{loss}}/\text{MW}$	V_{min}/kV	$\Sigma Q_c/\text{kVA}$
10	0.904 4	20.179 7	4.603 3
20	0.904 4	20.165 4	4.621 5
30	0.904 4	20.180 9	4.620 5
50	0.904 4	20.179 5	4.628 2
100	0.904 4	20.175 1	4.619 8

由表4分析可得,当 λ_2 取不同值时,系统有功网损值不变,综合考虑节点电压质量及无功补偿容量,可知当 $\lambda_2=10$ 时系统有比较好的解。

综上所述,在对IEEE 30节点配电网进行无功优化时,选取迭代次数 $T_{\max}=100$,惩罚因子 λ_1, λ_2 都取10时,优化效果最佳。

4.2 BPSO 算法最优补偿

在算例配电网无功优化过程中,选取迭代次数 $T_{\max}=100$,惩罚因子 $\lambda_1=\lambda_2=10$ 时,采用BPSO算法对系统无功优化。可以得到:系统有功网损 P_{loss} 为0.906 7 MW,最低节点电压值 V_{min} 为20.286 5 kV,系统补偿总容量 ΣQ_c 为4.980 4 MVA。

为验证BPSO算法的优越性,在相同条件下运行常规PSO算法和BPSO算法,得到电压曲线比较如图5所示,可以看出:PSO算法和BPSO算法对配电网电压质量都起到明显改善作用,但BPSO相对电压曲线更趋稳定,优化效果更好。

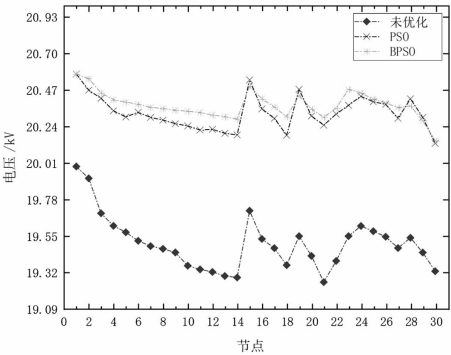


图5 PSO和BPSO算法电压曲线比较

常规PSO算法和BPSO算法的网损优化结果见表5,有功网损的收敛曲线如图6所示。

通过对PSO、BPSO两种算法的无功优化结果的

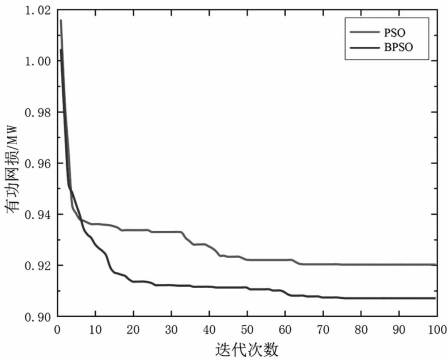


图6 PSO和BPSO的收敛曲线

比较,可以得出:

表5 优化结果比较

指标	PSO	BPSO
最优网损/MW	0.919 9	0.906 7
最差网损/MW	0.935 8	0.912 7
平均网损/MW	0.927 8	0.909 7

- 1)PSO算法在对配电网无功优化过程中,往往会陷入局部最优值,导致优化停滞不前;
- 2)BPSO算法在前期优化时,收敛速度与精度都表现不错,且随着迭代次数增加,回溯迭代使得搜索区间缩减,收敛速度变快,收敛精度也大幅提升;
- 3)通过两种算法的无功优化,配电网系统的有功网损值都得到大幅降低,但BPSO算法优化后的有功网损值相比PSO算法较小。

5 结 语

针对配电网节点多、结构复杂的特点,在充分考虑有功网损、电压质量和无功补偿设备容量限制的基础上,选取合适的优化目标函数,通过基于回溯迭代的粒子群算法对IEEE 33节点配电网系统进行无功优化,并验证该方法的可行性。主要结论如下:

- 1)在配电网无功优化过程中,合理地选取有功网损、电压质量和无功补偿设备容量作为优化目标函数,优化效果更优越;
- 2)BPSO优化算法与常规的粒子群算法相比,其收敛速度与精度都具有较好的效果,且优化后的有功网损幅值得到一定改善。

参考文献

[1] 陈琳,钟金,倪以信,等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2006,30(14):20-24.

(下转第46页)

MMC – MTDC 输电系统频率协调控制策略

杨 林¹, 邓鸿强¹, 邓云仁¹, 陈 浩²

(1. 国网四川省电力公司南充供电公司, 四川 南充 637000;
2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:针对交流系统通过 MMC – MTDC 实现异步联网后无法实现区域间频率支撑的问题,参照交流系统功 – 频特性和柔性直流输电系统直流电压下垂特性设计了 3 种频率协调控制策略:固定频率控制、频率偏差 PI 控制和功率估算频率控制。固定频率控制将频率参考值设定为常数来获得功率支撑量;频率偏差 PI 控制是将频率事故换流站的频率与参与协调控制换流站的频率平均值之差作为 PI 控制器的输入量来获取功率支撑量;功率估算频率控制根据事故换流站交流侧频率的实时变化,利用功 – 频静特性系数估算功率变化量来决定换流站的功率支撑量。在 PSCAD 仿真软件中搭建了异步联网交直流系统进行仿真验证,仿真结果表明了所提 3 种利用 MMC – MTDC 实现区域间频率协调的可行性和有效性。

关键词:MMC – MTDC;频率协调控制;电压下垂控制;固定频率控制;频率偏差控制;功率估算;功频静特性系数
中图分类号:TM761 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 – 6954(2019)01 – 0006 – 08

Frequency Coordinated Control Strategy for MMC – MTDC Transmission System

Yang Lin¹, Deng Hongqiang¹, Deng Yunren¹, Chen Hao²

(1. State Grid Nanchong Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China; 2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract:The problem of inter – area frequency support can not be achieved after asynchronous networking is realized through MMC – MTDC. Referring to the power – frequency characteristics of AC system and the DC voltage droop characteristics of flexible HVDC system, 3 frequency coordinated control strategies are designed: fixed frequency control, frequency deviation PI control and power estimation frequency control. Fixed frequency control sets frequency reference value as the constant to obtain power support. The frequency deviation PI control obtains the power support by taking the frequency of converter station with frequency accident and the difference of the average frequency of the coordinated control converter station as the input of PI controller. The power estimation frequency control is based on the instantaneous change of the frequency of AC side of the accident converter station. And the power – frequency characteristic coefficient is used to estimate the power variation to determine the power support of the converter station. In PSCAD simulation software, an asynchronous networking system is set up for simulation verification, and the simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed 3 methods to achieve inter – area frequency coordinated control.

Key words:MMC – MTDC; frequency coordinated control; voltage droop control; fixed frequency control; frequency deviation control; power estimation; power – frequency characteristic coefficient

0 引 言

在实现交流系统异步连接和新能源大规模集中功率送出等方面,基于模块化多电平换流器的多端
基金项目:国家重点研发计划(2018YFB0904600)

直流系统是一套具有前景的解决方案^[1-2]。多端系统在增加系统传输容量、对所连接的交流系统实现无功支撑、提升区域频率稳定和加强交流系统暂态稳定等方面都具有很大的优势^[3-5]。为了克服远方新能源发电区域与负荷中心的长距离输电容量的挑

战, MMC – MTDC 技术提供了高效灵活可控的大容量传输解决方案。此外,未来不同国家和地区的电力系统互联可由 MMC – MTDC 技术不断提升传输容量得以实现,这为不同国家和区域的能源交易市场铺平了道路,例如中国的张北直流工程和欧洲超级电网工程。MMC – MTDC 不仅能够交换确定的传输容量,而且当交流系统功率不平衡导致频率不稳定时,可以利用其实现异步交流系统的旋转储备功率交换来提升系统频率稳定。这个特点使其在传统电厂大量退出和新能源集中接入电网的新时代电力系统背景下扮演了十分重要的角色。下面的研究重点是基于 MMC – MTDC 提出不同的附加频率控制策略来提升交流系统的频率稳定。

考虑到 MTDC 输电网络的容量传输等级相对较大,因此异步交流网络可以通过 MTDC 系统来实现一次频率的调整。目前已经有大量基于 VSC 型平均值换流器模型进行一次频率调整的研究文献, VSC – HVDC 通常输出为两电平,直流侧单一的直流电容对直流电压的动态特性影响较大。此外,平均值模型的交直流侧功率平衡是直接耦合的,而 MMC 结构中大量子模块电容的储能作用可以认为交直流侧功率是解耦的。文献[6 – 8]中介绍了 MTDC 输电系统的实时功率平衡是通过直流电压下垂控制策略来实现的,直流电压下垂控制策略的优势在于,当网络中潮流出现较大的波动时,如一个换流站退出运行,其可以利用多个换流站来分担不平衡功率。这也为风电场利用 MTDC 进行功率输送时解决功率波动提供了一个较好方案。文献[9]在 VSC – MTDC 控制器中引入了直流电压下垂与频率下垂控制结构,该策略易于通过 MTDC 实现异步联网交流系统的一次频率调整。文献[10]研究了 VSC – HVDC 在异步电网中的频率调节功能,分别讨论了固定频率控制、直流电压 – 频率控制、功率 – 频率控制 3 种控制方法,对通过 MTDC 连接的异步电网的频率协调控制具有借鉴和指导意义。文献[11]针对 MMC – HVDC 提出了 4 种频率一次调整控制策略,然而该策略在 MTDC 系统中会使得定直流电压的换流站承担所有的不平衡功率,在多端系统中该策略会威胁系统的稳定运行。

针对 MMC – MTDC 直流电网参与异步交流系统一次频率调整的文献较少以及目前的文献侧重于两端系统频率附加控制策略的研究,就 MMC – MT-

DC 输电系统提出了 3 种频率协调控制策略来实现异步交流区域的功率支撑和频率协调。

1 测试系统

为了研究基于 MMC – MTDC 输电系统的频率协调控制策略,在文献[12 – 14]的 IEEE 39 节点系统基础上进行改进,如图 1 所示。图中删除了部分交流线路,原来的系统分离成由 MMC – MTDC 连接的 4 个异步交流系统。改进后的交直流系统是由 345 kV 的交流输电网和 500 kV 的四端直流电网共同构成,4 个换流站分别连接于母线 5、母线 6、母线 17、母线 26。仿真平台相关系统模块说明如下:

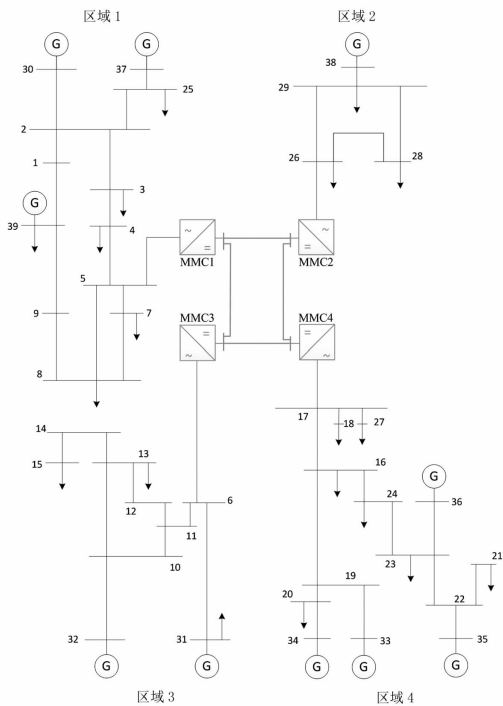


图 1 含有 MMC – MTDC 的改进 IEEE 39 节点系统

- 1) 每个发电机采用 dq0 坐标系下的模型进行研究,且发电机的机械系统运用单质量块进行等值;
- 2) 每个发电机的调速器和涡轮机单元采用仿真软件中的 HGOV18 模型;
- 3) 交直流系统的线路采用 Bergeron 模型;
- 4) 发电机励磁系统采用 IEEE DC1A 型模型;
- 5) 负荷采用式(1)的模型进行等值。

$$\begin{cases} P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{N_p} \cdot (1 + K_{PF} \cdot dF) \\ Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{N_Q} \cdot (1 + K_{QF} \cdot dF) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 、 Q 、 V 为有功功率、无功功率、交流电压; P_0 、 Q_0 、 V_0 为额定有功功率、额定无功功率、额定电压; N_p 和 N_q 为有功、无功的电压因子; K_{PF} 和 K_{QF} 为有功、无功的频率因子。取 $N_p = N_q = 2$, $K_{PF} = K_{QF} = 0$ 。

2 MMC 数学模型

MMC 型换流站的桥臂由上百个子模块构成,在系统仿真时需要大量的计算时间。交直流系统研究中为了加快仿真速度和节省仿真实空间,通常采用文献[15]的 CIGRE B4.57 导则中 Type 4 模型。该模型将所有桥臂的子模块输出电压用受控电压源进行等效,交直流物理量如图 2 所示。这里 MMC 的控制结构参照文献[16-17]中 VSC-MTDC 的频率协调控制结构,为此可以在 MMC-MTDC 的相关控制结构中引入一次频率调制的附加控制策略。

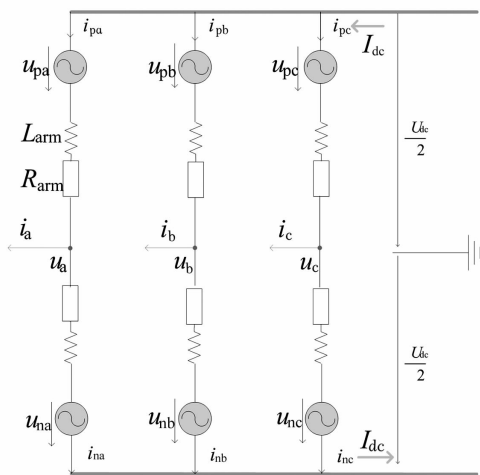


图 2 MMC 等值电路

根据图 2 的等值电路列写基尔霍夫电流、电压定律(下标 $i = a, b, c$):

$$i_i = i_{pi} - i_{ni} \quad (2)$$

$$u_i + u_{pi} + R_{arm} i_{pi} + L_{arm} \frac{di_{pi}}{dt} = \frac{1}{2} U_{dc} \quad (3)$$

$$u_i - u_{ni} - R_{arm} i_{ni} - L_{arm} \frac{di_{ni}}{dt} = -\frac{1}{2} U_{dc} \quad (4)$$

式中: i_p 、 i_n 为换流器上、下桥臂电流; u_p 、 u_n 为换流器上、下桥臂电压; R_{arm} 、 L_{arm} 为桥臂电阻和桥臂电抗; u_i 、 i_i 为交流侧输出电压、电流; U_{dc} 为直流电压。

联立式(2)至式(4),定义内部电流为 i_z ,交流侧控制电压为 u_Δ ,直流侧控制电压为 u_z ,可得

$$i_z = (i_{pi} + i_{ni})/2 \quad (5)$$

$$u_{\Delta i} = \frac{u_{ni} - u_{pi}}{2} = u_i + \frac{1}{2} R_{arm} i_i + L_{arm} \frac{di_i}{dt} \quad (6)$$

$$u_{zj} = \frac{u_{ni} + u_{pi}}{2} = \frac{1}{2} U_{dc} - R_{arm} i_z - L_{arm} \frac{di_z}{dt} \quad (7)$$

在同步旋转 dq 坐标系下,交流侧的功率通过控制 u_Δ 来实现对交流电流 i_i 的控制,而直流侧的功率和电压通过 u_z 来调整内部电流 i_z 的零序成分(稳态下, $3i_{z0} = I_{dc}$)。换流站与 PCC 点之间换流变压器的 Y/Δ 连接方式使得换流站阀侧交流电流的零序分量不存在,剩余分量通过 Clarke 变换获得电流的水平分量和垂直分量^[18]。根据瞬时无功功率理论,可得交直流交换的功率在 dq 坐标下的有功和无功为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (U_{sd} i_d + U_{sq} i_q) \\ Q = \frac{3}{2} (U_{sd} i_q - U_{sq} i_d) \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_{sd} 、 i_{sd} 为派克变换后的 d 轴电压、电流; U_{sq} 、 i_{sq} 为派克变换后的 q 轴电压、电流。

为了达到设定的功率运行点,MMC 外环控制器的电流分量由式(9)进行调整。

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{2}{3} \frac{P_{ref}^* u_{dm} - Q_{ref}^* u_{qm}}{u_{dm}^2 + u_{qm}^2} \\ i_{qref} = \frac{2}{3} \frac{P_{ref}^* u_{qm} + Q_{ref}^* u_{dm}}{u_{dm}^2 + u_{qm}^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{ref}^* 、 Q_{ref}^* 为通过调整后的有功和无功的参考值; u_{dm} 、 u_{qm} 为实时测量交流电压经派克变换后的 d、q 轴分量。有功功率的运行点 P_{ref}^* 通过前馈 PI 控制获得

$$P_{ref}^* = P_{ref} + (K_p + K_i/s)(P_{ref} - P_{refm}) \quad (10)$$

式中: P_{refm} 为 PCC 点测量的有功功率; P_{ref} 为有功功率参考值; K_p 、 K_i 为比例积分系数。有功功率的参考值是通过调度中心给定,为了使 MMC 换流站参与频率的调整,可以在外环控制器中叠加一个关于频率的功率分量。

3 交流系统的一次频率调整

交流电网的频率稳定是所有交流电网稳定运行的前提,发电机组和负荷之间功率暂态平衡通过频率变化来反应。不考虑严重情况下的二次调频,交流电网的一次频率调整是通过主调频发电厂调速器的频率下垂控制来实现的,其控制原理是将频率作为全局变量来平衡交流电网的功率交换。

发电机的频率下垂控制结构如图 3 所示,其详

细的下垂特性和结构参考文献[19-20]。频率下垂系数 ρ_{ac} 的大小表示发电机在交流电网功率不平衡导致频率偏移时的补偿能力。在图5中,频率下垂系数越小,交流系统就越强。典型的频率下垂系数为0.04~0.08 p.u.。

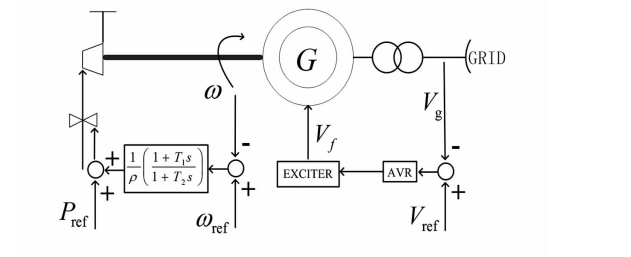


图3 发电机组频率下垂控制

交流电网中频率响应与发电机和负荷的调节特性相关,其功率静态特性曲线如图4所示。交流电网初始运行点A,由于负荷的变化,经过功频调整后运行于B,其功率增量为

$$\Delta P_{D0} = -(K_G + K_D) \Delta f = -K \Delta f \quad (11)$$

式中: K_G 、 K_D 、 K 分别为发电机功频静态特性系数、负荷频率调节效应系数以及交流系统功频静态特性系数。

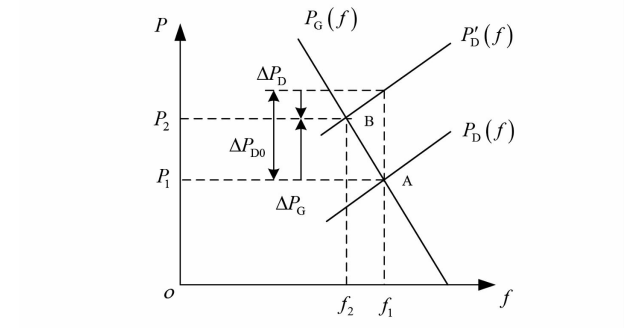


图4 交流系统功率-频率静态特性

4 MMC-MTDC 一次频率协调控制策略

通过多端系统连接的异步交流电网,如果采用主从控制策略,则只有一个换流站控制整个直流网络的直流电压(该换流站母线称为松弛节点)。交流系统出现频率变化时,采用定功率的MMC不能对频率变化进行响应,为此在功率参考值中引入频率变化带来的功率变化量 ΔP_F ,可以使MMC换流站参与交流系统的一次频率调整。如果交流系统的频率偏差过大,则可以通过MTDC系统实现异步电网功率支撑和频率稳定。MTDC系统中实现区域功

率支撑需要引入直流电压下垂控制策略,其工作原理与交流系统中发电机的功频静态特性相似,将会产生一个与直流电压相关的功率变化量 ΔP_{DC} 。

4.1 直流电压下垂控制

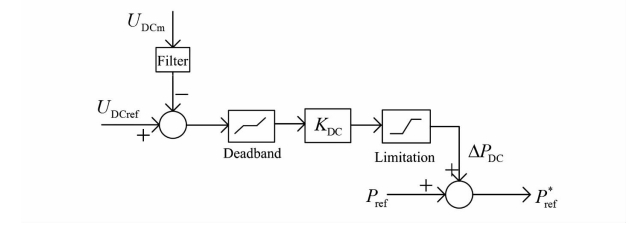


图5 直流电压下垂控制结构

直流电压下垂控制策略中测量电压 U_{DCm} 与参考电压 U_{DCref} 的差值乘以一个电压下垂系数 K_{DC} ,从而获得一个附加功率输出量 ΔP_{DC} ,其具有比例特性。调整功率 P_{ref}^* 通过前馈的方式送入MMC换流站的外环有功功率控制器中。结构如图5所示。

$$\Delta U_{DC} = U_{DCref} - U_{DCm} \quad (12)$$

$$\Delta P_{DC} = K_{DC} \Delta U_{DC} \quad (13)$$

采用直流电压下垂的换流站共同协调网络的直流电压,当直流网络中出现不平衡功率时,以直流电压作为纽带,通过换流站的下垂系数来实现不平衡功率在换流站之间的分配,从而减轻了主从控制中直流电压站的负担。

4.2 频率协调控制策略

4.2.1 固定频率控制

固定频率控制策略类似于传统同步发电机的一次频率调整。实际测量到的换流站PCC点的频率 f_{PCCm} 与额定固定参考频率 f_{ref} 的偏差乘以一个下垂系数 K_F ,得到一个具有比例特性的额外功率增量 ΔP_F ,这个功率增量叠加至4.1中直流电压下垂的输出量中,即可得到新的功率增量,从而实现了MT-DC系统的电压下垂和频率下垂控制,其结构如图6所示。

采用固定频率控制策略,通常对于一个具有较高短路比的强交流系统来说,当交流系统出现较大的功率不平衡情况时,通过MMC-MTDC可以很好地支撑弱交流系统的稳定。通常额定频率在标幺制下设为 $f_{ref} = 1$,此时式(10)中的功率参考值由式(16)进行更新。

$$\Delta f = f_{ref} - f_{PCCm} \quad (14)$$

$$\Delta P_F = K_F \Delta f \quad (15)$$

$$P_{ref}^* = P_{ref} - K_F \Delta f + K_{DC} \Delta U_{DC}$$

$$= P_{ref} - \Delta P_F + \Delta P_{DC} \tag{16}$$

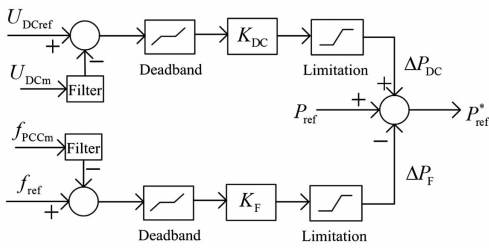


图 6 基于电压下垂的固定频率控制结构

4.2.2 频率偏差 PI 控制

基于 PI 的频率偏差控制结构如图 7 所示,频率的参考值计算方法为:采集所有参与频率协调控制换流站交流侧的频率 f_{PCCi} ,然后进行求和,最后利用 n 个频率信号的平均值作为频率的参考值 $\bar{f}$ 。

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{PCCi} \tag{17}$$

每个换流站频率调制引入附加功率为

$$\Delta P_F = K_p + \frac{K_I}{s}(f_{PCCi} - \bar{f}) = (K_p + \frac{K_I}{s})\Delta f \tag{18}$$

当网络出现不平衡功率时,由于控制器中的积分调节作用,使得最终稳态时异步网络的频率都趋向于平均频率 $\bar{f}$,这样就可以在很大程度上减少交流系统负荷变化导致的频率偏差过大。在这种情况下,MMC – MTDC 系统起到了交流联络线的作用,不同交流系统之间实现了备用容量的相互支撑,提高了电网的频率稳定性。

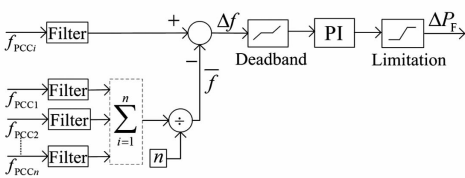


图 7 频率偏差 PI 控制结构

4.2.3 功率估算频率控制

交流系统中负荷的变化量通常很难估计,为此提出根据频率的变化量利用功频特性系数进行交流侧功率变化量的估计,然后根据功率变化量来调整 MMC 换流站的附加功率。根据 MMC 换流站在频率协调控制中扮演的角色,叠加频率相关的功率分量至其外环控制器。非频率事故的交流系统通过 MMC – MTDC 实现频率支撑时的附加功率与该交流系统的功 – 频特性系数正相关,故可利用功 – 频静特性系数之比来决定换流站的功率支撑比例。其实

现过程如图 8 所示,其中: K_i 表示频率故障端的功 – 频特性系数; $\alpha(\alpha \in [0,1])$ 表示需要调制的功率的范围;非频率故障的模块中的 β_n 表示第 n 个换流站所占支撑功率的比例。其满足如下表达式:

$$\beta_1:\beta_2:\cdots:\beta_n = K_1:K_2:\cdots:K_n \tag{19}$$

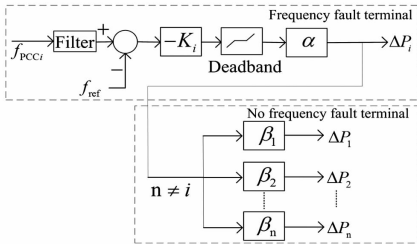


图 8 功率估算频率控制结构

5 仿真分析

为了验证所提出的频率协调控制策略在基于 MMC – MTDC 的交直流系统中的控制效果,将所提的各种控制方法运用于仿真算例中进行研究。在图 1 的区域 1 中加入 450 MW 的负荷,由于负荷的增加将导致区域 1 的频率下降,为了减小区域 1 的频率变化量,通过 MMC – MTDC 来实现区域间的功率支撑和频率协调。系统仿真参数如表 1 至表 4 所示。

表 1 交流系统功 – 频静特性系数

交流系统	功 – 频静特性系数/(MW · Hz ⁻¹)
K_1	1 548.7
K_2	400
K_3	273.6
K_4	931.7

算例 1:直流电压下垂控制

为了验证频率协调控制策略的有效性,以电压下垂控制在频率故障中的响应特性为参照, $t = 2\text{ s}$ 时,在区域 1 中交流母线母线 3 处加入 450 MW 的负荷。从表 1 中的 K_1 可以获得频率的理论变化量为 -0.29 Hz 。通过图 9 的仿真结果可以看出,区域 1 的频率下降至 49.71 Hz 左右,其他交流区域频率无变化。传输的有功功率和直流电压均无变化,说明直流电压下垂控制策略无法实现交流系统间频率变化时的功率支撑和频率协调,无法利用具有备用容量系统的功率支撑,这给系统的稳定运行带来了风险。

表 2 换流站系统参数				
系统参数	MMC1	MMC2	MMC3	MMC4
额定容量 /MW	1200	400	400	800
变比/kV	345/260	345/260	345/260	345/260
变压损耗 /(p. u.)	0.18	0.18	0.18	0.18
电平数	201	201	201	201
C_{SM}/mF	15	5	5	10
桥臂电抗 /mH	19	58	58	29
运行模式	逆变	整流	整流	整流
控制方式	PV/Q	PV/Q	PV/Q	PV/Q
直流电压 /kV	500	500	500	500
无功功率 /MVA	-150	20	0	0

表 3 发电机参数				
母线	额定容量 /MVA	惯性常数	x_d' /(p. u.)	x_q' /(p. u.)
30	609.6	5.8	0.031	0.031
31	647.7	3.142	0.064 7	0.069 7
32	749.8	3.564	0.053 1	0.053 1
33	700	3.6	0.043 6	0.043 6
34	612.6	3.41	0.132	0.132
35	797.8	5.016	0.05	0.05
36	659.9	3.141	0.049	0.049
37	749.8	3.141	0.057	0.057
38	1143	5.32	0.057	0.057
39	1 493.8	5.02	0.006	0.006

母线	x_d /(p. u.)	x_q /(p. u.)	T'_{d0} /s	T'_{q0} /s
30	0	0.069	10.2	0
31	0.295	0.282	6.56	1.5
32	0.249 5	0.237	5.7	1.5
33	0.262	0.258	5.69	1.5
34	0.67	0.62	5.4	0.44
35	0.254	0.241	7.3	0.4
36	0.295	0.292	5.66	1.5
37	0.29	0.28	6.7	0.41
38	0.210 6	0.205	4.79	1.9
39	0.2	0.019	7	0.7

表 4 直流线路参数				
线路区间	MMC1 – MMC2	MMC1 – MMC3	MMC2 – MMC4	MMC3 – MMC4
线路长度	200 km	100 km	200 km	200 km
线路参数	$R=3.576 \times 10^{-5} \Omega/m$			
	$X_L=5.078 \times 10^{-4} \Omega/m$			
	$X_c=6.16 M\Omega \cdot m$			

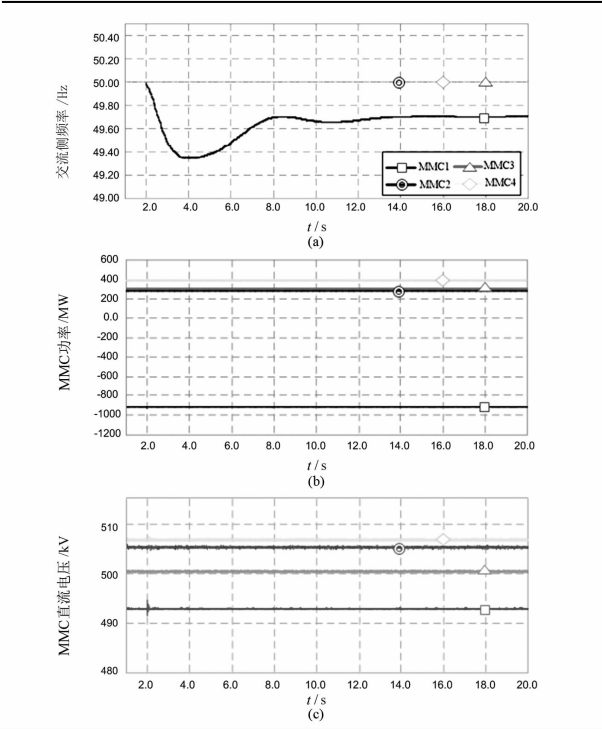


图 9 直流电压下垂控制策略

算例 2:固定频率控制

如图 10 所示,在 $t=2\text{ s}$ 之前,交流系统的频率以额定频率运行。在 2 s 时负荷的增加使得区域 1 的频率下降,由于 MMC – MTDC 采用的是频率协调控制策略,区域 1 的频率下降使得 MMC1 换流站的功率参考值增加,直流电压下垂控制策略使得其余换流站进行功率支撑,从而导致参与功率支撑的交流系统的频率下降。区域 1 的频率在稳定运行后频率维持在 49.80 Hz 左右,MMC1 的传输功率提升了 150 MW 左右,由于 MMC2、MMC3、MMC4 传输的功率都分别增加了 33 MW 、 41 MW 、 91 MW ,使得各交流系统频率相应下调,换流器损耗和线路损耗产生了 15 MW 的功率缺额。直流电压下垂系数 $K_{DC}=3$,导致直流电压的下降幅度较大。仿真结果表明,该控制策略能够有效地通过 MMC – MTDC 系统实现区域间的功率支撑和频率协调。

算例 3:频率偏差 PI 控制

由于基于 PI 调节的频率偏差控制采用的是比

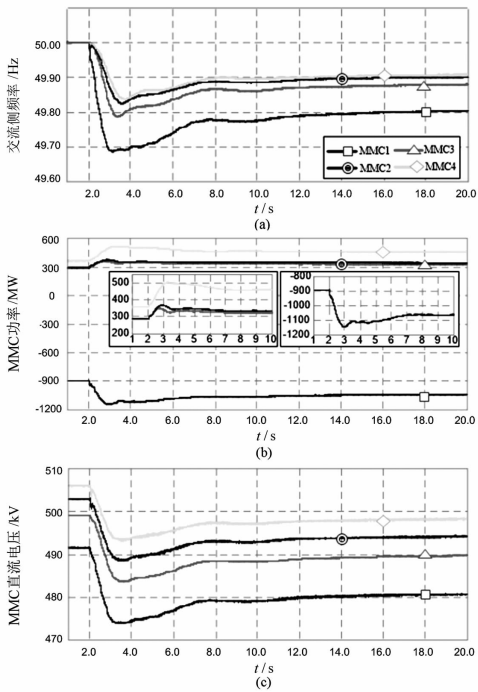


图 10 固定频率控制策略

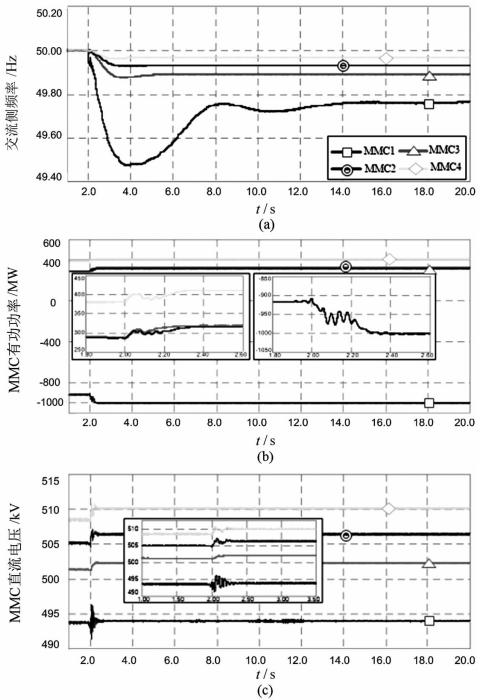


图 11 频率偏差 PI 控制

例积分控制器,使得每个交流系统的频率不断在调整追踪 $\bar{f}$,如图 11 所示。系统达到新的稳态时,区域 1 的频率为 49.77 Hz 左右,与直流电压下垂控制相比,其稳态频率提升了 0.06 Hz 左右,MMC1 传输的功率提升了 90 MW,同时由于 MMC2、MMC3 和 MMC4 都参与了频率协调控制,故其增加的输出功

率会引起交流系统的频率下降。频率偏差 PI 控制的控制结构不同于算例 2 中的控制结构,在协调控制器响应后直流电压有所上升,但是变化幅度较小。仿真结果表明,采用该控制策略可以有效地实现区域间功率的支撑和频率协调,并且不会引入过大的直流电压偏差,这对直流电压稳定要求较高的系统具有优越性。

算例 4: 功率估算频率控制

基于功率估算的频率协调控制策略对应的仿真结果见图 12、图 13 和图 14,分别对应于 $\alpha = 1/3$ 、 $\alpha = 2/3$ 、 $\alpha = 1$ 。该策略通过实时采集区域 1 的频率变化,根据频率的变化量利用功-频静特性系数来估算交流系统的功率变化量,将该功率量叠加至 MMC1 的外环控制器,并将该分量按照 $K_2:K_3:K_4 = 0.25:0.17:0.58$ 的比例分别叠加至 MMC2、MMC3、MMC4 的外环控制器中。通过调整 α 的值实现非事故区域对区域 1 的频率支撑和频率协调。仿真结果表明通过控制 α 的大小可以不同程度地实现异步电网频率协调控制策略,更好地利用交流系统的旋转备用容量。采用频率协调控制的换流站根据功频静特性系数大小决定附加功率,该方法可以有效地防止功频静特性系数较小的交流系统实现功率支撑时引起较大的频率偏移,故该方法在异步联网系统中具有较好的适用性。

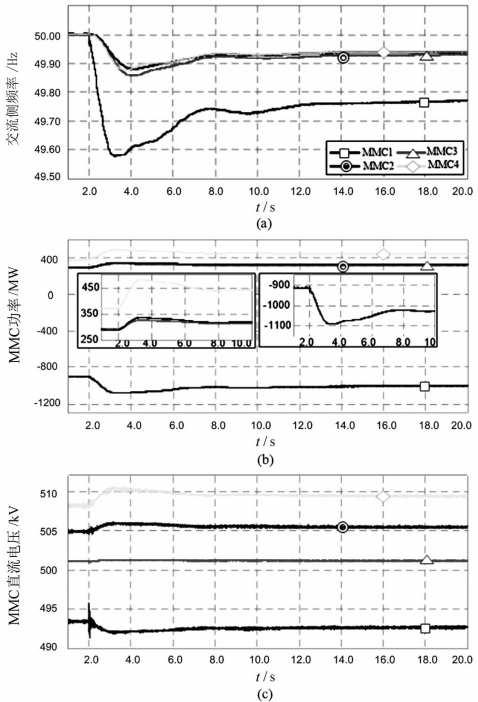


图 12 $\alpha = 1/3$ 时功率估算频率控制

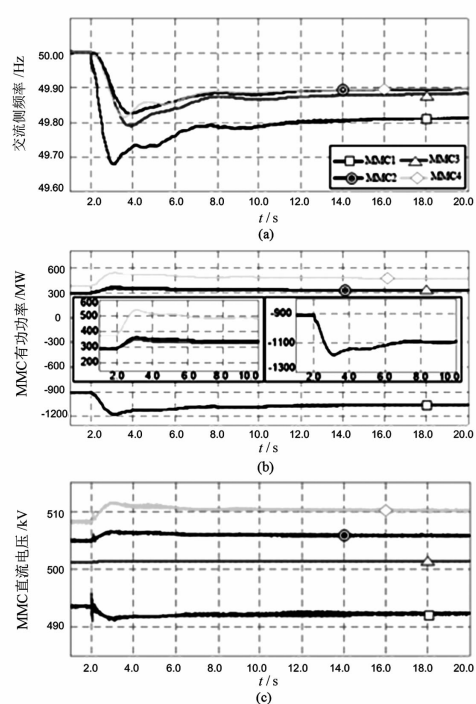


图 13 $\alpha = 2/3$ 时功率估算频率控制

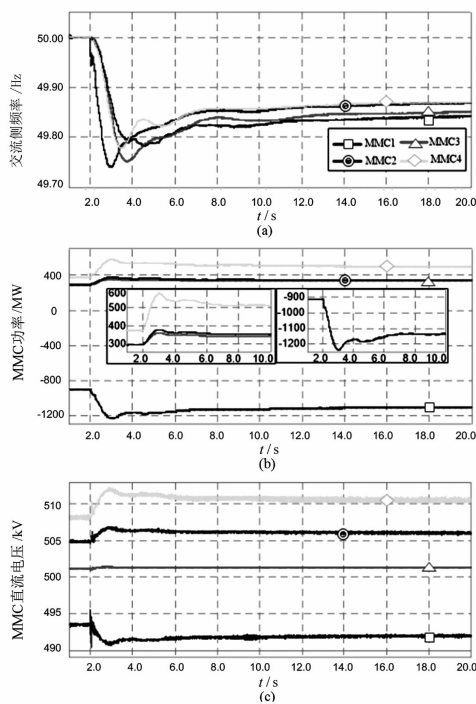


图 14 $\alpha = 1$ 时功率估算频率控制

6 结 语

前面提出了 3 种基于 MMC - MTDC 输电系统的频率协调控制策略的方法。该控制策略在 MMC 异步联网时实现不同区域的功率支撑和频率协调,根据频率变化自动调整 MMC 的传输功率。固定频

率控制中控制器输入的参考值为额定值,在交直流区域同步中具有优势,在异步联网中适用于功频特性系数较大的交流系统。频率偏差 PI 控制方法中由于频率的参考值进行了全局处理,可以较好地实现异步交流系统频率的实时跟踪控制,在实现区域功率支撑时,频率稳定特性良好。功率估算频率控制的方法具有更好的适用性,在实际系统中负荷变化一般是不明确的,测量的频率变化可以反映出功率缺额,为此利用交流系统的频率支撑能力来设置换流站的功率支撑量,换流站可以更为合理地分配网络不平衡功率。

参考文献

[1] Vrana T K, Denetiere S, Yang Y, et al. The CIGRE B4 DC Grid Test System[J]. Electra, 2013, 270:10 - 19.

[2] An T, Zhou X, Han C, et al. A DC Grid Benchmark Model for Studies of Interconnection of Power Systems [J]. Csee Journal of Power & Energy Systems, 2016, 1 (4):101 - 109.

[3] Renedo J, Garcia - Cerrada A, Rouco L. Reactive - power Coordination in VSC - HVDC Multi - terminal Systems for Transient Stability Improvement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):3758 - 3767.

[4] Leon A E. Short - term Frequency Regulation and Inertia Emulation Using an MMC - based MTDC System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018,33(3):2854 - 2863.

[5] Eriksson R. Coordinated Control of Multi - terminal DC Grid Power Injections for Improved Rotor - angle Stability Based on Lyapunov Theory [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4):1789 - 1797.

[6] Xu L, Williams B W, Yao L. Multi - terminal DC Transmission Systems for Connecting Large Offshore Wind Farms[C]// 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008;1 - 7.

[7] Hendriks R L, Delft T U, Paap G C, et al. Control of A Multi - terminal VSC Transmission Scheme for Connecting Offshore Wind Farms[C]// European Wind Energy Conference, Milan, Italy, 2007.

[8] Li X, Guo L, Hong C, et al. Hierarchical Control of Multi - terminal DC Grids for Large - scale Renewable Energy Integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3):1448 - 1457.

(下转第 67 页)

基于 MMC 的柔性直流系统控制策略研究

梁 明¹, 孟 鑫², 薛一鸣³, 王军成¹

(1. 西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;
2. 电力规划总院有限公司, 北京 100120; 3. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054)

摘 要:模块化多电平换流器作为柔性直流输电系统的常见换流器拓扑结构, 对其进行控制策略研究具有重要意义。首先介绍了 MMC 的拓扑结构和基本工作原理, 推导得到了 MMC-HVDC 的简化电路模型, 设计了 dq 坐标系下的内环电流控制器及外环控制器; 然后研究了 MMC-HVDC 系统下的有功/无功控制策略, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建了双端 MMC-HVDC 系统并进行仿真研究, 仿真结果表明了该电路模型的正确性及控制策略的有效性。

关键词:柔性直流输电; 电路模型; 控制策略

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2019)01-0014-05

Research on Flexible HVDC System Control Strategy Based on MMC

Liang Ming¹, Meng Xin², Xue Yiming³, Wang Juncheng¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;
2. Electric Power Planning & Engineering Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China;
3. State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100054, China)

Abstract: Modular multilevel converter (MMC) is the preferred converter topology of flexible DC transmission system, and researching the control strategy of MMC is of great significance. The topology and basic working principle of MMC are introduced, and the simplified circuit model of MMC-HVDC is deduced. The inner-loop current controller and outer-loop controller in dq coordinate are designed. Moreover, the active/reactive power control strategy of MMC-HVDC system is studied. Finally, a point-to-point MMC-HVDC system is established and simulated in PSCAD/EMTDC. The results show that the proposed MMC model is correct and the control strategy is effect.

Key words: HVDC flexible; circuit model; control strategy

0 引 言

电压源换流器(voltage source converter, VSC)结构简单紧凑,具有自换相能力,能有效避免换相失败问题,同时还能够对有功/无功功率进行独立控制,在直流输电领域得到了广泛的应用,已建成的柔性直流输电工程主要为两电平和三电平的VSC。但是VSC也存在缺点:首先,由于换流器电平数量限制,VSC输出特性不稳定,在工程中需要提高开关频率使用高频PWM调制策略来改善输出特性,造成较高的开关损耗;其次,VSC桥臂中开关器件的串联

均压技术实现困难,严重制约了VSC在更高电压等级的柔性直流输电系统的应用。

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)由于具有公共的直流母线,通过增加换流器级联数就可以提高输出电压扩展到大功率输电,因此MMC被认为是更适合应用于柔性直流输电领域的新技术。文献[1]分析了MMC的拓扑结构及工作原理,得出了理论等效电路模型;文献[2]对MMC-HVDC系统进行了数学建模,但该模型选择了与传统VSC相同的控制策略,直流电压波动较大。文献[3]将空间矢量脉冲调制策略用于MMC中,提出了调制策略的通用算法。文献[4]采用多

电平消谐波调制策略,在降低换流器开关频率的同时实现了谐波抑制。

下面通过分析 MMC 拓扑结构及其工作原理,研究 MMC – HVDC 系统的简化数学模型,并根据该模型将传统的 VSC 控制策略应用到全桥 MMC 系统中,提出有功/无功控制策略实现系统有功/无功的快速跟踪。最后在 PSCAD/EMTDC 中对有功阶跃、有功翻转及有功/无功独立控制 3 种工况进行了仿真验证。

1 MMC 的拓扑结构及其控制参数设计

图 1 为三相模块化多电平换流器的拓扑结构图。图中: u_a 、 u_b 、 u_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 分别表示交流系统三相输入电压和电流; U_d 和 I_d 分别表示直流侧输出电压和电流,“O”表示直流侧虚拟中性点。相比于传统 VSC,MMC 由 3 个相单元组成,在直流侧正负极之间没有直流储能电容。相单元由两个电抗 L_0 和 n 个子模块(SM_{*n*})串联而成的桥臂组成。MMC 子模块主要有半桥子模块和全桥子模块两种,如图 2 所示。

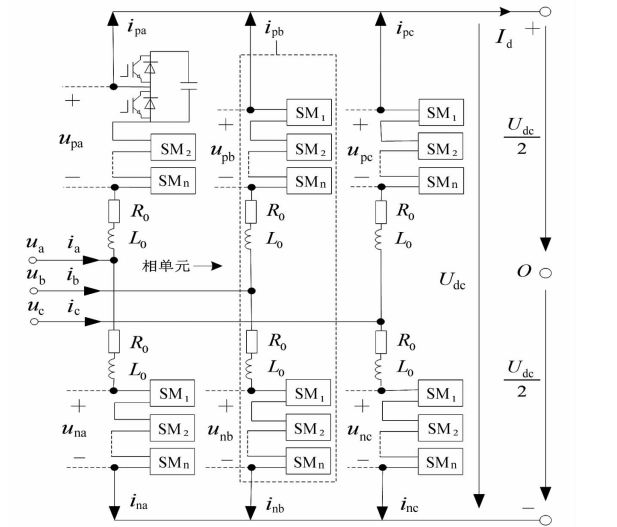


图 1 MMC 的拓扑结构

半桥子模块由一个作为开关单元的 IGBT 半桥和一个直流储能电容 C_0 组成,其中 IGBT 半桥包含两组 IGBT(T_1 、 T_2)和续流二极管(D_1 、 D_2)。对于半桥子模块,令直流电容电压为 U_c ,子桥模块输出电压为 U_{SM} 。子模块根据内部 T_1 、 T_2 的开关状态及电流方向,可以分为闭锁、全电压和零电压 3 种常见运行状态。

1)闭锁状态: T_1 、 T_2 均关闭。此时电流经 D_1 给

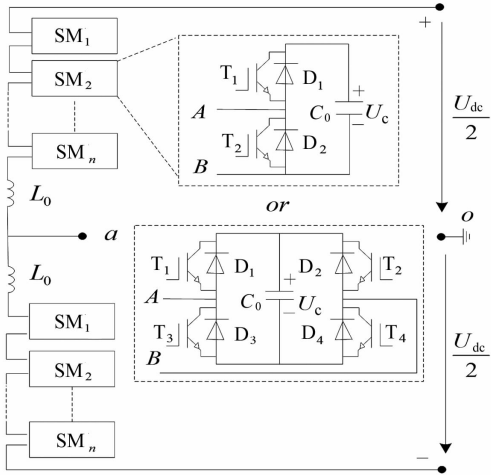


图 2 半桥及全桥子模块拓扑结构

电容充电,或经 D_2 旁路子模块。闭锁状态一般在 MMC 启动或系统发生故障时使用。

2)全电压状态(投入状态): T_1 导通, T_2 关闭。电流经 T_1 放电或经 D_1 给电容充电,此时子模块端口电压等于电容电压,即 $U_{SM} = U_c$ 。

3)零电压状态(切除状态): T_1 关闭, T_2 导通。此时子模块被 D_2 或 T_2 旁路,子模块端电压等于 0。

全桥子模块则是由 4 个 IGBT(T_1 至 T_4)和 4 个反并联二极管(D_1 至 D_4)以及一个直流储能电容 C_0 组成。定义全桥 MMC 流入子模块正端口为桥臂电流正方向,反之为负。 T_1 、 T_4 导通, $U_{SM} = U_c$, T_2 、 T_3 导通, $U_{SM} = -U_c$; T_1 、 T_2 或 T_3 、 T_4 导通, $U_{SM} = 0$ 。因此,根据 IGBT 导通方式的不同,全桥子模块可分为两种工作模式:PLUS 模式和 MINUS 模式。PLUS 模式下子模块交替地输出 U_c 和 0;MINUS 模式下子模块交替地输出 $-U_c$ 和 0。同时,全桥子模块的运行状态也可分为闭锁、切除和切除 3 种。

1)闭锁状态: T_1 至 T_4 全部关闭,电流经 D_1 和 D_4 给电容充电,或电容经 D_2 和 D_3 反极性接入电路。这种状态应用在系统故障时或在预充电不控整流阶段。

2)投入状态: T_1 和 T_4 导通, T_2 和 T_3 关闭,正方向时,电流经 D_1 和 D_4 给电容充电;反方向时,电流经 T_1 和 T_4 放电。此时,全桥子模块电容器被接入到主电路中,输出电压为电容电压。

3)切除状态: T_1 和 T_3 导通, T_2 、 T_4 关闭,正方向时,电流经 D_1 和 T_3 将子模块旁路;反方向时,电流经 D_3 和 T_1 将子模块旁路。

2 有功/无功控制

图3为典型MMC-HVDC系统的基本控制策略框图。送端及受端换流器均包含有功功率控制器及无功功率控制器,同时有一端包含直流电压控制器。具体的控制组合主要取决于交流系统情况的改变。一般对于两端有源系统网络,可以在整流侧采用有功/无功控制,逆变侧采用直流电压和无功的控制组合。典型MMC-HVDC系统的控制策略可以分为内环电流控制器与外环功率控制器两部分。内环电流控制器决定了MMC-HVDC系统的直流侧输出特性,外环控制器决定了MMC-HVDC系统的基本控制方式。内环电流控制器通过调节MMC输出电压,使坐标轴电流快速跟踪参考值;外环控制器可根据系统功率以及直流电压,计算内环电流控制器的 d,q 轴电流参考值。

在稳态下,电网三相平衡,系统的电压和电流均只含有正序分量。根据图4所示的MMC拓扑结

构,可得到MMC在 d,q 坐标系下的状态方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_{sd} - v_d + \omega Li_q - Ri_d \\ L \frac{di_q}{dt} = u_{sq} - v_q - \omega Li_d - Ri_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd}, u_{sq} 为网侧电压的 d 轴和 q 轴分量; i_d, i_q 为网侧电流的 d 轴和 q 轴分量; v_d, v_q 为阀侧交流电压的 d 轴和 q 轴分量; ω 为电网角频率。

MMC交流侧功率和直流侧功率可分别表示为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_{sd}i_d + u_{sq}i_q) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_{sq}i_d - u_{sd}i_q) \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{dc} = U_{dc}I_{dc} \quad (3)$$

在正常情况下, $u_{sq} = 0$,那么由式(2)可得交流系统送入MMC的功率的直流分量为

$$P_0 = \frac{3}{2}u_{sd}i_d, Q_0 = -\frac{3}{2}u_{sd}i_q \quad (4)$$

1) 内环电流控制器

在动态调节过程中,由于 d 轴电流和 q 轴电流

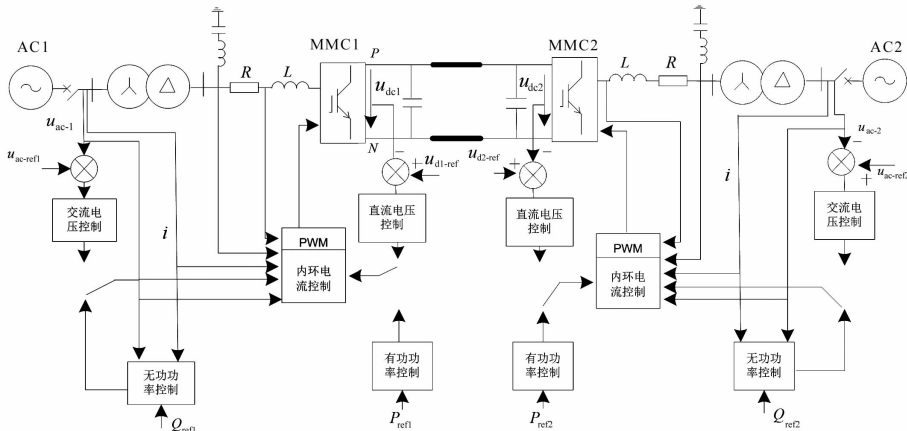


图3 双端MMC-HVDC系统控制框图

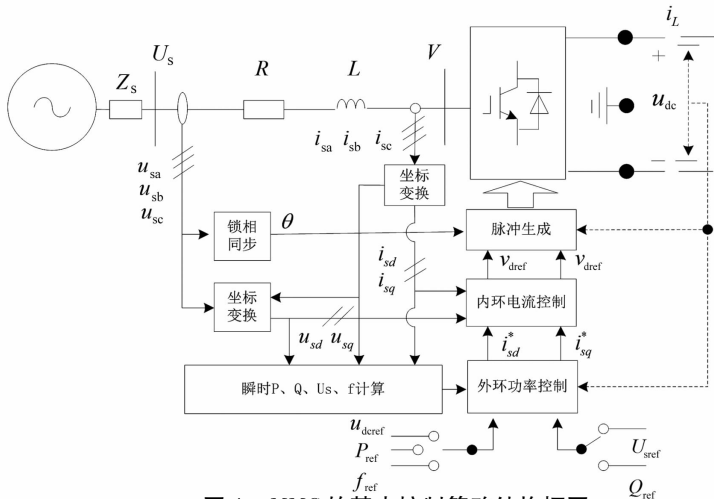


图4 MMC的基本控制策略结构框图

之间存在耦合关系,难以实现单独控制。内环电流控制器的作用就是让 d 轴和 q 轴电流分量独立解耦控制,使电流能够快速跟踪参考值。图 5 为内环电流控制器结构图。通过 PI 控制并引入电压前馈和耦合补偿,可得内环电流控制器的输入变量为

$$\begin{cases} v_d = u_{sd} + \omega Li_q - (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(i_d^* - i_d) \\ v_q = u_{sq} + \omega Li_d - (k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s})(i_q^* - i_q) \end{cases} \tag{5}$$

将式(5)代入式(1)可得 d 、 q 轴电流表达式为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(i_d^* - i_d) \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = (k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s})(i_q^* - i_q) \end{cases} \tag{6}$$

可见, d 、 q 轴电流之间实现了解耦。

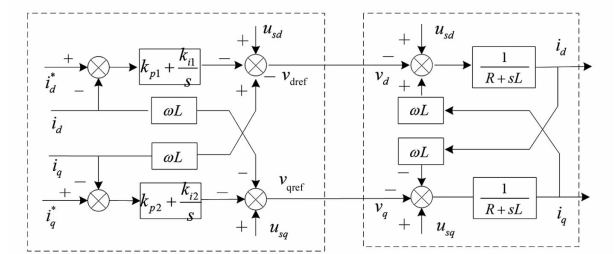


图 5 内环电流控制器结构

2) 外环功率控制器

MMC 中引入了内环电流控制器和外环功率控制器。内环电流控制器使得 d 轴和 q 轴电流解耦并能快速跟踪参考值,外环功率控制器则能够根据系统

变化及系统参数来确定内环电流参考值。通过内外控制器的综合作用可以有效对系统的功率变化进行跟踪,实现系统有功/无功控制。由于实际中为了防止器件过电流,一般认为负序电流的参考值为 0。由此根据式(4)可得 d 轴和 q 轴电流参考值以及定直流电压控制下 d 轴电流参考值分别为

$$i_d^* = P^*/(1.5u_{sd}), i_q^* = -Q^*/(1.5u_{sd}) \tag{7}$$

$$i_d^* = (k_p + \frac{k_i}{s})(U_{dc}^* - U_{dc}) \tag{8}$$

需要特别说明的是,双端 MMC - HVDC 系统正常运行时,若送端换流器采用定直流电压控制和无功控制,则受端可采用有功/无功控制,反之亦可。

3 仿真验证及分析

为了验证 MMC - HVDC 系统模型的正确性及有功/无功控制策略的有效性,基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件,通过搭建典型 MMC - HVDC 的双端系统,在有功功率阶跃、有功功率翻转和有功/无功独立控制 3 种典型情况下对前面所述控制策略进行了仿真验证。

1) 有功功率阶跃情况下的仿真

初始时,设定系统传输有功功率为 1000 MW,无功功率为 0 MVA;在 3.5 s 时,有功功率设定为 600 MW,无功功率为 0 MVA;直流电压一直保持 640 kV 不变。仿真结果如图 6 所示:其中(a)、(b)

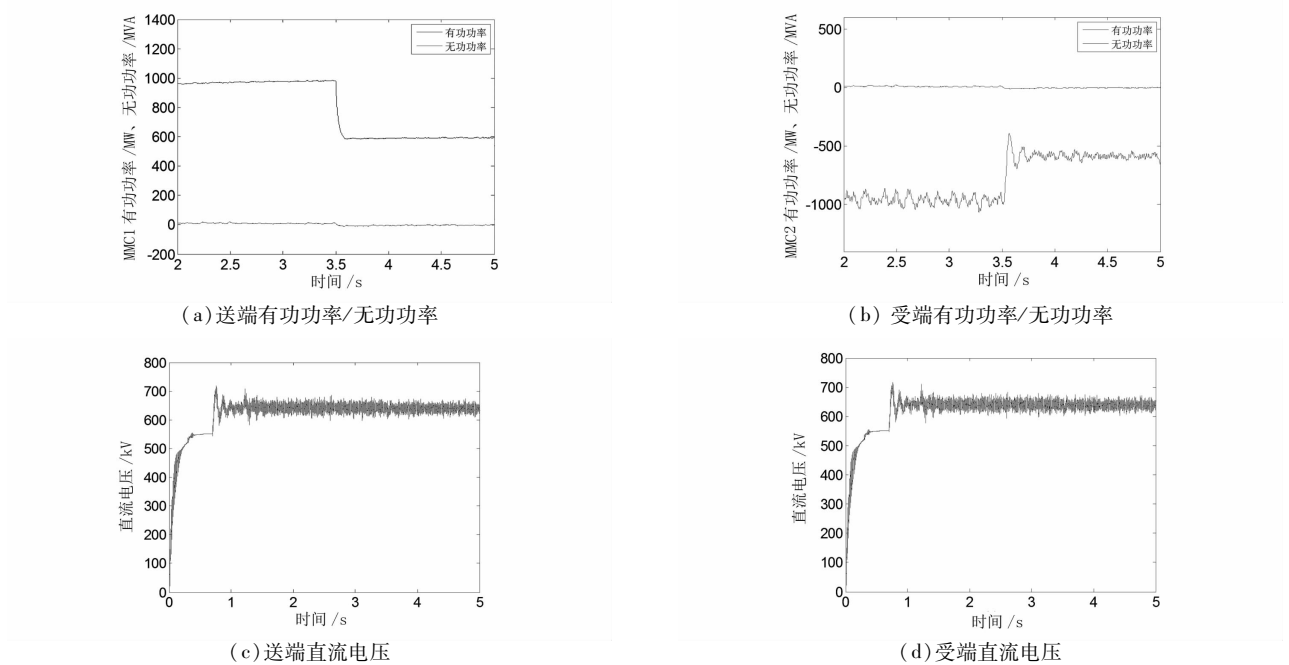
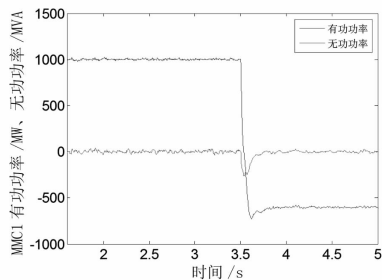


图 6 有功功率阶跃情况仿真结果

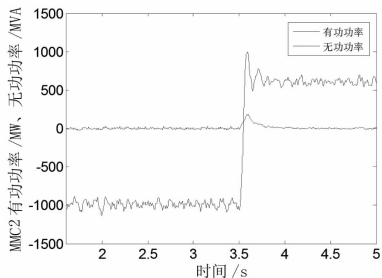
分别为送端和受端有功/无功波形,可见系统的有功、无功能够快速跟踪指令值的变化,解耦性能较好;(c)、(d)分别为送端与受端直流电压波形,可见有功功率发生阶跃时,系统直流电压波动较小,即使发生波动也能较快地恢复稳定值,保持系统稳定。

2) 有功功率翻转情况下的仿真

直流电压为 640 kV 不变,在启动完成后 MMC1 侧的有功功率设置为 1000 MW,3.5 s 时设为 -600 MW。仿真结果如图 7 所示。可见,当系统有功功率发生翻转时,系统有功和无功均有较快的响应速度,能较快恢复稳定运行,并快速实现潮流翻转。



(a) 送端有功功率/无功功率



(b) 受端有功功率/无功功率

图 7 有功功率翻转情况仿真结果

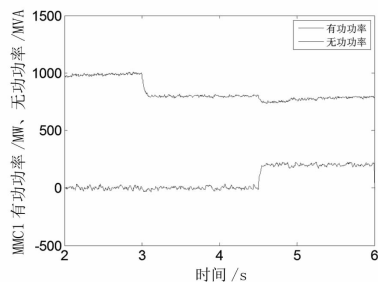
3) 有功/无功独立控制情况下的仿真

直流电压 640 kV,在启动完成后 MMC1 侧的有功功率设置为 1000 MW,3 s 时设为 800 MW。无功功率初始值为 0,4.5 s 时设为 200 MVA。

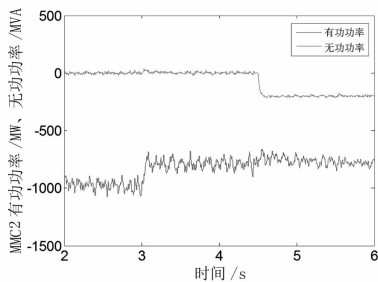
仿真结果如图 8 所示,由图可见当系统的无功功率和有功功率发生阶跃时,系统显示出良好的解耦性能,有功功率和无功功率之间相互影响较小,系统的功率能够快速跟踪系统的变化。

4 结 语

研究了 MMC-HVDC 拓扑结构及其数学模型,并简化了电路模型。将传统 VSC 的功率控制策略应用到 MMC 系统中,设计了适用于 MMC 系统的有



(a) 送端有功功率/无功功率



(b) 受端有功功率/无功功率

图 8 有功/无功独立控制情况仿真结果

功/无功控制策略。通过在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建 21 电平双端 MMC-HVDC 系统模型并进行 3 种常见工况的仿真研究,验证了所建简化数学模型的正确性和所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 肖刚,张译文,郭育华,等. 基于 MMC 的同相供电潮流控制器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017,45(14):79-84.
- [2] 运奕竹,娄剑,朱天权,等. 含柔性直流输电系统的故障仿真分析[J]. 东北电力大学学报,2017,37(2):19-23.
- [3] 刘英培,潘肫肫,栗然,等. 不对称电网电压下 MMC-HVDC 系统功率波动抑制策略研究[J]. 电测与仪表, 2017,54(2):18-24.
- [4] 黄守道,廖武,高剑,等. 基于改进均压算法的模块化多电平变流器开关频率分析[J]. 电工技术学报, 2016,31(13):36-45.
- [5] 王光江. 基于全桥 MMC 的柔性直流输电系统控制策略与故障隔离[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [6] 张兆钰. MMC-HVDC 直流输电系统复合故障的控制策略研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.
- [7] 辛业春,李国庆,王朝斌,等. 基于状态反馈解耦控制的 MMC-HVDC 系统控制策略研究[J]. 电测与仪表,2015,52(20):65-70.
- [8] 周国威. 模块化多电平换流器的环流控制策略[J]. 电气开关,2015,53(1):79-82. (下转第 40 页)

基于光伏 - 蓄电池 - 超级电容的微电网协调控制策略

张 谦, 蒋永梅, 丁 敏, 金武杰, 金晨星
(国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316021)

摘 要:针对光伏系统的不足,利用蓄电池-超级电容对光伏发电系统出力的互补特性,构成蓄电池-超级电容和光伏发电的微电网系统,并提出采用基于直流母线电压平衡的控制策略实现蓄电池-超级电容的快速响应。基于 Matlab/Simulink 搭建微电网模型,仿真验证了控制策略的优越性和正确性。
关键词:光伏电池;混合储能系统;微电网建模;协调控制
中图分类号:TM72 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0019-04

A Coordinated Control Strategy of Microgrid Based on PV, BES and SC

Zhang Qian, Jiang Yongmei, Ding Ming, Jin Wujie, Jin Chenxing
(Zhoushan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric
Power Company, Zhoushan 316021, Zhejiang, China)

Abstract:For the shorts of the output of photovoltaic power generation system, the complementary characteristics of battery and supercapacitor energy storage system to photovoltaic power generation system is utilized to composed the microgrid system with photovoltaic power generation, battery and supercapacitor. A control strategy based on DC bus voltage balance is proposed to achieve the fast response of battery and supercapacitor. Finally, the simulation model of microgrid is established with Matlab/Simulink simulation software, and the simulation results verify the superiority and validity of the proposed control strategy.
Key words:photovoltaic cell; hybrid energy storage system; microgrid modeling; coordinated control

0 引 言

新能源系统的功率受气候和天气影响存在较大波动性,影响电能质量和电力系统的可靠性。为保持稳定的电力输出,通常需增加储能装置。国内基于光、储能供电微电网系统的研究也处于发展阶段,基于光伏和蓄电池-超级电容的微电网系统运行特性及其控制策略研究具有一定的理论参考价值和实用价值^[1-5]。

为确保微电网系统安全可靠运行,混合储能的协调控制策略是关键技术。为解决此问题,文献[6-7]采用蓄电池与燃料电池发电系统作为车辆微电网的辅助电源,蓄电池主要吸收功率波动。文献[8]分析了含光伏和蓄电池的微电网储能技术,但

其中蓄电池结构过于简单,充放电过程不可控制。文献[9-11]采用了一种新型拓扑结构,通过变换器集成燃料电池与光伏使得光伏发电单元工作在最优状态。

首先确定了光伏-蓄电池-超级电容混合储能系统类型,并对混合储能系统的连接方式进行了选择,进而提出了混合储能的控制策略,这种策略的控制目的是实现直流母线电压的可控,并且通过仿真软件仿真验证了控制策略的优越性和正确性。

1 直流微电网建模

1.1 光伏电池模型

光伏电池等效电路如图1所示。
光伏阵列在参考日照强度与参考电池温度下的

输出电流 I_{pv} 和输出电压 U_{pv} 关系式及相应方程为

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{U_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{nkT}} - 1 \right) - \frac{U_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (2)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \quad (3)$$

$$I'_{SC} = I_{SC} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \quad (4)$$

$$V'_{OC} = V_{OC} (1 - \gamma \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S) \quad (5)$$

$$I'_{MPP} = I_{MPP} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \quad (6)$$

$$V'_{MPP} = V_{MPP} (1 - \gamma \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S) \quad (7)$$

$$R_s = I_{MPP} \left(\frac{V_{OC}}{\ln \frac{I_{SC}}{I_{sat}}} \ln \frac{I_{SC} - I_{MPP}}{I_{sat}} - V_{MPP} \right) \quad (8)$$

式中: I_{ph} 为光生电流; I_s 为二极管饱和电流; R_s 、 R_{sh} 分别为串联电阻和分流电阻; k 为波尔兹曼常数; T 为蓄电池的温度。

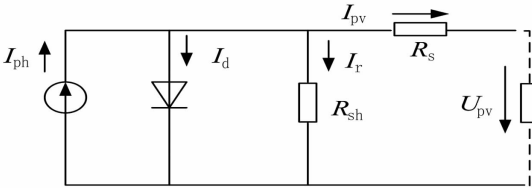


图1 光伏电池等效电路

1.2 蓄电池模型

通过分析比较不同类型的蓄电池性能,结果显示锂离子蓄电池性能更好,所以采用该类型蓄电池。其充放电数学模型如下:

$$E_d = E_0 - \frac{K \cdot Q \cdot i^* t}{Q - it} - \frac{K \cdot Q \cdot it}{Q - it} + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (9)$$

$$E_c = E_0 - \frac{K \cdot Q \cdot i^* t}{0.1Q + it} - \frac{K \cdot Q \cdot it}{Q - it} + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (10)$$

$$SOC = 1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt \quad (11)$$

式中: E_c 、 E_d 为充放电电能; E_0 为电压常数; i^* 为低频动态电流; K 为极化常数; it 为可提取的电能; i 为充放电电流; t 为充放电时间; Q 为蓄电池最大容量; A 为指数电压; B 为指数容量; SOC 为荷电状态。

1.3 超级电容储能系统数学模型

超级电容器等效模型一般为 RC 等效电路,其

具体结构如图2所示。

相应数学表达式如下:

$$P = U_0 I = (U - IR) I \quad (12)$$

$$C = \frac{Idt}{dV} \quad (13)$$

$$E = \frac{1}{2} C U_{max}^2 - \frac{1}{2} C U_{min}^2 \quad (14)$$

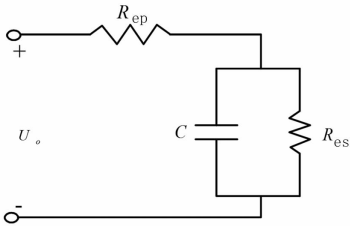


图2 超级电容等效电路

$$\eta = \frac{E_{dch}}{E_{cha}} = \frac{\int_0^t I_d \times u(t) dt}{\int_0^t I_c \times u(t) dt} \quad (15)$$

$$\eta_c = \frac{\frac{1}{2} C (U_{cmax}^2 - U_{cmin}^2)}{\int_0^t I_c \times u(t) dt} \quad (16)$$

$$\eta_d = \frac{\int_0^t I_d \times u(t) dt}{\frac{1}{2} C (U_{dmax}^2 - U_{dmin}^2)} \quad (17)$$

超级电容组的总电阻和总电容通过式(18)、式(19)计算:

$$R_{UC-total} = n_s \frac{R_{ES}}{n_p} \quad (18)$$

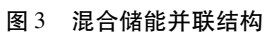
$$C_{UC-total} = n_p \frac{C}{n_s} \quad (19)$$

式中: U_{max} 、 U_{min} 为超级电容允许的最高、最低工作电压; U_0 为初始电压; I_c 、 I_d 为充、放电电流; E_c 、 E_d 分别为充、放电能量; E 为超级电容能量输出; η 为超级电容的效率; η_c 、 η_d 分别为充、放电效率; U_{cmax} 、 U_{cmin} 分别为充电截止电压和起路电压; U_{dmax} 、 U_{dmin} 分别为放电起始电压和截止电压。

2 混合储能并联方式的选择

为了弥补超级电容 (supercapacitor, SC) 和蓄电池独立应用时的不足, 结合两者的特点分析, 不难看出两者是有互补作用的: 蓄电池适合长时间持续放电, 但对突变情况反映缓慢; 而超级电容则可以快速反应各种突变, 但不具备长时间持续放电的特点。

综上所述,不难看出带混合储能的独立光伏发电系统只需将蓄电池与超级电容通过各自的变换器并联即可。图3中并未涉及交流负载,但可以通过DC/AC与交流负载相连。



混合储能的控制方法依然采用以稳定直流母线电压为目的的控制策略,如图 4 所示。结合两种储能方式的特点,通过低通滤波器将功率差值分为低频、高频两部分。基于 SC 充、放电速度快的优点,由 SC 负责吸收和释放因多种原因产生的高频功率。BES 因能量密度大,作为长时间的储能装置,负责吸收和释放低频功率。

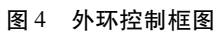
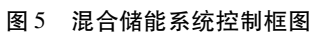
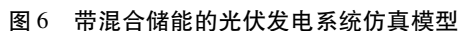


图5为混合储能系统的控制框图。当 $U_{dc-ref} > U_{dc}$ 时,此时 PI 环的输出为正值, $I_{bat-ref}$ 、 I_{sc-ref} 均为正值,混合储能处于放电状态。反之,混合储能处于充电状态。为保证 BES 吸收能量中的低频部分和 SC 吸收能量中的高频部分,引入低通滤波器和比例系数 K 。



为验证基于 PV、BES、SC 的微电网控制策略的可行性,基于 Matlab/Simulink 搭建微电网模型,如图 6 所示;各部分参数如表 1 至表 3 所示。



名称	数值	名称	数值
开路电压/V	215	短路电流/A	31.65
MPP 电压/V	175	MPP 电流/A	29.55
额定功率/kW	5	内阻/ Ω	0.20

名称	数值	名称	数值
额定电压/V	100	额定容量/Ah	20
内阻/ Ω	0.05	最大容量/Ah	20.83
额定功率/kW	5		

名称	数值	名称	数值
能量密度 /(Wh · kg ⁻¹)	3.9	功率密度 /(W · kg ⁻¹)	3300
循环效率	0.98		

在该模型中,直流负载 $C_3=200\ \Omega$, $C_4=200\ \Omega$, 设定 Ideal Switch 的触发信号, $t=0.3\text{ s}$ 时,触发信号由 0 变为 1,等同于将直流负载由 $200\ \Omega$ 增至 $400\ \Omega$ 。 $t=0.6\text{ s}$ 时,触发信号由 1 变为 0,等同于将直流负载由 $400\ \Omega$ 减至 $200\ \Omega$ 。仿真波形如图 7 至图 9 所示。

由图 7 可以看出,无论是负载由 $200\ \Omega$ 增加到 $400\ \Omega$ 的过程还是负载由 $400\ \Omega$ 减少到 $200\ \Omega$ 的过程,直流母线电压为 $150\ \text{V}$,波动幅度小于 $0.5\ \text{V}$ 。因此所提出的基于直流母线电压平衡的储能控制策

略能够达到预期效果。

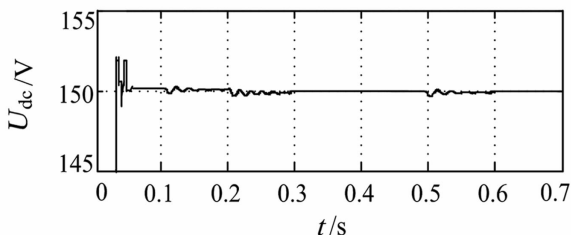


图7 直流母线电压波形

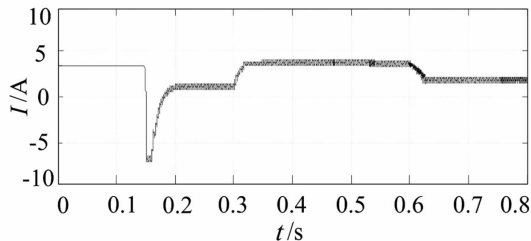


图8 蓄电池充、放电波形

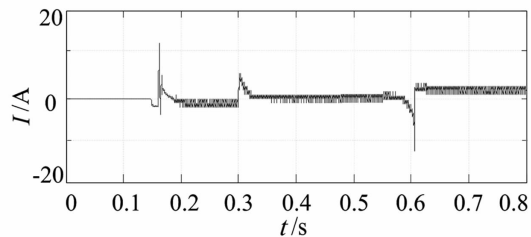


图9 超级电容器充、放电波形

由图8和图9可以看出,在 $t=0.3\text{ s}$ 和 $t=0.6\text{ s}$,负载发生增减时,在突变的瞬间,SC的充、放电电流骤增或骤减,而BES的充、放电电流缓慢上升或下降,约 0.02 s 后达到稳定状态。

通过分析混合储能系统的仿真波形可知,当负载发生突变时,由SC进行快速的充、放电,缓冲瞬间的功率差变化;待稳定后,由BES吸收和释放能量以弥补不平衡功率。仿真结果表明BES的充、放电状态一直很平稳,SC在突变情况下弥补BES不能快速放电和放电电流小的缺陷。

5 结 语

首先确定了所研究系统中储能方式为混合储能方式,然后确定了混合储能系统的连接方式。在设计混合储能系统的控制策略时,采用基于直流母线

电压平衡的控制策略,同时加入低通滤波器,能够有效地区分能量差中的高频部分和低频部分,这样不仅充分地发挥了各储能装置的作用,也提高了系统的响应速度。仿真验证了该控制策略可以通过协调控制SC和BES,确保在负荷和光照强度大幅波动的情况下直流母线电压处于允许范围内。

参考文献

- [1] Magdi S. Mahmoud, Mohamed Saif Ur Rahman, Fouad M. A. L. - Sunni F. M. Review of Microgrid Architectures - A System of Systems Perspective [C]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(8): 1064 - 1078.
- [2] 马艺玮,杨苹,王月武,等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 168 - 175.
- [3] 吴卫民,何远彬,耿攀,等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98 - 106.
- [4] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2 - 16.
- [5] Saleh Ziaeejad, Younes Sangsefidi, Ramon Zamora, et al. Design of A Fuel Cell - based Battery Extender Auxiliary Power Unit for a Vehicular Microgrid [C]. 40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2014: 3948 - 3954.
- [6] 姜志玲,陈维荣,刘小强,等. 燃料电池发电系统的能量管理控制[J]. 电源技术, 2010, 34(9): 911 - 914.
- [7] 金科,阮新波,杨孟雄,等. 复合式燃料电池供电系统[J]. 电工技术学报, 2008, 23(3): 92 - 98.
- [8] 史君海,朱新坚,隋生,等. 燃料电池 - 光伏混合发电系统建模与仿真[J]. 电源技术, 2007, 31(9): 728 - 731.
- [9] Prajof P, Vivek Agarwal. Novel Solar PV - fuel Cell Fed Dual - input - dual - output DC - DC Converter for DC Microgrid Applications [C]. Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015: 1 - 6.
- [10] 王冰清,曾国宏,童亦斌,等. 光伏组件精确工程模型及MPP电压范围研究[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3086 - 3090.
- [11] 李春华,朱新坚. 基于混合储能的光伏微网动态建模与仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 39 - 46.

作者简介:

张 谦(1989), 硕士, 从事装表接电工作, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护。

(收稿日期: 2018 - 08 - 06)

考虑分布式再生能源和储能的主动配电网可靠性评估

刘旭娜¹, 魏俊¹, 周瑜璐², 张景瑞², 张伟³

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041;

2. 厦门大学仪器与电气系, 福建 厦门 361005; 3. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100)

摘要:随着主动配电网技术的逐步发展和应用, 针对主动配电网的各项评估技术也需要进一步研究。由于主动配电网在网络结构、潮流流向等方面与传统配电网有很大区别, 因此针对主动配电网的评估方法也与传统配电网不同, 提出了一种考虑分布式再生能源和储能的主动配电网可靠性评估方法。首先运用蒙特卡洛模拟法进行系统状态选择, 再基于不同网络类型, 采用改进的前推回代潮流计算方法进行潮流计算与潮流平衡调整, 进而计算各项评估指标, 获取综合评估值。通过对9个方案进行可靠性评估, 验证了所提方法的有效性。

关键词:主动配电网; 可靠性评估; 网络类型; 潮流平衡

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2019)01-0023-06

A Reliability Evaluation Method of Active Distribution Network Considering Distributed Generations and Batteries

Liu Xuna¹, We Jun¹, Zhou Yulu², Zhang Jingrui², Zhang Wei³

(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Department of Instrumental and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 3. Jicheng Electronics Corporation, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: As the development of grid technology, a further study of evaluation techniques for active distribution network is also necessary. Evaluation methods of active distribution network are not similar to that of the traditional one because of their great differences, such as network structure, trend of flow, etc. A reliability evaluation method for active distribution network considering distributed generations and batteries is proposed. Firstly, a Monte Carlo simulation is implemented to obtain system states. Then, the power flow results obtained by an improved back/forward power flow calculation method is used to calculate the index values, and a comprehensive evaluation index value is then computed. Finally, the effectiveness of the proposed method is proved by nine cases.

Key words: active distributed network; reliability evaluation; network type; power flow balance

0 引言

随着电力需求的日益增长, 能源危机和环境污染的不断加剧, 越来越多的清洁能源被加以利用, 并以分布式电源 (distributed generation, DG) 的形式并入电网。为了充分利用分布式清洁能源, 并降低分布式能源间歇性、波动性等特点对电网的影响, 主动配电网技术应运而生。

主动配电网不同于传统配电网络, 除了有大电

网连接以外, 自身还包含了多种电源以及多个用户, 增加了网络的复杂度。同时网络中还安装了主动管理设备, 在多种复杂情况下可以进行不同的控制管理, 更大程度发挥分布式电源的优势并尽量避免其对配电系统的干扰。因此, 针对传统配电网的可靠性评估方法已经不再适用于主动配电网络^[1]。近年来, 国内外学者针对主动配电网的可靠性评估理论与方法展开了一系列研究。文献[2]提出的配电系统可靠性算法是基于编号法和蒙特卡洛模拟法展开的, 并说明了分布式电源的接入对系统可靠性水

平的提升有积极的影响。文献[3]探讨了在加入分布式电源后,配电网可靠性的研究理论和计算方法,同样说明了分布式电源并网一定程度上提高了系统的可靠性。

下面通过运用序贯蒙特卡洛模拟法,提出了一种适用于含分布式电源的主动配电网可靠性分析方法,该方法结合传统可靠性指标和针对分布式电源的可靠性指标进行研究,并解决了在评估过程中,不同系统网络类型的潮流计算与潮流平衡调整问题,总结出了完整的可靠性评估步骤。

1 可靠性评估指标

结合 TOPSIS 法^[4]和本征向量法,综合传统可靠性指标和针对分布式电源的可靠性指标^[5],提出了适用于主动配电网的可靠性综合评估值。该综合评估值既包含了频率、时间、电量的信息和孤岛运行时的电力供求状况,又反映了分布式电源接入对系统的影响。传统可靠性指标有:系统平均停电频率(system average interruption frequency index, SAIFI)、系统平均停电持续时间指标(system average interruption duration index, SAIDI)、系统总电量不足指标(energy not supplied, ENS)和电能质量指标(voltage quality, VOL)。针对分布式电源的新指标包括:DG 对 SAIDI 的贡献系数 D_{SAIDI} , DG 对 SAIFI 的贡献系数 D_{SAIFI} 和孤岛电力不足期望(expected demand not supplied when being island, EDNSI)。

1.1 传统可靠性指标

1) 系统平均停电频率指标(SAIFI)

$$SAIFI = \frac{\text{用户停电总次数}}{\text{用户总数}} = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (1)$$

式中: λ_i 为负荷点 i 故障率的平均值; N_i 为负荷点 i 的用户数; SAIFI 的单位为次/(户·年)。该指标也被定义为平均停电次数(average interruption times of customer, AITC)。

2) 系统平均停电持续时间指标(SAIDI)

$$SAIDI = \frac{\text{用户停电持续时间总和}}{\text{用户总数}} = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (2)$$

式中: U_i 为负荷点 i 的年停电时间平均值; SAIDI 的单位为小时/(户·年)。该指标还被定义为平均

均停电时间(average interruption hours of customer, AIHC)。

3) 系统总电量不足指标(ENS)

$$ENS = \sum L_{ai} U_i \quad (3)$$

式中, L_{ai} 为接入负荷点 i 的负荷平均值。

4) 电能质量指标(VOL)

$$VOL = \sum_{i=1}^K \frac{(V_i - V_{\min})(V_{\max} - V_i) |P_i|}{(V_r - V_{\min})(V_{\max} - V_r) \sum_{j=1}^K |P_j|} \quad (4)$$

式中: $(V_r - V_{\min})(V_{\max} - V_r) \sum |P_j|$ 表示系统中各个节点在额定电压下的总体电压水平; K 为主动配电网中的节点总数; V_i 为节点 i 的电压幅值; $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$ 和 V_r 分别为节点电压上、下限值和额定值; P_i 为节点 i 注入功率; P_j 为节点 j 注入功率。当电压水平越优时, VOL 会越高; 当节点电压是额定值时, 该指标值为最大值为 1^[3]。

1.2 针对分布式电源的指标

1) D_{SAIDI} 为 DG 对 SAIDI 的贡献系数, 是 DG 并网后 SAIDI 的减少量与 DG 容量之比, 计算方法为

$$D_{SAIDI} = \frac{SAIDI_0 - SAIDI_1}{P_{DG}} \quad (5)$$

式中: $SAIDI_0$ 代表 DG 并网前的系统停电时间平均值; $SAIDI_1$ 代表 DG 并网后的系统停电时间平均值; P_{DG} 是网络中各个分布式电源的额定容量。

(2) DG 对 SAIFI 的贡献系数 D_{SAIFI} , 是 DG 并网后配电网 SAIFI 的削减值与 DG 容量的比值。计算公式为

$$D_{SAIFI} = \frac{SAIFI_0 - SAIFI_1}{P_{DG}} \quad (6)$$

式中, $SAIFI_0$ 和 $SAIFI_1$ 分别代表 DG 并网前后的系统平均停电频率。

3) 孤岛电力不足期望

$$EDNSI = \sum (P(t)C(t)) \quad (7)$$

式中: $C(t)$ 为孤岛运行 t 时刻负荷削减量; $P(t)$ 为此刻该事件发生的概率。其中分布式电源出力 and 负荷削减特性均对 $C(t)$ 的值有一定影响。

2 序贯蒙特卡洛仿真

序贯蒙特卡洛模拟方法是在固定时段内, 按照时间顺序, 通过抽样模拟元件的状态转移过程, 最终

获取系统状态转移的虚拟过程^[6]。

为简化计算,对于系统中的元件,只考虑正常运行和故障停运两种状态。抽样的元件考虑了风机、光伏、蓄电池以及线路。一般来说,元件的正常状态持续时间和故障修复时间都服从指数分布,其概率密度函数为

$$f(t)=\lambda e^{-\lambda t} \tag{8}$$

$$g(t)=\mu e^{-\mu t} \tag{9}$$

式中: λ 为失效率; μ 为修复率; $f(t)$ 为 t 时刻发生故障的概率; $g(t)$ 为 t 时刻被修复完成的概率。

对概率密度函数求积分得到概率与时间的关系后,通过产生 $[0,1]$ 之间的随机数,运用概率密度函数的反函数来确定系统元件的具体工作状态,用于抽样的反函数公式为

$$T_{TF}=-\frac{1}{\lambda}\ln R_1 \tag{10}$$

$$T_{TR}=-\frac{1}{\mu}\ln R_2 \tag{11}$$

式中, R_1 、 R_2 为 $[0,1]$ 间均匀分布的随机数。对无故障工作时间 T_{TF} 和失效时间 T_{TR} 进行图1所示的状态持续时间抽样。

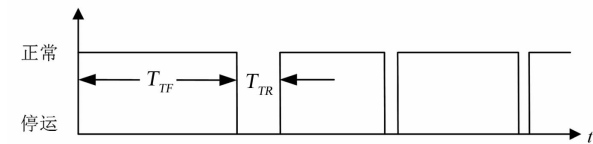


图1 故障与修复状态抽样

通过序贯蒙特卡洛模拟抽样得到各个元件的运行状态后,便可获得整个系统的运行状态,进而对系统的可靠性进行评估。

3 可靠性评估流程

3.1 网络类型分类

在蒙特卡洛仿真过程中,部分线路或者分布式电源可能发生故障,使得配电网由一个网络裂解成多个网络,形成不同类型的网络区域。所以在进行潮流计算之前,应先对网络区域类型进行分类。网络区域类型可分为3类:第1类为网络中含有电源节点(类型1);第2类为网络中不含有电源节点,但含有PV节点(类型2);第3类为网络中既不含有电源节点,又不含有PV节点(类型3)。

第1类网络可直接按照第3.2节所述的改进的

前推回代潮流计算方法进行计算。第3类网络无电源,不需要进行潮流计算。第2类网络需要对参考平衡节点和部分线路进行处理。由于第2类网络中没有电源点,故需要选择一个PV节点作为参考平衡节点,这里以PV节点编号最小的一个节点作为参考平衡节点。当网络正常时,某一线路的始节点和末节点是相对于给定电流正方向而言的,这样便于前推回代潮流计算时确定迭代方向。因此当参考平衡节点改变之后,需要调整部分线路的节点编号。如图2所示,如果电源点0节点发生故障,则该网络将节点6定为参考平衡节点,部分线路始末节点调整如表1所示。因此,对于第2类网络,需要先选定新的参考平衡节点,调整线路的始末节点,然后才可根据第3.2节所述的改进的前推回代潮流计算方法进行潮流计算。

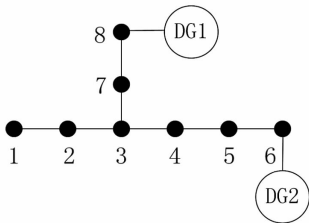


图2 节点编号调整

表1 故障前后线路始节点与末节点的改变

线路 编号	故障前		故障后	
	始节点	末节点	始节点	末节点
2	1	2	2	1
3	2	3	3	2
4	3	4	4	3
5	4	5	5	4
6	5	6	6	5

3.2 潮流计算

分布式电源接入配电网,给配电网的功率损耗、电压分布和潮流计算带来了巨大的影响。当分布式电源接入配电网后,潮流的流向也会发生变化,不仅仅是从变电站母线流向负荷的单一方向,也可能会出现回流现象,其电压变化更加复杂,因此有必要对网络中的潮流分布进行进一步分析。

这里将风力发电机和光伏电池等效为PV节点处理;蓄电池等效为PV节点;负荷等效为PQ节点。采用改进的前推回代潮流计算方法,通过无功修正,

将有分布式电源接入的 PV 节点转化为 PQ 节点进行计算^[8]。其计算方法如下：

- 1)形成 PV 型分布式电源节点的节点电抗矩阵,并给定无功初始值,将其转化为 PQ 型节点进行计算。
- 2)从线路末端开始前推计算系统各个支路的损耗和传输功率,直至前推到始端电源节点。
- 3)从始端电源节点开始,通过已知首段电压和前推得到的功率,回代计算支路电压降和支路末端电压,直至回代到网络线路最末端。
- 4)判断收敛情况。对于 PQ 型节点,连续两次迭代的电压幅值之差小于或等于给定收敛精度即达到收敛。对于 PV 型节点,本次迭代电压幅值与该 PV 节点原给定电压幅值之差小于或等于预设精度即为收敛。若收敛,继续下一步;否则,则转至步骤 2)。
- 5)输出潮流计算结果,计算结束。

3.3 潮流平衡调整策略

在潮流计算收敛的前提下,系统可能出现电能富余或者电能缺供的情况,针对不同的情况,需要对蓄电池的出力、风力发电机和光伏系统的出力以及负荷供给进行调整,以使得系统潮流平衡。不同的网络类型有不同的调整策略。类型 3 中既没有电源节点也没有 PV 节点,故无需进行调整。类型 1 和类型 2 的潮流平衡调整策略如图 3 和图 4 所示。

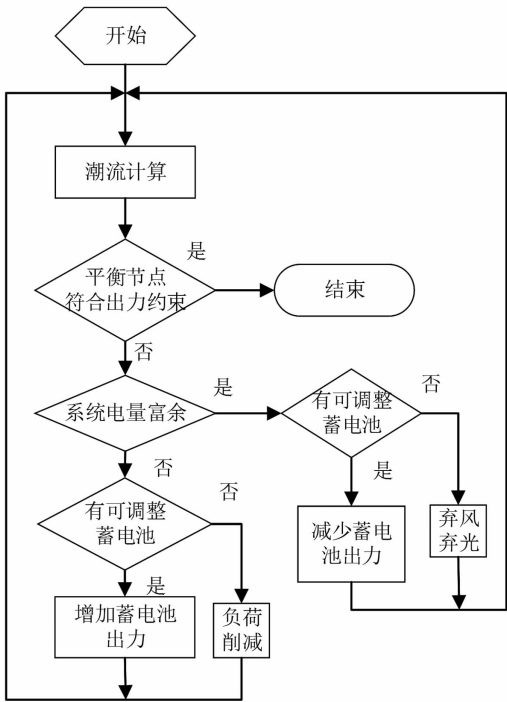


图 3 潮流平衡调整(类型 1)

之后检验蓄电池荷电状态约束并重新进行潮流计算,直到电源点的出力符合其出力限制或者所有蓄电池都达到调整下限。当第 2 类网络(不含电源点,但含有 PV 节点)系统电量不足时,逐步增加平衡节点之外所有蓄电池出力,最后才调整平衡节点上蓄电池的出力;同样,当系统电量富余时,逐步减

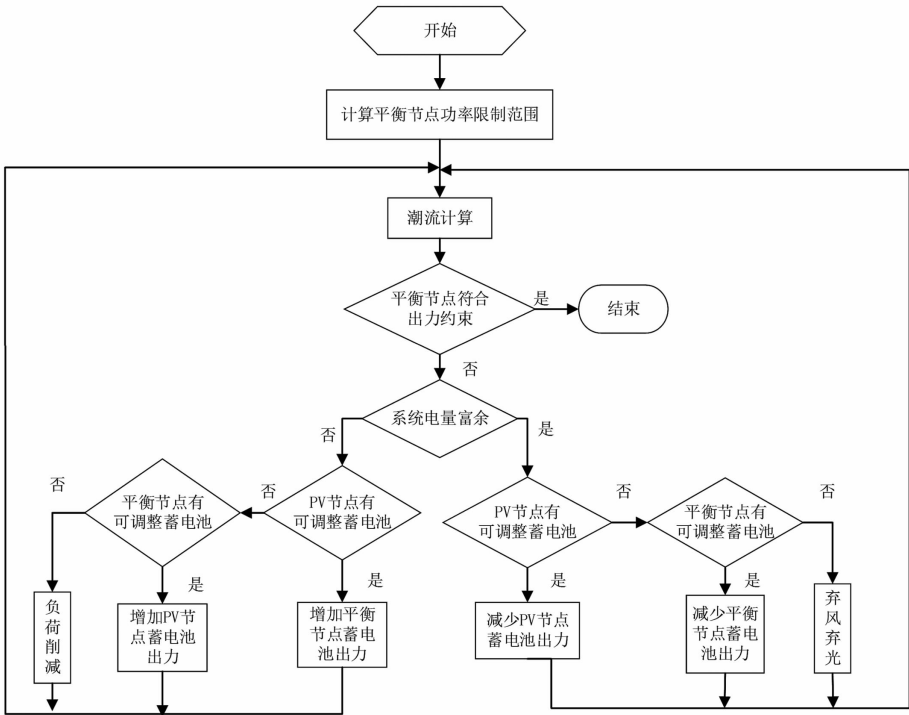


图 4 潮流平衡调整(类型 2)

小平衡节点之外蓄电池的出力,最后才调整平衡节点上蓄电池的出力,每次调整之后检验蓄电池荷电状态约束并重新进行潮流计算,直到平衡节点的出力符合平衡节点出力限制或者所有蓄电池都达到调整极限。

2) 负荷削减

当系统电力不足,而所有的蓄电池都达到了最大出力时,则需要对负荷进行削减。逐步削减负荷,每次调整之后重新进行潮流计算,直到平衡节点符合出力约束。

3) 弃风弃光

当系统电力富余,而所有的蓄电池都达到了最小出力时,则需要减少风力发电机和光伏系统的出力。对于第 1 类网络(含电源点),应逐步减小所有风力发电机和光伏系统的出力,每次调整后需重新进行潮流计算,直到平衡节点的出力符合出力限制;对于第 2 类网络(不含电源点,但含有 PV 节点),先减小平衡节点之外的所有风力发电机和光伏系统的出力,最后才调整平衡节点上的风力发电机和光伏系统的出力,每次调整后都应重新进行潮流计算,直到平衡节点的出力符合出力限制。

3.4 可靠性评估步骤

1) 给定初始网络结构、分布式电源安装位置及装机容量、负荷需求量以及线路与分布式电源的故障率、修复率。

2) 逐个按时刻进行蒙特卡洛仿真,得到每个时刻的网络结构。

3) 对每个时刻的网络进行分析,判断网络断裂成的网络个数,并根据网络类型对网络进行潮流分析。若潮流不平衡,则需根据潮流不平衡调整策略进行调整。

4) 根据潮流计算的结果统计计算可靠性指标。

5) 基于 TOPSIS 法和本征向量法计算可靠性综合评估值,再根据综合评估值来评价系统的可靠性高低。

4 算例分析

为验证所提出可靠性评估方法的有效性,以 IEEE 33 节点为例,对 9 个方案进行了可靠性评估。

方案 1 至方案 9 的网络结构和线路参数均参照 IEEE 33 节点系统,PQ 节点的用户数均为 10,其他

表 2 分布式电源参数				
方案	节点 编号	光伏板 面积 /m ²	风机额定 功率 /kW	蓄电池容量 /kWh
方案 1	6	400	200	500
	13		300	100
	24	500	200	200
	30	200	220	300
	合计	1100	920	1100
方案 2	6	200	500	200
	13			180
	24	400	300	150
	30	300	320	250
	合计	900	1120	780
方案 3	6	200	100	50
	13		150	100
	24	250	110	150
	30	100	110	1000
	合计	550	470	1300
方案 4	6	800	400	1 000
	13		600	200
	24	1000	400	600
	30	400	440	400
	合计	2200	1840	2 200
方案 5	7	400	200	500
	30	500	300	100
	15	200	200	200
	22		220	300
	合计	1100	920	1100
方案 6	3	400	200	500
	25	500	300	100
	10	200	200	200
	16		220	300
	合计	1100	920	1100
方案 7	6	800	200	500
	13		300	100
	24	1000	200	200
	30	400	220	300
	合计	2200	920	1100
方案 8	6	400	400	500
	13		600	100
	24	500	400	200
	30	200	440	300
	合计	1100	1840	1100
方案 9	6	400	200	1000
	13		300	200
	24	500	200	400
	30	200	220	600
	合计	1100	920	2200

节点不连接用户。9个方案的分布式电源参数如表2所示。电压上限设置为1.05 p. u.,电压下限设置为0.95 p. u.,线路传输功率限制为7000 kW,线路故障率为0.001,修复率为0.6。蓄电池的初始荷电状态为1。蒙特卡洛总仿真时长设置为8760 h,仿真10次。统计9个方案10次的仿真数据,可靠性综合评估指标如图5所示。

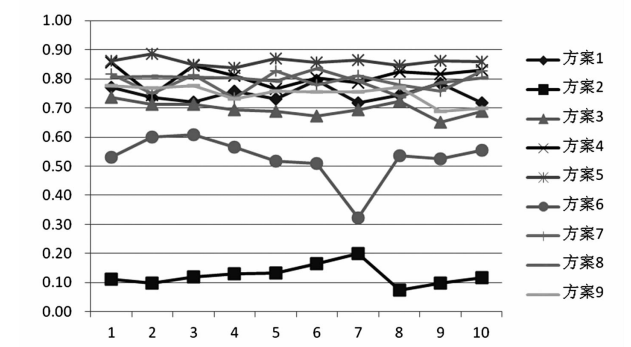


图5 可靠性综合评估指标

方案1和方案2的风、光、储的接入位置和装机容量不相同,方案1和方案5、方案6的风、光、储的接入位置不同,但是装机容量相同。在10次试验中,这4个方案的可靠性差异较大,可靠性从大到小排列为方案5、方案1、方案6、方案2,可见,合理设置风、光、储的接入位置和装机容量对于系统的可靠性具有重要意义。

方案3、方案4与方案1的风、光、储的接入位置相同,但方案3的装机容量是方案1的0.5倍,方案4的装机容量是方案1的2倍。在10次试验中,这3个方案可靠性从大到小排列为方案4、方案1、方案3,可见,当风、光、储的接入位置一致时,在一定范围内装机容量越大,系统的可靠性越高。

方案1、方案7、方案8和方案9中,风、光、储的接入位置相同,不同之处在于,方案7光伏系统的装机容量是方案的2倍,方案8风力发电机的装机容量是方案1的2倍,方案9蓄电池的容量是方案1的2倍。通过对比10次试验的结果,4个方案的可靠性相差不大,但方案7和方案8可靠性会略微大于方案1和方案9。综上所述,在一定程度上,风、光、储的装机容量越大,系统可靠性越高。合理选择

风、光、储的接入位置可以大大提高系统的可靠性。

5 结 语

为了综合评估主动配电网的可靠性,运用了两类可靠性指标进行评估,即传统可靠性指标和针对分布式电源的可靠性指标。运用序贯蒙特卡洛模拟法确定系统运行状态,从而进一步将网络类型分成3类。应用改进的前退回代潮流计算方法计算网络潮流,并对潮流不平衡进行调整,最终计算系统的综合可靠性指标。随着主动配电网技术的逐步发展,配电网结构将更加复杂,用户侧作为独立的利益主体将更多地参与到配网中来,考虑源—网—荷三方互动的主动配电网可靠性评估是未来重要的研究方向。

参考文献

[1] 盖佳麒,张焕.含分布式电源的配电网可靠性评估综述[J].广东电力,2013,26(5):1-7.

[2] 王源山.考虑分布式电源的配电系统可靠性研究[D].天津:天津大学,2010.

[3] 陈云云.考虑分布式发电的配电系统可靠性评估[D].天津:天津大学,2007.

[4] 潘力强,盛鸽,何红斌,等.基于TOPSIS法的220kV电网投资能力评价[J].现代经济信息,2016(7):380-383.

[5] 蒲天骄,陈乃仕,葛贤军,等.电力电量平衡评价指标体系及其综合评估方法研究[J].电网技术,2015,39(1):250-256.

[6] 张巍峰.基于蒙特卡洛法的电力系统可靠性评估算法研究[D].天津:天津大学,2014.

[7] 梁惠施,程林,刘思革.基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估[J].电网技术,2011,35(10):76-81.

[8] 张立梅,唐巍.计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J].电工技术学报,2010,25(8):123-13.

作者简介:

刘旭娜(1986),博士、高级工程师,主要研究方向为智能供配电系统、配电网规划与电能质量评估。

(收稿日期:2018-11-22)

基于云计算平台实现电网短期负荷预测算法的研究

王 帅,赵建平,王志远,谢 广
(国网乌鲁木齐供电公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要:短期电网负荷预测在任何电力系统的运行决策中都起着重要作用。由于负荷短期预测的实时性要求与在大型数据集上执行复杂的计算过程所需的高计算能力相冲突,提出了基于支持向量回归的短期电网负荷预测算法,并基于云计算平台实现了该算法。将所提预测算法分别在云计算平台和单机计算平台上进行对比实验,结果表明基于云计算平台的实现有效提高了算法执行效率。

关键词:负荷预测;SVR;云计算;Azure ML

中图分类号:TM769 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0029-04

Research on Short-term Load Forecasting Algorithm Based on Cloud Computing Platform

Wang Shuai, Zhao Jianping, Wang Zhiyuan, Xie Guang
(State Grid Urumqi Power Supply Company, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Short-term grid load forecasting plays an important role in the operational decision for any power system. Because the real-time requirements for short-term load forecasting conflict with the high computing capability which is required to perform complex processes on large data sets, a short-term grid load forecasting algorithm based on support vector regression is proposed, which is implemented based on cloud computing platform. The proposed forecasting algorithm is compared between the cloud computing platform and the stand-alone computing platform, and the results show that the implementation based on cloud computing platform effectively improves the execution efficiency of the algorithm.

Key words: load forecasting; SVR; cloud computing; Azure ML

0 引 言

电力工业的根本目标是通过科学的规划最大限度地提高发电和用电效率,提高电力系统运行的经济性。而电力负荷预测一直是电力系统有效规划和经济运行的重要组成部分。

短期电网负荷预测是电力系统运行决策的关键,对电力系统的机组组合、减少发电备用、提高经济调度、保持系统可靠性以及维护调度都有重要意义^[1-2]。近年来,准确的短期电网负荷预测在电力市场管制中得到了更大的重视和面临更大的挑战。

短期电网负荷预测算法需要处理从一个小时到几天的负载预测。由于短期负载具有极大的随机性,因此短期电网负荷预测的复杂性对电力运营者

是一个极大挑战。在过去的几十年里,人们提出了许多预测模型。这些预测模型可以分为传统模型或基于机器学习的模型。前者包括时间序列预测器,如自回归移动平均外生变量模型^[3]。这些传统模型是基于线性回归模型,不能准确代表复杂负载的非线性特征^[4]。不同的机器学习技术也被用于短期电网负荷预测,如人工神经网络(artificial neural network, ANN)^[5]、径向基函数(radial basis function, RBF)^[6]、模糊神经模型^[7]和支持向量回归^[8]。

预测过程依赖于对某一国家或地区电力需求历史数据的分析,还可以考虑许多其他因素,如天气预报和商业计划。因此,需要整个历史数据来训练预测模型,但是这样的方法其缺点是,如果考虑到新的信息则所有参数都可能需要重新训练。此外,这种庞大的数据量和预期的复杂预测过程导致需要大量

的计算能力。研究人员试图找到近似方法来最小化这一数据量,并将所需的计算能力降到最低。这些研究试图尽量减少数据采样量等。许多方法解决了这些回溯问题,其中一个采用了中的局部预测器^[9-10]。

经济约束在任何算法研究中都起着主要作用。云计算的出现解决了研究人员和开发人员面临的许多经济问题。在云计算技术之前,超级计算机是获得巨大计算能力的唯一合适选择,显然这是一个非常昂贵的选择。有许多计算系统可以提供巨大的计算能力,如分布式系统、网格计算、互联网计算以及量子计算等,但云计算技术是最具性价比的选择,获得了广泛的商业应用。为此,一些研究试图借助云计算技术为短期负荷预测提供足够的计算能力^[11-13]。

1 基于支持向量回归的短期负荷预测算法

一般来说,电力负荷由不同的消耗单元组成。各种因素都影响着电力负荷的变化,如天气、重大事件、经济因素和随机因素。短期负荷预测可以被认为是一个多变量预测问题。它可以作为回归问题的函数来求解。次日负荷为回归模型的输出,历史负荷数据及其影响因素为回归模型的输入。历史数据库提供训练数据。该回归问题的最终目标是从历史负荷数据及其影响因素中找到一个具有良好泛化能力的预测负荷映射函数。历史负荷数据被分为两个不同的数据集:一个是训练数据集用来训练回归模型;另一个是测试数据集用来评估训练后的回归模型^[14]。

基于统计学习理论提出的支持向量回归(support vector regression,SVR)^[15]已被研究作为一种有前景的电力负荷预测方法。其优势主要来自于采用结构风险最小化原理,并作为经验风险最小化原则的替代方案,它可以通过求解二次问题来获得最优的全局解。

SVR 的执行有两个主要特征:二次规划和核函数。二次规划问题将用线性约束求解得到 SVR 的参数。核函数的灵活性使该技术能够搜索宽范围的解空间。SVR 的主要目标是通过非线性映射将数据 x 映射到高维特征空间,并在该特征空间中执行线性回归^[16-17]:

$$f(x) = \langle w, x \rangle + b \tag{1}$$

式中: $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示点积; w 包含必须从数据中估计的系数; b 是一个实常数。使用 Vapnik 的 ε -不敏感损失函数^[18],将整体优化为

$$\min_{w,b,\xi,\xi^*} \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \tag{2}$$

约束条件为

$$\begin{cases} y_i - (w^T \phi(x_i) + b) \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ (w^T \phi(x_i) + b) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0, i = 1, \dots, N \end{cases} \tag{3}$$

式中: x_i 通过函数 ϕ 映射到更高维空间; ε 是实常数; ξ_i 和 ξ_i^* 是受 ε 不敏感区域影响的松弛变量; C 为正则化参数,其确定 $f(x)$ 的平坦度和训练误差之间的折衷。

引入拉格朗日乘数 α_i 和 α_i^* ,这两个参数满足 $\alpha_i, \alpha_i^* = 0$ 和 $\alpha_i, \alpha_i^* = 0 (i = 1, \dots, N)$ 。并且根据 Karush - Kuhn - Tucker 最优性条件^[18],SVR 训练过程相当于求解凸二次曲线问题:

$$\min_{\alpha, \alpha^*} \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_i, x_j) + \varepsilon \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) - \sum_{i=1}^N y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \tag{4}$$

约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C \\ \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, i = 1, \dots, N \end{cases} \tag{5}$$

输出是一个独特的全局优化结果,其形式如下:

$$\hat{y} = \hat{f}(x) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) Q(x_i, x) + b \tag{6}$$

式中, $Q(x_i, x)$ 是核函数。在 SVR 中采用核函数,所有必要的计算可以直接在输入空间中计算。核函数存在各种各样的内核,如线性、双曲正切、高斯径向基函数、多项式等^[19]。在这里,使用常用的 RBF 内核:

$$Q(x_i, x) = e^{-\gamma \|x_i - x\|^2} \tag{7}$$

SVR 的参数 C, γ 和 ε 在 SVR 的性能中起着至关重要的作用。因此,选择这些参数的正确值可以最大限度地减少预测误差。基于核的 SVRs 需要计算数据集中每个点之间的距离函数

$$O(n_{\text{features}} * n_{\text{observations}}^2) \tag{8}$$

基于 SVR 解决短期电网负荷预测问题可以归纳为以下步骤:

- 1) 加载历史数据并将其分为训练集和验证集;
- 2) 准确确定 SVR 的参数;

- 3)使用定义的参数训练 SVR 以获得支持向量
和相应的系数;
- 4) 利用式(6)得到预测的负载。

2 实验验证

为检验云计算平台在电力负荷预测领域的影
响,实验旨在测试两点:一是使用 Azure ML 实现负
荷预测技术的准确性;二是测试执行时间的改进。

2.1 数据集

该数据集收集了从 2016 年 1 月至 2017 年 12
月的 0.5 h 电力负荷、2016 年至 2017 年的日平均温
度以及 2016 年至 2017 年的假期信息。目标是预测
2018 年 1 月的每日最大负荷,并用 2018 年 1 月的负
荷实际值验证计算预测值。

2.2 实验平台

设计实验的实现有两个选择:本地实现和基于
云的实现。对于本地实现,可使用台式计算机及使
用 MATLAB 软件实现所提出的算法。台式计算机
具有以下规格:Microsoft Windows 10, Intel Core i7
2.7 GHz, RAM 16 GB。对于基于云的实现,则用 Az-
ure ML^[20]。

2.3 性能指标

实验考虑了两个主要的性能指标:第 1 个也是
最重要的一个是执行时间($T_{Execution}$);第 2 个是预测
准确性。所有实验将使用 4 个度量来评估预测准确
度:平均绝对百分比误差(MAPE)、最大误差幅度
(MAX)、平均绝对误差(MAE)和归一化均方误差
(NMSE)。这些值由式(9)至式(13)定义:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|A_i - P_i|}{A_i} \times 100\% \tag{9}$$

$$MAX = \max(|A_i - P_i|) \tag{10}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_i - P_i| \tag{11}$$

$$\Delta^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2 \tag{12}$$

$$NMSE = \frac{1}{\Delta^2 N} \sum_{i=1}^N (A_i - P_i)^2 \tag{13}$$

式中, A_i 、 P_i 、 $\bar{A}$ 和 N 分别为实际值、预测值、实际值
的平均值和测试数据集大小。

2.4 结果与讨论

实验包括了 4 种不同的实验方案,用以比较和
评估所提出的基于 SVR 算法的短期电网负荷模型

在云计算平台和单机计算平台上的性能差异。

所有这些实验方案的目标是使用训练集训练上
面所述的预测模型,再使用这个预测模型来预测
2018 年 1 月的 31 天内的最大日负荷,并与实际负
荷进行比较。所提出的各实验方案的训练数据有所
不同,如表 1 所示。

表 1 实验方案的数据集

实验 方案	训练数据集		测试数据	
	数据设定标准	数量	数据设定标准	数量
1	2016 至 2017 年的 每日负荷	723	2018 年 1 月 实际负荷值	31
2	2016 至 2017 年的 每日负荷和温度	723	2018 年 1 月 实际负荷值	31
3	2016 至 2017 年的 冬季(10、11、12、 1、2、3 月)的每日 负荷	357	2018 年 1 月 实际负荷值	31
4	2016 至 2017 年的 冬季(10、11、12、 1、2、3 月)的负荷 和温度	357	2018 年 1 月 实际负荷值	31

4 种实验方案的执行结果如表 2、图 1 和图 2 所
示。结果表明,使用云计算平台的执行时间远远少
于使用基于本地机器的单机计算平台的执行时间。
特别是在训练数据相对较大的在实验方案 2 中,云
计算平台与单机计算平台的执行时间相比,时间执
行的改进在 10 倍以上。值得指出的是,在云计算平
台上进行的第 2 次实验时比第 1 次运行更快,例如,
实验方案 2 的第 2 次执行时间等于 9 s,远低于第 1
次的 72 s。此外,从预测精度来看,两者几乎相同,在
实验方案 4 的情况下实现了最佳预测精度为 2.04%。

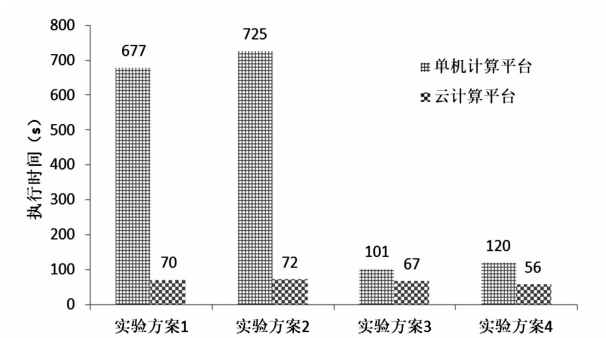


图 1 单机平台和云平台执行时间对比

3 结 论

前面提出了一种基于支持向量回归预测(SVR)

表 2 实验结果

实验 方案	$T_{\text{Execution}}/s$		MAPE %	MAE	MAX	NMSE	SVR 参数	
	单机	云					γ	C
1	677	70	2.21	16.45	42.8	0.346	0.5	1
2	725	72	2.41	17.65	60.6	0.421	0.25	2
3	101	67	2.08	15.55	36.35	0.295	0.25	2
4	120	56	2.04	15.2	40.4	0.297	0.125	2

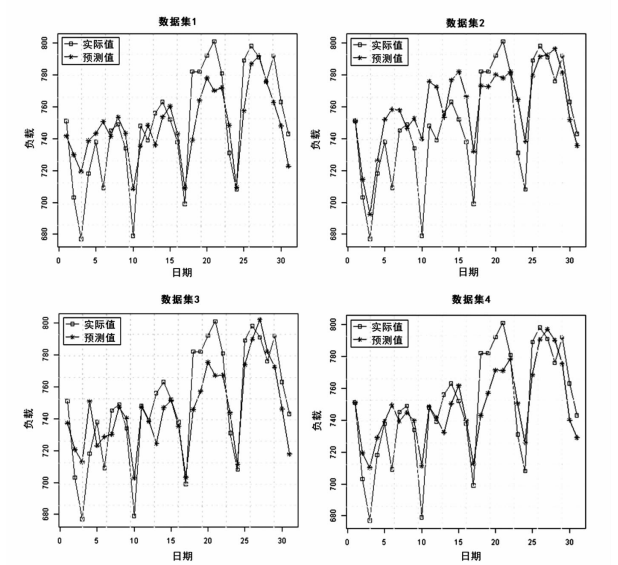


图 2 各个实验方案下预测值和实际值的偏差

算法短期电网负荷模型,并通过实验分别在云计算平台和单机计算平台上实现了该模型。在两个平台的对比实验中,选择执行时间和预测精度作为性能指标。对于所使用的实验数据集,单机计算平台和云计算平台实现的算法预测精度是相同的;但是,在云计算平台实现的算法执行时间显著减小。一般来说,SVR 并不推荐用于大型数据集,因为它的计算成本很高,而前面采用云计算平台体现了较好的计算效率,因此所进行的实验结果可为相关研究提供借鉴。

参考文献

[1] 王雁凌,吴梦凯. 经济新常态下基于偏最小二乘回归的中长期负荷预测模型[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):133-139.

[2] 王萍,李磊,胡聪,等. 云计算环境下智能电网短期负荷预测方法[J]. 科学技术与工程,2018,18(7):153-158.

[3] 苏小林,刘孝杰,阎晓霞,等. 计及需求响应的主动配电网短期负荷预测[J]. 电力系统自动化,2018,42(10):60-66.

[4] 赵芝璞,高超,沈艳霞,等. 基于关联模糊神经网络和

改进型蜂群算法的负荷预测方法[J]. 中国电力,2018,51(2):54-60.

[5] 吴润泽,包正睿,宋雪莹,等. 基于深度学习的电网短期负荷预测方法研究[J]. 现代电力,2018,35(2):43-48.

[6] 林涛,董栅,秦冬阳,等. 基于支持向量回归的风电场短期功率预测[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2017,36(4):95-99.

[7] 吴润泽,包正睿,王文韬,等. Hadoop 架构下基于模式匹配的短期电力负荷预测方法[J]. 电工技术学报,2018,33(7):1542-1551.

[8] 张智晟,于道林. 考虑需求响应综合影响因素的 RBF-NN 短期负荷预测模型[J]. 中国电机工程学报,2018,38(6):1631-1638.

[9] 韩中合,李秋菊,苑一鸣,等. 基于相关向量机的短期风速预测模型[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(3):38-42.

[10] 汤强,谢明中,罗元盛. 基于 SVR 的用电负荷特征三维回归模型[J]. 计算机工程,2017,43(9):300-303.

[11] 李滨,黄佳,吴茵,等. 基于分形特性修正气象相似日的节假日短期负荷预测方法[J]. 电网技术,2017,41(6):1949-1955.

[12] 肖白,刘庆永,房龙江,等. 基于模糊粗糙集理论和时空信息的空间负荷预测[J]. 电力建设,2017,38(1):58-67.

[13] 苏学能,刘天琪,曹鸿谦,等. 基于 Hadoop 架构的多重分布式 BP 神经网络的短期负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(17):4966-4973.

[14] 钱志. 基于改进型 SVR 的电网短期负荷预测[J]. 中国电力,2016,49(8):54-58.

[15] 马天男,牛东晓,黄雅莉,等. 基于 Spark 平台和多变量 L₂-Boosting 回归模型的分布式能源系统短期负荷预测[J]. 电网技术,2016,40(6):1642-1649.

[16] 孟安波,胡函武,刘向东. 基于纵横交叉算法优化神经网络的负荷预测模型[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(7):102-106.

[17] 罗滇生,王新坤. 基于云计算的智能电网负荷预测平台架构研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(2):101-108.

(下转第 56 页)

地铁牵引供电系统接入对电网电能质量影响分析

王宇飞¹, 徐琳²

(1. 国网四川省电力公司客户服务中心, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:首先介绍了某地铁牵引供电系统的结构、特点及牵引供电方式,对电力机车、牵引网、电缆构成的牵引供电系统进行详细地仿真建模,分析计算了各种运行工况下牵引供电系统的谐波电流水平。最后针对不同系统阻抗下 110 kV 电缆可能引发谐波电流放大的风险进行了评估。

关键词:电能质量评估; 地铁牵引供电系统; 谐波; 谐波电流放大

中图分类号:TM922.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0033-04

Analysis on Integration Effect of Metro Traction Power Supply System on Grid Power Quality

Wang Yufei¹, Xu Lin²

(1. State Grid Sichuan Customer Service Center, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Firstly, the structure, characteristics and traction power supply mode of a traction power supply system are introduced, and then the detailed simulation modeling of the traction power supply system is carried out which is composed of electric locomotive, traction network and cable. The injection of harmonic current component is analyzed under different operating conditions. Finally, the risk of harmonic current amplification by the 110 kV cables is assessed under different system impedance.

Key words: power quality assessment; metro traction power supply system; harmonic; harmonic current amplification

0 引言

地铁牵引供电系统大多由电力机车、牵引网、电缆等几部分组成,由于该系统采用直流牵引方式,具有非线性强、电压波动大、电缆引发的充电无功功率大等诸多特征,其接入对城市电网电能质量以及供电可靠性、稳定性都带来了较大的影响^[1-4]。为了防患于未然,在轨道交通接入前进行电能质量预评估并提出相应的预防性措施,可提高电网的电能质量及供电可靠性和稳定性,消除轨道交通接入对电网造成事故的潜在隐患^[5-8]。

首先介绍了某地铁主变电所的接入系统方案以及负荷情况。基于 PSCAD 对电力机车、牵引网、电缆构成的牵引供电系统进行详细地仿真建模,然后

分析了各种运行工况下地铁牵引系统的谐波电流水平。最后针对不同系统阻抗下 110 kV 电缆可能引发谐波电流放大的风险进行了评估,为轨道交通接入电网提供强有力的技术保障。

1 牵引供电系统仿真建模

1.1 牵引供电方式

研究的牵引供电系统采用单相工频 25 kV 交流制、带回流线的直接供电方式,如图 1 所示。

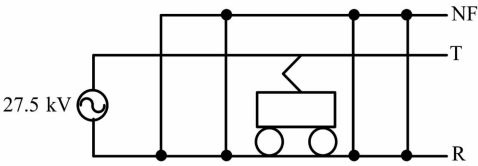


图1 带回流线的直接供电方式

该供电方式在接触网同高度的外侧增设了一条回流线,减轻了接触网对邻近通信线路的干扰,结构简单、维护量小、供电可靠性高。

地铁主变电所牵引部分采用两台三相 V/V 接线牵引变压器,一主一备。其中每台 V/V 变压器由两台单相变压器组成,分别接入两个不同的线电压,其接线形式如图 2 所示。

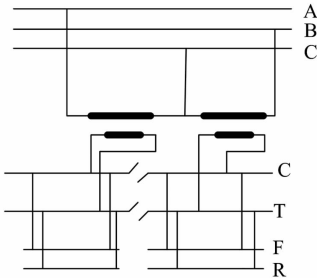


图 2 V/V 变压器接线形式

1.2 交直交型电力机车模型

表 1 为所选用的 A + 型车的主要特征参数,其中列车最高运行速度为 140 km/h,其载荷和重量参数如表 2 所示,牵引特性曲线如图 3 所示。可以看出,单车最大输出功率为 7200 kW。列车的加速过程为:0 → 48 km/h 为恒牵引力加速;48 km/h → 100 km/h 为恒功率加速;100 km/h → 160 km/h 以自然特性加速,转差效率恒定。

表 1 A + 型机车的相关参数

参数名称	参数要求
列车正线最高运行速度 /(km · h ⁻¹)	140
列车起动平均加速度 /(m · s ⁻²)	(0 → 50 km/h) ≥ 1 (0 → 140 km/h) ≥ 0.5
制动平均减速度 /(m · s ⁻²)	≥ 1.0
列车紧急制动平均减速度 /(m · s ⁻²)	≥ 1.2
列车辅助用电功率/kW	600

表 2 车辆总重

载客量	单车/t			列车/t
	TC 车	M 车	Mp 车	8 辆编组
空车(AW0)	38	40	43	322
座席(AW1)	41.6	43.6	46.6	350.8
定员(AW2,4 人/m ²)	50.6	52.8	55.8	424
超员(AW3,9 人/m ²)	61.9	64.4	67.4	516.2

注:乘客人均体重按 60 kg 计,轴重 ≤ 17 t。

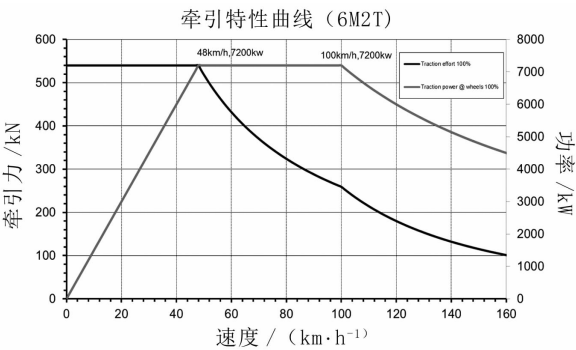


图 3 A + 型 8 辆编组机车牵引特性曲线

交直交机车的交流传动系统普遍采用“交 - 直 - 交”型主电路,主要由牵引变压器、四象限整流器、逆变器、三相异步交流电机等组成,主电路原理如图 4 所示。

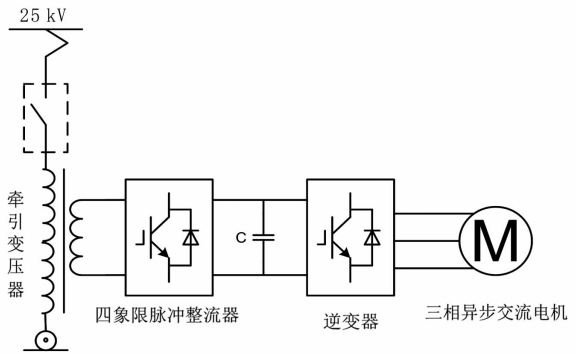


图 4 交直交机车主电路结构原理

2 牵引网仿真模型

2.1 牵引网串、并联元件

在单一频率下,牵引网输电线路可近似线性,等效为如图 5 所示的 π 型对称线性无源二端口网络电路。

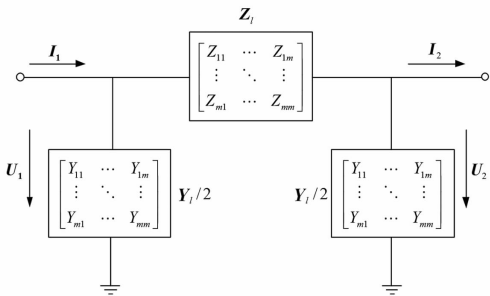


图 5 π 型等值电路

当牵引网的平行导线较多时,可对导线进行等值合并处理。建立串联阻抗元件的支路导纳矩阵为

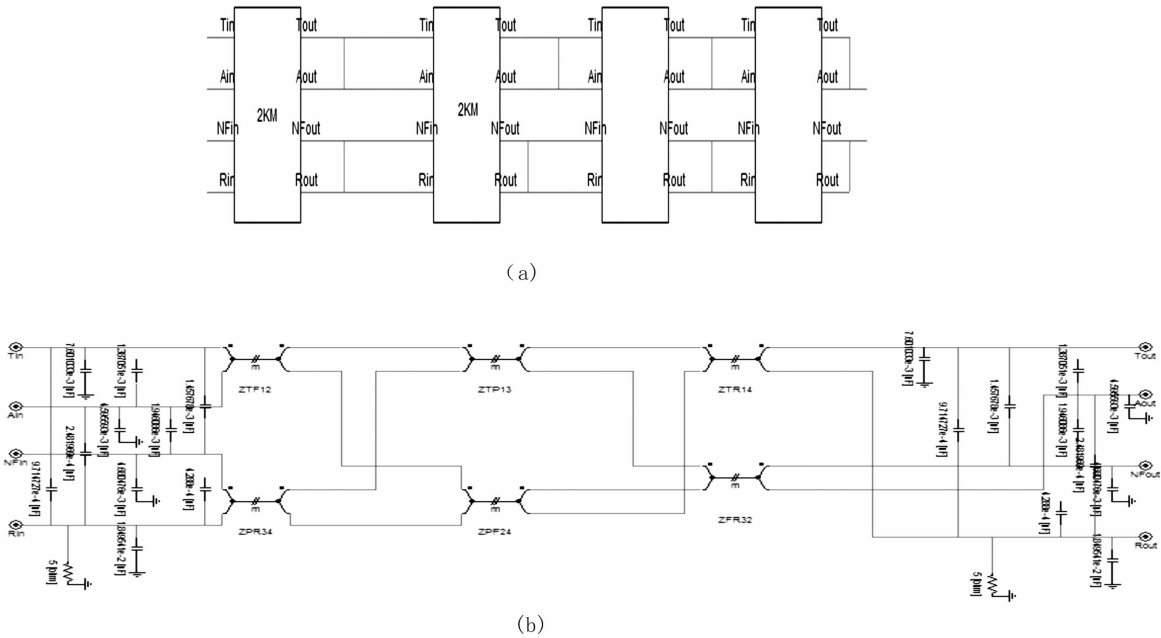


图6 电缆供电方式牵引网模块以及子模块

$$Y_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(1)

牵引网中并联元件的节点导纳矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta & -\Delta \\ 0 & 0 & -\Delta & \Delta \end{bmatrix}$$

(2)

其中 Δ 为大实数,而其他并联设备的节点导纳矩阵为

$$Y_s = \frac{1}{Z_p} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3)

2.2 牵引网简化仿真模型

复线带回流线直供方式牵引网采用8根导线等值,包括上/下行接触网(T1/T2)、上/下行钢轨(R1/R2)、上/下行加强导线(A1/A2)、上/下行回流线(NF1/NF2)。图6中搭建了基于直供带回流线供电方式的牵引网模型。

3 谐波电流水平评价

为了评估地铁牵引系统接入对区域电网的影响,下面考虑较为严重的运行工况,即考虑多车紧密

运行时注入电网的谐波水平。
设机车处于紧密运行状态,正常供电下某主变电所牵引变压器的计算负荷分别为19.57 MW和9.9 MW,因此重载8.615 km线路布置3列机车,各列车运行功率分别为7.2 MW、7.2 MW、5.2 MW;轻载5.639 km线路布置2列车,每列功率为5 MW。考虑最严重情况,有两列车分别处于牵引网上下行末端,列车在线路上分布见图7所示。

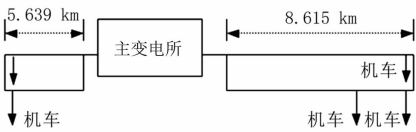


图7 牵引网中列车分布示意

图8和图9为某地铁主变电所接入电网110 kV侧三相电压和电流仿真波形以及最大相电压、电流的FFT频谱,谐波电流主要集中在1950 Hz和2050 Hz高频段,最大相1950 Hz谐波电流含量为3.63 A。

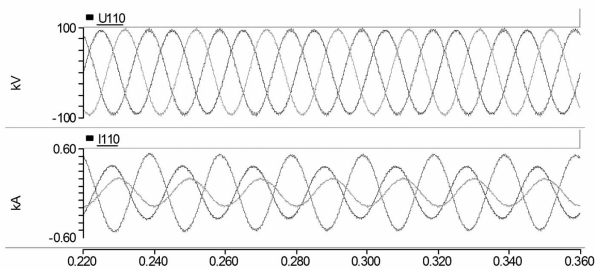


图8 多车紧密运行时110 kV 郭家堰侧电压和电流波形

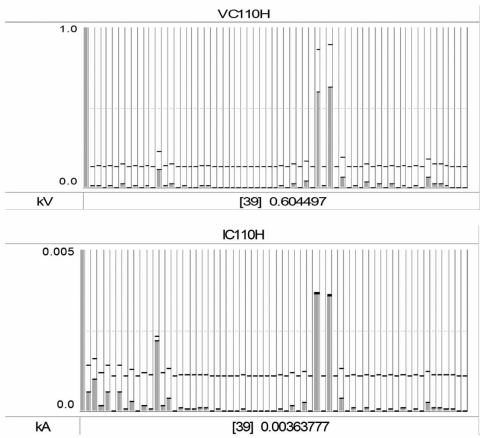


图 9 多车紧密运行时 110 kV 接入点电压和
电流 FFT 频谱

图 10 和图 11 为重载臂 V/V 变压器 27.5 kV 侧电压、电流仿真波形和 FFT 频谱,表 3 和表 4 则分别对 110 kV 接入点的电压和电流畸变情况进行了统计,可以看出,110 kV 母线各相电压总畸变率分别达到 0.97%、0.61%、1.36%,110 kV 接入点各次谐波电流也均满足国标限值要求。

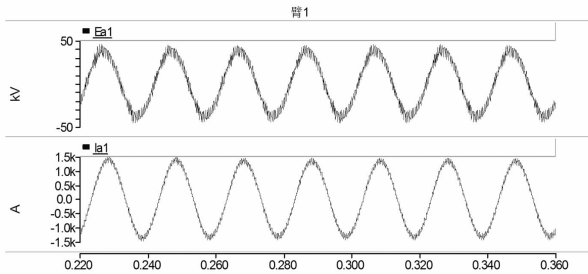


图 10 重载臂 V/V 变压器 27.5 kV 侧电压和
电流仿真波形

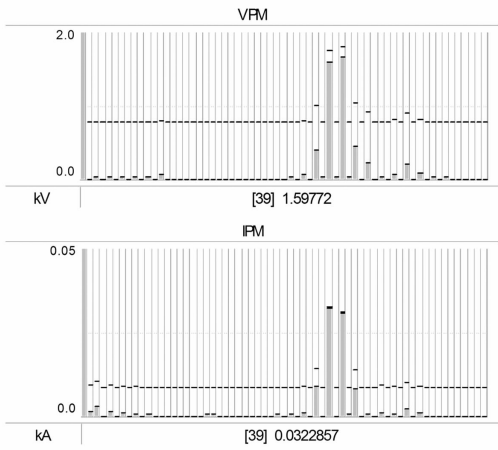


图 11 重载臂 V/V 变压器 27.5 kV 侧电压和
电流 FFT 频谱

表 3 110 kV 接入点电压畸变情况

测试参数	A 相	B 相	C 相
基波电压/kV	65.51	66.61	66.13
总畸变率/%	0.97	0.61	1.36
650 Hz/%	0.05	0.11	0.10
1950 Hz/%	0.64	0.36	0.91
2050 Hz/%	0.67	0.37	0.94

表 4 110 kV 接入点电流畸变情况

测试参数	A 相	B 相	C 相
基波电流/A	239.71	128.63	348.51
650 Hz 电流/A	0.42	1.78	2.18
1950 Hz 电流/A	2.54	1.44	3.63
2050 Hz 电流/A	2.52	1.42	3.60
总畸变率/%	1.65	2.53	1.67

4 110 kV 电缆引发谐波电流放大风险分析

当牵引系统产生的谐波电流与接入电网的 110 kV 电缆线路参数、系统阻抗共同作用时,易引发并联谐振,造成谐波电流放大,进一步增大电网侧的谐波含量。图 12 给出了牵引供电系统与电网交互的并联谐振等效电路。图中 $\dot{U}_{s,h}$ 为系统 h 次谐波电压; $\dot{Z}_{s,h}$ 对应 h 次谐波的系统阻抗; $\dot{U}_{sl,h}$ 为 PCC 点 h 次谐波电压; $\dot{Z}_{1,h}$ 和 $\dot{Z}_{c,h}$ 为 110 kV 传输电缆对应的 h 次谐波阻抗; $\dot{Z}_{L1,h}$ 和 $\dot{Z}_{L2,h}$ 为 PCC 点等效负荷与牵引系统等效 h 次谐波阻抗。分别考虑主变电所在系统运行大方式和小方式两种模式下 110 kV PCC 点 h 次谐波电流 $\dot{I}_{s,h}$ 与牵引站 h 次谐波电流 $\dot{I}_{1,h}$ 的关系,当 $\dot{I}_{s,h} > \dot{I}_{1,h}$ 时,则表明牵引系统的 h 次谐波电流经 110 kV 电缆有放大现象。

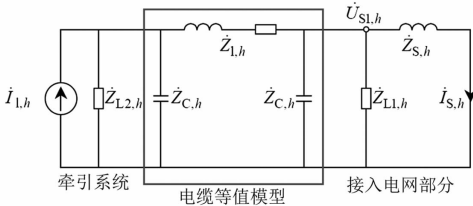


图 12 牵引供电系统与电网交互的并联谐振等效电路

图 13 则为大方式和小方式下各次谐波电流经 110 kV 电缆传输后 $\dot{I}_{s,h}/\dot{I}_{1,h}$ 传递函数的幅频特性曲
(下转第 71 页)

新电改下发电偏差最小的水电中长期调度模型研究

白智丹¹,余 熙¹,朱燕梅²,武云霞¹,黄天意¹,谢荻雅²

(1. 西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021;2. 四川大学水利水电学院,四川 成都 610065)

摘要:随着新一轮电力体制改革不断深入,流域水电调度目标已由发电量最大化转变为发电收益最大化。按照电力市场规则要求,水电商需要承担偏差电量的考核费用,因此水电商除获取更多的发电指标和更高的电价外,还应控制发电偏差,避免偏差考核。针对当前电力市场环境,构建了基于区域电力市场规则的水电中长期调度模型,并通过实例分析,对该模型的合理性和有效性进行了验证。

关键词:新电改;水电;中长期调度;偏差考核

中图分类号:TM73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0037-04

Research on Mid – long Term Dispatching Model of Hydropower Based on Minimization of Power Generation Deviation Under New Situation of Electricity System Reform

Bai Zhidan¹, Yu Xi¹, Zhu Yanmei², Wu Yunxia¹, Huang Tianyi¹, Xie Diya²

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co. ,Ltd. ,Chengdu 610021, Sichuan, China;

2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract:With the deepening of new electricity system reform, the goal of hydropower dispatching has been transformed from maximizing power generation to maximizing power generation profit. According to the requirements of electricity market rules, hydropower suppliers need to bear the assessment cost of the deviation of electricity. Therefore, in addition to obtain more power generation indicators and higher electricity prices, hydropower suppliers should also control power generation deviations and avoid deviation assessment. Based on the current electricity market environment, a hydropower mid – long term scheduling model is constructed based on regional electricity market rules. The rationality and effectiveness of the proposed model are verified by an example analysis.

Key words:new electricity system reform; hydropower; mid – long term dispatching; deviation assessment

0 引 言

在传统的水电中长期调度中,上网电价由政府定价,主要按照充分利用流域水资源的原则,以流域梯级发电量最大化为目标构建数学模型^[1-3],优化水库调度运行过程。根据新电改的要求,水电企业通过参与电力市场交易获取发电指标和电价,电量和电价均存在较大的不确定性,因此在市场环境下,水电中长期调度优化目标已经转变为发电收益最大化^[4],对此国内外学者进行了有意的探索。文献[5-7]提出了电力市场环境下梯级水电站中长期调

度与检修计划双层优化模型、中长期调度与跨价区交易组合双层优化模型,以及计及随机和风险因素的梯级水电调度交易优化模型,分别将检修计划、交易组合和电价波动性、径流随机性引入模型中,以期获得最大发电收益;文献[8]在收益最大化模型中引入了丰枯电价,对单站的优化调度进行了研究。但这些研究大都只是进行理论模型的探索,研究结果难以直接指导水电企业参与电力市场中长期交易的实践。

新电改明确要求继续有序放开发用电计划,加快推进电力市场化交易,完善直接交易机制,发电企业上网电价除政府定价的方式外,还可参与电力市

场交易,通过协商、市场竞价等方式确定。在新电改的形势下,水电发电企业不仅需要通过降低发电耗水率、实施梯级统一调度等技术手段提升自身的市场竞争力,还应采取以电力市场交易指导生产,积极调整中长期交易量价结构,开展水电联调等措施,以降低偏差考核风险。

下面以水电站中长期交易合同电量执行偏差最小为目标函数,考虑水电站运行约束及电力市场交易电量约束,构建了考虑不同交易品种的水电站中长期调度模型并求解。采用动态规划算法,以四川省某电站为例进行了研究。

1 水电中长期调度模型构建

《电力中长期交易基本规则(暂行)》(发改能源[2016]2784 号)提出:在市场中获得的中长期合同电量,在进行月度分解执行时,如超过一定比例将受到经济惩罚,中长期合同电量执行情况将影响水电企业的经济效益。在此背景下,以合同电量执行偏差最小为目标,构建水电中长期调度模型。

1.1 目标函数

水电站发电偏差最小:

$$\min \sum_{t=1}^T (A \cdot Q_t \cdot H_t \cdot \Delta t - P_t)^2 \quad (1)$$

其中,

$$P_t = m_t + f_t \quad (2)$$

$$m_t = m_{1,t} + m_{2,t} + \cdots + m_{n,t} \quad (3)$$

式中: t 为时段变量; T 为年内计算总时段数(以旬为单位),中长期合约中 $T=1,2,\cdots,36$; A 为水电站的出力系数; Q_t 为水电站第 t 时段的发电流量, m^3/s ; H_t 为水电站第 t 时段的水头, m ; Δt 为计算时段长度, s ; P_t 为合约电量, MWh ; f_t 为跨省跨区交易电量, MWh ; m_t 为省内交易电量,包括电力直接交易电量、富余电量增量交易电量、丰水期居民生活电能替代采购交易电量、发电侧合同电力转让交易电量、偏差电量调整交易电量和辅助服务交易电量等, MWh ; n 为省内电力交易品种 $m_{i,t}$ 的个数,由实际成交情况决定。

1.2 约束条件

1) 水量平衡约束

$$V_{t+1} = V_t + (q_t - Q_t - S_t) \Delta t \quad \forall t \in T \quad (4)$$

式中: V_{t+1} 为水电站第 t 时段末水库蓄水量, m^3 ; V_t

为水电站第 t 时段初水库蓄水量, m^3 ; q_t 为水电站第 t 时段入库流量, m^3/s ; S_t 为水电站第 t 时段弃水流量, m^3/s ; Δt 为计算时段长度, s 。

2) 水库蓄水量约束

$$V_t^{\min} \leq V_t \leq V_t^{\max} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

式中: $V_t^{\min}$ 为第 t 时段应保证的水库最小蓄水量, m^3 ; V_t 为第 t 时段的水库蓄水量, m^3 ; $V_t^{\max}$ 为第 t 时段允许的水库最大蓄水量, m^3 ,其通常是基于水库安全方面考虑的,如汛期防洪限制等。

3) 水库下泄流量约束

$$Q_t^{\min} \leq (Q_t + S_t) \leq Q_t^{\max} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

式中: $Q_t^{\min}$ 为第 t 时段应保证的最小下泄流量, m^3/s ; $Q_t^{\max}$ 为第 t 时段最大允许下泄流量, m^3/s ; S_t 为第 t 时段的弃水量, m^3/s ;其他符号意义同前。

4) 电站出力约束

$$N_t^{\min} \leq N_t \leq N_t^{\max} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

式中: $N_t^{\min}$ 为第 t 时段的允许的最小出力, MW ; $N_t^{\max}$ 为第 t 时段的允许的最大出力, MW ; N_t 为第 t 时段的发电出力, MW 。

5) 非负条件约束

上述所有变量均为非负变量(≥ 0)。

2 模型求解

动态规划算法是寻求多阶段决策过程的一种最优化方法,它能处理各种目标函数和多约束条件下的复杂最优化问题,且对于非线性、不连续、多变量、随机性、多阶段等许多复杂问题的求解比较成熟,能将庞大的 $m \cdot n$ 维问题变成 n 个 m 维问题求解,大大减少了求解难度,计算简便,且能获得全局最优解。水电站水库调度过程是一个多阶段的决策过程,目标函数和约束条件同样具有非线性、不连续、多变量、多阶段和随机性特点,因此动态规划算法在水库优化调度研究和水电站运行调度中得到了极为广泛的应用^[9]。下面采用动态规划算法求解水电中长期调度模型。

动态规划算法的基本求解思路是将过程分成若干个互相联系的阶段,即子问题,将各阶段按照一定的次序排列好之后,对于某个给定的阶段状态,先求解子问题,然后通过各子问题的解得到原问题的解。这里以水电站发电偏差最小为目标函数,以年为计算周期、旬为计算时段,将各时段末水库水位离散作

表 1 水库特征水位特征库容

正常蓄水位 /m	死水位 /m	汛期限制水位 /m
850	790	841
正常蓄水位以下 库容/(10 ⁸ m ³)	死库容库容 /(10 ⁸ m ³)	总库容库容 /(10 ⁸ m ³)
50.62	11.8	53.90

为状态变量,以时段合约电量和实发电量的偏差电量为决策变量,求解水电中长期调度模型。即将一年内水电站累计发电偏差最小化问题划分为 36 个时段对应的 36 个发电偏差最小化问题,大大减少了计算量,提升了计算速率,水库水位离散示意图如图 1 所示。

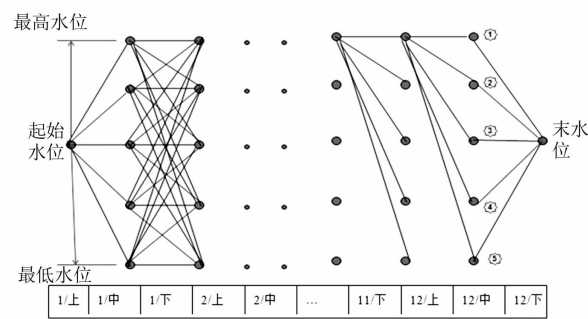


图 1 动态规划算法的水库水位离散示意

3 实例分析

为验证所建模型的合理性和有效性,以四川省某电站为研究对象,并结合《四川电力中长期交易规则(暂行)》(川监能市场〔2017〕51 号)和《2018 年四川电力交易指导意见》(川监能市场〔2018〕40 号)的具体内容进行实例分析。

1) 电力市场交易规则

《2018 年四川电力交易指导意见》(川监能市场〔2018〕40 号)指出:水电参加上下调服务引起的增发电量及减发电量按照机组预挂牌形成的上、下调价格进行结算;下调减发电量不大于 2% 时不补偿,超过 2% 时全额获得补偿;2% 以内的少发电量免于支付偏差考核费用,2% 及以上的少发电量按系统上调电量补偿单价支付偏差考核费用;弃水期,超发电量不予结算,2% 以内的超发电量免于支付偏差考核费用,2% 及以上的超发电量按月度增量直接交易最高成交价的 10% 支付偏差考核费用;未弃水期,超发电量按

60 元/MW 时进行结算。因此,发电厂商为了免于支付偏差考核费用,应当按照合约电量指导发电生产,尽量将发电偏差控制在 2% 以内,以获取期望的发电收益。

2) 计算基础资料

选取四川省某水电站为研究对象,进行基于发电偏差最小化的水电中长期调度模型合理性和有效性验证,该水电站为四川省某流域水电梯级开发的下游控制性水库工程,具有不完全年调节能力,电站采用堤坝式开发,是一座以发电为主,兼有防洪、拦沙等综合利用效益的大型水电工程。坝址控制流域面积 68 512 km²,占全流域面积 77 400 km²的 88.53%,电站总装机容量 3600 MW,电站多年平均年发电量为 1.458 × 10¹⁰ kWh,保证出力为 926 MW。水库主要特征参数见表 1。

3) 计算结果及分析

基于以水电站发电量与合约电量偏差最小化为目标的水电中长期交易模型,以旬为计算时段,选取四川省某水电站为研究对象,采用动态规划算法进行模型求解,计算结果如图 2 所示。

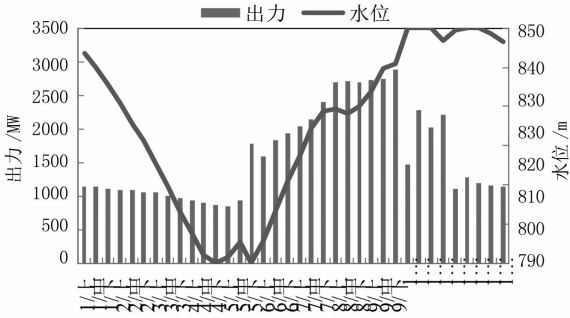


图 2 四川某电站典型年出力和水位过程

受水库调节能力和来水的影响,水库水位分别在 4 月下旬(枯期末)和 5 月下旬(汛期初)消落至死水位 790 m,在 10 月上旬蓄满,整个 10 月保持最高水位 850 m 运行,为枯期保持了较高的水头,满足水库运行方式的要求;水库各时段均未发生弃水,水量利用率高达 100%。四川省某电站典型年偏差分析结果见图 3,通过对比水电站实发电量和合约电量过程发现,各时段发电偏差均在 0.6% 以内,其中正偏差最大值出现在 1 月中旬,为 0.6%,负偏差最大值出现在 2 月下旬,为 -0.59%,月平均偏差均能控制在 0.5% 以内,满足交易规则的不大于 2% 的偏差控制要求,企业可免于支付偏差考核费用。

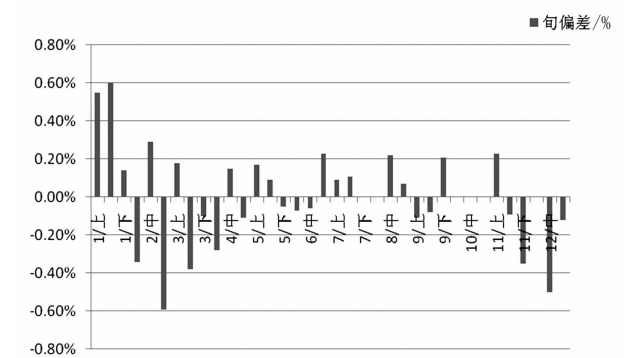


图3 四川某电站典型年偏差分析

4 结 语

随着电力市场化改革的不断深化,中国能源结构将进一步优化,水电作为清洁能源,在新电改的形势下机遇和挑战并存。传统以发电量最大为目标的水电站调度准则已不能适应电力市场发展的趋势。结合新电改对水电调度的新要求,提出了发电偏差最小化的水电中长期调度模型,通过实例分析验证,模型是有效和适用的。

对参与电力市场中长期交易的水电优化调度进行探索,对于水电企业中长期合同电量的执行具有较强的指导意义。在今后的研究中,可进一步研究水电企业参与区域电力市场中长期交易的不同交易品种组合策略。

参考文献

[1] 马科. 基于多核并行计算的水库群中长期优化调度研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2014.

[2] 汪明清, 林成, 肖燕, 等. 多种中长期发电优化调度模

=====

(上接第18页)

[9] 李爽, 王志新, 吴杰. 采用基频零序分量注入的 MMC 换流器故障容错控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 1-7.

[10] 胡静. 基于 MMC 的多端直流输电系统控制方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

[11] 薛英林, 徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 起动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 1-7.

[12] 管敏渊. 基于模块化多电平换流器的直流输电系统控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

[13] 曹春刚, 赵成勇, 陈晓芳. MMC-HVDC 系统数学模

型在乌江梯级的应用[J]. 南方电网技术, 2012, 6(s1): 37-39.

[3] 卢立宇, 赵飞, 陶春华, 等. 瀑布沟水电站及下游梯级经济运行方式研究[J]. 水力发电, 2015, 41(4): 63-65.

[4] 刘方, 张粒子. 流域梯级水电优化调度模型与方法研究综述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 81-90.

[5] 刘方, 张粒子, 蒋燕, 等. 电力市场环境下梯级水电站中长期调度与检修计划双层优化模型[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1541-1548.

[6] 刘方, 张粒子. 流域梯级水电站中长期调度与跨价区交易组合双层优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 444-456.

[7] 刘方, 张粒子. 计及随机和风险因素的梯级水电调度交易优化模型和方法[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 870-877.

[8] 罗京蕾, 黄显峰, 方国华. 电力市场交易背景下水电站优化调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 184-188.

作者简介:

白智丹(1985), 高级工程师, 从事调度自动化工作;

余 熙(1963), 教授级高级工程师, 主要从事电网系统二次规划工作;

朱燕梅(1993), 硕士研究生, 从事水电智能运行管理及电力市场研究;

武云霞(1981), 高级工程师, 从事调度自动化和电力市场工作;

黄天意(1990), 助理工程师, 从事调度自动化和电力市场工作;

谢获雅(1995), 硕士研究生, 从事水电智能运行管理及电力市场研究。

(收稿日期: 2018-10-17)

型及其控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(4): 13-18.

作者简介:

梁 明(1973), 工学学士、教授级高级工程师, 主要从事输电线路设计工作;

孟 鑫(1988), 工学博士、工程师, 主要从事输电线路设计工作;

薛一鸣(1987), 工学硕士、工程师, 主要从事输电线路检修工作;

王军成(1987), 工学学士、工程师, 主要从事输电线路设计工作。

(收稿日期: 2018-09-18)

特高压线路瓷绝缘子污秽分布特性研究

李世平¹, 范超², 郭裕钧², 张血琴², 肖章², 王耀振²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学, 四川 成都 611756)

摘要:绝缘问题是特高压输电建设中需要解决的首要问题,研究不同气候不同电压类型条件下输电线路绝缘子积污分布对指导输电线路外绝缘设计具有重要意义。以特高压输电线路广泛使用的陶瓷绝缘子为研究对象,建立电场等效模型,通过调整3片绝缘子伞裙两端电压模拟实际特高压输电线路绝缘子串周围电场情况,并基于实验室搭建的人工雾室模拟南北方典型气候,在不同电压类型下开展了陶瓷绝缘子积污试验。研究表明:在南方沿海气候下,由于空气湿度较大,两种电压类型下的陶瓷绝缘子表面积污量均高于北方地区;绝缘子串的积污量随电压等级的升高而增大;在两种气候下,陶瓷绝缘子串在直流电压作用下积污量呈现两端高、中间低的现象,而交流电压下积污量变化不大,且直流电压较同等级交流电压作用下绝缘子片上下伞面的积污量更大;南方和北方气候下陶瓷绝缘子直流和交流电压下积污比分别约为1.37和1.51。

关键词:特高压输电线路;南北方气候;积污规律;直交比

中图分类号:TM852 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0041-06

Research on Pollution Distribution Characteristics of Ceramic Insulators in UHV Transmission Lines

Li Shiping¹, Fan Chao², Guo Yujun², Zhang Xueqin², Xiao Zhang², Wang Yaozhen²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract:Insulation is the most important problem to be solved in the construction of UHV transmission lines. It is of great significance to study the pollution distribution of transmission line insulators under different climates and voltage types. Taking ceramic insulator which is widely used in UHV transmission lines as the research object, the electric field equivalent model is established, and the electric field around the actual insulator string of UHV transmission lines is simulated by adjusting the voltage at the ends of 3 insulator sheds. Typical climates in the north and south are simulated, and pollution accumulation tests of the ceramic insulator are carried out under different voltage types based on the artificial fog chamber built in the laboratory, and the effectiveness of the model is verified. The research results show that in the southern coastal climate, the pollution accumulation on ceramic insulator surfaces are higher than that in the northern climate under two voltage types because of the high humidity of the air. Under DC and AC voltage, the pollution accumulation quality of insulator string increases with the increase of the voltage level. In both climates, the pollution accumulation quality on insulator string under the action of DC voltage on two ends sheds is higher than the middle shed, while the pollution accumulation quality on the upper surfaces of 3 sheds is about the same under AC voltage. And the pollution accumulation quality on the upper and the lower surfaces of 3 insulator sheds under DC voltage is higher than that under the same AC voltage level. The contamination ratio of the ceramic insulator string under DC and AC voltages in southern climate is about 1.37, while that of northern climate is about 1.51.

Key words:UHV transmission line; north and south climate; pollution accumulation rule; contamination ratio

0 引言

特高压直流输电工程相对交流输电具有线路输

电距离远、损耗小、容量大、功率调节控制灵活等优势,已成为中国“西电东送、全国联网”的重要手段^[1-3]。外绝缘问题是特高压输电需要解决的首要问题。特高压输电线路设备易受到工业粉尘、扬尘、

鸟粪等污秽污染,在雾、露、毛毛雨、融冰等不利气候条件下,即在空气相对湿度较高时容易发生污闪事故^[4-5],给设备外绝缘带来了极大的危害。绝缘子积污机理较复杂,其表面污秽程度和分布与地域气候环境、带电情况等因素相关。在直流电场作用下,污秽颗粒会受到单一方向的电场力作用,相对于交流电场而言,污秽颗粒更容易粘附在绝缘子表面,在恶劣天气下易发生闪络^[6-8],对电力系统的安全运行、工农业生产及人们的日常生活造成危害。

目前,已有很多学者对输电线路绝缘子积污特性进行了研究分析。文献[9-10]在美国 ± 400 kV和 ± 500 kV线路、新西兰 ± 275 kV线路等地区的试验站进行了直流电压下合成绝缘子的积污情况研究。文献[11]对 ± 500 kV换流站支柱绝缘子积污特性及绝缘子直交流电压下积污比进行了研究,得出了直交流等值盐密比。文献[12]研究了 ± 800 kV宾金线绝缘子自然积污特性,发现电压极性对绝缘子积污无显著影响。文献[13]对哈郑线负极性线路瓷绝缘子的积污特性进行了研究,得到了绝缘子表面的灰盐比。文献[14-15]通过复合和瓷绝缘子自然积污试验研究发现:复合绝缘子下伞面直交比大于5,瓷绝缘子下伞面直交比大于10。文献[16]开展了高海拔地区特高压线路绝缘子带电积污试验,并对瓷三伞绝缘子的积污特性进行数值模拟,研究发现:材质对积污影响较大,瓷三伞绝缘子积污直交比随风速增大而减小,随粒径增大而增大。文献[17]对 ± 800 kV楚穗特高压线路复合绝缘子自然积污特性展开了研究:复合绝缘子表面污秽呈两端重、中间轻的分布规律。文献[18]对广州地区500 kV以下线路玻璃绝缘子积污特性及灰盐比进行了研究。

中国特高压线路“五纵五横”贯穿东西南北,不同地区的气候相差较大,对线路设计中的设备选型以及线路建成后的运行维护都带来很多不便。目前,针对南北方地区特高压输电线路陶瓷绝缘子的积污特性和直交比的异同还少有研究。有针对性的结合南北方地区典型气候环境,研究和分析特高压输电线路绝缘子的积污规律,可以指导特高压输电线路外绝缘的防污工作,对输电线路外绝缘配置和电力系统的安全运行具有重要的理论和工程实际意义。为此,建立了输电线路陶瓷绝缘子仿真模型,并搭建了实验室人工雾室,针对南北方地区典型气候

下的陶瓷绝缘子积污特性以及污秽直交比展开了人工积污试验研究。

1 污秽受力分析及电场等效模型

下面对输电线路周围污秽颗粒的受力状态进行了理论分析,通过仿真软件分析了特高压输电线路绝缘子周围电场分布并提出等效模型;通过对污秽颗粒的受力分析讨论影响绝缘子积污的因素。

1.1 颗粒受力分析

图1、图2分别为空气中及绝缘子表面粘附的污秽颗粒受力示意图。

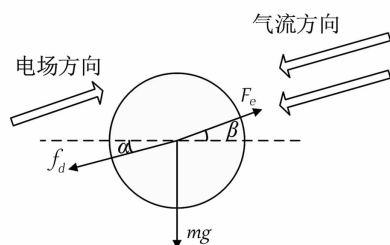


图1 空气中污秽颗粒受力示意

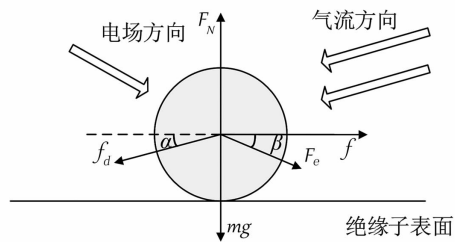


图2 绝缘子表面粘附污秽颗粒受力示意

由图中可以看出,绝缘子周围污秽颗粒在空中主要受气流曳力、电场力以及自身重力作用,其中:影响曳力的主要因素为气流与污秽颗粒的相对速度以及空气湿度;影响电场力的主要因素是绝缘子串周围电场强度以及污秽颗粒自身荷电量;重力则为污秽颗粒自身的性质,同一地区的污秽平均质量一般不会有太大变化。

因此,设计试验时主要考虑风速、湿度以及电场强度3个因素,并以此研究特高压输电线路陶瓷绝缘子污秽分布特性。

1.2 等效电场仿真

由于特高压输电线路电压等级高、拉伸应力大的原因,绝缘子串较长,在实验室中难以有效开展特高压线路绝缘子串人工积污试验。而在输电线路旁架设试验线的方式成本较高,且无法探究不同因素对积污的影响。因此,提出了一种能够模拟特高压

电场环境下输电线路绝缘子积污的方法。

仿真和试验绝缘子采用型号为 XWP-70 的陶瓷绝缘子模型,模型盘径为 255 mm,结构高度 160 mm,如图 3 所示。

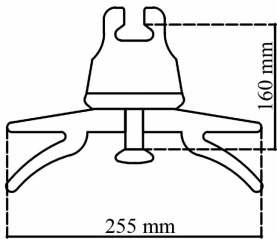


图 3 XWP-70 型陶瓷绝缘子结构

特高压输电线路 I 型耐张绝缘子串由 54 片 XWP-300 陶瓷绝缘子片构成。绝缘子串从高压端至低压端,其表面及周围空气中的电势与电场强度分布不均匀呈马鞍形分布。因此,仿真和试验均采用 3 片陶瓷绝缘子分别模拟绝缘子串高压端、中间段以及低压端。仿真计算 800 kV 电压下 54 片陶瓷绝缘子周围电场大小,使 3 片绝缘子周围电场大小分别与 54 片绝缘子串的高压端、中间段和低压端相似,以此方法模拟特高压绝缘子串周围电场情况。

对特高压输电线路 I 型耐张绝缘子串进行电场仿真,其最上部金具接地,最下部金具接高压端,周围电场仿真结果如图 4 所示。

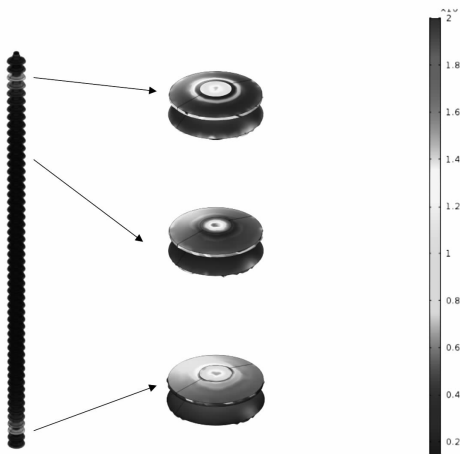


图 4 特高压输电线路绝缘子串电场仿真

由仿真图可以看出,在 800 kV 电压等级下,绝缘子串高压端和低压端伞裙周围电场达到 8×10^5 V/m;绝缘子串的中间伞裙周围电场强度约为 3.3×10^4 V/m,与两端伞裙场强相比,低了 1~2 个数量级。

改变两端所加电压,对 3 片陶瓷绝缘子进行电场仿真得到其周围场强。当两端所加电压为 45 kV

时,中间绝缘子片与绝缘子串的中间部分的伞片电场强度基本等效。高压端和低压端绝缘子片周围场强与绝缘子串两端约第 10 片的伞裙场强大小等效。因此,在 3 片绝缘子两端施加 45 kV 电压时,其 3 片伞裙可分别等效 800 kV 电压等级下 54 片绝缘子串的高压侧、中间和低压侧伞裙周围电场强度。同时进行 1100 kV 电压等级下绝缘子串的电场仿真,发现 3 片绝缘子两端加 55 kV 时两者电场分布相似。

2 绝缘子直流积污试验方法

2.1 试验样品及平台

通过电场等效仿真模型,可以确定试验所需电压等级并在人工雾室内进行陶瓷绝缘子积污试验。试验采用的陶瓷绝缘子样品结构、大小以及形状都与仿真模型相同。人工雾室主体为 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,其结构示意图如图 5 所示。雾室前后壁面设有开口,以便绝缘子通过套管连接高压电源。侧壁设有进风与出风口,出风口处放置负压风机,负压风机抽取气流,使绝缘子受到恒定气流作用。负压风机可提供的风速范围为 $0 \sim 5 \text{ m/s}$,可模拟自然风。雾室内部设置有水雾发生器,通过调控水雾产生的速率以调节雾室内湿度,可模拟南方湿润气候条件。

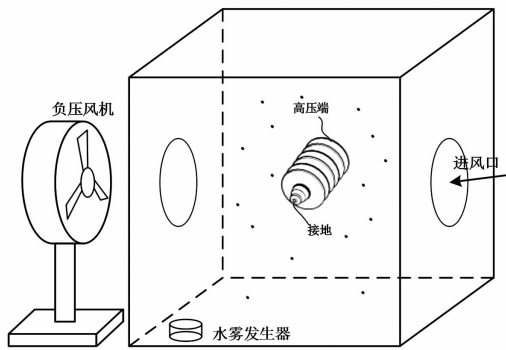


图 5 人工气雾室结构

2.2 试验积污方法

将 3 片陶瓷绝缘子通过支撑杆悬挂,第 3 片伞片下金具接交、直流高压,第 1 片伞片上金具接地,如图 6 所示。绝缘子加压后,使用鼓风机将 3 g 高岭土颗粒吹入雾室,使绝缘子完全处于污秽颗粒包围的状态,污秽颗粒受到重力作用下降,并在气流曳力、重力以及电场力的共同作用下在绝缘子表面沉积。积污时间持续 10 min,当雾室内空气中无悬浮的污秽颗粒时,再次鼓入 3 g 高岭土,重复进行 3

次。试验结束后,使用洁净棉签分别清扫3片绝缘子上下表面沉积的污秽颗粒,并使用精度为0.1 mg的称量仪称量污秽质量。每个电压类型、等级或每个湿度重复进行3次试验,并取结果的平均值作为最终测量结果。



图6 人工雾室

3 南北方气候条件下绝缘子直、交流积污特性

3.1 不同湿度下绝缘子直流积污试验对比

云南—广东特高压直流输电线路受端换流站位于广州市,地处南亚热带,属于典型的季风海洋气候,年平均相对湿度约为79%,年平均风速约为2.3 m/s。调整负压风机的频率,采用FA-300A风速测定仪测得风速约为2.3 m/s,调整水雾发生器产雾速率,控制雾室内的湿度为80%,与广州地区基本一致。按照第2.2节积污方法完成积污试验。

而北方地区气候相较南方地区,其湿度较小,风速稍高。如哈密南—郑州特高压直流输电线路,其受端换流站位于郑州市,属于温带季风气候,年平均相对湿度约为55%,年平均风速约为2.8 m/s,与广州地区比差别不大。调整风机频率,使风速达到2.8 m/s;调整水雾发生器,使雾室内湿度为55%,以模拟郑州市的气候条件。在陶瓷绝缘子两端分别施加45 kV和55 kV直流电压,模拟特高压输电线路绝缘子串周围电场强度,并完成积污试验。

南北方气候环境中45 kV和55 kV直流电压下3片陶瓷绝缘子表面的积污量如图7所示。

对比两种气候下的试验结果,可以看出,广州地区与郑州地区绝缘子积污情况不同,但3片绝缘子污秽颗粒质量变化趋势一致,由于两端伞裙周围电场强度较高,对颗粒吸附作用较中间伞裙更强,因此

两种气候下均呈现两端伞裙污秽颗粒质量较大,中间伞裙污秽颗粒质量较小的现象。湿度对绝缘子积污有很大的影响,湿度较高的情况下,3片绝缘子伞裙上下表面的积污量均有明显增多。绝缘子表面被水雾湿润,当污秽颗粒碰撞于绝缘子表面更容易粘附,且难以受气流曳力的影响离开绝缘子表面,因此,在湿度更高时的陶瓷绝缘子伞片积污更加严重。

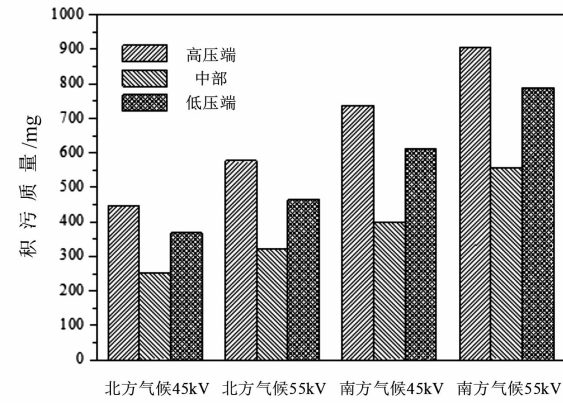


图7 南北方气候直流电压下3片伞裙积污分布

3.2 直、交流积污试验对比

在雾室内模拟南北方两种典型气候,并在绝缘子两端分别施加45 kV和55 kV的直、交流电压,观察不同电压类型和电压等级下绝缘子积污分布情况。

两种气候环境中45 kV和55 kV直、交流电压作用下绝缘子串总污秽质量如图8所示。

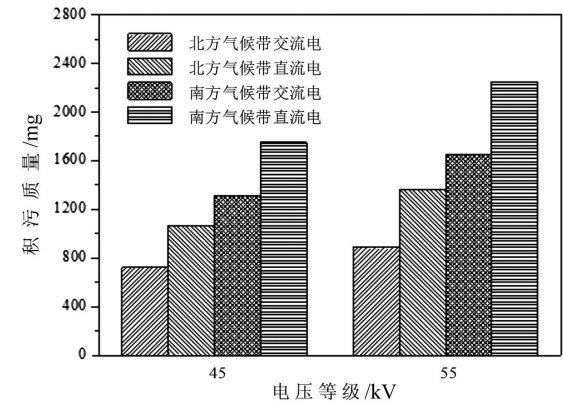


图8 南北方气候直、交流电压下绝缘子串总积污量

从图8中可以看出,在相同的电压类型和电压等级下,南方气候较北方气候绝缘子串表面积污更严重,这是由于湿度较高,污秽颗粒更容易发生团聚使质量增大,受到重力影响较大沉降并粘附于绝缘子表面,在气流曳力作用下沿绝缘子表面滑移或脱离绝缘子表面的概率较低。在相同气候类型和电压类型下,随着电压等级升高,绝缘子串周围电场增

大,对污秽颗粒吸附作用增强,空气中沉降的污秽颗粒更容易吸附于绝缘子表面。在相同气候类型和电压等级下,直流电压较交流电压下绝缘子串积污量更大,直流电场力对污秽颗粒的作用比交流电场力更稳定,颗粒在绝缘子表面粘附后更牢固,而交流电场力在一个周期内对污秽颗粒作用力为0。

3.3 交流电压对绝缘子积污分布影响

南北方气候环境中45 kV和55 kV交流电压下3片陶瓷绝缘子表面的积污量如图9所示。

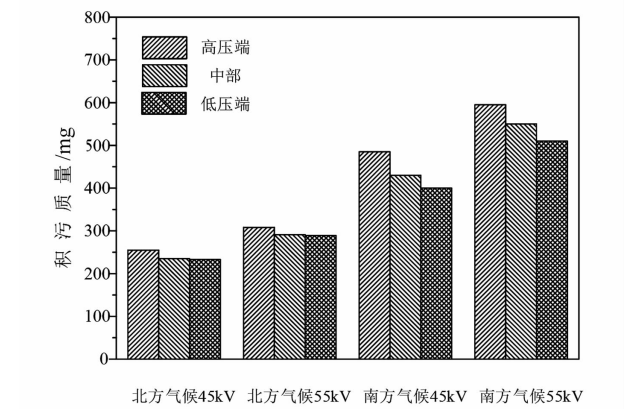


图9 南北方气候交流电压下3片伞裙积污分布

与第3.1节中直流电压下绝缘子表面积污量不同,在相同气候类型和电压等级下,交流电压作用下3片绝缘子伞裙积污量之间没有太大的变化,与绝缘子不带电情况下积污规律类似。造成这种现象的主要原因是由于交流电作用下,绝缘子周围会产生周期性的交变电场,由于污秽颗粒所带电荷极性固定,电场方向的变化会造成作用在污秽颗粒表面的电场力方向的改变,使得电场力对污秽颗粒的作用效果变弱,因此此种情况下积污规律与绝缘子不带电情况类似。

将两种电压类型下绝缘子串表面总污秽颗粒质量的比值作为直交比,可以得出:北方气候下,直流和交流电压下陶瓷绝缘子串表面积污直交比约为1.51;在南方气候下,直流和交流电压下陶瓷绝缘子串表面积污直交比约为1.37。

4 结 论

通过人工气雾室开展交直流电压下绝缘子积污试验,研究了南北方不同典型气候下陶瓷绝缘子的积污规律,计算南北方典型气候不同电压等级下绝缘子积污直交比,得到如下结论:

1) 在南方沿海典型环境下,由于空气湿度较高,与绝缘子表面碰撞的污秽颗粒更容易发生粘附,故相较北方气候条件下的绝缘子表面积污量更大,且积污量随电压等级升高而增大。

2) 在两种不同典型环境气候下,陶瓷绝缘子串在直流电压作用下积污量呈现两端高、中间低的现象,而交流电压下积污量大致相同,3片间变化不大,且直流电压较同等级交流电压作用下绝缘子片上下伞面的积污量更大;

3) 南方和北方典型气候环境下陶瓷绝缘子直流和交流电压下积污比分别约为1.37和1.51。

参考文献

[1] 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2513-2522.

[2] 张文亮,于永清,李光范,等.特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.

[3] 谢辉春,崔翔,路遥,等.特高压同塔双回交流输电线路绝缘子串长优化后的线路可听噪声试验[J].高电压技术,2016,42(5):1659-1666.

[4] 徐式蕴,吴萍,赵兵,等.提升风火打捆哈郑特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J].电工技术学报,2015,30(13):92-99.

[5] 吴敬儒,王建生,何百磊.建设特高压直流输电工程输送风电的技术经济可行性分析及建议[J].风能,2013,44(10):54-58.

[6] 孙保强,王黎明,关志成,等.电压种类及极性对绝缘子积污的影响[J].高电压技术,2013,39(12):3101-3108.

[7] 宿志一.葛南直流输电线路华东段和南桥换流站绝缘子自然积污状况调查[J].电网技术,1993,17(3):9-15.

[8] 汤存燕,梁曦东.国外直流合成绝缘子运行及自然污秽试验[J].电网技术,1999,23(9):50-53,59.

[9] GUBANSKI S M. Wettability of Naturally Aged Silicone and EPDM Composite Insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3): 1527-1535.

[10] 宿志一.换流站直流绝缘子的自然积污特性与直交流积污比[C]//中国电机工程学会高压专委会2007年学术年会2007年学术年会论文集,深圳:中国电机工程学会,2007:281-290.

[11] 李特,王少华,柳青山,等.±800 kV特高压宾金直流悬式及支柱绝缘子自然积污特性[J].电网技术,2017,41(11):3553-3558.

- (收稿日期:2018-12-06)

(收稿日期:2018-09-16)

220 kV MOA 带电测量相间干扰的研究与分析

何大猛¹, 王仲奕²

(1. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041;
2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:提出了一种将“场”和“路”相结合的方法用于计算 220 kV MOA 带电测量相间干扰问题。并运用 ANSYS Maxwell 和 EMTP 软件联合仿真计算加以验证, 为 MOA 在线监测减小相间干扰提供了理论依据和切实可行的办法。仿真计算结果显示, A 相和 C 相受干扰影响比较明显, 而 B 相幅值和相位变化相对较小。
关键词:金属氧化物避雷器 (MOA); 相间干扰电流; 有限元法; 相间耦合电容; 带电监测
中图分类号:TM835 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0047-05

Research and Analysis on Interphase Interference of On-line Measurement for 220 kV Metal Oxide Arrester

He Dameng¹, Wang Zhongyi²

(1. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, China)

Abstract: A method combined with "field" and "circuit" is proposed to calculate the interphase interference of 220 kV metal oxide arrester. It is verified by the joint simulation with ANSYS Maxwell and EMTP, which provides a theoretical basis and a practical way to reduce interference effects. The simulation computation results show that the interference effect on phase A and phase C is more obvious, however the amplitude and phase changes of phase B are relatively small.
Key words: metal oxide arrester (MOA); interphase interference current; finite element method (FEM); interphase coupling capacitance; live line monitoring

0 引言

从 20 世纪 80 年代开始, 金属氧化物避雷器 (metal oxide arrester, MOA) 由于具有优越的非线性特性、耐受大幅值冲击电流能力强以及运行可靠性高, 在中国得到了广泛应用。MOA 中的氧化锌电阻片作为重要的过电压保护元件, 在长期运行中, 会出现氧化锌电阻片劣化的问题, 泄漏电流中的阻性电流分量不断增大, 功耗变大, 电阻片运行温度不断升高, 发生热崩溃, 发展到一定程度后将致使 MOA 爆炸。因此, 监测持续运行电压下 MOA 的泄漏电流及其阻性分量, 是判断 MOA 运行状态的重要手段。

正常情况下, 避雷器的泄漏电流主要是容性电

流, 而阻性电流只占很小一部分。运行中, 被试避雷器自身存在的相间干扰, 会影响带电测量的结果, 使测量结果不能真实反映避雷器的运行状况。因此, 准确、有效地分析 MOA 的相间干扰, 可以使得带电监测的结果更能反映真实情况^[1-6]。

下面提出了一种“场”和“路”相结合的方法来计算 MOA 相间干扰, 首先采用能比较精确处理多介质分布问题的有限元法来计算 MOA 杂散电容和相间耦合电容, 再结合“路”的方法计算相间干扰电流。

1 计算原理

1.1 计算模型

220 kV 电压等级的 Y10W5-220/520W 型 MOA 由 2 节单元组成 (忽略伞群), 节与节之间用金

属法兰相连接,顶部有均压环罩入,底部由法兰和金属构架支撑。计算模型中各介质的相对介电常数如表1所示。

表1 各介质的相对介电常数

介质	绝缘杆	SF ₆	电阻片	瓷套	空气	金属
相对介电常数	5.6	1	740	5.0	1.0	1.0

分别给图1(a)的1至3号导体编号为V₁至V₃,图1(b)1至6号导体编号为V₁到V₆。

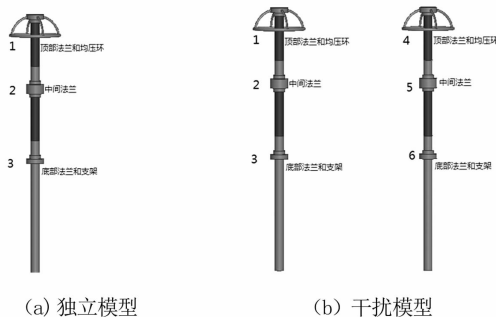


图1 有限元模型

1.2 有限元法计算耦合电容参数

电磁场理论表明电容参数与模型结构、接地体的位置有关,而与施加激励的频率、电压幅值无关,因此可在静电场条件下计算耦合电容参数。

针对模型,写出其相应的边值问题为

在求解域内:∇²φ=0 (1)

高压端:φ=U (2)

低压端:φ=0 (3)

大地:φ|_{大地}=0 (4)

无穷远:φ|_{r→∞}=0 (5)

介质分界面上:φ₁=φ₂ ε₁ ∂φ₁/∂n=ε₂ ∂φ₂/∂n (6)

悬浮导体上:∮_Γ ∂φ/∂n dS=0 (7)

对每个单元应用数学变换,并最终整理为一个统一的矩阵方程为

[K][φ]=[V] (8)

式中:[K]为系数矩阵;[φ]为剖分单元节点的待求电位矩阵。

求解方程得到标量电位值。对于金属氧化物避雷器,内部包括很多导体,因此,需将电容的公式推广到多导体系统。对于多导体系统,根据式(9)导体电荷、导体间电压和导体间电容的矩阵关系式可得到分布电容。

[Q]₁ [Q]₂ [Q]₃ [Q]₄ [Q]₅ [Q]₆ = [C₁ C₁₂ C₁₃ C₁₄ C₁₅ C₁₆ C₂₁ C₂ C₂₃ C₂₄ C₂₅ C₂₆ C₃₁ C₃₂ C₃ C₃₄ C₃₅ C₃₆ C₄₁ C₄₂ C₄₃ C₄ C₄₅ C₄₆ C₅₁ C₅₂ C₅₃ C₅₄ C₅ C₅₆ C₆₁ C₆₂ C₆₃ C₆₄ C₆₅ C₆] [φ]₁ [φ]₂ [φ]₃ [φ]₄ [φ]₅ [φ]₆ (9)

式中,C_i=C_{i1}+C_{i2}+C_{i3}+C_{i4}+C_{i5}+C_{i6},i=1,2,3⋯,6。

1.3 相间干扰电流理论分析计算

求得耦合电容之后,根据基尔霍夫定律建立等效电路模型,就可以求得对应的电流值。在A相MOA底部的测量点所得到的电流i_A为A相MOA总的泄漏电流,如果只考虑相邻相MOA的影响,那么它主要包括本体泄漏电流和邻相MOA通过耦合电容在A相的1、2、3号导体上作用而产生的总耦合干扰电流i_{BA}。由于耦合干扰电流是通过电容耦合产生的,因此在相位上超前耦合电压90°,其向量关系如图2所示。

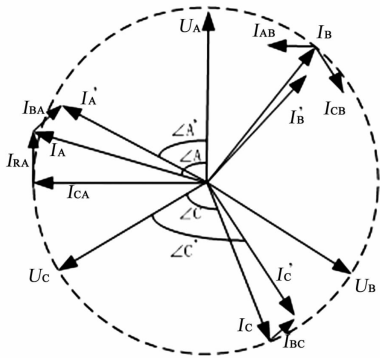


图2 仅考虑相邻耦合干扰情况下的MOA向量关系

从图2分析可知,考虑相间干扰后,A相MOA本体的持续电流I'_A是由未考虑干扰时的持续电流I_A和耦合干扰电流I_{BA}两部分组成,其中I_A又是由其本体产生的容性电流I_{RA}组成。耦合干扰电流I_{BA}的存在,致使I_A向滞后方向偏移了∠A-∠A'。也就是说,由于耦合电流的存在,使得A相MOA的持续电流和运行电压的夹角变小,且持续电流的幅值也减小了,因此用投影法测得的阻性电流分量I'_{RA}=I'_Acosφ_A值就会比未考虑干扰时的I_{RA}值要大。

对于C相MOA,由于耦合干扰电流I_{BC}的作用,使得I_C向超前方向移动∠C'-∠C至I'_C。换言之,耦合干扰电流使得C相MOA的持续电流和运行电压的夹角增大,且持续运行电流的幅值减小,则阻性电流分量I'_{RC}明显减小。

A相和C相MOA对B相的干扰相电流 I_{AB} 与 I_{CB} 为幅值相同的容性电流,且关于 I_B 的容性分量对称,所以B相MOA的持续电流容性分量减小,导致持续电流幅值减小,相位角也会有所减小。

综上所述,由于本组MOA的相间耦合,使得原有持续电流 $I_A、I_B、I_C$ 变成了 $I'_A、I'_B、I'_C$,新的持续电流不仅角度发生了变化,幅值也有所改变。如果原来 $I_A = I_B = I_C$,则有 $I'_A > I'_C > I'_B$,且电压电流的夹角为 $\varphi'_C > \varphi'_B > \varphi'_A$,且角度偏差为 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。

2 仿真计算

应用电磁场有限元分析软件Maxwell 3D从“场”的角度计算出MOA的耦合电容值和杂散电容值,再运用电力系统和电子线路仿真软件EMTP的ATP程序搭建起相应的“路”模型,计算出相间干扰时的持续电流值。

2.1 有限元计算分布电容

应用电磁场有限元分析软件Maxwell 3D从“场”的角度计算出耦合电容值和杂散电容值,如表2、表3所示。

表2 独立MOA时的电容值				单位:pF
导体	V_1	V_2	V_3	
V_1	72.586	-39.339	-2.228	
V_2	-39.339	89.270	-34.250	
V_3	-2.228	-34.250	94.962	

表3 干扰时的耦合电容值							单位:pF
导体	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	
V_1	72.70	-39.20	-2.14	-1.72	-0.70	-0.67	
V_2	-39.20	89.30	-34.21	-0.70	-0.37	-0.45	
V_3	-2.41	-34.2	96.20	-0.67	-0.45	-0.80	
V_4	-1.70	-0.70	-0.67	72.70	-39.20	-2.15	
V_5	-0.70	-0.37	-0.45	39.20	89.30	-34.20	
V_6	-0.67	-0.44	-0.80	-2.15	-34.20	96.50	

2.2 EMTP计算持续电流

由于C相与A相的距离较远,分布电容对泄漏电流的影响程度比较微弱,故忽略不计C相与A相之间的干扰。

2.2.1 B相对A相干扰分析

220 kV的MOA每节单元有33块电阻片,在正常运行时,处于小电流区。电阻片的电阻 R 可以认为是固定值,其值为4400 kΩ。所以,考虑杂散电容后,Y10W5-220/520W型MOA每相的简化模型如

图3所示。

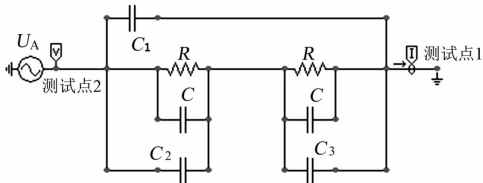


图3 A相MOA考虑杂散电容的简化模型

图3中: U_A 为最大持续运行电压峰值 $168.5 \times \sqrt{2}$ kV的正弦电压; R 为33块电阻片的串联电阻值; C 为MOA第1节、第2节单元的等效电容值; $C_1、C_2$ 分别为高压端对地和对中间法兰的杂散电容值; C_3 为中间法兰对地的电容值。在测试点1和测试点2处分别可以测得未受干扰时,A相MOA的持续运行电压和泄漏电流波形,如图4所示。

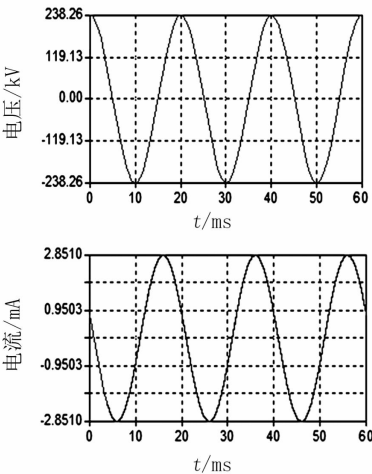


图4 未考虑相间干扰时,A相MOA的持续运行电压、电流波形

从图4可以看出,A相MOA持续运行电压峰值为238.259 kV,泄漏电流幅值为2.851 mA;泄漏电流波形超前电压波形4.57 ms,即 $(4.57/20) \times 360^\circ = 82.26^\circ$,所以泄漏电流超前电压的相位角度为: $\varphi_A = 82.26^\circ$ 。根据投影法,可以计算出阻性分量幅值为0.384 mA。

仅考虑相邻B相MOA对A相的干扰后,其电路模型如图5所示。图5中 $C_{h1} - C_{h3}、C_{m1} - C_{m3}、C_{11} - C_{13}$ 分别为B相MOA的4、5、6号导体与A相MOA的1、2、3号导体间的耦合电容,计算结果如图6所示。

从图6可以看出,有B相MOA干扰后,A相MOA的持续运行电压峰值为238.259 kV,泄漏电流的峰值为2.798 mA;泄漏电流波形超前于电压波形4.454ms,即 80.01° ,所以电流超前电压的相位角

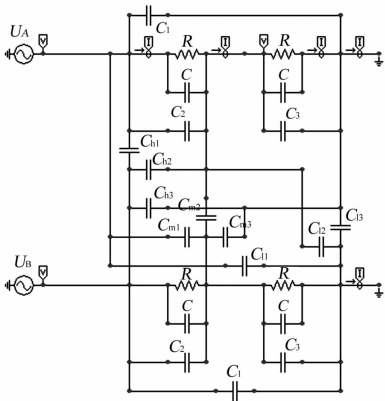


图5 B相对A相干扰的电路模型

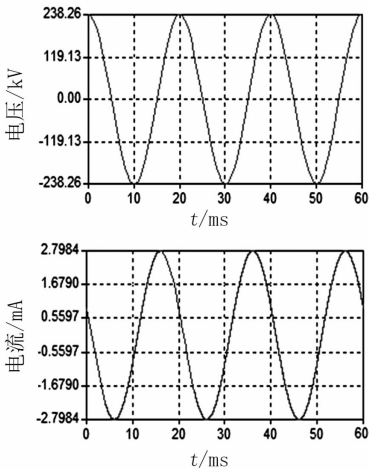


图6 B相MOA干扰时,A相的持续运行电压、电流波形
 $\varphi'_A = 80.01^\circ$ 。根据投影法,可以计算出泄漏电流阻性分量的幅值为0.485 mA。

对比图4和图6的计算结果,可以看出,由于B相的干扰,使得A相MOA的泄漏电流从2.851 mA减小到了2.798 mA,减小了1.86%;电流超前电压的相位角从82.26°减小到了80.01°,减小了2.25°,然而电流的阻性分量幅值却从0.384 mA增加到0.485 mA,增加了26.30%。

2.2.2 B相对C相干扰分析

同理,只需把上述图3和图5中的正弦电压 U_A 换成C相持续运行电压 U_C 就可以求出关于C的干扰情况,如图7所示。由于C相的电压和电流都滞后A相240°,所以未受干扰时C相的相位角以及泄露电流及其阻性分量都和A相的一致。

从图7可以看出,有B相MOA干扰后,C相MOA泄漏电流幅值为2.746 mA;泄漏电流波形超前电压波形4.64 ms,即83.52°。根据投影法,可计算出C相泄漏电流阻性分量幅值为0.310 mA。

对比未受干扰时的结果,可以看出,由于B相MOA的干扰,使得C相MOA的泄漏电流减小了

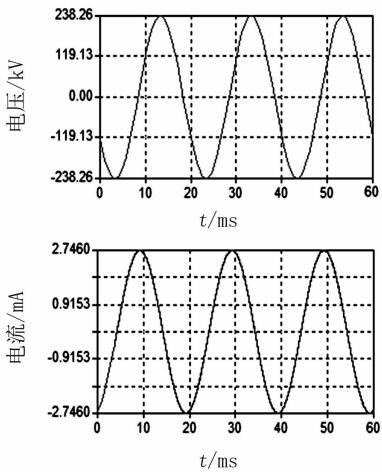


图7 B相MOA干扰时,C相的持续运行电压、电流波形
3.683%,电流超前电压的相位角增加了1.26°,然而泄漏电流的阻性分量幅值却减小了19.27%。

2.2.3 A相和C相对B相的干扰分析

将图3中的电压相角滞后120°就可以得到B相MOA单独运行时的结果,由于B相的电流也都滞后A相120°,所以未受干扰时B相的相位角以及泄露电流及其阻性分量都和A相的一致。

考虑相邻A相和C相MOA对B相的干扰后,其电路模型如图8所示,图中 $C_{A1} - C_{A9}$ 为A相对B相的耦合电容, $C_{C1} - C_{C9}$ 为C相对B相的耦合电容。仿真波形如图9所示。

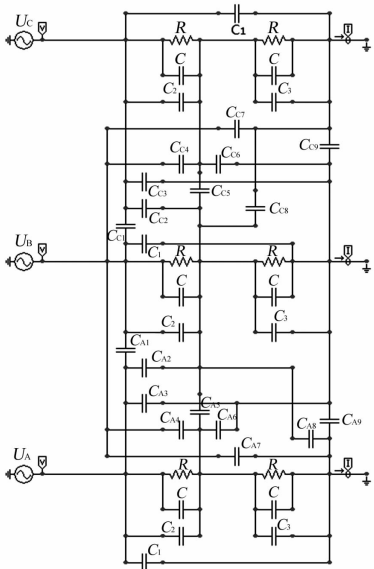


图8 A相和C相对B相干扰的电路模型

从图9可以看出,有A相和C相的干扰后,B相MOA泄漏电流峰值为2.705 mA;泄漏电流波形超前电压波形4.54 ms,即81.72°,根据投影法计算出C相泄漏电流阻性分量幅值为0.390 mA。

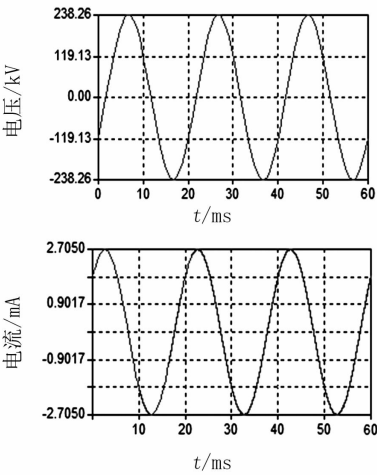


图 9 有 A 相与 C 相 MOA 干扰时,B 相的持续运行电压、电流波形

对比干扰前后的计算结果,可以看出:由于 A 相和 C 相的干扰,使得 B 相 MOA 的泄漏电流减小了 5.12%,泄漏电流超前电压的相位角减小了 0.54°,而电流的阻性分量却增加了 1.56%。

3 结果分析与讨论

上节仿真结果汇总见表 4,可以看出:
1) 仿真数据验证了相与相之间通过耦合电容干扰,使得 MOA 的持续电流不仅相位角发生了变化,幅值也有所改变。如果原来 $I_A = I_B = I_C$, 则有 $I'_A > I'_C > I'_B$, 且电压电流的夹角为 $\varphi'_C > \varphi'_B > \varphi'_A$, 而且性分量有 $I'_{RA} > I'_{RB} > I'_{RC}$ 。

2) 仿真数据中 A、B、C 三相的角度偏差分别为 2.25°、0.54°、1.26°,这完全符合理论推导 2°~3° 的偏差范围。

3) A 相和 C 相受 B 相干扰时,泄漏全电流变化幅度较小,但阻性分量变化幅度很大,分别为 26.30% 和 19.27%; B 相受 A、C 两相共同干扰时,全电流和阻性分量也略有变化:所以会对在线监测带来误差,尤其是阻性分量,这会影响对避雷器运行状况的正确判断。

表 4 Y10W5-220/520W 型 MOA 正常运行状态下仿真数据

参数	A	B	C
全电流 I_X /mA	2.798	2.705	2.746
阻性电流 I_{RP} /mA	0.485	0.390	0.310
容性电流 I_{CP} /mA	2.756	2.677	2.728
相角/(°)	80.01	81.72	83.52

4 结 语

针对相间干扰引起的误差,根据仿真电压、电流相位角的变化规律,建议采取相角适当修正的方法来减小相间干扰的影响,即:将所测量得到的 φ'_A 增加 1°~2°, φ'_B 增大 0.5°, φ'_C 相应减小 2°~3°,幅值在 I'_B 基础上调大 5%,这样就可以消除相间干扰所带来的误差了。

参考文献

[1] 唐炬,苟海丰,张新强,等.用部分电容法计算和消除相间干扰[J].重庆大学学报,1999,22(6):41-46.

[2] 杨殿成.金属氧化物避雷器带电测试干扰分析[J].高压电器,2009,45(5):130-132.

[3] 赵伟,万德均,岳建民.金属氧化物避雷器带电测量相间干扰研究[J].仪器仪表学报,2006,27(1):87-90.

[4] 张泽华.MOA 带电测试的现场干扰问题[J].高电压技术,2001,27(104):73-74.

[5] 胡道明,潘文霞.考虑两种干扰源下的 MOA 在线监测数学模型探讨[J].电力自动化设备,2004,24(12):67-69.

[6] 徐志钮,赵丽娟,丁傲,等.一种新的 MOA 阻性电流提取算法[J].电力自动化设备,2010,30(12):47-51.

[7] 王洪新,贺景亮.氧化锌避雷器在线监测中相间干扰的分析研究[J].高电压技术,1997,23(2):26-30.

[8] 高峰,郭洁,徐欣,等.交流金属氧化物避雷器受潮与阻性电流的关系[J].高电压技术,2009,35(11):2629-2633.

[9] 任新宇.模拟电荷法原理及其应用概述[J].科学之友,2009,4(11):1-3.

[10] 丁品南,钟雅凤,颜文.氧化锌避雷器阻性电流测量仪的研制及其应用[J].中国电力,2000,33(2):48-50.

[11] 郭洁,何计谋,李晓峰.750kV 金属氧化物避雷器电位分布研究[J].中国电力,2006,39(1):15-17.

[12] 颜旭,陈绍东,江润志,等.自然雷电下氧化锌避雷器残压特征分析[J].中国电力,2013,46(7):72-76.

[13] 周泽存.高电压技术[M].北京:中国电力出版社,2007.

[14] 冯慈璋.工程电磁场导论[M].北京:高等教育出版社,2000.

[15] 盛剑霓.工程电磁场数值分析[M].西安:西安交通大学出版社,1991.

作者简介:
何大猛(1988),硕士、工程师,研究方向为电气设备电磁分析与电力系统过电压防护。

(收稿日期:2018-09-12)

输电线路硬质管母线发热分析

赵 强,刘 意,邱中华,陈 波,马志方,王 鸿,周 静,郭定海
(国网四川省电力公司检修公司,四川 成都 610041)

摘 要:针对硬质管母线过热导致输电线路运行故障的问题,利用试验和仿真相结合,通过改变硬质管母线外接头螺栓力矩大小以及通过管母线电流的大小,发现影响硬质管母线发热的主要因素是接触压力和通流的大小。根据对影响因素的分析,提出减小接触面粗糙度以及增大材料热通量的措施,以改善硬质管母线发热状况,最后通过仿真模型验证了措施的有效性。

关键词:硬质管母线;接触压力;热对流;过热分析;大电流试验

中图分类号:TM726 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0052-05

Analysis on Overheating of Hard Tube Bus of Transmission Line

Zhao Qiang, Liu Yi, Qiu Zhonghua, Chen Bo, Ma Zhifang, Wang Hong,
Zhou Jing, Guo Dinghai
(State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:In order to study the failures of transmission line caused by overheating of hard tube bus, a large current test is designed. The main factors which affect the overheating of hard tube bus are the contact pressure and the passing current through changing the moment of the bolt torque and the size of the tube current. Based on the analysis of the influencing factors, the measures to reduce the roughness of the contact surface and increase the heat flux of the material are put forward to improve the heating condition of hard tube bus. Finally, the effectiveness of the proposed measures is verified by an effective simulation model.

Key words:hard tube bus; contact pressure; thermal convection; overheating analysis; large current test

0 引 言

硬质管母线主要应用在电力建设工程中电网输电导线与变电站变压器之间的导体连接、输电线路中的跳线、电力设备中的连接导体以及在大电流直流融冰装置中作过流导体。硬质管母线的质量和性能对输电线路的可靠运行有至关重要的作用^[1-4],具有承载电流大、结构简单、安装灵活等优点。硬质管母线正常工作时温升在 10 K 左右^[5],温升带来的电阻损耗也是电网能量损耗的重要部分。硬质管母线温度除了受自身散热性能影响之外,还受环境温度、风速等环境因素的影响。当温度超过一定范围后,其机械强度和电学性能将会受到严重影响,导致材料老化、寿命降低^[6]。温度过高一直是影响硬质管母线正常服役的重要原因。

下面采用试验与仿真结合的方法,通过改变螺栓力矩大小,探究接触压力对管母线发热的影响;通过改变硬质管母线的通流大小,探究电流对其发热的影响。根据对影响因素的分析,提出改善硬质管母线发热状况的相应措施,并通过建立仿真模型,验证措施的有效性。

1 硬质管母线过热理论分析

影响硬质管母线发热的因素有很多,包括管母线结构参数、连接方式、管母线间接触电阻等以及管母线热通量等性能的影响。

1.1 硬质管母线结构

工程上常用的硬质管母线主体部分是外径为 150 mm、管壁厚为 7 mm 的铝制空心长管,连接时将两管接触,然后两端对齐,保证硬质管母线两管呈

矩形,将管母线外接头连接紧固。结构如图 1 所示。

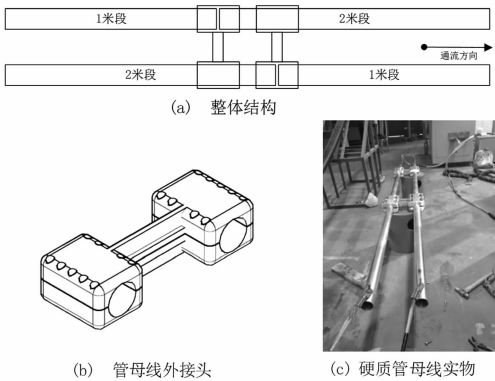


图 1 硬质管母线结构

电流在不同导体间流动时,导体接触面上会产生复杂的机械、电、热和化学现象,即电接触现象^[7-8]。在两导体表面实际接触处,接触电阻由收缩电阻和膜电阻两部分组成,即^[9]:

$$R_c = R_s + R_f \tag{1}$$

通过电接触理论,可以分析在此种连接结构下,可能影响硬质管母线发热的因素有以下方面:

- 1) 铝管连接处的接触面大小及其光滑程度;
- 2) 硬质管母线外接头紧固程度;
- 3) 硬质管母线的通流大小。

1.2 对流传热

热对流是热传递的重要形式^[10],硬质管母线热传递形式主要是自然对流。

考虑到硬质管母线本身的产热与散热,其中接触电阻产生的焦耳热使温度上升,同时由于环境温度的缘故,也在与空气对流,公式为

$$Q_{\text{流入}} + Q_{\text{生成}} - Q_{\text{流出}} = 0 \tag{2}$$

对于产生热对流的两种材料而言,流通热量将按照两接触材料导热系数进行分配:

$$q_i = \frac{I^2 R}{S_{\text{接触}}} \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_j} \tag{3}$$

式中: S 为接触面面积; I 为通过电流; R 为材料电阻; q_i 是流向材料的热流密度; λ_i 、 λ_j 为材料的导热率,硬质管母线铝管的导热率为 $200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,螺栓的导热率为 $50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,空气的导热率为 $5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2 大电流试验

2.1 电流对发热的影响

在进行试验时,由于螺栓压力测量较为困难,根

据公式(4)可以将螺栓拉力转换为螺栓扭矩。

$$M = kNd \tag{4}$$

式中: M 为螺栓扭矩值; N 为螺栓预拉力; d 为扭力计长度; k 为扭矩系数参数。

参照德国工程师协会标准 VDI2230^[11],可知型号 M12、性能等级 8.8、摩擦系数 1.0 的螺栓紧固扭矩为 $73 \text{ N} \cdot \text{m}$ (参数为试验用螺栓参数),因此试验设计最大扭矩为 $80 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。试验采用 FLIR TiX560 红外成像仪自带温度监测功能对外接头紧固状态下的管母线进行温度检测,其误差为 $\pm 0.045 \text{ }^\circ\text{C}$ 。大电流电源采用 1000 kVA 低压大电流发生器,误差为 $\pm 5\%$ 。

试验环境温度为 $7 \text{ }^\circ\text{C}$,电流分别为 0 A 、 200 A 、 400 A 、 600 A 、 800 A 和 1000 A 时的温度分布如图 2 所示。

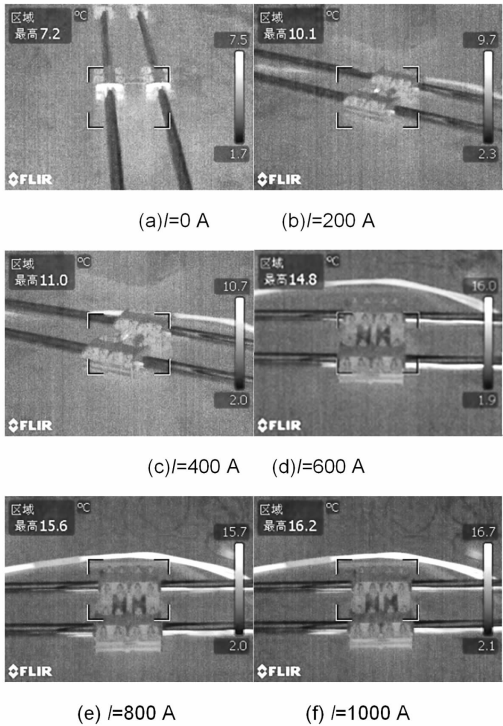


图 2 外接头紧固状态不同电流下硬质管母表面温度分布

从图 2 中可以看出:外接头紧固并加有大电流状态下,硬质管母线温度与环境温度相比有所上升,但温升不超过 10 K 。这与管母线在正常运行状态下的温升幅度一致,说明只要安装正确、操作规范,正常情况下硬质管母线不会出现过热等现象。

2.2 螺栓紧固力对发热的影响

硬质管母线表面温度与其管母线外接头上接触压力有关。通常硬质管母线与管母线外接头的接触面粗糙不平。当接触压力较小时,材料产生弹性变

形,此时只有很少的实际接触点。随着接触压力的增大,接触面会发生塑性变形,使实际的接触面积增大,同时增大接触压力可以压碎金属表面的薄膜,使膜电阻下降。所以增大接触压力,可以使接触电阻减小。但当总的塑性变形大到一定程度后,接触压力再增加,接触面积增大程度及接触电阻减小率明显减小。

在实验中,利用力矩扳手改变螺栓紧固力观察硬质管母线的发热与温升变化,其中力矩扳手长度为30 cm,用红外成像仪拍摄并记录管母线表面温度,将实验电流设定在800 A,所得结果如图3所示。

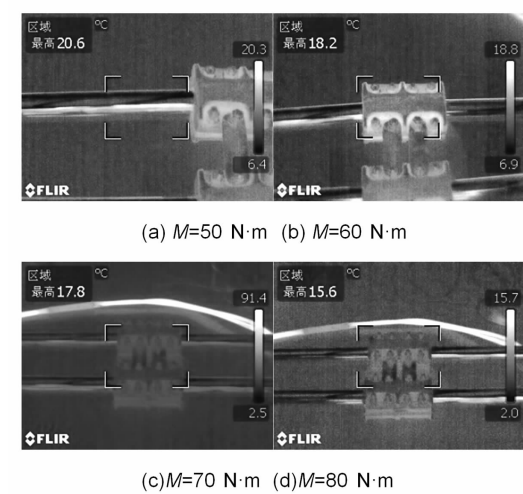


图3 800 A 不同力矩下硬质管母线表面温度分布

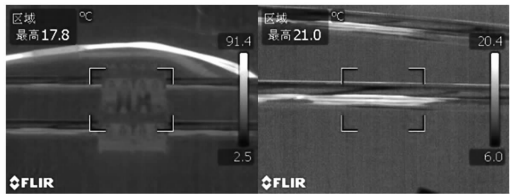
试验证实了在不同的螺栓紧固力作用下,硬质管母线的发热情况不同:在力矩扳手设定为最低扭力时硬质管母线出现最高温度值,此后温度随扭力增大而降低,在最大扭力时硬质管母线最高温度降至最低。由图3可看出,随着螺栓力矩由50 N·m变化到80 N·m,温度下降了5 K。

当扭矩达到70 N·m后,硬质管母外线接头温升在10 K以内,与其余部位正常工作时的温升相当。此后,随着扭矩的增加,温度的变化不再明显。这是由于接触压力已使绝大多数接触点产生塑性形变,接触面积已增大至临界值,此后接触压力的增加已很难产生更多的新接触点,接触面积达到稳定值。

2.3 不同部位发热状况分析

硬质管母线由于内部热交换快速且表面与空气接触面积较大,所以其发热严重的部位与温度最高部位可能不在同一处:硬质管母线之间接触面以及管母线与外接头之间接触面不可避免地有接触电

阻,会发出大量的热,一般情况下其温度较其他部位高;但随着螺栓紧固得越好,温度最高的部位会向硬质管母线中段移动,如图4所示。



(a)管母线外接头 (b)硬质管母线

图4 800 A、70 N·m 时管母线外接头与硬质管母线温度分布

造成这种现象的主要原因是:当螺栓紧固不足时,接触点处发热量增大,此时接触点处吸收热量增大、温度较高,随着螺栓紧固得越好,接触点处发热量减小,热量主要由管母线自身电阻产生;而外接头与空气接触面积较大,散热快,故外接头的温度反而较管母线中段低。

3 硬质管母发热仿真分析

3.1 仿真模型建立

通过仿真分析对大电流试验进行补充验证。使用有限元软件对硬质管母线进行仿真建模。建模后需要在软件中分别定义硬质管母线及其外接头以及螺栓的材料类型。金属材料的物理性能参数如比热容、导热率、弹性模量、屈服应力等一般都随温度变化而变化^[12]。当温度变化不大时,可采用材料物理性能参数的平均值进行计算。由于试验温升结果在100 K内,此处可以直接添加常系数的导热系数^[13]。硬质管母线及外接头的材料属性设置为:铝,导热率200 W/(m·K),密度2700 kg/m³。

所建立的模型如图5所示。

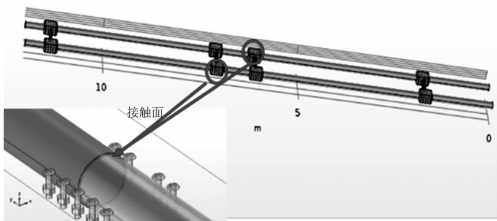


图5 硬质管母线仿真模型
硬质管母线各部件以及空气的导热率设置与实

际情况一致。将硬质管母线以接触面为分界点分为 A、B、C、D 4 个部分,如图 6 所示。

通过比较不同区域的温度分布情况,可以快速有效地分析硬质管母线的发热规律。

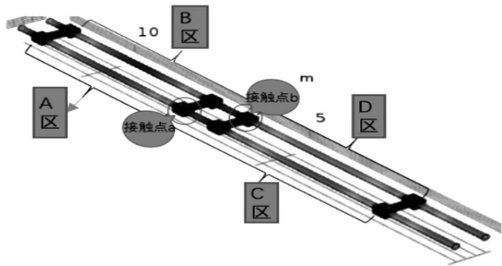


图 6 区域划分示意

3.2 硬质管母发热仿真分析

环境温度设置为 30 ℃,改变通流大小以及螺栓力矩,可以得到不同通流情况下最高温度随螺栓力矩变化的曲线如图 7 所示。由曲线可以清楚地发现:电流一定时,硬质管母线温度均随螺栓力矩的增大而降低。螺栓力矩由 50 N·m 到 80 N·m 变化的过程中,通流大小分别为 800 A、600 A、400 A 和 200 A 时,硬质管母线最高温度分别下降了 20.1 K、18.7 K、16 K 以及 13.5 K。说明随着电流的减小,螺栓的紧固状态对硬质管母线的发热影响也在降低,这主要是因为电流的减小会对接触电阻产生的焦耳热有影响,紧固状态对接触电阻的影响是固定的,因此当电流越小时,螺栓紧固状态对硬质管母线的发热影响越小。

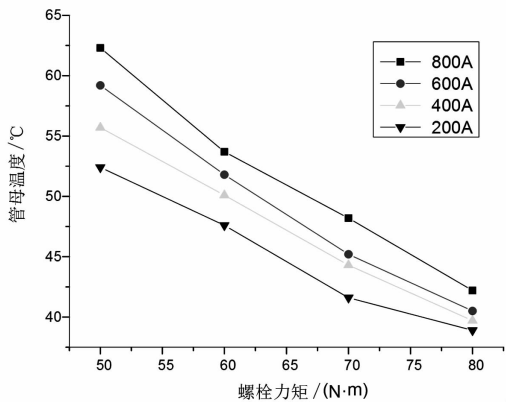


图 7 不同电流下管母温度随螺栓力矩变化曲线

同时,电流为 800 A 时,硬质管母线温度随螺栓力矩的变化趋势与大电流试验结果大体相同,说明仿真模型具有一定的有效性,可以用于分析改善措施对硬质管母线发热的影响。

3.3 改善措施及其仿真实验

通过以上的分析,得知发热的主要原因是接触电阻增大和通过电流过大。电流是由线路负荷决定,同一条特高压直流输电线路通流大小不容易人为调节,而接触电阻大小则可以通过改变接触面粗糙度控制。通过试验及仿真发现,影响接触电阻的主要因素有:接触压力、接触面平整度、温度等。一般情况下有两种途径可以降低硬质管母线的温升:一是通过减小接触电阻从而减小发热量;二是通过提升硬质管母线本身的散热性能,从而减缓温度上升的趋势。

减小接触电阻,即减小接触面的粗糙度,可以通过对接触面进行打磨以及在接触面表面涂抹电力脂等方法进行接触面粗糙度的改变。在仿真中就是将模型接触面的粗糙平均高度由 0.8 μm 调整为 0.5 μm,将表面粗糙平均斜率由 0.4 调整为 0.2,而其他参数均不变。当电流 800 A、螺栓力矩 50 N·m 时,可得硬质管母线温度分布如图 8 所示。将之与图 9 所示的改变粗糙度前同等条件下的温度分布图进行比较,可以看出:降低粗糙度后,在接触压力较小的情况下,温升由 32.3 K 降低到 22.9 K,下降了 9.4 K,改善效果明显。

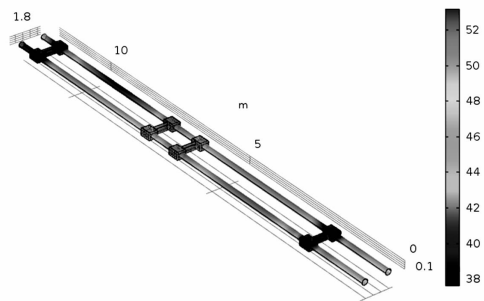


图 8 降低粗糙度后硬质管母线温度分布

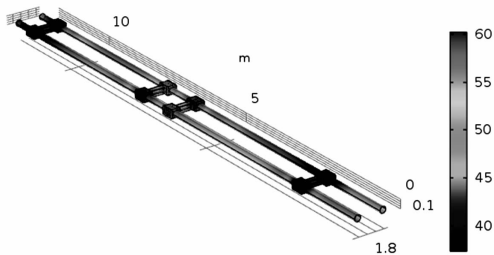


图 9 降低粗糙度前硬质管母线温度分布

改变硬质管母线材料的导热率,增加其耐热性能。实际生产中可通过在铝中加入一定量金属元素做成合金,增加铝制品熔点及其导热率。在仿真中,

其他参数保持不变,仅将模型的硬质管母线导热率由 $200\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加到 $250\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 即可。改变后硬质管母线在电流 800 A 、螺栓力矩 $50\text{ N}\cdot\text{m}$ 时的温度分布如图 10 所示。

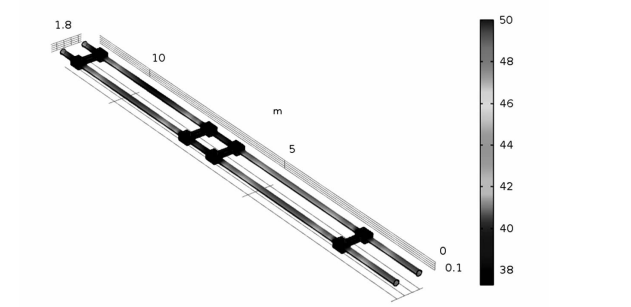


图 10 增加热通量后硬质管母线温度分布

比较热通量改变前后的温度变化可以发现:提升硬质管母线本身的散热性能,即增大其表面导热率,可以加快硬质管母线与空气的热交换,温升由 32.3 K 降低到 20.2 K ,下降了 12.1 K 。说明选取合适的铝合金制品提升硬质管母线的散热能力,可以有效缓解硬质管母线的发热问题。

4 结 论

- 1)通过对硬质管母线进行的大电流试验以及仿真结果的分析,其过热的主要原因是由于接触点处铝管接触不紧密,使硬质管母线自身产生的热量远大于其与空气进行热交换时的散热量。
- 2)通过仿真分析可以发现减小温升主要有两种途径:一是通过打磨以及涂抹电力脂等方法增加管母线连接处光滑程度以减小接触电阻,减少发热量;二是在铝制品中增加一定量金属元素做成合金,增加硬质管母线本身的导热率,从而减缓温度的上升。

参考文献

[1] 包健康,高波,张血琴. 500kV 输电线路耐张线夹电

(上接第 32 页)

[18] 王宁,谢敏,邓佳梁,等. 基于支持向量机回归组合模型的中长期降温负荷预测[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(3):92-97.

[19] 沈沉,秦建,盛万兴,等. 基于小波聚类的配变短期负荷预测方法研究[J]. 电网技术,2016,40(2):521-526.

接触计算及其发热研究[J]. 中国电力,2016,49(11):25-30.

[2] 丁永福,王祖力,张燕秉,等. $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流换流站阀厅金具的结构特点[J]. 高压电器,2013,49(9):13-18.

[3] 徐元哲,王乐天,刘雪冬,等. 电力电缆接头测温系统的设计[J]. 高电压技术,2009,35(12):2977-2982.

[4] 胡艳. 弓网系统在电滑动过程中材料转移特性的试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.

[5] 韩国栋. 焊缝缺陷对管母线导电性能和发热的影响研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.

[6] 韩国栋,吴章勤,万书亭,等. 管母线损耗发热状况多物理场分析计算[J]. 科学技术与工程,2014,14(28):214-219.

[7] 陈森昌,迟彦惠,张平. 电接触现象和接触电阻模型的研究进展[J]. 广东技术师范学院学报,2015,36(2):40-44.

[8] 潘良胜. 接触电阻影响因素的研究和分析[J]. 电气制造,2014(4):58-60.

[9] 何旭岩,黄旭骏,郑宏伟,等. 降低电气连接点过热的方法探讨[J]. 电子制作,2013(19):222.

[10] 龚炳林,刘银河,黄龙林. 浅析导电膏在电气连接中的作用[J]. 盐业与化工,2013,42(3):41-42.

[11] VDI 2230-1-2014, Systematic Calculation Of Highly Stressed Bolted Joints Joints with One Cylindrical Bolt [S].

[12] 产品集合技术规范(GPS)表面结构轮廓法表面粗糙度参数及其数值:GB/T 1031-2009[S],2009.

[13] 张文峰,彭向阳,陈锐民,等. 基于无人机红外视频的输电线路发热缺陷智能诊断技术[J]. 电网技术,2014,38(5):1334-1338.

作者简介:

赵 强(1975),高级工程师,从事输电线路运维检修工作;
刘 意(1982),高级工程师,从事输电线路运维检修工作;
邱中华(1986),高级工程师,从事输电线路带电作业工作。

(收稿日期:2018-09-13)

[20] 卢朝晖. 基于多用户的 Windows Azure 平台下的访问控制模型的设计[J]. 科技通报,2015,31(5):241-245.

作者简介:

王 帅(1988),本科、工程师,研究方向为电气工程及其自动化。

(收稿日期:2018-08-24)

基于 GA - SVR 数据融合的风机噪声预测述

余 金¹, 宋新甫¹, 高 明¹, 张增强¹, 李海峰^{1,2}

(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;
2. 能源与电力经济技术实验室(国网新疆电力有限公司经济技术研究院), 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:研究风电机组振动噪声特性对机组工况判别及故障诊断的意义,以永磁同步风电机组为例,建立基于遗传算法的支持向量回归(GA - SVR)的多源数据融合振动噪声预测模型。采集机组空载、负载及变化风速不同运行工况下的振动、噪声数据,基于信息熵理论处理后建立样本数据,并选择发电机主轴纵横两个方位、齿轮箱高速轴和低速轴纵横两个方位的振动数据为模型输入变量,机组的噪声数据为模型输出变量,建立 GA - SVR 特征级融合预测模型,以实测数据验证预测模型。结果表明,该预测模型在机组噪声预测应用中,能得到较精确的噪声波动趋势及预测值,具有实际应用可行性。

关键词:风电机组;发电机;噪声预测;遗传算法;支持向量机

中图分类号:TM614 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2019)01 - 0057 - 06

Noise Prediction of Wind Turbine Based on Data Fusion of GA - SVR

Yu Jin¹, Song Xinfu¹, Gao Ming¹, Zhang Zengqiang¹, Li Haifeng^{1,2}

(1. State Grid Xinjiang Economic Research Institute, Urumqi 830000, Xijiang, China;
2. Energy and Power Economy Technology Laboratory, State Grid Xinjiang
Economic Research Institute, Urumqi 830000, Xijiang, China)

Abstract:In order to research the significance of vibration noise characteristics of wind turbine on the diagnosis of operation conditions and fault of the unit, taking a permanent magnet synchronous wind turbine as an example, a multi - source data fusion noise prediction model based on genetic algorithm - based support vector regression (GA - SVR) is established. The vibration noise of the unit under different operation conditions such as no - load, load and variation of wind speed are simulated, and the sample data after processing based on information entropy theory are set up. The radial and axial of generator shaft and the high - speed shaft and low - speed shaft of gearbox are selected as input variables as well as the noise data as output variables, so a GA - SVR feature - level fusion prediction model is established, and it is verified with the measured data. The results show that the prediction model can obtain more accurate noise fluctuation trend and predictive values in the noise prediction application, which has a practical application feasibility.

Key words:wind turbine; generator; noise prediction; genetic algorithm; support vector machine

0 引 言

风电产业随新能源需求的日益增大,不断蓬勃发展,风力发电技术也日趋完善。作为风机选择及风电场选址重要指标参数的风电机组噪声及其衍生问题,也逐渐被科研人员重视起来^[1-3]。文献[4]评价并指出了风电机组中发电机所发低频噪声对居

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5230JY170003);国家电网有限公司科技项目(5230JY170002);国家新疆电力有限公司科技项目(5230JY180001)

民生活的相关影响。文献[5]仿真验证了风电机组所辐射的噪声信号,其参数声压级中包含有机组运行状态信息。文献[6]以风电机组振动、噪声信号长期检测为研究基础,发现并分析了机组振动、噪声信号之间存在的相关性。由此表明,进行风电机组噪声预测的研究具有极重要的现实意义。

目前,针对风电机组的噪声信号研究,主要以风机气动噪声为出发点,对机组机械噪声的探索研究十分少。以实验室环境为基础,分析研究永磁同步风电机组的振动、噪声相关性,模拟机组空载、负载

及加有风速逐渐变化的运行状态,实时采集各运行状态下风电机组发电机主轴纵横两个方位、齿轮箱的高速轴与低速轴纵横两个方位的振动信号数据和风电机组整机的噪声信号数据^[7],并通过信息熵理论计算提取数据的特征量作为样本数据,建立基于遗传算法的支持向量回归(genetic algorithm – based support vector regression, GA – SVR)的多源数据融合噪声预测模型,为实现以振动噪声相关性为基础的振动、噪声预测提供参考,并为开展机械噪声的预测研究提供参考。

1 风电机组振动与噪声

大型风电机组的噪声特性参数一直以来被视为其质量评定的重要指标。同时,有学者研究指明风电机组所辐射产生的振动与噪声信号间存在有一定的相互关联性。事实上,机组运行时的噪声数据根据国标要求有很大的采集难度,但其对风电机组的运行状态研究又十分重要^[8]。因此,开展对风电机组实时运行中噪声信号的预测研究,具有极为重要的现实发展意义。

2 实验模拟和数据采集

实验研究数据通过振动检测设备 EMT690D 和噪声检测设备 SVAN958A,对标准干净的实验室环境下的 20 kW 永磁同步风电机组(不含叶片)进行实验模拟,该机组的具体参数如表 1 所示。采集分为数据的信号检测和后台处理两个部分。信号检测通过振动传感器与声级计完成,采集到的实时数据需经滤波,再转成数字信号显示、储存于后台运行计算机,采集过程如图 1 所示。

表 1 永磁同步风力发电机组参数

发电机型号	齿轮箱型号	齿轮箱速比	输出扭矩 /(N·m)
SZ20kW-40	XWD9	1:7	7100
额定转速 /(r·min ⁻¹)	额定功率 /kW	额定电流 /A	额定电压 /V
80	20	40	380

测振点分别设置于机组中发电机主轴端纵横两个方位、齿轮箱高速轴和低速轴的纵横两个方位。以振动传感器为基准,在其同侧设置与机组轴承等高的声压级传感器,保持声压级传感器与机组水平测距为1.5m。数据采集中设置振动、噪声采样频

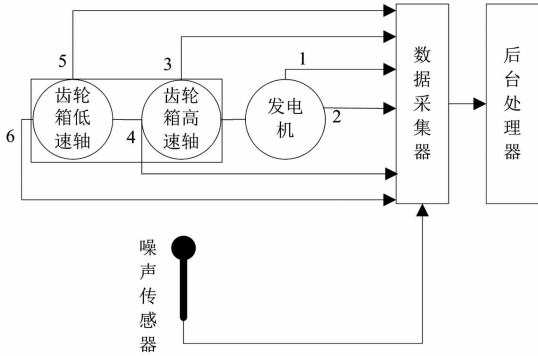


图 1 振动与噪声的信号采集

率一致,均为 200 Hz,选取振动加速度和声压级作为本次测量的主要参数。

在实验室环境下,分别模拟了风电机组的空载运行、空载运行时变速和匀速增加调节风速、负载 6 kW 运行、负载 6 kW 运行时变速和匀速增加调节风速,并同步采集在不同实验中对应的振动、噪声数据。

3 噪声预测模型的建立

3.1 信息熵

设 M 为易被观察的集合 H 构成的勒贝格空间(Lebesgue space),设空间测度为 μ 且有 $\mu(M) = 1$ 。设空间 M 可被 $A = (A_i)$ 有限划分和表示为有限的互不相容的集合,即: $M = \bigcup_{i=1}^n A_i$,且有 $A_i \cap A_j = \emptyset, \forall i \neq j$,其中 $\frac{A_i}{M}$ 是划分后任意子集 A_i 的所得配额份量。由此条件,即得出 M 的信息熵:

$$S(A) = - \sum_{i=1}^n \mu(A_i) \log \mu(A_i) \tag{1}$$

式中, $\mu(A_i) = \frac{A_i}{M}$ 是任意子集 A_i 的测度, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

研究分析表明,以奇异谱熵、功率谱熵、小波能谱熵和小波空间谱熵 4 种信息熵为基础,对振动、噪声信号进行特征量的提取,可以较完整地保留信号各特征信息^[9]。

奇异谱熵能够实现数据时域的特征提取。设已有空间 A 为 $M \times N$ 的矩阵,对其进行奇异分解可得对应的奇异值谱 $\{\sigma_i\}, 1 \leq i \leq m$,对这些谱值按一定方式进行比例划分,遵循 $p_i = \sigma_i / \sum_{i=1}^m \sigma_i$,则可定义得奇异谱熵 H_i 为

$$H_i = - \sum_{i=1}^m p_i \log p_i \tag{2}$$

功率谱熵能够实现数据频域的特征提取。设 $S = \{S_1, S_2, \cdots, S_n\}$ 为信号在频域空间中的能量划分,并以此划分下的功率谱概率为基础进行 $q_i = S_i / \sum_{i=1}^n S_i$ 的计算。最后,对这些划分进行功率谱熵 H_f 计算:

$$H_f = - \sum_{i=1}^n q_i \log q_i \tag{3}$$

小波能谱熵和小波空间谱熵则能够实现数据基于时频域的特征提取。假设能量函数 $f(t)$ 满足小波变换后的能量守恒定律,则:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{c_\psi} \int_0^{+\infty} a^{-2} E(a) da$$

$$c_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{w} dw$$

$$E(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \tag{4}$$

式中, $E(a)$ 是函数 $f(t)$ 在尺度为 a 时的能量表示, $E = \{E_1, E_2, \cdots, E_n\}$ 是信号 $f(t)$ 分别在 n 个不同尺度下的小波能谱。 $q_i = E_i / \sum_{i=1}^n E_i$ 为任意尺度下的小波能谱在能量谱中的划分占有。由此计算出小波能谱熵:

$$H_{we} = - \sum_{i=1}^n q_i \log q_i \tag{5}$$

设 $W = [|W_f(a, b)|^2 / c_\psi a^2]$ 是信号在二维空间度中的能量分布阵。因此,可以求得对应的奇异值谱 $\{\sigma_i\}, i = 1, 2, \cdots, n$ 及其对应的划分占有比例 $p_i = \sigma_i / \sum_{i=1}^n \sigma_i$ 。由此计算出小波空间谱熵为

$$H_{ws} = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \tag{6}$$

3.2 多源数据融合

多源数据融合技术在处理多层次、多方面等过程上有着极广泛的应用。该技术能实现全面的对多传感器采集的多数据进行检测、相关、组合和估计等处理,提升了其在状态、身份识别应用中的精准度,并且该技术还能完成对极为复杂的多变化态势的实时评测。该技术在实际应用中,通过多个传感单元实现多源证据信息的获取,然后全面地对这些证据信息进行融合,从而有效实现了比单一传感更精准、更稳当、更有效的解析和判别^[10]。

多源数据特征级融合,是在传感单元处便开始进行数据的特征提取,然后对提取的特征量进行解析实现最终的融合,如图2所示。

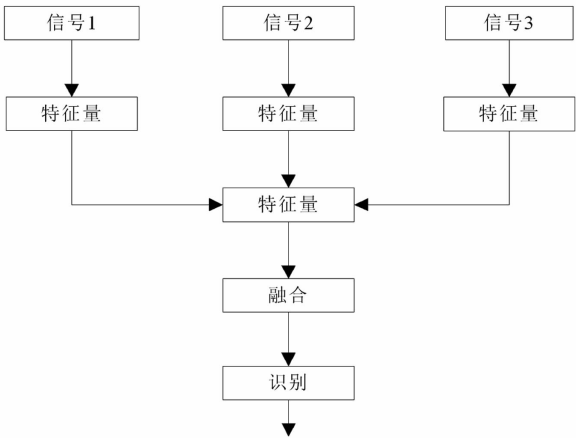


图2 特征级融合

3.3 GA-SVR 算法

一般的支持向量机回归 (support vector regression, SVR), 因其核函数可以完成矩阵运行及相应的乘积运算等, 在进行二次规划问题研究中相较其他一般算法效率和功能有所提升^[11]。

基于遗传算法 (genetic algorithm, GA) 的 SVR 预测, 以 GA 完成优化。该算法能够自适地实现随机搜寻, 并在全局较大概率地得到最优解, 确定得到较优的惩罚因子 c 与核函数半径 g 等。同时, 基于遗传算法的支持向量机回归 (GA-SVR) 结合了 ϵ -不灵敏损失函数, 提高了算法在应用中的鲁棒性和泛化性^[12]。GA-SVR 的预测流程如图3所示。

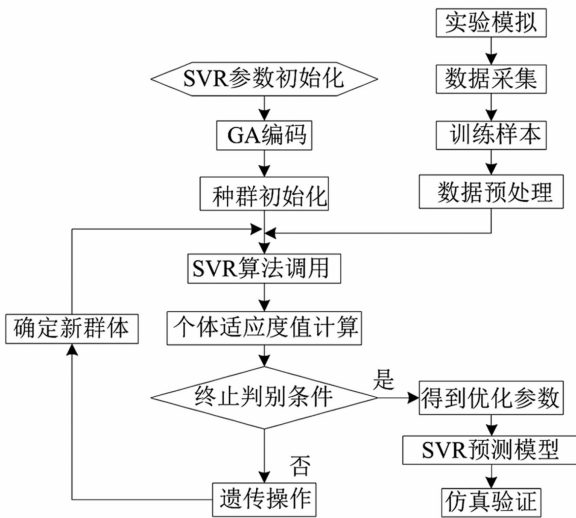


图3 GA-SVR 的预测流程

3.4 多源数据特征级融合与 GA-SVR 相结合

通过信息熵理论计算提取振动、噪声数据的特征量,特征量中保留有信息特征,并以此为样本数据在 GA-SVR 中完成多源数据特征级融合,建立预测模型实现风电机组振动、噪声预测,其流程如图4所示。

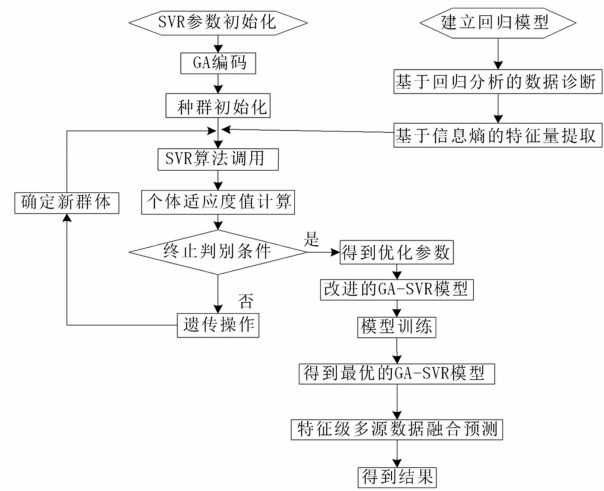


图 4 多源数据融合结合改进的 GA - SVR

4 仿真结果和分析

4.1 数据样本

实验中选择用 Matlab 编写、实现模拟仿真,并以同步测得的实际振动、噪声数据样本为依据,随机选取样本数据 100 个,用式(2)、式(3)、式(5)、式(6)分别计算出样本数据点的奇异谱熵值、功率谱熵值、小波能谱熵和小波空间谱熵值,如表 2 所示。将这些特征数值作为输入样本进行模型的构建和完善训练。首先,随机选取数据样本库中的 70 个样本点为基础训练数据,对模型进行完善训练,再以完善的训练模型预测随机选取的 30 个样本点对应的声压级,最后进行预测结果与实际样本值的比较,计算出相对误差及平均相对误差。相对误差的大小用于直观反映预测结果的可信度,平均相对误差的大小

用于间接验证预测结果是否为可接受。

4.2 结果分析

首先,实验模拟风电机组空载运行的状态,以振动数据参数预测噪声数据参数,将预测结果的值与实测样本值进行比较,如图 5 所示,并计算得出相对误差百分比,如图 6 所示,相对误差的平均值如表 3 所示。

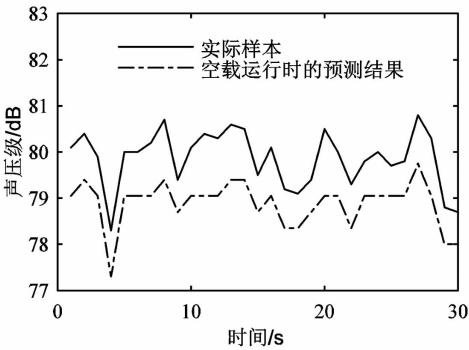


图 5 空载运行时的预测结果

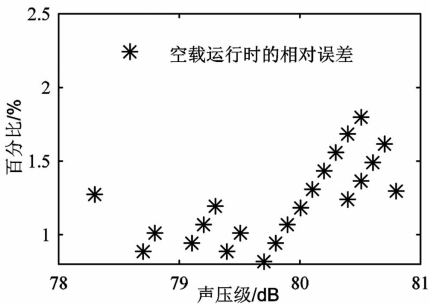


图 6 空载运行时的相对误差

图 5 表明幅值存在小幅度误差,波动趋势基本一致。同时,图 6 中的相对误差均不高于 2%,且以小于 1.5% 为主,表明预测精度较高;平均相对

表 2 特征量熵值的部分计算结果

样本点	奇异谱熵 (HHT)	奇异谱熵表 (小波)	功率谱熵 (HHT)	功率谱熵 (小波)	小波能谱熵	小波空间 谱熵
1	56.044 352	89.664 96	5.637 492	7.324 273	0.979 079	99.712 29
2	30.355 616	89.505 09	4.389 894	7.383 375	0.903 201	99.841 85
3	25.824 474	88.739 86	3.915 231	7.322 817	3.494 736	99.552 63
4	45.052 191	89.779 79	5.018 310	7.388 075	0.849 476	99.724 23
5	29.373 089	89.733 50	4.381 837	7.354 744	10.742 66	99.532 77
6	29.431 296	89.721 60	4.0892 545	7.351 689	0.912 249	99.679 92
7	45.210 494	89.435 68	5.096 884	7.368 043	0.777 791	99.793 05
8	23.342 649	89.343 03	3.861 155	7.336 220	1.850 124	99.740 64
9	15.473 443	89.268 88	3.6150 82	7.344 845	2.689 231	99.391 89
10	27.035 722	87.277 65	3.961 777	7.441 320	1.059 100	99.945 40

误差仅为 1.221 1%,直观地表现出可以接受的预测结果。

实验模拟空载运行时变速和匀速增加调节风速的运行状态,将预测结果的值与实测样本值进行比较,如图 7 所示,并计算得出相对误差百分比,如图 8 所示,相对误差的平均值如表 3 所示。

图 7 表明幅值也存在小幅度误差,但波动趋势基本一致。图 8 中的相对误差均不高于 3%,且以小于 1.8% 为主,表明预测精度较高;平均相对误差仅为 1.232 2%,直观地表现出可以接受的预测结果。

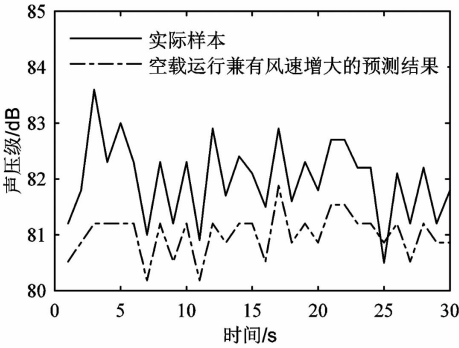


图 7 空载运行时风速增大的预测结果

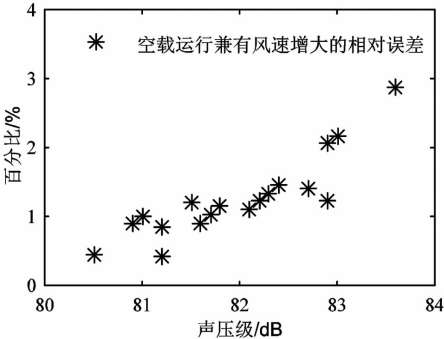


图 8 空载运行时风速增大的相对误差

实验模拟负载 6 kW 运行的状态,将预测结果的值与实测样本值进行比较,如图 9 所示,并计算得出相对误差百分比,如图 10 所示,相对误差的平均值如表 3 所示。

表 3 相对误差的平均值

运行情况	相对误差平均值/%
空载	1.221 1
空载时风速增大	1.232 2
负载 6 kW	1.233 0
负载 6 kW 时风速增大	1.112 1

图 9 表明幅值存在小幅度误差,波动趋势基本一致。图 10 中的相对误差均不高于 1.6%,且以小于 1.5% 为主,表明预测精度较高;平均相对误差仅为 1.233 0%,直观地表现出可以接受的预测结果。

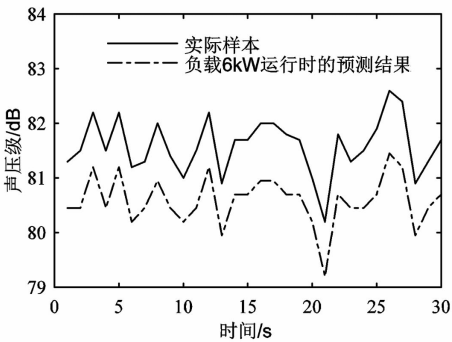


图 9 负载 6 kW 运行时的预测

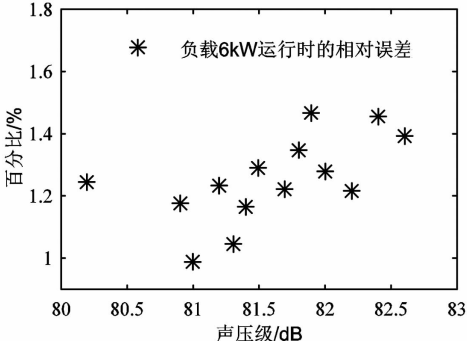


图 10 负载 6 kW 运行时的相对误差

实验模拟负载 6 kW 运行时变速和匀速增加调节风速的运行状态,将预测结果的值与实测样本值进行比较,如图 11 所示,并计算得出相对误差百分比,如图 12 所示,相对误差的平均值如表 3 所示。

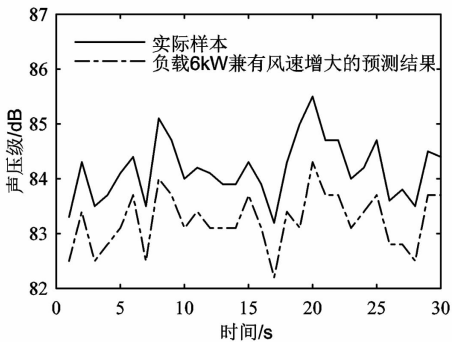


图 11 负载 6 kW 运行时风速增大的预测

图 11 表明幅值存在小幅度误差,波动趋势基本一致。图 12 中的相对误差均不高于 2.5%,且以小于 1.5% 为主,表明预测精度较高;平均相对误差仅为 1.112 1%,表明预测结果可以接受。

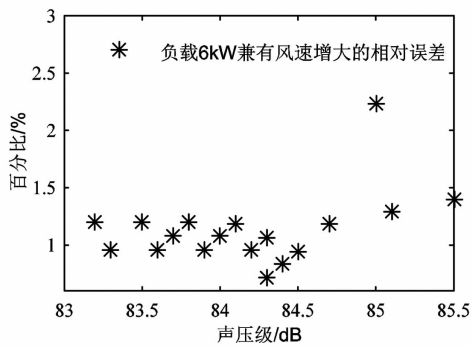


图 12 负载 6 kW 运行时风速增大的相对误差

5 结 语

通过分析研究大型永磁同步风力发电机组振动信号与噪声信号的现实特征,和它们之间的相互关联与影响特性,提出了运用信息熵的优秀特征提取特性,完成振动数据参数对噪声数据参数的有效预测思路。在标准干净的实验室环境下模拟了机组运行时可能出现的不同运行状态,并对风电机组中发电机的主轴径向与轴向、齿轮箱高速轴和低速轴径向与轴向的振动数据、整机噪声进行了实时采集,并以信息熵理论为基础对采集到的样本数据进行了特征量的提取。最后,应用基于多源数据特征级融合的 GA - SVR 噪声预测方法,对所提出的预测思想进行了验证。

实验结果表明,基于多源数据特征级融合的 GA - SVR 噪声预测,预测值与实际值之间尚有一定误差,分析推测可能是受电磁振动、噪声的影响,但获取的预测结果能满足较高的精度要求,并准确地在预测结果中得到了与实际情况一致的噪声波动趋势,这将为风电机组运行预测和早期故障诊断提供有效的参考和依据。

参考文献

[1] Tachibana Hideki, Yano Hiroo, Sakamoto Shinichi, et al. Synthetic Research Program on Wind Turbine Noise in Japan [C]. USA: Institute of Noise Control Engineering of the USA, 2012.

[2] SON E, KIM H, KIM H, et al. Integrated Numerical Method for The Prediction of Wind Turbine Noise and the Long Range Propagation [J]. Current Applied Physics, 2010, 10(2): S316 - S319.

[3] Kuwano Sonoko, Yano Takashi, Kageyama Takayuki, et al. Social Survey on Wind Turbine Noise in Japan [J]. Noise Control Engineering Journal, 2014, 62(6): 503 - 520.

[4] Tachibana Hideki. Outcome of Systematic Research on Wind Turbine Noise in Japan [C]. Australia: Australian Acoustical Society, 2014.

[5] 吴宏钢. 风力发电机组振动检测及噪声评估研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

[6] Allaei Daryoush. Root Causes of Noise and Vibration in Wind Turbine Systems [C]. USA: International Institute of Acoustics and Vibrations, 2010.

[7] 余金, 何山, 程静, 等. 基于 GA - SVR 的永磁同步风电机组多工况噪声预测 [J]. 可再生能源, 2016, 34(2): 226 - 231.

[8] Yu Shenbo, Li Lei, Cao Shen. Modal Analysis of Stator and Rotor in Large Capacity Permanent Magnet Motor [J]. Machinery Electronics and Control Engineering, 2013, 313(10): 41 - 44.

[9] 化柏林, 李广建. 大数据环境下多源信息融合的理论与应用探讨 [J]. 图书情报工作, 2015, 59(16): 5 - 10.

[10] 刘同明, 夏祖勋, 解洪成. 数据融合技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.

[11] Baydaroglu Ozlem, Kocak Kasim. SVR - based Prediction of Evaporation Combined with Chaotic Approach [J]. Journal of Hydrology, 2014, 508: 356 - 363.

[12] Sanz - Garcia A, Fernandez - Ceniceros J, Antonanzas - Torres F, et al. GA - PARSIMONY: A GA - SVR Approach With Feature Selection and Parameter Optimization to Obtain Parsimonious Solutions for Predicting Temperature Settings in a Continuous Annealing Furnace [J]. Applied Soft Computing Journal, 2015, 35: 13 - 28.

作者简介:

余 金(1991), 硕士研究生, 研究方向为配电网规划。
(收稿日期: 2018 - 09 - 11)

欢迎订阅《四川电力技术》

V²C 控制 Buck 变换器输出电容 ESR 临界值研究

游志昆

(国网宜宾供电公司,四川 宜宾 644000)

摘要:针对输出电容等效串联电阻对变换器性能具有较大影响,以 V²C 控制 Buck 变换器为例,建立了其分段线性模型,推导了 Jacobi 矩阵及其特征根,给出了变换器由稳定变为不稳定时 ESR 的临界值。研究表明,V²C 控制在 V²控制中引入电感电流反馈,增大了稳定工作范围。所得结论可以对分布式发电系统中 DC-DC 变换器设计和器件选型提供指导。

关键词:等效串联电阻(ESR);PSIM;开关变换器;V²C 控制

中图分类号:TM46 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0063-05

Research on Critical ESR of Output Capacitor for V²C Controlled Buck Converter

You Zhikun

(State Grid Yibin Electric Power Supply Company, Yibin 644000, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the great influence of output capacitor equivalent series resistance (ESR) on the performance of converters, the piecewise linear model is established by taking V²C controlled Buck converter for example. Jacobi matrix and its eigenvalues are derived, and the critical ESR is given when the stable state of converter transfers to the unstable state. The results show that the inductance current is introduced as the feedback in V²C control, which broadens the range of stability. The obtained conclusions can provide a guidance for DC-DC converter design and device selection in distributed generation systems.

Key words: equivalent series resistance(ESR); PSIM; switching converter; V²C control

0 引 言

太阳能光伏发电因清洁无污染、资源丰富等优点在分布式发电系统获得了广泛应用。其中,DC-DC 变换器作为关键的电能转换与平衡设备,其工作状态将直接影响发电质量,进而影响负载、电网等^[1-3]。DC-DC 变换器的控制方法决定了其瞬态响应速度、输出电压稳态精度。传统电压型控制检测输出电压作为单环反馈,根据电压变化进行控制,响应速度慢。峰值电流控制检测电感电流(或开关电流)作为补充,输入瞬态响应速度快,但不能精确控制电流,负载瞬态响应速度也没有提高。V²控制则检测滤波回路中电容的等效串联电阻纹波作为内环反馈,取代峰值电流控制中电流反馈,负载瞬态响

应速度快,但是抗干扰能力差,且不能控制电流。V²C 控制内环既检测电感电流(或开关电流),又检测输出电容纹波,具有响应速度快与限制电流等优点^[4]。

已有对 DC-DC 变换器的研究发现,输出电容等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)对变换器的控制性能起到至关重要的作用。当 ESR 较大时,变换器工作正常;当 ESR 较小时,变换器将出现次谐波振荡等不稳定工作状态,甚至失效^[5-7]。当分别选用陶瓷电容和 OSCON 电容作为固定开通时间(constant on-time, COT)控制 Buck 变换器输出滤波电容时,前者 ESR 为 5 mΩ,后者 ESR 为 20 mΩ;采用陶瓷电容时,变换器出现次谐波振荡,采用 OSCON 电容时,变换器工作正常^[5]。针对 ESR 对变换器工作性能具有较大影响,以 V²C 控制 Buck 变换器为例,建立其分段线性模型,推导 Jacobi 矩阵及其

特征根,给出变换器由稳定状态变为不稳定状态时的ESR临界值,可以为分布式发电系统中DC-DC变换器设计和器件选型提供指导。

1 V²C 控制 Buck 变换器建模

1.1 实现原理

图1为V²C控制Buck变换器实现原理图和主要波形。V²C控制内环采用电感电流与输出电压加权求和后作为反馈量, ω_c 、 ω_v 分别为电感电流权重系数、输出电压权重系数。V²C控制的内环相当于在峰值电流控制的电流反馈环中引入了输出电压反馈,或相当于在V²控制中引入电感电流反馈。

从每一个开关周期 T 的初始时刻开始,锁存器 V_p 输出为“ON”,此时开关管 S_1 导通,二极管 S_2 关断,电源 E 供电给负载 R ,同时电容 C 充电,电感电流 i_L 和输出电压 v_o 上升,当检测电压 v_s 与 v_k 相等时,比较器使 V_p 输出“OFF”, S_1 关断, S_2 导通, v_o 与 i_L 下降,直到下一个时钟信号开启新的开关周期。如图1(b)为V²C控制Buck变换器为电感电流连续导电模式时(continuous conduction mode, CCM)的主要波形。

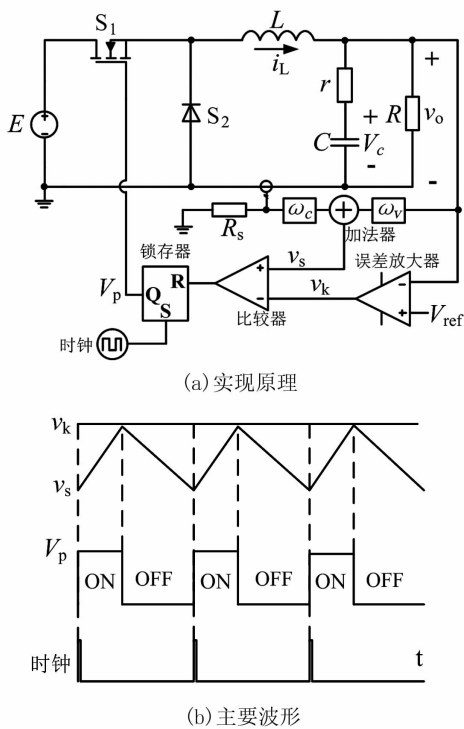


图1 V²C 控制 Buck 变换器

1.2 分段线性模型

忽略变换器输出电压纹波对电感电流的影响,

假定其电流上升和下降的斜率均为常数,变换器在整个周期内是分段线性的。在第 n 个周期开始时, v_n 、 i_n 为电容电压与电感电流初值,开关管 S_1 导通,二极管 S_2 关断时,电感电流和电容电压满足^[7]:

$$i_{n+d} = i_n + m_1 t_{on} \tag{1}$$

$$v_{n+d} = v_n + \frac{i_n - i_o}{C} t_{on} + \frac{m_1}{2C} t_{on}^2 \tag{2}$$

式中: m_1 为电感电流上升的斜率; i_o 为输出电流; t_{on} 为开关管 S_1 导通的时间。

当开关管 S_1 关断,二极管 S_2 导通时,电感电流和电容电压满足:

$$i_{n+f} = i_{n+d} - m_2 t_{off} \tag{3}$$

$$v_{n+f} = v_{n+d} + \frac{i_{n+d} - i_o}{C} t_{off} - \frac{m_2}{2C} t_{off}^2 \tag{4}$$

式中: m_2 为电感电流下降的斜率; t_{off} 为二极管 S_2 导通的时间。

在第 n 个周期结束时,电感电流和电容电压满足:

$$i_{n+1} = i_{n+f} \tag{5}$$

$$v_{n+1} = v_{n+f} - \frac{i_o}{C} t_{off2} \tag{6}$$

变换器内环检测电压为

$$v_s = \omega_c R_s i_L + \omega_v v_o \tag{7}$$

式中: $0 \leq \omega_c \leq 1, 0 \leq \omega_v \leq 1$,且 $\omega_c + \omega_v = 1$;当 $\omega_c = 1$ (亦即 $\omega_v = 0$)时,图1变成如图2所示的峰值电流控制;当 $\omega_v = 1$ (亦即 $\omega_c = 0$)时,图1变成如图3所示的V²控制。

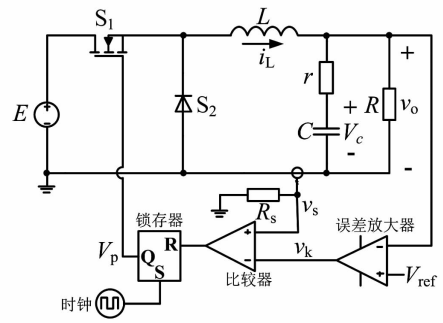


图2 峰值电流控制 Buck 变换器

由图1得开关管 S_1 关断时满足:

$$v_s = v_c = K(V_{ref} - v_o) \tag{8}$$

式中, K 为误差放大器比例系数。

式(1)至式(4)和式(8)为变换器工作在CCM模式时的模型,此时 $i_{n+1} = i_{n+f}, v_{n+1} = v_{n+f}, t_{off} = T - t_{on}$;式(1)至式(6)和式(8)为变换器工作在DCM模式时的模型,此时 $i_{n+1} = i_{n+f} = 0, t_{off2} = T - t_{on} - t_{off}$ 。

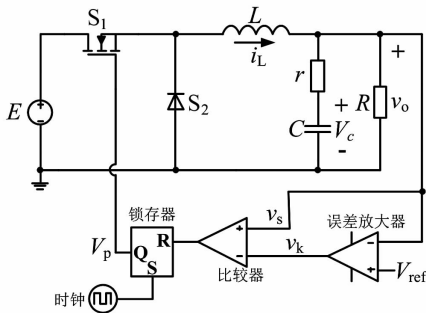


图 3 V^2 控制 Buck 变换器

2 ESR 临界值推导

Buck 变换器的 Jacobi 矩阵为^[7]

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \bigg|_{i_n = I_L, v_n = V_C} \quad (9)$$

变换器工作在 CCM 模式时,通过式(1)至式(4)得到 Jacobi 矩阵元素为

$$J_{11} = \frac{\partial i_{n+1}}{\partial i_n} = 1 + (m_1 + m_2) \frac{\partial t_{on}}{\partial i_n} \quad (10)$$

$$J_{12} = \frac{\partial i_{n+1}}{\partial v_n} = (m_1 + m_2) \frac{\partial t_{on}}{\partial v_n} \quad (11)$$

$$J_{21} = \frac{\partial v_{n+1}}{\partial i_n} = \frac{T}{C} \left(1 + m_1 \frac{\partial t_{on}}{\partial i_n} \right) \quad (12)$$

$$J_{22} = \frac{\partial v_{n+1}}{\partial v_n} = 1 + \frac{(m_1 + m_2) t_{off}}{C} \cdot \frac{\partial t_{on}}{\partial v_n} \quad (13)$$

变换器工作在 DCM 模式时,元素 $J_{11} = J_{12} = J_{21} = 0$,根据式(1)至式(6)得 J_{22} 为

$$J_{22} = 1 + \frac{m_1 (m_1 + m_2) t_{on}}{m_2 C} \cdot \frac{\partial t_{on}}{\partial v_n} \quad (14)$$

通过式(8)得:

$$\frac{\partial t_{on}}{\partial i_n} = \frac{-2rC - 2t_{on} - 2\omega_k R_s C}{2m_1 rC + m_1 t_{on} + 2m_1 \omega_k R_s C} \quad (15)$$

$$\frac{\partial t_{on}}{\partial v_n} = \frac{-2C}{2m_1 rC + m_1 t_{on} + 2m_1 \omega_k R_s C} \quad (16)$$

式中, $\omega_k = \omega_c / (\omega_v + K)$ 。

CCM 工作模式时 Jacobi 矩阵如下:

$$\begin{cases} J_{11} = \frac{-(M_1 + 2M_2)T_{on} - 2M_2 C(r + \omega_k R_s)}{(2rC + T_{on} + 2\omega_k R_s C)M_1} \\ J_{12} = \frac{-2(M_1 + M_2)C}{(2rC + T_{on} + 2\omega_k R_s C)M_1} \\ J_{21} = \frac{-T_{on}T}{(2rC + T_{on} + 2\omega_k R_s C)C} \\ J_{22} = \frac{2M_1 C(r + \omega_k R_s) - (2M_1 + M_2)T_{off}}{(2rC + T_{on} + 2\omega_k R_s C)M_1} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $M_1, M_2, T_{on}, T_{off}$ 为稳态值。

DCM 工作模式时 Jacobi 矩阵如下:

$$\begin{cases} J_{11} = J_{12} = J_{21} = 0 \\ J_{22} = \frac{M_1 M_2 C(r - \omega_k R_s) - M_1 T_{on}^2 - M_2 I_o}{M_1 M_2 C(r - \omega_k R_s) + M_1 M_2 T_{on} - M_2 I_o} \end{cases} \quad (18)$$

Jacobi 矩阵的特征方程为^[5]

$$\det[\lambda I - J] = 0 \quad (19)$$

解得 Jacobi 矩阵特征根 λ_1, λ_2 为

$$\lambda_{1,2} = 0.5(J_{11} + J_{22}) \pm 0.5 \sqrt{(J_{11} - J_{22})^2 + 4J_{12}J_{21}} \quad (20)$$

变换器稳定工作时,特征根 λ_1, λ_2 均在单位圆内部,满足^[5]:

$$|\lambda_{1,2}| < 1 \quad (21)$$

根据式(17)、式(20)和式(21)解得,CCM 模式时 ESR 临界值为

$$r_{c1} = \frac{T}{2C} + \frac{D^2 T}{(1 - 2D)C} - \omega_k R_s, D < 0.5 \quad (22)$$

式中, D 为开关管 S_1 导通占空比。

DCM 模式时,考虑到 t_{on} 为^[6]

$$t_{on} = \sqrt{\frac{2LV_o T}{RE(E - V_o)}} \quad (23)$$

根据式(18)至式(21)解得此时 ESR 临界值:

$$r_{c2} = \frac{1 - 2G}{2C} \sqrt{\frac{2\tau T}{1 - G}} + \frac{G\tau/C}{1 - G} - \omega_k R_s \quad (24)$$

式中: $\tau = L/R; G = v_o/E$, 为电压传输比。

特别地,峰值电流控制 ESR 临界值为

$$\begin{cases} r'_{c1} = \frac{T}{2C} + \frac{D^2 T}{(1 - 2D)C} - \frac{R_s}{K}, D < 0.5 \\ r'_{c2} = \frac{1 - 2G}{2C} \sqrt{\frac{2\tau T}{1 - G}} + \frac{G\tau/C}{1 - G} - \frac{R_s}{K} \end{cases} \quad (25)$$

V^2 控制 ESR 临界值为^[7]

$$\begin{cases} r''_{c1} = \frac{T}{2C} + \frac{D^2 T}{(1 - 2D)C}, D < 0.5 \\ r''_{c2} = \frac{1 - 2G}{2C} \sqrt{\frac{2\tau T}{1 - G}} + \frac{G\tau/C}{1 - G} \end{cases} \quad (26)$$

对比式(22)、式(24)至式(26)可得,峰值电流控制的 ESR 临界值与 V^2 控制相比较小, V^2C 控制的 ESR 临界值介于两者之间;引入电感电流反馈量之后, V^2 控制变成 V^2C 控制,变换器的稳定工作范围将增大。

3 仿真结果

利用 PSIM 软件对图 1 至图 3 所示电路进行仿真,

固定电路参数: $E=10\text{ V}$, $V_{\text{ref}}=v_o=3\text{ V}$, $L=20\text{ }\mu\text{H}$, $C=1000\text{ }\mu\text{F}$, $R_s=1\text{ }\Omega$, $K=100$, $T=20\text{ }\mu\text{s}$ 。通过改变负载 R 和输出电容 ESR, 得到如图 4、图 5 所示电感电流和输出电压时域波形。

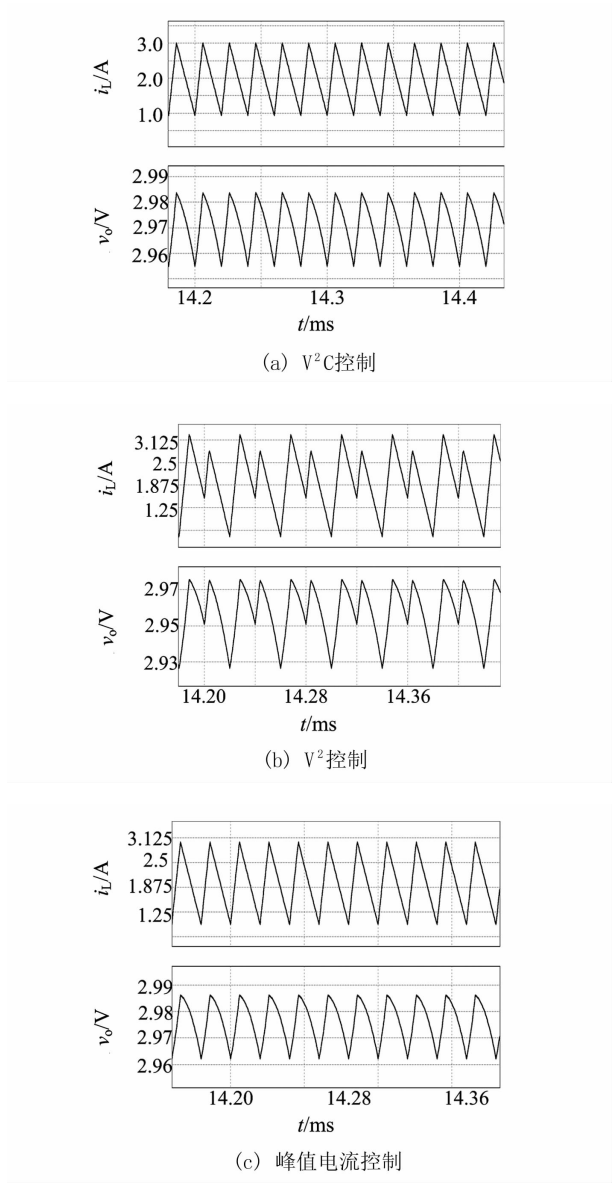


图 4 CCM 模式时电感电流和输出电压时域波形

由图 4 和图 5 以及表 1 可得,峰值电流控制的 ESR 临界值最小, V^2 控制的 ESR 临界值最大, $V^2\text{C}$ 控制的 ESR 临界值介于两者之间;当采用 V^2 控制, ESR 小于临界值时,变换器处于次谐波振荡状态,改用 $V^2\text{C}$ 控制后,变换器处于稳定的周期 1 态;继续减小 ESR 值并改用峰值电流控制后,变换器仍处于稳定的周期 1 态。引入电感电流反馈之后, V^2 控制变成 $V^2\text{C}$ 控制,变换器的稳定工作范围将增大,与上述分析一致。

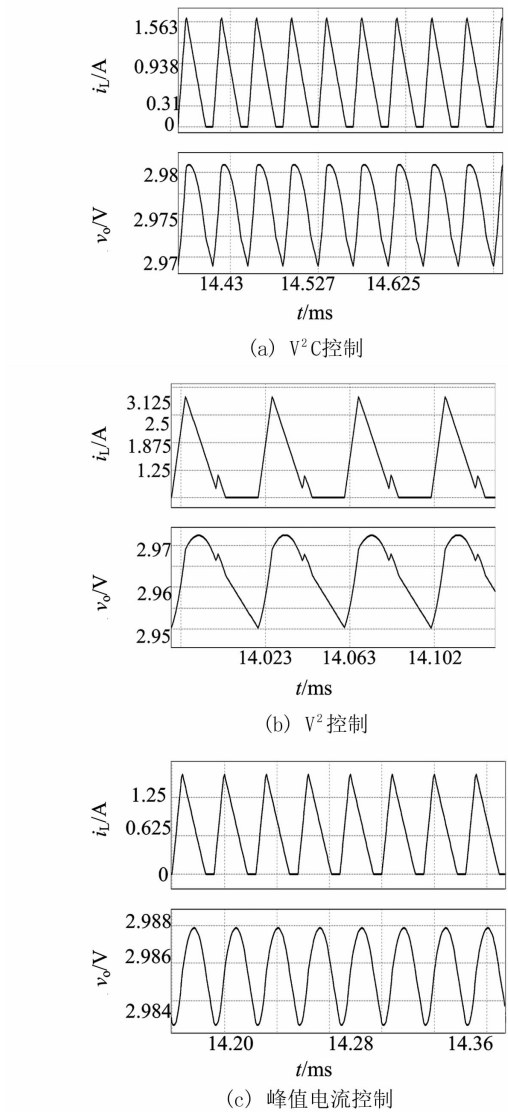


图 5 DCM 模式时电感电流和输出电压时域波形

表 1 不同控制类型系统稳定性对比

工作模式	控制类型	R/Ω	ESR/ $\text{m}\Omega$	ESR 临界值/ $\text{m}\Omega$	说明
CCM	$V^2\text{C}$	1.5	14	9.5	周期 1
	V^2	1.5	14	14.5	次谐波振荡
	峰值电流	1.5	9	4.5	周期 1
DCM	$V^2\text{C}$	4.5	5	0.12	周期 1
	V^2	4.5	5	5.09	次谐波振荡
	峰值电流	4.5	1	-4.91	周期 1

4 结 语

基于结合峰值电流控制和 V^2 控制的 $V^2\text{C}$ 控制,以 Buck 变换器为例,研究了其输出电容 ESR 的临界值。考虑实际中忽略输出电压纹波对电感电流的影响建立了分段线性模型,推导了 Jacobi 矩阵及其特征根,得到了峰值电流控制、 V^2 控制和 $V^2\text{C}$ 控制分别在

CCM模式和DCM模式时ESR的临界值,最后通过PSIM仿真验证。研究表明,峰值电流控制的ESR临界值最小, V^2 控制的ESR临界值最大, V^2C 控制的ESR临界值介于两者之间; V^2C 控制内环在 V^2 控制中引入电感电流反馈,增大了稳定工作范围。所得的结论可以为分布式发电系统中DC-DC变换器设计和器件选型提供重要的指导意义。

参考文献

[1] Abusorrah A, Al-Hindawi M M, Al-Turki Y, et al. Stability of A Boost Converter Fed From Photovoltaic source[J]. Solar Energy, 2013, 98(4):458-471.

[2] 刘俊杰, 张新燕. 基于PSIM的光伏模块建模与电气特性仿真[J]. 四川电力技术, 2010, 33(6):06-08.

[3] 曹龙汉, 余佳玲, 李景南, 等. 基于MATLAB/Simulink的光伏电池仿真建模研究[J]. 半导体光电, 2015, 36(5):718-721.

[9] 朱瑞可, 王渝红, 李兴源, 等. 用于VSC-HVDC互联系统的附加频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16):81-87.

[10] Elansari A S, Finney S J, Burr J, et al. Frequency Control Capability of VSC-HVDC Transmission System [C]// IET International Conference on AC and DC Power Transmission, 2015:1-6.

[11] Rink Y, Held L, Wenig S, et al. On Implementation of Primary Frequency Control in MMC-HVDC Transmission Systems [C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2017:1-6.

[12] Ajaei F B, Iravani R. Dynamic Interactions of the MMC-HVDC Grid and Its Host AC System due to AC-Side Disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):1289-1298.

[13] Li H, Liu C, Li G, et al. An Enhanced DC Voltage Droop-control for the VSC-HVDC Grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2):1520-1527.

[14] Athay T, Podmore R, Virmani S. A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1979, PAS-98(2):573-584.

[15] <http://b4.cigre.org/Publications/Technical-Brochures/TB-604-2014-Guide-for-the-Development-of-Models-for-HVDC-Converters-in-a-HVDC-Grid>.

[16] Haileselassie T M, Uhlen K. Frequency Sensitivity A-

[4] 周国华, 许建平. 开关变换器调制与控制技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6):815-831.

[5] Wang J, Bao B, Xu J, et al. Dynamical Effects of Equivalent Series Resistance of Output Capacitor in Constant On-time Controlled Buck Converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5):1759-1768.

[6] Redl R, Sun J. Ripple-based Control of Switching Regulators—An Overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12):2669-2680.

[7] Zhou G, He S, Zhang X, et al. Critical Output-capacitor ESR for Stability of V^2 , Controlled Buck Converter in CCM and DCM [J]. Electronics Letters, 2014, 50(12):884-886.

作者简介:

游志昆(1992), 工学硕士, 研究方向为电力电子技术与电路理论等方面。
(收稿日期:2018-08-28)

(上接第13页)

analysis of AC Grids Connected to MTDC Grid [C]// IET International Conference on AC and DC Power Transmission, 2010:1-5.

[17] Haileselassie T M, Uhlen K. Primary Frequency Control of Remote Grids Connected by Multi-terminal HVDC [C]// Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2010:1-6.

[18] Kolb J, Kammerer F, Braun M. Straight Forward Vector Control of the Modular Multilevel Converter for Feeding Three-phase Machines over Their Complete Frequency Range [C]// IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2011:1596-1601.

[19] Prabha Kundur. Power System Stability and Control [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[20] 刘天琪, 邱晓燕. 电力系统分析理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

作者简介:

杨林(1991), 硕士, 主要从事电力系统稳定与控制、直流输电技术、设备检修等方面的研究和工作;

邓鸿强(1986), 硕士, 主要从事电力系统运行、稳定与控制、设备检修的等方面的研究和工作;

邓云仁(1986), 硕士, 主要从事电力系统运行、稳定与控制、继电保护和自动化等方面的研究和工作;

黄晶(1994), 硕士, 主要从事电力系统稳定与控制、新能源开发与利用、设备检修等方面的研究和工作;

陈浩(1994), 硕士, 主要从事电力系统稳定与控制、柔性直流输电方面的研究。
(收稿日期:2018-09-12)

LTB245E1 – BLK222 型断路器机构缺陷的分析

熊攀¹,王嘉易²,李辉¹,李逢兵³,贾志杰²,董汉彬²

(1. 国网泸州供电公司,四川 泸州 646002;2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
3. 国网眉山供电公司,四川 眉山 620010)

摘 要:LTB245E1 型断路器为 220 kV SF₆ 断路器,配置 BLK222 型弹簧操动机构,目前广泛应用于四川电网中。通过对一起该型断路器弹簧机构缺陷原因的分析,就 LTB245E1 – BLK222 型断路器检修工作重点及对策进行了探讨,以防电气故障的发生。

关键词:断路器;缺陷;弹簧机构;检修工作

中图分类号:TM561 **文献标志码:**B **文章编号:**1003 – 6954(2019)01 – 0068 – 04

Analysis on Fault of Operating Mechanism in LTB245E1 – BLK222 Circuit Breaker

Xiong Pan¹, Wang Jiayi², Li Hui¹, Li Fengbing³, Jia Zhijie², Dong Hanbin²

(1. State Grid Luzhou Electric Power Supply Company, Luzhou 646002, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. State Grid Meishan Electric Power Supply Company, Meishan 620010, Sichuan, China)

Abstract:LTB245E1 circuit breaker is a widely used switch equipment in electric power enterprises currently. It is the 220 kV SF₆ circuit breaker produced by Beijing ABB Company, which is equipped with BLK222 spring operating mechanism. A typical fault of spring operating mechanism is analyzed. In order to prevent the electrical faults, the focus of the repair work and countermeasures are discussed.

Key words:circuit breaker; fault; spring mechanism; repair work

0 引 言

高压断路器作为电力系统中的重要设备,起着控制和保护的双重作用。由于种种原因,断路器往往出现故障,其性能会直接影响电网的稳定运行性以及供电的可靠性。LTB245E1 型为北京 ABB 高压开关有限公司生产的 220 kV SF₆ 断路器,该型断路器配置 BLK222 型弹簧操动机构,目前广泛应用于四川电网中^[1-3]。

LTB245E1 型断路器配置的 BLK222 型操动机构具有体积小、安装调试简便、技术较为成熟等特点,是一种应用广泛的弹簧机构。该型断路器在四川电网中运行较为稳定,但是在近些年的运行中也出现了一些问题^[4-8]。下面结合在一起典型的

LTB245E1 – BLK222 型断路器机构缺陷,对检修工作重点及对策进行了探讨。

1 典型缺陷

1.1 断路器概况

某 220 kV 变电站 264 断路器为北京 ABB 高压开关有限公司生产的 LTB245E1 型断路器,配装机构为 BLK222,操作机构型式为卷簧。在检修过程中,通过机械特性测试发现该断路器 A 相的分、合闸时间均合格,合闸速度合格但分闸速度均低于标准值。

1.2 测试结果

采用 SA10 特性测试仪对 264 断路器进行机械特性测试,其中速度测试采用角位移传感器。试验

采用外触发模式,逐相操作测试。测试结果,如图1、图2 所示。

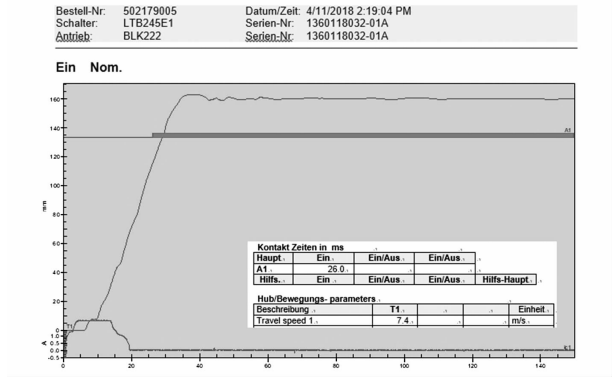


图1 264 断路器 A 相合闸时的测试结果

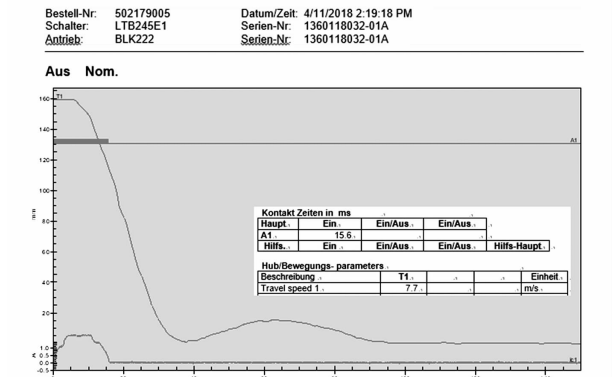


图2 264 断路器 A 相分闸时的测试结果

从图1、图2 中可以看出,A 相合闸时间为26 ms,合闸速度为7.4 m/s;A 相分闸时间为15.6 ms,分闸速度为7.7 m/s。在厂家提供的《北京 ABB 高压开关有限公司 LTB245E1 – BLK222 型断路器维护与检修工艺导则》中规定,断路器的额定合闸时间不大于28 ms,额定分闸时间为 17 ± 2 ms,额定合闸速度为7.2~7.8 m/s,额定分闸速度为7.8~8.7 m/s。经多次测试并对比测试数据与标准值可知,264 开关的分、合闸时间均合格,合闸速度也合格,但其分闸速度均低于标准值。

2 缺陷原因分析

2.1 BLK222 型操动机构工作原理

BLK222 型操动机构如图3 所示,可以看出该机构主要由以下元件组成:1 – 分闸掣子;2 – 驱动拐臂;3 – 偏心拐臂;4 – 合闸掣子;5 – 主轴;6 – 合闸弹簧;7 – 储能电动机;8 – 驱动器;9 – 限位开关;10 – 分闸弹簧;11 – 分闸缓冲器。

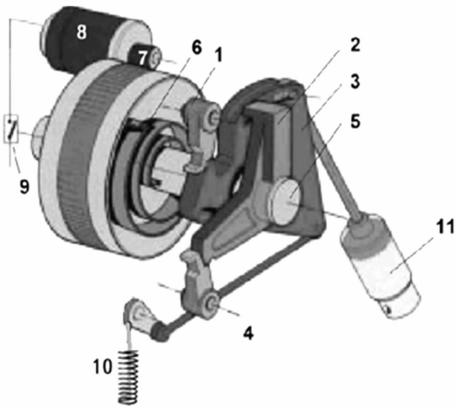


图3 BLK222 型操动机构

机构的储能过程为:断路器在初始位置(断路器在分位,分、合闸弹簧均没有能量),打开储能电源,限位开关接通储能电动机回路,电动机启动给合闸弹簧储能。合闸弹簧旋转储能到位后,储能指示盘上的挡块压下限位开关,断开电动机回路。

断路器接到合闸指令后,合闸线圈衔铁拨动合闸掣子,释放驱动拐臂,带动偏心拐臂至合闸位置,同时将分闸弹簧压缩储能。在合闸行程的末段偏心拐臂被分闸掣子锁定在合闸位置。驱动拐臂与偏心拐臂分离并返回初始位置。

断路器接到分闸指令后,分闸线圈衔铁拨动释放分闸掣子,并由断路器的分闸弹簧带动偏心拐臂完成分闸操作,分闸运动尾段由分闸缓冲器进行阻尼。

2.2 原因分析

由 BLK222 型操动机构工作原理可知,在机构无卡涩等正常情况下,决定分闸速度快慢的主要因素是分闸弹簧的能量大小。分闸弹簧的能量由合闸弹簧提供,而分闸弹簧能量大小由分闸弹簧的压缩量决定。

从断路器的行程曲线可以看出,整个曲线光滑无畸变点,说明机构无卡涩情况存在,所以分闸速度偏低的主要原因为分闸弹簧的预压缩量偏小。

3 缺陷处理

3.1 处理方法研究

根据对断路器分闸速度偏小原因的分析,处理缺陷的思路主要有2 种:

1)增大合闸弹簧储能。通过调节储能盘的角度,调节储能弹簧的旋转角度,达到调整储能弹簧储

能大小。增加储能弹簧的旋转角度,增大储能弹簧的输出能量,从而增大分闸弹簧的吸收能量,间接达到提高分闸速度的目的。调整方法是储能盘往左增加储能弹簧的旋转角度,往右减少储能弹簧的旋转角度,每一个孔调整角度为 5°。调整后,螺丝涂螺纹密封胶,紧固力矩为 3.6 Nm。

2)增加分闸弹簧的预压缩量。可在合闸输出能量不变(对合闸速度的影响非常小)的情况下,增加分闸弹簧的储能大小,从而提高分闸速度。

3.2 处理方法选择

调节合闸弹簧储能大小,会同时影响分闸和合闸速度,适合于分、合闸速度均需要调整的机构调节处理。调节完合闸速度后,如分闸速度出现偏差,可能需要再次对分闸弹簧进行调整。增加分闸弹簧的预压缩量,仅影响分闸速度(对合闸速度影响极小),调节影响面较小。适合分闸弹簧出力轻微降低时的机构调节处理。

本次 264 继路器弹簧操作机构 A 相合闸速度正常而分闸速度偏低,为节省调整时间减小停电影响,采用增大分闸弹簧的预压缩量的调节方法,只调整分闸弹簧的长度,即可简洁、准确地完成调整。

3.3 处理结果

针对实测分闸速度与额定值的差值,根据调试经验对分闸弹簧紧固螺母旋紧 2~2.5 圈。图 4 和图 5 为处理后的机械特性测试结果。

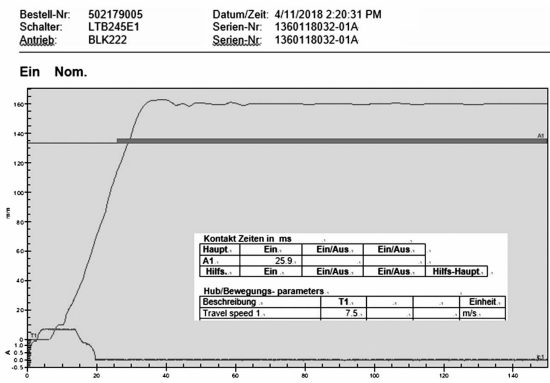


图 4 264 断路器 A 相调整后合闸时的测试结果

分闸弹簧调节后,复测合闸时间为 25.9 ms,分闸时间为 15.6 ms,符合要求;合闸速度为 7.5 m/s,符合额定合闸速度 7.2~7.8 m/s 的要求;分闸速度为 8.2 m/s,符合额定分闸速度 7.8~8.7 m/s 的要求。处理后的分、合闸速度均符合要求。

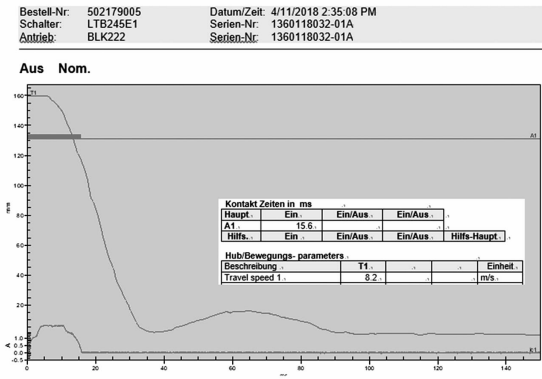


图 5 264 断路器 A 相调整后分闸时的测试结果

4 检修工作重点

通过对四川电网在运的 LTB245E1 型断路器的统计分析,发现该型断路器的缺陷和故障主要集中在操作机构及二次回路上,因此检修工作的重点也应在这两方面上。

1)操作机构检修

LTB245E1 型断路器所配 BLK222 型弹簧操作机构具有很强的环境适应性,但是由于其操作功大、动作速度快,容易出现机械特性测试不合格、机构连杆松动、分合闸掣子磨损、缓冲器故障等问题。

因此,操作机构的检修工作主要包括:检查各连杆、拐臂螺栓是否紧固;检查分闸缓冲器有无变形;检查储能弹簧紧固螺栓标记有无错位,螺栓有无松动;用塞尺检查分、合闸掣子间隙是否为 1 mm;完善机构箱封堵;检查除湿装置是否正常工作;按照规程开展相关机械特性测试等。

2)二次回路检修

作为断路器的重要组成部分,二次回路的缺陷(如控制回路电源及控制回路元件异常、分合闸线圈断线或匝间短路、相关继电器触点异常等)都会造成断路器动作异常或故障。故而在二次回路的检修工作中,应加强对电气元件的清扫,接线紧固;开展二次回路绝缘电阻测量;检查机构防跳功能是否正常等。

5 结 语

LTB245E1 型断路器是一种运行状况相对较好的断路器,但该型断路器也出现了不少缺陷和故障,

尤其是配用的 BLK222 型操动机构。

北京 ABB 高压开有限公司的《LTB245E1 - BLK222 型断路器维护管理导则》中规定的中期检修项目繁多,设备运维单位应加强对检修项目的督导检查,保证检修重点的落实,确保断路器状态良好,动作可靠准确,进而保障电力系统的安全稳定运行。

参考文献

[1] 张成林. 高压断路器状态检修系统研究[D]. 广州:华南理工大学,2007.

[2] 许婧,王晶,高峰,等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术,2000,24(8):48-52.

[3] 孙兵. LTB245E1 型断路器 BLK222 型弹簧机构的故障分析和预防[J]. 价值工程,2013(1):68-70.

(上接第 36 页)

线。从图中看出,随着系统阻抗的增大,谐振点向低频移动,大方式和小方式下的低频谐振点分别在 643 Hz 和 443 Hz。小方式下,在低频段 300 ~ 600 Hz 谐波电流均有放大可能,在 443 Hz 附近谐波电流放大最明显;大方式下,在低频段 300 ~ 1000 Hz 谐波电流均有放大风险,在 643 Hz 附近谐波电流放大最明显。而在高频段 2718 Hz 和 4977 Hz 附近大方式和小方式下均存在谐波电流放大风险。

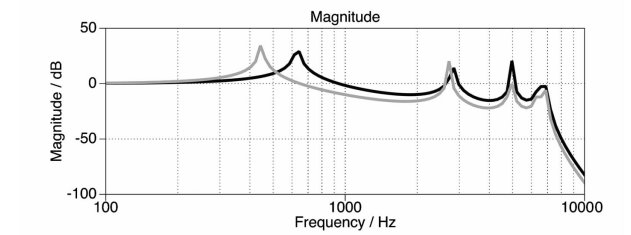


图 13 $I_{s,h}/I_{1,h}$ 传递函数的幅频特性
(浅色:小方式,深色:大方式)

5 结 语

针对城市轨道交通牵引系统进行了详细的仿真建模,考虑了多车紧密运行方式下牵引供电系统的谐波电流水平,并针对不同系统阻抗下 110 kV 电缆可能引发谐波电流放大的风险进行了评估。结果表明:一方面根据当前主变电所接入点的短路容量计算得知,各次谐波电流均满足国标限值要求;另一方

[4] 崔景春,袁大陆,杜彦明. SF₆ 断路器操动机构的运行可靠性和选型探讨[J]. 高压电器,2001,37(2):1-4.

[5] 方可行. SF₆ 断路器的弹簧操动机构及其应用[J]. 高压电器,2003,39(6):76-77.

[6] 邓瑞鹏. BLK222 型弹簧机构故障分析及研究[J]. 电力系统装备,2018(1):145-146.

[7] 熊胜源,邱偲,刘涛. BLK222 型弹簧机构故障分析及研究[J]. 山西电力,2017(5):51-54.

[8] 唐跃林,伍平,谢林涛,等. 一台 252 kV SF₆ 断路器合闸故障分析及处理[J]. 高压电器,2011,47(2):72-75.

作者简介:
熊 攀(1983) 大学本科、高级工程师,从事变电检修试验技术研究及管理。

(收稿日期:2018-10-31)

面,牵引系统产生的谐波电流经 110 kV 电缆线路注入电网时,在低频段和高频段均存在谐波电流放大风险。

参考文献

[1] 李扬,胡文平,任建文. 城市轨道交通牵引供电系统对电网的影响[J]. 河北电力技术,2013(5):36-38.

[2] 孙才勤. 地铁供电系统谐波无功功率的综合治理方案[J]. 电气化铁道,2009(5):40-43.

[3] 赵顺,曾志. 地铁 24 脉波整流机组特性及谐波分析[J]. 电子元器件应用,2012,14(5):38-41.

[4] 邱长文. 三相 V/V 接牵引变压器在工程设计中的应用[J]. 华东交通大学学报,2005(5):100-105.

[5] 李建民,孙建设. 城市轨道交通供电系统谐波分布研究[J]. 电测与仪表,2008,45(2):1-6.

[6] 邵岩. 基于 RTDS 的地铁牵引供电系统建模与仿真[D]. 成都:西南交通大学,2014.

[7] 马沂文,白秀梅. 城市轨道交通供电接触网类型的比较[J]. 城市轨道交通研究,2003,6(1):20-24.

[8] 李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,2012.

作者简介:
王宇飞(1987),助理工程师,目前主要从事大客户供电电管理工作;
徐 琳(1984),高级工程师,目前主要从事电能质量分析与评估。

(收稿日期:2018-09-25)

采用带间隙避雷器降低 10 kV 架空线路跳闸率的应用

刘起钟^{1,2}, 张剑平¹, 杨万波¹, 梁伟¹, 吴开良¹, 罗 丹¹
(1. 四川泸州川南发电有限责任公司, 四川 泸州 646007;
2. 华润电力(云浮)有限公司, 广东 云浮 527322)

摘 要:针对泸州电厂雷雨季节期间经常发生 10 kV 架空线路跳闸现象,对架空线路跳闸率高的原因进行了分析,探讨可能的改善措施,提出了将氧化锌避雷器更换为带间隙避雷器的解决方案。理论分析和现场应用表明这一措施有效减少了感应过电压引发的线路跳闸,提高了架空线路运行可靠性。
关键词:架空线路;雷击跳闸率;带间隙避雷器;运行可靠性
中图分类号:TM862 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2019)01-0072-03

Reducing Trip – out Rate of 10 kV Overhead Line by Application of Arrester with Gaps

Liu Qizhong^{1,2}, Zhan Jianping¹, Yang Wanbo¹, Liang Wei¹, Wu Kailiang¹, Luo Dan¹
(1. Sichuan Luzhou Chuannan Power Generation Co. , Ltd. ,Luzhou 646007,Sichuan, China;
2. China Resources Power(Yunfu) Co. , Ltd. ,Yunfu 527322, Guangdong, China)

Abstract:The 10 kV overhead lines of Luzhou power station frequently trip out due to lightning overvoltage in thunderstorm season. The reasons of high trip – out rate are analyzed and the potential solutions are discussed. Theory analysis and field application show that substituting the existing MOA with arrester with gaps can effectively reduce the trip – out rate, which can significantly improve the operational reliability of overhead lines.
Key words:overhead line; lightning trip – out rate; arrester with gaps; operational reliability

0 引 言

四川泸州川南发电有限责任公司(以下简称泸州电厂)江边取水线路采用 10 kV 架空线路,雷雨季节期间经常发生线路跳闸,影响机组正常运行。为解决该问题,在 10 kV 架空线路大修期间,将线路氧化锌避雷器更换为带间隙避雷器,改造后 10 kV 架空线路未发生雷击和避雷器故障引起的线路跳闸事件,架空线路运行可靠性和机组安全性大大提高。

1 改造前线路跳闸情况

1)改造前线路状况

泸州电厂江边取水 10 kV 线路全长 3340 m,导线采用 LGJ-120/20 型钢芯铝绞线,双回同杆架设,

杆塔共 22 基,其中转角耐张杆 16 基,直线杆 6 基。
耐张杆采用复合绝缘子,耐张复合绝缘子串采用单根绝缘子组合成串;直线杆采用复合针式绝缘子;跳线采用复合横担绝缘子,全线杆塔逐基接地,在终端塔和地势较高处的杆塔装设氧化锌避雷器。

2)改造前线路跳闸情况统计

2010 年至 2013 年,泸州电厂江边取水 10 kV 线路共发生线路跳闸 22 次,详见表 1。

表 1 改造前线路跳闸统计

年度	跳闸次数	备 注
2010	3	
2011	5	1 次线路接地
2012	6	3 次线路接地
2013	8	3 次线路接地
合计	22	

根据跳闸事件统计分析,历次跳闸均发生在打雷过后,但未发生遭受直击雷导致的线路故障;且多

次线路永久接地故障均为氧化锌避雷器损坏,需要将避雷器更换,线路绝缘合格后方可送电。

2 架空线路跳闸原因分析

据统计资料表明,雷击跳闸事故是 10 kV 架空线路常见故障,约 80% 以上的故障是由于雷击危害引起。而雷害事故中约 20% 是直击雷,超过 50% 的直击雷事故中雷电流大于 20 kA;约 80% 是感应雷,超过 95% 的感应雷电流小于 1 kA。运行经验表明,感应雷过电压只对 35 kV 及以下的线路会造成雷害。

结合历次跳闸事件检查结果进行分析,泸州电厂江边取水架空线路跳闸原因主要是由于感应雷导致。根据线路故障性质,分为永久性接地故障和非永久性接地故障,下面分别对两种不同性质故障跳闸原因进行分析。

1) 非永久性接地故障跳闸原因分析

泸州电厂多次发生雷暴天气时 10 kV 江边取水线路跳闸。待雷暴天气过后,运行人员检测线路绝缘满足规程规定,对线路重新送电。以上故障为非永久性接地故障引起的线路跳闸。

根据感应雷导致线路跳闸原因分析,雷击大地时,在导线上产生的感应雷过电压能达到 500 kV 以上,远远超过了绝缘子雷电冲击电压耐受值,在绝缘子上发生闪络导致线路跳闸^[1]。根据氧化锌避雷器原理,避雷器能够泄放雷电流并且及时关断工频续流,是降低线路雷击跳闸率的有效手段。但是安装避雷器后,雷击闪络会发生在未装设避雷器的杆塔处。如果全线安装线路避雷器能够对 10 kV 配电线路防雷起到良好的效果。^[2]

泸州电厂 10 kV 江边取水线路并未全线装设避雷器,仅在终端塔和部分地势较高的杆塔装设避雷器。在未装设避雷器的杆塔,可能发生感应雷引起的线路跳闸。

根据以上分析,非永久性接地故障引起的线路跳闸主要是由于感应雷过电压导致,通常发生在未安装避雷器的杆塔处。

2) 永久性接地故障跳闸原因分析

雷暴天气时线路跳闸,待雷暴天气过后,运行人员检测线路绝缘为 0,需要将故障处理后,线路绝缘才测试合格。以上故障为永久性接地故障引起的线

路跳闸。

每次永久性接地故障发生后,检修人员对线路进行巡视,检查发现故障点均为氧化锌避雷器损坏,需要将损坏的避雷器更换,处理过程和时间较长。

氧化锌避雷器损坏的原因主要是由于没有串联间隙,长期承受系统各种电压、电流。电流中的有功分量造成阀片发热,引起伏安特性变化,长期作用的结果会导致阀片老化,甚至热击穿。并且,氧化锌避雷器受到冲击电压的作用,阀片也会在冲击电压能量的作用下发生老化。一旦氧化锌避雷器意外损坏击穿,将会造成系统接地,成为永久性接地故障。

根据以上分析,永久性接地故障主要是由于避雷器故障导致,发生在安装避雷器的杆塔处。

3 10 kV 线路防雷方案对比

目前降低雷击跳闸率主要采取全线安装线路避雷器、采用瓷横担绝缘子、架设避雷线、降低接地电阻和安装带间隙避雷器等措施^[3]。几种防雷措施技术经济对比详见表 2。

表 2 防雷措施技术经济对比

防雷方案	优点	缺点	备注
安装线路避雷器	有效抑制感应过电压	需全线安装,长期承受运行电压,加速了电阻片的劣化而损坏	避雷器意外损坏后形成永久故障点
采用瓷横担绝缘子	强度高,绝缘距离和爬电距离大	重量大,不宜安装,更换投资成本高	
架设避雷线	提高配电线路感应雷耐雷水平	投资成本高,雷击避雷线后容易造成反击闪络	
安装带间隙避雷器	大幅降低输电线路雷击跳闸率,安装方便,使用寿命长,免维护	投资成本较高	串联间隙可避免故障时形成死接地

考虑到现场实施难度和使用效果,经过综合比较,泸州电厂采取了全线安装带间隙避雷器的治理方案。

4 带间隙避雷器改造实施方案

4.1 带间隙避雷器原理

10 kV 线路带间隙避雷器示意图 1。

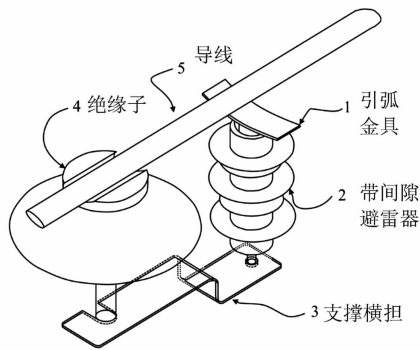
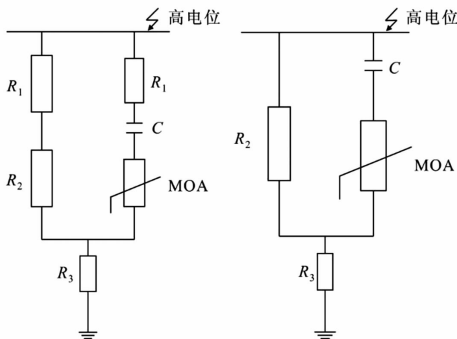


图 1 10 kV 线路带间隙避雷器

从图 1 可以看出,带间隙避雷器主要由引弧金具、氧化锌避雷器本体以及支撑横担构成。其电路原理如图 2 所示。



注: R_1 —绝缘导线电阻; C —串联空气间隙; R_2 —绝缘子电阻;
 R_3 —杆塔对地电阻;MOA—带间隙避雷器

图 2 10 kV 线路带间隙避雷器原理

带间隙避雷器能够有效防止绝缘子闪络:当感应过电压作用于导线上时,由于带间隙避雷器加串联空气间隙的击穿电压远低于绝缘子的 $U_{50\%}$,过电压击穿与导线的串联空隙间隙使避雷器本体动作,钳住绝缘子两端的电位差,使其低于绝缘子的 $U_{50\%}$,从而能够防止绝缘子发生闪络。

根据国家电网公司重点实验室(武汉大学高电压实验室)进行的 10 kV 线路带间隙避雷器动作特性试验结果,10 kV 线路带间隙避雷器能够有效动作, R_3 阻值的增加不影响带间隙避雷器动作的可靠性^[4]。10 kV 带间隙避雷器采用自然接地,不需另设地网,主要利用混凝土电阻率随水饱和度增加呈降低趋势,当水饱和度达 50% 以上时呈指数函数降低^[5],在雷雨天气下,杆塔对地电阻 R_3 下降较大。

由于在导线与引弧金具之间形成串联空气间隙,避雷器平时不受工频电压、操作过电压等的作用,减少避雷器的老化,从而增加氧化锌避雷器的运行寿命。

4.2 架空线路防雷改造实施方案

2013 年秋季,泸州电厂结合 10 kV 架空线路大

修,实施了线路防雷改造,利用杆塔自然接地,将已有的氧化锌避雷器更换为带间隙避雷器,未安装避雷器的杆塔加装带间隙避雷器,共安装 44 组,132 只。

线路加装带间隙避雷器如图 3 所示。

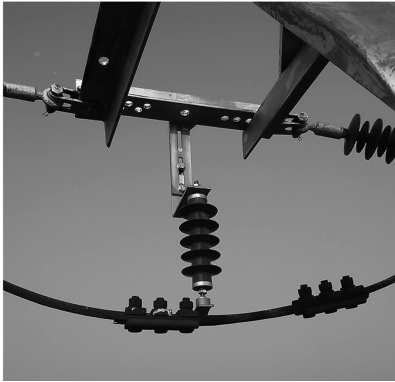


图 3 10 kV 线路加装带间隙避雷器

4.3 改造后效果分析

改造后的 2014 年至 2017 年,江边取水 10 kV 线路仅 2015 年发生 1 次线路跳闸,且原因是由于线路下方竹木长高,安全距离不够引起的线路对地放电,说明进行线路防雷改造后,该线路未发生感应雷和避雷器故障引起的线路跳闸事件,大幅降低线路跳闸概率。

5 结 语

10 kV 江边取水架空线路全线装设带间隙避雷器后,有效减少了感应雷和氧化锌避雷器故障引起的线路跳闸,架空线路运行可靠性和机组安全性大大提高。

参考文献

[1] 唐军,孔华东,陈焕栋,等. 10 kV 架空配电线路避雷器感应雷保护特性分析[J]. 高压电器,2013,49(4): 122 - 127.

[2] 王希,王顺超,何金良,等. 安装避雷器后 10 kV 配电线路的雷电感应过电压特性[J]. 电网技术,2012,36(7): 149 - 154.

[3] 陈柱华. 10 kV 配电线路雷击跳闸的影响因素及治理措施[J]. 中国科技纵横,2013(18): 118.

[4] 王敬春,罗军,吕诗月,等. 降低配电线路雷击断线和跳闸率的防护措施[J]. 高电压技术,2008,34(12): 2958 - 2962.

[5] 刘志勇,詹镇锋. 混凝土电阻率及其在钢筋混凝土耐久性评价中的应用研究[J]. 混凝土,2006(10): 13 - 16.

作者简介:

刘起钟(1981),工程师、大学本科,从事发电厂继电保护技术管理工作。
(收稿日期:2018 - 08 - 27)

基于声电联合检测技术的高压开关柜局部放电缺陷分析及整改措施研究

王嘉易¹,李 刚²,贾志杰¹,丁 澄³,罗 洋¹,董汉彬¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;2. 国网德阳供电公司,四川 德阳 618000;
3. 思源博睿(成都)科技有限公司,四川 成都 610041)

摘 要:利用带电检测技术可有效发现开关柜中的绝缘类缺陷,准确掌握开关柜运行状态。针对一起典型的10kV 开关柜内部局部放电的案例,采用暂态地电压(TEV)检测技术、超声波(AE)检测技术及超高频(UHF)检测技术对开关柜进行检测,发现存在局放信号,通过信号分析和停电检查找出局部放电的原因并提出了相应的整改措施。得出的结论对开关柜的局部放电带电检测诊断和整改措施提供了可靠的指导。

关键词:开关柜;局部放电;绝缘事故;声电联合检测

中图分类号:TM564 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2019)01-0075-04

Partial Discharge Defect Analysis of High – voltage Switchgear Based on Detection Technology Combined Ultrasonic and Electrical and Research on Its Improvement Measures

Wang Jiayi¹, Li Gang², Jia Zhijie¹, Ding Cheng³, Luo Yang¹, Dong Hanbin¹
(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China;
3. Siyuan Borui (Chengdu) Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:The insulation defects can be found out and the operation state can be known accurately by using on – line detection technology. A typical case of partial discharge in 10 kV switchgear is described. By using transient earth voltage (TEV) detection technology, acoustic emission (AE) detection technology, and ultra – high frequency (UHF) detection technology, the partial discharge signal in switchgear is detected. Through signal analysis and outage detection, the main reasons are found out and the improvement measures are put forward. The obtained results can provide a reliable guidance for the detection and improvement measures of partial discharge in switchgear.

Key words:switchgear; partial discharge; insulation defects; detection technology combined ultrasonic and electrical

0 引 言

高压开关柜是电网中重要的设备,经调查研究发现,开关柜发生故障的原因之一就是局部放电(partial discharge,PD)。局部放电能够预示设备绝缘发生劣化的情况,若能对开关柜在运行时进行局部放电的带电检测,就能及时掌握设备的绝缘状况,对开关柜的维护以及电力系统的安全保障都是有益

的^[1-7]。目前,对高压开关柜局部放电的检测方法主要有超声波(acoustic emission,AE)法、暂态地电压(transient earth voltage,TEV)法及超高频(ultra high frequency,UHF)法等。超高频法不受设备机械振动等环境影响、定位快速;超声波法抗电气干扰能力强、定位准确;暂态地电压法的灵敏度和结果稳定性高。声电联合检测技术综合了3种检测方法的优点,使得检测结果更为迅速和精确,在故障检测及分

析方面有良好的效果^[8-13]。

某供电公司在开展春节保电工作中,对某 220 kV 变电站进行了 10 kV 开关柜超声波、超高频和暂态地电压局部放电联合带电检测。通过联合检测发现 2 号主变压器 902 开关柜和 9022 隔离柜的后柜门下部均有异常放电信号。

下面通过对检测数据进行全面分析,并通过停电检查找出缺陷原因,最终提出了相应的整改措施。

1 带电检测数据分析

1.1 暂态低电压检测数据分析

在对某 220 kV 变电站 10 kV 高压室开关柜进行普测时,首先选用暂态地电压测试,检测结果发现,902 开关柜后柜门下部幅值为 35 dB,9022 隔离柜后柜门下部放电信息幅值为 37 dB,整个开关柜室的背景噪声幅值为 13 dB。依据 Q/GDW 11060-2013《交流金属封闭开关设备暂态地电压局部放电带电测试技术现场应用导则》,若设备上测得的信号绝对值大于或等于 20 dB,则认为设备中可能存在有害的局部放电。因此,判断 902 开关柜及 9022 隔离柜下部有可能存在局部放电。

1.2 超声波检测数据分析

采用超声波法,对 902 开关柜及 9022 隔离柜的前柜门下部缝隙和后柜门下部缝隙、通风孔处进行检测,发现在仪器增益为 80 的情况下,902 开关柜和 9022 隔离柜测得信号平均幅值分别为 24 dB μ V 和 30 dB μ V,峰值分别为 31 dB μ V 和 37 dB μ V,远远超出 6 dB μ V 的警戒阈值。而整个开关柜室的背景噪声幅值仅为 -5 dB μ V,开关室内其他开关柜同样部位的超声波测试幅值均在 -3 ~ 3 dB μ V 左右。

如图 1 所示,由于在整个测试过程中接近 90 s 时间范围内,大部分时间放电脉冲柱的幅值超过背景噪声,且时域波形的包络线并非是振动信号的正弦波形,而是以短脉冲为主,因此很可能有异常放电存在。超声波局部放电测试周期峰值、有效值、50 Hz 工频相关性和 100 Hz 工频相关性如图 2 所示。从图中可以看出该异常放电的 50 Hz 工频相关性很弱且 100 Hz 工频相关性较弱,说明其放电的周期重复性和相位相关性弱。同时,根据图 3 所示的放电幅值与放电脉冲数量之间的关系可以看出,局部放

电信号的周期放电峰值较高,说明该放电现象与尖端毛刺放电、金属悬浮电位放电关系不大,很可能是导电微粒放电或者绝缘介质沿面放电。

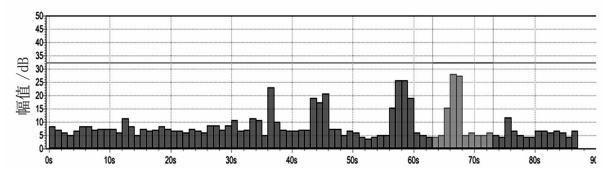


图 1 超声波局部放电测试放电幅值的时域波形

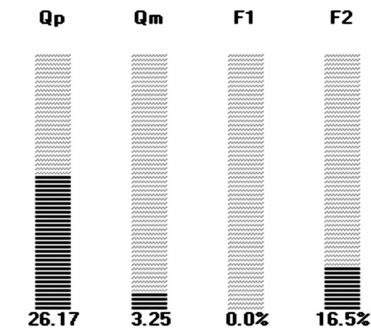


图 2 超声波局部放电测试周期峰值、有效值、50 Hz 工频相关性和 100 Hz 工频相关性

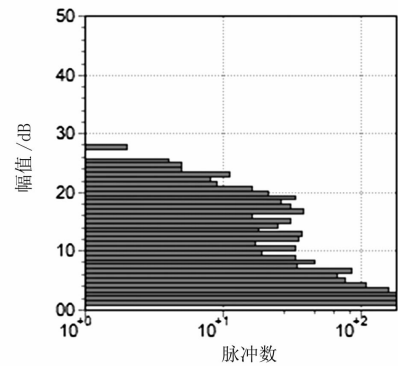


图 3 超声波局部放电测试放电幅值与放电脉冲数量之间的关系

1.3 超高频检测数据分析

采用超高频法,将传感器放置在 9022 隔离柜后柜门下部的玻璃观察窗处。放电幅值的时域波形,放电脉冲的周期峰值、有效值、50 Hz 工频相关性和 100 Hz 工频相关性,放电幅值与放电脉冲数量之间的关系分别如图 4、图 5 及图 6 所示。

由超高频测试结果可得,由于在整个测试过程接近 120 s 时间范围内,大部分时间放电脉冲柱的幅值超过背景噪声 14 dB,按照该仪器的使用判据,很可能有异常放电存在。由于该异常放电的 50 Hz 工频相关性很弱且 100 Hz 工频相关性较弱,说明其放电的周期重复性和相位相关性弱,同时周期放电

峰值较高,说明该放电现象与尖端毛刺放电、金属悬浮电位放电关系不大,很可能是导电微粒放电或者绝缘介质沿面放电。

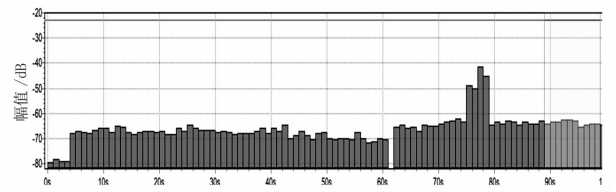


图 4 超高频局部放电测试放电幅值的时域波形

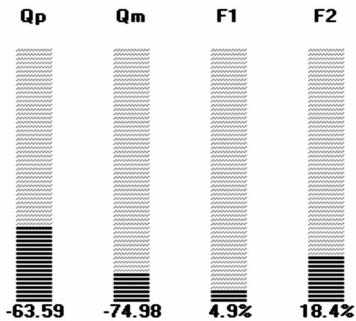


图 5 超高频局部放电测试周期峰值、有效值、50 Hz 工频相关性和 100 Hz 工频相关性

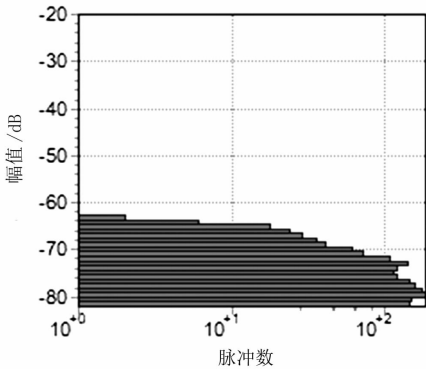


图 6 超高频局部放电测试放电幅值与放电脉冲数量之间的关系

1.4 综合分析

通过声电联合检测的方法对高压开关柜的局部放电检测表明,902 开关柜和 9022 隔离柜后柜门下部存在较为明显的放电现象,尤其是两面开关柜下部相接处,对应两面柜内的主母排的支持瓷瓶和三相穿柜套管。在关闭掉开关室内通风设施,降低外部噪声干扰后,在两面开关柜的后下柜门处,能听见较为微弱的“嘶嘶”放电声,尤其是两面开关柜下部相接处,初步判断放电声来自三相穿柜套管位置。透过开关柜后下部的观察窗,未看到两面开关柜后下部内有肉眼可分辨的杂质或微粒,柜内无凝露现象,母排搭接处

也无肉眼可分辨的过热痕迹。初步怀疑是三相穿柜套管内屏蔽不良或沿面爬电所致。

2 停电检查及整改

为查清缺陷原因,进一步采取停电检修、解体分析的方法。检查发现 902 开关柜和 9022 隔离柜间 CT 的 A、B 相穿柜套管的环氧树脂绝缘均有被铝质母排刮擦后留下的大量白色粉末,且对应刮擦处有浅浅的凹痕,如图 7、图 8 及图 9 所示。



图 7 902 开关柜内存在环氧树脂粉末的穿柜套管



图 8 902 开关柜穿柜套管 A 相



图 9 9022 隔离柜穿柜套管 A 相

通过检查发现,由于 A、B 相母排对中不良,明显紧贴穿柜套管下部并且刮擦到 CT 的环氧树脂主绝缘,造成大量环氧树脂白色粉末出现。进一步测量可得,902 开关柜的三相母排对接地构架的距离,均仅为 125 mm,刚好满足国家电网公司十八项电网重大事故反措施的最低要求^[15]。但是由于支撑母排的 A、B 相构架在厂内组装时与后柜门的距离存在偏差,造成 A、B 相母排未对中带 CT 的穿柜套管,偏离了套管中心,更靠近后柜门。同时,现场安装的 A、B 相母排更靠近带 CT 的穿柜套管下部,造成安装时母排与 CT 的环氧树脂主绝缘发生了刮擦。随着 902 开关和 9022 隔离开关分合闸时给母排带来的振动,以及带负荷运行时母排的热胀冷缩及电力作用,使得 CT 的环氧树脂主绝缘进一步被缓慢破坏,造成大量白色环氧树脂粉末出现。

由于带较大负荷运行时母排轻微振动,给紧挨的 CT 的环氧树脂主绝缘带来机械力的作用,会产生超声信号。同时,运行时 CT 的环氧树脂主绝缘表面浅浅的凹痕带来了局部电场集中,此处也会产生暂态低电压及超高频信号。

由于套管位置已无法改动,通过重新安装母排以调整母排位置,加装热缩护套的方式,避免母排与 CT 的环氧树脂主绝缘直接接触,同时擦拭清扫穿柜套管及 CT 内表面。投运后局放带电检测未发现异常。

3 结 语

在开关柜运行过程中,超高频、超声波和暂态地电压检测能够及时发现开关柜内部放电异常。通过声电联合局部放电测试方法对开关柜局部放电进行精确定位和测试分析,可以大大降低设备维护时间,提高维护效率。

同时,安装调试阶段应特别注意并综合考虑主变压器开关柜和主变压器隔离柜、母线分段柜和分段隔离柜间母排与穿柜套管间的对中以及母排对地的绝缘距离、多层母排间垫片加装等情况,保证开关柜无缺陷投运。

参考文献

[1] 国网公司运维检修部. 电网设备带电检测技术[M]. 北京:中国电力出版社,2015.

[2] 张国光. 电气设备带电检测技术及故障分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2015.

[3] 孔令明,肖云东,刘娟,等. 开关柜局部放电带电检测定位技术的应用与研究[J]. 山东电力技术,2010(6): 5-8.

[4] 章涛,王俊波,李国伟. 10 kV 开关柜局部放电检测技术研究及运用[J]. 高压电器,2012,48(10):100-104.

[5] 魏振,张强,齐波,等. 高压开关柜典型缺陷局部放电 TEV 特性的研究[J]. 高压电器,2014, 50(2):60-67.

[6] 嵇丽明,邱崑,徐翀,等. 开关柜局部放电综合诊断技术的应用研究[J]. 高压电器,2014,50(7):106-110.

[7] 陈庆祺,张伟平. 开关柜局部放电暂态对地电压的分布特性研究[J]. 高压电器,2012,48(10):88-93.

[8] 骆洁艺. 基于暂态对地电压和超声波测试 10 kV 开关柜绝缘状态评估技术的研究[J]. 广州:华南理工大学,2010.

[9] 徐焰. 开关柜局部放电暂态对地电压检测技术[J]. 供用电,2011,28(1):62-64.

[10] 蒋远东,刘显强,梁庆龙,等. 高压开关柜局放特性的研究与监测[J]. 电气技术, 2013,14(5):58.

[11] 任明,彭华东,陈晓清. 采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电[J]. 高电压技术,2010,36(10): 2460-2466.

[12] 曾雄杰,江健武. TEV 和 UHF 在 10 kV 开关柜带电检测中的应用[J]. 高压电器,2012,48(1):41-47.

[13] 吴吉,吕鸿,王流火,等. 开关柜局部放电暂态地电波 (TEV)传播特性的实验研究[J]. 高压电器,2014,50(11):115-121.

[14] 陈俊,古乐,王波. 开关柜局部放电的 AE 和 TEV 联合检测系统的研究[J]. 高压电器,2016,52(1):124-128.

[15] 国家电网有限公司. 十八项电网重大反事故措施(修订版)[M]. 北京:中国电力出版社,2018.

作者简介:

王嘉易(1987),硕士、工程师,从事断路器类设备状态评价及新技术研究工作。

(收稿日期:2018-09-02)

北京经济技术开发区电缆双环网与电缆直配双射网的运行对比分析

刘保全

(国网北京市电力公司亦庄供电公司, 北京 100176)

摘要:从调控运行专业角度出发,针对10 kV 电缆双环网与开闭站电缆直配双射网在供电可靠性、停电影响范围、电缆负载率、自动化终端运行状况等方面进行了对比研究分析,论述了电缆双环网模式在运行中存在的劣势以及开闭站电缆直配双射网模式的优势所在。为城市地区10 kV 电缆网络的建设与发展提供了合理的借鉴与参考。

关键词:双环网;双射网;可靠性;负载率;自动化终端

中图分类号:TM726.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0079-04

Comparison and Analysis on Operation of Cable Double Ring Network and Cable Direct – attached Dual – beam Network in Beijing Economic and Technological Development Zone

Liu Baoquan

(Yizhuang Electric Power Supply Company of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100176, China)

Abstract:From the scheduling and control point of view, a comparative research and analysis on the reliability of power supply, power outage impact range, cable load rate and the operation status of automated terminals are carried out for 10kV cable double ring network and switching station cable direct – attached dual – beam network. The disadvantages in the operation of cable double ring network mode are discussed as well as the advantages of the switching station cable direct – attached dual – beam network mode, which provides a reasonable reference for the construction and development of 10kV cable network in urban areas.

Key words:double ring network; direct – attached dual – beam network; reliability; load rate; automated terminal

0 引言

现代城市配电网主要以电缆网为主。其中,10 kV 电缆网肩负着向高压电力用户提供电能的重任。北京经济技术开发区的用电客户绝大多数是知识和技术密集型企业。随着经济技术开发区的飞速发展,现代高新技术企业对电能质量和供电可靠性的要求越来越高^[1]。因此,对城市地区10 kV 电缆网供电方式的研究分析具有十分重要的意义。

北京经济技术开发区10 kV 电网是比较典型的电缆配电网结构。其中以电缆双环网接线方式为主,并辅以少数开闭站(变电站)出线的电缆直配双射网方式。近年来,北京经济技术开发区配电网逐

步完成了自动化改造。在经过两年多的运行中,积累了大量珍贵的调控运行数据和经验,同时也发现了一些明显的不足。因此,有必要通过对电缆双环网接线方式和开闭站(变电站)出线的电缆双射网直配方式进行对比分析,为城市配电网的规划、发展和运行提供科学合理的指导建议。

1 基本方式介绍

通常情况下,北京经济技术开发区10 kV 电缆双环网是由一座变电站不同母线出线的一组电缆双射线路与另外一座变电站出线的一组双射线路之间安装联络开关(一侧常开,另一侧常闭)组成^[2]。正常方式运行时,线路上的每一个用户都由同一座变

电站的不同母线供电。见图 1 所示。

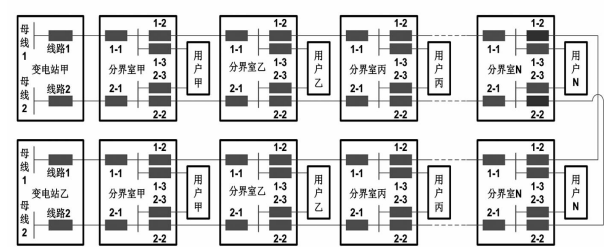


图 1 电缆双环网

开闭站(变电站)出线的电缆直配双射网方式由开闭站或者变电站不同母线馈出两条电缆专路,为用户提供双路电源^[3],见图 2 所示。

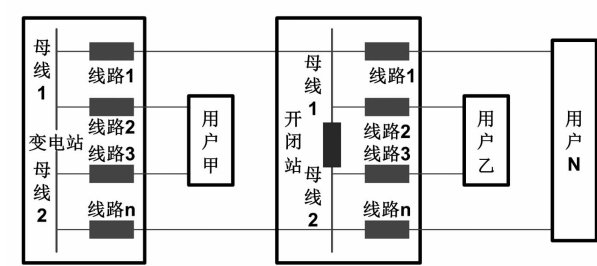


图 2 电缆直配双射网方式

2 对比分析

2.1 供电可靠性和灵活性

电缆双环网上的每一个用户理论上可以具备 4 个供电电源,极端情况下,可以满足 $N-3$ 方式运行,具备非常强的供电可靠性和方式变化的灵活性。但是为满足 $N-3$ 情况下运行,双环网 4 条线路平均负载率最大限度仅为 25%。若只满足 $N-2$ 运行,则线路平均负载率上限可达到 50%。若进一步放宽至满足 $N-1$,那么线路平均负载率上限可达到 75%^[4],但是要通过负荷分配预算和复杂的倒闸操作方可实现。

开闭站(变电站)引出的直配双射电缆线路为双电源供电,可以满足 $N-1$ 运行。但是线路平均负载率最大可高达 50%^[5]。

开发区配电网运行数据统计显示,近 10 年未发生过电缆双环网 $N-2$ 的情况,因此可以说,对于一般非重要用户,双电源完全可以满足供电可靠性要求。电缆双环网的理论高可靠性实际意义并不大,而且严重牺牲了线路的平均负载率上限。在实际运行中,由于用户的负荷不断增大,多数双环网线路已突破理论平均负载率上限,难以实现理论上的可靠

性和灵活性,造成了空有电源,但因负荷过高而无法灵活倒换线路的局面。

表 1 平均负载率区间分布

平均负载率区间/%	0 ~ 25	> 25 ~ 50	> 50 ~ 75	> 75 ~ 100
占比/%	72.4	25.6	1.5	0.5

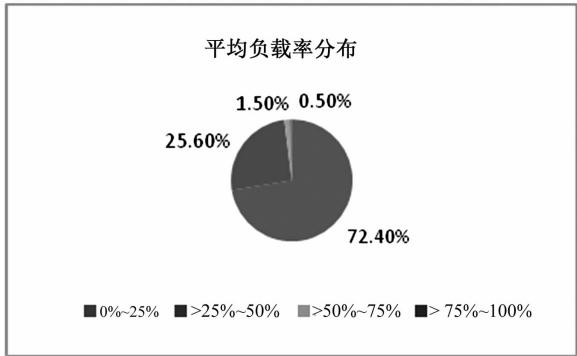


图 3 平均负载率区间分布

2.2 停电影响范围

1) 故障停电

电缆线路上发生故障,变电站内馈线开关跳闸,线路全线停电,线路上所有用户均会失去一路电源,影响正常供电。故障点隔离之后,故障区段之前的部分可以恢复正常运行,故障区段之后的部分可以通过联络开关将负荷倒至双环网对侧线路。根据开发区近 5 年的运行统计,平均每起电缆双环网线路故障影响 5 户,其中 1 户在故障区段,另外 4 户为陪停用户(可通过双环网倒出)。

而作为对比的由开闭站或变电站引出的直配电缆双射线故障,站内出线开关跳闸,线路停电后只有所带的 1 户失去一路电源,影响范围明显更少。

2) 计划停电

因 10 kV 电缆双环线路通常无合环保护,在无有效的安全措施和精确分析计算的情况下,不允许合环操作^[6],所以线路安排计划停电工作时,需要停电倒换线路,受影响用户较多。

设定 10 kV 电缆双环网线路由 N 个环网单元(分界室或分界箱)串接组合,带 N 个 10 kV 高压用户。因为计划停电工作安排在各个区段的概率均等,所以计划停电工作安排在某一区段的概率为

$$p = 1/N \tag{1}$$

则每项 10 kV 电缆双环网线路计划停电工作需要停电倒换线路的平均用户数量为

$$S_{\text{倒}} = \sum_{i=1}^N (N + 1 - n)/N = (N + 1)/2 \tag{2}$$

根据选取的 30 条典型 10 kV 电缆双环网线路所带用户数据统计,平均每条线路带 5 户,那么可以计算出每项 10 kV 电缆双环网线路计划停电工作需要停电倒换线路的平均用户数量为 3 户。

由变电站或开闭站引出的电缆直配线路安排计划停电工作时,只需站内停出线开关即可,线路停电只影响 1 个 10 kV 高压用户。

电缆双环网线路与开闭站(或变电站)引出的电缆直配双射线线路停电影响用户数量对比见表 2。

表 2 停电影响用户数量对比

停电类型	电缆双环网/户	电缆双射直配/户
故障停电	5	1
计划停电	3	1

2.3 分段电缆负载率

电缆双环网正常运行时,每段电缆的实际负载从首端向末端逐级递减,但是线路倒换后从双环网对端供电时,电缆首端将变成末端,为了保证线路倒换可行,线路全线各段基本都是同一截面积、同一额定载流的电缆。每条电缆线路在 99% 以上的时间里是正常方式运行状态,电缆实际负载率从首端到末端依次递减。这就造成了严重的电缆载流容量浪费,越靠近末端轻载现象越严重。尤其是双环网中的两条联络电缆,正常运行时,其负载率长期为 0。

假定一条电缆双环网线路由 N 段电缆串接而成,每个环网柜(分界室)带 1 个用户,全线共带 N 个用电客户,线路总负荷为 P ,每个用户的负荷为 P/N ,电缆的负载额定上限为 P_1 ,则正常运行方式情况下,线路上每段电缆的负载率从末端至首端依次是 $P/(NP_1)$ 、 $2P/(NP_1)$ 、 $3P/(NP_1)$ …… P/P_1 。由此可以计算出线路每段电缆的平均负载率为

$$F_{均} = \frac{\sum_{i=1}^N (nP)/(N^2P_{限})}{N} = \frac{(1+N)P}{2NP_{限}} \tag{3}$$

式中, P/P_1 为电缆首端负载率,即线路的负载率。

若按上面所述,根据开发区核心区 10 kV 电缆双环网线路数据统计,平均每条线路由 5 段电缆组成,每条线路带 5 户,那么正常运行方式情况下,可以计算出线路每段电缆的平均负载率为 $0.6P/P_1$ 。理论上,电缆双环网为满足 $N-3$ 情况下运行,线路平均负载率最大仅为 25%。那么,可以计算出线路每段电缆的平均负载率仅为 15%。

即便是牺牲电缆双环网的可靠性和灵活性,允许满足 $N-2$ 运行条件(线路平均负载率上限 50%)

即可,线路每段电缆的平均负载率也仅仅能够达到 30%。

在实际的线路运行中,部分线路已经出现首端重载甚至接近满载,而末端仍轻载运行的浪费情况。根据开发区配电网运行数据统计结果,电缆双环网首端电缆负载率平均为 29.6%,第 2 段电缆负载率平均为 22.1%,末段电缆负载率平均仅为 8.9%。

如果是变电站或开闭站引出的直配电缆线路模式,开闭站或变电站出线直配电缆可以根据用户不同的负荷情况选择电缆截面积,而且在保证线路 $N-1$ 运行条件的情况下,每条电缆的负载率可以达到 50%,远高于电缆双环网方式,基本不会出现上述浪费情况。

2.4 电缆终端头数量

电缆双环网线路由大量的环网柜(电缆分界箱、分界室)连接而成,开关数量庞大,电缆终端头众多,而开关处电缆终端头是电缆线路较为薄弱的环节,容易出故障^[7]。根据开发区近 5 年的配电网故障数据统计,近 14% 的电缆线路故障发生在开关电缆接头处。

在典型的电缆双环网中,用户数量等于分界室数量,每个分界室 8 个开关,6 个开关电缆接头。而开闭站或变电站出线直配电缆方式,每个用户仅对应 2 个出线开关,2 个开关电缆接头。在用户数量既定的情况下,若采用开闭站或变电站出线电缆直配方式,将会减少大量的开关节点,电缆终端接头的数量也会大大降低,相应的故障发生次数也将会大量减少。

2.5 自动化终端运行环境

配电网运行的精益化管理对配电网自动化的要求越来越高。电缆分界室或分界箱中配电网自动化终端的运行状况,直接决定了配电网自动化系统在调控运行工作中能否充分地发挥作用。然而,电缆分界室或分界箱的运行环境普遍较差,其温度和湿度变化较大,严重影响着配电网自动化终端的运行状况^[8],自动化终端的在线率难以保证。自开发区配电网自动化系统投运以来,双环网线路上分界室自动化终端的在线率长期在 92% 左右浮动,难以再度提高,严重制约了配电网调控运行工作效率。具体表现在以下几个方面:

1) 电缆分界室或分界箱的运行环境使自动化终端运行不稳定,导致系统上送大量的误发信号,给

配电网调控运行工作带来了极大的干扰。

2) 自动化终端的运行电源依赖一次设备的正常供电,当双环网故障后,停电的电缆分界室或分界箱的自动化终端电池供电可靠性较差。在自动化终端失电后,调控人员无法通过遥控操作进行故障点隔离以及非故障段恢复供电。在开发区配电网自动化系统投运以来,有接近 29% 的双环网故障后停电区段自动化终端因失电离线,配电网自动化的遥控功能丧失,严重影响了故障的处置效率。

3) 电缆分界室或分界箱的自动化终端运行不稳定,导致故障发生时,系统收到的信号不全,从而导致故障区间研判不准确的问题。

4) 自动化终端在实际运行中,电缆分界室或分界箱中的温度和湿度变化较大,容易出现终端设备凝露现象,从而引发开关误动。

在开闭站或变电站出线电缆直配方式中,开闭站(变电站)中的自动化终端运行环境得以显著改善,不会出现温度和湿度的剧烈变化,自动化终端运行稳定,从而有效克服了大量终端误上信号以及故障区段研判错误等问题,故障点将非常容易查找,同时也不会出现装置凝露问题。另外,开闭站内的站内电源非常可靠,基本不用担心自动化终端因失电而离线的问题,配电自动化系统的功能作用将会得到充分发挥。

2.6 后期改造

电缆双环网每条线路带多户负荷,线路负荷增长无规律,难以预估,一旦线路负荷增长过快,造成线路重载或过载,线路改造复杂,工程难度大,常常出现就近的变电站预留待用间隔不足的问题,如此,需要以较远的变电站为电源,线路建设投资非常大。

在开闭站或变电站出线电缆直配方式中,当用户负荷增大,线路重载后,更换更大额定载流的电缆即可,线路改造工程较为简单。

3 建 议

在配电网的调控运行工作中发现,如果线路的负载率较低,则电缆双环网的可靠性和灵活性确实有明显的体现。然而为了实现理论上的可靠性和灵活性,必然会牺牲电缆的负载率,经济性较差。另外,由于电缆双环网的停电影响范围较大以及配套的自动化终端运行环境较差,比开闭站(或变电站)

出线直配电缆方式有明显的不足。因此,对于高压用户较为密集的地区(如经济技术开发区),建议采取电缆直配双射网供电为主要模式。如果变电站的 10 kV 出线间隔数量有限,可以通过变电站引出开闭站的模式提供充足的出线间隔。

对于个别重要用户,建议提供 3 路电缆直配电源供电,或者由两组双射电缆直配线路加装联络形成最简单的双环网结构,以保证其供电可靠性和方式灵活性。

4 结 语

通过对开发区电缆双环网与开关站电缆直配双射网在可靠性、停电影响、负载率、自动化终端运行环境等方面的对比分析,论证了电缆双环网模式在调控运行工作中存在的劣势和开关站电缆直配双射网模式的优势所在。电缆双环网模式与开关站电缆直配双射网模式的对比分析研究对城市地区 10 kV 电缆配电网络的建设与发展具有重要的指导与参考意义。

参考文献

- [1] 刘向军,马爽,许刚. 基元接线模型构建的配电网典型接线模式[J]. 电网技术, 2012,36(2):58-63.
- [2] 黄伟军,钱远驰,吕志来. 闭环运行方式城市配电网接线模式的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013,41(24):123-127.
- [3] 谢莹华,王成山,葛少云,等. 城市配电网接线模式经济性和可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2005,25(7):12-16.
- [4] 霍凯龙,王主丁,畅刚,等. 目标年中压配电网规划实用方法[J]. 电网技术,2013,37(6):1769-1774.
- [5] 王成山,王赛一,葛少云,等. 中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2002,26(24):34-39.
- [6] 邹俊雄,周冠波,付轲,等. 10 kV 配网合环转电计算模型与试验分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(8):144-148.
- [7] 靳英. 110 kV 电缆终端故障分析及处理[J]. 电力安全技术,2011,13(11):28-30.
- [8] 林功平,徐石明,罗剑波. 配电自动化终端技术分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(12):59-62.

作者简介:

刘保全(1986),硕士、工程师,研究方向为电力调度、电力系统。
(收稿日期:2018-09-20)

一种新型窃电策略的研究与实现

任燕康,杜立斐,宋 剑,李 剑,甯 锐
(国网资阳供电公司,四川 资阳 641300)

摘要:线损率是一个衡量供电企业综合管理水平的重要指标,而窃电现象普遍存在,这直接影响了供电企业的经济效益。在国家电网公司全力打造的用电信息采集系统这个成熟的平台上,利用专变采集终端自带的表计特性,通过计量回路与测量回路的多日电量比对进行窃电分析与日常监控,最终形成良好的防范机制。

关键词:用电信息采集系统;专变采集终端;计量回路;测量回路;窃电分析

中图分类号:TM73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)01-0083-07

Research and Realization of A New Electricity – stealing Prevention Strategy

Ren Yankang, Du Lifei, Song Jian, Li Jian, Ning Rui
(State Grid Ziyang Electric Power Supply Company, Ziyang 641300, Sichuan, China)

Abstract:Line loss rate is an important index of comprehensive management level for power supply companies, but electricity stealing happens frequently, which directly influences the economic benefits of power supply companies. On the platform of electric energy data acquisition system which is built with effort by State Grid Corporation of China, the measurement characteristics of data acquisition terminal of special transformer is used, and the electricity stealing analysis and daily monitoring are carried out through the comparison of multi-day power consumption of metering loop and measurement circuit, thus a good prevention mechanism is formed finally.

Key words:electric energy data acquisition system; data acquisition terminal of special transformer; metering loop; measurement circuit; electricity stealing analysis

0 引 言

社会经济增长对电能的需求日益增加,窃电行为却始终存在,并成为影响社会经济环境和供电企业利益的重大问题。据统计,中国一年由于窃电行为造成的损失高达200亿元,而屡屡发生的窃电行为不但使国家电力资源白白流失,而且往往附带电力设施损坏或人员伤亡,直接威胁整个电网的安全运行。近年来,利用高新科技的窃电技术层出不穷,窃电手段也出现多元化发展和隐蔽性态势,甚至成为一整套产业化生产链。从电能表外使用高仿铅封、加装反检查继电器模块与延时电容,到电能表内焊接二极管进行半波整流、主动分断电路改变相位等,无不体现“高精尖”水平,随之而来的是更大的

反窃电难度^[1-3]。

不少供电企业采取了一定手段,但主要还是依托第三方公司,采购大量昂贵的仪器设备,并加装成套监测模块,对现行电路构架进行深度改造,以达到可监测、可管理的目的;或者建立新的窃电信息系统,增设特有通讯信道,经过后台特定数据库处理环节,与现有供电企业的业务系统进行接口设计以达到信息与资源共享。但以上两方面,无疑增加了系统投资与运营成本,且未因地制宜,充分运用好现有的系统资源与硬件设施,造成了不必要的浪费。

1 策略研究的问题背景

用电信息采集系统是建设智能电网的关键部分,同时也是物理基础,其涉及方面包括传感器技术、电能计量技术、通信技术、数据库技术等,主要能

实现电力用户数据采集、数据检索、数据分析和数据管理,为供电企业各项业务提供可靠的技术支撑;同时也能方便供电企业与电力用户进行双向沟通、广泛互动,从而实现提高供电电能利用效率,优化电网能源结构的最终目的^[4-5]。

专变采集终端是供电企业依托用电信息采集系统推进“全覆盖”、“全采集”、“全费控”进程中利用到的一种常见的用电信息采集设备,具有集成度高、技术先进,测量准确等优点。远端普遍采用 GPRS/CDMA/GSM/SMS 等通讯方式;其近端则采用 RS485/电力载波等通讯方式,能实现电能表历史和当前数据采集、电能表运行情况监测、事件记录与报警、电能异常监测以及远程关断控制。其具有单独的交流采样信号回路,能完成电流信息的采集与上传,主要使用场合多数为专变台区^[6-8]。

专变台区用户窃电行为相比公变台区来说具有更明显的隐蔽性和大电量性。一般情况下,专变用户计量设备因其变压器所属性质会一同安装在其厂区内,为供电企业用电检查人员进行窃电侦查带来诸多不便;并且由于生产特性与规模,往往使得窃电追补金额数以万计;所以专变台区窃电治理必须防微杜渐,从防做起,对窃电苗头进行有效监控和处理。

专变台区配电柜一般会存在 3 种类型的 CT,即计量 CT、测量 CT 和保护 CT。这 3 种 CT 的用途分别为:计量 CT 主要是将电流信息反馈给计量装置(如智能电能表),用于供电企业电能结算,一般准

确度等级为 0.2(S)或 0.5(S);测量 CT 主要是将电流信息反馈给测量装置(如显示电流表),用于检查人员观察电流大小,一般准确度等级为 0.2 或 0.5;保护 CT 主要是将故障电流信息反馈给继保装置(如保护动作开关),用于切断故障电路,保护供电系统安全,一般准确度等级为 5 P 或 10 P。3 种 CT 虽各自用途不同,但通过实际比较,计量 CT 和测量 CT 从准确度等级和安装位置两方面来看都最为接近,而保护 CT 由于准确度等级不够且涉及到继保装置动作问题,如果更改接线将会产生更多不必要的工作量^[9-10]。

基于以上问题,结合专变台区的窃电防治工作,深度揣摩窃电者的心理,提出了一种现实可行且耗费较小的监控方法。通过现场搭建实验平台,充分利用成熟的用电信息采集系统平台以及广泛投用的专变采集终端,对专变台区配电柜进行改造,选择接入配电柜自带的测量 CT,与计量 CT 电量信息进行有针对性的实时比对,从而实现窃电防治的双保险机制。

2 实时监控的平台搭建

实现实时监控的平台搭建如图 1 所示。但根据专变台区的现场计量装置安装位置情况可以分为两种现场硬件搭建接法:“高供高计接法”和“高供低计接法”。

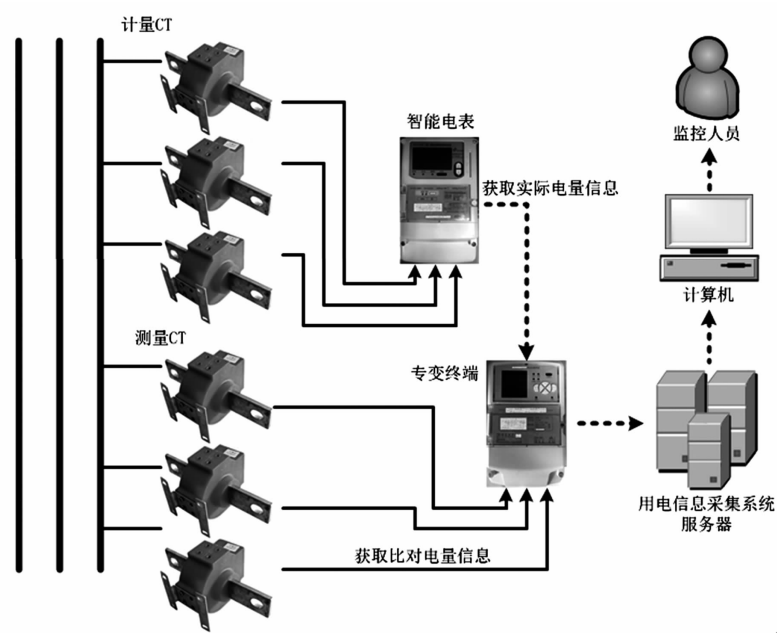


图 1 系统构架

2.1 “高供高计”接法

针对“高供高计”的专变台区,计量装置一般选用三相三线智能电能表,电能表规格为“ $3 \times 100 \text{ V}$ 、 $3 \times 1.5(6) \text{ A}$ ”,电能表、计量 CT、计量 PT 以及专变采集终端均安装在高压室,其中计量 CT 数量为 2 个,串接在 A 相和 C 相,计量 PT 数量为 2 个,采用“V - V”接法并入电路,PT 二次侧 B 相接地。测量 CT 一般在配电柜组装过程中就配备好并安装在低压室,数量为 3 个,分别串接在 A、B、C 三相上。考虑到实际设备及环境情况,应分为两种类型来改造。第 1 种类型如图 2 所示,具体为计量 CT 不带多抽头或多绕组。此种情况下,专变采集终端的电流信号可取自低压室测量 CT,但需单独布线从低压室引线至高压室,对户外预装式箱式变电站可采用这种方法,缺点是布线距离较长,对测量精度可能会带来影响。第 2 种类型如图 3 所示,具体为将计量 CT 更换为多抽头或多绕组类型。此种情况下,专变采集终端的电流信号可直接从计量 CT 的其他绕组(通常为测量用绕组)获取,需要单独布线,但距离较短,可适用于户外预装式箱式变电站或配电室,缺点是需要采购并更换计量 CT,有一定的资金耗费。

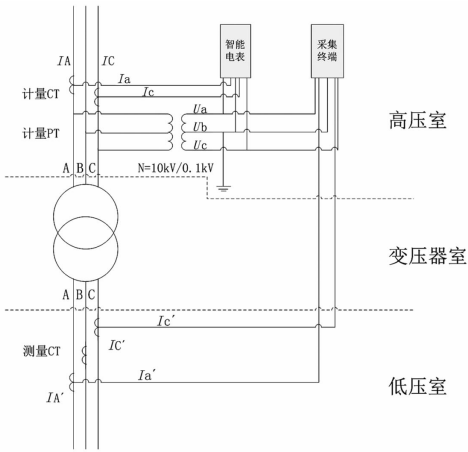


图 2 “高供高计”且计量 CT 不带多抽头或多绕组

2.2 “高供低计”接法

针对“高供低计”的专变台区,计量装置一般选用三相四线智能电能表,电能表规格为“ $3 \times 220 \text{ V}/380 \text{ V}$ 、 $3 \times 1.5(6) \text{ A}$ ”。电能表、计量 CT 及专变采集终端均安装在低压室,如图 4 所示,其中计量 CT 共有 3 个,分别安装在 A、B、C 三相上;测量 CT 同样有 3 个,也分别安装在 A、B、C 三相上。区别是两种 CT 安装位置一般分布于总路断路器上下两侧,优点是测量 CT 可直接使用,较为简便。

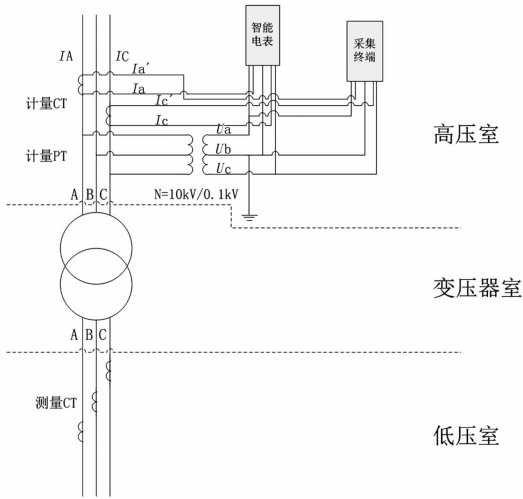


图 3 “高供高计”且计量 CT 自带多抽头或多绕组

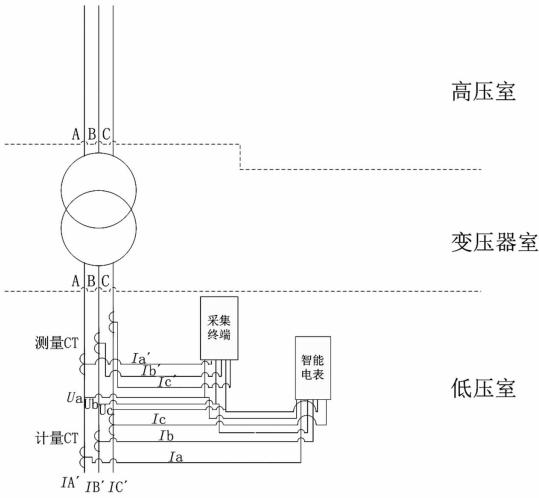


图 4 “高供低计”接法

2.3 改造接法特点分析

表 1 改造接法特点分析

“高供高计”不带多抽头多绕组	“高供高计”更换多抽头多绕组	“高供低计”
布线距离长	布线距离短	布线距离短
需绝缘铜导线	需绝缘铜导线及更换 CT	需绝缘铜导线
适用箱式变电站	适用配电室及箱式变电站	适用配电室及箱式变电站
信号传输影响大	信号传输影响小	信号传输影响小

3 种方法各有优缺点,在实际勘查之后可以根据现场情况灵活运用,选择最合适的改造接法,完成窃电监控平台的硬件搭建。

3 系统建设及分析方法

专变采集终端可从测量 CT 或计量 CT 的测量

绕组获取第2组电流信号,通过终端自带的表计特性计算得到的电量信息,原理如图5所示,再与电能表计算得到的电量信息进行多次比对,从而为计量装置是否存在故障或专变用户是否存在窃电行为提供可靠参考。

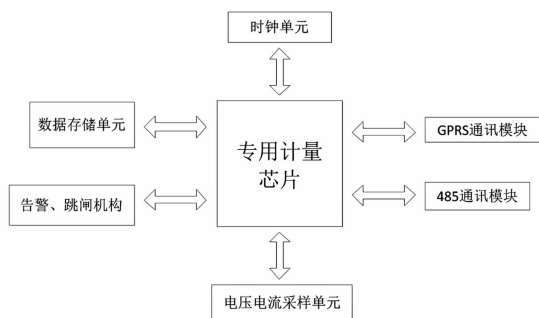


图5 专变采集终端计量原理

3.1 “高供高计”且计量CT不带多抽头或多绕组情况分析

根据常见的DYN11型配电变压器特性,图1中变压器高压侧相电流与低压侧相电流关系满足:

$$\frac{I_A}{I_A'} = \frac{1}{N\sqrt{3}} = \frac{I_C}{I_C'} \quad (1)$$

式中, N 为变压器变比。

在三相电压对称,三相负荷平衡的条件下,电表计算得到的电量为

$$W_1 = [U_{ab} \times I_a \times \cos(30^\circ + \theta) + U_{cb} \times I_c \times \cos(30^\circ - \theta)] \times t \quad (2)$$

式中: U_{ab} 、 U_{cb} 为高压侧线(相)电压; I_a 、 I_c 为高压侧相电流; θ 为相电压与相电流的夹角。

同样情况下,专变采集终端计算得到的电量为

$$W_2 = [U_{ab} \times I_a' \times \cos(30^\circ + \theta) + U_{cb} \times I_c' \times \cos(30^\circ - \theta)] \times t \quad (3)$$

式中: U_{ab} 、 U_{cb} 为高压侧线电压; I_a' 、 I_c' 为低压侧线(相)电流; θ 为相电压与相电流的夹角。由于配电变压器不具有移相功能,所以高压侧相电压与高压侧、低压侧相电流的夹角均相同。

根据电流互感器特性,图1中电流互感器一次侧电流与二次侧电流关系满足式(4)、式(5):

$$\frac{I_A}{I_a} = N_1 = \frac{I_C}{I_c} \quad (4)$$

$$\frac{I_A'}{I_a'} = N_2 = \frac{I_C'}{I_c'} \quad (5)$$

式中: N_1 为计量CT倍率; N_2 为测量CT倍率。联合式(1)、式(4)、式(5)代入式(3)中与式(2)比

较可得到:

$$W_1 = \frac{N_2}{N \times N_1 \times \sqrt{3}} \times W_2 \quad (6)$$

可知在这种情况下,对专变采集终端得到的电量信息进行如式(6)校正后再与电能表得到的电量信息进行多次比对,就能够较准确地判断出是否存在电量异常情况。另一种处理方法是直接将计量CT更换为多抽头或多绕组的形式,具体电量分析方法见3.2节。

3.2 “高供高计”且计量CT自带多抽头或多绕组情况分析

在三相电压对称,三相负荷平衡的条件下,电能表计算得到的电量为

$$W_1 = [U_{ab} \times I_a \times \cos(30^\circ + \theta) + U_{cb} \times I_c \times \cos(30^\circ - \theta)] \times t \quad (7)$$

式中: U_{ab} 、 U_{cb} 为高压侧线电压; I_a 、 I_c 为计量CT的计量绕组引出的高压侧线(相)电流; θ 为高压侧相电压与高压侧相电流的夹角。

同样情况下,专变采集终端计算得到的电量为

$$W_2 = [U_{ab} \times I_a' \times \cos(30^\circ + \theta) + U_{cb} \times I_c' \times \cos(30^\circ - \theta)] \times t \quad (8)$$

式中: U_{ab} 、 U_{cb} 为高压侧线电压; I_a' 、 I_c' 为计量CT的测量绕组引出的高压侧线(相)电量; θ 为高压侧相电压与高压侧相电流的夹角。

根据电流互感器特性,图2中电流互感器一次侧电流与二次侧电流关系满足:

$$\frac{I_A}{I_a} = N_1 = \frac{I_C}{I_c} \quad (9)$$

$$\frac{I_A'}{I_a'} = N_2 = \frac{I_C'}{I_c'} \quad (10)$$

式中: N_1 为计量CT倍率; N_2 为测量CT倍率。联合式(9)、式(10)代入式(8)中与式(7)比较可得到:

$$W_1 = \frac{N_2}{N_1} \times W_2 \quad (11)$$

在此种情况下,对专变采集终端得到的电量信息也需要进行如式(11)校正后再与电能表得到的电量信息进行多次比对,即可较为准确地判断出是否存在电量异常情况。

3.3 “高供低计”情况分析

在三相电压对称,三相负荷平衡的条件下,电能表计算得到的电量为

$$W_1 = [U_a \times I_a \times \cos\theta + U_b \times I_b \times \cos\theta +$$

$$U_c \times I_c \times \cos\theta] \times t \tag{12}$$

式中： $U_a、U_b、U_c$ 为低压侧相电压； $I_a、I_b、I_c$ 为计量 CT 引出的低压侧相电流； θ 为低压侧相电压与低压侧相电流的夹角。

同样情况下，专变采集终端计算得到的电量为

$$W_2 = [U_a \times I_a' \times \cos\theta + U_b \times I_b' \times \cos\theta + U_c \times I_c' \times \cos\theta] \times t \tag{13}$$

式中： $U_a、U_b、U_c$ 为低压侧相电压， $I_a'、I_b'、I_c'$ 为测量 CT 引出的低压侧相电流； θ 为低压侧相电压与低压侧相电流的夹角。

根据电流互感器特性，图 3 中电流互感器一次侧电流与二次侧电流关系满足：

$$\frac{I_A'}{I_a} = \frac{I_B'}{I_b} = \frac{I_C'}{I_c} = N_1 \tag{14}$$

$$\frac{I_A'}{I_a'} = \frac{I_B'}{I_b'} = \frac{I_C'}{I_c'} = N_2 \tag{15}$$

式中： N_1 为计量 CT 倍率； N_2 为测量 CT 倍率。联合式(14)、式(15)代入式(13)中与式(12)比较可得到

$$W_1 = \frac{N_2}{N_1} \times W_2 \tag{16}$$

通过式(16)对专变采集终端得到的电量信息进行校正后可与电能表得到的电量信息进行多次比对，进而能够发现该专变用户是否存在电量异常情况。

3.4 SG186 系统及用电信息采集系统建设方法

在现场硬件设备搭建完成之后，需要对专变采集终端进行调试，调试流程见图 6。由于各厂家终端逻辑上默认自身设备为“测量点 01”，所以必须通过修改参数将“测量点 01”强制开启并设置为交流采样模式，电能表地址设置为终端的逻辑地址，这样才可实现终端的计量功能。

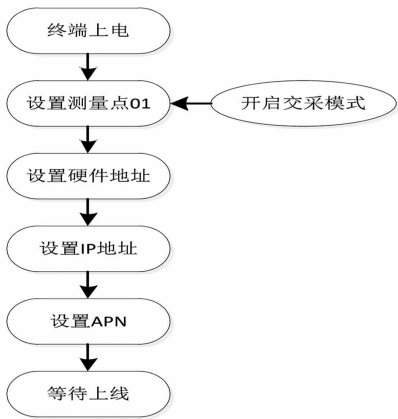


图 6 终端硬件调试

在 SG186 系统中新建考核类型的虚拟用户，该用户下计量点设置为考核类型的虚拟电能表，并挂接在供异常监控用的虚拟台区下，最后进行采集系统资源同步，如图 7 所示。

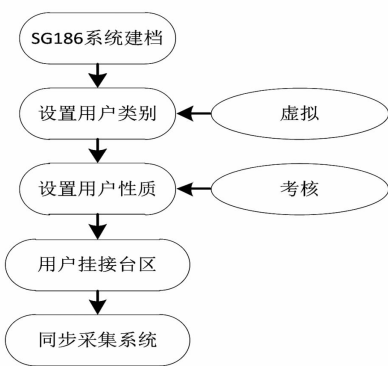


图 7 SG186 系统搭建

可在用电信息采集系统“用户自定义群组”中添加需要监控的实际专变用户和通过专变采集终端新建的虚拟用户。在“表码查询”功能界面可实现表码逐日跟踪，或“电量查询”功能界面实现异常时段内的电量跟踪，具体流程见图 8。

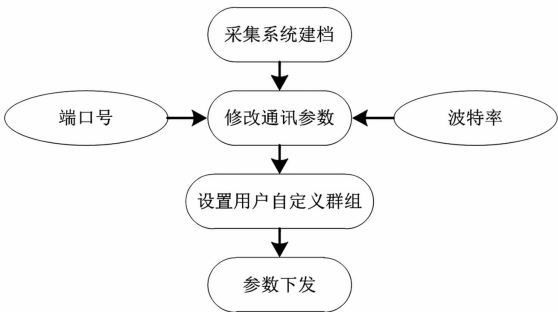


图 8 用电信息采集系统搭建



图 9 现场装置实物

4 现场实验验证

以辖区内某异常专变台区进行实际安装验证,经过现场勘查后发现,该台区变压器容量为 800 kVA,采用“高供低计”的计量方式,计量电能表为 DTZY832-Z 型三相四线费控智能电能表,电能表规格为“3×220 V/380 V、3×1.5(6) A、50 Hz”,准确度等级为有功 1.0 级,无功 2.0 级。采集设备为 FKGA23-WFET1000 型专变采集终端,终端规格为“3×220 V/380 V、3×1.5(6) A、50 Hz”,准确度等级为有功 0.5 级,无功 2.0 级;计量 CT 变比为 1200/5,准确度等级为 0.2 S 级;测量 CT 变比为 1200/5,准确度等级为 0.5 S 级。由于计量 CT 与测量 CT 变比相同,根据“高供低计”电量校正公式(16)可以得到 $W_1 = W_2$ 。在此校正公式下可通过比对电量进行实际电量的异常跟踪。

根据现场情况进行改造,将测量 CT 接入专变采集终端,完成终端上线调试和系统档案维护工作,然后对该专变台区进行多日电量信息监控,图 9 为现场装置实物图,从上到下(从左到右)依次为三相四线智能电能表、专变采集终端、计量 CT、测量 CT。

1)该台区连续 7 d 的电量数据如表 2 所示。

表 2 7 d 电量数据对比

日期	某专变台区计量电能表 (W_1)	某专变台区采集终端 (W_2)
3月6日	201.60	199.92
3月7日	199.20	197.52
3月8日	184.80	183.60
3月9日	139.20	136.80
3月10日	163.20	161.04
3月11日	177.60	175.44
3月12日	153.60	151.20

通过计量电能表得到的电量数据 7 d 平均值为 $\overline{W_1} = (201.6 + 199.2 + 184.8 + 139.2 + 163.2 + 177.6 + 153.6) \div 7 = 174.171\ 4$ (17)

利用贝塞尔公式得到 W_1 的实验标准偏差为

$$\begin{aligned} S_1(W) &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \overline{W_1})^2}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{3\ 270.034\ 286}{6}} \end{aligned}$$

$$\approx 23.345 \tag{18}$$

通过采集终端得到的电量数据 7 天平均值为 $\overline{W_2} = (199.92 + 197.52 + 183.6 + 136.8 + 161.04 + 175.44 + 151.2) \div 7 = 172.217\ 1$ (19)

同样利用贝塞尔公式得到 W_2 的实验标准偏差为

$$\begin{aligned} S_2(W) &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \overline{W_2})^2}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{3\ 368.661\ 943}{6}} \\ &\approx 23.695 \end{aligned} \tag{20}$$

两者 7 d 时间内的平均电量数据相对误差为

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{\overline{W_1} - \overline{W_2}}{\overline{W_1}} \\ &= \frac{174.171\ 4 - 172.217\ 1}{174.171\ 4} \times 100\% \\ &= 1.12\% \end{aligned} \tag{21}$$

同时两者实验标准偏差的相对误差为

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \frac{S_1(W) - S_2(W)}{S_1(W)} \\ &= \frac{23.345 - 23.695}{23.345} \times 100\% \\ &= -1.499\% \end{aligned} \tag{22}$$

δ_1 和 δ_2 均满足实际监控的误差要求,由此可见这种方法能够达到精准监控专变用户电量数据异常变化的目的。

2)对比计量电能表计和采集终端 3 月 8 日全天的电量数据,数据密度为每小时采集 1 个数据。通过绘制对比曲线(如图 10 所示)可知,采集终端较好地完成了计量电能表计电量信息的跟踪任务,两者数据误差较小,能够实现用户电量异常监控的目的。

3)对比计量电能表计和采集终端中记录的三相电流数据,数据密度为每小时采集 1 个数据。通过绘制 A 相电流比对曲线(如图 11 所示)可知,采集终端也可实现电流信息的有效跟踪,且相对误差较小,可以用来监控用户的电流异常。

由于测量 CT 隐藏在配电柜中,且组数较多,不易发觉,当用户擅自更改计量 CT、智能电能表接线

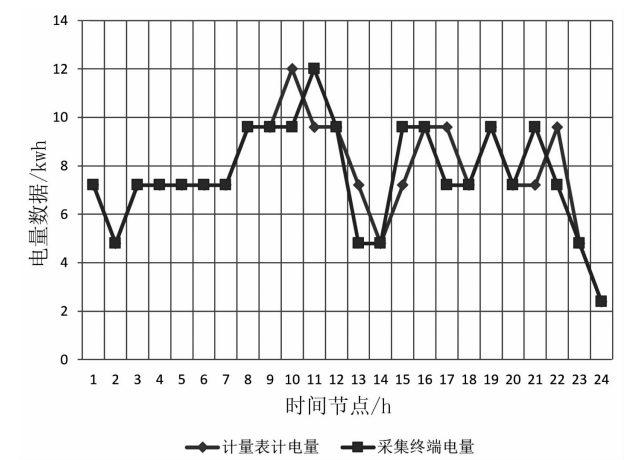


图 10 3月8日全天电量数据对比

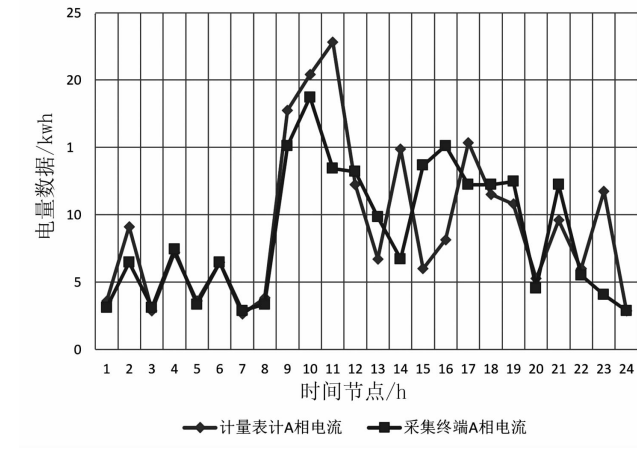


图 11 3月8日全天电流数据对比

时,用电信息采集系统会监测到两者电量差异变化,从而监控人员能够较快发现窃电异常,同时通过专变采集终端获取的第2组电量数据能够为窃电处罚及电量追补提供可靠依据。

在后续的监控过程中,通过对比发现及时查处了该用户间歇性绕越计量装置进行窃电的行为,为供电企业追回了电量电费损失。而实际工作中,这种新型防窃电策略也得到了区域性推广,在异常监控和降低线损率方面取得了一定成效。

5 结 语

根据专变台区的现场实际情况,利用专变采集终端的交流采样功能,联合测量 CT 组成第2套测量回路,与专变用户本身使用的电能表、计量 CT 组

成计量回路形成可靠对比,通过实验中两者传回数据的综合分析,验证了该策略的有效性和合理性。从整体推广的角度上看,其具有的主要优势如下:

- 1) 充分利用现场资源,如专变采集终端和测量 CT,未在变压器两侧新增加任何设备仪器,尤其是未在计量回路添加任何装置,所以不会对计量设备造成影响;
- 2) 充分利用窃电心理,在计量装置背后设置第2道防线,由于测量 CT 的组数较多、位置隐藏,并能够为窃电处理和追补提供可靠数据支持;
- 3) 充分利用系统资源,如用电信息采集系统,不需要专门开发新的监控系统,利用现有的通讯主站,在终端上线调试完成之后,即可进行每日异常监控。

参考文献

[1] 胡江溢,祝恩国,杜新纲,等. 用电信息采集系统应用现状及发展趋势[J]. 电力系统自动化,2014,38(2): 131-135.

[2] 张瑞. 基于用电信息数据挖掘的智能反窃电研究与应用[J]. 价值工程,2016,25(12): 51-54.

[3] 陈华睿. 配电管理系统的防窃电功能研究[J]. 中国高新技术企业,2016(31): 124-125.

[4] 王全兴,李思韬. 基于采集系统的反窃电技术分析及防范措施[J]. 电测与仪表,2016,53(7): 78-83.

[5] 祝恩国,窦健. 用电信息采集系统双向互动功能设计及关键技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(17): 62-67.

[6] 刘海峰,周敬嵩,沈勤卫,等. 智能防窃电管理信息平台的应用[J]. 浙江电力,2016,35(4): 65-69.

[7] 肖监,王玉萍,桂专,等. 一种分布式高低压线路防窃电设计[J]. 电测与仪表,2016,53(51): 185-187.

[8] 马淑清. 基于快速瞬态算法的智能防窃电系统的研究[J]. 山西建筑,2015,41(31): 129-131.

[9] 黄荣国,陆春光,姚力,等. 防窃电仿真试验平台设计与实现[J]. 电测与仪表,2016,53(24): 115-120.

[10] 王承刚,夏景欣,张文嘉,等. 基于电流型窃电的新型防窃电装置的开发[J]. 电工技术,2016(3): 66-68.

作者简介:

任燕康(1988),硕士研究生、助理工程师,主要从事用电智能化研究及线损治理等领域的工作。

(收稿日期:2018-09-16)

基于 PMS – ERP 流程管理的大修技改项目精益化提升研究

庄秋月, 李凡红

(国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

摘 要:大修技改工程具有规模差异大、周期长短不一、涉及环节和专业多等特点,由于外在影响因素不断变化,若过程管控不到位,容易产生项目工期延长、计划资金无法完成、精益化管控指标不达标等问题。基于此,借助 PMS – ERP 项目管理实施平台,以生产大修技改精益化管理评价指标为基础,以梳理大修技改项目的管理流程短板为目标,从生产大修技改项目管理中潜在的衔接漏洞、职责不清、PMS – ERP 应用不足等问题进行深入研究,从问题表现、影响因素、解决方案和实施细则等方面进行深度分析和挖掘,进行流程优化、弥补短板,加强 PMS、ERP 等信息系统的有效应用,着力提升大修技改项目全过程管理的精益化水平。

关键词:PMS – ERP;大修技改;精益化管理评价;资产全寿命管理

中图分类号:TM73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 – 6954(2019)01 – 0090 – 05

Research on Lean Improvement of Overhaul and Technical Reform Project Based on PMS – ERP Process Management

Zhuang Qiuyue, Li Fanhong

(State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:The overhaul and technological reform project has the characteristics of large scale difference, different cycle lengths, many involved links and specialties, etc. Due to the constant changes in external influence factors, if the process control is not in place, the project duration will be prolonged, the planned funds will be unable to complete and the lean management and control indicators will not be up to the standard. On thid basis, the potential connection loopholes, unclear responsibilities and insufficient application of PMS – ERP management are analyzed in – depth with the PMS – ERP project management implementation platform, depending on the lean management evaluation index of the major technical renovation and the shortcomings of the management process of the overhaul and technical reform project. Simultaneously, an in – depth research on issues such as problem performance, influencing factors, solutions and implementation so onis conducted in order to optimize the process, remedy the shortcomings and enhance the effective application of information systems such as PMS and ERP, which can further upgrade the lean level of the entire project management.

Key words:PMS – ERP; overhaul and technical reform; lean management assessment; life cycle management on asset

0 引 言

随着电网资产和设备规模不断增多,设备隐患缺陷对电网的影响也日益剧增,生产大修技改在电网生产运行环节中的作用越发明显,对其管理工作也提出了更高的要求。作为设备更新改造、缺陷整治最有效、最直接的途径,生产大修技改在电网安全

运行、网架优化等方面发挥着重要的作用。现阶段,“三集五大”职能体系建设后的部门机构分工和 workflows 发生了极大的变化,不仅影响项目实施的形象进度,在很大程度上也增加了后期潜在的经济审计风险;同时,随着 PMS、ERP、ECP 等支撑应用平台的不断完善和改进,国网公司对大修技改管理工作的精益化建设要求也日益提高,“正步走”的流程进度实施、生产实际需求节点、后期决算审计风险这三

者之间的不对应矛盾越发凸显。

1 项目管理存在问题

生产大修技改项目管理是利用成熟、先进、实用的技术、设备、工艺和材料等,对现有电网生产设备、设施进行完善、更新,以提高设备运维检修的可靠性、经济性,继而适应电网建设的快速发展^[1]。生产大修技改项目全过程可简单概括为前期管理、计划管理、实施管理、后期管理4个阶段^[2]。下面结合生产大修技改管理实际现状,从分工界面、流转环节、工作流程等方面进行深入剖析,梳理并总结存在问题。

1.1 前期管理

前期管理主要侧重于可研编制、可研审查、储备库建设3个方面,其主要表现在以下3方面:

- 1)可研报告编制不规范。主要涉及技术方案、全寿命成本分析对比等关键环节质量参差不齐,深度不足,操作性不强,对技术方案的描述经常拟定为“唯一”,且未结合资产全寿命管理要求和设备状态评价结果进行成本分析对比,造成可研报告的安全、效能和成本分析论证及比选依据不足,无法确定最优方案。
- 2)可研未达初设深度。主要体现在技术方案不切现场实际、工程量差异大、物料描述不一致、采购策略缺乏针对性、新技术应用物料未固化或需新增等,造成后期项目实施被动开展,直接影响精益化形象进度管理。
- 3)PMS 储备信息不规范。PMS 储备信息不规范主要表现在七大方面,如图 1 所示。这直接造成

储备库项目质量差,3 年滚动计划无法实现有序递增,计划及专业审查难度大、周期长、通过率低且反复修改审核,不能正确指导次年预安排项目及年度投资计划的上报。

1.2 计划管理

计划管理主要影响项目实施的及时率和准确率,通过近 3 年项目管理大数据分析不难发现:一是 PMS 年度计划项目编制滞后,是否列为预安排项目的依据不充分,PMS 编制上报因不规范反复修改。二是 ERP 项目创建时间滞后。由于 ERP 操作流程繁琐,加之各部门配合不能有效沟通流转,造成项目推送 ERP 后 5 个工作日内不能完成信息维护,影响计划下达及时率。三是 PMS 里程碑计划编制不规范。未综合考虑物资到货、停电检修时间等综合因素,出现物资到货时间不符合招标采购周期、设计和监理施工需求同批次节点提报等问题。

1.3 实施管理

生产大修技改项目实施管理是全过程管理的重点阶段,是精益化管理评价中的核心部分,也是项目正常实施管控的关键节点区间。通过历年项目管控的大数据统计分析后,发现实施阶段存在的主要问题如下:

- 1)物资采购策略错误,需求计划提报滞后。物资采购涉及国网招标、省公司招标、地市采购、协议库存、超市化采购等多种采购策略,且各类采购批次的的时间和周期均不相同。国网物资部不定期对物料描述、采购方式等参数进行更新补充或调整,导致项目实施时的物资采购策略发生变更,招标计划被退回,PMS 物资需求计划节点滞后。
- 2)物资招标超概算造成合同无法签订。在招

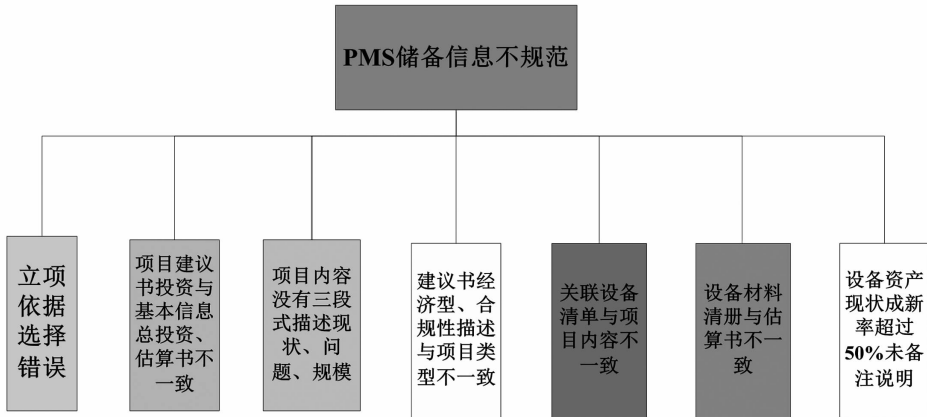


图 1 PMS 储备审查的共性问题

标采购中,由于物资招标未设置最高限价,仅根据技术规范书的技术方案和商务要求进行招标采购,经常出现物资招标超概算的情况,导致物资采购合同无法签订,ERP 订单无法创建,直接影响到 PMS 中的物资合同签订、物资到货等后续环节实施。

3)物资生产周期长,无法按时到货。电力主设备的招标周期长,且技术要求高,厂家通常都是收到中标通知书后,再根据技术要求下单生产,一般需 3~5 个月生产周期及 1~2 个月运输周期,这造成物资需求从计划提报到实际到货周期将长达半年之久。从公司 2017 年大修技改项目形象进度节点大数据分析发现,因物资未到货造成的节点滞后约占总数的 43%。

4)公开招标流标,重新采购周期长。达到公开招标条件的服务类型需上报省公司及国网公司审核并开展招标采购。从招标计划提报到发布公告、开标、定标,持续时间约 2~3 个月。如因投标厂家不足、招投标不满足条件、投标条件未达要求等因素造成公开招标流标,将使招标计划在下一个批次重新开展。重新采购周期将达到 5 个月以上,严重影响大修技改项目的正常实施。

1.4 后期管理

后期管理短板主要集中表现在以下方面:

1)物资报废流程长,物资结余处理不明确。物资报废需要主管部门及财务部共同审核审批,且须上报省公司或国网相关报废批次,流程流转周期长,报废时间很难精确估计。因施工方案调整或停电原因导致的物资结余应办理退库或利库手续,但因检修公司有库存利用率考核指标,退库或利库计划需在检修公司大范围内全面考虑,实际的退库或利库

手续流程无法顺利开展,直接导致物资结算、工程入账滞后办理。

2)结算书编制不规范,三方沟通不顺畅。结算审计的进度与施工单位提供的结算依据、结算书编制水平以及三方沟通都有很大的关系。由于技能水平参差不齐,结算取费依据不规范、工程变更签证不足、虚列管理费或工程量等问题带来了极大的廉政风险。

3)资料归档不规范。项目档案资料是后期审计的主要依据,但在历年的审计及精益化检查中,常出现的不规范问题如图 2 所示。

2 原因分析

结合生产大修技改精益化管理评价内容,并针对每一类型问题内在原因进行深入分析,通过前期对近 3 年大修技改项目全过程管理分析以及近年国网公司项目管理工作评价经验,提炼出影响大修技改项目管理精益化水平的关键因素:

1)项目储备规划不合理。重报、漏报、虚报现象普遍,3 年滚动计划落实不到位,未真正结合大修技改储备原则、储备重点及自身生产实际需求梳理;加之电网发展规划与政府经济发展互相制约,储备管理的经济型、合规性在瘦身健体、提质增效专项活动中的矛盾突出。

2)项目实施组合不明显,采购计划、停电计划等重要节点存在较大时间差。由于不能综合平衡差异,造成里程碑节点的制定缺乏正确参考,实施阶段物资到货、停电开工等重要形象进度节点管控难度大。



图 2 历年大修技改项目检查共性问题

3)项目审计流水化,效能监察工作未深入指导项目管理。项目审计的流水化极易造成审计盲区;加之效能监察工作管控力度不足使得项目管理存在耗时窝工、效率低的现象,严重影响后续环节的顺利开展,项目的个体差异化不容易被发觉,极易造成审计资金风险和安全风险。

4)项目管理人员缺乏技经知识,估算投资、预结算编制审核被动。因专业间不互通性极易出现“懂专业、不懂技经”和“懂技经、不懂专业”的情况,各专业间的“互通有无”力度不足往往使得项目在估算投资、预结算编制等管理环节陷入被动局面,造成项目管理各环节的返工、费时现象严重。

5)项目隐蔽工程监督力度不足,开竣工管理被动。项目隐蔽工程在项目前期准备中不易察觉,加之其督导力度不够常使得项目在开竣工管理过程中出现物料变更、实施方案修改、成本增补等情况,导致项目管理处于被动局面,为后续结算审计、资金审计等环节埋下了巨大的潜在隐患。

3 应对策略

针对上述存在的问题及原因分析,课题研究小组以目标管理为导向、以过程管理为主线^[3],利用策略型鱼骨图分析方法(如图3所示),提出了一系列相关的应对策略:

1)加强标准化、精益化在大修技改项目管理过

程中的应用^[4]。持续规范、完善大修技改管理工作流程,明确各部门在全过程管理中不同阶段的主要责任并落实责任专责,严格执行“首问制”。

2)注重大修技改的3年滚动计划实施,以PDCA为平台管理,循环改进。项目全过程管理实施结束后,积极进行验收总结,组织专业人员对未达到实施目的或有影响精益化水平的因素进行深入分析讨论,并提出改进措施,再次纳入大修技改储备计划,完成一个完整的PDCA循环,使设备专业管理及项目精益化管理水平同时得到提升。

3)强化大修技改审计力度,充分发挥效能监察工作在大修技改管理的作用。将技改也纳入入账前的审计范畴,利用效能监察工作的高度认知制定检查工作计划,对全过程管理进行有效的监督控制,充分保证项目开展的必要性和有效性,减少外来审计风险。

4)深化项目部组织机构职能^[5]。组建专职项目部团队,通过与上级部门的垂直沟通,完成项目储备、计划、实施、结算各个环节的工作与交流,将部门之间、专业之间、上下级的沟通调整为项目部间的环节衔接。

5)建立健全计划管理、工程管理奖励考核机制,充分调动项目管理人才的主观能动性,增强其价值实现意识、专业认同感和归属感,激发其主动发现、分析和解决问题的潜力,为项目管理的良性健康发展注入活力,并为项目管理的人才储备提供有力

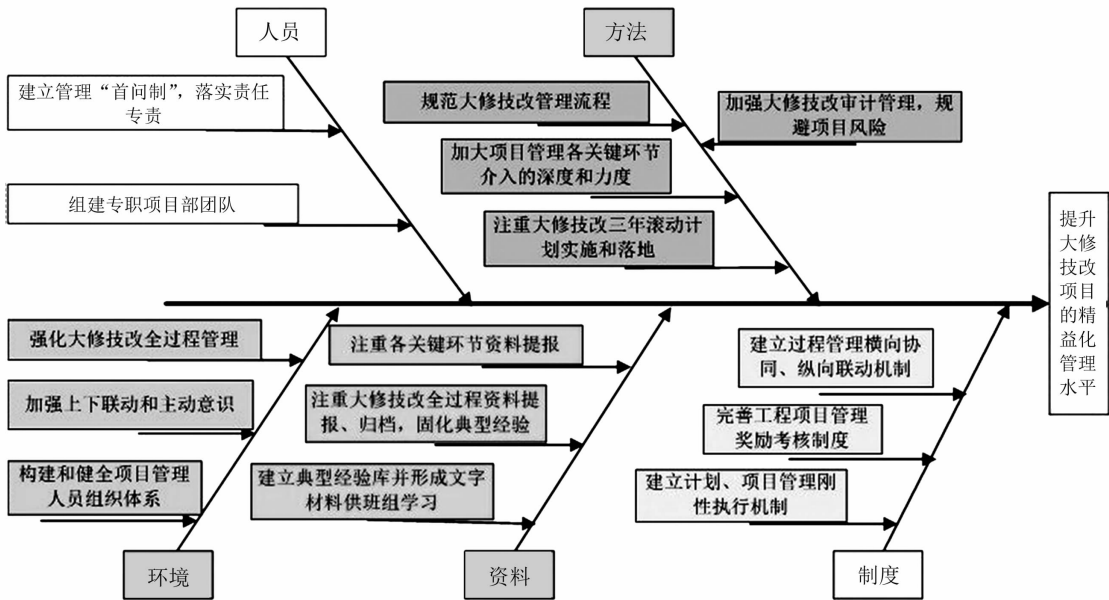


图3 应对策略鱼骨框图

支撑。

4 实施举措及管理建议

综上所述,生产大修技改项目精益化管理涉及了项目储备、计划下达、招标采购、合同签订、开工竣工、验收投产、结算审计、决算转资、项目关闭等全过程节点,项目建管单位、主管部门、综合服务中心、财务资产部、监察审计部均在其管理范围内,各个管理部门均以 ERP、PMS 系统为支撑平台,以项目里程碑为节点管控,通过各部门、专业的横向协作、纵向沟通,推进项目的全过程闭环管理。针对省检修公司现阶段生产大修技改的管理现状与规划发展,提出以下应对举措和管理建议:

1) 优化人力资源,加强工程管理人才的储备

加强技经人才管理和储备,逐步提高基层单位技经人才管理水平,减少工程审计风险。同时,有必要加大工程管理人员的储备及培养锻炼,增设项目管理小组专职人员岗位,补充相关规定并明确工作职责和要求,全面负责基层单位大修技改项目的全过程实施。

2) 提质增效,深化可靠性及全寿命周期成本管理应用

强化大修技改实施全过程管理,根据设备资产全寿命成本^[6]、绩效和风险要求,对遇到的机会和选择进行评估,制定合理的建设和采购计划(如里程碑计划、物资需求计划),并对计划进行优化调整,有效规避风险。利用 LCC 理论对大修技改项目的管理进行模型决策,并借鉴 U 型曲线模型以可靠性管理为理论基础,通过采集相关设备一定范围和时间的横向和竖向数据进行统计分析,为设备故障提供数据支撑,选择成本最低的决策方法作为设备大修技改的最终方案。

3) 优化信息系统的使用,加强集中共享管理

建议集中开发生产大修技改数据和流程管理的统一信息化管控平台,整合应用、优化流程,使其具备完成数据集成、项目管理、报表分析、档案查询等功能,起到既能够完成需求计划的提报,也能够识别项目过程实施关键节点数据的作用;同时加强对涉及项目管理的部门、单位提供流程节点对应的操作权限管理,有效避免各个环

节对管理要求和文件规定的理解偏差,提高项目管理的信息化、智能化水平。

4) 理清界面,加强计划与生产专业的相互支撑力度

建章立制明确分部计划专责、专业专责与公司计划、专业管理之间的流程和界面,加强计划与生产专业的联动机制,建立项目实施管理体系,制定管理流程统一规定,充分发挥管理效能,切实做好计划与生产互相引导、互相支撑、互相协作的友好局面。

5 结 语

从长远来看,大修技改项目的精益化管理将成为电网企业发展的必然选择,因此如何持续提高管理质效是一个长期坚持的过程,建议将管理质效提升纳入日常生产统一管理,以 PMS - ERP 系统为依托,通过各专业不断磨合,优化整合现有资源配置和模式,最终达成提高项目管理效率和生产效益的目标。同时,这也将有助于各供电企业项目管理质效提升工作的推广实施,具有较大的借鉴参考价值。

参考文献

[1] 杨小飞,黄宾来. 标准化管理在设备大修技改中的运用[C]. 第八届中国标准化论坛论文集,2011.

[2] 孙江涛,路平,潘琪杰. 供电企业生产技改大修项目管理中存在的问题研究[J]. 企业导报,2013,4(14):89-91.

[3] 夏琼,周广平,陈晓晖. 创新生产技改大修项目管理模式[J]. 中国新技术新产品,2014(20):155-156.

[4] 宫艺. 浅谈如何提高技改大修项目的管理水平[J]. 山东工业技术,2014(24):227.

[5] 何燕,董帆,庞绍宗. 大修技改“项目部”管理模式的实践与探索[J]. 时代经贸,2013(24):43-44.

[6] 伍谟煊. 资产全寿命周期成本与大修技改效益分析[J]. 江西电力,2013,37(4):77-80.

作者简介:

庄秋月(1986),硕士、高级工程师、技师,从事计划管理;

李凡红(1984),硕士、高级工程师、技师,从事电力系统继电保护及自动化管理。

(收稿日期:2018-08-27)