

# 江苏电机工程

## JIANGSU DIANJI GONGCHENG

第 33 卷 增刊 2

2014 年 11 月 26 日出版



南京供电公司专刊

### 目 次

#### 系统分析

- 高压直流输电主电路稳态特性参数计算及应用  
..... 王 峰,王春宁,李 颖(1)
- 分布式电源接入对配电网损耗影响分析  
..... 朱 红,韦 磊,史豪杰,等(4)
- S 变换在电力系统故障暂态信号时频分析中的应用  
..... 刘文涛,蒋东平(7)
- 风力发电对配电网电压波动性的影响研究  
..... 朱 红,韦 磊,蔡 敏,等(10)
- 电力系统瞬时无功功率补偿研究与应用  
..... 袁 远,王徐延(13)
- 分布式旋转发电机接入配电网对继电保护影响及案例分析  
..... 李 琳,吴 罡(17)
- 一种新的电网状态及参数误差离线估计方法  
..... 陆子强(20)
- 一种全局无功优化的新型智能混合算法  
..... 周冬旭,罗 兴,李征恢(25)
- 基于改进遗传 K-means 聚类算法的风电场多机聚合建模  
..... 马洲俊,朱 红,岳浩永,等(29)

#### 输变电技术

- 电网故障综合智能告警在地区调度自动化系统的应用  
..... 朱红勤,陈 艳,王 赫(34)
- 大容量低压短路试验相关问题研究 ..... 朱英杰,胡新瑞(37)
- 220 kV 大截面电缆拉管敷设安装研究  
..... 马耀家,郑 瑛(40)
- 一起电网调度自动化系统告警信息丢失故障分析和思考  
..... 郭 晏,赵 扬,朱红勤,等(44)

### 《江苏电机工程》 编辑委员会

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

江苏省一级期刊

中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

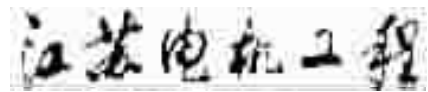
中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

中国期刊全文数据库全文收录期刊

中文科技期刊数据库收录期刊

《CAJ - CD 规范》执行优秀期刊

(双月刊)



主管单位:江苏省电力公司

主办单位:江苏省电力公司

江苏省电机工程学会

编辑出版:《江苏电机工程》编辑部

地址:南京市江宁区帕威尔路1号

邮政编码:211103

电话:(025)86558772(主编)

(025)86556860(编辑)

(025)86558020(编务)

(025)86558020(广告)

网内:954296903, 954296927

传真:(025)86558020

电子信箱:jsdj@chinajournal.net.cn(电网系统外)

jee@js.sgcc.com.cn(电网系统内)

创刊时间:1982年

发行范围:公开

国内发行:南京邮政局

邮发代号:28-305

国内定价:16.00元

订阅:全国各地邮政局(所)

印刷:南京电力印刷厂

增刊备案号:321541201402

广告经营许可证号:3200004000534

中国标准连续出版物号:ISSN 1009-0665  
CN 32-1541/TM

变电站辅助设备监控集成技术与系统应用

..... 司小庆,陈冰冰,廖英祺(46)

两起电容器串抗故障的分析

..... 王 毅,陈冰冰(50)

### 配网技术

智能配电网超短期运行优化需求探讨

..... 王 勇,余 昆,罗 兴(54)

面向智能用电的高级量测体系关键技术探讨

..... 周恒俊,肖 晶,李 雪,等(57)

南京一流配电网自动化建设实践研究

..... 陈庭记,颜 昕,许洪华(61)

基于有限元法的110 kV联合建设变电站电磁环境仿真分析

..... 蒋 涛,还留龙,徐志科(64)

基于地理信息平台的智能通道规划辅助系统的开发和应用

..... 肖 晶,李 雪(67)

物联网技术在电动汽车充换电领域的应用

..... 李 荣,蒋东平,卞孝琴(70)

南京电网调度自动化基础数据校核技术

..... 朱红勤,王 赫(74)

配电通信网技术及维修案例

..... 周俊礼(78)

基于可靠性的110 kV输电线路停电优化方案

..... 李懂理,刘 倩,丛 云(81)

南京苏南现代化电网评估指标体系研究

..... 李 晨,肖 晶,王自桢,等(85)

10 kV电缆线路不停电作业应用研究

..... 陈庭记,颜 昕,许洪华(90)

同步相量测量技术在配网合环的实用化应用研究

..... 李 凯,张玉林,杜红卫,等(93)

信息 ..... (28, 49, 77, 80, 89, 92)

#### 封面简介:

南京供电公司隶属于国网江苏省电力公司,至今已有百年历史,担负着省会南京11个区的供电任务,服务电力客户335万户。

南京电网作为江苏“北电南送”的落脚点和“西电东送”的起始点,在全国省会城市中率先建成500 kV跨长江O型双环网,220 kV分三个片区环网运行,110(35) kV辐射互联、主城区10 kV双环网、中心城区10 kV格式环网为主的坚强架构,走在了全国省会城市的前列。2013年,南京实现全社会用电量462.7亿kW·h,同比增长8.88%;完成售电量420.8亿kW·h,同比增长12.56%,最高网供负荷刷新历史记录,达到8347 MW,较以往最高纪录增长了10.8%。公司连续3年荣获国家电网公司“大型供电企业业绩标杆”称号,并荣获“全国文明单位”,“全国五一劳动奖状”,“全国用户满意服务企业”等多项荣誉称号。

# 高压直流输电主电路稳态特性参数计算及应用

王峰,王春宁,李颖

(南京供电公司,江苏南京 210019)

**摘要:**论述了高压直流输电系统主电路稳态特性参数计算的目的是要求,讨论了与主电路稳态特性参数计算密切相关的换流变压器分接头控制方式。然后在考虑相关基础参数,并基于一种控制方式,具体研究了主电路稳态特性参数计算的方法,并制定了详细的计算流程。最后通过一个高压直流输电主电路稳态特性参数计算的工程实例验证了该算法的有效性。

**关键词:**高压直流输电;主电路稳态特性参数;换流变压器;计算流程;基本设计

中图分类号:TM721.1

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0001-03

## 0 引言

在高压直流输电系统设计过程中,主电路稳态特性参数计算是设计的基础内容,也是系统运行与控制器设计的基础,同时还是高压直流工程系统研究和成套设计的基础和关键。目前,我国高压直流输电工程主要采用 ABB 或 SIEMENS 公司开发的主电路稳态特性参数软件计算稳态运行特性,由于两者考虑的控制策略不一样,其对应的计算结果也有差别。具有自主知识产权的国产设计软件也正在开发研制过程中<sup>[1]</sup>。

本文论述了主电路稳态特性参数计算目的和要求,讨论了与主电路稳态特性参数计算密切相关的换流变压器分接头控制方式,并基于一种控制方式研究了稳态特性参数计算的算法,制定了详细的计算流程。最后通过一个工程实例验证了该算法的有效性。

## 1 计算目的和要求

主电路稳态特性参数计算是高压直流输电系统基本设计的基础,其目的是在特定的控制模式(包括直流系统和换流变压器分接头控制方式)下,考虑特定的约束条件,以功率扫描的方式计算高压直流系统输送特定负荷水平时的相关参数稳态值。在高压直流输电系统设计软件中,主电路稳态特性参数计算模块是无功管理、交直流谐波计算、交直流滤波器设计等其他功能模块的基础,其计算结果为这些功能模块提供基础数据,计算结果通常包括触发电角/关断角、换相角、换流器无功功率消耗量、换流变压器二次侧电压、换流变压器分接头位置、无功设备提供的最小最大无功功率等参数。



图1 主电路稳态特性参数示意图

为满足实际直流工程安全稳定运行的要求,主电路稳态特性参数计算需要考虑直流工程实际可能的各种运行方式和工况。运行方式有:直流功率正反输送方向、单双极运行接线方式、考虑温度等影响的直流高低电阻、直流和两端交流系统电压水平。采用功率扫描的方式计算稳态运行特性,以涵盖可能所有运行工况,通常是以 0.1 pu 为起点,0.05 pu 为步长,计算到某一负荷水平,具体数值根据系统的过负荷水平决定<sup>[2]</sup>。

## 2 换流变压器分接头控制

直流输电系统的主要控制方式是通过改变换流器触发电角或关断角来实现的,该方式具有调节范围大、调节快速等优点。而换流变压器分接头控制是通过改变分接头的位置以改变阀侧电压来实现对直流系统的控制。相对于换流器控制角控制方式而言,其调节范围有限,速度缓慢,调整一档需 3~5 s,通常作为一种辅助控制方式。但其作用明显,对系统安全稳定运行有重要的意义。换流变压器分接头控制包括角度控制和电压控制两种方式<sup>[3]</sup>。

## 3 算法和流程

主电路稳态特性参数计算是考虑在具体的系统控制方式下,直流系统两端换流器的相关参数稳态运行值<sup>[4]</sup>。

考虑两端换流器控制方式和两侧换流变压器



图2 变压器分接开关调压示意图

分接头控制方式,直流系统输送功率水平从最小值(0.1 pu)以某一步长(如 0.05 pu)逐渐递增到某一值(如 1.2 pu)。

具体算法及流程如图 3 所示。

整流侧相关稳态参数基本关系式推导如下<sup>[5]</sup>:

$$\frac{u_v}{u_1} = \frac{u_{dio}}{u_1} = \frac{1}{1+n_T \cdot \Delta \eta} \quad (1)$$

$$U_{dioNR} = \frac{(\frac{U_{dNR}}{n_B} + U_T)}{\cos \alpha_N - (d_{xR} + d_{rR})} \quad (2)$$

$$I_d = P_{dR} / U_{dR} \quad (3)$$

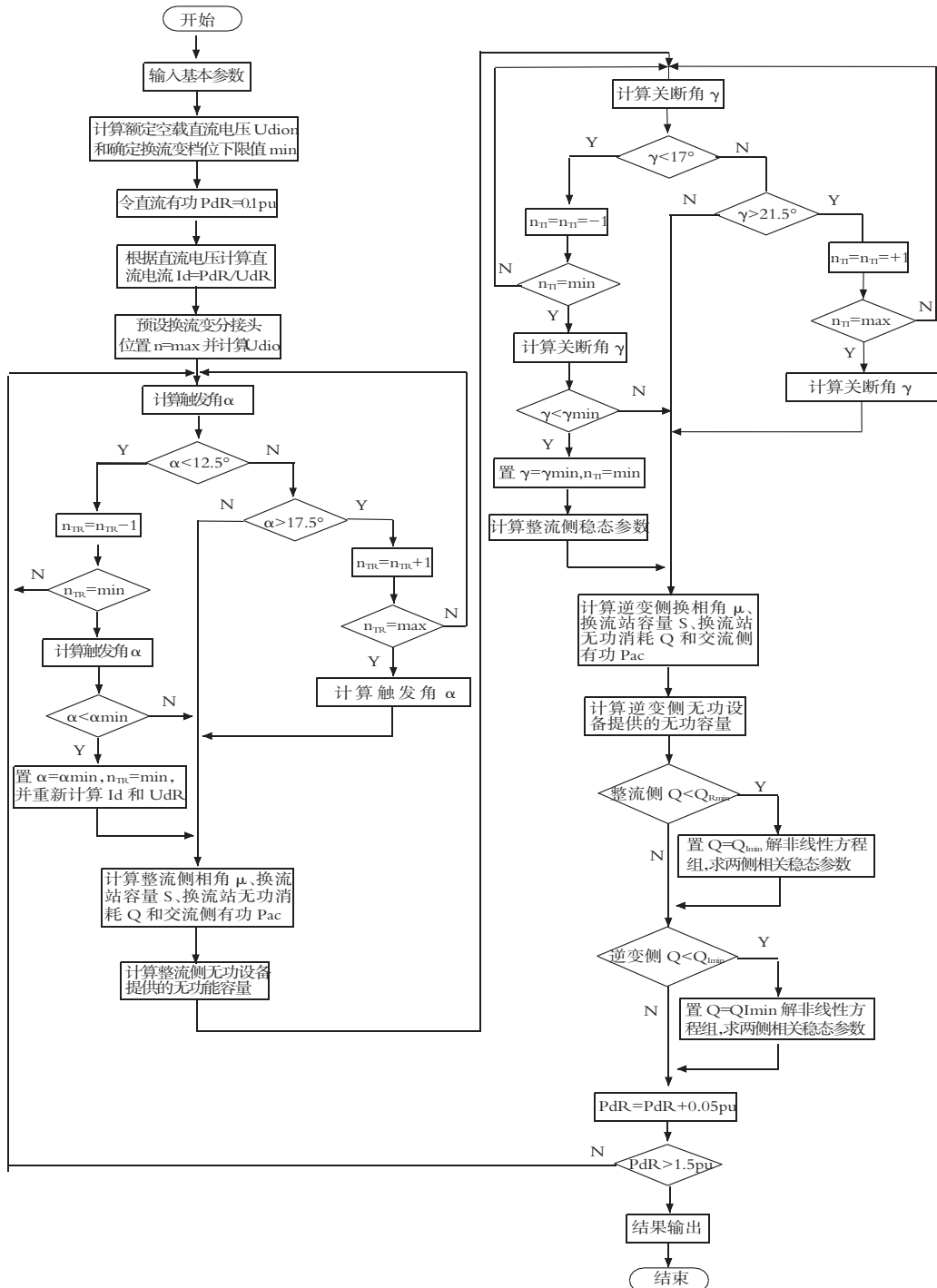


图3 主电路稳态特性参数计算算法及流程图

$$\alpha = \arccos \left[ \frac{U_{dR} + U_T + (d_{xR} + d_{rR}) \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot U_{dioNR}}{U_{dioR}} \right] \quad (4)$$

$$\mu_R = \arccos(\cos \alpha - 2 \cdot d_{xR} \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{dioNR}}{U_{dioR}}) - \alpha \quad (5)$$

$$S_R = \frac{P_{dR}}{\cos \alpha - (d_{xR} + d_{rR}) \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{dioNR}}{U_{dioR}}} \quad (6)$$

$$Q_R = P_{dR} \cdot \frac{(\mu_R - \sin \mu_R \cdot \cos(2 \cdot \alpha + \mu_R))}{\sin \mu_R \cdot \sin(2 \cdot \alpha + \mu_R)} \quad (7)$$

$$P_{acR} = \sqrt{S_R^2 - Q_R^2} \quad (8)$$

其中:  $u_1$ 、 $u_v$ 、 $u_{dio}$ 、 $U_{dio}$  分别是网侧、阀侧、空载直流电压标幺值和空载直流电压实际值,  $n_T$  是换流变压器分接头所处的位置,  $\Delta \eta$  是换流变压器调节步长,  $u_d$ 、 $I_d$ 、 $P_d$  分别直流电压、电流和有功功率,  $d_x$ 、 $d_r$  分别是感性和阻性压降,  $\alpha$ 、 $\mu$ 、 $S$ 、 $Q$ 、 $P_{ac}$  分别是换流器的触发角、换相角、视在功率、无功功率和交流系统输送的有功功率, 下标  $N$  和  $R$  分别表示额定值和整流侧的量。

逆变侧相关稳态参数基本关系式与整流侧类似, 只需将触发角  $\alpha$  替换为关断角  $\gamma$ , 其他参数替换为逆变侧相应的参数即可。

#### 4 算例验证与分析

以国内某  $\pm 500$  kV 直流输电工程为例校验上述的计算方法和流程<sup>[6]</sup>, 系统及典型运行状态参数如表 1 所示。

表 1 系统及典型运行状态参数

双极额定直流功率 /MW	3000
额定直流电流 /A	3000
额定直流电压 /kV	500
回路电阻 / $\Omega$	10.4
整流侧触发角 / $^\circ$	15
整流侧换流变档位	0
逆变侧关断角 / $^\circ$	17

整流侧、逆变侧主电路稳态特性参数计算结果如图 4、5 所示。

由图 4 可知, 中间负荷水平时, 换流变分接头调整使两端控制角在一定范围内。结合图 4-5 分析可得, 在低功率水平时, 由于最小滤波器投入的要求, 此时交流系统无功过剩, 换流器以大角度运行, 以平衡系统的无功功率, 同时换流变分接头也处于极限位置。



图 4 换流器触发角(关断角)随功率水平的变化



图 5 换流变分接头位置随功率水平的变化

#### 5 结束语

本文论述了主电路稳态特性参数计算的目的是要求, 讨论了与主电路稳态特性参数计算密切相关的换流变压器分接头控制方式, 并基于一种控制方式研究了稳态特性参数计算的算法, 制定了详细的计算流程。最后通过一个工程实例验证了该算法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 李岩, 黎小林, 饶宏, 等. 高压直流输电技术自主化新进展 [J]. 中国电力, 2009, 42(1): 41-44.
- [2] 刘宝宏, 马为民, 殷威扬. 三沪直流输电系统主回路参数研究 [J]. 电力建设, 2007, 28(11): 1-4.
- [3] 马为民.  $\pm 800$  kV 特高压直流系统换流器控制 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 71-74, 110.
- [4] D. G. Chapman, J. B. Davies, F. L. Alvarado, et al. Programs for the Study of HVDC Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1182-1188.
- [5] E.W. Kimbark. Direct Current Transmission [M]. New York: Wiley-Interscience, 1971.
- [6] 杜忠明. 贵广第二回直流输电工程换流站无功补偿的研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(10): 69-74.

#### 作者简介:

王峰(1984), 男, 工程师, 研究方向为高压直流输电系统基本设计;

王春宁(1966), 男, 高级工程师, 从事供电企业科技开发及管理工作;

李颖(1963), 男, 高级工程师, 从事供电企业情报管理及研究工作。

# 分布式电源接入对配电网损耗影响分析

朱红<sup>1,4</sup>, 韦磊<sup>1,2</sup>, 史豪杰<sup>2</sup>, 黄莉<sup>3</sup>, 余昆<sup>2</sup>

(1.南京供电公司,南京 210019;2. 河海大学能源与电气学院,南京 211100;

3. 南瑞科技股份有限公司,南京 210061;4.华北电力大学 北京 102206)

**摘要:**分布式电源(Distributed Generators, DG)对配电网损耗的影响与分布式电源的出力方式和负荷的分布关系密切。根据不同类型 DG 的发电原理,在潮流计算中将其分别等效为 PQ、PI、PV 和 PQ(V)型节点,采用改进前推回代法计算含各种类型 DG 的配电网潮流,评价不同类型 DG 在接入重负荷、轻负荷及一般负荷区域时对配电网损耗的影响。在 IEEE33 节点模型中加入 DG 进行仿真计算,结果表明在重负荷区域接入 DG 有助于降低损耗,对于吸收无功的 DG 需要和无功补偿装置配套安装。

**关键词:**分布式电源;配电网;改进前推回代法;有功损耗

中图分类号:TM726

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0004-03

## 0 引言

分布式发电系统接入到配电网是发展趋势<sup>[1]</sup>。大量 DG 的接入,改变了配电网的功率分布,从而引起网络损耗的变化,这种变化取决于接入配电网 DG 的类型<sup>[2]</sup>及 DG 接入区域的负荷水平。

目前,已有文献研究 DG 接入配电网对损耗的影响,集中在潮流和损耗的计算方法上,如在理想条件下简化配网模型以计算 DG 接入前后损耗<sup>[3]</sup>、考虑 PQ 和 PV 型 DG 接入情况下采用改进前推回代法计算潮流和网络损耗,分析接入 DG 前后损耗的变化<sup>[4]</sup>、采用馈线分段分析法分析光伏发电接入时损耗的变化<sup>[5]</sup>,文献[6]则采用灵敏度法研究了不同容量及不同运行方式下 DG 接入对损耗的影响。

现有方法集中在有功和无功输出恒定的 PQ 型 DG,对于无法等效为 PQ 模型的 DG,如输出有功和电流恒定型 DG、有功和电压恒定型 DG 以及有功恒定、无功与输出电压相关型 DG,对网损的影响是否与 PQ 型 DG 具有同样的规律,需要进行研究。本文考虑不同类型 DG 的特性差异,将其分为 PQ、PV、PI、PQ(V)四种类型<sup>[7,8]</sup>,利用改进前推回代法计算不同类型 DG 接入配电网的潮流,并分别对重负荷、轻负荷和一般负荷几种情况下 DG 接入对系统网损影响的变化规律进行仿真分析。

## 1 含 DG 的配电网潮流计算

传统配电网的结构是放射状或接近于放射状,前推回代算法包含回代和前推两个迭代过程。当 DG 接入配电网后,原来的单电源系统变成多电源系统,传统的前推回代法不能有效地处理 DG 并网

后多种类型节点<sup>[9]</sup>。因此,需要针对不同类型 DG 模型改进前推回代算法。

### 1.1 DG 的电源特性

PQ 恒定型分布式电源可视为与功率大小相等、方向相反的负荷,所以该类型 DG 的视在功率为  $S=-P-jQ$ ,即可以得到如下公式:

$$i=[(-p-jQ)/(e+jf)]^* \quad (1)$$

式中:  $e$  和  $f$  分别为分布式电源端电压的实部和虚部。

PI 型节点的输出有功和注入电流均为恒定值,其注入的无功大小为:

$$Q=\sqrt{|I|^2(e^2+f^2)-P^2} \quad (2)$$

通过上式可将 PI 型 DG 转化为 PQ 节点,即可以通过公式(1)得到其注入电流。

PV 型 DG 的模型则可描述为输出有功和机端电压保持恒定。

PQ(V)型节点的特点是无功功率与机端电压有关,当 DG 采用异步发电机并网运行时,其简化等值电路图<sup>[10]</sup>如图 1 所示。



图 1 异步发电机简化等值电路图

其中,  $x_m$  为激磁电抗,  $x_2$  为定子漏抗,  $x_c$  为转子漏抗,  $x_c$  为机端并联电容器电抗,  $R_2$  为转子电阻,  $s$  为转差,定子电阻忽略。

根据图 1 可以推出异步风力发电机吸收的  $Q$  与  $V$  的函数关系式:

$$Q = -\frac{V^2}{x_F} + \frac{-V^2 + \sqrt{V^4 - 4P^2 X^2}}{2X} \quad (3)$$

式中,  $x = x_1 + x_2$ ;  $x_p = \frac{x_c x_m}{x_c - x_m}$ 。

一般来说,采用有励磁调节能力的同步发电机作为接口的 DG 具有两种励磁控制方式,即电压控制和功率因数控制<sup>[1]</sup>。采用电压控制的 DG 在潮流计算中可作为 PV 节点处理,采用功率因数控制的 DG 可作为 PQ 节点处理。对于采用无励磁调节的同步发电机作为接口的 DG,则需要在潮流计算中进行特殊处理。考虑隐极机,有下式成立:

$$P_{DG} = \frac{E_{DCq} V}{X_d} \sin \delta \quad (4)$$

$$Q_{DG} = \frac{E_{DCq} V}{X_d} \cos \delta - \frac{V^2}{X_d} \quad (5)$$

式中:  $P_{DG}$ ,  $Q_{DG}$  分别为 DG 的有功输出和无功输出;  $E_{DCq}$  为 DG 机组的空载电势,由于无励磁调节系统,所以  $E_{DCq}$  为常数;  $X_d$  为 DG 机组的同步电抗;  $V$  为机端电压;  $\delta$  为功角。

一般在潮流计算中可认为 DG 输出有功已知,根据式(4)和式(5)可以推得  $Q_{DG}$  与端电压的关系:

$$Q_{DG} = \sqrt{\left(\frac{E_{DCq} V}{X_d}\right)^2 - P_{DG}^2} - \frac{V^2}{X_d} \quad (6)$$

式(6)与式(3)有类似之处,不同的是式(3)中的  $Q$  小于 0,表明异步发电机实际上是吸收无功,而式(6)中的  $Q$  大于 0。

## 1.2 DG 的潮流计算模型

根据上述分析可知,在含分布式电源的配电网潮流计算中,PQ 恒定型分布式电源可以当作功率大小相等、方向相反的负荷处理;PI 型 DG 通过公式(2)可转换成 PQ 型分布式电源参与潮流计算。

对于 PQ(V) 节点,潮流计算每次迭代后都要对电压进行修正,并根据修正后的电压幅值计算出 DG 的无功功率。因此,第一次迭代时,通过公式(3)和(6),可把 PQ(V) 节点暂时转换成传统潮流算法能处理的 PQ 节点,再利用公式(1)将 PQ(V) 型的分布式电源模拟成注入电流,进行潮流计算。第二次迭代时,根据修正后的电压计算无功功率,此时又转换为 PQ 节点,重复以上过程直至迭代收敛。

在处理 PV 节点时,为了保证 PV 节点迭代电压幅值不变和 PV 节点的有功功率不变,需要增加一个电压源向 PV 节点注入一定电流,以此来使得 PV 节点的电压幅值等于设定的电压幅值  $V'_{pv}$ 。增加的电压源为:

$$\Delta \dot{V}_{PV} = V'_{PV} - \dot{V}_{PV} \quad (7)$$

通过对  $\Delta \dot{V}_{PV}$  的判定来决定是否对 PV 节点通过注入无功电流进行补偿。若  $|\Delta \dot{V}_{PV}| < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为收敛精度),那么 PV 节点的电压将收敛于设定的电压幅值  $V'_{PV}$ ;若  $|\Delta \dot{V}_{PV}| \geq \varepsilon$ ,则需要对 PV 节点注入一定的电流使得 PV 节点收敛于设定的电压值,PV 节点注入补偿电流  $\Delta \dot{I}_{PV}$  的计算公式如下:

$$\Delta \dot{I}_{PV} = Z_{ii}^{-1} \times \Delta \dot{V}_{PV} \quad (8)$$

式中,  $\Delta \dot{I}_{PV}$  为 PV 节点注入补偿电流相量;  $Z_{ii}$  为 PV 节点的自阻抗;当有多个 PV 节点时为端口的入端阻抗矩阵,其对角线上元素为 PV 节点的自阻抗(即 PV 节点到根节点所有阻抗之和),非对角线上元素为 PV 节点之间的互阻抗(即 PV 节点  $i$  与 PV 节点  $j$  到根节点公共路径上所有阻抗之和)。

PV 节点的无功功率越界问题可采用传统方式处理,即在迭代过程中,若经过修正后的 PV 节点无功越限,则将其转化成无功为上限或者下限的 PQ 节点。

表 1 部分节点负荷数据

节点编号	轻负荷		一般负荷		重负荷	
	有功功率 /MW	无功功率 /Mvar	有功功率 /MW	无功功率 /Mvar	有功功率 /MW	无功功率 /Mvar
11	0.187	0.093	0.415	0.190	0.810	0.403
12	0.190	0.098	0.402	0.200	0.808	0.412
13	0.200	0.100	0.410	0.218	0.820	0.396
14	0.210	0.110	0.384	0.210	0.806	0.401
15	0.190	0.102	0.400	0.206	0.812	0.417
16	0.192	0.113	0.414	0.212	0.820	0.396
17	0.185	0.082	0.405	0.188	0.825	0.400
18	0.181	0.079	0.380	0.190	0.810	0.413

## 2 算例分析

采用本文前述的改进前推回代潮流计算方法,利用 Matlab 对 IEEE33 节点系统进行仿真分析,接线如图 2 所示。

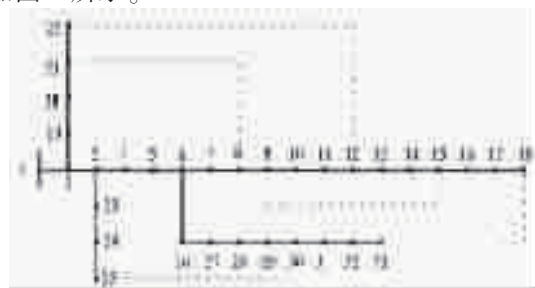


图 2 IEEE33 节点系统

不同类型 DG 在接入重负荷、轻负荷以及一般负荷区域时,对系统网损影响的变化规律具有差异,假定 11~18 号节点分别接入重负荷、一般负荷和轻负荷进行仿真和对比分析,具体负荷信息如表 1 所示。基准功率取  $1 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,电压基值取  $10 \text{ kV}$ ,则

母线电压为 1.02。

在三种负荷水平情况下,分别将各类型 DG 接入 17 号节点,计算接入 DG 前后的系统有功损耗。各种分布式电源的数据信息如表 2 所示;仿真结果如表 3 所示。

表 2 分布式电源的数据信息

DG 类型	相关参数
PQ 型	$P=0.424 \text{ MW}$ $Q=0.220 \text{ Mvar}$
PI 型	$P=0.424 \text{ MW}$ $I=0.030 \text{ kA}$
PQ(V)型	$P=0.424 \text{ MW}$ $E_{\text{DG}}=11.07 \text{ kV}$ $X_d=17 \Omega$ $x_p=38.6 \Omega$ $x=1.68 \Omega$
PV 型	$P=0.424 \text{ MW}$ $V=10 \text{ kV}$

表 3 DG 接入前后的系统有功损耗(单位:MW)

DG 类型	负荷水平		
	重负荷	一般负荷	轻负荷
无 DG	1.3463	0.5176	0.2916
PQ 型	1.1848	0.4435	0.2490
PV 型	1.2187	0.4590	0.2578
PQ(V)型(吸收无功)	4.5879	3.5633	3.3132
PQ(V)型(发出无功)	0.8948	0.4024	0.2597
PI 型	1.1485	0.4244	0.2385

除吸收无功的 PQ(V)型 DG,其它类型 DG 的接入均降低了配电网损耗,与未接入 DG 相比,损耗的降低程度如表 4 所示,负值表示接入 DG 后损耗增加。

表 4 DG 接入后系统有功损耗减小量(单位:MW)

DG 类型	负荷水平		
	重负荷	一般负荷	轻负荷
PQ 型	0.1615	0.0741	0.0462
PV 型	0.1276	0.0586	0.0338
PQ(V)型(吸收无功)	-3.2416	-3.0457	-3.0216
PQ(V)型(发出无功)	0.4515	0.1152	0.0319
PI 型	0.1978	0.0932	0.0531

仿真结果表明,DG 接入配电网对损耗的影响与 DG 的类型及接入区域的负荷水平密切相关。对于 PQ、PV、PI 和发出无功的 PQ(V)型 DG,无论其接入点附近的负荷水平如何,都可以降低系统损耗。但损耗的降低程度与接入点附近的负荷水平有关,接入区域为重负荷时损耗降低最多,其次是接入一般负荷区域,降损较少的是接入轻负荷区域。因此,对于 PQ、PV、PI 和发出无功的 PQ(V)型 DG,应尽量接入重负荷区域,充分利用 DG 发出的功率,降低网络损耗。对于吸收无功的 PQ(V)型 DG,应装设充足的无功补偿设备,否则该类型 DG 的接入将增加系统的损耗。

### 3 结束语

由于 DG 类型众多,因此在研究 DG 的接入对系统损耗的影响时,需要针对不同类型 DG 分别进行分析。本文通过对四种类型的 DG 在接入重负荷、轻负荷以及一般负荷区域时,系统损耗的变化情况进行仿真,全面分析、总结了各种类型 DG 接入对配电网损耗的影响规律。有关 DG 接入对系统损耗影响的分析结论可作为实际分布式发电接入决策时的参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 李兴源,李 蓓. 分布式发电及其对配电网的影响[J]. 国际电力,2005,9(3):45-49.
- [2] Quezada Víctor H. Méndez, Abbad Juan Rivier, Román Tomás Gómez San. Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2006, 21(2): 533-540.
- [3] 刘琳,陶顺,肖湘宁,等. 分布式发电及其对配电网网损的影响分析[J]. 电工电能新技术,2012,31(3):16-24.
- [4] 刘鹏,马明,张俊芳. 分布式电源对配网网损影响的研究[J]. 现代电力,2008,25(6):27-30.
- [5] Hoff T, Shugar D S. The Value of Grid-support Photovoltaics in Reducing Distribution System Losses[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(3):569-576.
- [6] Ayres Hugo M., Silva Luiz C. P. Da, Freitas Waldir. Evaluation of the Impact of Distributed Generation on Power Losses by Using a Sensitivity-Based Method [C]. Power & Energy Society General Meeting, 2009:1-6.
- [7] 闫丽梅,谢明霞,徐建军,等. 含分布式电源的配电网潮流改进算法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(5):1-22.
- [8] 陈海众,陈金富,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):35-40.
- [9] 吕学勤,吴辰宇. 含分布式电源的配电网潮流计算改进方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(21):48-51.
- [10] Feijdo Andr S. E, Cidris Jose. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2000, 15(1):110-115.
- [11] Freitas Waldir, Vieira Jose C. M, Morelato Andre. Influence of Excitation System Control Modes on the Allowable Penetration Level of Distributed Synchronous Generators[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2005, 20(2):474-480.
- [12] Chiradeja Pathomthat, Ramakumar R. An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation [J]. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2004, 19(4):764-773.

#### 作者简介:

朱红(1971),女,高级工程师,主要研究方向为电网运行调度、智能电网、分布式能源;

韦磊(1982),男,南京人,高级工程师,博士研究生,主要研究

## S变换在电力系统故障暂态信号时频分析中的应用

刘文涛, 蒋东平

(南京供电公司, 江苏南京 210019)

**摘要:**针对传统的傅立叶分析难以处理电力系统故障时产生的暂态信号,提出一种基于S变换的电力系统故障暂态信号时频分析技术,通过一个时窗调节因子改造S变换的可变高斯窗函数,得到时频分辨率可调的广义S变换,对输电线故障暂态信号进行了时频分析仿真,信号的广义S变换图形状基本保持不变,显示出改进的S变换对含噪声的信号有较强的抗噪和分析能力。应用改进的S变换对信号进行了分析与短时傅里叶变换、多窗重排谱图作了比较,得到改进的S变换具有更高的时频聚集性和分辨率,能够较好的抑制交叉项。仿真结果证实了方法的有效性。

**关键词:**电力系统;故障信号;时频分析;多窗重排谱图;S变换

**中图分类号:** TM711

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)S2-0007-03

## 0 引言

电力系统发生故障后,其电流、电压、功率等各电气量将发生剧烈变化,这些电气量中含有大量的非工频暂态分量。从信号的角度看,由故障引起的这些暂态分量属于非平稳的随机信号,其中蕴含着丰富的故障信息。传统的方法是用傅立叶变换进行分析,但由于傅里叶变换不具有频域局部化特征,所以在处理非平稳故障信号时有较大的局限性。Stockwell等<sup>[1]</sup>提出的S变换是近年来人们研究非平稳信号的时频分布的一个重要工具。由文献[1]可知,S变换吸收并发展了短时傅里叶变换和连续小波变换,它采用了与频率有关的可变高斯函数,具有多种分辨率,克服了短时傅里叶变换固定分辨率的不足。S变换中含有相位因子,这是小波变换所不具备的特性。而且由于是一种线性时频表示,因此不存在Cohen类分布的交叉项的干扰。近年来,基于S变换的非平稳信号分析的方法已经应用于地震信号处理、医学信号处理和电力技术等领域<sup>[2-6]</sup>。本文将S变换及其改进后的时频分辨率可调的广义S变换引入到电力系统故障信号的时频域分析领域,致力于利用不同时频分析方法分别对故障信号进行仿真研究。

## 1 时频分析方法

## 1.1 多窗重排谱图

平稳随机信号  $S(t)$  的频谱统计特性常用功率谱密度  $S_s(w)$  来表示,其表达式如下:

$$S_s(w) = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{2T} \left| \int_{-T}^{+T} s(t) e^{j\omega t} dt \right|^2 \right\} \quad (1)$$

在实际计算中采用对无限长的平稳信号序列进

行截断,这等于对信号加以矩形窗,使得谱分辨率较低。Thomson提出多窗口法,即利用多个正交窗口  $\{h_k(t), k \in Z\}$  获得各自独立的近似功率谱估计,然后综合这些估计,最终得到平稳信号的功率谱估计。

$$S_{s,k}(w) = \sum_{k=0}^{K-1} d_k S_s^{(h_k)}(w) \quad (2)$$

其中  $K$  为窗口数,  $d_k$  为估计系数,这种方法在估计精度和减小振荡方面均有较好改善。Bayram和Baraniuk应用正交 Hermite 窗函数将 Thomson 提出的多窗口谱分析方法推广到时间-频率平面:

$$MWS_k(t, w) = \sum_{k=0}^{K-1} d_k S_s^{(h_k)}(t, w) = \sum_{k=0}^{K-1} d_k \left| \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) h_k^*(\tau-t) e^{-jw\tau} d\tau \right|^2 \quad (3)$$

将式(3)的方法推广,将其应用于重排谱图,既得多窗重排谱图 (MWRS, Multiple Window Reassigned Spectrogram)

$$MWRS_k(t, w) = \sum_{k=0}^{K-1} d_k RSP_s^{(h_k)}(t, w)$$

其中,  $RSP_s^{(h_k)}(t, w)$  为重排后的谱图(简称为RSP, Reassigned Spectrogram),它在任一点处的值等于重排到这一点的所有谱图值的和。

## 1.2 S变换

Stockwell在文献[7]中提出的连续S变换的正反变换表达式为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}\right) \exp(-j2\pi f t) dt \quad (4)$$

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) \exp(j2\pi f \tau) df \quad (5)$$

式中,  $S(\tau, f)$  为连续函数  $h(t)$  的正变换,  $f$  为频率,  $\tau$  为时窗函数中心点,  $j$  为虚数单位。S变换采用宽度可变的高斯窗函数,其时窗宽度随频率  $f$  呈

反比变化,在低频段的时窗较宽,从而获得较高的频率分辨率;而高频段的时窗较窄,故可获得很高的时间分辨率。 $S$  变换窗函数需满足归一化条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \omega(t,f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2}{2}} e^{-j2\pi ft} = 1 \quad (6)$$

由(5)式可知  $S$  变换与傅里叶变换互为逆变换,因此  $S$  变换具有无损可逆性,在时域与频域的相互变换过程中没有任何的信息损失。鉴于  $S$  变换与傅里叶变换的紧密联系,因此可以直接利用现有的快速傅里叶变换算法实现正、反  $S$  变换的计算<sup>[6,7]</sup>。这样极大地提高了  $S$  变换的计算速度,使  $S$  变换具有更广泛的应用前景。

$S$  变换正反变换的离散表示形式为:

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(\frac{2\pi^2 m^2}{n}\right) \exp\left(j \frac{2\pi m i}{N}\right) \quad (7)$$

$$h[kT] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] \right\} \exp\left(j \frac{2\pi n k}{N}\right) \quad (8)$$

式中,  $i, m, n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。特别的,当  $n=0$  时的离散  $S$  变换为

$$S[jT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left[\frac{m}{NT}\right] \quad (9)$$

离散的  $S$  变换也受到采样和有限长度的影响,在时域和频域会产生边界效应<sup>[8]</sup>。实际信号往往是实信号,因此需要对原信号做希尔伯特变换,获得对应的解析信号后再做  $S$  变换。

### 1.3 改进的 $S$ 变换

本文对  $S$  变换的高斯窗函数进行改造,引入一个调节因子,从而根据实际应用中非平稳信号的频率分布特点和时频分析的侧重点,进一步加快或减慢时窗宽度随信号频率变化的速度,更好的适应具体信号的解释。式(4)方括号中高斯窗的宽度等于频率的倒数,为了改变时频分辨率,可以将窗宽因子  $\sigma$  修正为

$$\sigma = k/f \quad (10)$$

这样就可以得到改进的  $S$  变换

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{k\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2k}\right) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (11)$$

上式中当  $k>1$  则提高频率分辨率,反之,则提高时间分辨率。由傅里叶变换的尺度变化性质知,时窗函数在时域的压缩对应其在频域的拉伸,反之亦然。根据 Heisenberg 不等式,存在时间分辨率和频率分辨率的不相容性,为了获得较好的时间分辨率,要选择时间窗较窄的窗函数(对应与频率窗较宽),但此

时不能获得很高的频率分辨率;若选择频率窗较窄的窗函数,其时间窗就较宽,故达不到很好的时间分辨率,因此,要根据实际需要有所折中<sup>[9]</sup>。离散序列的改进的  $S$  变换可由下式计算( $f \rightarrow n/NT, \tau \rightarrow jT$ )

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-\frac{2\pi^2 k^2 m^2}{n}\right) \exp\left(j \frac{2\pi m i}{N}\right) \quad n \neq 0 \quad (12)$$

当  $n=0$  时,离散序列的改进的  $S$  变换为

$$S[jT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left[\frac{m}{NT}\right] \quad (13)$$

## 2 故障信号仿真分析

### 2.1 去噪预处理

为了考察其用电情况。对其中三天的电网电压值进行监测,得到了一个电压采样序列,但由于在采样过程中,监测设备出现了一些故障,使得所采集信号引入了噪声,现利用小波分析,将这种由于仪器故障引起的噪声进行消噪处理。

该问题是一个消噪问题,利用小波消噪的基本原理,首先选择一个小波 db1,然后确定小波分解的层数  $N$ (在这里,取  $N$  为 3)。

针对本问题。分别用强制消噪处理、默认阈值消噪处理、给定软(或硬)阈值消噪处理等三种消噪方法进行消噪处理,并对消噪的结果加以对比。输出结果如图 1 所示。

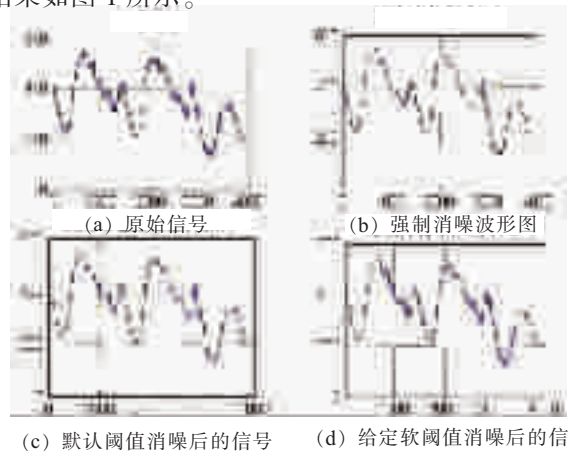


图 1 原始信号、强制消噪及给定阈值消噪信号对比

从图 1 可看出,消噪处理后的信号较为平滑,但它有可能失去信号中的有用成分,而默认阈值处理和给定阈值消噪处理则在实际应用中更实用一些。

### 2.2 时频分析方法对比

对预处理后的仿真信号分别使用短时傅里叶变换(STFT)、多窗重排谱图(MWRS)、 $S$  变换及改进的  $S$  变换等方法进行仿真对比,其中 STFT 选取长度为 25 的 Hamming 窗作为固定的窗函数;图 2

(d)对故障信号实施了改进的S变换,取调节因子 $K=3$ ,采用宽度与频率成反比,幅度与频率呈正比的高斯窗函数。比较图2(a)~2(d)等,故障信号改进的S变换在时域和频域上都具有良好的分辨率。

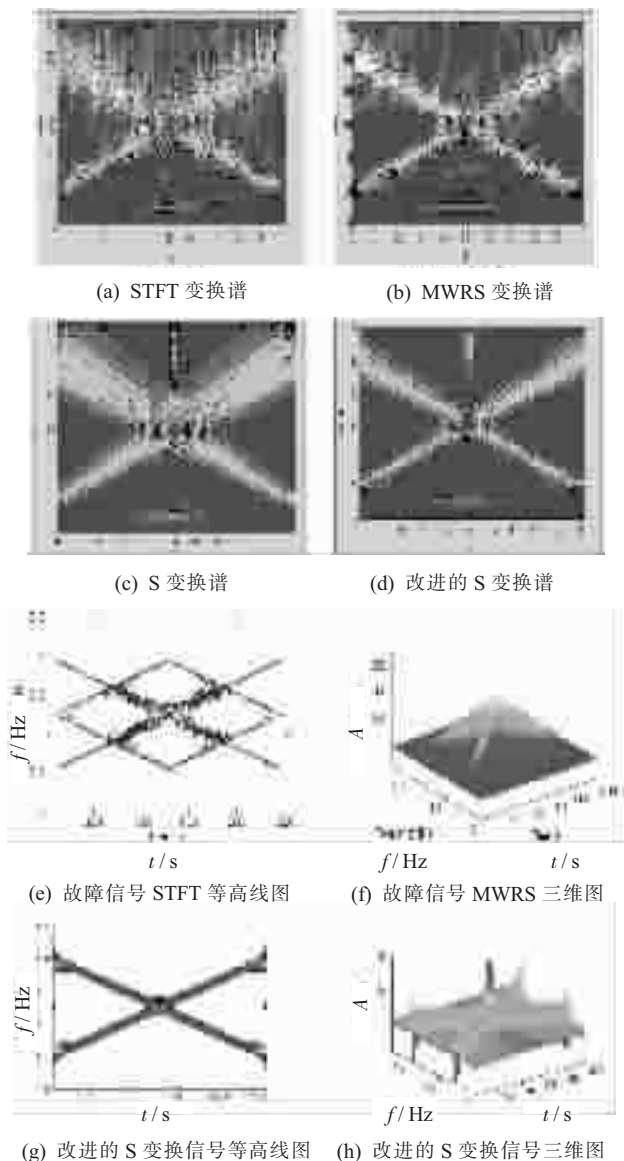


图2 不同时频分析方法仿真实例

从图2(e)~图2(h)可以看出,STFT、MWRS、S变换和改进的S变换四种时频表示方法都能够描述故障信号的时频表示,但是改进的S变换比传统S变换、MWRS、STFT具有更高的时频聚集性和分辨率,能够较好的抑制交叉项。图中显示改进的S变换频带宽度(尤其在高频方向)减小,即频率分辨率较高。上述仿真结果表明,信号的改进S变换图形状基本保持不变,显示出改进的S变换对含噪声

的信号也有较强的抗噪和分析能力。

### 3 结束语

本文通过对S变换的窗函数进行改造,可以获得具有更高灵活性和时频分辨率的广义S变换,是时频平面上描绘了故障信号的频率和幅值的变换情况,有效地刻画信号在时域和频域中的全貌和局部特征。通过分析各种噪声模型和故障信号在S变换谱图上的不同表现,可有效分辨故障信号。对比采用STFT、MWRS、S变换和改进的S变换四种时频分析方法对电力系统故障信号进行仿真分析可知,改进的S变换比S变换、MWRS、STFT具有更高的时频聚集性和分辨率,能够较好的抑制交叉项。并且,S变换与傅里叶变换互为逆变换,为不同时频分析方法应用于电力系统故障信号处理提供了一种新的思路和方法。

#### 参考文献:

- [1] Stockwell R G, Mansinhal L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [2] 邹文. S变换时频分析技术及其在 seismic 勘探中的应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005: 12-14.
- [3] 辛欣, 张效民. 基于S变换的水中目标特征提取[J]. 电声技术, 2007, 31(1): 10-12.
- [4] Assous S, Humeau A, Tartas M, et al. S-transform applied to laser Doppler flowmetry reactive hyperemia signal [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(6): 1032-1037.
- [5] 范树凯. 非线性跳频信号的时频分析及其应用[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 16-20.
- [6] Dash P K, Behera H S, Lee I W C. Time sequence data mining using time-frequency analysis and soft computing techniques [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 202-210.
- [7] 王殿伟. 基于S变换的时频特征提取与目标识别[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 10-12.
- [8] Schimmel M, Gallart J. The inverse S-transform in filters with time-frequency localization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(11): 4417-4422.
- [9] 陈学华, 贺振华. 改进的S变换及在地震信号处理中的应用[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(4): 449-553.

#### 作者简介:

刘文涛(1983),男,博士,工程师,从事运营监测工作;  
蒋东平(1961),男,江苏南通人,工程师,从事电工技能培训管理工作。

(上接第6页)

方向为电力系统自动化,电力系统信息通信;

黄莉(1985),女,南京人,工程师,硕士,研究方向为智能用电、需求侧管理,分布式电源与微电网;

史豪杰(1989),男,南京人,硕士研究生,研究方向为智能配电

网经济运行分析;

余昆(1978),男,南京人,博士,副教授,研究方向为配用电规划与评估、智能配电网运行分析、配电网智能调度与自愈控制、高效用电与节能。

# 风力发电对配电网电压波动性的影响研究

朱红<sup>1</sup>, 韦磊<sup>1,2</sup>, 蔡敏<sup>2</sup>, 余昆<sup>2,3</sup>

(1. 南京供电公司, 江苏南京 210019; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏南京 211100;

3. 南京智能配用电工程技术研究中心, 南京 211100)

**摘要:** 风力发电接入改变了配电网的运行特性, 功率潮流改变过程中会产生电压波动。在电压波动的机理分析基础上, 利用电力系统仿真软件 DigSILENT/Power Factory 对风力发电机开停机过程和输出功率发生周期性变化过程中的电压波动情况进行仿真。结果表明风力发电机的开停机和功率波动给配电网的电压波动影响较小。

**关键词:** 风力电源; 配电网; 电压波动

中图分类号: TM726

文献标识码: B

文章编号: 1009-0665(2014)S2-0010-03

## 0 前言

随着智能电网建设的推进, 越来越多的分布式电源将接入到配电网<sup>[1]</sup>。风力发电机属于分布式电源的一种, 其输出功率波动很大, 不确定性程度高, 容易造成配电网的电压波动, 严重影响配电网运行的安全和可靠性。因此, 对分布式电源接入配电网引起的电压波动进行研究具有十分重要的意义。

分布式电源, 尤其是风力发电机接入配电网带来的电压波动问题已成为研究的一个热点<sup>[2-4]</sup>。由于电压波动的机理与计算比较复杂, 目前多数采用现场实测的方法进行研究<sup>[5]</sup>。文献[6]对分布式发电对闪变的影响进行了简化分析, 指出了分布式发电对电压波动和闪变的潜在影响, 文献[7]从配电网的整体角度考虑, 分析了分布式发电引起的电压波动和闪变机理。

## 1 电压波动理论

电压波动是指公共连接点电压在短时间里急剧变动, 并且明显偏离标称电压值(IEEE 中给出的典型电压波动范围为 0.1%~7%, 变化频率小于 25 Hz), 相对电压偏差而言, 电压波动也称为快速电压变动, 或动态电压变动, 是分布式电源对电网电能质量的主要负面影响之一。电压闪变是指电光源的电压波动造成灯光照度不稳定, 从而带来的人眼视觉反应<sup>[1]</sup>。严格来说, 闪变是电压波动引起的有害结果。电压波动取值可表示为:

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} \times 100\% \quad (1)$$

其中:  $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  分别为风力发电机接入后电

压最大值和最小值;  $U_n$  为系统额定电压值。

对于一条线路, 已知首端功率和线路阻抗时, 其两端的电压差如下:

$$\Delta U = (PR + QX) + j(PX - QR) \quad (2)$$

其中,  $P$ 、 $Q$  分别为线路首端的有功功率和无功功率,  $R$ 、 $X$  为线路的电阻和电抗。

当线路较短时两端的相角差较小, 接入点电压波动可近似表示为:

$$d(\Delta U) \approx d(P)R + d(Q)X \quad (3)$$

## 2 风力发电对配电网电压波动影响的理论分析

风力发电机一般采用定功率因数或单位功率因数控制, 则公式(3)就可进一步简化为:

$$d(\Delta U) \approx d(P)(R + k \cdot X), k = \frac{Q}{P} \quad (4)$$

当采用单位功率因数控制时  $k=0$ <sup>[7]</sup>。

由上式可以看出, 对于某一配电网, 其  $R$ 、 $X$  恒定, 电压波动值的大小和风力发电机输出功率的波动值直接相关。当接入配电网的风力发电机输出功率出现波动时, 配电网内的有功电流和无功电流会随之变化, 从而导致配电网内的电压波动。根据上式可以看出, 当风力发电机采用单位功率因数控制时, 电压波动值和风力发电机输出的有功功率波动值呈正比关系, 也就是说风电机在短时间内输出的有功功率值变化越剧烈, 配电网内的电压波动就越严重。但实际中大部分风电机在运行过程中还会吸收无功功率, 所以电压波动值同有功功率波动值并非线性关系。

实际中有多种因素会导致风电机的输出功率出现波动。由于风力发电机是利用风力资源进行发电, 受是风速和湍流强度影响较大, 不确定性高, 较难控

制。另外,风电控制器的算法和参数设定也可导致输入系统功率周期性变动<sup>[7]</sup>。基于上述分析,本文设计了三个场景,分别对风力发电机启动、退出运行和输出功率周期性变动三种情形进行仿真。

### 3 仿真分析

仿真算例接线图如图1所示,其中,分布式电源采用目前应用最多的异步风力发电和小水电,负荷采用恒定阻抗模型,分布式电源都采用单位功率因数方式控制。采用DIGSILENT/Power Factory软件进行仿真分析。

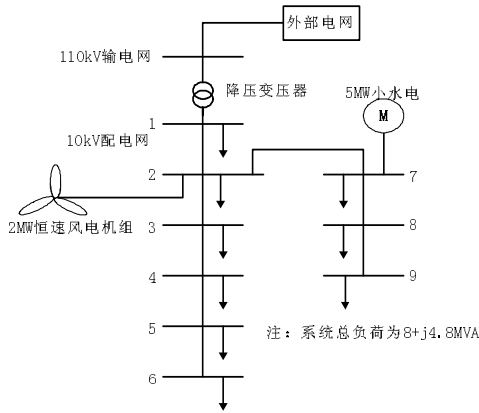


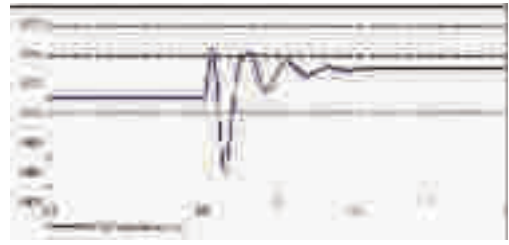
图1 仿真算例接线图

#### 3.1 风力发电机启停机电压仿真分析

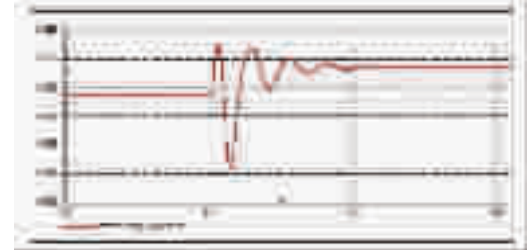
假设5s前风力达不到发电机的启动要求,风力发电机处于停机状态。5s时风速开始增大,达到风力发电机运行的额定风速,此时风力发电机开始投入运行;但在风力发电机刚投入运行时其输出有功功率和无功功率并不会阶跃到恒定功率,实际存在一个过渡过程,此过程中有功功率和无功功率波动较大,直到10s时输出功率才达到稳定。观察系统内各个节点的电压变化情况,并以风力发电机接入的2号母线、小水电接入的7号母线和无分布式电源接入并且位置偏馈线末端的5号母线为例进行分析,其电压的变化曲线如图2所示。

由上可知,各条母线的电压在风力发电机接入时均会发生不同程度的波动,由于分布式电源的接入,母线的电压被抬高。由于7号母线的小水电注入功率最大,所以其电压变化率较大;2号母线所接的风力发电机注入较小功率,但由于其运行过程中要吸收无功功率,所以其电压变化率最大;5号母线处于馈线末端位置,其短路容量较小,所以尽管没有分布式电源接入,但其电压变化率也相对较大。从计算结果可知,各母线的电压变化率远小于IEC所规定的7%,即使考虑动态过程的超调量,也不超过该数值,并且电压波动也远小于所规定的2%。

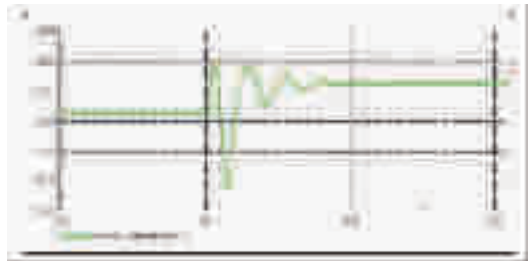
同样,假设5s之前风速可以达到风力发电机



(a) 2号母线电压的变化曲线



(b) 5号母线电压的变化曲线



(c) 7号母线电压的变化曲线

图2 风力发电机启动过程电压的波动曲线

表1 风力发电机接入前后母线电压的变化情况

母线编号	2	5	7
投入前电压/kV	1.0349	1.0151	1.0386
投入后电压/kV	1.0352	1.0153	1.0388
电压变化率/%	0.023	0.020	0.022
超调量/%	0.016	0.017	0.025
$U_{max}$ /kV	1.0354	1.0155	1.0391
$U_{min}$ /kV	1.0343	1.0145	1.0380
电压波动/%	0.108	0.103	0.106

运行要求,即风力发电机正常运行,在5s时风速突然减小,不能达到风力发电机运行的额定风速,风力发电机退出运行。此时风力发电机的输出有功功率和无功功率出现较大的波动变化,直到10s时稳定为0,结果如表2所示。

表2 风力发电机退出运行前后母线电压变化情况

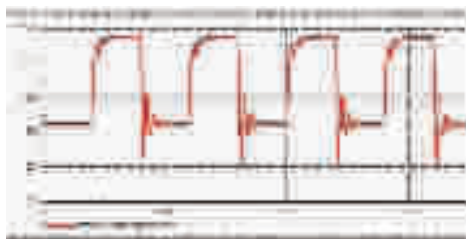
母线编号	2	5	7
退出前电压/kV	1.0353	1.0154	1.0389
退出后电压/kV	1.0350	1.0152	1.0387
电压变化率/%	0.029	0.020	0.021
超调量/%	0.039	0.030	0.029
$U_{max}$ /kV	1.0354	1.0155	1.0391
$U_{min}$ /kV	1.0338	1.0140	1.0375
电压波动/%	0.157	0.147	0.157

由表2可知,风力发电机退出时各母线电压均

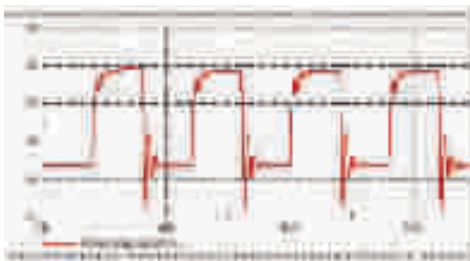
会发生不同程度的波动,由于分布式电源退出失去电源的支撑作用,各母线的电压会降低。由上述分析可知,考虑实际中分布式电源接入和退出运行一般存在过渡过程,在这种逐步变化的过程中,分布式电源对配电网电压的影响较小,各母线的电压只有很小的波动,可以忽略不计。实际中对风力发电机的保护,启动和停机信号一般为斜坡函数,在逐步的变化过程中,风力发电机对配电网电压的影响将更小,各母线的电压只有很小的波动,可以忽略。

### 3.2 风力发电机输出功率发生周期性扰动时的电压仿真分析

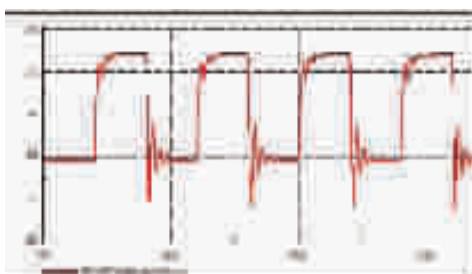
由于在实际情况下风机输出具有一定的惯性,风力发电机不能输出严格的矩形波功率,因此为达到风力发电机的输出功率周期性变化的目的,只能通过设置风速按照矩形波进行周期性的变化实现。假设 10 s 之前风速恒定,在 10 s 时风速突然变小但仍然能达到风电机的运行要求,之后风速以矩形波的形式进行周期性的变化,一个周期的时长为 20 s。对这一过程进行仿真计算,并同样以 2 号、5 号和 7 号母线为例进行分析说明,其电压的变化曲线如图 3 所示。假设风速按照矩形波周期性变化,此时风力发电机的输出功率就发生周期性的变化。仿真结果如图 3 所示。



(a) 2号母线电压的变化曲线



(b) 5号母线电压的变化曲线



(c) 7号母线电压的变化曲线

图3 风力发电机出力变化时电压的波动曲线

表3 风力发电出力变化时母线电压的变化情况

母线编号	2	5	7
$U_{\max}/kV$	1.038	1.018	1.041
$U_{\min}/kV$	1.034	1.014	1.038
电压波动/%	0.382	0.360	0.373

2号母线接入的风力发电机为异步发电机,可控性相对较差,且在运行过程中需要吸收无功功率,有功功率改变时无功功率也随之发生变化,而无功功率变化是影响电压的主要因素,因此2号母线的电压闪变情况最为严重,为0.382%。从仿真结果来看,风力发电机输出功率发生周期性扰动时引起的电压波动值相对于开停机过程引起的电压波动值要大得多,是引起配电网电压波动的主要原因。但是,这个计算结果仍然远小于国标规定的2%的电压波动限值。因此,风力发电机出力变化引起各母线的电压波动可以忽略。

### 3 结束语

由于分布式电源的启、停功率的随机波动均不是阶跃变化,即使接入容量相对于系统总负荷较大的风力发电机,其开停机过程和出力变化所引起的配电网电压波动非常小。实际中,不仅要考虑机组输出功率的波动,还要考虑配电网的短路容量。短路容量越小,其功率波动时产生的电压变化就越大。即使风电机接入短路容量较小的低压配电网,它的接入也会使配电网的短路容量增大,从而抑制电压波动。如果风力发电机装置无功补偿设备,那么对电压波动的抑制作用就更明显。因此,分布式电源对配电网电压波动的影响十分有限,除了功率有大幅度的急剧变化以外,可忽略其微小的影响。

#### 参考文献:

- [1] 乔文俞.现代电能质量问题的研究及监测系统开发[D].北京交通大学:硕士学位论文,2011.
- [2] Saad-Saoud Z, Jenk ins N. Models for predicting flicker induced by large wind turbines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3):743-748.
- [3] Ake Larsson. Flicker emission of wind turbines during continuous operation [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2002, 17(1): 114-118.
- [4] 孙涛,王伟胜,戴慧珠,等.风力发电引起的电压波动和闪变[J].电网技术,2003,27(12):62-66.
- [5] Thiringer T, Dahlberg JA. Periodic pulsations from a three-bladed wind turbine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(2): 128-133.
- [6] Niskayuna B, Kroposki DG. Power quality [J]. Protection and Reliability Case Studies Report, 2003(8):15-20.

# 电力系统瞬时无功功率补偿研究与应用

袁 远,王徐延

(南京供电公司,江苏南京 210019)

**摘要:**随着电力电子技术的发展,电力系统中增加了大量的非线性负载,导致多种电力运行指标恶化,其中最主要的两项是谐波污染严重和无功需求增加,给电网带来额外负担且影响了供电质量。而无功补偿是提高电能质量,保证电网安全性和稳定性的重要手段之一,对电网的安全运行和降损节能有重要的意义。本文主要对无功电流瞬时无功补偿从理论上给予了严格的公式推导,得出了最终的补偿电流换算公式,通过 MATLAB 仿真验证了这种方法的正确性,并将其应用在某城市实际的电网运行中,运行效果良好。

**关键词:**瞬时无功功率;无功补偿;MATLAB 仿真

中图分类号:TM761<sup>+</sup>.1

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0013-04

## 0 引言

无功补偿可以有效改善三相不平衡问题,对电网的安全和降损节能有着重要意义<sup>[1]</sup>,因此被广泛应用于电力电子技术、电力系统、电气自动化技术、电工理论等领域<sup>[2]</sup>。近年来,随着大型电机和电力电子装置的广泛应用,谐波和无功功率的补偿问题日益受到重视<sup>[3]</sup>,但建立在平均值基础上的传统功率理论已经难以适用于对变化的无功功率进行快速动态跟踪补偿的场合<sup>[4]</sup>,而基于瞬时无功功率理论的检测法是电网畸变电流检测的有效方法。无功补偿包括两个方面,一是对系统,即对输电线的补偿;二是对负荷的补偿。低压电网负荷补偿是电力系统无功补偿中重要的组成部分,它着重于在负载端对电网中负载消耗的无功功率进行补偿<sup>[5]</sup>。本文重点研究了无功电流法瞬时无功补偿的原理,进行了仿真,并将其应用在实际系统运行中。

## 1 不可控及可控无功功率补偿

### 1.1 不可控无功功率补偿

在无功补偿中,最简单的方法是接上扼流线圈或电容器,见图1中(a),(b)。电容器与扼流线圈接在一起(图1中(c)),可补偿谐波或滤波。串联电容器(图1中(d))提供平衡无功功率,特别在长距离输电线上,可调线路角减少无功功率输送,要注意这种方式会引起同步振荡<sup>[6]</sup>。

### 1.2 可控无功功率补偿

(1) 传统的无功功率补偿器。

图1中(e)是自饱和电抗器,用于抑制主频率以及瞬时过电压。图1中(f)是直流电压控制扼流线圈,用以预防磁化扼流线圈,并调节其饱和特性。图1中(g)是同步电动机,仅供应无功功率<sup>[7]</sup>。



图1 无功功率补偿装置示意图

(2) 现代化的无功功率补偿器。

图1中(h)为晶闸管控制电抗器(TCR)。电路包括变压器、耦合电网整流器和扼流圈。图1中(i)为晶闸管开闭电容器(TSC),晶闸管接成反并联电路。电容器电流通过分段调节来达到改变电容器电流的目的。扼流线圈限制开关闭合的冲击电流和短路电流。图1中(j)为主整流无功功率变换器电抗储存。该方式会产生一些直流输出。主无功功率的改变是通过相位控制实现的。图1中(k)的自整流无功功率变换器电容储存是近来发展的无功功率补偿装置<sup>[8]</sup>。

## 2 无功电流法瞬时无功补偿

### 2.1 瞬时有功功率的概念

在交流电路中有一个“瞬时功率”的概念。瞬时功率即使对于稳定性负载也是周期性变化的,因而不能用它衡量负载消耗能量大小。传统上用它的一个周期内的平均值,作为衡量的尺度,称之为“有功功率”。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (1)$$

其中  $T$  是瞬时功率的周期。对于快速变化的负载,其当前消耗的能量水平应根据最靠近的一个电源周期内的瞬时功率的平均值来衡量,即  $t$  时刻负载消耗的有功功率应为:

$$P \Big|_{t-T}^t = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t P(t) dt \quad (2)$$

若  $t$  连续变化, 则(2)式的值也是连续变化的, 记作  $P(t)$ , 如图 2(d)所示, 显然  $P(t)$  综合了瞬时量和周期量特征的积分限函数, 所以我们称之为“瞬时有功功率”。对于稳定的负载, 其瞬时功率的周期是电源电压周期的一半, 故可证明稳定负载的功率:

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t P(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} p(t) dt = p \quad (3)$$

由此可见, 瞬时功率包含了传统的有功概念, 前者是后者的推广和引申。

当电力系统含有储能元件 (电感  $L$  和电容  $C$ ) 时, 在稳定运行情况下, 它们与电源之间存在着能量的“往返输送过程”, 即在前半周期由电源吸收 (或放出) 能量, 而在后半周期则向电源放出 (或吸收) 能量。就整个周期而言, 它们既不发出也不消耗能量, 因此在传统的平均功率中包含这种“往返输送过程”的任何信息 (如往返输送的能量的强度和频率)。

因  $S^2 = P^2 + Q^2$ , 瞬时有功功率  $p(t)$  是一个积分限函数, 那么如果要定义“瞬时无功功率”  $q(t)$  的话, 它也应该是一个积分限函数。

## 2.2 瞬时补偿原理

图 2 为变动负载由补偿装置进行瞬时补偿的示意图。图中  $u_L, i_L$  为负载的端电压和电流,  $u_s, i_s$  为电源的电压和电流,  $u_C, i_C$  为补偿装置的端电压和电流, 这些量均为瞬时值。

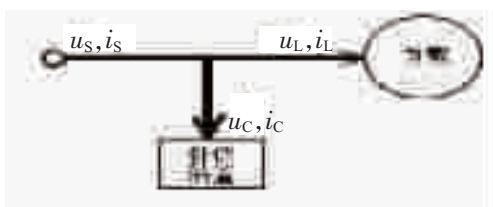


图 2 瞬时补偿示意图

在图 2 所示具有补偿装置的电力系统中, 由于补偿装置在整个过程 (或周期过程的任意周期内) 既不消耗也不发出能量, 则根据能量守恒定理可知: 负载在任意过程任一电流周期内吸收的能量与电源同一时期提供的能量必须相等, 即

$$\int_{t-T}^t p_L(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t p_s(t) dt \quad (4)$$

上式除以  $T$  则得

$$P_L(t) = P_s(t) \quad (5)$$

假设电源电压为:

$$u_s(t) = \sqrt{2} U \sin \omega t \quad (6)$$

补偿后期望的电网电流为:

$$i_s(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

其中  $\varphi$  为期望达到的功率因数角, 故电网功率为:

$$p_s(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t u_s(t) i_s(t) dt = UI \cos \varphi \quad (8)$$

而

$$u_s(t) i_s(t) = \sqrt{2} U \sin \omega t \cdot \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi) = UI \cos \varphi \left[ 1 - \frac{\cos(2\omega t + \varphi)}{\cos \varphi} \right] \quad (9)$$

根据(8), (9)两式可得:

$$i_s(t) = \frac{P_s(t)}{u_s(t)} \left[ 1 - \frac{\cos(2\omega t + \varphi)}{\cos \varphi} \right] \quad (10)$$

考虑到式(5), 则式(10)又可写成:

$$i_s(t) = \frac{P_L(t)}{u_s(t)} \left[ 1 - \frac{\cos(2\omega t + \varphi)}{\cos \varphi} \right] \quad (11)$$

因为

$$i_s(t) = i_L(t) + i_C(t) \quad (12)$$

故补偿电流应为:

$$i_C(t) = \frac{P_L(t)}{u_s(t)} \left[ 1 - \frac{\cos(2\omega t + \varphi)}{\cos \varphi} \right] - i_L(t) \quad (13)$$

由式(3)可知: 当测定了负载瞬时电流  $i_L(t)$  和负载的瞬时有功功率  $P_L(t)$  后, 就可以由式(13)确定所需的补偿装置电流  $i_C(t)$ , 使电网电流达到期望的功率因数, 并且不含任何谐波分量。

## 3 瞬时无功补偿的 MATLAB 仿真模型建立

根据无功电流法瞬时无功补偿的基本原理, 我们知道仿真的关键是计算出补偿电流  $i_C(t)$ , 而根据公式(13), 要想计算出  $i_C(t)$ , 我们必须首先测量出  $i_L(t)$  和  $P_L(t)$ , 使电网达到期望的功率因数。根据公式(2), 我们可以得到  $P_L(t)$ 。建立仿真的原理见图 3 所示, 利用 MATLAB 仿真的接线图, 见图 4。

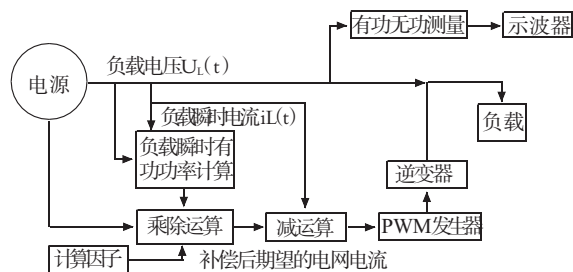


图 3 瞬时无功补偿仿真原理图

系统加补偿之前, scope5 的波形图, 如图 5 所示。系统加补偿之后, scope6 的波形图, 如图 7 所示 (蓝色波形为无功功率变化情况, 绿色波形为有功功率变化情况)。从仿真的 scope5 波形图, 我们可以看出无功功率的确得到了有效的补偿, 从而验证了瞬时无功补偿的正确性。

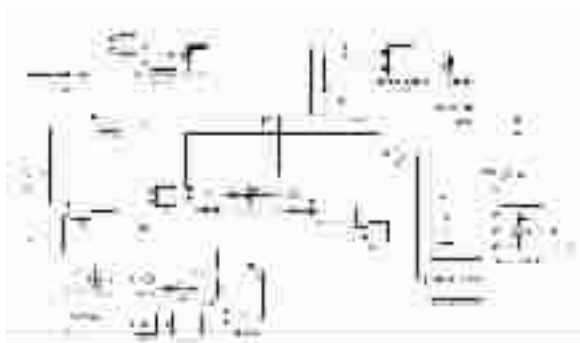


图 4 无功电流法瞬时无功补偿仿真接线图

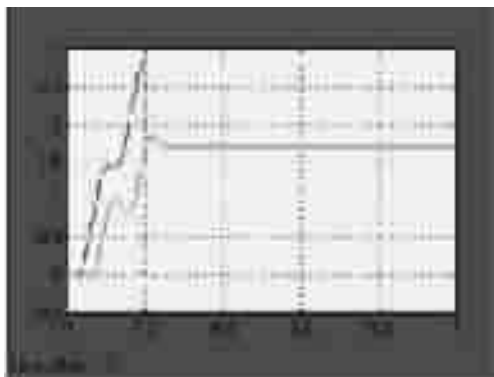


图 5 加 TSC 补偿之前 scope4 和 scope5 波形图

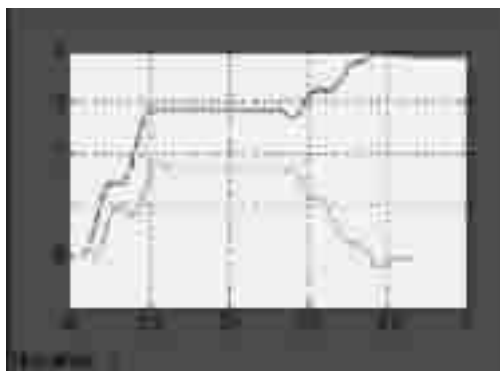


图 6 加 TSC 补偿之后 scope4 和 scope5 波形图

#### 4 瞬时无功补偿在电力系统的实际应用

以 110 kV 南京某变电站为例。图 7 为某日该主变无功运行趋势图,变电站主变无功缺口较大,但在使用传统无功补偿设备后,母线电压出现较大波动,影响供电质量及功率因数。

在运用无功电流瞬时无功补偿后,母线电压、电流波形均有明显改善,消除了波形中的毛刺和尖峰,使系统内的波形更接近正弦波。减少了谐波对系统负载的影响,保持设备运行稳定,如图 8 所示。

对于冲击大的负荷,运用无功电流瞬时无功补偿后,无功冲击有了明显改善,考核点的功率因数保持在 0.95 左右运行,满足了相关国家标准的规定。补偿前后母线的功率趋势如图 9、图 10 所示,补偿前后的母线的功率因素趋势图如图 11、12 所示。

由 7、8、9、10、11、12 等 6 张图可知,无功电流

瞬时无功补偿法具有响应速度快,能够实时跟踪系统无功变化,可以有效地起到稳定波动性负荷工作电压、提高功率因数的效果。

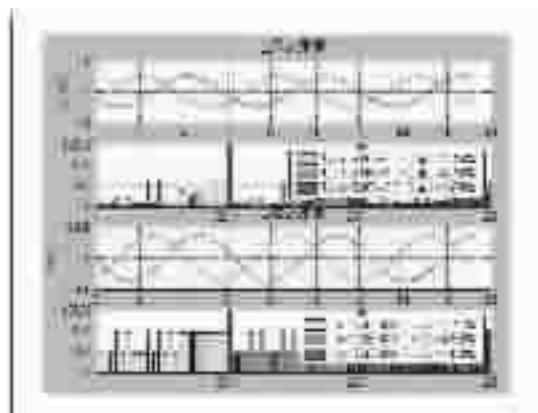


图 7 补偿前电压和电流波形图

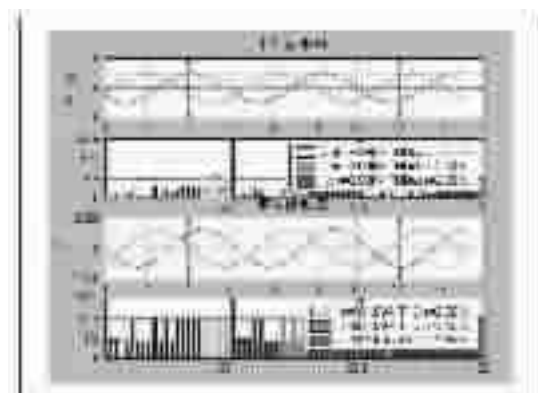


图 8 补偿后电压和电流波形图

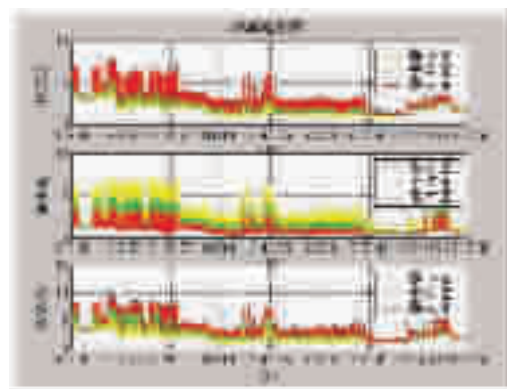


图 9 补偿前功率趋势波形图

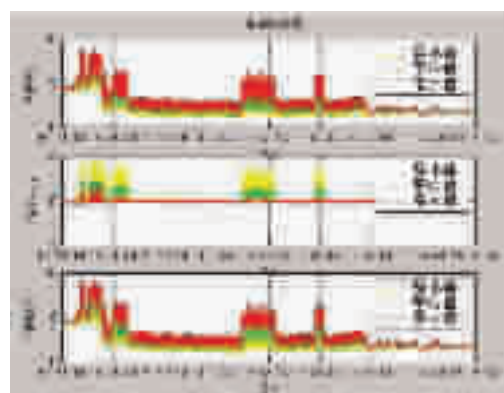


图 10 补偿后功率趋势波形图

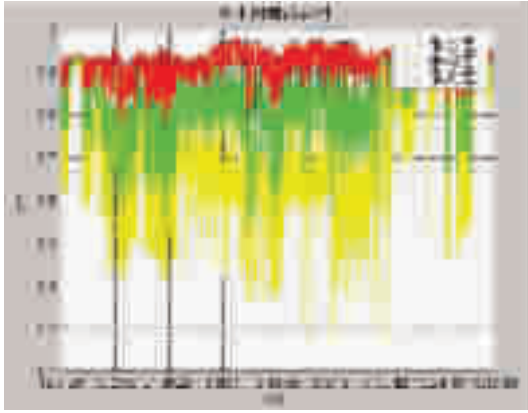


图 11 补偿前功率因素趋势波形图

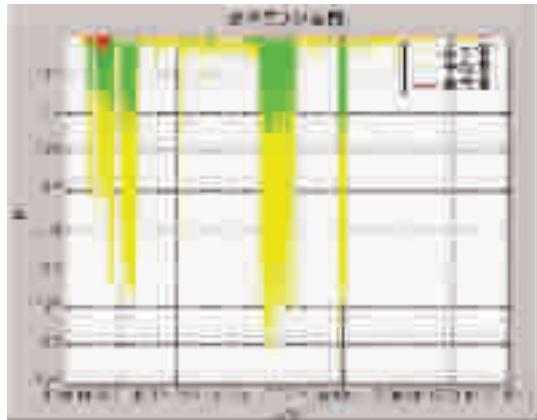


图 12 补偿后功率因素趋势图波形图

由于电力电子装置等非线性装置需要消耗无功功率,特别是各种相控装置,如相控整流器、相控交流功率调整电路等,其工作时产生的基波和谐波电流都要消耗无功功率。二极管整流电路的基波电流虽然基本不消耗基波无功功率,但它产生的大量谐波电流,也消耗一定的无功功率。因此无功补偿应包含对基波和谐波无功功率的补偿。电网系统运行中其谐波含量应控制在国家标准范围内,其对电网的影响应考虑在设计范围内,根据上述原因,无功功率的增加,导致电流增大和视在功率增加,从而使发电机、变压器及其他电气设备容量和导线容

量增加。可以得到如下结论,在进行实际电网补偿时,无功设备容量的选择应大于理想情况计算结果。本文中提出的补偿实例已综合考虑以上原因,根据实时潮流,适当放大无功补偿设备容量选型,补偿效果较好。

## 5 结束语

本文主要对无功电流瞬时无功补偿从理论上给予了严格的公式推导,得出了最终的补偿电流换算公式,并用 MATLAB 软件对其进行了仿真,得出了仿真波形,并将其应用在某城市实际的电网运行中,运行效果良好,证实了这种方法的可行性。

### 参考文献:

- [1] 葛锁良,袁业剑,于敏华.一种新型可连续调节的无功补偿装置[J].电力自动化设备,2011(11).
- [2] Czamecki L S.Instantaneous reactive power P-q theory and power properties of three-phase systems[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):362-367.
- [3] 孙哲,梁青阳.基于瞬时无功功率理论和模糊 PID 控制的三相不平衡补偿算法[J].计测技术,2010,30(5).
- [4] 郑翔骥,陈明凯.一种改进型谐波和无功电流检测方法[J].福州大学学报:自然科学版,2005,33(2):174-178.
- [5] 陆安定.现代无功补偿的理论与应用[J].能源技术,2002,23(2):83-86.
- [6] 王全峥,王小玲,赵志刚.提高电网无功补偿效益的原则与方法[J].山西电力,2002(2):18-20.
- [7] 刘淑敏,等.无功补偿装置的选择[J].电气传动,2002(4):61-64.
- [8] 洪乃刚.电力电子和电力拖动的控制系统的 MATLAB 仿真[M].北京:机械工业出版社,2006.

### 作者简介

袁远(1983),女,江苏南京人,硕士,主要研究方向为电力系统自动化;

王徐延(1983),女,江苏南京人,硕士,主要研究方向为电力系统自动化。

(上接第 12 页)

[7] 吴汕,梅天华,龚建荣,等.分布式发电引起的电压波动和闪变[J].能源与环境,2006,(04):54-58.

### 作者简介:

朱红(1971),女,高级工程师,主要研究方向为电网运行调度、智能电网、分布式能源;

韦磊(1982),男,江苏南京人,高级工程师,主要研究方向为

电力信息化和电力通信;

蔡敏(1991),男,浙江人,研究生,主要研究方向为智能有序用电技术;

余昆(1978),男,重庆人,副教授,主要研究方向为智能配电网运行分析与控制、配用电自动化及其高级应用、能效与节能。

# 分布式旋转发电机接入配电网对继电保护影响及案例分析

李琳, 吴昱

(南京供电公司, 江苏南京 210019)

**摘要:** 本文重点分析分布式旋转发电机接入配电网对传统继电保护配置的影响, 找出产生影响的原因。进而结合实例, 提出在不调整一次网架的基础上, 仅通过改造二次系统配置, 满足电源接入, 降低接入成本, 提高电网运行效率。

**关键词:** 分布式旋转发电机; 配电网继电保护; 重合闸

**关键词:** 分布式旋转发电机; 配电网继电保护; 重合闸

中图分类号: TM93

文献标识码: B

文章编号: 1009-0665(2014)S2-0017-03

## 0 引言

随着可再生能源的推广, 以风力发电、水力发电、太阳能发电、热电联产、垃圾发电等功率为几 kW 至几十 MW 的小型电源为代表的分布式电源 (Distributed Generation, DG) 已成为一种重要的电力电源形式。大量的 DRG 并网使配电网的结构和运行方式发生了很大的变化, 原先的保护控制体系越来越难以适应。本文重点分析分布式旋转发电机 (Distributed Rotary Generator, DRG) 接入对于配网继电保护影响及产生原因, 通过实际接入方案分析, 提出采用改造二次系统配置, 满足电源接入, 降低接入成本, 提高电网运行效率。

## 1 分布式旋转发电机接入对于配网继电保护影响

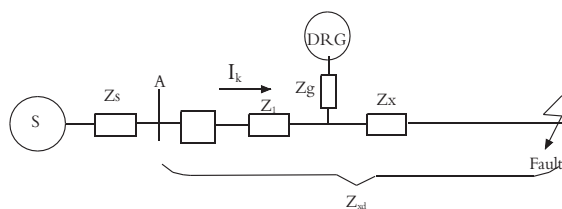
传统的配电系统总体上采取了单电源、辐射式结构, 电能由高电压流向低电压, 经馈线送达用户。在这种运行方式下, 单向的潮流成为了配电网保护控制系统设计的基本条件。DRG 接入对故障电流有助增作用, 如图 1 所示, 多个 DRG 都会提供故障电流, 增大了故障电流大小, 改变了故障电流方向。



图 1 分布式旋转发电机对故障电流助增作用

### 1.1 对过电流保护的影响

假设将某 DRG 接入一条馈线上, 当馈线末端发生故障时, 故障电流来自于配电变压器和 DRG。如图 2 所示:



$Z_s$ : 电力系统和配电变压器的阻抗;  $Z_g$ : DRG 和变压器的等效阻抗;  $Z_l$ : 母线至 DRG 接入点之间的阻抗 (表征 DRG 接入位置);  $Z_x$ : 保护末端至 DRG 接入点之间的阻抗;  $Z_{zd}$ : 线路保护范围内的总阻抗

图 2 分布式旋转发电机接入降低馈线保护灵敏度

当无 DRG 接入时, 馈线保护感知到的故障电流为  $I_s$ , DRG 接入的情况下, 馈线保护感知到的故障电流为  $I_k$ , 可以通过  $I_k/I_s$  的比值反映出 DRG 接入对保护灵敏度的影响程度。

$$I_k = \frac{E}{(Z_{zd} + Z_s) + Z_x [Z_s + Z_l] / Z_g} \quad (1)$$

当未接入 DRG 时馈线保护感知到的故障电流为:

$$I_s = \frac{E}{Z_{zd} + Z_s} \quad (2)$$

从上述两式可以看出  $I_k/I_s$  的比值小于 1, 这说明由于 DRG 的接入使保护所检测到的故障电流有所降低, 降低了馈线保护的灵敏性。

### 1.2 对阻抗继电器保护的影响

由分布式能源接入配电网所引起的距离保护有效范围缩小的现象在文献 [1, 2] 中有所涉及。阻抗继电器的保护范围是在一定阻抗区域内触发继电器动作的最大故障距离。这个最大距离对应于检测到的最大故障阻抗或者最小故障电流。

图 4 系统中继电保护装置 R 在 a 点短路时的故障电压可按下式计算:

$$U_r = I_{nw} Z_{23} + (I_{nw} + I_{wt}) Z_{3a} \quad (3)$$

式中:  $Z_{23}$  是从母线 b2 到 b3 的线路阻抗;  $Z_{3a}$  是母线 b3 到故障点 a 的线路阻抗。由式 (3) 可见, 电压  $U_r$  由于分布式电源 G 通过母线 b3 的额外电流注

入而增大。因而,保护装置测量到的阻抗为:

$$Z_r = \frac{U_r}{I_{rw}} = Z_{23} + Z_{3a} + \frac{I_{dg}}{I_{nw}} Z_{3a} = Z_{r,real} + Z_{r,distur} \quad (4)$$

由式(4)可见,  $R$  测量到的阻抗  $Z_r$  大于实际的故障阻抗  $Z_{r,real}$ 。这会导致  $R$  对应的故障距离增加, 缩小有效保护范围, 并可能由下一个故障区域的故障触发误动作, 如图3所示。

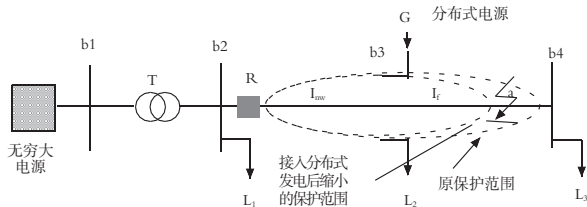


图3 分布式旋转发电机接入配电网对于距离保护的影响

### 1.3 对重合闸影响

配电网的故障80%~90%的部分是瞬时性的。重合闸的应用对提高系统供电可靠性, 减少电网维护工作量有着相当重要的作用。当DRG接入配电网线路后, 如果线路因故障跳闸后, DRG极有可能在重合闸动作时没有跳离线路, 这将产生两种潜在的威胁。

(1)非同期重合闸。由于电网电源的失去, DRG很难与电网保持完全同步。在电网电源跳开后至重合闸时的这段时间内, 两者之间的相角差可能出现在0~360°。之间的任何一个位置, 这将造成检同期合闸失败, 从而引起不必要的停电; 如果自动重合闸装置没有检同期的功能, 则一旦重合, 冲击电流将可能损坏DRG, 同时电网也会出现高电压和大电流的暂态过程, 图4展示了相差为60°。的非同期合闸时所检测到的冲击环流。

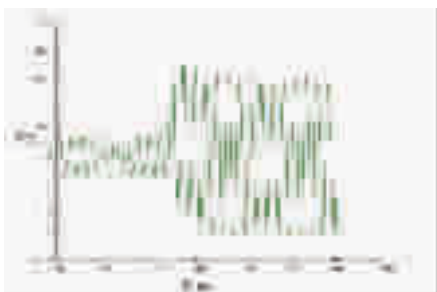


图4 非同期合闸产生的故障暂态电流

(2)故障点电弧重燃。在失去电网电源后, 故障点可能由于DRG的维持而没有消除。当进行重合闸时, 由于电网电源的作用, 可能引起故障电流跃变, 引起故障点电弧重燃, 导致绝缘击穿, 进一步扩大事故, DRG提供故障电流使故障点无法熄弧, 可能使暂时性故障变成永久性故障。

### 1.4 孤岛运行

配电网中的故障通常由距离故障地点最近的保护继电器清除。如果故障发生在DRG接入点上游,

DRG会为已经从配电网隔离的部分负荷提供电能, 如果分布式电源的容量不足以提供额外增加的负荷, 就会出现过载现象, 电压和频率会逐渐降低并最终导致停机。但也有可能分布式电源的容量足够为解列后的孤岛系统提供全部负荷所需电能。如果与主电网隔离的孤立系统, 负荷用电全部由分布式电源提供, 此种情况称为孤岛运行或孤岛。

孤岛运行可能造成如下危害:

(1) 电网维护人员可能由于孤岛运行而误接触带电导体发生触电事故。

(2) 与电网供电相比, 分布式电源供电的孤岛系统的电能质量无法保证, 特别是电压重量和频率质量。

(3) 配电网的继电保护系统通常都配备自动重合闸装置, 在故障发生一定时间后, 一旦自动重合闸动作, 可能造成仍然处于孤岛运行状态的电网由于非同步合闸而造成故障进一步扩大, 并且延缓供电恢复的时间。

综上所述, 一般电网规程要求分布式电源与配电网的公共接入点在检测到孤岛状态时, 断开分布式电源与电网的连接。

## 2 分布式旋转发电机接入概况

### 2.1 项目概况

南京江北静脉产业园生活垃圾焚烧发电厂位于南京市浦口区星甸镇, 焚烧工艺采用引进国外先进的机械往复炉排炉。单台处理能力为500 t/d, 设四台焚烧炉和两台20 MW凝汽式汽轮发电机组, 为两炉两机配置, 项目计划2013年年底建成投运, 拟接入浦口南部电网。

### 2.2 项目周边电网概况

如图5所示, 垃圾电厂周边电网以220 kV山江变、高旺变为中心, 联络顶山变、北门变、开发区变等110 kV变电站和各35 kV变电站。其中垃圾电厂位于35 kV供电区, 附近可供接入的系统变电站有2座, 为220 kV高旺变和110 kV瓦殿变。



图5 周边电网地理接线图

220 kV高旺变电站位于垃圾电厂东侧, 距离约

20 km,电压等级 220/110/35 kV,主变容量为  $2 \times 120 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,220/35 kV 侧采用单母线分段接线,110 kV 侧采用双母线接线,具备接入条件;110 kV 瓦殿变位于垃圾电厂东北侧,距离约 6 km,主变容量  $2 \times 31.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,电压等级为 110/35/10 kV,110/35/10 kV 侧均采用单母线分段接线,具备接入条件。

### 2.3 一次接入方案

如图 6 所示,根据《配电网规划设计技术导则》要求,110~35kV 电源接入配电网,宜采用专线方式,因此江北垃圾电厂采用两回专线接瓦殿变的 35kV 两段母线。考虑到 220kV 城南河变的投运,将形成城南河和三江变之间的 110kV 联络,因此可断开三江变和高旺变之间的 110kV 联络,断开点选在图中红圈位置,形成瓦殿变至高旺变的双回 110kV 专线。



图 6 一次接入系统方案示意图

## 3 接入方案设计

### 3.1 二次接入方案

#### (1) 220 kV 城南河变。

城南河变至高旺变每回 220 kV 线路在城南河变侧配置双套光纤分相电流差动保护,与高旺变侧保护装置型号一致。

#### (2) 220 kV 高旺变。

高旺变至城南河变每回 220 kV 线路在城南河变侧配置双套光纤分相电流差动保护,与城南河变侧保护装置型号一致。

高旺变 220 kV 母线配置单套具备失灵保护功能的母差保护。

高旺变至瓦殿变双回 110 kV 线路均配置单套光纤分相电流差动保护装置,与瓦殿变保护装置型号一致,并设置检无压的三相一次重合闸。

#### (3) 瓦殿变。

瓦殿变至高旺变双回 110 kV 线路均配置单套光纤分相电流差动保护装置,与高旺变保护装置型号一致,三段式定时限过电流保护作为后备保护。

瓦殿变 110 kV 母线配置单套具备失灵保护功能的母差保护。

瓦殿变 1#、2# 主变零序保护及间隙保护各增加一段时限,保护动作第一时限跳电厂双回 35 kV 并网线路,第二时限跳主变三侧。

瓦殿变至电厂 35 kV 线路配置单套光纤分相电流差动保护,并设置检无压的三相一次重合闸装置;其余 35 kV 线路更换为距离保护。

瓦殿变 35 kV 母线配置单套具备失灵保护功能的母差保护。

#### (4) 江北垃圾电厂。

电厂至瓦殿变 35 kV 线路配置单套光纤分相电流差动保护,并设置检同期的三相一次重合闸装置。

在电厂的发电机出口断路器、35 kV 并网通道线路断路器设置共 4 处同期点。

解列点设置与同期点相同。在电厂的发动机出口断路器上配置低频、低压解列装置及高频率、高电压切机装置;35 kV 并网通道线路断路器设置频率电压异常紧急控制装置。

### 3.2 二次接入系统方案评估

一是强化高旺变至城南河变 220 kV 线路和瓦殿变至高旺变 110 kV 线路保护配置,将原有馈线距离保护调整为光纤分相电流差动保护,防止出现由于电厂的接入,短路电流方向变为双向,使得保护丧失选择性。

二是优化瓦殿变主变保护配置,将原有主变零序保护及间隙保护各增加一段时限,第一时限跳开电厂双回 35 kV 并网线路,防止出现当瓦殿变上级电源系统出现故障时,电厂通过瓦殿变主变向故障点倒送故障电流,使得主变中性点电压升高,进而造成设备的损坏,或者使主变保护动作,跳开主变,扩大停电范围的问题。

三是合理配置检同期的三相一次重合闸装置,防止出现冲击电流损坏 DRG,以及高电压和大电流的暂态过程。

江北垃圾电厂二次接入方案,调整二次系统配置,很好地避免了 DRG 接入对电网二次控制策略的影响,满足了接入要求,为未来 DRG 接入电网积累了宝贵设计和运行经验。

## 4 展望

目前,在分布式电源条件下,配电网仍然沿用了传统的保护控制系统,通过对 DRG 并网运行设定严格的限制,维护配电网保护控制系统正常工作。这种方式很大程度上局限甚至破坏了 DRG 的正常运行,牺牲了 DRG 发电商的利益,不利于分布

(下转第 24 页)

# 一种新的电网状态及参数误差离线估计方法

陆子强

(南京供电公司,江苏南京 210019)

**摘要:**为了提高电力系统状态估计的可信度及安全稳定控制决策的可靠性,对支路参数误差进行辨识估计。提出了一种2步法离线估计支路参数,第一步计算所有相关支路量测的残差率,根据电气距离分别进行赋权值并求和,以最大值为待辨识支路。第二步利用抗差状态估计原理估计已辨识的支路参数,并采用预测-校正内点法进行求解,修正参数后重新辨识估计参数误差,以遥测合格率的误差小于门限值为止。最后,算例仿真结果验证了该算法具有较好的数值稳定性并且提高了误差参数估计的精度。

**关键词:**电力系统;状态估计;参数辨识;抗差参数估计

**中图分类号:** TM744

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)S2-0020-05

## 0 引言

静态状态估计器利用数据库中给定的电网参数以及一组实时量测断面,估计出电力系统的实时状态量<sup>[1]</sup>。因此,状态估计结果的优劣取决于电网参数和量测数据的精度。在量测系统中,遥测通信数据在采集传输过程中可能出现故障或受到干扰而产生误差,实际运行中相对较大的误差即为坏数据。而储存在离线数据库中的电网参数,包括输电线路的阻抗、变压器电抗及变比以及对地电纳等,也很可能由于不精确的铭牌参数、网络结构的变化、数据库未及时更新、不准确的实际计算等原因而出现误差甚至成为错误参数<sup>[2-4]</sup>。

参数误差对状态估计会产生不利影响,并且较于坏数据及拓扑错误更难辨识。较早的研究中,将变压器分接头增广为状态量进行辨识估计<sup>[5-6]</sup>,文献[5]利用变压器两端无功量测及简化模型估计分接头位置,文献[6]将分接头的变化看作马尔科夫链进行估计,考虑了动态信息的同时又增强了算法的鲁棒性。Felix F. Wu提出了基于潮流补偿量的参数估计法<sup>[7]</sup>,在线性化模型基础上,引入潮流偏差值作为中间变量进行估计,再计算参数误差,提高了参数估计的数值稳定性。文献[8-9]将算法实用化,使之更加符合实际运行需要。近年来,利用广域测量系统(WAMS)信息扩展、数据采集与监视控制系统(SCADA)量测以提高参数估计精度收到很大的关注和研究<sup>[10-13]</sup>,文献[10]首先利用残差灵敏度辨识参数误差支路,特别是考虑了WAMS/SCADA混合量测进行辨识,并在多断面量测基础上利用最优化算法估计支路参数,虽然不受残差污染干扰且计算速度快,但无法给出参数错误和量测错误的区别。

文献[11]同样将SCADA/PMU数据都纳入量测方程,并以参数上下限为约束条件建立优化模型进行估计,支路电抗估计较电阻精度较高,且易受线路传输功率的影响。文献[12]利用多断面量测数据增加估计方程系数矩阵的秩,在引入相量测量单元(PMU)量测后,进一步提高参数的可观测性,达到系数矩阵的满秩,扩展了参数估计的范围。文献[13]考虑每个节点存在量测的情况,直接进行状态估计从而根据方差辨识参数误差。由于参数误差的存在是较长且不易变化的过程,文献[14]提出一种离线参数估计方法,根据较大残差比例给出可疑参数误差集,采用多断面反复迭代的方法估计出误差参数。

本文同样基于离线参数辨识估计的原理,考虑了参数误差对局部残差的影响范围和程度,提出了一种新的参数误差支路辨识方法,给出可疑支路集。利用增广状态量法进行参数估计,并采用现代内点法进行求解,保证了算法的数值稳定性,算例仿真验证结果表明,此方法可以估计出较为精确的参数值,并提高了状态估计合格率。

## 1 状态和参数估计

### 1.1 常规状态估计

加权最小二乘状态 (weighted least squares, WLS)估计模型为:

$$Z=h(x)+w \quad (1)$$

式中, $Z$ 为量测列向量( $m \times 1$ ); $x$ 为状态量( $n \times 1$ ),即电压幅值和相角; $h(x)$ 为 $x$ 的非线性矢量函数; $n$ 为待估计的状态量个数; $m$ 为量测量个数; $w$ 为量测误差,即零均值方差为 $R$ 的随机误差。通过WLS估计使得目标函数 $J(x)$ 达到最小,其定义为:

$$J(x)=[z-h(x)]^T R^{-1} [z-h(x)] \quad (2)$$

其中,将非线性矢量函数 $h(x)$ 泰勒展开并只保

留一次项,并对  $x$  求导得雅克比矩阵  $\mathbf{H}(x)=\frac{\partial h(x)}{\partial x}$ ,

解得方程为:

$$\mathbf{G}\Delta x=\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}(z-h(x)) \quad (3)$$

式中,增益矩阵  $\mathbf{G}=\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}$ 。

由此得到迭代方程:

$$\Delta \hat{x}=\mathbf{G}^{-1}(x_0)\mathbf{H}^T(x_0)\mathbf{R}^{-1}\Delta z \quad (4)$$

式中,  $\Delta z=z-h(x_0)$ 。直到  $\left|\Delta \hat{x}_i^{(l)}\right|_{\max}<\varepsilon_x$ ,其中,  $i$

表示矢量  $x$  中分量的虚耗,  $l$  为迭代次数。  $\varepsilon_x$  可取基准电压幅值的  $10^{-4}\sim 10^{-6}$ 。

### 1.2 残差分析

残差向量  $r$  定义为量测量  $z$  与相应的量测估计量  $\hat{z}$  的差值,实际中通常采用标准化残差进行分析,即:

$$r_{N,i}=\frac{r_i}{\sqrt{\sum_{r,ii}}} \quad (5)$$

式中,  $\sum_{r,ii}$  为对角阵  $\mathbf{D}$  的诸对角元素,  $\sum_{r,ii}=d_{ii}(i=1,2,\dots,m)$  为相应残差分量的方差,其中  $\sum_r=\mathbf{WR}$ ,  $\mathbf{W}$  为残差灵敏度矩阵,  $\mathbf{W}=\mathbf{I}-\mathbf{H}(\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H})\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}$ , 于是式(4)可写为:

$$r_N=\sqrt{\mathbf{D}^{-1}}r \quad (6)$$

如果  $r_{N,i}>\lambda$  (预设阈值),带有误差的量测量被辨识出,在坏数据辨识中,  $\lambda$  取值一般为 2.81。

### 1.3 增广参数估计

参数误差会在局部范围内(即流经参数误差支路的潮流以及两端注入功率)对状态量以及量测估计量产生不良影响。利用 WLS 模型,将误差参数 ( $p$ ) 增广为状态量,因此,在 WLS 估计基础上,增广参数估计的目的是使以下目标函数最小:

$$J(x,p)=[z-h(x,p)]^T\mathbf{R}^{-1}[z-h(x,p)] \quad (7)$$

利用线性化模型得:

$$\mathbf{H}^T(\hat{x},\hat{p})\mathbf{R}^{-1}[z-h(\hat{x},\hat{p})]=0 \quad (8)$$

$$\mathbf{H}_p^T(\hat{x},\hat{p})\mathbf{R}^{-1}[z-h(\hat{x},\hat{p})]=0 \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{H}_p$  分别为非线性矢量函数  $h$  相对于  $x$  和  $p$  的雅克比矩阵。式(8)及式(9)可根据对  $x$  和  $p$  是否同时估计而应用。

### 1.4 加权最小绝对值状态估计(WLAV)

量测系统的坏数据并非依据状态估计模型而基于高斯分布,因此,为了提高状态估计抵御坏数据的能力,近年来对抗差估计的研究越来越深入<sup>[15-17]</sup>,抗差估计器具有较好的抑制坏数据能力,而 WLAV 状态估计器应用较为广泛,其模型为:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^m C_i |r_i| \\ \text{s.t. } r_i=z_i-h_i(x) \quad i=1,2,\dots,m \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $c=[c_1,\dots,c_m]^T$  为权系数向量,其中,  $c_i=1/\sigma_i^2$ ,  $\sigma_i^2$  为第  $i$  个量测误差的方差。

## 2 预测-校正内点法

为了提高 WLAV 状态估计的计算速度,较广泛的方法是采用高阶算法来提高牛顿方向的精度,从而减少总的迭代次数。在式(10)中,引入松弛变量  $l>0,u>0,l\in R^m,u\in R^m$ ,文献[18]提出利用  $l+u$  替代  $|r|$ ,即:

$$\begin{cases} z-h(x)-r+2l=0 \\ -z+h(x)-r+2u=0 \end{cases} \Rightarrow l+u=|r| \quad (11)$$

将式(10)的等式约束改造为障碍函数,可得拉格朗日函数如下:

$$L(x,y,l,u,\alpha,\beta)=C^T(l+u)-y^T[z-h(x)+l-u]-\alpha^T l-\beta^T u \quad (12)$$

式中,  $y\in R^m,\alpha\in R^m,\beta\in R^m$  为拉格朗日乘子,即对偶变量;  $l,u$  为原变量。

在预测-校正内点法中,中心参数  $\sigma$  是影响算法性能的重要参数,而预测-校正内点法的核心思想是对中心参数动态估计。即在预测阶段求解方程:

$$\nabla_{\lambda}^2 L(\lambda)\Delta\lambda_{af}=\Delta d_{af} \quad (13)$$

解出仿射方向  $\Delta\lambda_{af}$ ,求仿射步长  $\alpha^*$ ,然后计算仿射补偿间隙:

$$C_{\text{gap}}^{af}=(\alpha+\alpha^*\Delta\alpha_{af})^T(l+\alpha^*\Delta l_{af})+(\beta+\alpha^*\Delta\beta_{af})^T(u+\alpha^*\Delta u_{af}) \quad (14)$$

并计算仿射障碍参数:

$$\mu=\min\left\{\left(\frac{C_{\text{gap}}^{af}}{C_{\text{gap}}}\right),0.1\right\}C_{\text{gap}}/2m \quad (15)$$

在校正-阶段,由方程:

$$\nabla_{\lambda}^2 L(\lambda)\Delta\lambda_{co}=\Delta d_{ce}+\Delta\lambda_{co} \quad (16)$$

解出校正方向  $\Delta\lambda_{to}$ ,并由  $\Delta\lambda_{af}+\Delta\lambda_{to}$  得到总的原、对偶变量修正量。

## 3 离线参数估计两步法

离线参数包括两个阶段:第一步:辨识可疑参数;第二步:估计已辨识的参数。具体步骤如下:

### 3.1 基于加权最大残差率绝对值和的参数辨识

因该算法为离线计算,故可在历史数据中选择

较为正确的量测断面,即基本剔除了坏数据及拓扑错误。因此,相对较大残差所对应的量测即可表明存在参数误差。

各相关量测的残差率绝对值 $|r_i'|$ 计算公式为:

$$|r_i'| = \left| \frac{r_i}{z_i^*} \right| \quad (17)$$

式中, $r_i, z_i^*$ 分别为第*i*个量测量的残差和量测基值。量测基值的选取为以下标准:对于电压考核基准:220 kV 电压等级取 264 kV,500 kV 电压等级取 600 kV;对于功率考核基准:220 kV 电压等级取 305 MV·A,500 kV 电压等级取 1082 MV·A。对可疑支路进行加权残差率绝对值求和,选取加权残差率绝对值和最大的可疑支路作为参数误差支路。具体步骤如下:

步骤一:在可疑集中,将对应于本支路的支路量测(距离1)残差率绝对值 $|r_i'|$ 赋予较大的权值(本具体实施方式中其值为1),并同时寻找出与本支路两端相连各支路量测(距离2)残差率绝对值;

步骤二:将距离2支路残差率绝对值 $|r_i'|$ 赋予较小的权值(本具体实施方式中其取值范围为0.2—0.4),并同时寻找出与距离2相联的个支路量测(距离3)支路残差率绝对值;

步骤三:将距离3支路残差率绝对值 $|r_i'|$ 赋予更小的权值(本具体实施方式中其取值范围为0.1),最后将距离1支路、距离2支路、距离3支路的所有残差率绝对值进行加权求和,计算得到可疑集中某支路的加权残差率绝对值和。

按照如上方法计算可疑集中的所有支路的加权残差率绝对值和,进行比较,取值最大者为存在参数误差的支路。

### 3.2 基于抗差估计的参数估计

参数误差在残差中表现为:

$$z_i = h_i(x_i + p^*) + [h_i(x_i, p_i) - h_i(x_i, p^*)] + w_i \quad (18)$$

式中, $x_i$ 为状态量, $p_i$ 代估计参数真值, $p^*$ 为代估计参数误差。

在WLS状态估计模型中,将可疑参数( $p$ )增广为状态量,因此,增广参数估计是使以下目标函数最小:

$$J(x, p) = [z - h(x, p)]^T R^{-1} [z - h(x, p)] \quad (19)$$

将方程线性化:

$$H^T(\hat{x}, \hat{p}) R^{-1} [z - h(\hat{x}, \hat{p})] = 0 \quad (20)$$

$$H_p^T(\hat{x}, \hat{p}) R^{-1} [z - h(\hat{x}, \hat{p})] = 0 \quad (21)$$

式中, $H$ 和 $H_p^T$ 分别为非线性量测矢量 $h(x, p)$ 相对于 $x$ 和 $p$ 雅克比矩阵,式(19)和式(20)分别根据是否将 $x$ 和 $p$ 同时估计而定。

同时,计算遥测估计合格率:

$$\text{遥测估计合格率} = \frac{\text{遥测估计合格点数}}{\text{遥测点综述(不含坏数据)}} \times 100\% \quad (22)$$

遥测估计合格点数是指遥测数据估计值误差 $\leq 1.5\%$ 的点数,其中:

$$\text{遥测数据估计值误差} = \frac{|\text{估计值} - \text{量测值}|}{\text{量测值的里程}} \times 100\% \quad (23)$$

遥测估计合格率误差 $< 0.01$ ,则表明状态及参数估计基本准确。

## 4 算例分析

### 4.1 IEEE算例

由于实际电网中,量测真值无法得到,因此对抗差估计器的性能很难进行准确的评估。因此,选取IEEE-30节点标准系统进行参数估计。IEEE-30节点系统图如图1所示,量测配置如表1所示。

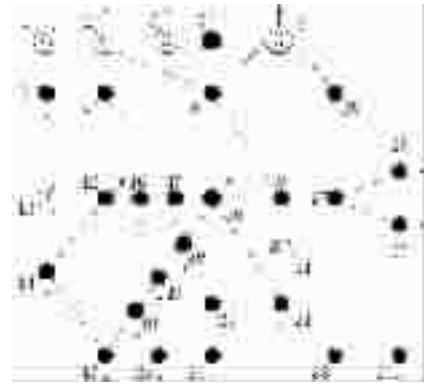


图1 IEEE-30节点系统图

表1 IEEE-30系统量测配置

系统	有功量测	无功量测	电压量测
IEEE-30	111	106	5

对IEEE-30节点系统进行参数错误仿真,选取以下三条支路作为参数错误支路:线路4-2,线路6-4,线路4-12。其中将电抗值扩大2倍,电压变比扩大10%。对以上系统进行状态估计,基于内点法的WLAV状态估计合格率为94.88%,而含参数估计的WLS状态估计合格率为92.52%,表2给出了部分不合格量测的估计结果。

由表2可知,由于系统含参数错误,WLS对部分量测估计残差较大。例如,支路4-3无功量测,WLS估计残差为0.1136,而WLAV估计结果与真值相同,残差为0,有效抵制了参数错误对状态估计的影响。WLS估计检测出的可疑支路集为:支路4-3、支路6-2、支路6-4和支路4-12。由于4-3支路不含参数错误,因此属误检错误;而4-2支路发生漏

表 2 IEEE-30 节点系统 WLS 与 WLAV 部分量测估计结果

量测序号	量测量类型	量测真值 /pu	WLS 估计		WLAV 估计	
			估计值 /pu	残差 /pu	估计值 /pu	残差 /pu
14	4-3 支路无功	0.0415	-0.0721	0.1136	0.0415	0.0000
16	4-3 支路无功	-0.0275	0.0916	-0.1191	-0.027	-0.0005
22	6-2 支路无功	0.0100	0.1799	-0.1699	0.0700	-0.0600
24	6-2 支路无功	0.0117	-0.1274	0.1391	-0.0461	0.0578
26	6-4 支路无功	0.1661	0.4602	-0.2941	0.1648	0.0013
28	6-4 支路无功	-0.1558	-0.4279	0.2721	-0.1606	0.0048
34	7-6 支路无功	0.0212	-0.0801	0.1013	-0.0043	0.0255
36	7-6 支路无功	-0.0281	0.0744	-0.1025	-0.0028	-0.0253
58	4-12 支路无功	0.1464	0.04500	0.1014	0.1092	0.0372
60	4-12 支路无功	-0.0995	0.0044	-0.1039	-0.0616	-0.0379
174	节点 4 注入有功	-0.0760	0.0340	-0.1100	-0.0501	-0.0259

检错误。

进一步,通过对量测系统中部分量测进行置零,符号取反等方式注入不良数据。当量测系统中含不良数据时,WLS 估计合格率为 91.08%,而 WLAV 合格率为 94.36%,估计结果受不良数据影响不大。

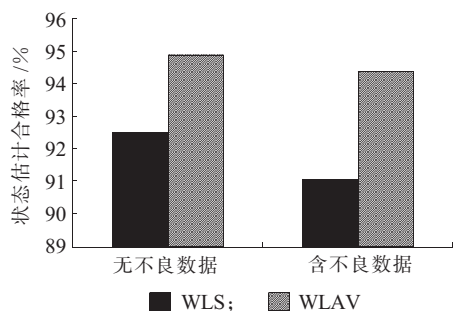


图 2 状态估计合格率

#### 4.2 实际电网算例

以我国某省网实际数据进行算例仿真,包含 434 条母线,855 条支路,一个断面有 3104 个量测(1501 个有功量测,1501 个无功量测,102 个电压量测)。进行状态估计,并分别对有功量测与无功量测的合格率进行了比较。以 2012 年 2 月 26 日 20 点 20 分的量测断面为例,得出遥测估计合格率为 94.55%。

分析实际电网遥测估计合格率不高的原因有很多。对于有功功率,调试方法有:检查线路、主变两端的潮流有功、无功数值与符号是否匹配;检查是否有相邻量测置零等。此外,解决了量测问题之后,还需要考虑参数是否有误差。如母线上除一条支路外其它出线估计结果基本正确,则不一致的该线路可能有误;对于变压器支路,较容易存在变比错误。

对 SCADA 中量测数据进行了处理,同时找出

了 8 条较大参数误差的支路进行了修正,并对全网进行状态估计计算,与 WLS 状态估计的合格率进行比较,结果如表 3 所示。由表 3 可知,含不良数据辨识的 WLS 较常规 WLS 状态估计在合格率上有一定程度的提高,而采用 WLAV 后提高较明显。

表 3 实际电网估计合格率比较

估计方法	有功量测 /%	无功量测 /%
WLS	94.25	85.64
WLS+BD	94.32	86.63
WLAV	96.88	95.75

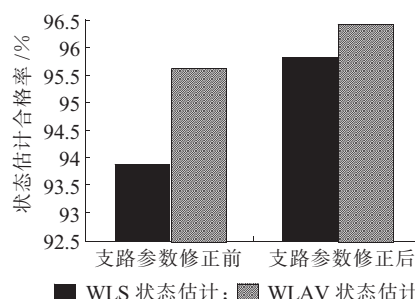


图 3 实际电网参数修正后状态估计合格率比较

图 3 给出了实际电网全网参数修正前后的遥测估计合格率变化情况。由图 3 可知,在参数修正前,电网状态估计合格率仅为 94.55%,而修正后可提高至 95.85%。采用 WLAV 抗差状态估计时,未进行参数修正时合格率为 94.92%,修正后可提高至 96.88%。结果表明,无是电网支路参数是否存在参数误差,WLAV 具有比 WLS 更高的求解精度,可大大提高状态估计合格率。

#### 5 结束语

本文针对电网参数误差进行离线辨识估计,有以下特点:①利用加权最大残差率绝对值和的方法辨识存在参数误差的支路;②采用基于 WLAV 的参

数估计,估计参数误差,并计算遥测估计合格率,反复计算以辨识估计出全部的电网参数误差。IEEE 标准算例及实际算例表明,本文给出的方法能在抵御坏数据的同时有效地辨识出参数误差,提高遥测估计合格率,并且采用了预测-校正内点法,计算效率亦有所提高。

#### 参考文献:

- [1] Schweppe F C, WILDES J, ROM D B. Power system static state estimation parts I, II, and III [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 120-135.
- [2] A. Abur, A. G. Expó sito. Power System State Estimation: Theory and Implementation [M]. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [3] P. Zarco, A. G. Expó sito . Power system parameter estimation: A survey [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 2000, 15(1): 216-222.
- [4] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
- [5] D. L. Fletcher, W. O. Stadlin. Transformer Tap Position Estimation [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(11): 3680-3686.
- [6] 王 兴,刘 广,于尔铿.基于变比变化检测的变压器抽头位置跟踪估计算法 [J]. 中国电机工程学报,1997,17(3): 162-165.
- [7] W. E. Liu, F. F. Wu, S. M. Lun. Estimation of parameter errors from measurement residuals in state estimation [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1992, 7(1): 81-89.
- [8] W. E. Liu, S. L. Lim. Parameter Error Identification and Estimation in Power System State Estimation [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1995, 10(1): 200-208.
- [9] 杨 滢,孙宏斌,张伯明,等.集成于 EMS 中的参数估计软件的开发与应用[J]. 电网技术,2006,30(4):43-49.
- [10] 陈晓刚,易永辉,江全元,等.基于 WAMS\_SCADA 混合量测的电网参数辨识与估计 [J]. 电力系统自动化,2008,32(5):1-5.
- [11] 李 钦,项凤雏,颜伟,等.基于 SCADA 及 PMU 多时段量测信息的独立线路参数估计方法 [J]. 电网技术,2011,35(2):1-5,109.
- [12] 柴京慧,李书敏,何 桦.基于 PMU 及多时间断面的输电网参数估计[J]. 电力系统自动化,2009,33(11):49-52.
- [13] M. C. de Almeida, A.V. Carcia, E. N.Asada. Regularized Least Squares Power System State Estimation [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 2012, 27(1): 290-297.
- [14] M. R. M. Castillo, J. B. A. London, N. G. Bretas. etc. Offline Detection, Identification, and Correction of Branch Parameter Errors Based on Several Measurement Snapshots [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 2011, 26(2): 870-877.
- [15] 吴文传,郭 焯,张伯明.指数型目标函数电力系统抗差状态估计[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):67-71.
- [16] 郭 伟,单渊达.M 估计及其在电力系统状态估计中的应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):26-31.
- [17] Mili L, Phaniraj V, Rousseeuw P J. Least median of squares estimation in power system [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991,PWRS-6(2):511-523.
- [18] J.M. Ramirez, E.E.Barocio. Solving state estimation in power systems by an interior point method [J]. Electrical Power and Energy Systems.

#### 作者简介:

陆子强(1984),男,助理工程师,研究方向为电力系统运行和控制。

(上接第 19 页)

式电源技术的发展。未来的分布式电源保护控制应该从整个系统的全局出发,借助配电自动化系统的快速故障判断、故障区域隔离、非故障区域恢复供电、分布式电源智能组建微网的功能,实现配电自动化和继电保护的有效配合,从而解决 DRG 接入带来的电网安全性和可靠性等问题,充分发挥 DRG 所带来的经济效益。

#### 参考文献:

- [1] Dugan Roger C, McDermott Thomas E. Operating conflicts for

distributed generation on distribution systems [C]//Rural Electric Power Conference, Little Rock, USA:2001.

- [2] Dugan Roger C, McDermott Thomas E. Distributed generation [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8(2):19-25.

#### 作者简介:

李 琳(1982),女,江苏宜兴人,工程师,主要从事变电设计工作;

吴 罡(1981),男,江苏徐州人,高级工程师,主要从事系统设计工作。

# 欢迎投稿 欢迎订阅

# 一种全局无功优化的新型智能混合算法

周冬旭, 罗兴, 李征恢

(南京供电公司, 江苏南京 210019)

**摘要:**提出了粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)-自适应细菌觅食(Adaptive Bacteria Foraging Optimization, ABFO)的智能混合优化算法,将其应用于电力系统无功优化。PSO-ABFO算法通过引入自适应变速思想,避免了算法陷入局部最优的缺点,能够较快得到全局最优解。建立了基于PSO-ABFO算法的电力系统无功优化数学模型。最后通过IEEE-30节点测试系统验证了该算法在电力系统无功优化中应用的可行性和有效性。

**关键词:**细菌觅食算法;粒子群算法;无功优化;自适应变速

中图分类号:TM761<sup>+</sup>.1

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0025-04

## 0 引言

电力系统在运行过程中,由于无功潮流分布不合理造成的无功过剩或无功不足会直接影响系统电压质量,使得节点电压的幅值超出或低于合格的范围。无功优化可以通过对系统内现有的无功资源进行优化配置,其措施包括调节发电机机端电压,调整有载调压变压器分接头位置,改变无功补偿装置投切容量等,从而达到优化电网的无功潮流分布,降低电网有功损耗,改善系统电压水平,提高电力系统整体的安全性和经济性的目的。电力系统无功优化的数学模型较为复杂,目标函数和约束条件均含有非线性方程,其控制变量既有连续变量,又有离散变量,并具有解空间多维、多约束、多极值等特点。

目前,已提出并使用的无功优化方法主要分为传统数学优化方法和人工智能算法两大类。传统数学优化方法包括:线性规划、非线性规划、动态规划、内点法等方法。这些算法计算速度快、收敛性好、算法稳定。但需要对离散控制变量进行连续化处理,要求目标函数连续、可导、单峰等条件,并且在处理多极值点的目标函数时,易陷入局部最优解<sup>[1-3]</sup>。人工智能算法是近几十年来受到广泛推崇的优化方法,该类算法采用启发式搜索方式对问题进行求解,能以较大概率在复杂优化问题的解空间内寻觅到全局最优解。常用的人工智能算法包括遗传算法<sup>[4]</sup>、模拟退火算法<sup>[5]</sup>、粒子群优化算法以及以上几种方法互相取长补短的混合算法<sup>[6-7]</sup>。人工智能算法在电力系统无功优化领域已得到了广泛而积极的研究,但搜索效率不高一直阻碍该类方法在电力系统中的应用。

细菌觅食优化算法(Bacteria Foraging Optimiz-

ation, BFO)是近年来提出的一种仿生进化算法<sup>[8]</sup>,BFO算法的突出特点是变方向搜索能力,细菌以一定的概率迁徙到新的觅食区域中,减小了菌群收敛于局部最优的概率,提高了找到最优解的概率,具有很强的局部搜索能力。由于其全局搜索能力低于粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO),因此文献[9]对以上两种算法进行混合,提出PSO-BFO混合优化算法,通过BFO算法中的趋向性运动算子完成局部搜索的功能,通过PSO算子完成整个空间的全局搜索,并取得较好的效果。

本文在文献[9]的基础上对算法进行改进,提出了粒子群-自适应细菌觅食优化算法(PSO-ABFO),通过引入自适应变速思想,避免了算法陷入局部最优的缺点,能够较快得到全局最优解。并建立了基于PSO-ABFO算法的电力系统无功优化数学模型。最后通过IEEE-30节点测试系统验证了该算法在电力系统无功优化中应用的可行性和有效性。

## 1 PSO-ABFO混合优化算法

### 1.1 标准BFO算法

BFO算法的理论基础是觅食理论,在觅食理论中,自然法则倾向于保留大量繁殖觅食能力强的生物,并淘汰觅食能力弱的生物。在自然进化的过程中,觅食能力较强的生物由于获得了足够多的食物供他们生存并繁殖,所以相比较而言这些生物存活下来的可能性就会变大,它们优秀的觅食基因进而被保留下来。按照上述觅食理论,以BFO算法求解优化问题时,首先要对所求问题的解进行适当的编码,然后充分利用群体信息对个体进行操作,最终达到获得最优解或准最优解的目的。在实际应用中,BFO算法主要通过趋向性操作、复制操作和迁徙操作这三种操作迭代计算来求解问题。

(1) 趋向性操作(Chemotaxis)

细菌的前进可以看作是在解空间中对可行解进行搜索, 减速就意味着对当前搜索到的解不满意, 准备对其进行调整, 停下来的原地旋转对应着当前解的优劣进行判断, 这时可以通过适应度函数进行判断是否对当前解进行调整以及如何调整。

设细菌种群大小为  $S$ , 一个细菌所处的位置表示问题的一个候选解, 细菌  $i$  的信息用  $D$  维向量表示  $\theta^i = [\theta_1^i, \theta_2^i, \dots, \theta_D^i]$ ,  $i=1, 2, \dots, S$ ,  $\theta^i(j, k, l)$ , 表示细菌  $i$  在第  $j$  次趋向性操作, 第  $k$  次复制操作和第  $l$  次迁徙操作之后的位置。细菌  $i$  的每一步趋向性操作表示如下:

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \quad (1)$$

式中,  $C(i) > 0$  为细菌的趋向性步长单位,  $\Delta(i)$  为单位长度的随机方向向量。

### (2) 复制操作 (Reproduction)

为了保持整个群体规模的恒定, 一部分觅食能力强的细菌进行自身的繁殖, 生成和父代完全相同的子代, 以替换被淘汰的细菌。

设需要淘汰的细菌种群数为  $S_r = S/2$ 。将种群中的所有个体按照所处位置的优劣进行排序, 选取排在前  $S_r$  个细菌进行自我复制, 并替换后  $S_r$  个细菌。这样, 经过新的复制操作, 会使群体中的优良个体得到保留, 不良个体被淘汰, 既提高了寻找最优解的速度, 又保持了群体的多样性。

### (3) 迁徙操作 (Elimination and Dispersal)

由于细菌所生存的环境易受外界因素的干扰而发生变化, 同时细菌本身也会受到食物的制约, 因而会出现局部区域细菌群体消亡或整个群体迁徙到其他区域的现象。

迁徙操作是按照给定的概率  $P_{ed}$  发生的, 如果某个体满足迁徙操作的条件, 那么就将其个体删除, 重新生成一个新的个体, 相当于将原来的个体转移到了一个新的位置, 这样更有利于趋向性操作跳出局部最优解和寻找全局最优解。

## 1.2 标准 PSO 算法

PSO 初始化为一群随机粒子, 通过迭代找到最优解。在每一次迭代中, 粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。第一个极值就是粒子本身所找到的最优解, 这个极值称为个体极值  $p_{best}$ 。另一个极值是整个种群目前找到的最优解, 这个极值是全局极值  $g_{best}$ 。每个粒子根据如下的公式来更新自己的速度和在解空间的位置

$$v_{d+1} = w \cdot v_d + \varphi_1 \cdot rand() \cdot (p_{best} - x_d) + \varphi_2 \cdot rand() \cdot (g_{best} - x_d) \quad (2)$$

$$x_{d+1} = x_d + v_{d+1} \quad (3)$$

式中, 下标  $d$  表示迭代次数,  $x_d$  表示第  $d$  次迭代时的粒子空间位置,  $v_d$  表示第  $d$  次迭代时的粒子速度,  $w$  为惯性常数,  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  为学习因子,  $rand$  是介于 (0,1) 之间的随机数。

## 1.3 PSO-ABFO 算法

PSO-BFO 算法通过 BFO 算法中的趋向性运动算子完成局部搜索的功能, 通过 PSO 算子完成整个空间的全局搜索, 具有较好的效果。但是由于所求目标函数解空间的复杂性和多维性, 依然存在陷入局部最优解的可能性。为了提高优化前期的全局搜索能力, 以及优化后期的局部搜索能力, 本文引入将自适应变速<sup>[10]</sup>思想引入 PSO-BFO 算法中。将趋向操作时的步长调整为动态值, 并根据循环次数而改变, 如式(4)所示:

$$C(k, l) = \frac{L_{red}}{n^{k+l-1}} \quad (4)$$

式中,  $L_{red}$  表示为初始趋向步长,  $n$  表示控制步长下降梯度的参数。

在优化前期, 即  $k+l$  较小时,  $C(k, l)$  增大, 提高了个体解空间移动能力, 避免在局部范围过多地消耗搜索时间。在优化后期,  $k+l$  逐渐增大,  $C(k, l)$  减小, 使得个体在接近全局最优点附近的局部搜索能力增强, 保证算法最终趋近全局最优点。映射到细菌觅食行为中, 相当于加快了细菌觅食能力和速度, 从细菌群体角度看, 是保留了优秀细菌的基因, 增强了细菌群的繁殖和迁徙能力。

综上, 本文提出的 PSO-ABFO 算法的步骤如下:

(1) 初始化参数: 给定群体规模细菌数目  $S$ , 解空间维数  $P$ , 趋向性操作次数  $N_c$ , 前进最大步数  $N_s$ , 趋化步长初始值  $C(i)$ , 复制操作次数  $N_{re}$ , 迁徙操作次数  $N_{ed}$ , 迁徙概率  $P_{ed}$ , 以及 PSO 算法的相关参数。

(2) 利用公式(1)计算细菌  $i$  在第  $j$  次趋向性操作, 将其保存为  $J_{last}$ 。再计算细菌  $i$  在第  $j+1$  次趋向性操作后的位置, 并与  $J_{last}$  进行比较, 如新位置由于  $J_{last}$ , 则细菌  $i$  将在该随机方向上进行前进操作, 直到前进最大步数为止。

(3) 利用公式(2)、(3)更新位置, 并寻找全局最优解。

(4) 通过判断种群中各个细菌所处位置的优劣来进行复制操作和迁徙操作, 同时对趋化步长进行更新。

## 2 基于 PSO-ABFO 算法的无功优化

### 2.1 无功优化模型

本文以网损最小为优化目标,则目标函数为:

$$\min f = \sum_{k \in N_e} P_{\text{kloss}} = \sum_{k \in N_e} g_k (V_i^2 + v_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

功率等式约束方程:

$$P_{G_i} - P_{D_i} = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i \in N_i, i \neq s \quad (6)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i \in N_{PQ} \quad (7)$$

式中,  $P_{G_i}$ 、 $Q_{G_i}$  分别为发电机节点的有功功率和无功功率出力;  $P_{D_i}$ 、 $Q_{D_i}$  分别为负荷节点的有功和无功功率;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\theta_{ij}$  分别为节点之间的导纳、电纳和电压相角差;

不等式约束:

$$V_{G,\min} \leq V_G \leq V_{G,\max} \quad i \in N_G \quad (8)$$

$$T_{K,\min} \leq T_{kK} \leq T_{kK,\max} \quad k \in N_T \quad (9)$$

$$Q_{C_i,\min} \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_i,\max} \quad i \in N_C \quad (10)$$

$$Q_{G_i,\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i,\max} \quad i \in N_G \quad (11)$$

$$V_{L,\min} \leq V_L \leq V_{L,\max} \quad L \in N_L \quad (12)$$

式中,控制变量为  $V_G$ 、 $T_k$ 、 $Q_c$ ,分别为发电机机端电压,有载调压变压器分接头和无功补偿装置投入容量。状态变量为  $Q_G$ 、 $V_L$  分别为发电机发出的无功功率和负荷节点电压。

为了保证状态变量满足上述不等式约束,本文将  $P$ - $Q$  节点的节点电压和无功功率写成罚函数的形式加入目标函数,则总目标函数可表示为:

$$\min F = f + \sum_{i \in N_{PQ}} \lambda_{v_i} (V_i - V_{i,\lim})^2 + \sum_{i \in (N_{PQ} + N)} \lambda_{G_i} (Q_{G_i} - G_{G_i,\lim})^2 \quad (13)$$

式中,  $\lambda_{v_i}$ 、 $\lambda_{G_i}$  为罚因子;  $V_{i,\lim}$ 、 $G_{G_i,\lim}$  可表示为:

$$V_{i,\lim} = \begin{cases} V_{i,\max} & : V_i > V_{i,\max} \\ V_{i,\min} & : V_i < V_{i,\min} \end{cases} \quad (14)$$

$$Q_{G_i,\lim} = \begin{cases} Q_{G_i,\max} & : Q_{G_i} > Q_{G_i,\max} \\ Q_{G_i,\min} & : Q_{G_i} < Q_{G_i,\min} \end{cases} \quad (15)$$

## 2.2 基于 PSO-ABFO 算法的无功优化实现

PSO-ABFO 算法的无功优化流程图如图 1 所示。

(1) 设定控制变量、状态变量的限值,以及 PSO-ABFO 算法相关参数。

(2) 将每个细菌个体代入式(13)计算适应值,进行趋向性操作和前进操作,并引入 PSO 变异算子。

(3) 进行复制操作和迁徙操作,并引入变速趋

向补偿,重复步骤(2)。

(4) 判断是否达到精度要求,并输出结果。

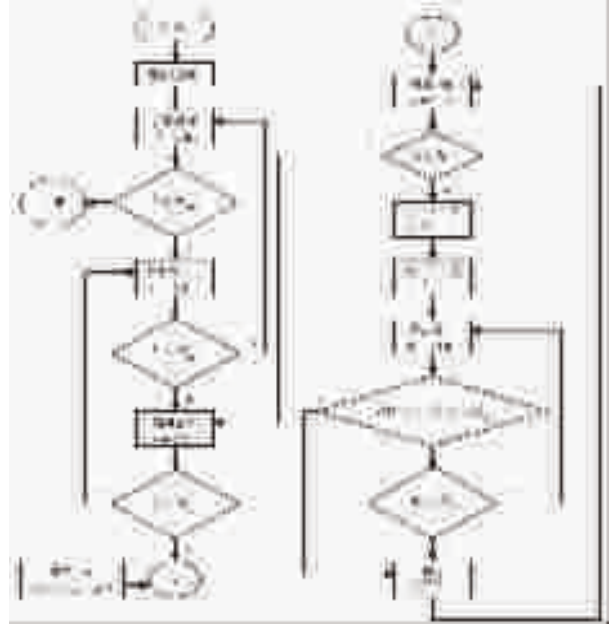


图 1 PSO-ABFO 算法的无功优化流程图

## 3 算例验证

为了验证所提算法在无功优化方面的优越性,本文分别采用 PSO-ABFO 算法、BFO 算法以及 PSO 算法对 IEEE-30 节点进行无功优化计算,并将 3 种计算结果相对比。IEEE-30 节点系统中有 41 条支路、6 个发电机节点和 22 个负荷节点。这 6 个发电机节点为 1、2、5、8、11、13,其中节点 1 为平衡节点,其余为  $P$ - $V$  节点,系统中其他节点均为  $P$ - $Q$  节点。4 台可调变压器分布在支路 6-9、6-10、4-12、27-28,2 个并联无功补偿装置补偿点为节点 10 和节点 24。选取细菌群体数为 26,趋向性操作次数为 50,复制操作次数为 4,迁徙操作次数为 4,迁徙概率为 0.25,初始精度为  $10^{-4}$ 。三种算法优化结果比较如表 1 所示。

表 1 优化结果比较

算法	初始网损 /MW	优化后网损 /MW	网损下降率 /%	迭代次数
PSO	17.8071	14.7585	17.12	77
BFO	17.8071	14.6588	17.68	71
PSO-ABFO	17.8071	14.5590	18.24	34

由表 1 可见,本文所提算法无功优化后系统网损为 14.559,网损下降率为 18.24%,计算结果优于其他两种算法。从迭代次数看 PSO-ABFO 算法次数最少,对 PSO-ABFO 算法随机进行 50 次优化计算,不管初值如何分布,总能找到接近全局最优解的次优解,说明本文所提方法有较好的收敛稳定性。系统优化前后各节点电压幅值变化曲线如图 2 所示。

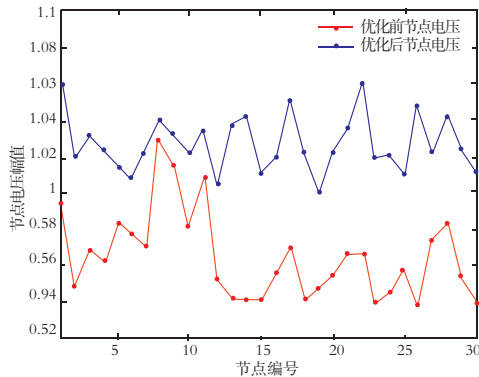


图2 系统优化前后各节点电压幅值变化曲线

由图2可以看出,采用本文所提方法优化后的节点电压幅值都稳定在额定电压附近,电压质量较优化前得到了明显改善。

#### 4 结束语

针对目前无功优化算法的不足,本文提出了PSO-ABFO算法,在建立无功优化数学模型的基础上,通过引入自适应变速思想,避免了算法陷入局部最优的缺点,能够较快得到全局最优解。IEEE-30节点标准测试系统表明,该方法能够有效的降低网损,改善电压质量,并具有很好的计算效率和收敛稳定性。因此,该方法可以作为求解电力系统无功优化问题的一种新途径,值得在理论和实践上加以进一步的研究和探索。

#### 参考文献:

[1] 赵波,曹一家.电力系统无功优化的多智能体粒子群优化

算法[J].中国电机工程学报,2005,25(5):1-7.

- [2] Lee K Y.Optimal reactive power planning using evolutionary programming, evolutionary strategy, genetic algorithm and linear programming [J].IEEE Transactions on Power System, 1998, 13(1):101-108.
- [3] 刘明波,程莹,林声宏.求解无功优化的内点线性和内点非线性规划方法比较[J].电力系统自动化,2002,26(1):22-26.
- [4] 张粒子,舒隽,林宪枢,等.基于遗传算法的无功规划优化[J].中国电机工程学报,2000,20(6):5-8.
- [5] 贾德香,唐国庆,韩净.基于改进模拟退火算法的电网无功优化[J].继电器,2004,32(4):32-35.
- [6] 刘科研,盛万兴,李云华.基于改进遗传模拟退火算法的无功优化[J].电网技术,2007,31(3):13-18.
- [7] 姚煜,蔡燕春.离散粒子群与内点法结合的电力系统无功优化[J].电力系统保护与控制,2010,38(3):48-52.
- [8] Passino K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J].IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22:52-67.
- [9] 范国英,郭雷,孙勇,等.BFO-PSO混合算法的PSS参数优化设计[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(6):28-31.
- [10] 储颖,糜华,纪震,等.基于粒子群优化的快速细菌群游算法[J].数据采集与处理,2010,25(4):442-448.

#### 作者简介:

周冬旭(1984),男,辽宁葫芦岛人,博士,工程师,主要研究方向为电网调度运行;

罗兴(1983),男,安徽芜湖人,工程师,主要研究方向为电网调度运行;

李征恢(1984),男,江苏南京人,工程师,主要研究方向为电网规划。

## 特高压“绕路”140 km

国家重点工程“淮南-南京-上海”特高压输电工程江苏段的3个变电站上周开工,工程建设驶入快车道。记者近日得知,为坚守生态红线,淮上线建设绕行140公里,多花近20亿元,占到江苏段总投资的10%。

2013年8月,全省生态红线区域保护规划公布,共划定779块生态红线区域。作为迄今全球输送容量最大、投资额度最多、建设难度最高的特高压交流工程,淮上线江苏段519km,途经我省6个省辖市的13个县市区,生态敏感区多,建设中为此转了很多弯。比如,在盱眙境内避开了铁山寺国家森林公园、天泉湖省级湿地公园、八仙台风景名胜;按照保护生态和耕地的原则,避开了兴化的有机蔬菜、有机稻米生产基地和苏州的阳澄湖湿地等重要区域,抵达常熟后将落点放在一级水源地下游6公里处。南京变电站至泰州变电站线路长157km,曲折系数1.1,意味着比直线路径绕行14.2km,投资增加了2.3亿元。据统计,整条线路避开了20个生态红线区。

为不影响城市整体规划和生态景观,淮上线尽可能沿河、沿路、沿现有线路和行政区划边界。中新苏通生态科技城是我省南北合作重点项目,线路选址时紧贴其西侧外围行走,绕行后多出7km,投资增加了1亿元。线路过了常熟后可谓“九曲回肠”,在太仓市规划区、太仓市西区规划区和昆山光电产业园的狭长交界地带开辟了一个走廊。

淮上线开工前,做了严格的环境影响评价,涉及5万平方公里,涵盖了线路走廊两侧各300m范围,部分生态敏感区拓展到线路两侧各2km,其中农地占72%,林地占3%,水域占10.8%,居民点、交通、工厂等占12%。淮上线江苏段负责人肖树介绍,全线需砍伐6.86万棵人工种植的杨树、柳树等,将进行移栽、补栽,施工期间会将地表土壤剥离保存,施工结束后回填、复耕,淮上线总投资中专门安排了1550万元修复生态。建设方还将在距离自然保护区或森林公园较近的塔架涂上警示色,减少鸟类飞行中的误撞。

摘自《江苏电力信息网》

# 基于改进遗传 K-means 聚类算法的风电场多机聚合建模

马洲俊<sup>1</sup>, 朱红<sup>1</sup>, 岳浩永<sup>1</sup>, 罗兴<sup>1</sup>, 王春宁<sup>1</sup>, 丁昊<sup>2</sup>

(1.南京供电公司,江苏南京 210019;2.江苏省电力公司检修分公司,江苏南京 211102)

**摘要:**风电机组大规模接入电网将对电力系统的生产调度、调频调峰以及安全稳定性等产生影响,针对大型风电场聚合模型的构建,提出了基于改进遗传 K-means 聚类算法(改进 GKA)的风电场多机聚合建模方法。所提的基于改进 GKA 的风电场多机聚合建模方法利用层次聚类法给出了风电场多机分群所需的最优聚类数和较优初始聚类中心,将遗传算法的全局优化能力与 K-means 聚类算法的局部优化能力相结合,提升了方法的整体有效性和收敛速度。在仿真软件 DigSILENT PowerFactory 中建立某实际风电场详细模型、单机表征模型和基于改进 GKA 的风电场多机聚合模型,并对比上述模型在三种典型风速场景下的仿真结果,验证了本文所提方法的有效性。

**关键词:**风电场;机群分类;尾流效应;改进遗传 K-means 聚类算法;单步 K-means 优化

中图分类号:TM744

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0029-05

## 0 引言

风力发电作为清洁的可再生能源发电形式正日益受到世界关注。随着风电并网容量的不断增加,风电对电力系统的潮流与网损、发电计划安排、电力生产调度以及电网的安全稳定性等将产生重大影响<sup>[1-3]</sup>,因此需要建立合理的风电场模型以便科学合理的评估风电并网对电力系统造成的影响。

从电网角度,更为关心的是作为风机整体接入形式的风电场特性对于电力系统的影响。风电场通常由几百台甚至上千台风力发电机组构成且各台风力机间存在着相互影响,按常规思路需要针对风电场中全部风力机一一建立模型,并依据风电场实际连接结构形成风电场整体仿真模型。这种风电场详细建模方法模型繁杂,需要的仿真计算时间也更长。在研究大型风电场乃至几个风电场组成的风电基地时,一般情况下很难也没有必要把构成风电场的每一台风机作为一个单独的元件加入到仿真程序中加以研究。

国内外许多专家学者对于风电机组的分组方法和风电场的聚合建模开展了广泛研究。文献[3-5]指出可以将同一个风电场内所有风电机组划为同一组并等效成单机模型;采用电力系统动态等值的方法,按照风电机组的发电功率相关性进行分组,并通过参数辨识的方法进行多台风电机组参数等值。现有的风电场聚合建模研究还存在一些问题,例如在风速给定的情况下,所建立的风电场单机或多机模型无法给出较为精确的风电场出力预测;对于大型风电场多机聚合过程中的机组聚类中心数量的确定及风电机组的归类尚缺乏有效方法。

收稿日期:2014-09-04;修回日期:2014-10-13

鉴于此,本文研究了考虑尾流效应下基于改进遗传 K-means 聚类算法的大型风电场多机聚合建模的方法,以某大型风电场为算例说明本方法的有效性。

## 1 风电场风速模型建立

### 1.1 机群分类依据

研究风电场稳态特性一般认为在某个时刻风电场的来风保持恒定;如果研究风电场动态特性及其对于电网造成的影响时,往往认为如此短暂的时间内风电场的来风近似不变,这样在本研究中便可将风速作为风机机组分群的依据。本文借鉴同调思想<sup>[5]</sup>以简化风电场聚合模型,认为风力发电机组的运行状况主要由风速决定,考虑尾流效应造成的风电场内不同位置的风速差别,对处于相同或相近运行点的风电机组进行合并处理认为处于同一机群。

### 1.2 考虑尾流效应的风电场风速模型

在研究风电场建模问题过程中,为简化考虑往往假设风电场内所有风电机组的风速均相同。国内外学者进行了大量实验和数学分析后认为,计算上、下游风机风速时需要考虑该位置的尾流风速与该位置与上游风机的距离、风机的风能利用系数及外界大气参数等。当风机的尾流影响距离  $d > 5R_{rot}$ , 远距离尾流风速的损失值  $\Delta v$  可通过下式计算:

$$\frac{\Delta v(x)}{v_0} = A \left( \frac{r_{rot}}{x} \right)^n \quad (1)$$

式中: $v_0$  为正面风速; $r_{rot}$  为风轮半径; $x$  为距离; $A$  和  $n$  为常数,与风轮机的风能利用系数有关,根据经验  $1 < A < 3$ ,  $0.75 < n < 1.25$ 。

在真实的风电场中,风电场风机之间的尾流效应应该具有三维特点,从电力系统角度分析电特性的时候无需考虑发电机组结构动力特性,所以通常

采用一维尾流模型<sup>[6]</sup>。

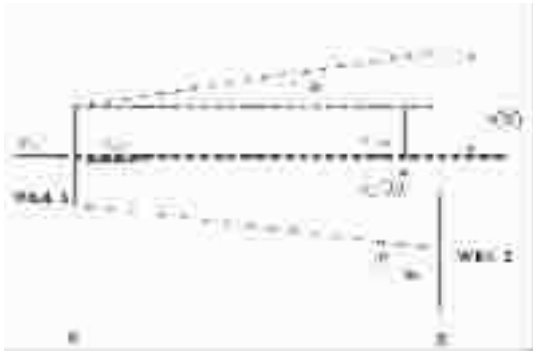


图 1 风机尾流效应模型

## 2 基于改进遗传 K-means 聚类算法的风电场多机聚合建模

### 2.1 单机表征和多机表征思想

在对风机等值的精确性要求不高的场合,定速机组风电场常用单机表征方法进行聚合建模,但是单机表征法受地形地貌以及尾流效应等影响,在有效性方面存在不足。

多机表征方法是在借鉴电力系统动态等值中同调等值法思想的基础上,以风电机组具有相同或相近运行点作为机组分群原则并对同群的机组进行合并等值处理。

### 2.2 基于改进遗传 K-means 聚类算法的风机分群

K-means 算法是一种应用最广泛的聚类算法,聚类结果使得同簇的样本点具有较高的相似性,而不同簇间的样本点相似程度较低。该方法首先在由  $N$  个样本点组成的样本集  $X = \{x_i \mid x_i \in R, i=1, 2 \dots, n\}$  中随机选取  $k$  个样本中心组成聚类中心集  $M = \{m_i \mid m_i \in R, i=1, 2 \dots, k\}$ ,从而得到该样本集满足如下条件的划分<sup>[7]</sup>:

$$(1) X = \bigcup_{i=1}^k c_i, \text{ 其中 } c_i \text{ 为以 } M \text{ 为聚类中心集的全体样本的一个划分}$$

$$(2) c_i \neq \emptyset (i=1, 2 \dots, k)$$

$$(3) c_i \cap c_j = \emptyset, (i, j=1, 2 \dots, k; i \neq j)$$

进而寻找最佳聚类中心集  $M$ ,使得标准测度  $E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} d(x_j, m_i)$  最小,从而完成对于样本集  $X$  的

聚类划分,其中  $m_i = \frac{1}{N_i} \sum_{\tau \in c_i} \tau$  为第  $i$  个簇的样本均值,  $N_i$  为第  $i$  个簇的样本数。

本文所提的改进遗传 K-means 聚类算法 (改进 GKA) 采用层次聚类法确定了最优聚类数  $k_{best}$  和在

最优聚类数下的较优初始聚类中心,不仅克服了传统 K-means 聚类算法对于  $k_{best}$  值选取的随意性,还能方便地形成后续改进 GKA 中较优的部分初始种群。

#### 2.2.1 最优聚类数 $k_{best}$ 和较优初始聚类中心的确定

利用层次聚类法<sup>[8]</sup>确定最优聚类数  $k$  和较优初始聚类中心的主要思想是先将样本集  $X$  中每个样本归为单独一类,并计算此时的标准测度  $E$  以及最小类间距离  $\min CD$ ;然后按标准测度  $E$  的增加量最小原则,每次合并一个类并计算对应的  $E$  和  $\min CD$ ,直至样本集中所有样本聚为一类;最后根据整个层次聚类过程记录的标准测度  $E$  和最小类间距离  $\min CD$  的变化情况,并基于在达到最优聚类数目情况下继续进行合并类将引起标准测度  $E$  和最小类间距离  $\min CD$  剧烈增长的原则,选出最优聚类数目以及对应的较优初始聚类中心。定义聚类数为

$$k \text{ 的标准测度 } E_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} d(x_j, m_i), \text{ 最小类间距离 } \min CD_k = \min_{1 \leq i < j \leq k} d(m_j, m_i) \text{ 则确定最优聚类数 } k_{best} \text{ 和较优初始聚类中心的方法如下图所示。}$$

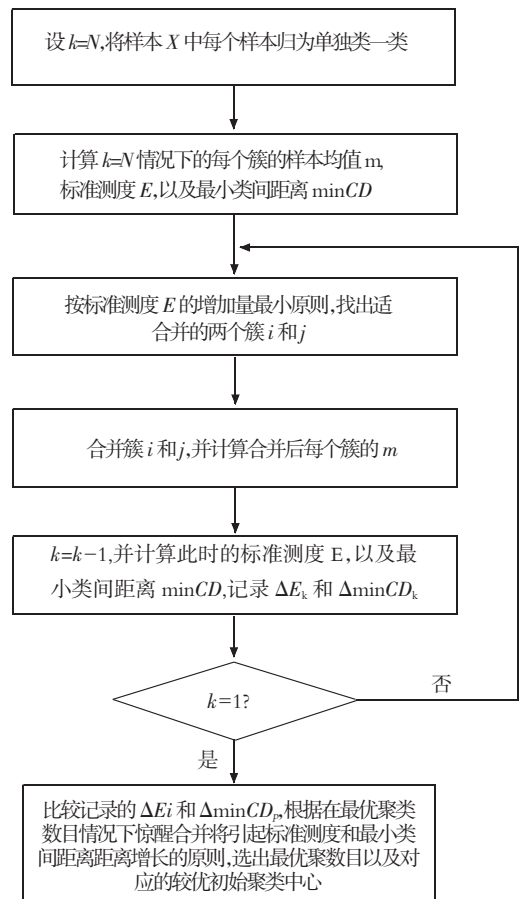


图 2 最优聚类数  $k$  和较优初始聚类中心计算框图

#### 2.2.2 基于改进 GKA 的风机分群算法

在 2.2.1 节通过层次聚类法给出最优聚类数

$k_{best}$  和在最优聚类数下较优初始聚类中心后,采用所提的改进 GKA 进行风机的分群。该算法编码方式主要有以下两种:一是基于已给的  $k$  个聚类中心的编码方式;二是根据每个数据对象所属的聚类划分的编码方式。当需要进行聚类的对象为大型数据集时,第二种编码方式对应的聚类算法效率较低、运算复杂,故本文选择更为有效的基于聚类中心的编码方式。

基于改进 GKA 的风机分群算法的基本流程如图 3 所示,算法具体描述如下:

#### (1) 参数初始化。

根据层次聚类法给出的最优聚类数  $k_{best}$  和较优初始聚类中心  $m_i (i=1,2,\dots,k_{best})$ ,对较优初始聚类中心  $m_i (i=1,2,\dots,k_{best})$  进行 1 位二进制编码后为  $m_i^{(2)} (i=1,2,\dots,k_{best})$ ,按序组成  $M_1 = \{m_1^{(2)}, m_2^{(2)}, \dots, m_{k_{best}}^{(2)}\}$  作为初始种群之一。设置种群规模  $POP_{size}$  为 20,遗传算法终止迭代代数  $maxGen$  设为 100,交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  按后文设置。

#### (2) 生成初始种群。

#### (3) 计算种群中所有个体的适应度。

构造个体的适应度评价函数为:

$$f = \frac{\min CD_{k_{best}}}{0.1 + E_{k_{best}}} = \frac{\min_{1 \leq i < j \leq k_{best}} d(m_j, m_i)}{0.1 + \sum_{j=1}^{k_{best}} \sum_{i=1}^{N_j} d(x_j, m_i)}$$

从而使得寻找的最优聚类中心集合体现类与类之间相距尽可能松散,同一个类内的个体与该类中心应尽可能紧凑,适应度函数值越大说明该个体的适应度越高。

#### (4) 当前种群中最优个体保存,最差个体淘汰。

为了保证改进 GKA 通过迭代收敛于全局最优解,并克服遗传进化过程中选择—交叉—变异等随机操作对于种群平均适应度和算法效率的降低,本文采取当前种群中最优个体保存,最差个体淘汰策略:在每一代进化操作完成后找出当前种群中适应度最高的个体和适应度最低的个体;如果当前种群中适应度最高的个体比之前所有最优个体适应度高的时候,则将其记录为目前最优个体并取代之前的最优个体,同时用之前的最优个体替换当前群体中的最差个体,从而提高整体的适应度值和算法的收敛速度。

#### (5) 选择。

本文以群体中个体的适应度大小作为选择操作的依据,采用轮盘赌的选择方法。

#### (6) 交叉。

本文改进 GKA 算法采用采用算术交叉。

#### (7) 变异。

采用自适应变异算子,动态调整种群个体的变异概率以避免种群早熟,计算方法如下:

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} + \frac{(P_{m2} - P_{m1})(f_{max} - f)}{(f_{max} - f_{ave})}, & f > f_{ave} \\ P_{m1} & , f \leq f_{ave} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $P_{m1}=0.1, P_{m2}=0.04$ ;  $f_{ave}$  为该代群体中所有个体适应度值的平均值;  $f_{max}$  为该代群体中个体的最大适应度值;  $f$  为需要变异的个体的适应度值。

#### (8) 单步 K-means 优化。

为了提高遗传算法的局部搜索能力,在父代种群经过选择—交叉—变异之后进行单步的 K-means 优化操作。根据变异后的种群个体  $M_i, i=1,2,\dots,k_{best}$  所对应的聚类中心对样本集  $X$  的每个样本点分配给离它最近的簇中心所代表的簇,在所有样本点均处理完成后计算各个新簇中所有样本的均值,将其作为更新之后的聚类中心从而形成单步 K-means 优化后的新种群个体。

#### (9) 产生新一代种群。

(10) 判断终止条件是否满足,即为判断 Gen 是否大于  $maxGen$ ,如果  $Gen > maxGen$ ,则迭代过程结束并将种群最优个体即最优聚类中心及与之对应的划分结果作为输出;否则继续进行迭代。

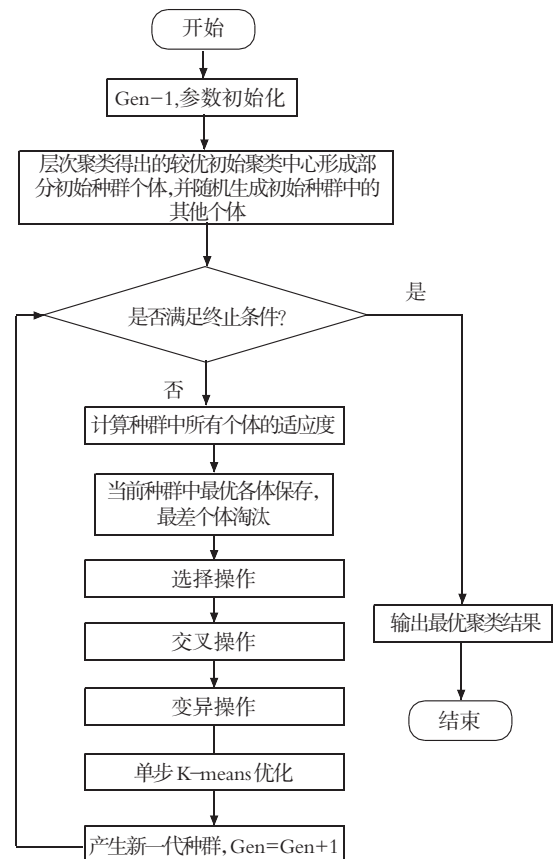


图 3 基于改进 GKA 的风机分群算法流程图

### 2.3 基于改进 GKA 的风电场多机聚合建模步骤

综上所述,基于改进 GKA 的风电场多机聚合建模步骤如下:

Step 1: 输入实际风电场各机组的机械和电气参数,位置坐标,风电场输入风向和风速等参数。

Step 2: 以风速作为机群分类依据,根据第 1 节建立的考虑尾流效应的风电场风速模型,给出尾流效应下的各风电机组的实际输入风速。

Step 3: 以各风电机组的实际输入风速作为输入量,通过 2.2 节的层次聚类分析给出最优聚类数  $k_{best}$  和在最优聚类数下的较优初始聚类中心,作为改进 GKA 的部分初始化参数。

Step 4: 以 Step 3 的输出结果作为部分输入量,进行基于改进 GKA 的风机分群,给出最优的聚类中心和在此条件下的风机机群最优划分。

Step 5: 计算基于改进 GKA 的风机分群下的多机表征的机械和电气参数。

Step 6: 根据 Step 4 和 Step 5 的输出结果,在 DigSILENT PowerFactory 仿真软件中建立基于改进 GKA 的风电场多机聚合模型,进行计算仿真并对比风电场单机聚合模型和详细模型的仿真结果。

### 3 算例仿真

本文采用某 300MW 实际风电场为例,其风机布局如图 4 所示。该风电场采用双馈异步风机(DFIG),型号为 SL3000/113,单机容量 3MW,叶轮直径 113m,轮毂高度 90m,切入风速 3m/s,切出风速 25m/s,额定风速 11.6m/s。



图 4 某实际风电场排列示意图

为说明本文所提建模方法的有效性,在 DigSILENT Power Factory 仿真软件中建立了该实际风电场详细模型、单机表征模型和基于改进遗传 K-means 聚类算法的风电场多机聚合模型,并对比分析了上述 3 种模型在(1)风速 11.6 m/s,与正方向(规定与第一排风机垂直的方向为正方向)夹角  $0^\circ$  (额定情况);(2) 风速 9 m/s,与正方向夹角  $60^\circ$ ; (3)风速 11.6 m/s,与正方向夹角  $90^\circ$  (最坏情况)这

3 种典型场景下的风电场出力情况。

#### (1) 模型 1 风电场详细模型。

建立风电场的详细模型,只需确定风电场内各风机的实际位置坐标、风速、风向即可。以最坏情况即第 3 种风速场景(11.6 m/s,夹角  $90^\circ$ )为例,其详细模型如图 5 所示。

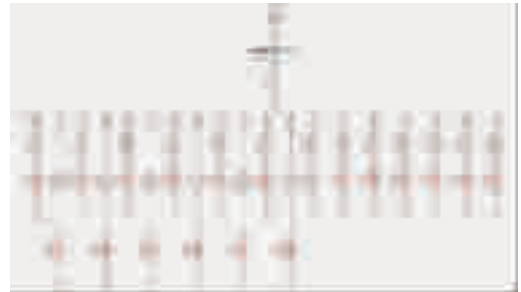


图 5 风电场详细模型

#### (2) 模型 2 风电场单机表征模型。

采用单机等值法对于上述实际风电场进行聚合建模,聚合前后 DFIG 模型参数修改如表 1 所示,聚合后风场的单机表征模型如图 6。

表 1 单机聚合模型参数

	聚合前单机模型	聚合后风场等值机模型
机组额定容量 /MVA	3	300
空气平均密度 /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.0021042	0.443765
双馈机转动惯量 /( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	6.03	603
风力机出力基准值 /MW	2.25	225
风电机出力基准值 /MW	1.970627	197.0627
风轮低速轴与双馈机高速轴间互阻尼系数	2.25	225
转子侧变频器侧功率测量模块基准值	3	300
转子过流保护整定值	2.25	225



图 6 单机等值的风电场聚合模型

(3) 模型 3 基于改进遗传 K-means 聚类算法的风电场多机聚合模型。

采用本文所提的基于改进 GKA 的风电场多机聚合方法,可得到风电场风机聚类结果如表 2 所示。

根据表 2 的数据,对风电场进行基于改进 GKA

表 2 改进 GKA 的风电场分群结果

风速	等值台数(测度函数值)	4 (0.092)			
11.6 m/s	各台等值风速/(m·s <sup>-1</sup> )	10.716	10.947	11.162	11.602
夹角 0°	各台聚合风机数	18	15	30	37
风速	等值台数(测度函数值)	4 (0.194)			
9 m/s	各台等值风速/(m·s <sup>-1</sup> )	8.065	8.302	8.622	9.001
夹角 60°	各台聚合风机数	12	18	34	36
风速	等值台数(测度函数值)	8 (0.335)			
11.6 m/s	各台等值风速/(m·s <sup>-1</sup> )	7.962	8.161	8.402	8.688
夹角	各台聚合风机数	13	24	21	15
90°	各台等值风速/(m·s <sup>-1</sup> )	8.961	9.249	9.723	11.601
	各台聚合风机数	6	6	8	7

的风电场多机聚合等值并同样对于给定的 3 种风速情景进行建模仿真。

上述三种模型在三种不同场景下的出力仿真结果如表 3 所示。

表 3 三种不同风电场模型出力仿真结果

仿真情景	详细模型	单机等值模型	改进 GKA 聚合
	/MW	/MW	模型/MW
风速 11.6 m/s 夹角 0°	277	300	280
风速 9 m/s 夹角 60°	139	184	145
风速 11.6 m/s 夹角 90°	134	153	142

由表 3 可以看出,由于尾流效应,在额定风速下 300 MW 风电场的实际出力为 277 MW。极端情况即当风向与每排风机方向平行时,即使在额定风速下 300 MW 风电场实际出力只有 137 MW,说明尾流效应的影响非常明显。在不同风速场景下,当风电场内风机间相互遮挡较少时,相较于风电场详细模型,单机等值模型能较为准确地反应风电场出力情况,由于单机等值模型未考虑尾流效应的影响,单机等值模型的仿真出力值要高于实际值。

从表 3 三种模型的仿真结果可见,在三种风速情景下基于改进 GKA 的风电场多机聚合模型仿真结果都要比单机等值聚合模型更接近详细模型的仿真结果,说明了本文所提方法的有效性。

#### 4 结束语

风力发电等新能源并网容量的增加将对电力系统产生重大影响,因此迫切需要建立合理的风电场模型以便科学评估风电并网对电力系统造成的影响。本文提出了基于改进遗传 K-means 聚类算法的风电场多机聚合建模方法。该方法建立了考虑尾流效应的风电场风速模型,并以此模型下的输入风速作为风电机组分群依据,改进 GKA 风电场多

机分群算法利用层次聚类法克服了传统 K-means 聚类算法的不足,并且在遗传进化过程中有机结合单步 K-means 优化,有效提升了 GKA 的全局寻优和局部寻优能力以及算法的收敛速度。

本文所提的基于改进 GKA 的风电场多机聚合建模方法可用于大型风电场出力预测、风电场风机合理分群及并网优化调度等方面。但是本文没有对所提方法能否用于风电场暂态和动态特性的研究展开深入探讨,这个也是以后进一步研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] JIANHUI WANG, MOHAMMAD SHAHIDEHPOUR, ZUYI LI. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1319-1327.
- [2] BART C. UMMELS, MADELEINE GIBESCU, ENGBERT PELGRUM, et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 44-51.
- [3] O'GORMAN R, REDFERN M A. The difficulties of connecting renewable generation into utility networks [C]// 2003 Power Engineering Society General Meeting, July 13-17 2003, Toronto, Canada: IEEE, 2003, 3: 1466-1471.
- [4] 黄 梅, 万航羽. 在动态仿真中风电场模型的简化 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 147-152.
- [5] 曹 娜, 于 群. 风速波动情况下并网风电场内风电机组分组方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 42-46.
- [6] WASP. The wind atlas analysis and application program [EB/OL]. [2010-08-10]. <http://www.wasp.dk/Download/Power-Curves.html>.
- [7] 曹 娜, 赵海翔, 任普春, 等. 风电场动态分析中风速模型的建立及应用 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 68-72.
- [8] D.J. WILD, C.J. BLANKLEY. Comparison of 2D fingerprint types and hierarchy level selection methods for structural grouping using wards clustering [J]. J. Chem. Inf. Comput. Sci. 2000, 40(1): 155-162.

#### 作者简介:

马洲俊 q(1986), 男, 江苏无锡人, 硕士, 主要从事为电力系统规划与运行、含风电的电力系统建模仿真等研究;

朱 红(1971), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电网运行调度、智能电网、分布式能源;

岳浩永(1976), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 主要从事电网调度运行管理方面的工作;

罗 兴(1983), 男, 江苏南京人, 工程师, 主要从事电网调度运行方面的工作;

王春宁(1966), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 主要从事电网规划管理方面的工作;

丁 昊(1987), 男, 江苏南京人, 助理工程师, 主要从事电网二次继保和电网检修方面的工作。

# 电网故障综合智能告警在地区调度自动化系统的应用

朱红勤<sup>1</sup>, 陈艳<sup>2</sup>, 王赫<sup>1</sup>

(1.南京供电公司,江苏 南京 210019;2.扬州供电公司,江苏 扬州 225000)

**摘要:**结合南京电网调度自动化系统的实际应用,系统讨论分析了地区事故告警信号产生的原因,以实现在不影响地调系统现有实时监控功能的基础上,对事故分闸告警进行合成处理,提高转发省调事故告警信息的准确性。实际应用表明,这些机制大大减少了事故分闸告警的漏报和误报现象,提高了综合智能告警转发省调正确率,为调控人员分析决策提供了可靠保障。

**关键词:**事故分闸;事故总信号;电网故障综合智能

**中图分类号:** TM711

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)S2-0034-03

## 0 引言

监控告警信息是电网运行监视与判断的重要手段,准确、清晰的告警信息能够帮助调控人员在电网故障情况下正确判断与快速处理事故,保证电网在最短时间内恢复安全、稳定运行。

南京供电公司“地县一体调度自动化系统”承担了整个南京地区的电网实时数据采集与监视任务,自2011年3月投运以来,按照《江苏电网调度自动化系统监控信息采集规范》的要求,根据监控信号的重要程度及特点,将其分为事故、异常、遥测越限、变位、告知五类,在监控系统上实现统一描述和分类显示,大大提高了监控运行管理的安全与效率。

但目前仍存在两大问题,一是监控告警信息多,特别是迎峰度夏期间,据统计2012年8月监控系统共输出告警信息近40万条,其中事故跳闸2162条,平均每天近70条,面对如此庞大的数据,如果没有有效的手段,完全依靠人工分析,对调控人员已是很大的负担;二是监控告警信息存在误报、漏报的现象,南京地区还有一大部分变电站未进行综合自动化改造,站端自动化设备老化严重,误报、漏报信号的现象短时间内很难完全避免。而“五类”告警信息中,事故信息的重要性最大,一旦调控人员分析错误就有可能影响电网的安全稳定运行,甚至导致人身伤亡事故。

2014年1月,国网公司将电网故障综合智能告警正确率作为地区供电公司的同业对标指标。为提高综合智能告警信号的可靠性,自动化专业人员对电网事故告警信号产生的原因进行分析讨论,对事故分闸告警进行合成处理,减少了事故分闸告警的漏报和误报现象,为调控人员分析决策提供可靠保障。

## 1 电网故障综合智能告警

### 1.1 调度自动化系统事故分闸的合成机制

电网中的设备发生故障时,相关保护会跳开断路器以切断故障电流,变电站综合自动化系统<sup>[1]</sup>设备向调度主站发送相关设备的开关分闸信号以及一系列相关保护信号,保护信号和开关分闸信号输入到I/O测控单元后在本单元“逻辑与”生成本间隔的事故动作信号<sup>[2]</sup>。各I/O测控单元间隔事故动作信号传送到总控单元后在总控单元“逻辑或”软件合成全站事故总信号上传至调度端,即变电站内任何一个开关设备事故信号动作,都会触发全站事故总信号动作,调度自动化系统对这些信号进行组合分析判断,确定是否为事故分闸,为调控人员判断和处理故障提供决策依据。目前,江苏省内调度自动化系统主要采用南瑞OPEN3000系统,事故分闸信号的合成条件2有如下几种类型:第一种是开关分闸信号和该变电站的全站事故总信号相继发生3秒以内,第二种是开关分闸信号和该相关的重要保护信号相继发生3秒以内,重要保护信号包括保护动作,后备保护动作,保护纵差动作,母差动作,主变重瓦斯动作等等,第三种是特定的单一的开关分闸信号。

### 1.2 江苏省调度自动化系统事故分闸的合成机制

目前,我国电力系统采用分层(多级)的调度控制模式,2011年国家电网公司进行“五大体制”改革后,南京供电公司作为地区调度机构负责220kV及以下变电站的110kV及以下电压等级设备的调控业务,代省调负责220kV设备的监控业务。作为南京公司的上级调度机构江苏省调则负责500kV变电站的调度控制业务以及220kV变电站中220kV电压等级设备的调度业务。为满足省调的调控需求,目前,江苏地区500kV变电站监控信息由省调自动化系统直接采集,220kV变电站监控信息由各地调

通过 DL476 规约转发,220 kV 变电站监控系统除了向地调调度端发送全站事故总外,另增加“220 kV 省调事故总信号”,该信号由 I/O 测控单元间隔事故动作信号“逻辑或”软件合成,即在 220 kV 电压等级开关事故跳闸时产生。另外,地调调度自动化系统还负责转发 220 kV 设备的遥信信息,省调调度自动化系统 220 kV 设备的事故分闸就是由地调转发的开关分闸信号和 220 kV 省调事故总信号组合判断的结果。

### 1.3 综合智能告警 3 正确报出率

由于现场检修工作等原因,变电站现场自动化信号存在误报漏报现象,省调仅凭地调转发的开关分闸信号和 220 kV 省调事故总信号这两个信号来判断事故分闸,也容易发生误判和漏判现象,给省调调控人员正常工作带来困难。为进一步提高省调调度自动化系统 220 kV 设备事故分闸判断的准确性,省调要求地调结合电网故障发生时除事故总外其他重要保护信号的动作情况、遥测情况等一系列信息进行组合判断,以变电站为单位合成一个 220 kV 综合智能告警事故总信号转发给省调调度自动化系统,即当一个 220 kV 变电站的设备发生事故跳闸时,地调调度自动化系统除了转发该设备的开关分闸信号和该厂站 220 kV 省调事故总信号这两个信号之外,另外发送该厂站的 220 kV 综合智能告警事故总信号动作信息给省调。

综合智能告警正确报出率就是以省调调度自动化系统接收的地调系统转发 220 kV 综合智能告警事故总信号为准进行统计。综合智能告警正确报出率 = (220 kV 电网故障正确报出次数 / 220 kV 电网故障次数) \* 100%。其中 (1) 电网故障报出延时超过 5 分钟,视为未正确报出;(2) 统计周期内每 5 次误报,统计分母“220 kV 电网故障次数”增加 1 次。

## 2 综合智能告警系统的开发思路

### 2.1 总体思路

目前地调事故分闸判断逻辑已能够满足正常监控需求,但可能会出现误判,为了不影 响地调系统现有实时监控功能,考虑一是开发独立事故分闸信号合成程序;二是需对事故分闸告警进行合成优化处理,上送省调的合成事故告警信息 220 kV 综合智能告警事故总信号中需要将这部分误判告警尽可能滤除;三是 220 kV 综合智能告警事故总信号上送省调前经过调控人员的人工判断。

### 2.2 220 kV 综合智能告警事故总信号的优化过滤逻辑

根据综合智能告警正确报出率的考核要求,地

调自动化主站人员制定了 220 kV 综合智能告警事故总信号的优化过滤逻辑包括:

(1) 结合开关状态进行判断,即 220 kV 开关在已置牌(封锁牌、检修牌或冷备用牌)的情况下,变电站向地调调度自动化上送的该间隔的所有变位信息和保护信号动作情况均不合成 220 kV 综合智能告警事故总信号。

(2) 结合遥测进行判断,即在事故分闸时判断开关所连设备的量测(默认取有功)是否归零(归零值可以配置),如果量测也归零则判断事故分闸正确,否则过滤此事故分闸信息(设定 30 秒内有功或电流 < 10,其中时间和大小可配置)。

(3) 结合对侧开关跳闸判断,即在事故分闸判断时判断线路对侧开关是否也跳闸,如果是则判断事故分闸正确,否则过滤此事故分闸信息(+3 秒内对侧有事故分闸,其中时间可配置)。

(4) 结合对侧遥测进行判断,即在事故分闸时判断线路对侧开关所连设备的量测(默认取有功)是否归零(归零值可以配置),如果量测也归零则判断事故分闸正确,否则过滤此事故分闸信息(30 秒内有功或电流 < 10,其中时间和大小可配置)。

### 2.3 220 kV 综合智能告警事故总信号人工判断规则

考虑到综合智能告警正确报出率要求电网故障报出延时不超过 5 分钟,地调自动化主站人员设定信号经过优化过滤合成后弹出告警后保留 4 分钟供调控人员进行人工确认,即信号一是 4 分钟内经过调控人员人工确认后上送省调;二是如果调控人员未加确认,在 4 分钟后自动上送省调。

变电站事故分闸综合智能告警信号上送省调,信号生成逻辑如图 1 所示。

## 3 综合智能告警系统的实施方案

### 3.1 地调侧实施方案

(1) 开发事故分闸合成软件,具体程序逻辑参考 220 kV 综合智能告警事故总信号的优化过滤逻辑。

(2) 地调为所有 220 kV 厂站新增一个虚事故分闸遥信点即“220 kV 综合智能告警事故总信号”(名称统一为:某某变上送省调事故分闸信号),由事故合成程序实现各厂站“上送省调事故分闸信号”的自动更新(当该厂站发生事故分闸时将此遥信置为 1,事故后 1 分钟将此信号复归)。

(3) “220 kV 综合智能告警事故总信号”在地调自动化系统合成后推告警窗提醒调控人员,经过调控人员确认后或者信号合成后超过 4 分钟后自

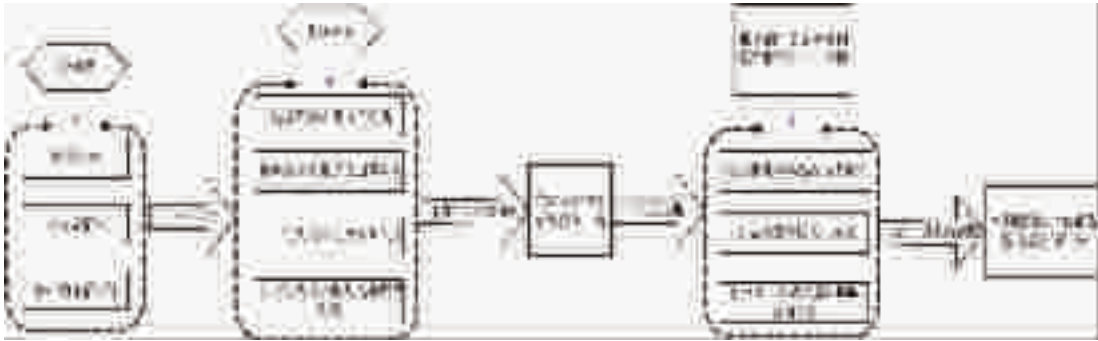


图1 变电站事故分闸综合智能告警信号上送省调信号生成逻辑图

动由前置系统通过 DL476 规约实时转发给省调调度自动化系统。

(4) 地调通过历史告警查询工具可以查询地调上送省调的所有综合智能告警事故总信号事件,并对调控人员确认上送、取消上送、系统超时自动上送的情况进行标注。如表 1 所示。

表 1 地调综合智能告警事故总信号上送省调告警查询结果

序号	发生时间	告警内容
1	2014年06月04日 10时32分34秒	大行宫变事故信号取消 上送省调 jkygx(于广学)nanjjk4-1
2	2014年06月12日 10时51分09秒	宁北变事故信号取消 上送省调 jkygx(于广学)nanjjk4-1
3	2014年06月13日 11时04分58秒	龙山变事故信号等待 已超过4分钟,自动上送省调
4	2014年07月06日 12时02分39秒	溧水变事故信号取消上 送省调 jkwym(王玉美)nanjjk4-1
5	2014年07月07日 20时39分18秒	雨花变事故信号等待 已超过4分钟,自动上送省调

### 3.2 省调侧实施方案

(1) 省调需为所有 220 kV 厂站增加一个虚事故分闸遥信点,并从地调实时接收该信号(可以定义到保护信号表或者测点遥信表中)。

(2) 省调通过历史告警查询工具可以查询地调上送的所有事故分闸信号事件。

系统实施后,220 kV 电网故障综合智能告警上传省调。如图 2 所示。

## 4 结束语

电网故障综合智能告警系统告警模块在率先南京电网调度自动化系统进行试点部署,并在先后在扬州等江苏全省 13 个地调进行优化并推广应用,大大提高了地调向省调推送自动化系统事故分闸信号合成的准确性,通过系统自动对事故分闸告警信息进行优化处理和调控人员人工判断相结合的方式,大大提高地区 220 kV 设备综合智能告警正

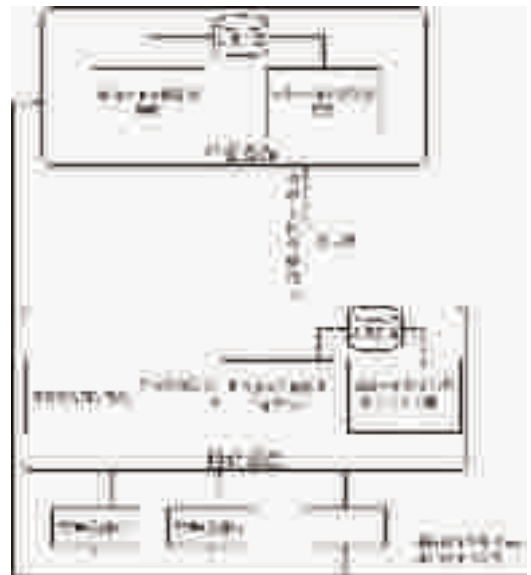


图 2 220 kV 电网故障综合智能告警上传省调架构示意图

确报出率,基本达到 100% 的目标,为省调调控人员正确判断和处理事故提供了决策依据,实现了全省 220 kV 变电站事故的不漏报、不误报的目标,为电网调控对电网事故的快速判断提供了技术支持。

### 参考文献:

- [1] 张永健. 电网调控与调度自动化[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 王志平,吴玉林,朱书扬,等. 变电站事故总信号生成方式及改进[J]. 江苏电机工程,2006,25(5):53-55.
- [3] 李云鹏. 智能专家告警处理系统在南通电网的应用 [J]. 江苏电机工程,2008,27(5):48-50.

### 作者简介:

朱红勤(1981),女,江苏南通人,工程师,从事电力系统自动化工作;

陈艳(1978),女,江苏扬州人,工程师,从事电力系统自动化工作;

王赫(1981),男,辽宁大连人,工程师,从事变电运维管理工作。

# 大容量低压短路试验相关问题研究

朱英杰,胡新瑞

(南京苏逸实业有限公司,江苏 南京 210009)

**摘要:** 大容量低压短路试验,其负荷性质主要是冲击负荷,大的冲击负荷会导致电网电压暂降等诸多问题,本文首先简单介绍了大容量低压短路试验的基本原理及其负荷特征,接着对电压暂降、直流暂态分量问题进行了重点分析,最后简单分析了继电保护、电能计量问题。

**关键词:** 短路试验;电压暂降;直流暂态分量;继电保护

**中图分类号:** TM711

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)S2-0037-03

## 0 引言

大容量低压试验主要是通过短路试验变压器,其高压侧带有星三角转换开关、低压侧带有手动星三角转换开关和串并联转换开关,使该变压器的输出侧电压在一定范围之间变换,可以在低压电器试验室变电所 0.4 kV 侧产生从几千安培到几万安培不等的短路电流。

大容量低压短路试验主要用于低压电器产品的通断试验和短路耐受强度试验等,其目的是提供考核各类低压电器产品是否满足产品标准中规定的各种特性要求。文献[1]提出,大容量低压试验用以模拟短路故障,其负荷性质是短时间、大电流、大容量的瞬间冲击负荷。

试验持续时间内电网中存在电压暂降、继电保护、电能计量等诸多问题。

## 1 电压暂降指标探讨

### 1.1 电压限值的相关规定

试验变压器低压侧的一次小阻抗单相或三相接地故障,试验持续时间内,将对公共电网造成冲击,引起电网供电母线的暂时跌落,可能影响其他用电客户用电设备的正常工作,甚至影响正常生产,带来经济损失。我们国家目前尚未出台电压暂降国家标准,现有的相关标准也没有相关的明确规定,这就使得电力用户和电力部门在面对此问题时出现了偏差<sup>[2]</sup>。本文对国内外相关标准进行了研究,对于和电压暂降有关的标准进行了分析。

#### 1.1.1 国内相关标准

国标《GB/T 12325-2003 电能质量 供电电压允许偏差》中,说明了该标准的适用范围是交流 50 Hz 电力系统在正常运行条件下供电电压相对标称系统电压的偏差<sup>[3]</sup>。

国标《GB12326-2008 电能质量 电压波动和闪变》,注重于 PCC 母线电压闪变的允许值、以及分级进行评估方法,同时较简单地提出了由波动负荷在电网公共连接点产生的电压变动限值,并指出产生的电压变动与变动频度、电压等级有关。明确规定了该标准的适用范围是“适用于交流 50 Hz 电力系统正常运行方式下,由波动负荷引起的公共连接点电压的快速变动及由此可能引起人对灯光闪烁明显感觉”<sup>[4]</sup>。说明了所谓波动负荷是指生产(或运行)过程中从供电网中取用快速变动功率的负荷。例如:炼钢电弧炉、轧机、电弧焊机、电气化机车等。其机理是快速变动负荷引起供电母线电压的快速变动,电压的变动特性具有连续性和周期性的特征。一般说来,这种电压变动的幅值不高,对电网中的电气设备不会造成损害,但其产生的电压闪变将会使白炽灯产生明显闪烁,引起人眼难忍的不适。

所以,该标准注重的是波动负荷引起供电母线电压的闪变问题,在术语的定义、限值的规定、以及计算方法等方面,对电压闪变占有更多的篇幅。

显然,由于电气操作、电气故障、开关断流试验等引起的母线电压暂降,由于其具有偶发性、不连续性等发生频度极低,套用本标准中电压变动的限值,规定电压暂降深度显然是过于保守。

《GB 50055-2011 通用用电设备配电设计规范》制定了电动机、起重运输设备、电焊机用电设备配电设计规范。

该标准对端电压 10 kV 以下的电动机启动时,对电网和电动机本身的影响、特别就马达启动时对电网供电母线产生的电压暂降容许值作了规定<sup>[5]</sup>:

(1)电动机启动时,其端子电压应能保证机械要求的启动转矩,且在配电系统中引起的电压波动不妨碍其它用电设备的工作。

(2)交流电动机启动时,配电母线上的电压应符合下列规定:

① 在一般情况下,电动机频繁启动时,不宜低于额定电压的 90%;电动机不频繁启动时,不宜低于额定电压的 85%。

② 配电母线上未接照明或其它对电压波动较敏感的负荷,且电动机不频繁启动时,不应低于额定电压的 80%。

对于“一般情况”,应理解为电动机母线上接有照明等对电压跌落水平较敏感的负荷;所谓“频繁”是指每小时启动数十次以至数百次。对于电压暂降容许值的上述规定,是沿用多年的数据并被广泛采用。

显然,对于大容量低压短路试验引起的电压暂降,套用上述标准又显得过于宽松。

### 1.1.2 国外相关标准

对于电压暂降的定义和限值,欧洲标准《EN 50160-1999》、IEEE 标准《IEEE std 1159-1995》、《IEEE std 446-1995》各有规定。

在《EN 50160-1999》中,由于系统故障所引起的电压变化归入电压暂降(Voltage Dip),对于电压暂降,在标准中只是提出了一个年发生率的参考值,并没有给出相应的限值水平;由于用户负荷变化或系统操作引起的电压变化归入电压快变化(Rapid Voltage Change)。根据《EN 50160-1999》给出的电压快变化定义,电压在两个值之间的过渡,持续时间不确定,既可以是毫秒级的,也可能是秒级的,并且,电压的快变化由用户负荷的变化或系统操作所引起。所以,在《EN 50160-1999》中定义的电压变动,可以理解如我国国标中所定义的电压偏差<sup>[6]</sup>。

《IEEE std. 1159-1995》是关于电力系统电能质量监测的推荐准则,在《IEEE std. 1159-1995》中,将短时的电压跌落以单词“sag”表示,并说明与《EN 50160-1999》标准总的用词“dip”相一致。IEEE 标准中将电压暂降(sag)的幅值范围定义在额定电压的 10%—90%,并根据持续时间的不同,又细分为即态、瞬态和暂态三种情况。该标准将引起短时电压暂降归结为系统故障、大容量负荷的投切或大容量马达的启动。在《IEEE std. 1159-1995》中,虽然对电压的变动进行了很明确的分类,但并没有给出相应电压暂降的兼容水平<sup>[7]</sup>。

《IEEE std. 446-1995》是关于工业和商业系统用户的紧急和备用功率的标准<sup>[8]</sup>。关于电压暂降的兼容水平,引用了美国工业信息技术协会(Information Technology Industry Council)第 3 技术工作组(TC3)推出的所谓 ITI 曲线。ITI 曲线是在美国工业信息技术协会的前身美国计算机和商用设备制造商协会提出的 CBEMA 曲线的基础上修改而得,所以,亦

有仍称 CBEMA 曲线。电压暂降的容许范围分两种情况:电压暂降至额定电压的 80%,持续时间不超过 10 秒;电压暂降至额定电压的 70%,持续时间不超过 0.5 秒。

ITI 曲线给出了 60 Hz、120 V 系统中电压的容许范围,并不适用于高于 120V 的其它电压等级的系统。实际上,由于系统阻抗的传递,高压系统的电压跌落将引起低压系统电压跌落具有增大的趋势,所以,在高压系统参考使用 ITI 曲线时,必须考虑这一因素。

### 1.2 推荐使用标准

根据低压短路试验的试验方式,电压的跌落不具有连续性和周期性,并按照《EN 50160-1999》和 IEEE 标准,分别定义为电压暂降和短时电压暂降。所以,不宜套用《GB12326-2008 电能质量 电压波动和闪变》中电压波动的允许值界定试验时造成的电压暂时跌落水平。

按照《EN 50160-1999》的定义,短路试验对供电母线带来的效应,应理解为电压暂降(Voltage Dip)较为合适。但在该标准中没有给出具体的限值水平。

按照 IEEE 标准的定义,低压短路试验对供电母线带来的效应,显然可以归入短时电压暂降(Voltage Sag)。同样,该标准中没有给出具体的限值水平。

虽然 ITI(CBEMA)曲线适用于 120 V 60 Hz,但其给出的兼容水平值得参考。用电设备应该适应持续时间不超过 10 秒时,电压暂降应不超过额定电压的 20%;持续时间不超过 0.5 秒时,电压暂降应不超过额定电压的 30%;持续时间不超过 20 毫秒时,电压暂降应不超过额定电压的 40%的系统运行条件。当然,电压暂降应不超过额定电压的 10%时,可以长期稳定的工作。对于其它电压等级的系统中参照应用 ITI 曲线时,必须考虑由于网络阻抗造成的电压降落传递,其电压暂降限值应作相应的调整。

按照《GB 50055-2011 通用用电设备配电设计规范》对大容量马达启动时提出的电压跌落水平允许值,在电动机临近供电母线上接有照明或对电压跌落敏感的用电设备时,电动机频繁启动时,不宜低于额定电压的 90%;电动机不频繁启动时,不宜低于额定电压的 85%。配电母线上未接照明或其它对电压波动较敏感的负荷,且电动机不频繁启动时,不应低于额定电压的 80%,对于大容量低压短路试验引起的电压暂降,套用上述标准显得过于宽松。

《GB/T 12325-2003》关于系统运行电压的偏差已经做出了明确的规定。当用电客户受端运行电压

曲线在规定的偏差范围内走动时,应不至于影响用电设备的正常工作。

所以,低压实验站进行短路试验时,按最保守的估计,只要引起的电压暂降水平落在允许的电压偏差范围内,不会影响其它用电客户用电设备的正常运行。实际上,由于试验的持续时间一般只有 100 ms,最长也不超过 200 ms,按照 CBEMA 曲线,其允许的电压暂降水平还可以适当的放宽。

根据以上分析,对于大容量低压短路试验引起的电压暂降,不建议采用 CBEMA 曲线的推荐值,也不建议采用《GB50055-2011》提出的允许值,而是应采用偏于保守的设置,建议采用国标《GB/T 12325-2003》。由于目前没有电压暂降标准,文献[9]还提出:具体电压暂降允许值的设置,需结合具体工程,得到供电主管部门的确认,同时需要制定电压暂降标准来规范和约束电力公司、电力用户和设备制造商,以此推动电压暂降问题的逐步改善和解决<sup>[9]</sup>。

## 2 直流暂态分量影响

试验时通过调节试验回路的串联电抗器分接头,得到所要求的试验电流。试验回路的综合功率因数决定了直流暂态分量的衰减时间常数(表 1)。

表 1 不同试验电流时,试验回路的功率因数和时时间常数

试验电流 $I_p/kA$	功率因数 $\cos\varphi$	时间常数/ms
$I_p \leq 1.5$	0.95	1.05
$1.5 < I_p \leq 3.0$	0.9	1.05~1.54
$3.0 < I_p \leq 4.5$	0.8	1.54~2.39
$4.5 < I_p \leq 6.0$	0.7	2.39~3.25
$6.0 < I_p \leq 10.0$	0.5	3.25~5.51
$10.0 < I_p \leq 20.0$	0.3	5.51~10.12
$20.0 < I_p \leq 50.0$	0.25	10.12~12.33
$50.0 < I_p$	0.2	15.59

由表 1 可知,当试验电流为 10 kA 时,时间常数不超过 5.51 ms;当试验电流为 25 kA 时,时间常数不超过 12.33 ms。

试验时通过回路的总电流与合闸角有关,当在电流过零点合闸时,没有暂态直流分量发生,最不利的是在电流正负最大值时合闸,将存在最大的暂态直流分量。

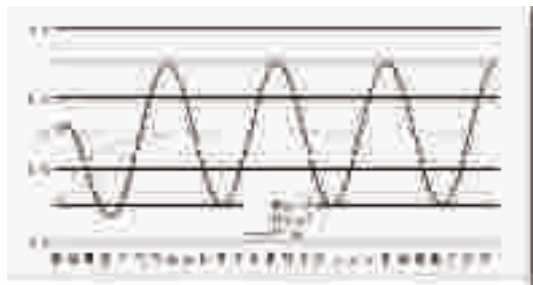


图 1 试验电流 10 kA,  $\cos\varphi=0.5$   $\tau=5.51$  ms

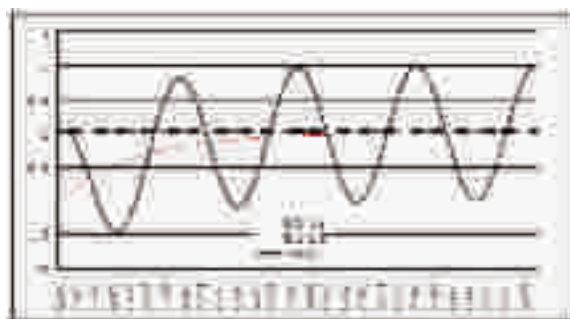


图 2 试验电流 25kA,  $\cos\varphi=0.25$   $\tau=12.33$ ms

由图 1,对于 10 kA 试验电流,时间常数 5.51 ms,直流暂态分量在半个工频周波已基本衰减结束,总电流与稳态分量没有明显的差异。

由图 2,对于 25 kA 试验电流,时间常数 12.33 ms,合闸后半周波(10 ms 左右)出现总电流幅值超过稳态分量 1.5 倍。一个周波后总电流与稳态电流曲线已经基本吻合。

无论是 10 kA 试验电流,或是 25 kA 试验电流,最不利的合闸角情况下,试验回路最大电流均发生在合闸后的半个工频周期(10 ms)以内,然后是暂态直流分量已得到足够的衰减,试验回路中流过的已是稳态电流,因此,大容量低压短路试验可以忽略试验时直流分量的影响,只考虑稳态试验电流产生的电压跌落。

## 3 短路试验对保护装置的影响

试验持续时间内,造成输电线路电流瞬时增加,根据文献[10],有可能导致电流起动元件动作,而短路试验在系统中造成的瞬时电压可能使变压器后备保护的复合电压元件短时起动<sup>[10]</sup>,因此应校验短路试验是否会引起输电线路、变压器保护装置误动作。

## 4 短路试验对电能计量的影响

大容量试验站变电所计量点一般设在试验站高压进线侧,由于试验站负荷主要是冲击负荷,负荷变化速度较快,要求电能计量表有较快的响应速度,根据文献[11],如果高压进线侧计量电能表不能完全计量使用期间电量,可以考虑在高压进线侧电流回路加装故障录波器记录试验电流冲击次数,当月电量根据短路试验变压器投运次数、试验电流冲击次数、高压进线侧电能表计量值综合测算<sup>[11]</sup>。

## 5 结束语

本文总结分析了国内外电压暂降指标,对于大容量低压短路试验引起的电压暂降允许值,建议采用国标《GB/T 12325-2003》。电压暂降已成为我国面

(下转第 43 页)

# 220 kV 大截面电缆拉管敷设安装研究

马耀家<sup>1</sup>, 郑 瑛<sup>2</sup>

(1. 国网国际发展有限公司, 北京 100086; 2. 南京供电公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:** 本文立足 220 kV 某变电站送电工程实践, 从管线轨迹设计、敷设方案、电气安装等角度研究了拉管敷设大截面高压电缆线路的主要技术工艺要点, 并分析拉管敷设大截面高压电缆的优缺点。

**关键词:** 拉管; 220 kV 大截面电缆; 敷设安装

中图分类号: TM757.3

文献标识码: B

文章编号: 1009-0665(2014)S2-0040-04

## 0 引言

220 kV 某变电站电缆送电工程路径总长 16.5 km, 总造价 12.5 亿元, 全线采用 2500 mm<sup>2</sup> 大截面电缆。为江苏电网迄今单体规模最大、工艺最复杂的电缆送电工程。线路途径南京七大主干道, 横穿三大主干河道及四处防洪涵道, 绕越地铁地下站房, 采用明挖隧道和盾构结合, 交叉路口及地下管线密集处采用大截面拉管敷设电缆。

大截面拉管敷设 220 kV 电缆是首次大规模应用在江苏电网电缆工程中的新工艺。本文着重介绍该工艺有关敷设安装技术要点。

## 1 拉管敷设电缆的工艺特点

### 1.1 拉管工艺简述

拉管属于非开挖地下管线施工工艺之一, 采用定向钻机按照设计路径在地下钻孔, 扩孔后拖曳电缆保护管形成地下管孔, 然后将电缆敷设在电缆保护管中。拉管敷设电缆施工速度快, 环保安全, 造价低, 是穿越城市道路及河流的好办法。该工艺在 10-110 kV 城市电网工程中较常用, 220 kV 及以上的高压电缆送电工程中此前未大规模应用, 主要原因是电缆自重大, 分盘长, 刚度强, 拉管敷设难度很大。

### 1.2 拉管敷设 220 kV 大截面电缆的工艺要点

#### 1.2.1 管束选择

电缆保护管选择改性聚丙烯管(MPP), 适度柔性, 韧性好, 机械强度高, 且耐热耐低温, 管质轻、细腻光滑摩擦力小, 可热熔接, 广泛应用于城市电缆工程中。考虑本工程电缆外径 164 mm, 选择电缆保护管外径 325 mm, 壁厚 25 mm, 增强型 MPP 管。回流线及通讯管采用外径 110 mm, 壁厚为 10 mm 的普通 MPP 管。

#### 1.2.2 管孔轨迹设计

管孔施工工艺与普通中低压配电电缆工程并无实质性区别, 但考虑大截面电缆敷设要求, 对钻孔轨迹设计提出了更高要求。

在管孔中拖曳电缆时, 管壁与电缆的摩擦力是由二者摩擦系数、电缆重力以及侧压力、单段拉管的长度三个因素决定的。本次使用的电缆截面达到 2500 mm<sup>2</sup>, 加之 220 kV 绝缘材料厚度大, 使得电缆本体刚度大, 不易弯曲, 因而电缆敷设时弯曲部分侧向压力很大, 且自重大, 二者叠加导致摩擦力大大增加, 相应的电缆穿管牵引张力也大大增加。为防止拉坏电缆, 必须从轨迹设计入手, 尽量采用平缓的曲线, 降低侧压力带来的摩擦力。在一般工程中, 电缆保护管的平面轨迹通常是规划路径及管线交叉要求、现场地形条件和牵引设备施工场地布置三方面因素确定的, 本工程中, 还要增加摩擦力校核。准确设计电缆管道平面和纵断面轨迹, 并计算每个弯曲处的电缆穿管侧压力和摩擦力, 确保累计摩擦力不超过电缆安全牵引力的 70%。

另外, 大截面电缆较硬, 弯曲的拉管中穿过时, 载管孔弯曲部分的内侧, 电缆受到管壁的侧压力大。如果侧压力超过了电缆结构强度许可值, 就会将挤坏电缆护层, 甚至将电缆压扁, 导致电缆绝缘失效。故在每个弯曲处均需要单独计算侧压力, 保证低于电缆允许侧压力的 70%。侧压力校核是大截面电缆轨迹设计的特殊要求。

最后, 单段拉管的长度需要根据电缆牵引力限制进行校核, 电缆越重, 牵引时需要克服的摩擦力也越大。为避免牵引力超过电缆结构强度限额, 单段拉管长度不能太长。特别是在弯曲部分, 由于侧压力产生的额外摩擦力, 需要缩短单段拉管长度。原则上单段拉管只允许设计一个转弯。校核摩擦力不超过电缆允许牵引力的 70%, 作为控制单段长度的边界条件之一。

设计校核后应建立拉管轨迹的空间坐标,用以指导施工单位精确构造电缆管路径。



图1 拉管设计轨迹

### 1.2.3 电缆穿管牵引方案

本工程采用单端卷扬机牵引加多点配置敷缆机辅助输送的牵引方案。沿线在各段拉管之间的电缆过渡沟中布置多组滑轮支架,转弯处采用滑轮支架或托辊式支撑。大盘布置于开阔场地,并在卷扬机牵引钢丝绳上栓应力表,监控牵引力。根据每盘电缆摩擦力预测值确定牵引力和敷缆机输送力矩。

此外,本工程为保险起见,选用的电缆选用涂石墨的双层聚乙烯外护套来提高电缆耐受侧压力能力,并涂石墨降低摩擦力,最终敷设过程未发生电缆破皮现象。

### 1.2.4 敷设安装工艺创新

电缆终端、接头、接地箱及回流线等辅助设备统称为电缆附件,它们组成了电缆线路的电气系统。220 kV 电缆附件尺寸更大,采用的绝缘材料密度更高,重量更大,密封要求也更高,因而安装工艺技术要求很高。

本工程需要在迎峰度夏前完成,共敷设电缆 54 段,共计 324 盘,单盘重量在 17 至 30 吨之间,电缆中间接头 318 处,户外终端 12 只,数量多,工作量大,大部分电缆接头设置在户外电缆接头沟中,且施工期恰好是梅雨季节,空气湿度大,安装条件差。施工项目部开创性的在电缆接头沟上方搭建净化棚,配备环控设备,控制温度和湿度,在恒温充气的净化棚内完成接头制作、刮屏蔽、压接电缆芯、拉预制件、上铜壳、封铅等工序。多台班,滚动式施工,有效提高电缆接头制作质量,提高劳动效率。创造了 1 天完成 18 个电缆头制作的记录,并保证了 100% 的接头一次性成功率。如图 2 所示。

### 1.2.5 定向钻孔和三维轨迹定位

传统的拉管由拉管机直接钻孔形成,对地下管孔轨迹无严格要求。高压大截面电缆拉管要求精确设计轨迹,施工时必须克服轨迹定位难题。此外,本工程穿越大量城市交通要道,局部规划有地铁线

路、排水箱涵等,规划局要求施工结束后提供准确的地下管控轨迹坐标。



图2 净化棚内作业现场照片

针对此要求,建设管理单位对定向钻孔技术发展调研,选定美国 DCI 公司生产的月蚀精确数字定位系统作为定向钻孔的控向系统,如图 3 所示。



图3 DCL 控向系统

控向系统主要功能说明如下:

表 1 DCL 控向系统功能表(对照图 2)

功能	说明
1 倾角	控制钻进倾角度数
2 面向角	钻头板的方位,以钟面形式表示
3 钻头深度	GPS 差分计算得到的钻头高程与控制设备高程差
4 计算深度	倾角数据校验后的钻头深度
5 方向	钻头方向
6 状态	电池容量及钻头定位芯片信号强度信息

在钻孔敷设管道等工序完成后,进一步应用“惯性陀螺仪管线三维坐标”系统,结合陀螺仪导航、计算机拟合计算等技术,将管道内窥陀螺仪贯穿管道,以复测管线轨迹。采用比利时 REDUCT 公

司生产的 DR—HDD4.1 内窥式惯性陀螺仪(如图 3 所示),配合美国 Trimble GPS 卫星三维定位仪获得管线陀螺仪穿过管道准确采样坐标,再插值拟合<sup>[6]</sup>获得连续的三维轨迹。



图 4 DR—HDD4.1 内窥式惯性陀螺仪



图 5 内窥陀螺仪贯穿管道现场照片

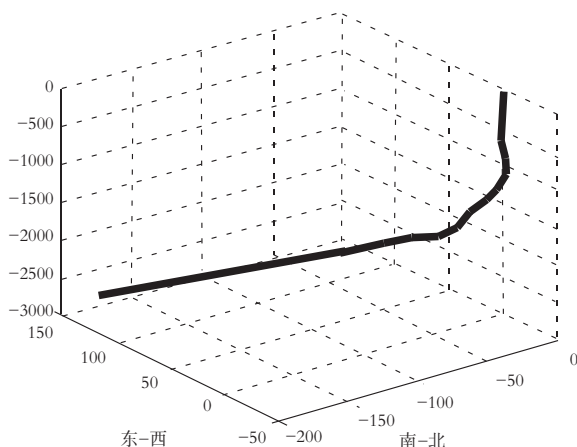


图 6 插值拟合得到的三维轨迹图

开发地下电缆管线地理信息系统(GIS-Geographic Information System),将实测管线轨迹数据可视化表达在 GIS 系统中,采用高分辨率的数字高程模型和数字正射影像<sup>[7]</sup>,提供三维和二维的同步显示和数据更新功能,提供隧道、电缆线路的断面查看功能,如图 7 所示。

在 GIS 系统支持下,运行单位能准确掌握电缆拉管位置信息,其他市政部门也可以根据管线准确位置避让 220 kV 电缆,充分满足了规划部门的要求,取得良好效果。

## 2 拉管敷设电缆的优缺点

### 2.1 拉管敷设电缆的优点

最大的优势就是避免地表施工面开挖,环境污

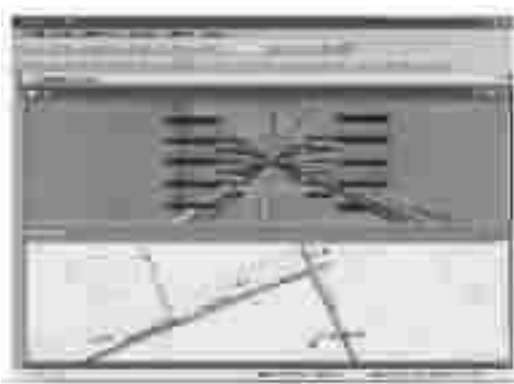


图 7 地下电缆管线 GIS 系统的三维和二维同步显示界面

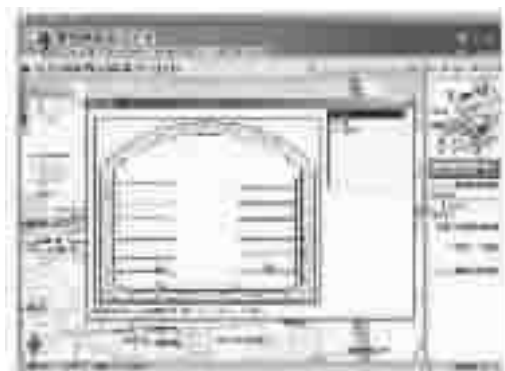


图 8 地下电缆管线 GIS 系统线路的断面查看界面

染小,交通影响小,对地层扰动破坏小,也避免其他管线保护和迁移。

其次,相对于明挖电缆隧道和电缆沟、电缆排管等土建形式,完成同等长度,同等规模的电缆土建通道,其实际工作量大幅减少,施工周期短,造价较低。

再次,拉管管孔外没有钢筋砼构筑物,管束集中,故通道占用宽度小,节约城市日趋紧张地下管廊资源。

最后,穿管主要靠拉管机穿拖管线,无人员在地下作业,施工风险低,安全性较好。

### 2.2 拉管敷设电缆的缺点

影响电缆载流量的关键因素是最高运行温度。电缆敷设于拉管中时,管孔密集,空间狭小,散热条件差,因而电缆运行温度高,载流量相应下降。经过计算,2500 mm<sup>2</sup> 电缆在普通电缆沟中敷设时的载流量为 1784 A,拉管中敷设时载流量降为为 1240 A,下降约 30%<sup>[3]</sup>。

此外,拉管管道内无法安装电缆附件,因而无法通过金属护套接线方式来控制护套环流,只能在接头沟中安装交叉互联箱及相应的过电压保护器。这对拉管敷设电缆的分段也有产生限制,削弱了电气系统设计的灵活性。

最后,拉管没有钢筋砼保护层,抵御外力破坏的能力先天不足。而且拉管深埋地下,如有破损检修

很困难。本工程中路径上方增加电缆标志及警告牌,提示下有电缆,不可开挖。

### 3 对电缆运行管理的建议

#### 3.1 加强运行监控

高压大截面电缆载流量大,敷设在拉管中,日常运行电缆发热主要通过管壁向土壤散热,长期积累,会改变土壤环境,改变地下水分布,从而导致土层力学性能变化,引起管、沟等电缆构筑物不均匀沉降。对由此引起的沉降究竟幅度,影响范围等目前尚缺乏系统研究,亦无法有效预测,故需建立长期观测机制,强化运行状态监控。今后可以考虑采用在外护套嵌入感温光缆的复合式电缆,从而构建在线监测系统,实时监控掌握电缆运行状况。本工程未采用在线监测,故在拉管两端过渡沟内设置沉降观测点,通过定期沉降观测,及时发现沟管沉降。

#### 3.2 预留检修备用管孔

对考虑到拉管深埋地下,上方往往有密集管线或者重要路口,通常不能再次开挖,一旦出现电缆故障,只能更换整根电缆。在距离较短的拉管中,可通过接收井抽出旧电缆,穿入新电缆。但在长度超过 200 m 的拉管中,抽出旧电缆很困难,而且时间往往很长,且抽出的泥浆会污染环境,在市区电缆工程中,可以在建设阶段就预留备用管孔。如果电缆损坏可在备用空中直接穿设新电缆。在日常维护中,除了维护运行电缆及其管孔外,还要确保检修备用管孔状态完好,两端严密封堵,无破损,无积

水,无沉渣。

### 4 结束语

本文立足 220 kV 某变电站送电工程实践,从管线轨迹设计,敷设方案,电气安装等角度研究了拉管敷设大截面高压电缆线路的主要技术工艺要点,并分析拉管敷设大截面高压电缆的优缺点。并着重介绍了克服拉管固有缺点的创新方法,包括三维轨迹定位和净化棚安装电缆附件两种新技术。

#### 参考文献:

- [1] GB 50217-2007, 电力工程电缆设计规范[S].
- [2] DL/T 5221-2005, 城市电力电缆线路设计技术规定[S].
- [3] 江日洪.交叉互联电缆护层过电压的分析计算[M].武汉水利电力学院出版社,1982.
- [4] 李宗延,王佩龙.电力电缆施工手册[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [5] 叶建良.非开挖铺设地下管线施工技术与实践[J].电力建设.2006.(2).
- [6] DL 620-1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [7] Boyun Guo, Robert Lee, Stefan Miska. Constant curvature Equations Improve Design of 3-D Well Trajectory [J]. Oil&GasJournal, 1993, 19(4):30233
- [8] J E Walstrom, A A Brown. An Analysis of Uncertainty in Directional Surveying[C].SPE2181, 1969.

#### 作者简介:

马耀家(1982),男,工程师,从事输变电工程设计和项目管理工  
作;  
郑 琪(1983),女,助理工程师,从事综合管理工作。

(上接第 39 页)

临的重要电能质量问题,建议国家相关部门尽快制定相关标准对电压暂降的影响进行规范和评价。

#### 参考文献:

- [1] 李 炜,李玉春,李向阳.开关短路试验对系统电压影响的仿真研究[J].华北电力大学学报,2006,33(5).
- [2] 赵 亮,张建军.电压暂降问题及一种有效治理措施[J].电气技术,2011(6).
- [3] GB/T 12325-2003 电能质量 供电电压允许偏差[S].2003.
- [4] GB 12326-2008 电能质量电压波动和闪变[S].2008.
- [5] GB 50055-2011 通用用电设备配电设计规范[S].2011
- [6] EN 50160-1999, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems[S].
- [7] IEEE std 1159-1995, Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality [S].

- [8] IEEE std 446-1995, Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications [S].
- [9] 林 焱,吴丹岳,章雪萌,等.电压暂降指标的探讨[J].电力系统保护与控制.2010,38(3).
- [10] 王 骅,张晓东,郑伟杰,等.开关试验对电力系统的影响及其仿真[J].电网技术.2011.35(12).
- [11] 陈昌鹏,王海民.大容量试验站变电所电源设计[J].电气应用.2007(2).

#### 作者简介:

朱英杰(1976),男,山东菏泽人,研究生学历,高级工程师,从事电力系统规划分析方面的研究工作;  
胡新瑞(1966),男,湖北咸宁人,本科学历,工程师,从事生产运行、输配电及用电工程工作。

# 一起电网调度自动化系统告警信息丢失故障分析和思考

郭晏,赵扬,朱红勤,嵇文路,毛小武  
(南京供电公司,江苏南京 210019)

**摘要:**针对一起 OPEN-3000 系统告警窗中告警信息丢失的故障,重点分析了造成此次故障的原因,发现了 OPEN-3000 系统告警窗各类型告警存储显示设计上存在的漏洞,并对这一漏洞进行了改进。为今后更好的维护 OPEN-3000 系统,确保各项功能的正确使用积累了宝贵经验。

**关键词:**调度自动化;告警窗;信息丢失

**中图分类号:** TM711

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)S2-0044-02

## 0 引言

调度自动化系统是电网监控员和调度员监视和控制电网的主要手段,随着今年来“区公司本部化”、“调控一体化”的开展和实施,特别是“大运行”体系建设的深入开展,对原有电网运行管理方式产生了深远的影响,工作流程和工作范围发生巨大的变化,每年新建和改扩建厂站的大幅增加,都使得对调度自动化系统的可靠性提出了更高的要求。

电力调度控制中心地区监控人员担负着南京地区 35 kV 及以上电网运行情况的监控任务,是电网的眼睛,是电网安全运行的第一道屏障。目前公司使用的调度自动化系统 OPEN-3000 系统,随着需要监控信号的成倍增加,OPEN-3000 系统中的告警窗越来越成为监控人员发现电网运行异常的重要工具和手段。本文针对一起 OPEN-3000 系统告警窗告警信息丢失的故障进行重点分析。

## 1 故障现象

2012年12月20日上午8时许,地区监控人员发现 OPEN-3000 系统监控工作站的告警窗事故跳闸信息丢失。自动化运维人员到现场查看,发现公司所有在用的 OPEN-3000 系统工作站上的告警窗内事故跳闸信息均丢失。正常告警窗如图 1 所示,故障发生时告警窗如图 2 所示。



图 1 告警窗正常情况示意图



图 2 故障发生时告警窗情况

## 2 故障分析和定位

### 2.1 故障分析

由于 OPEN-3000 工作站长期连续运行,故障首要原因可能为告警窗程序进程死机,在将告警窗进程 warn 关闭后重启,故障仍然存在。由于告警窗程序进程没有错误,则怀疑在此时间段内电网是否确实没有发生事故分闸。运维人员通过查询 OPEN-3000 系统数据库,发现此时间段内存在事故分闸告警,查询结果如图 3 所示。历史数据库中保存了动作信号,但告警窗没有,怀疑由数据库将告警信息发送到告警窗程序的消息总线存在问题。运维人员用前置模拟器在前置服务器中模拟事故分闸信号动作,发现告警窗能够正确反映,不存在问题。

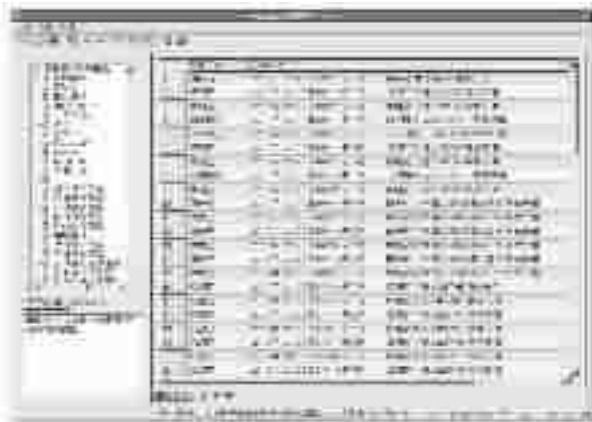


图 3 故障发生时系统事故分闸告警记录示意图

### 2.3 故障定位

重新检查告警窗内信号后,发现五类告警中,只有“异常”和“告知”两类信号。同时,这两类信号动作时间均在一小时之内,之前的信号均丢失。

OPEN3000 系统的告警窗设计为先进先出的堆栈式结构,最大容量为 10000 条记录,在堆栈内对五类告警信号不做区分。通过 OPEN-3000 告警数据库查询发现,在 20 日凌晨开始,虎踞变档位不停发生动作,怀疑现场遥信辅助接点抖动导致。在半小时内动作次数达到 80000 次左右,如图 4 所示。而告警窗设计为先进先出的堆栈式结构决定了当超过最大记录数后,原有的信息将会被后来的信息覆盖。所以,当档位抖动产生的大量重复信号把之前的事故跳闸等信息全部覆盖,造成告警窗中事故分闸告警信息无显示,而只显示作为“异常”和“告知”类型的档位动作信息。

对虎踞变档位动作信号屏蔽后,事故分闸告警信息正常在告警窗内显示,故障消除。



图 4 故障发生时虎踞变档位动作记录

### 3 故障思考

随着变电站无人值守和调控一体化的实施,地区监控成为了发现电网故障和异常的第一道关口,由于公司新建和改扩建的厂站逐年增加,需要监控人员关注的监控信号也越来越多。在调度自动化 OPEN-3000 系统中专门为监控人员监视电网异常信号设置了告警窗,对于厂站上送的告警信息分类进行显示,大大提高了监控效率。但是技术手段的提升也造成对自动化系统的依赖性,一旦告警窗出现故障,则会造成监控人员的瞬时“失明”,虽然可以通过查询数据库来发现告警信息,但是在实时性上无法保证电网安全运行对监控的要求。

OPEN-3000 系统是目前全国应用最广泛的电网调度自动化系统,经过长时间,多地域连续运行,以及厂家相关技术人员的不断完善,系统具有较

高的成熟度和可靠性。但是通过此次故障我们也应当看到,即使是成熟的系统,在某些特殊情况下仍然存在影响安全生产的漏洞和缺陷。此次事故发现的漏洞是由于告警窗结构设计的缺陷所导致的,如果不发生档位频繁动作导致事故分闸告警信息被覆盖,该漏洞很难被及时发现。因此,我们对于事关电网安全可靠运行的调度自动化系统不能有丝毫懈怠,要对系统时刻保证足够的警惕和对缺陷足够的敏感度。

目前 OPEN3000 系统有对频繁动作的信号进行屏蔽的设置,但是设置繁琐,会占用系统资源,导致系统运行和反映速度变慢。更重要的是,如何判断频繁动作的信号是由于现场采集设备故障造成的还是一次设备真实发生了频繁动作是摆在我们面前的重大难题。自动化运维人员事故后联厂家增加告警信号自动分析程序,自动对同一个动作信号进行分析。但是对告警信号处理的“防漏怕误”,即既要防止漏掉告警信号,又害怕信号是错误信号,导致通过自动分析和过滤告警信息成为两难。今后对信号的自动分析和过滤需要将监控人员的实际运行经验和厂家的技术优势相结合,随着技术的不断进步,最终解决这一难题。

为从根本上消除此次故障再次出现的可能,运维人员联系厂家改进告警窗结构设计。目前 10000 条记录对告警窗来说足够使用,没有增加的必要,只需将原来的先进先出堆栈式结构改为并行式堆栈结构,如图 5 所示,此时每一类告警信息的最大记录数均为 2000 条,这样即使有一类信号出现大量堆积,也不影响其他类型信号的显示。

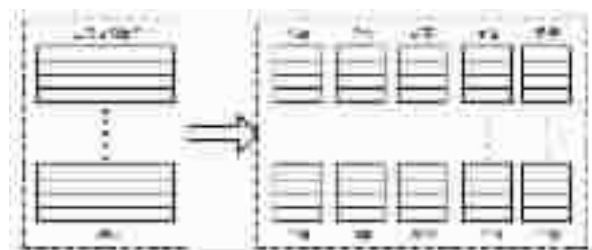


图 5 告警窗结构改进示意图

### 4 结束语

此次 OPEN-3000 系统告警窗事故分闸告警信息丢失故障是由于系统结构设计缺陷造成的,通过此次故障的分析,发现和弥补了 OPEN3000 系统一个在特定条件下出现的系统的漏洞,有效提高了调度自动化系统运行的可靠水平。

随着监控在电网运行中重要性的加大,OPEN-3000 系统中告警窗的可靠性和正确性被赋

(下转第 49 页)

# 变电站辅助设备监控集成技术研究与应用

司小庆,陈冰冰,廖英祺  
(南京供电公司,江苏南京 210019)

**摘要:**对目前现有变电站辅助设备监控方式的不足,本文开展了变电站辅助设备监控集成技术研究,详细论述了变电站辅助设备监控系统的构成和架构体系、各模块的功能和集成运行方式,解决了变电站辅助设备集约融合问题,统一规范了各设备的通讯接口,实现了辅助设备的数据采集、存储、预处理、后台同步、远程服务等功能,达到了缺陷及时发现、快速处理的目的。最后展示了系统在南京地区的应用情况。

**关键词:**变电站;辅助设备监控;集成;多线程;负载均衡

**中图分类号:** TM64

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)S2-0046-04

## 0 引言

变电站设备状态和信息的正常监测对电网稳定运行至关重要,直接关系到向用户供电的安全可靠[1]。目前江苏电网变电站辅助设备监控的运行方式主要有两种:一是变电站拥有独立的远程监测系统,实现对变电设备的远程监视和巡检;二是在站内实现就地监控,通过定期人工巡检方式查看和收集相关信息。两种方式存在如下不足:一是不能满足设备集约融合和统一管理的要求;二是不能满足设备缺陷及时发现和快速处理的要求;三是不能满足设备通讯接口统一规范的要求;四是不能满足企业提高效益的要求。

针对上述监控方式的不足,本文开展了变电站辅助设备监控集成技术研究,采用 hessian、多线程技术和 Quartz 任务调度框架,实现变电站辅助设备的运行状况、状态参数、告警信息等的集中监控。同时通过本系统的建设,统一管理变电站各种设备的状态和数据,便于运行人员、检修人员、管理人员等对辅助设备的集中综合监视和管理,便于保持数据完整和系统化,适应当前电网的发展方向和需求[2]。

## 1 系统监控对象

变电站辅助设备监控系统的监控对象包括4大类,分别为一次设备类、环境安防类、电能质量类和公用设备类。根据目前实施的实际情况,具体包括SF6、蓄电池、直流系统、油色谱、避雷器、门禁、火灾报警和温湿度等。

## 2 系统构成

系统主要包括省公司主站系统、变电站智能终端和变电站辅助装置。

系统总体运行流程为:通过主站系统统一维护各变电站的数据,集中调度系统把从各变电站采集到的数据集中汇总,通过分布式、集群式数据处理,实现采集数据和告警信息上传、分析等功能。具体架构如图1所示[3]。

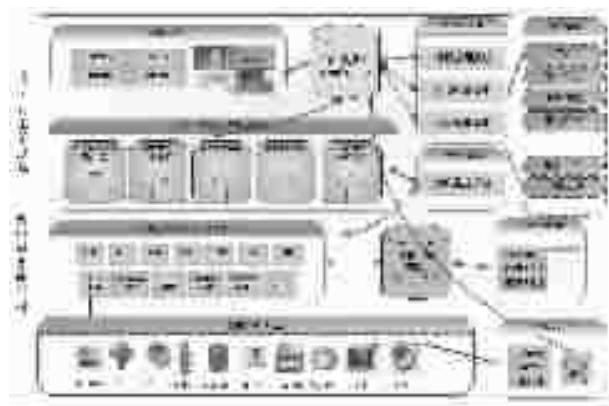


图1 变电站辅助监控系统结构

### 2.1 主站系统

主站系统部署为集中 web 应用服务器、集中统一调度任务集群服务器和集中数据库服务器,汇总和处理所有地市下属所有变电站的监测信息,保存汇总信息和结论性数据,通过电力信息内网和变电站智能终端进行交互。

### 2.2 变电站智能终端

每个变电站配备一台变电站智能终端,变电站终端采用无风扇工业控制机,通过串口(RS485/232)和网络口与现场的设备连接,负责变电站所有需要采集的辅助监控设备的信息采集,规约解析,数据过滤,告警计算,变频采集,同时提供数据缓存和存储。并且在智能终端提供应用查看实时状态和告警以及3个月的历史状态和告警数据。且智能终端提供对外的透传接口,提供省集中平台进行透传采集分析。

### 2.3 外部系统

实现与多个外部系统连接,包括 PMS 生产管理系统,省公司统一平台,电能质量监测系统,短信平台,邮件平台,专家系统等。

## 2.4 配置调试工具

该工具系统支持远程连接集中数据库或者本地文件数据库,使系统运行更稳定,维护、实施更简单。

## 3 系统架构

### 3.1 主站系统

#### 3.1.1 主站系统应用架构

主站系统共包括了 5 个应用系统

**集中展示系统:**以丰富的图表来展示辅助监控系统中宏观数据量,从接入统计(变电站,装置)、全景告警(多视角,全方位)、厂家装置告警分析、高压变电站实时数据展示等方面进行系统的数据展现。  
**集中 WEB 应用:**从运行人员,检修人员,专责,领导等多种角色进行个性画面设计,组织不同的角色所关心的数据以易用简洁的画面进行运行监测,检修处理和报表分析管理。

**集中运维监控系统:**用于监控集中调度服务集群和 3000 多个智能终端设备的 CPU,内存以及各个线程的内存和运行健康状况。可以对线程进行停止/启动控制;智能终端服务的停止/启动控制。

**智能终端应用:**在智能终端同省平台断网后,支持实时数据和历史数据(3 个月)的查询展示功能。

**配置调试工具:**提供易用配置工具,进行设备规约及规则的配置,方便实施人员在现场进行设备调试。为大量应用变电站智能终端上线的一个利器<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.2 主站调度服务集群架构

主站调度服务集群包括资源分配服务系统及集中调度服务系统。主站调度服务集群架构如图 2 所示。

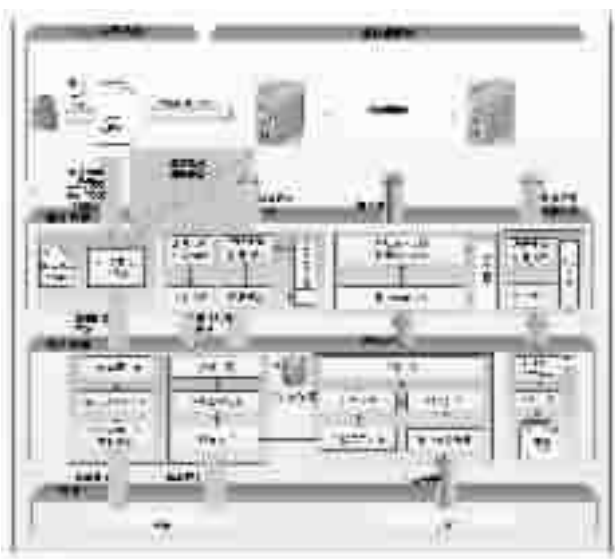


图 2 主站调度服务集群架构

资源分配服务系统能够均衡分配集中调度与智能终端的对应关系,使集中调度服务器均衡发挥数据处理能力,使整个系统达到资源最优分配。集中调度服务系统设计将采用面向对象的设计方法,功能划分采用模块化设计方式,功能实现采用分层原则,各层间通过由内部接口完成数据交互。

集中调度服务系统为了达到持续高效的完成各类任务,采用了并发处理技术,让每个采集任务能够同时独立而不被打扰地在系统框架中执行,保证整个采集系统中的各个功能能够独立高效有序的运行。为了让每个采集任务专心于它们自己的核心工作,汇集到的数据会被放入队列中由其它公共服务来处理,从而提高采集系统的整体运行效率<sup>[5]</sup>。

### 3.2 智能终端架构

智能终端采集架构系统设计采用面向对象的设计方法,功能划分采用模块化设计方式,功能实现采用分层原则,各层之间通过由内部接口完成数据交互。

在智能终端采集处理的总体架构包括两个部分,一个是设备 ADP 的,一个是对外的接口服务。设备 ADP 对应多个线程,一个设备的一条规约对应一个线程。如果是 MODBUS 的,包括功能有接收透传指令,并发送到装置,将结果返回给透传服务;接收任务指令,发送至装置,将返回结果解析进行过滤等处理,将状态和告警存储数据库并调用上报服务。如果是 CDT,接收装置报文,解析过滤等处理后,将状态和告警存储数据库并调用上报服务。

**基础数据下发服务:**接收来自集中平台的配置数据,并存储到本地数据库,将规约等刷新到内存中。  
**历史状态汇集服务(轮询汇集):**接收来自集中调度的任务调用,准备好数据进行汇集。

**历史状态汇集服务(断网后接通):**断网后智能终端将历史数据单独生成 SQL 文件备份存储本地,用于接通后 ftp 到主站服务处理。这样保证了大数据传输的性能和稳定性。  
**终端监测服务:**是基于 JMX 技术,供集中运维监控系统调用,对本智能终端运行状况以及各个 ADP 线程进行监控。

**对时服务:**接受来自主站的对时调用,调用本地操作系统指令,修改系统时间。录波变频采集将采用 java 的队列缓存告警前状态数据,保证其占用内存固定不产生内存溢出。其具体采集处理结构如图 3 所示。

## 4 多线程采集和均衡服务原理

### 4.1 多线程采集服务

系统采用了多线程任务调度采集框架,系统可

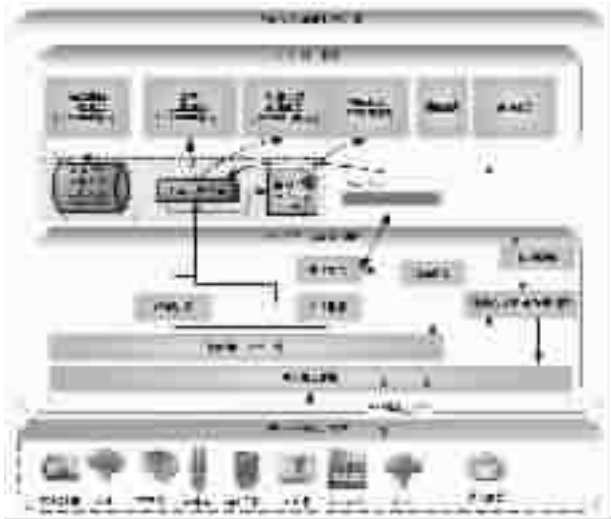


图3 智能终端采集处理结构图

以动态的接入多个二次设备,并对各个设备进行多通道数据采集。可对每个采集任务进行动态配置处理流程和处理顺序。

采集服务可以根据用户的需求接入二次设备,以热插拔的形式对设备信息进行采集,无需修改采集服务代码,减少采集服务程序包的更新次数。

数据处理流程通过采集服务注入到处理流程中,各个处理模块之间通过全局变量来传递数据,各处理模块之间没有必然的联系,这样添加自定义处理模块不会影响到其他处理模块的执行。数据处理流程自定义如图4所示。

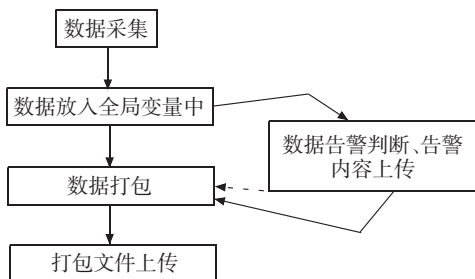


图4 数据处理流程自定义

根据设备数据采集的不同需求,采集不同的信息,比如系统可以以不同的采集频率对温湿度传感器进行温度和湿度的采集,也可以用同一种频率对温度和湿度进行组合采集。大大减少了采集服务的资源消耗,提高了采集服务的灵活性。

#### 4.2 负载均衡服务

由于目前现有网络的各个核心部分随着业务量的提高,访问量和数据流量的快速增长,其处理能力和计算强度也相应地增大,使得单一的服务器设备根本无法承担。在此情况下,如果扔掉现有设备去做大量的硬件升级,这样将造成现有资源的浪费,而且如果再面临下一次业务量的提升时,这又将导致再一次硬件升级的高额成本投入,甚至性能

再卓越的设备也不能满足当前业务量增长的需求。

负载均衡,其意思就是将负载进行平衡、分摊到多个操作单元上进行执行,例如 Web 服务器、FTP 服务器、企业关键应用服务器和其它关键任务服务器等,从而共同完成工作任务。

负载均衡有两方面的含义:首先,单个重负载的运算分摊到多台节点设备上做并行处理,每个节点设备处理结束后,将结果汇总,返回给用户,系统处理能力得到大幅度提高,这就是我们常说的集群技术。第二层含义就是:大量的并发访问或数据流量分摊到多台节点设备上分别处理,减少用户等待响应的的时间,这主要针对 Web 服务器、FTP 服务器、企业关键应用服务器等网络应用<sup>[6]</sup>。

### 5 系统应用

系统在南京地区石门坎变等 10 座 110 kV 变电站实现了部署和接入运行,具备变电站辅助设备监控数据采集、存储、预处理、后台同步、远程服务等各项功能,分别为运行、检修和专家人员提供了便利。

为运行人员提供实时的、直观的、全面的告警和故障信息。



图5 变电站辅助监控系统

为检修人员提供及时定位和判断设备缺陷和故障的技术手段。



图6 设备缺陷和故障显示

为行业专家提供远程诊断手段和专业分析工具。



图7 变电站设备在线监测

## 6 结束语

本文对变电站辅助设备监控集成技术开展了研究,重点论述了监控系统的构成和构架内容,并在南京地区实现了10套系统的部署和应用。有效地提升变电设备监测水平,为在线诊断和远程分析

提供了便利。

### 参考文献:

- [1] 耿建. 变电站综合监控系统的设计与实现[D]. 山东大学, 2011.
- [2] 张喜铭. 远程方式维护变电站监控系统研究与实现[J]. 广东电力, 2011(06):72-74.
- [3] 蔡婷婷, 王宇航, 王岩. 变电站监控系统数据采样方式分析[J]. 中国新技术新产品, 2012(24):134-135.
- [4] 曹志辉, 黄红远, 车磊. 一种基于调度数据网的变电站监控系统远程维护方案[J]. 电气应用, 2013(01):30-32.
- [5] 杨庆华, 袁海文. 基于C8051F043的变电站监控系统通信模块的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2011(05):108-111.
- [6] 张晓光. 变电站监控系统设计方案[J]. 上海电力学院学报, 2012(05):406-408, 442.

### 作者简介:

司小庆(1977),男,南京人,工程师,研究方向电气工程;  
陈冰冰(1983),男,江苏盐城人,工程师,研究方向电气工程;  
廖英祺(1980),男,黑龙江鹤岗人,工程师,研究方向电气工程。

(上接第45页)

予了更高的要求。自动化运维人员在保证厂站上送的遥测和遥信信息的准确性的同时,更需要对其中告警信号的准确性和及时性多加关注。同时对于成熟的系统时刻保持对缺陷的敏感度,及时发现系统漏洞,为调度员、监控员等系统使用者提供更坚实的技术支持,保障电网的安全稳定运行。

### 参考文献:

- [1] 张永健. 电网监控与调度自动化[M]. 北京:中国电力出版社, 2010.
- [2] 国电南瑞股份有限公司.OPEN-3000平台使用手册[R]. 2011.
- [3] 江苏省电力公司. 江苏电网调度二次系统安全工作管理规

定(自动化部分)[R]. 2012.

### 作者简介:

郭晏(1984),男,工程师,从事电网调度自动化系统运维工作;  
赵扬(1981),男,工程师,从事电网调度自动化系统运维工作;  
朱红勤(1981),女,高级工程师,从事电网调度自动化系统运维工作;  
嵇文路(1974),男,高级工程师,从事电网调度自动化系统运维工作;  
毛小武(1968),男,高级工程师,从事电网调度自动化系统运维工作。

## 220 kV 宁海路变电站进线工程取得重大突破

2014年11月13日,220 kV 宁海路变电站进线电缆盾构施工在水下14 m成功穿越秦淮河,取得重大突破。

据悉,220 kV 宁海路变电站进线工程从220 kV 莫愁变电站出,沿清凉门大街、江东路、汉江路、秦淮河、国防园、清凉山公园、虎踞关路、汉口西路、上海路至220 kV 宁海路变电站,全长4887 m。工程沿途地质条件复杂,作业环境恶劣。

今年9月25日,江苏省电力公司副总经理兼公司总经理李作锋深入盾构现场实地查看了工程建设情况,并强调,要充分认识到该工程对于主城区电网平稳运行的重要性和紧迫性,要在保证工程质量和安全生产的基础上确保明年迎峰度夏前建成投运。

南京供电公司周密部署,各部门通力合作。盾构过河之前,公司建设部、安全监察质量部牵头组织施工各方,全方位演练过河涉及的应急方案,并对过河物资、机械进行了全面梳理检查,确保一次性顺利过河,媒体业务室也提前做好舆情的关注,并与驻宁主流媒体做好沟通,营销部、配电运检室也对施工用电进行了拉网式排查,确保施工用电安全可靠。

据了解,220 kV 宁海路变电站进线工程除了穿越秦淮河、国防园、清凉山公园至虎踞关的1310 m段正在采用盾构工艺施工外,其余工程均已完工。盾构段共分1058环,截止目前,盾构掘进已完成169环。11月11日,南京供电公司还创造了日盾进11环的南京电网建设新纪录。

摘自《江苏电力信息网》

# 两起电容器串抗故障的分析

王 骏,陈冰冰

(南京供电公司,江苏 南京 210019)

**摘要:**串联电抗器是并联电容器装置的重要组成部分,本文针对两起并联电容器组串联电抗器故障进行了详细的分析,阐述了串联电抗器的作用及选用原则,最后提出了不同谐波背景下串联电抗器的配置建议。

**关键词:**并联电容器组;串联电抗器;串抗率;谐波

中图分类号:TM53;TM772

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0050-04

## 0 引言

串联电抗器是并联电容器装置的重要组成部分,其作用是限制电容器组合闸涌流并抑制电力谐波,防止电容器对电网谐波的放大和发生谐振等。补偿用并联电容器对谐波电压最为敏感,由于电容器容抗和频率成反比,高次谐波在电容器中形成高于工频的谐波容抗通道。谐波电压加速电容起老化,缩短使用寿命;谐波电流将使电容器过负荷出现不允许的温升,特别严重的是当电容器组与系统产生并联谐振时电流急速增加,导致电容器组因谐波电流而过热损坏。为避免并联谐振的发生,电容器串联电抗器。电抗率按背景谐波次数选取,电网的背景谐波为5次及以上时,宜选取4.5%~6%;电网的背景谐波为3次及以上时,宜选取12%。

## 1 汤山变 #2 电容器串抗故障情况

汤山变 #2 电容器串抗为昆山市特种变压器制造有限公司 2007 年 9 月产品,型号为 CKSC-108/10,额定容量 108 kV·A,额定电抗 2.27 Ω,电抗率 4.5%。



图 1 汤山变 #2 电容器串抗故障示意图

### 1.1 故障经过

8月17日16时20分,110 kV 汤山变 #2 电容

器 205 开关跳闸,零序过压 II 保护动作。

保护装置报文为:8/17 15:38:05:098 零序过压 II 动作 3U0=140.58 V。

经现场检查故障设备发现,#2 电容器调节组的串联电抗器烧毁,但电容器组本体及熔丝等设备无损坏。

### 1.2 故障分析及处理

从电抗器的选型来看,该电抗器的作用为抑制谐波,并且针对谐波次数最低为5次。设备厂家昆山市特种变压器制造有限公司相关技术人员现场分析认为调谐电抗器的选型应根据电容器装置接入处的实际背景谐波进行选择,并提出该电容器组4.5%的电抗率选择不合理,建议测量该变电站实际背景谐波。

通过汤山变 #2 主变变三侧 102 计量回路上设置电能质量测试仪,测量 10 kVII 段母线电能质量数据,数据显示均为合格。

表 1 汤山变电能质量统计报表(电压)

表 2 汤山变电能质量统计报表(电流)

表 3 汤山变电能质量统计报表(功率)

表 4 汤山变电能质量统计报表(通过率)

根据上述测量的数据显示,汤山变电能质量较好,并无明显的谐波污染,可以推断电抗器烧毁故障应与谐振无关,且由于故障现象表征为串抗烧毁,但电容器组并无损坏,若串抗选择有误,导致谐波放大,则电容器组亦应有过热损坏痕迹,故综合考虑本次电抗器烧毁故障为设备老化引起,电抗率选择4.5%没有问题。但根据国网公司最新标准,结合本次故障抢修更换,将电抗率更换为5%,同样抑制5次背景谐波,更换后目前设备运行状况良好。

## 2 山江变电容器组故障情况

6月20日、27日、29日220kV山江变#2、#1电容器组先后出现三起故障。该两组电容器组为苏州市胜天特种电器有限公司生产,型号为TBB10-6000/200-AY,2008年9月28日投运。电容器主接线图见图2。

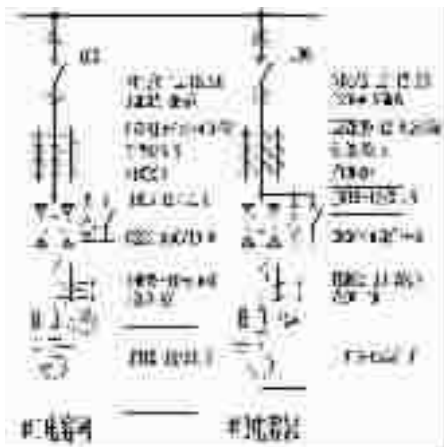


图 2 山江变电容器组电气主接线图

### 2.1 故障前运行方式

事故前山江变为单主变运行,主变运行正常,

110kV母线和10kV母线运行正常。10kV母联断开,10kV线路正常运行。

### 2.2 第一次故障经过

6月20日13时07分,监控后台报#2电容器106过流I段保护动作,事故总动作。保护动作情况记录:#2电容器过流I段保护动作,事故总动作,故障相为C相,电流为736.68A。

经检查故障设备发现#2电容器C相桩头连接电容器组处烧熔脱落(见图3),电容器进线隔离刀闸B、C两相烧熔,B、C两相2只避雷器外表面有贯穿的放电痕迹,避雷器旁的放电PT二次小线部分烧熔。电容器组共17组熔丝熔断,电容器柜门发黑,#2电容器其他一次设备外观检查正常。



图 3 山江变 #2 电容器故障示意图

故障录波显示:在录波开始,母线C相电压(二次)均150V左右(正常应为57V),电流波形显示电流较小,A相最大值2.64A,B相最大值12.26A,C相最大值17.71A,但有畸变。二个周波时A、C相电压消失,A、C相电流随之变大,B相四个周波时电压消失,B相电流随之变大。电流最大154A(二次),一次为18480A,10个周波左右发出跳闸脉冲,见图4。



图 4 山江变 #2 电容器故障录波图

### 2.3 第二次故障情况

6月27日10时16分,山江变#1电容器105电压不平衡动作。经查为#1电容器C相铝排与电容器组引线熔断。

故障录波显示:在录波开始,母线电压偏高,A、B、C三相均85V左右,正常应57V,电流波形有畸变。8个周波时,C相电压减小(最大值15V左右)后,A、B两相电压进一步升高至140-150V左右,相当于有三倍左右的过电压,故障电流A、B相为6-7A(二次)左右,C相比较最大12.7A(二次)左右,一次1524A。

保护2个周波启动,10个周波左右发出跳闸脉冲,13个周波故障电流消,见图5。



图5 山江变#1电容器故障示意图

### 2.4 第三次故障情况

6月29日14时54分,山江变#2电容器106开关送电过程中,投运瞬间即跳闸,电流I段动作,电缆沟冒出白烟。初步检查为两相电缆爆开,电容器组外表检查无问题。

### 2.5 故障分析及处理

根据以上三次事故现象,从前两次故障录波图可以看出系统存在过电压,且两次均达到三倍左右的过电压。同时系统存在一定的谐波,省电科院7月18日完成了对该10kV母线电能质量状况的现场测试工作,现场测试期间,电容器组退出,测试结果未发现电能质量指标超标异常现象;10kV母线装有电能质量在线监测装置,通过在线监测数据发现,6月份10kV供电母线基波电流出现四次由190A突变到630A的现象,此时3次谐波电流由1A放大至16A的异常现象,7月份电容器组退出后未出现此类现象。

基于现场测试的谐波基础数据,以及线路和设备的部分参数,对电抗率按6%和12%配置时对谐波影响进行了仿真。仿真软件为ETAP7.5.2。

表1为主变10kV侧谐波电流仿真结果比较。仿真参数为一组电容器总容量为6000KVAR,串联

电抗容量为360KVAR,电抗率6%,仿真参数按实际参数设置。由表5可见。

表5 主变10kV侧谐波电流仿真比较结果

谐波次数	实测结果(A) (电容器组退出)	仿真结果(A) (电容器组退出)	仿真结果(A)	
			电抗率按6% 配置情况下	电抗率按12%配 置情况下
2	0.24	0.3	0.3	0.3
3	2.11	2.3	13.5	0.4
4	0.14	0.1	0.0	0.1
5	4.92	5.4	2.1	3.9
6	0.08	0.1	0.0	0.1
7	3.39	3.7	2.1	2.8
8	0.09	0.1	0.1	0.1
9	0.51	0.6	0.3	0.4
10	0.08	0.1	0.1	0.1
11	3.23	3.5	2.2	2.8
12	0.08	0.1	0.0	0.1
13	2.12	2.3	1.5	1.8
14	0.09	0.1	0.1	0.1
15	0.31	0.3	0.2	0.3
17	0.85	0.9	0.6	0.7
19	1.15	1.3	0.8	1.0
23	0.73	0.8	0.5	0.6
25	0.63	0.7	0.4	0.5

在电容器组退出情况下,仿真结果与实测结果基本一致。

电抗率按6%配置时,3次谐波电流放大。

电抗率按12%配置时,未出现谐波放大现象。

图6—图8分别为电容器组退出情况下、电抗率按6%和12%配置时谐波阻抗变化情况,可见电抗率按6%配置时3次谐波放大较明显。



图6 电容器组退出时谐波阻抗特性



图7 电抗率按6%配置时谐波阻抗特性

基于实测谐波背景参数,以及提供的线路和设备参数,仿真结论为:

在一组电容器投运时,电抗率按6%配置,3次



图 8 电抗率按 12%配置时谐波阻抗特性

谐波电流放大;电抗率按 12%配置,未发生谐波放大现象。

### 3 电抗率的选择

串联电抗器的大小应视电容器安装处母线的谐波状况而定。

系统中谐波很少,只是限制合闸涌流时选择 0.5%~1%即可满足要求,但它对 5 次谐波电流放大严重,对 3 次谐波放大轻微,故一般选用电抗率为 4.5%~6%。

系统中谐波不可忽视时,应查明背景谐波含量,再合理确定电抗率。电抗率的配置应使电容器接入处谐波阻抗呈感性。

在电容器电抗器串联回路中,电抗器的感抗  $X_{Ln}$  与谐波次数成正比,电容器的容抗  $X_{Cn}$  与谐波次数成反比。为了抑制 5 次及以上谐波,则要使 5 次及以上串联回路的谐振次数小于 5 次,这样,对于 5 次及以上谐波,电容电抗器串联回路呈感性,消除了并联谐振的产生条件,对于基波,电容器电抗器串联回路呈容性,保持无功补偿作用。如电容器电抗器串联回路在  $N$  次谐波谐振,则:

$$nX_{Ln} = \frac{X_{Cn}}{n} \quad n = \sqrt{\frac{X_{Cn}}{X_{Ln}}}$$

式中, $n$  为谐振频率; $X_{Ln}$  为电抗器感抗; $X_{Cn}$  为电容器容抗; $\frac{X_{Cn}}{X_{Ln}}$  为电抗率的倒数。

不同的电抗率对应不同的谐振次数或不同的谐振频率,如表 6 所示。

背景谐波为 5 次及以上时,应配置电抗率为 4.5%~6%。通常 5 次谐波最大,7 次谐波次之,3 次谐波较小。配置 6%的电抗器抑制 5 次谐波效果较好,但明显的放大 3 次谐波,且谐振点 204 Hz,与 5 次谐波的频率 250 Hz 相比裕度较大。配置 4.5%的

表 6 电抗率对应谐振频率表

电抗率	谐波次数	谐波频率 Hz
4.5%	4.71	235.5
5%	4.47	223.5
5.5%	4.26	213
6%	4.08	204
12%	2.89	144.5

电抗器对 3 次谐波轻微放大,且谐振点 235 Hz 与 5 次谐波频率接近,因此可抑制 5 次及以上谐波同时又兼顾减小对 3 次谐波的放大。

目前国网公司要求 5 次及以上背景谐波下选择电抗率为 5%,3 次及以上背景谐波下选择电抗器为 12%。

### 4 结束语

国标 GB\_50227-2008《并联电容器装置设计规范》规定电抗率的选取:用于抑制谐波,当背景谐波为 5 次及以上时,电抗率宜取 4.5%-5%;当谐波为 3 次及以上时,电抗率宜取 12%,亦可采用 4.5%-5%与 12%两种电抗率混装方式。

理论与实践研究:在电容器组中串联电抗器,在某个电容量和某个短路容量下,对某次谐波可能引起串、并联谐波或谐波放大。为抑制 5 次及以上谐波,在电容器组中串电抗率为 4.5%-6%的电抗,可能对 3 次谐波电流引起并联谐振或谐波放大;为抑制 3 次及以上谐波,电抗率应大于  $(\frac{1}{3})^2 = 0.1111$ ,取 12%。

对于电抗率的选取视安装点的具体情况确定,并需根据电容器组容量、母线短路容量、背景谐波进行校核。

#### 参考文献:

- [1] 俞永杰. 串联电抗器的谐波抑制与电抗率选择[J]. 电气应用. 2005(3).
- [2] 胡晓,张化良,钟山. 国家电网公司 110—500 kV 变电站电容器典型规范的编制和应用[J]. 电力设备. 2007(6).
- [3] 王志洁,季美红. 低压并联电容器装置中串联电抗器的选用[J]. 电工电气. 2009(8).

#### 作者简介:

王 毅(1982),女,南京人,助理工程师,从事物流工作;  
陈冰冰(1981),男,南京人,工程师,从事设备检修工作。

努力超越 追求卓越

## 智能配电网超短期运行优化需求探讨

王 勇<sup>1</sup>, 余 昆<sup>2</sup>, 罗 兴<sup>1</sup>

(1.南京供电公司,江苏 南京 210019;2.河海大学,江苏 南京 211100)

**摘要:**配电网与负荷直接相连,各负荷的用电性质相对单一且负荷容量较小,受生产和生活规律的影响,负荷点的功率变化波动性较大。为了平滑智能配电网的负荷曲线,尤其是在负荷高峰期间,需要对运行方式进行优化,实现短时间内的能量平衡,对故障、缺陷处理和重要用户的保电进行优化。通过对典型区域的分析,表明运行方式优化的可行性。

**关键词:**智能配电网;实时运行方式;需求分析

**中图分类号:**TM76

**文献标识码:**B

**文章编号:**1009-0665(2014)S2-0054-03

智能电网是世界电力工业未来的发展方向<sup>[1-2]</sup>,虽然电网结构、运行模式等因素各异造成各国智能电网建设的重点不同,但各国电网都具有数字化、信息化、自动化、互动化和智能化等发展趋势<sup>[3-6]</sup>。智能配电网中存在多种不确定因素和扰动源,为了平滑智能配电网的负荷曲线,需要协调分布式电源、储能装置和负荷之间的状态。

本文从正常运行时的能量扰动、故障缺陷等紧急情况以及重要负荷保电等特殊情况出发,分析超短期调度阶段智能配电网运行方式优化的需求,为调度提供决策依据。

## 1 智能配电网中超短期能量平滑需求

相对与传统配电网来说,风力发电、太阳能光伏发电和电动汽车充放电负荷等都是一种新的扰动源,具有很大的不确定性。当风速在切入与额定风速之间时,发电机的出力近似与风速成线性关系,但于风速的变化没有明显的规律,因此风力发电机的输出功率随着时间的变化具有很强的随机性,甚至可能中断,即具有间歇性。对于太阳能光伏发电来说,日照强度和温度会影响其输出特性,光伏发电机的出力近似与光照强度成正比,虽然每天的光照强度变化遵循一定的规律,但各时刻的值却变化无常,也就是说实际日照强度都是在规律变化基础上叠加一定的随机变化量,因此太阳能光伏发电同时具有一定的规律性和随机性。

目前,虽然分布式电源等新型元素在配电网中所占比例较小,但是各种常规的负荷也会随时间波动,如图1所示,是某馈线所有配变的负荷情况。

经过计算,该日的峰谷差率为80.85%,平均负荷率为30.09%,最小负荷率为19.15%。最大负荷

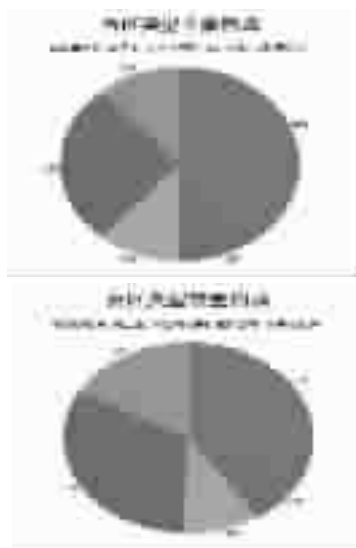


图1 某馈线台区负荷类型构成

出现时刻为11:10,最小负荷出现时刻为5:30。结合南京青奥智能配电网示范区、新街口地区等多个区域的负荷分析可知:

- (1) 配变负荷的波动性和随机性较大;
- (2) 尽管在同一条馈线中,不同类型配变负荷曲线变化规律差异非常大;
- (3) 馈线和配变负荷的峰谷差均较大;
- (4) 同一馈线的负荷具有一定的互补性,整条馈线的负荷波动性和随机性变小;
- (5) 尽管馈线的负荷变化波动性变小,但也存在短时间出现高峰负荷的现象,如晚上20点到21点期间具有持续的高峰负荷。

总之,在智能配电网中存在多种扰动源,使得配电网的功率急剧波动,分布式电源出力存在间歇性变化。这些随机变化在任何时间段都可能发生,因此加大了负荷的峰谷差,在高峰负荷期间可能造成过负荷。为了保证智能配电网的安全可靠供电,需要针对超短期可能出现的分布式电源出力扰动、多样性负荷扰动,利用智能配电网内可控分布式电源

和储能装置进行配合,实现超短期的能量平衡和一定程度的削峰填谷。



图2 某馈线的负荷曲线

## 2 智能配电网中特殊运行情况优化需求

故障检测、隔离和供电恢复是配电网自动化的一项重要任务,运行缺陷是引发故障的安全隐患,为防止缺陷升级演变为故障需要进行消缺处理,部分消缺工作需要制定负荷转移与停电安排。对于重要的负荷需要制定保电方案,全力保障其安全可靠供电。

### 2.1 故障与缺陷的处理

随着社会、经济的发展,用户对供电安全可靠供电的要求也越来越高,首先需要减少配电网中故障的发生,其次在故障发生后,要快速、准确找出故障位置,迅速排除故障,确保电网安全正常运行,将损失减到最小。因此,针对复杂的配电网络进行快速故障定位尤其重要,然后当发生故障时,往往会产生大量的报警信号,给调度人员快速准确定位和识别故障造成一定的干扰,一般故障隔离的方案偏保守。如图3所示,首先获得的故障范围可能是虚框的范围,扩大了故障区域,将影响健全区域的供



图3 馈线联络示意图

电恢复。

传统配电网属于单电源系统,进行故障与消缺处理时相对简单,主要是通过馈线联体系之间进行负荷转供来保证健全区域的持续供电。但配电网中有1/3以上的馈线之间具有多点联通关系,即存在多种负荷供电的方式,不同的负荷转供对经济性和用户供电可靠性的影响具有差异,所以需要健全区域的供电方案进行优化。

如图4所示的三条馈线联络,如果馈线B的供电半径短、负荷轻,馈线C的供电半径较长,同时负荷较重,那么馈线A下游负荷如果由馈线B转供所产生的网络损耗要比由馈线C转供时小,因此两种可供选择的方案中应选择馈线B进行转供。

### 2.2 重要负荷保电处理

重要用户往往由双电源进行供电,如图5的(a)所示。馈线中的双电源用户要求两路电源来自不同母线,当馈线A发生故障时,该用户部分负荷将失去电源,此时需要进行负荷转供。若由馈线B转供馈线A的失电负荷,虽然双电源用户的双路供电可以得到满足,但是两路电源均来自于同一母线,不满足双电源的要求,但如果由馈线C转供,则可保证双电源来自不同变电站的两条母线,不仅保障了真正的双电源,同时供电的可靠性更高。

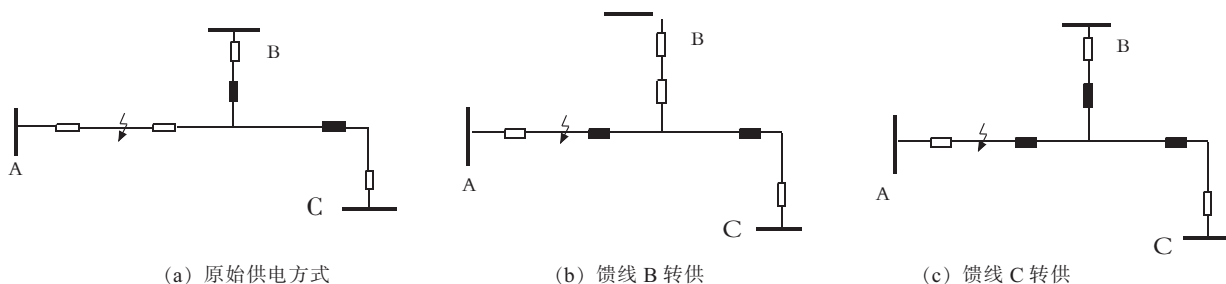


图4 不同转供方案的比较

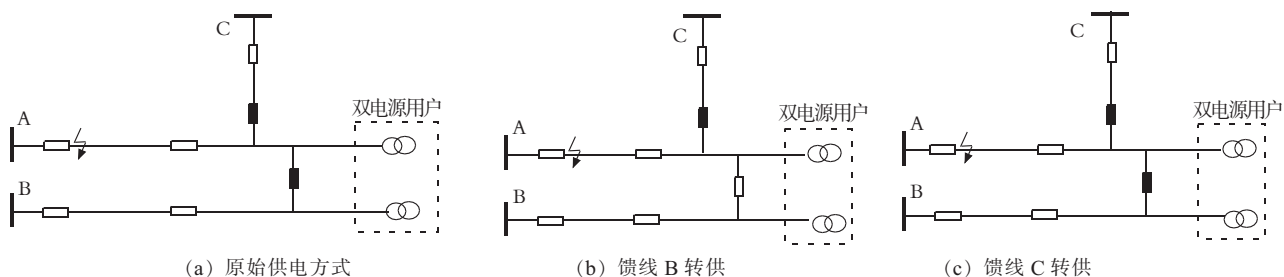


图5 重要负荷保电方案比较

从上面的分析可看出,采用不同的网络运行方式进行负荷转供时需要考虑供电可靠性的要求,在非紧急处理时还要考虑经济性。除常规负荷与网络之间联系外,在智能配电网中,还存在各种分布式电源、储能装置,以及电动汽车充放电设施等,在保电处理时需要考虑这些元件的有效利用。

### 3 运行优化仿真分析

结合配电网的特点和上述分析的超短期优化需求,本文运用粒子群算法对运行方式进行优化。采用粒子的每一维代表一个支路组,其取值为非负数。用0代表支路组没有断开,即支路组中所有支路均处于闭合状态,用正整数1表示支路组中第1条支路处于断开状态,显然,1不大于该支路组中的支路数。这样每个支路组中最多只能有一个支路断开,巧妙避免了一个支路组中断开两条及以上支路产生无效的粒子,且与用二进制编码中0和1表示每一条支路状态的编码方法相比,大大降低了维数,提高了搜索效率。

为方便分析,本文对富城变的鸿达线所在连通系进行简化,等效为如图6所示的结构,形成4条馈线、26个拓扑节点及23个分段开关和4个联络开关的结构,总负荷为16581 kW+j8014 kvar。

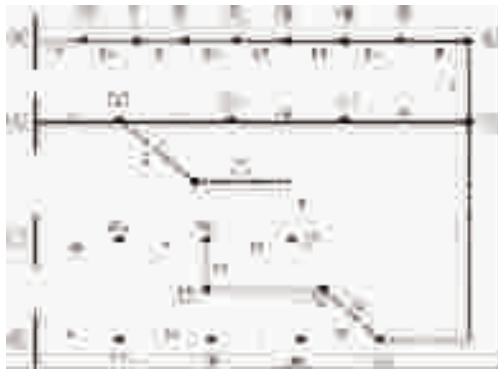


图6 26节点算例等效结构图

由于故障后的处理、缺陷停电处理以及重要用户保电都属于短时间的供电方案优化问题,因此以

下仅以供电恢复进行分析。分别假设在8、15、1三处发生故障,在不考虑分布式电源和负荷因素情况下,恢复供电的方案如表1所示。

表1 恢复供电方案

故障	失电负荷 /kW	需动作开关	开关操作次数	未恢复的线路	备注
1	0	5-11	3	0	完全恢复
		16-13			
		11-12			
2	3879.9	17-6	2	16	部分恢复
		16-17			
3	3383.1	17-6	2	4,5	部分恢复
		3-4			

对于故障1,如果仅通过联络开关(5-11)能够带起失电负荷,但会发生电压越限,因此优化方案是闭合两个联络开关(5-11、16-13),同时打开一个分段开关(11-12),这样既能将失电区域完全恢复供电,又能保证电网安全运行。对于故障2,如果仅闭合一个联络开关(17-6)不能完全恢复对失电区域的供电,由于失电区域各负荷点的负荷分布不均匀,导致没有任何方案能将失电区域完全恢复供电,因此优化方案只能通过闭合两个联络开关(17-6、16-13)恢复17节点供电,并甩掉16节点的负荷。

对于故障3,如果闭合容量最大的联络开关(6-17),不能完全恢复供电,由于失电区域各负荷节点负荷分布不均匀,且联络开关(5-26、5-11)容量不大,导致闭合多个联络开关和断开分段开关仍然不能完全恢复供电,最终采用的方案是只恢复2、3、6节点的供电,而甩掉4、5节点的负荷。

假设节点3、5、9为重要负荷,首先尽可能多的恢复重要负荷,其次才是尽可能多的恢复其它失电负荷,且在优化策略中考虑减负荷方案,但不计负荷减载的开关操作次数,优化仿真结果如表2所示。当故障发生在节点8处时,只需通过操作两个联络开关和一个分段开关(5-11、16-13、11-12)就能将失电区域完全恢复供电。如果故障发生在节点15

表2 计及重要负荷的恢复供电方案

故障	位置	停电负 /kW		分合开关	开关操作次数	负荷减载量	未恢复的线路	是否考虑负荷减载	备注(重要负荷为3、9、17)
		故障恢复前	故障恢复后						
1	8	1485.9	0	5-11 16-13 11-12	3	0		否	失电区域完全恢复
2	15	4464.9	3879.9	17-6 16-17	2	0	16	否	1、部分恢复失电区域 2、最终失电区域内不含重要负荷,因此无需负荷减载
3	1	5628.6	3383.1	17-6 3-4	2	0	4,5	否	1、部分恢复失电区域 2、最终失电区域内不含重要负荷,因此无需负荷减载

# 面向智能用电的高级量测体系关键技术探讨

周恒俊,肖晶,李雪,李晨  
(南京供电公司,江苏 南京 210019)

**摘要:**高级量测体系在促进电网与用户的互动方面起着最为关键的作用,被认为是智能用电建设的第一步。从地域及功能层面上提出分层分区的高级量测体系架构,在此架构的基础上,对智能电表、用户智能管理系统、ZigBee 家域网等门户层关键技术,GPRS/CDMA、ANSI C12 系列协议等通信层关键技术,计量数据管理系统、IEC61968 信息共享与集成等主站层关键技术进行探讨。

**关键词:**智能电网;高级量测体系;用户智能管理系统;计量数据管理系统

中图分类号:TM71

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0057-04

## 0 引言

进入 21 世纪以来,我国电力工业面临着新的形势,能源发展格局、电力供需状况、电力发展方式正在发生着深刻变化。面对新形势和新挑战,国家电网公司提出加快建设以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网<sup>[1]</sup>。坚强智能电网以通信信息平台为基础,包含发电、输电、变电、配电、用电和调度六大环节<sup>[2]</sup>,覆盖从低压到特高压所有电压等级,实现电力流、信息流与业务流的高度一体化融合,是经济、高效、互动和清洁的现代电网。作为智能电网六大环节之一,智能用电为用户提供优质的供电服务、提高电能利用效率。

高级计量体系(advanced metering infrastructure, AMI)<sup>[3,4]</sup>、高级配电运行系统(Advanced Distribution Operation, ADO)、高级输电运行系统(Advanced Transmission Operation, ATO)、高级资产管理系统(Advanced Asset Management, AAM)是智能电网四大技术支持系统。在这四个系统中,AMI 在促进电网与用户的互动方面起着最为关键的作用,被认为是智能用电建设的第一步。

本文从地域及功能层面上提出分层分区的高级量测体系架构,在此架构的基础上,对智能电表、用户智能管理系统、ZigBee 家域网等门户层关键技术,GPRS/CDMA、ANSI C12 系列协议等通信层关键技术,计量数据管理系统、IEC61968 信息共享与集成等主站层关键技术进行探讨。

## 1 分层分区的高级量测体系架构

高级量测体系是一个用来测量、收集、储存、分析和运用用户用电信息的完整的网络和系统,由用户智能用电管理系统、智能表计、本地通信网络、连

接电力公司数据中心的通信网络、表计数据管理系统以及数据集成平台组成<sup>[5]</sup>。AMI 将全面改变电能和信息单方向流动的现状,为用户和电网的双向互动提供平台和技术支持。

从横向上看,AMI 可分为计量维和业务维两个维度。与电力系统生产控制大区(一、二区)和管理信息大区(三、四区)相对应,计量维实现计量数据的实时采集、存储和处理,业务维则实现实时电价等电价机制、负荷控制等需求响应业务信息的发布与订阅。

从纵向上看,AMI 可划分为门户层、通信层和主站层。在门户层,智能用电管理系统同时将耗能情况传递给本地用户和电力公司,通过分析 AMI 数据实现智能的节能方案。在通信层,可选择 OPLC 光纤专网、GPRS/CDMA 公用商用网、电力无线专网实现电力公司与用户之间的信息交互。在配电中心层,利用 AMI 数据来帮助优化电网运行,降低成本以提升用户服务,有利于企业资产的改进或者更好地进行资产维护、增加或者替换。

## 2 高级量测体系关键技术探讨

### 2.1 门户层关键技术

#### (1)智能电表。

智能电表是高级量测体系的基础单元和核心设备<sup>[6]</sup>,高级量测体系通过智能电表和配电中心之间建立安全网络架构,从而实现电力公司和用户之间的双向计量。智能电表可提供可选 5、15、30、60 min 的分时段双向电能计量,记录并报告异常用电事件,提供谐波、闪变、畸变等电能质量问题的监视与告警,支持实时电价、激励电价、紧急峰值电价等电价机制,支持智能电器与分布式电源的接入,并可远程控制参与需求响应的用户负荷,实现用户侧分布式电源、储能设备、电动汽车的实时监控,制定最优发电/用电方案。

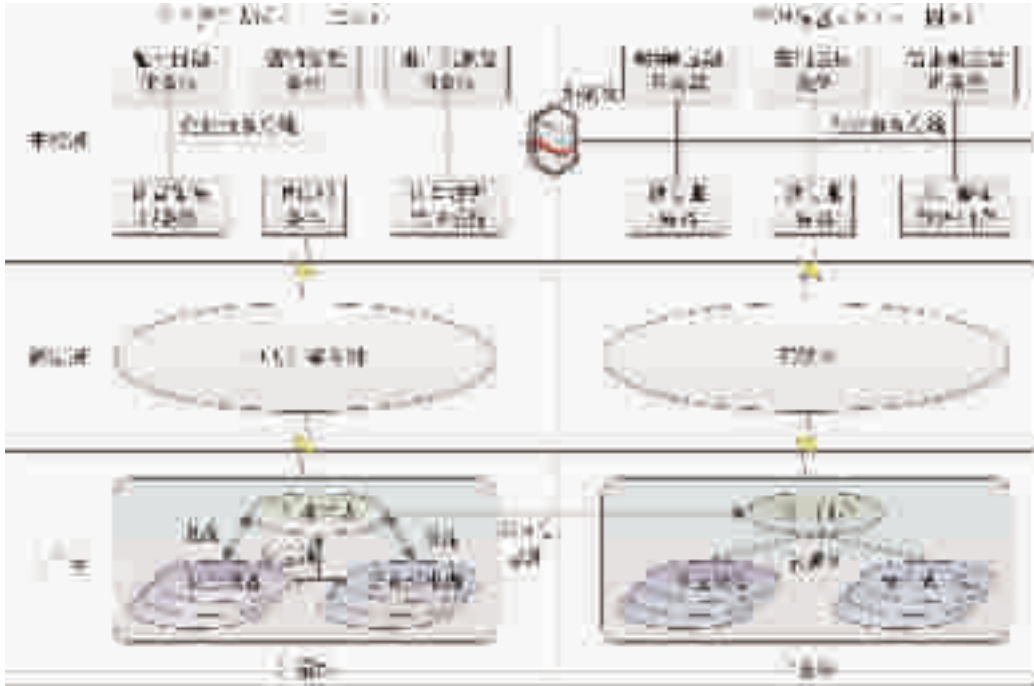


图 1 高级量测体系层次结构图

(2)用户智能用电管理系统。

用户侧的电能管理及其与电力公司的电能与信息交互是高级量测体系的重点,以用户智能用电管理系统作为电网与用户的信息入口点,通过用户智能用电管理系统,电力部门可以进行远程负荷控制、更新费率等高效用户管理,用户也可以实现预付电费、查询账单、实施需求响应等全方位的用电管理。用户智能用电管理中心的引入是AMI与传统用电信息采集系统的区别所在,该中心可以与用户的多种设备进行接口,为用户和电网进行交互提供了支持平台,如图2所示。



图 2 AMI 功能结构图

(3)家域网。

要实现用户侧智能电能管理需要解决关键问题之一是能够覆盖智能表计与家庭所有智能设备的通信网络,从目前国内外发展情况来看,适合于构建家域网的通信方式主要有 HomePlug 技术<sup>[6]</sup>

和 ZigBee 技术<sup>[7]</sup>,HomePlug 利用电力线载波通信技术(Power Line Communication, PLC)实现表计与家庭设备的通信以及家庭与外网的通信。ZigBee 技术以一个开放、可互操作的标准实现了从公用设备到家域网为负荷控制和需求响应目的而进行的通信,是现今也是以后组建家域网最为普遍使用的一种方式。而对于电磁污染比较严重的大型工业企业,采用 ZigBee 或 PLC 通信会产生较严重的信号畸变,为此企业用户在部署内部通信网络时大多采用现场工业总线技术。

2.2 通信层关键技术

(1)通信数据网。

AMI 采用固定的双向通信网络能够每天多次读取智能表计,并能把表计信息包括故障报警和装置干扰报警近于实时地从电表传到数据中心。该通信网络需要涵盖各类不同的用户和负荷点,这其中不仅有小型家庭用户,还有中型商业用户和大型工业用户。在通信信道方面,电力线载波通信与无线通信是两种比较常见的通信方式。而考虑到无线通信网络在可靠性、稳定性、安全性和实时性上的缺陷,可采用 GPRS/CDMA 双无线组网以及无线虚拟专网的方式来构建主站与用户之间安全可靠的专用信息交互通道。

(2)通信规约。

美国发布的 ANSI C12.19 提供了一个基于光的标准表计通信协议,C12.19 标准为计量通信定义了标准数据结构,其表结构如表 1 所示。C12.22 延伸并扩展了 ANSI 协议集,从而可适应任何表计通信

网络。C12.22 的目的是,基于开放式系统互联模型允许数据表在任何可靠的网络通信系统上传输<sup>[8-9]</sup>。C12.22 协议定义了一个自带寻址信息的数据包能够将 C12.19 数据表在任何网络上传输,并分别提供一个 full-stack 定义作为 C12.22 设备和 C12.22 通信模块的接口和本地端口的点对点通信,C12.22 还提供了公共数据的加密和安全技术,使得终端设备在一个公共通信环境下能够安全的互操作。ANSI C12.22 可以进一步和 GWAC 定义的互操作性环境框架联系在一起。并通过使用 C12.19 的数据表来实现语法的互操作性。C12.19 定义了系统间交换的信息结构,那么不同类型的设备就可以在一个网络内交换信息。

表 1 ANSI C12.19 表计数据结构

系列号	名称	表的数量
0	Configuration Tables	9
1	Data Source Tables	8
2	Register Tables	9
3	Local Display Tables	5
4	Security Tables	6
5	Time-of-Use Tables	7
6	Load Profile Tables	8
7	History and Event Logs	10
8	User Defined Tables	10
9	Telephone Control Tables	9
10	Extended Source Tables	4
11	Load Control and Pricing Tables	9
12	Network Control Tables	8
13	Relay Control Tables	7
14	Extended User Defined Tables	4
15	Quality of Service	9
16	One Way Devices	5

### 2.3 主站层关键技术

#### (1) 计量数据管理系统。

信息系统的应用是 AMI 的一个重要组成部分,而计量数据管理系统 (Meter Data Management System, MDMS) 更是重中之重。作为一个带有分析工具的数据库,MDMS 通过与 AMI 自动数据收集系统的配合实现对电表计量值的处理和储存。

自动数据收集系统对智能表计的计量以及报警信息的读取可以按照预先设定的时间进行,也可以被偶然的事件所触发,开启后通过企业服务总线与其他系统进行数据的分享。实时运行所需要的信息将直接转发到停电管理系统、调度管理系统、能量管理系统等相关的系统。

MDMS 首先对从 ESB 取得的数据进行分析和分析,然后按需求传给一些对实时性要求不高的系

统,如用户信息系统、计费系统、负荷预测系统、电能质量管理、变压器负荷管理等。MDMS 具有确认、编辑、估算 AMI 数据的功能,即使通信网络中断或用户侧出现故障,也能够完整准确地完成与软件及信息系统之间的数据传输。对于计费系统的功能设计和类型,MDMS 提供的数据支持分时计费、峰谷电价以及其他一些复杂的计费方法。MDMS 数据不仅支持对多种市政计量仪表(气、电、水)的管理,同时支持对电表的控制(如根据需求及时的读取、接通或断开),对系统读表时间的维持,以及对需求侧的响应和停电修复<sup>[10]</sup>。

#### (2) 计量数据共享与集成。

为实现电力系统应用软件之间无缝集成,国际电工委员会(International Electrical Committee, IEC) 定义了一种公共信息模型 (Common Information Model, CIM) 使得这些应用或系统能够不依赖于信息的内部表示而访问公共数据和交换信息。IEC61970 和 IEC61968 标准中的 CIM 分别定义和详细描述了能量管理系统和配电管理系统所涉及的电力对象。

因此,要使得计量数据在用户账单管理、负荷预测、馈线自动化等应用程序中得到应用,必须借助 CIM 将计量数据与其他网络拓扑数据相关联。图 3 展示了面向 AMI 的 CIM 中按对象建模的公共数据类或数据属性之间扩展后的多层嵌套和继承的关联关系,如智能表计类 (CustomerMeter) 继承能量用户类的属性值,并与馈线、变压器存在一对多的关联关系;在时间轴上,智能表计类由时间间隔类 (Interval) 聚合而成,并借助与量测类的关联关系将量测数据与各智能表计相关联。

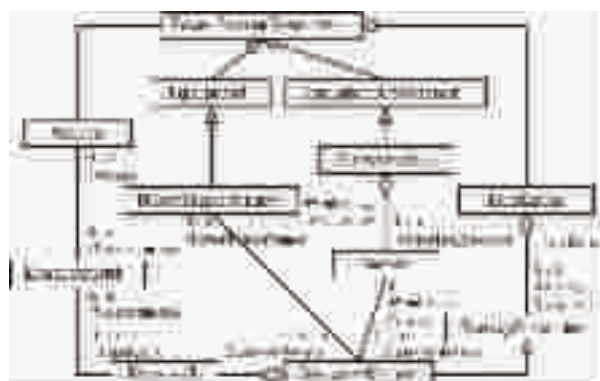


图 3 高级量测体系关联关系图

### 3 结束语

智能电网与传统电网的一个重要不同点就是智能电网尤其强调与用户的信息与电能互动。本文从 AMI 分层分区的系统架构、用户的智能用电管

理、全方位覆盖的通信网络、标准规范化的通信规约和“即插即用”的软件平台这几个方面对 AMI 实现信息与电能互动的相关关键技术进行了探讨。但目前 AMI 还处在不断发展中,应在智能电表、用户智能用电管理、主站层信息交互平台等方面加强技术研究,不断深化 AMI 的技术内涵,在技术成熟的基础上大规模推广建设 AMI。

#### 参考文献:

- [1] 傅书遄. 中国智能电网发展建议[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20):23-26.
- [2] 国家电网公司智能计[2010]09号. 国家电网智能化规划总报告.
- [3] 栾文鹏. 高级量测体系[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2):6-10.
- [4] 张景超, 陈卓娅. AMI 对未来电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2):20-22.
- [5] Li Wei-xuan, Wang Xin-yi. The Research of AMR in Smart Meter. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, 2010: 1-4.
- [6] Yonge L. The HomePlug Power line Alliance and Home Plug AV Overviews. 2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2006: 9-10.
- [7] Hoi Yan Tung, Kim Fung Tsang, KaLun Lam. ZigBee sensor

network for Advanced Metering infrastructure. 2010 Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2010: 95-96.

- [8] American National Standard Utility Industry End Device Data Tables, ANSI C12.19-1997, Mar. 1997.
- [9] American National Standard Protocol Specification for Interfacing to Data Communication Networks (draft), ownership by ANSI C12 SC17WG1, and will be designated “ANSI C12.22” when approved.
- [10] EcoLogic Empowering Energy Efficiency-The Ecologic Meter Data Management System. Intelligent Outage Management for the Smart Grid. <http://www.ecologicanalytics.com/pdf/ProdSheet-Enhanced-Outage-Management-Module.pdf>.

#### 作者简介:

- 周恒俊(1984),男,江苏扬中人,工程师,从事电网分析与规划工作;
- 肖 晶(1981),女,江苏徐州人,高级工程师,从事电网分析与规划工作;
- 李 雪(1979),女,江苏南京人,高级工程师,从事电网分析与规划工作;
- 李 晨(1980),男,江苏溧阳人,高级工程师,从事电网分析与规划工作。

(上接第 56 页)

处,则只能通过操作一个联络开关和一个分段开关(17-6、16-17)恢复部分失电区域,并且未能恢复的失电区域不含重要负荷,因此无需进行负荷减载。如果故障发生在节点 1 处,则操作一个联络开关和一个分段开关(17-6、3-4)恢复大部分失电区域,但是会丢失重要负荷 5,为了保证重要负荷的供电,优化结果只有断开分段开关(13-12、3-4),和闭合联络开关(11-5、6-17),虽然在一定程度上增大了停电负荷,但是保证了重要负荷的供电。

## 4 结束语

综上所述,配变负荷的波动性和随机性较大,分布式电源出力、电动汽车充放电设施用电的随机性增大了尖峰负荷和峰谷差率,智能配电网超短期优化调度需要考虑利用可控分布式电源和储能装置的配合,实现超短期能量平衡、平滑负荷曲线、降低峰谷差。出现故障或缺陷时,进行故障的定位与隔离,通过优化馈线联通系之间的负荷转供方案来健全区域持续供电,同时需要考虑重要负荷的多电源供电,从而保证配电网的经济性和可靠性。

#### 参考文献:

- [1] Chen-Ching Liu, Juhwan Jung, Heydt G. T., et al, The Strategic Power Infrastructure Defense (SPID) System. A Conceptual Design, IEEE Control Systems Magazine, 2000, 20(4):40-52.
- [2] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源. 2009, 25(1): 7-11.
- [3] 陈星莺, 顾欣欣, 余 昆, 等. 城市电网自愈控制体系结构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24):38-42.
- [4] 常 康, 薛 峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术发展评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17):10-15.
- [5] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8):1-7.
- [6] 李 威, 丁 杰, 姚建国. 智能电网发展形态探讨[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2):24-28.

#### 作者简介:

- 王 勇(1971),男,江苏南京人,高级工程师,主要研究方向电网运行调度、智能电网、分布式能源;
- 余 昆(1978),男,重庆人,副教授,主要研究方向为配用电规划与评估、智能配电网运行分析、配电网智能调度与控制;
- 罗 兴(1983),男,安徽芜湖人,工程师,主要研究方向为电网调度自动化、分布式能源。

# 南京一流配电网自动化建设实践研究

陈庭记, 颜 昕, 许洪华  
(南京供电公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:**配电网自动化建设是目前供电企业生产工作的核心工作之一。以南京供电公司为例,分析了南京市配电网自动化建设的现状,从集中配网调控模式、主配网一体化调控、配电网综合故障研判平台、基于内嵌式地理图平台的配电网运行管理、配电网自动成图、一体化配电网通信管理平台等六大方面阐述一流配电网自动化建设体系,并从统一配调技术支持系统、打通营配调工作流程、全网设备异动更新、规范建设设计要求等四个方面分析配电网自动化实用性建设内容,为一流配电网自动化建设提供了实践指导。

**关键词:**一流配电网;配电网自动化;建设实践

**中图分类号:** TM71

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)S2-0061-03

## 0 引言

目前,国内配电网整体比较薄弱,普遍存在损耗大、电压质量差、设备运行时间过长、信息传输滞后、遥控设备少等问题<sup>[1-3]</sup>。电网事故的发生和事故后抢修、供电恢复速度都配电网造成了很多直接或间接的影响<sup>[4,5]</sup>。因此,配电网建设已成为电力企业生产工作的重点推进工作<sup>[6]</sup>。配电网自动化建设体系主要包括集中配网调控模式建设;可实现的主配网一体化调控模式建设;配电网综合故障研判平台建设;基于内嵌式地理图平台的配电网运行管理模式建设;应用配电网自动成图技术建设;应用配电网自动成图技术、建设一体化配电网通信管理平台建设等方面。

本文以南京供电公司为例,在对目前的配电网建设现状的分析基础上,探讨了一流配电网自动化建设体系六个方面的建设工作,并从四个方面分析了配电网自动化实用化建设的内容,为一流配电网信息化、自动化、互动化建设提供了实践案例指导。

## 1 配电网自动化建设现状

南京供电公司作为国家电网公司在南京市电网建设的落地单位,承担着南京配网自动化建设的责任。南京供电公司按照“网架坚强、人才一流、运维高效、服务优质、配电设施与自然人文环境和谐相融”的原则选择明城墙内和河西地区作为试点区域,加快配网示范区建设,依托示范区内配电网自动化建设的推广,大大降低示范区内配网停电时间,提升供电可靠性。

### 1.1 配电网自动化在南京市的建设进程

南京配电网自动化试点工作选取主城中心 A 区

(夫子庙、新街口等地区)、主城中心 B 区(东郊中山陵风景等地区)和主城中心 C 区(奥体中心等地区)三个负荷敏感度高、保电任务较多的区域进行配电网自动化试点建设。试点区域约 24 km<sup>2</sup>,用电负荷约 35 万 kW,供电量 17 亿 kW·h,涉及 64 条配电线路,线路总长 312 km,其中电缆 244 km、架空线路 68 km。

2010 年初,根据国家电网公司《关于下达坚强智能电网第二批试点项目计划的通知》(国家电网智能[2010]131 号),批准南京供电公司开展配电网自动化第二批试点工程。

2010 年 5 月 21 日,《南京供电公司配电网自动化试点工程建设实施方案》通过国网公司专家组审查。

2010 年 10 月 22 日,国网公司发布生配电[2010]193 号文件《关于南京配电网自动化试点工程建设实施方案的批复》,批准了南京供电公司提交的“南京配电网自动化试点工程”方案,并对工程建设提出具体工作要求,批复的建设资金为 9128.49 万元。

2011 年 4 月,南京供电公司配电网自动化主站系统、子站、终端、通信系统、信息交互总线合同签订仪式和工程启动典礼举行,配电网自动化建设工作正式启动。

2011 年 5 月至 10 月,南京配电网自动化试点工程建设全面展开。

2011 年 9 月 28 日,南京配电网自动化系统投入试运行。

2011 年 11 月 2 日至 4 日,试点工程通过江苏省电力公司专家组验收。

2011 年 12 月 24 日至 25 日,试点工程通过了国网公司专家组的基本功能测试。

2012 年试点工程进入实用化阶段,并于当年 10 月 14 日通过国网公司配电网自动化实用化验收。

2013年1月至今,南京公司启动二期工程建设。南京配电自动化二期建设主要集中在南京市西南板块,根据重要线路划分以及地区负荷密度、重要性、供电可靠性及人口密集度、经济、行政、交通、地理等因素把配电线路划分为新街口中心区、奥体中心区、板桥-铁心桥新城、青奥保电线路四个区域。

配网自动化后续的三期、四期、五期建设覆盖面积、覆盖范围如图1、图2所示。

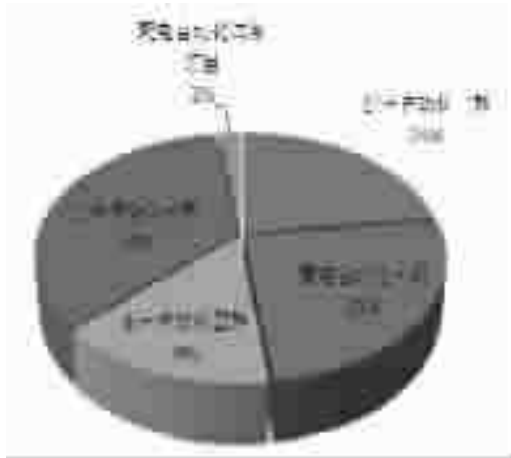


图1 南京配网自动化建设覆盖面积示意



图2 南京配电自动化建设工期与覆盖范围示意

## 1.2 配电网自动化建设的主要内容及效果

南京配电网自动化试点建设所涵盖的区域线路设备采用“三遥”与“两遥”相结合的配电自动化建设模式,对于采用光纤通信的线路,开关站、环网柜、柱上开关以“三遥”改造为主,部分末端和无负荷设备采用“两遥”改造方式;部分线路和设备光纤无法到达的可采用无线通信,设备改造采用“两遥”改造方式。

通过配网自动化项目建设,解决了配网调度的“盲调”,全面支撑了配网调控一体化建设,所建设区域内的配电线路通信覆盖率达2.54%提升到100%,供电可靠性由99.98%提升到99.99%,客户端电压合格率由99.90%提升到99.92%,建设区域内的A级保电出动人员从200人次/日减少到50人

次/日,客户满意率由95.279%提升到99.5%。

## 2 南京一流配电网自动化建设体系

### 2.1 实现“大运行”体系的集中配网调控模式

结合配电自动化试点和“大运行”体系构建工作,明确规范地区电网调度和配网调度的职责界面,严格以电压等级区分两级调度调管范围,其中地区电网调度管辖范围是110kV及以上电网,配网调度管辖范围是35kV及以下电网;同时,结合监控业务特点,以变电站为监控业务职责界面,而变电站站内、站外监控业务又分别由地区监控、配网调控承担。

在明确配电网调控业务界面的基础上,加强配网调控业务的统一管理,实现城区、江宁、浦口、六合等地区的2000多条配网线路,205座变电站,16万余台配电设备调控业务模式的集中管理和实现配网调控的集约化精益化管理。配电自动化主站系统建设根据集中配网调控业务模式,信息按调控业务管辖范围进行分层分区配属,有效支撑集中配网调控业务开展。

### 2.2 全面实现主配网一体化调控

配电自动化主站系统构建了10kV配网图模数据、110kV和35kV上级电网图模数据的主配网一体化模型。依据图模维护的唯一性原则,配电自动化主站系统模型管理整体思路为10kV配网图模信息从PMS(生产管理系统)系统获得,主网模型从EMS(调度自动化系统)获得,在配电自动化主站系统完成主、配网模型的拼接以及模型动态变化管理功能。

配电自动化实时数据采集包括10kV配网实时信息和变电站实时信息两部分。10kV配网实时信息由各种类型的配电终端、子站通过全光纤通信方式上送到配电主站;变电站实时数据由地调EMS系统转发获取。

目前,通过PMS系统图模导入,南京配电自动化主站系统建立了全市2000多条配电线路配网模型基础,并在此基础上实现了实时数据监测、负荷控制等动态管理,显著提高了公司配电网自动化管理水平。

### 2.3 建设配电网综合故障研判平台

利用南京公司现有的系统资源,将配电主站、EMS、PMS、GIS等系统进行集成,达成多平台之间的信息交互。

通过对配用电网中变电站至低压用电客户的全拓扑范围内故障设备上报监测和对电网连通性采用自上而下延伸、自下而上追溯方式的分析,实

现故障点位置、故障影响设备及范围的判断,且可以并结合设备运行信息在关键设备节点处进行主动召测。通过分析相应设备的电流、电压实时及突变信息,增加故障研判的准确性;同时通过故障设备拓扑叠加校验,故障点、面重合校验,计划停电面与故障点覆盖校验,实现排除重复故障报修和计划停电报修;该故障研判平台工作步骤是:首先在接收上报故障信息后的第一时间进行自动研判,然后获得准确的故障类型、故障地点和故障影响区域,从而为故障抢修及管理提供有力依据,最后实现故障抢修。该平台有效提高了故障抢修效率和电网供电可靠性。

#### 2.4 基于内嵌式地理图平台的配电网运行管理

经过广泛调研和对公司相关信息系统实际情况的分析,利用配电自动化主站系统内嵌地理图平台和信息交换总线集成 PMS、GIS 系统相关资源,构建了配电网区域联络图、环网图、单线图、地理图一体化的可视化平台,为配电网生产管理指挥和配电网调度提供了坚实的基础。

#### 2.5 开创应用配电网自动成图技术

针对配电网运行方式变动较多的特点,通过开展基于开创性的自动布线技术的研究,以配电网单线图模型为参考依据,自动生成区域联络图和环网图,并成功地将一体化配电网全景式潮流图的可视化方法与调度智能分析决策方法有机地结合在一起,突破传统可视化的展现内容。

配电网全景式潮流图能够提供更高、更宽广的视野,它将所有的调度分析决策信息都纳入了一张电网的全景图中,开辟了一种崭新监控思路。

#### 2.6 建设一体化配电网通信管理平台

系统通过统一资源模型,在支持跨系统的统一软件框架平台基础上,根据系统各功能及其之间的交互关系,制定了相应的软件模块,融合了一体化采集平台等重要软件模块。

### 3 南京配网自动化实用化建设

#### 3.1 统一配调技术支持系统,提升配电网调控运行水平

配调业务涵盖配电自动化试点区域内设备的监控业务后,有利于解决异构系统信息交互的困难,实现与 EMS 系统图模及实时数据的同步更新,在国内率先将配调技术支持系统统一。该系统全面覆盖变电站站内直至中压配变的所有配调管辖设备,实现站内图、联络图、单线图多维多屏全方位电网运行状态信息展示,并基于可靠完善的图模信息实现不同维度监视图形的实时切换,快速、准确、灵

活的展示所有调控设备的逻辑关系及试点区域内设备的实时运行情况。

#### 3.2 突破营、配、调信息壁垒,打通营、配、调工作流程

通过加强信息交互总线建设,运用多平台之间的信息交互,消除了营销系统与生产系统之间的信息壁垒:营销系统新上或变更用户信息将通过系统的流程,确保一一送达 PMS 系统,再由 PMS 系统流程提交至调度审核,确保了用户设备投退的闭环管理;PMS 系统中配网的变化经调度审核后,系统自动同步至营销系统,确保了营销系统中用户及台区挂接关系的实时准确。

#### 3.3 常态开展全网设备异动更新,智能提升潮流图运维效率

截至 2013 年 9 月 30 日,已完成全市域 2341 条中压配电线路的红黑导入,累计完成设备异动流程 1100 余次。

针对配电网变动多联络图维护工作量大的问题,通过开展自动布局布线技术的研究,基于可靠配电网模型,依据各变电站的 GIS 坐标,实现区域联络图和环网图的自动生成。测试表明,原需要近 2 小时维护的潮流图工作,通过自动布局布线应用可缩减至 20 秒完成,在有效的提升了联络图图模的准确性和调控人员应用界面的直观性的同时,全面提升系统联络图及环网图的运维工作效率。

#### 3.4 规范配网工程建设与设计要求,促进建设管理模式的转变

随着南京城市配电网建设的不断发展推进,城区配电设备也在不断进行更新改造和新增。如配网建设还按照旧的模式开展,这些设备将成为城市配电网信息孤岛,势必造成将来重复投资,进行二次改造。配网建设模式的发展将是朝结合配电自动化和相关的通信系统同步设计同步施工方向发展。

目前,南京公司要求所有新上配电设备必须具备配电自动化功能,对相关设备的设计和技术要求也作出了相应的规范。同时公司正在试点开展居配工程以及大型变电站出线工程的相关一次设计,并同步施工配电自动化通信系统,为今后的配网工程设计、建设模式以及相关管理模式的转变做好铺垫。

### 4 结束语

本文在分析南京市配电自动化建设的现状基础上,从集中配网调控模式、主配网一体化调控、配电网综合故障研判平台、基于内嵌式地理图平台的

# 基于有限元法的 110 kV 联合建设变电站电磁环境仿真分析

蒋涛<sup>1</sup>, 还留龙<sup>2</sup>, 徐志科<sup>2</sup>

(1. 南京供电公司, 江苏 南京 210003; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 变电站与高层建筑联合建设是解决城市中心供电紧张和土地稀缺矛盾的合理、经济的新途径, 这也对变电站提出了新要求。针对变电站周围的电磁辐射的情况, 本文利用有限元分析软件 ANSYS 对 110 kV 户内变电站进行电磁环境仿真分析, 分析了母线与电力电缆在通过额定电流情况下, 变电站室内磁场分布, 仿真结果表明设计的变电站周围电磁辐射完全能达到国家工频磁场评价标准。

**关键词:** 变电站; 有限元; 电磁场; 仿真

**中图分类号:** TM71

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)S2-0064-03

## 0 引言

随着经济的不断发展, 特别是国内近几年房地产的开发发展, 供电负荷猛增, 相应变电站的分布越来越密, 并逐渐深入到市中心人口稠密区。城区房地产的开发和旧城改造, 使深入市中心的变电站越来越多, 其建设难度也越来越大。变电站与高层建筑联合建设是解决城市中心供电紧张和土地稀缺矛盾的合理、经济的新途径, 而且这种建设方式将成为今后的一种趋势。

变电站在运行过程中会因为感应产生电磁波, 为了研究变电站周围电磁场的情况, 本文利用有限元分析软件 ANSYS 对 110 kV 户内变电站进行电磁环境仿真分析。

## 1 有限元分析工具

ANSYS<sup>[1]</sup>软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发, 软件主要包括三个部分: 前处理模块, 分析计算模块和后处理模块。前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具, 用户可方便地构造有限元模型; 分析计算模块包括结构分析(可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析)、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析, 可模拟多种物理介质的相互作用, 具有灵敏度分析及优化分析能力; 后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可看到结构内部)等图形方式显示出来, 也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。软件提供了 100 种以上的单元类型, 用来模拟工程中的各种结构和材料。

收稿日期: 2014-09-04; 修回日期: 2014-10-13

ANSYS 以 Maxwell 方程组作为电磁场分析的出发点。有限元方法计算的未知量(自由度)主要是磁位或通量, 其他关心的物理量可以由这些自由度导出。根据用户所选择的单元类型和单元选项的不同, ANSYS 计算的自由度可以是标量磁位、矢量磁位或边界通量。利用 ANSYS 可以完成二维、三维的静磁场、谐波磁场、瞬态磁场以及静电场、谐波电场、瞬态电场的分析, 并且可以完成三维低频、高频电磁场分析。

ANSYS 的基本分析步骤如下<sup>[2]</sup>:

- (1) 创建物理环境;
- (2) 建立模型, 划分网格, 对模型的不同区域赋予特性;
- (3) 加边界条件和载荷(激磁);
- (4) 求解;
- (5) 后处理(查看计算结果)。

## 2 110 kV 联合建设变电站电磁环境模型的建立

根据 ANSYS 分析步骤, 对 110 kV 联合建设变电站内电磁情况进行仿真。该联合建设变电站主变设计为  $2 \times 80 \text{ MV} \cdot \text{A}$ , 一次建成, 110/10 kV 两级电压, 110 kV 线路共 2 回进线(带并接端口), 10 kV 线路为 28 回电缆出线。

在变压器室内, 两组母线 110 kV 母线通过额定电流 800 A, 根据实际情况对室内的电磁环境仿真。根据实际尺寸, 建立模型, 模型由空气、墙壁、导体(母线)以及虚拟无限边界组成, 分别用使用 SOLID97 和 INFIN47 来对前面的实体分别进行剖分, 实现模型的离散化。模型从内到外分别是导体(母线)、空气以及无限边界。首先, 根据 ANSYS 分析步骤创建物理环境, 并进行网格划分, 实现实体的离散化, 其模型如图 1 所示。



图1 电磁环境有限元分析模型

模型中导体布置基本按照实际母线布置情况进行建立,如图2所示,外面矩形实体模拟的为主变室。为了简化模型,在该仿真分析中,只考虑110 kV侧母线通过额定电流情况下的主变室内工频磁场分布情况。

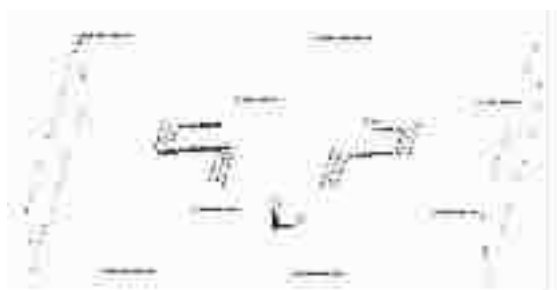


图2 电磁环境有限元分析模型

根据前面分析,目前户内变电站均采用带有屏蔽层的电力电缆、母线等装置,不存在裸露导体存在于空气中,因此在正常运行中,系统中的电场可以认为完全达到国家规定标准范围内<sup>[9]</sup>。因此这里只需要进行磁场分析。

在模型上施加电流和电压载荷,这里首先分析单相母线通电时候磁场分布情况,施加电压载荷110 kV,电流为800 A,频率为50 Hz,忽略墙体内钢筋的导磁特性,利用ANSYS进行工频磁场的响应分析,仿真结果如下图3所示。

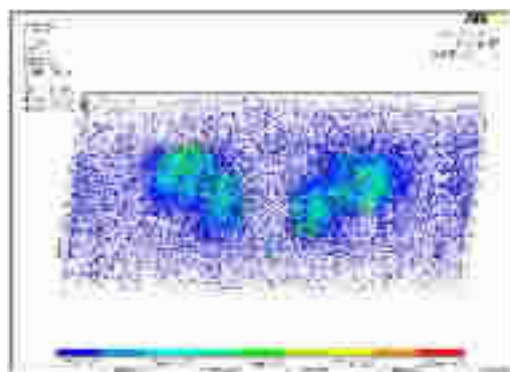
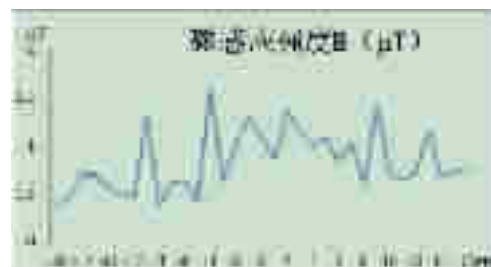


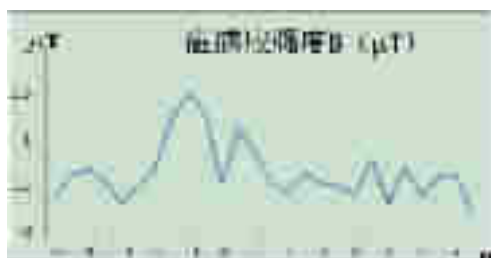
图3 主变室内磁感应强度B分布情况

图3中可以看到,磁感应强度B的大小可以根据颜色进行判断。从图中图示可以看出,磁感应强度为蓝色,数值最小,红色是数值最大,并且最大磁感应强度出现在母线处,达到0.446 mT,最小的出现在蓝色磁力线处,为0.213  $\mu\text{T}$ 。

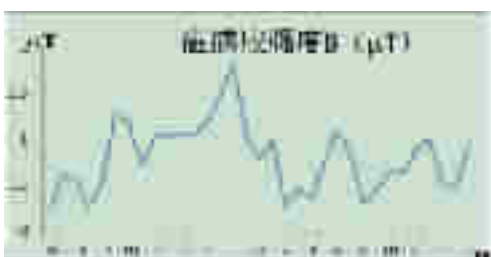
为了更好了解母线所产生的磁感应强度B在该变电站中的分布情况,根据仿真分析得到结果,获得主变室四周各个位置上磁感应强度B数值,如图4所示,其中的图(a)、(b)、(c)、(d)分别是主变室四周B的分布情况。



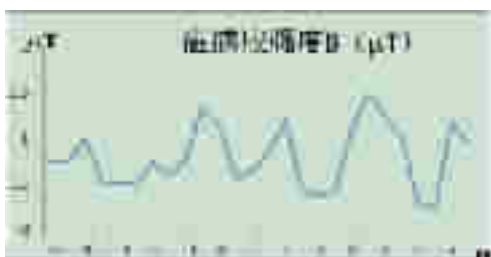
(a) 主变室南部



(b) 主变室东部



(c) 主变室北部



(d) 主变室西部

图4 主变室周围各个位置上磁感应强度分布

从上述分析可以得到,该主变室四周最大磁感应强度B不超过1.8 T,完全能够达到对于国家工频电磁场在HJ/T24-1998《500 kV超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》中推荐以100  $\mu\text{T}$ 为工频磁场的评价标准,以及IEEE Std C95.6和ICNIRP导则对50 Hz的公众照射限值相同,磁场强度限值为100  $\mu\text{T}$ 的标准。

### 3 电力电缆磁场有限元仿真分析

由于电力电缆<sup>[9]</sup>外部也设置有屏蔽层,因此电力电缆也只需要进行磁场分析,设置三相电力电缆

存在于一个  $40\text{m} \times 40\text{m} \times 30\text{m}$  空间内,在该空间内还设置了一个  $24\text{m} \times 24\text{m} \times 5\text{m}$  的房间,房间墙壁假设为钢筋混凝土,一般来说,钢筋的相对磁导率在 500-3000 之间,这里将墙体考虑在电力电缆的电磁分析中,施加电压载荷 110kV,三相对称电流为 800A,频率为 50Hz,仿真结果如下图 5 所示。

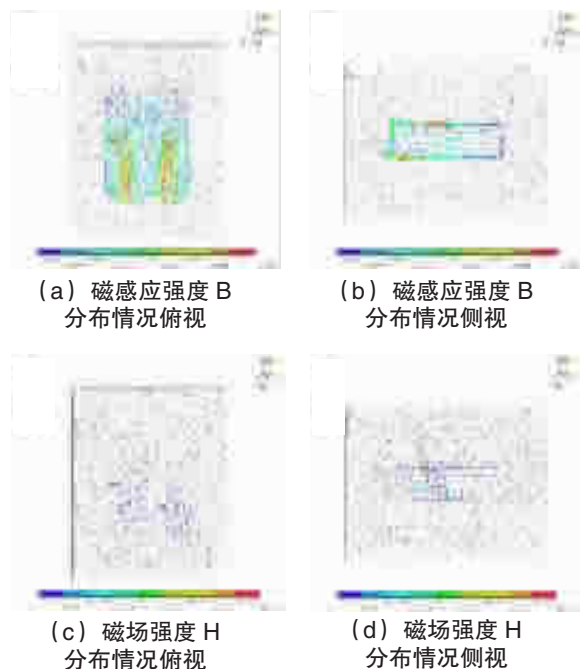


图 5 流过三相对称电流的电力电缆磁场分布情况

图 5 中可以看到,蓝色较密区域为墙体,这是由于墙体为一个实体单独建模,墙体位置的单元数目较多,因此计算得到的磁感应强度在该区域显示较密,磁感应强度的大小则可以根据颜色进行判断。从仿真计算中可以得到最大磁感应强度为 4.3 mT,

出现在电力电缆附近,空气中最小磁感应强度为  $0.038 \mu\text{T}$ ,最大磁场强度为  $450.4 \text{ A/m}$ ,最小磁场强度为  $0.03 \text{ A/m}$ 。

#### 4 结束语

通过前面户内变电站的两组六根 110 kV 高压母线以及电力电缆的仿真,完全能达到国家对于工频电磁场在 HJ/T24-1998 《500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》<sup>[5]</sup> 中推荐以 4 kV/m 作为居民区工频电场评价标准,以  $100 \mu\text{T}$  为工频磁场评价标准。

#### 参考文献:

- [1] 李红云. ANSYS10.0 基础及工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 谢德馨,杨仕友. 工程电磁场数值分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [3] 许杨,张小青,杨大晟. 高压输电线路工频电磁环境[J]. 电力学报,2007,22(1): 9-14.
- [4] 张愉,吴锁平,窦飞,等. 500 kV 过江电缆空间工频磁场的研究[J]. 华东电力,2010,38(6):881-886.
- [5] HJ/T24-1998, 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S].

#### 作者简介:

- 蒋涛(1978),男,南京人,硕士,工程师,主要从事电力系统设计及建设管理工作;
- 还留龙(1988),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事电力电子方面的研究工作;
- 徐志科(1978),男,江苏常州人,博士,副研究员,主要从事电机与电器方面的研究工作。

(上接第 63 页)

配电网运行管理、配电网自动成图、一体化配电网通信管理平台六大方面阐述了一流配电网自动化建设体系,并从统一配调技术支持系统、打通营配调工作流程、全网设备异动更新、规范建设设计要求等方面分析了配电网自动化实用性建设内容。后续配网自动化建设还要进一步优化配网规划管理体系、优化配网项目建设管理模式,加大人力、资金投入,加快工程进度,全面推进一流配电网建设。

#### 参考文献:

- [1] 黄建良. 电力系统配电网自动化的应用探讨[J]. 湖北电力, 2003, 27(6): 11-12.
- [2] 程明. 关于配网自动化与配网管理的论述[J]. 黑龙江科技信息, 2013(6): 78.
- [3] 赵兴华. 配网自动化建设与运行管理问题建议[J]. 科技与企

业, 2013(1): 130.

- [4] 史善哲, 闪琪琪, 季鹏, 等. 石家庄配网自动化建设实践与探索[J]. 华北电力技术, 2013(4): 42-46.
- [5] 周农伦. 中小城市中配网自动化系统的研究[J]. 机电信息, 2013(3): 156-157.
- [6] 王丽芳, 何卫斌. 配网自动化在城市电网中的改造应用[J]. 电源技术应用, 2013(3): 221.

#### 作者简介:

- 陈庭记(1975),男,江苏南京人,高级工程师,主要研究方向为电网运行、智能电网;
- 颜昕(1975),男,江苏南京人,工程师,主要研究方向为电网运行、智能电网;
- 许洪华(1981),男,山东临沂人,工程师,主要研究方向为电网调度、分布式能源等。

# 基于地理信息平台的智能通道规划辅助系统的开发和应用

肖晶,李雪

(南京供电公司,江苏 南京 210019)

**摘要:**为实现智能化的电力通道规划,将南京电网地理接线图结合现有南京市地理背景图、变电站地理分布图、架空及电缆线路图、规划电网线路图和地下管沟剖面图等众多数据,开发地理信息平台,为后期的供电规划和线路维护提供方便和辅助决策。

**关键词:**地理信息系统;电力通道规划;辅助系统

中图分类号:TM715

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0067-03

## 0 引言

电网规划是电力系统建设中一项重要且复杂的前期工作,规划质量直接影响电网投资效益及电网运行安全。同时随着城市发展不断的提档升级,地上地下通道资源日益紧张,对电力通道的规划选线提出更高的要求。

传统的电网通道规划主要靠一些纸质图纸、局部 CAD 图,收集客观、准确、全面的数据是科学电网规划决策面临的一大瓶颈。现状电网地理接线图一般是建立在以一定方式配准的图片格式的地图背景简化地理基础上的,变电站及输电通道的具体位置不尽准确,虽然对长距离输电线路的辅助规划影响不甚明显,但是对于电网优化方案来说,精细度明显不够,仍需要多次现场踏勘<sup>[1-2]</sup>。

为实现电网图形化管理和变电、输电、配电各专业的数据整合及共享,为电网公司生产、营销等相关专业提供电网和用户资源的编辑、查询统计、分析、专题图、供电方案辅助设计等服务,实现企业设施资源、客户关系、设计规划等业务管理的信息化与智能化,国内外大型城市供电公司先后与相关科研院所合作开展基于地理信息系统(GIS)的电网规划管理系统的开发。地理信息系统可充分整合利用地理信息数据,方便对空间地理数据进行查询、加工以及分析处理。由于电网线路具有典型的线性地理特征,所以可应用 GIS 对电网进行可视化、形象化的管理。为此我公司开发了基于地理信息平台的智能通道规划辅助系统,对南京主城地区 35 kV 及以上变电站、线路 GIS 数据、电网规划数据空间化,并将所有电网数据输入已建成的“南京供电公司地下电缆及管沟地理信息和应用平台”,并在该平台上拓展电网选线功能,为电网规划、建设、管理提供重要的地理参考资料和通道规划的辅助决策。

收稿日期:2014-09-04;修回日期:2014-10-13

## 1 基于地理信息平台的智能通道规划辅助系统的开发

### 1.1 系统数据库的建立

通过电网线路调查,将已有的电网地理接线略图结合现有南京市地形图和管线图数据,对线路走向和供电设施如电杆等进行矢量化,并将矢量化的成果与现有南京市大比例尺矢量 GIS 数据进行套合,在系统中将供电线路和设备的精确位置和相互关系进行描述。

系统覆盖的电网数据包括:35 kV 至 500 kV 变电站地理分布图、35 kV 至 500 kV 架空及电缆线路图、规划电网线路图和地下管沟剖面图。系统为这些资源建立了先进的 GIS 数据模型,实现了电网资源数据的集中管理。电网数据库建立技术流程如图 1 所示。

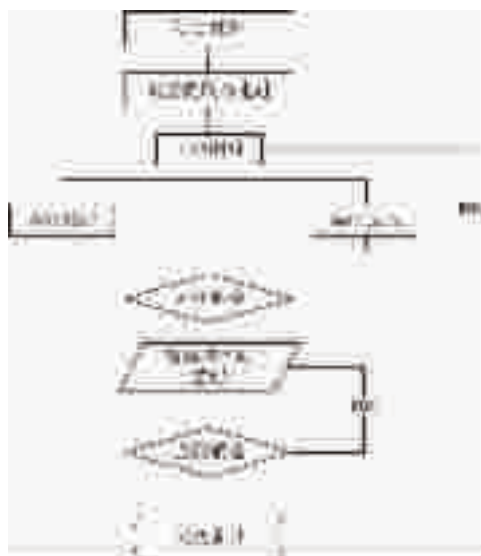


图1 电网数据采集流程图

#### 1.1.1 准备工作

调阅最新的大比例尺地形图和综合地下管线图,收集和整理与本项目有关的多种数据资料。

### 1.1.2 数据提取

调用已有最新的 1:500/1:1000 地形图和电力地下管线资料,从中提取管线设施层;其中从地形图提取管线及设施层电力要素,管线数据提取电力管线点层中的上杆、配电箱等要素,合并成一个图形。

### 1.1.3 数据对比

将合并的图形叠加到南京市 GIS 数据上,形成底图,根据南京主城区电网地理接线挂图中电力管线的走向和设备位置进行数据筛选,确定加工范围,如图 2 所示。



图 2 地形图和管线图的电力要素

### 1.1.4 图形编辑

叠加挂图、DLG 图、管线图,根据挂图上的变电站位置,在 DLG 图中查找,并转绘为 GIS 数据;根据挂图的电力线走向结合 DLG 图和管线图,转绘电力线。从 DLG 图和管线图上提取供电设施(高压电杆、窨井)位置,根据挂图线路表明电压等级进行属性录入,如图 3 所示。



图 3 电力要素提取

### 1.1.5 成果验证

通过外业抽查试验区变电站的名称和电压等级结果,电力线路走向的准确性与专业部门协助核查。数据集成后,与参考资料进行一致性比对,检查各属性字段是否存在漏填、不规范的情况,最终完成数据的上图工作。

### 1.1.6 数据入库

数据集成后对数据进行配图和入库,将数据集成到系统中。

### 1.1.7 叠加电网规划数据层

根据主城区近期规划的 110 kV 以上电网项目,添加规划线路层,查找规划电力线路与规划变电

站,根据规划的路线走向及电力设施位置进行绘制,添加要素属性,并根据电压的不同进行配色,线型以虚线表示,如图 4。



图 4 电力规划图层

## 1.2 系统功能模块的建立

### 1.2.1 选线功能描述

选线功能是基于南京市的路网模型,选取电网选线分析的起点和终点,也可插入必经点和障碍点,来分析得出满足以上条件的,从起点到终点的最短电网铺设线路。

### 1.2.2 路网模型建立

首先对南京的路网数据,进行交叉点处打断道路中心线,拓扑检查道路中心线,形成路网模型的原始数据。然后进行选线分析模型制作。根据已经测试完的网络模型,发布成 Geoprocessing 服务。

### 1.2.3 电网选线功能实现

工具栏“路径分析”,点击“起点”按钮,到地图拾取起点位置点击“终点”按钮,到地图拾取终点位置,如果线路上有限制通行的点位,点击“障碍点”按钮,到地图拾取障碍点位置,线路上有必须经过的点位,点击“必经点”按钮,到地图拾取必经点位置,“确定”生成一段推荐选线路径。

### 1.2.4 与输电 GIS 接口

本系统预留与输电 GIS 平台对接接口,能访问输电 GIS 数据服务,与本系统的地理接线图叠加,可作为地理接线图更新的依据。

## 2 基于地理信息平台的智能通道规划辅助系统应用及效果

### 2.1 地理数据共享

利用 ArcGIS Server 可以将基础地理空间数据、电力专题数据发布成 Web 地图服务来实现地理数据的共享。各部门可以将其本地数据库中的数据在 Internet 上发布成空间数据服务,然后定期进行同步更新,这样不同部门之间就可以共享数据。通过使用 REST API 开发人员可以快速地将 Internet 上发布的服务与自己的服务集成,图 5 是集成了电网地

理接线图服务和基础地形底图服务的系统截图<sup>[3]</sup>。



图5 南京主城区电网地理接线图

## 2.2 功能服务共享

电力各种 GIS 功能以功能服务的方式,对外提供各种接口,满足供电公司各部门用户的浏览、查询、分析等需求。主要的功能服务如下:

### 2.2.1 图形检索

GIS 图形检索模块主要提供了变电站地理分布图、架空及电缆线路图、规划电网线路图、地下管沟剖面图和地理背景图的浏览服务,为电网规划设计提供所需的电网基本信息。

### 2.2.2 管网分析

系统的管网分析主要包括管线的横剖面分析、纵剖面分析。横剖面分析主要是查看电缆管沟地下管孔资源数据,管孔的占用、闲置状态数据,以便能及时准确的掌握管孔的使用情况;纵剖面分析的功能在于将地下管线的地下走向反映到一个平面内<sup>[2]</sup>。

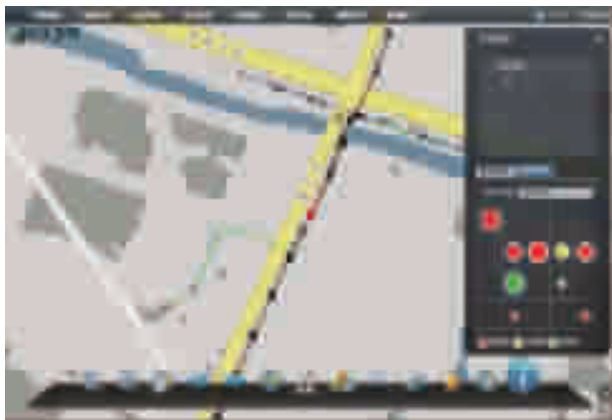


图6 地下管沟剖面图

### 2.2.3 综合统计

综合信息统计分析主要用于分析线路、变电站、管沟的综合信息,为电网规划设计人员提供所需的综合信息。设计人员可以划定范围对管线及其它设备进行统计,统计结果用列表和图形显示给用户。

### 2.2.4 线路选择

线路走廊和路径的选择是电网长期规划中的

一项重要任务,在紧密结合区域地理信息的基础上做出最优电网构架规划,无疑将减少占地走廊、节省投资、便于维护<sup>[4]</sup>。规划设计人员通过选择线路接出变电站和接入变电站,以及想避开的点或者必须经过的点,系统能生成合适的电网布线供设计人员参考,结合地下电缆及管沟地理信息和应用平台的地下电力管线的现状及规划预留通道,推荐最优的选线路径。



图7 线路布局设计

## 3 结束语

基于地理信息平台的智能通道规划辅助系统将南京主城地区 35 kV 及以上变电站、线路 GIS 数据进行加工,对架空和电缆线路进行区分和表达;规划图层,将拟建变电站与线路数字化;通道规划选线功能选取电网选线分析的起点和终点,也可插入必经点和障碍点,来分析得出满足以上条件的,从起点到终点的最短电网铺设线路,结合已有的“南京供电公司地下电缆及管沟地理信息和应用平台”,对选线路径进行初步筛选。

基于地理信息平台的电网规划辅助系统所带来的效益主要体现在以下几个方面,一是电网数据的共享可充分利用整合的数据成果,方便其他部门和系统对电网空间数据进行浏览、查询及分析处理<sup>[5,6]</sup>,在足不出户的情况下就能全面了解电网信息,并利用这些信息生成电网专题图、线路平断面图,指导电网设计、规划和管理;二是电网建设工程周期短、涉及区域广,传统的规划、设计工作需要大量的现场测量、验证,有了电网规划辅助功能,大大减少了外业的工作量;三是利用该系统设计的变电工程,线路路径缩短,铁塔数量减少,节省人工,节约项目投资。目前该套系统运行稳定,提供的电网数据现势性好,能直观反映电网的分布、走向、电压等级、电网类型,已在 2016 年 220 kV 及 110 kV 电网项目包选线中使用该系统,为电网规划和数据调阅提供了快捷的途径。

# 物联网技术在电动汽车充换电领域的应用

李 荣, 蒋东平, 卞孝琴  
(南京供电公司, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 本文结合实际工程, 介绍了电动汽车充换电服务网络建设中物联网技术的应用。重点介绍了物联网的身份标识, 结合充换电站运营管理系统, 实现统一管理调度, 以及动力电池、运行车辆等充换电设施实时监控以及全生命周期管理的应用。最后探讨了物联网技术在智能电网的未来技术展望, 并提出实现方法。

**关键词:** 物联网; 传感器; 电子标签; 充换电设施全生命周期管理; 车辆监控管理系统

**中图分类号:** TN929.5; TP391.44; U469.72 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-0665(2014)S2-0070-04

## 0 概述

2010年10月10日国务院颁布了《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》, 将物联网技术列为国家战略性新兴产业加以培育和发展, 提出要促进物联网、云计算的研发和示范应用。2011年3月举行的第十一届全国人民代表大会第四次会议上, 我国“十二五”规划纲要获得通过, 智能电网及物联网均被列为我国下一个五年战略性新兴产业也再一次重申要加快培育发展战略性新兴产业, 积极发展新一代信息技术产业, 促进物联网示范应用。这些都标志着智能电网和物联网的发展已得到国家高度重视, 在国家“十二五”规划纲要中, 物联网关键技术研发和产业示范应用被列为重点支持对象。

国家电网公司组建了专门的研发团队, 探讨物联网在智能电网中的应用技术。承担或参与多项物联网相关的国家科技重大专项、国家973计划、国家重大咨询等项目, 包括: 2010年国家科技重大专项: “面向智能电网的安全监控、输电效率、计量及用户交互的传感器网络研发与应用验证”; 国家发改委重大咨询项目“‘十二五’物联网战略发展规划-智能电网课题”; 中国工程院重大咨询项目“物联网在各行业中的应用-智能电网”等。

目前, 国家电网已经有分布式发电及微电网接入控制、输电设备及线路状态监测系统、输电线路无人机智能巡检系统、智能园区等多个方向开展物联网相关研发及工程建设。

本文结合实际工程需要, 将物联网设备及技术引入电动汽车充换电站运营管理系统。利用物联网设备的身份编码、识别技术, 对动力电池、电动汽车进行统一编码, 实现统一识别管理。

## 1 物联网技术在电动汽车充换电领域的应用

收稿日期: 2014-09-04; 修回日期: 2014-10-13

在电动汽车充换电网络建设中, 应用了大量设施, 如电动汽车、充电机、充电桩、动力电池等。如果将这些设施进行有机相联, 并进行无缝对接及实时监控, 则可实现所有设施的在线监控, 保证充换电设施及运行人员的安全, 更好的为电动汽车提供充换电服务。物联网基于物物相联的关键技术, 通过标识设备及射频识别系统, 可以解决以上需求。

### 1.1 物联网物理设备

在电动汽车、动力电池、充换电设施上安装物联网电子标签及射频识别设备。射频识别设备包括RFID读写器, 用于读取安装终端设备上的RFID标签, 以实现终端设备的身份识别, 并通过光纤网络将终端设备的身份识别信息发送至充换电站监控管理中心。实现对相关设备的在线监测、一体化集中管控、资源优化配置等高级应用。

通过“三网”(智能电网、物联网、交通网)技术融合, 实施“三化”(信息化、自动化、网络化)管理, 实现对电动汽车用户跨区域全覆盖的“三同”(同网、同质、同价)服务的智能充换电服务网络发展模式。利用物联网先进传感、全球定位系统、射频识别、通信等技术, 通过电动汽车及充换电设施运行状态感知与综合检测分析, 有助于实现电动汽车运营管理系统的智能化、互动化, 保证电动汽车、电池级充换电设施的稳定、经济、高效运行。

物联网应用场景见图1。



图1 物联网应用场景

### 1.2 物联网系统架构

物联网系统架构见图 2。

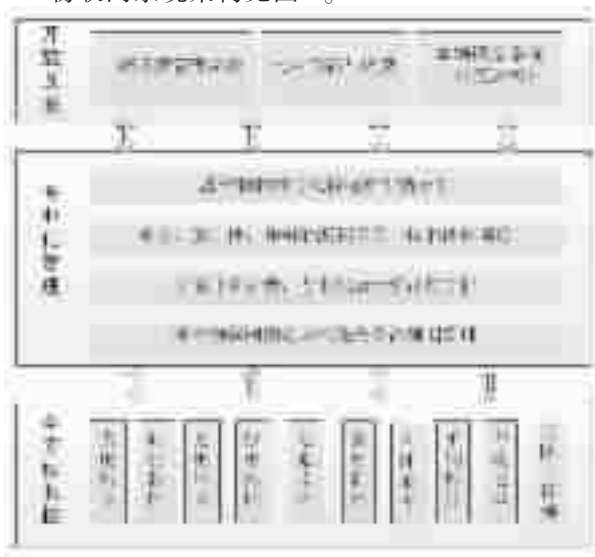


图 2 物联网系统架构

## 2 应用场景

### 2.1 电池物联网

在动力电池上安装物联网电子标签,见图 3。该电子标签可标示该组电池的机械及电气特性,且编码唯一,实现充换电服务网络中的动力电池实时在线监测、全生命周期管理等高级应用。



图 3 动力电池物联网-电子标签

在换电设备上安装电子标签识别设备,通过该设备读取动力电池的身份编码,可实现动力电池的性能监测、巡视维护等高级应用。传感器见图 4。



图 4 动力电池物联网-传感器

### 2.2 电动汽车进站导引

在电动汽车上安装可唯一标示其身份编码的电子标签,该编码可标示该辆汽车的基本特性,实现充换电服务网络的车辆在线监测功能。在充换电工位安装车辆物联网标签设备。该设备用于对车辆标签编码的编写及读取,与监控系统配合,完成车辆的进站导引、换电过程全方面监视。见图 5。



图 5 车辆物联网物理部署

通过智能化的调度算法,充换电站监控管理系统能够实现从车辆进站到出站的自动化管理,不仅提高了换电操作的安全性,缩短了换电操作的时间,同时也大大简化了换电服务流程,提高了换电站的服务质量。

### 2.3 充换电设施全生命周期管理

利用物联网技术,通过对设备的需求计划管理、招标选型、订货和供应商资信管理等,对需求采购计划生成、招标过程技术支撑、订货合同及技术协议签订等选购内容进行过程管理。同时对设备(配电设备、充电设备、换电设备、电动汽车、电池、监控设备、计量计费设备等)状态转变的各个业务环节进行规范管理,实现对设备生命周期状态的跟踪管理。另外还可以提供站与站之间的电池借用和返还,以实现电池资源紧急调拨。具体可以包括采购管理、检定管理、仓储管理、电池借用/返还、设备台账管理、设备轮换、检修管理和报废管理等<sup>[1,4]</sup>。见图 6。

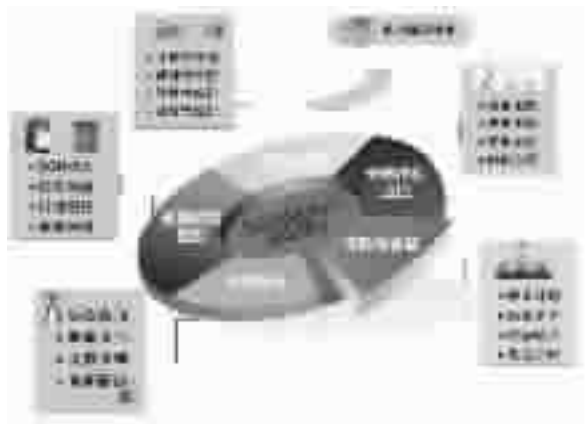


图 6 充换电设施全生命周期管理

### 2.4 充换电服务网络计量计费

物联网设备用于接收来自终端信息采集设备的终端设备的身份识别信息、对充换电站的工作状态进行监控、对充换电过程进行计量计费,并将所监控的充换电站的状态信息、所获得的计量计费信息以及所接收的终端设备的身份识别信息传输至区域监控设备;区域监控设备,用于根据来自终端信息采集设备的信息和来自充换电站监控设备的信息对所辖区域内的终端设备和充换电站进行监控,并统计计量计费信息<sup>[9]</sup>。

## 2.5 充换电站监控管理系统

在充换电站监控管理系统中引入物联网技术,可实现对进站车辆及站内动力电池进行实时监控。见图 7。当车辆进入充换电工位时,监控系统页面实时显示车辆信息,便于运行人员进行充换电操作预判。可实现充换电过程中的全自动智能化操作,从而保障运行人员及设施的安全。



图 7 进站车辆全景监控

充换电站监控系统通过物联网设备,实时采集动力电池信息,包括充/待机状态、充电过程信息等,可实现充电过程的远程监视及遥控操作,保障运行人员的安全。见图 8。



图 8 充换电设备全景监控

## 2.6 车辆监控管理系统

在充换电站车辆监控系统中引入物联网技术,可实现车辆的实时运行信息监视,包括行车路线、车辆信息、车载动力电池信息。支持车辆运行轨迹回放。见图 9、10。

## 3 未来充换电领域的物联网应用展望

利用物联网技术实现充换电监控系统的智能化和互动化,通过在电动汽车、电池、车载终端等安装传感器和识别系统,利用物联网相关技术可以实



图 9 运行车辆实时监控系统



图 10 动力电池实时监控

时感知电动汽车的运行状态和电池的使用状态,通过所监控的充换电站的工作状态获知充换电站及当前网内能源的供给状态,实现电动汽车和充换电站的综合监测与分析,实现资产管理集约化<sup>[2]</sup>、仓储管理简易化、物流调度智能化、充电计费多样化、运营服务互动化,保证电动汽车、电池及充换电站等稳定、经济、高效的运行,也从电网运行角度充分发挥电动汽车的节能减排效应,实现资源优化配置,实现社会效益最大化。

### 3.1 电动汽车与大电网互动

V2G 是智能电网的关键应用技术,电动汽车不仅作为电力消费体,同时也能在不使用的时候为电网提供电力,电动汽车兼顾了电网储能的功能。V2G 技术体现的是能量双向、实时、可控、高速地在车辆和电网之间流动,充放电控制装置既有与电网的交互,又有与车辆的交互,交互的内容包括能量转换、客户需求信息、电网状态、车辆信息、计量计费信息等<sup>[9]</sup>。V2G 技术是一项较为前瞻的科技,从结构框架上大致分为 4 个层面:电网层、站控层、智能充放电装置层和车辆层,通过系统的工作原理实现电能可在电网和车辆之间双向流动的双向智能控制装置与参与 V2G 技术的车辆连接后,将连接车辆可充放电的实时容量、充电状态等受控信息提供给后台服务系统。后台管理系统根据电网系统的调度指令,下发充放电指令,对所管辖范围内双向智能控制装置进行充放电控制管理并反馈相关信息。

应用 V2G 技术和智能电网技术,电动汽车电池的充放电将被统一部署,根据既定的充放电策略,

电动汽车用户、电网企业和汽车企业将获得共赢。例如,对电动汽车用户而言,可以在低电价时给车辆充电,在高电价时,将电动汽车出储存能量出售给电网公司,获得现金补贴,降低电动汽车的使用成本;对电网公司而言,不但可以减少因电动汽车大力发展而带来的用电压力,延缓电网建设投资,而且可将电动汽车作为储能装置,用于调控负荷,提高电网运行效率和可靠性。

### 3.2 充换电设施物流配送

通过建立多级库房、库区、储位的建立和维护,再加以入库管理、出库管理、库房盘点和库存预警等方面的业务支撑,实现对库房规范有序的管理;通过对设备配送需求的生成、配送计划的制定、配送执行的工作进行管理,实现从配送中心一级库方向下级单位库房的配送物流控制;通过物联网技术,实现各类设备(充换电设施、电池等)在物流调度过程中的自动识别,物流车辆的定位跟踪以及实现设备调度请求的实时在线申请、审批、调配,以满足多样化的物流调度管理需求,构建智能化物流调度体系。具体可以包括车辆管理、配送申请、配送计划、配送执行、配送调度和配送质量管理等。

### 3.3 智能告警

可以根据危险等级对电池状态信息中的异常信息和故障进行分类,例如由低到高划分成几个等级;根据车辆上安装的传感器采集车辆处于行驶或停止状态以及实时车速,再利用 GPS 采集车辆的具体地理位置信息,根据车速和车辆的地理位置综合分析车辆失去动力后的风险等级;对于低等级电池异常或车辆失去动力的高风险情况,采用车载终端告警方式提示用户在适当的时候进行处理;根据车辆的地理位置以及传感器采集的车辆整体状况,结

合充换电服务网络的分布和应急抢修能力向用户提供应急处理的辅助决策信息;对于高等级电池异常或故障,可以采取预警加紧急断电的方式。例如,通过车载终端告知用户系统将在一分钟或几分钟后切断供电,使用户有紧急避险处理时间,从而保障用户及车辆的安全运行。

## 4 结束语

通过在充换电服务网络建设中引进物联网技术,将充换电设施、动力电池、电动汽车进行深度融合,实现设备的全网透明监视,提高运营管理系统的管理效率,同时推进物联网技术的实际应用技术,从而提高智能电网的智能化水平。

### 参考文献:

- [1] 杨永标,丁孝华,朱金大,等.物联网应用于电动汽车充电设施的设想[J].电力系统自动化,2010,34(21):95-98.
- [2] 宋永华,胡泽春,阳岳希.电动汽车电池的现状及发展趋势[J].电网技术,2011,35(4):1-7.
- [3] 杨 丰.无线传感器网络在电能信息采集中的应用[J].计算机与网络创新,2010(5):43-46.
- [4] 薛 飞,雷宪章,等.基于物联网的电动汽车智能充换电服务网络电池管理[J].电力系统自动化,2012(21).
- [5] 腾乐天,何维国,杜成刚,等.电动汽车能源供给模式及其对电网运营的影响[J].华东电力,2009(10).

### 作者简介:

- 李 荣(1977),男,江苏南通人,工程师,从事电动汽车服务工作;
- 蒋东平(1961),男,江苏南通人,工程师,从事电工技能培训管理工作;
- 卞孝琴(1963),女,南京人,工程师,从事电工技能培训管理工作。

(上接第 69 页)

### 参考文献:

- [1] 邱朝明.基于 GIS 的电网规划管理系统开发研究[J].中国高新技术企业,2007(4).
- [2] 尚海燕,薛志宏.GIS 在配电网自动化系统中的应用[J].电力学报,1998,13(4):274-276.
- [3] 王永红,姚 瑾.基于 ArcGIS Engine 的电厂管理信息系统的设计与实现 [J].长沙民政职业技术学院学报,2007,14(2):88-91.
- [4] 王 鹏,蒋御柱.基于 GIS 的电网规划系统设计与实现[J].计算机工程与设计,2008,29(22):5741-5744.

- [5] 李 欣,胡良明,朱 健,等.江苏省电力 GIS 现状调查及应用前景展望[J].现代测绘,2007(2):15.
- [6] 钟一俊,周明磊,戚伟强.矢量地图在浙江电力 GIS 中的应用研究[J].电力信息化,2012(7):11.

### 作者简介:

- 肖 晶(1981),女,江苏徐州人,高级工程师,从事电网规划工作;
- 李 雪(1979),女,江苏淮安人,高级工程师,从事电网规划工作。

# 南京电网调度自动化基础数据校核技术

朱红勤,王 赫

(南京供电公司,江苏 南京 210019)

**摘要:**结合南京电网调度自动化系统的实际应用,系统研究了调度自动化系统基础数据的校验规则,并基于校验规则库开发了调度自动化基础数据质量综合校核工具,实现对电网参数数据和系统采集基础数据的准确性进行综合质量校验,解决了南京EMS系统的地区网供负荷和电能量系统的供电量数据的准确性进行有效校验的问题。

**关键词:**基础数据;校核技术;平衡算法

中图分类号:TM734

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0074-04

## 0 引言

电力调度自动化系统系统的量测数据是电网运行运行方式调整和电网故障处理的重要数据基础,其准确性对于电网运行的安全可靠具有重要的意义。

南京供电公司随着大运行体系建设的不断深入,南京调度技术支持系统对电网运行业务的基础支撑作用不断加强,对数据准确性要求持续提升,特别是EMS系统的网供负荷、电量系统的供电量数据等是公司经营管理的重要指标,电网主变、线路负荷数据是电网规划运行决策的重要依据,其中电量预测还涉及公司重要同业对标考核,一旦出现数据异常将会带来一系列严重影响。为提高调度自动化基础数据的完整性、准确性、一致性、及时性和可靠性,国家电网公司、江苏省电力公司也通过状态估计遥测合格率等指标对地区调度自动化基础数据质量进行全面考核。提高电网参数数据和系统采集基础数据的准确性成为调度自动化专业的一项重要难题。通过对地区调度自动化系统基础数据的校验技术的研究,并开发基于校验规则库的调度自动化基础数据质量综合校核工具,实现对电网参数数据和系统采集基础数据准确性进行综合质量校验,解决了EMS系统的地区网供负荷和电能量系统的供电量数据的准确性进行有效校验的问题。

## 1 南京调度自动化基础数据存在的问题

### 1.1 EMS系统中基础数据缺乏有效的甄别和校验机制

EMS系统SCADA量测不平衡分析、状态估计坏数据检测可以发现系统中异常遥测、遥信数据,但只能进行实时分析,无法实现结果保存和查阅,特别是对于一些偶发瞬时突变的遥测异常无法及

时发现。具体表现在如下四个方面:

(1) 对于遥信频变没有很好的处理方法,目前由于厂站端设备调试等原因,遥信频变的问题还不能完全避免,短时间内大量的遥信变位告警信息影响监控人员对其他告警信息的监视。

(2) 对于遥测突变问题还不能完全避免,当电气设备启动或电网模型发生变更时会引起遥测突变,影响网供负荷等统计数据的正确性,目前只能通过人工方式来发现和修正,效率低且容易遗漏。

(3) 电网模型设备参数不可避免存在错误,影响遥测数据状态合格率指标。且目前大量的数据核查均依靠日常积累的经验进行人工分析,耗费大量人力且效果不理想。

(4) EMS系统中网供负荷数据等计算量数据缺乏有效的甄别和校验机制,由于计算量分量较多,系统异常或突变造成的分量遥测数据异常导致计算结果的不准确的情况不容易被甄别。

### 1.2 电量系统中供电量数据缺乏有效的校核手段

目前,南京地调采用的“江苏电网地县一体化电量采集系统”通过采集电表状态、电表采集数据的质量标志、EMS积分电量比较等方法实现了单块电表采集电量的校核,但是对于电量系统中南京市供电量等计算量数据缺乏有效直观的校核手段,特别是电网模型和参数发生变更时,对于供电量公式本身定义的正确性以及每个供电量分量数据的正确性无法快速甄别,目前只能判断为可疑数据或者是发现出错后,通过人工比对的方式来发现和修正,效率低且容易出现错误。

## 2 调度自动化基础数据校核规则和方法

为解决上述问题,根据电网能量守恒原则,分析了六重基础数据智能数据校验规则库,并研究基于这些校验规则开发调度自动化基础数据质量综合校核工具,实现对电网参数数据和系统采集基础

数据的准确性进行综合质量校验、告警提示、原因定位、决策建议等,使相关人员对数据的准确性、分析依据等一目了然,并及时有效地采取处理方案,提高基础数据的准确性,保障电网安全运行。

### 2.1 合理值上下限规则

合理值上下限是自动化主站采用的最有效的规则之一,即给某个量根据其参数和拓扑可以设定一个合理值上下限即最大量和最小量,当系统采集的基础数据大于最大值或者小于最小值时标记为“错误”或“可疑”。

### 2.2 遥测和遥信的一致性规则

遥测和遥信的一致性规则就是指当开关遥信为“分”时,如果遥测值是不为零的数或者绝对值远大于零,则标记该遥信或者遥测可疑。

### 2.3 告警信号合理性规则

对监控告警信号的合理性进行分析,如对监控信号的频繁动作、事故告警信号发生时,相关遥信或保护动作信号没有相应告警,则标记为改告警信号可疑<sup>[2]</sup>。

### 2.4 “三大”平衡校验规则

“三大”平衡校验规则:一是母线平衡,是指变电站里的变压器侧进入母线和母线各线路侧有功、电量等量测基本守恒。二是主变平衡,是指变电站里变压器进入主变和流出主变各侧有功、电量等量测基本守恒;三是线路平衡,线路对端校核是指流入各线路和流出个线路的有功、电量等量测基本守恒。

### 2.5 EMS 积分电量和电表采集电量相近规则

EMS 积分电量和电表采集电量相近规则是指

将 EMS 系统采集数据的历史曲线进行积分计算后所得的电量和电能量系统中直接采集电表所得的电量基本一致。

### 2.6 相似日数据校验规则

相似日数据校验规则是指选择季节、气温、天气等具有相似外部条件的相似日,电网相应的统计数据应具有一定的相似性。

### 2.7 调度自动化基础数据校核的实现方法

传统的调度自动化基础数据校核一般依赖于自动化运维人员、调控人员的人工校核,耗费了大量的人力,为实现对自动化基础数据的自动校核,根据电网运行实际,按照校核规则,设计基础数据校核规则模块,实现自动化基础数据的自动校核。具体实现方法如图 1 所示。

## 3 自动化基础数据质量校核工具的实施

### 3.1 监控告警信号频繁动作统计工具的实施

针对遥信频变的问题,根据告警信号合理性规则,研究遥信信号合并等功能,对短时间内多次出现的信号进行统计处理,避免因调试等原因短时间内出现大量相同信号淹没其他有用信息。对监控信号分类并按一段时间内动作次数由高到低进行排序,并对告警信号的频繁动作原因进行分析,推进异常告警消除力度。例如通过模块的分析显示“实时值与封锁值一致,请解除封锁”信号动作频繁,自动化主站进一步分析,发现调控人员遥测封锁后出现实时值和封锁值一致而未及时解除封锁,会每 5 分钟发一次该信号,影响监控人员的正常监控,且占用大量资源。因此通过分析后自动化主站将该信号设置为

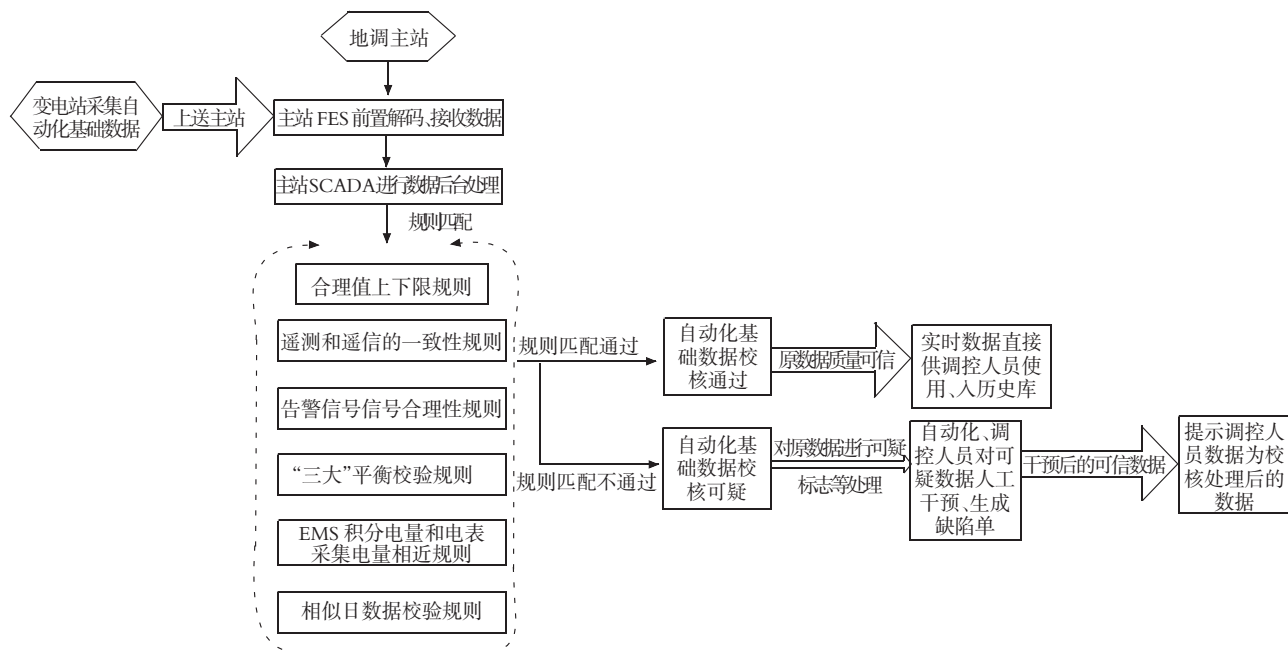


图 1 自动化基础数据校核的实现方法

不告警,提高告警信号的可用率。如表 1 所示。

表 1 从 2013 年 12 月 1 日至 12 月 3 日  
频繁告警动作信号查询

序号	厂站	电压等级	事故分闸信号	动作次数
1	其林门变	10	其林门变宁航线 263 事故分闸	5
2	学景变	10	学景变龙眼 #1 线 161 事故分闸	5
3	淳化变	10	淳化变水泥线 115 事故分闸	5
4	淳化变	10	淳化变东月线 121 事故分闸	4
5	所街变	10	所街变星雨 #2 线事 故分闸	1

### 3.2 EMS 系统基础数据合格性校验工具的实施方案

#### 3.2.1 状态估计数据自动分析与告警工具

针对遥测数据异常和电网参数不正确的问题,通过合理值上下限原则和遥测遥信一致性等原则对 EMS 系统状态估计 5 分钟的结果文件进行分析,通过计算机自动解析数据文件,数据库的存储方式,通过将状态估计值与实际值之差与设定残差值比较等方法,自动分析不合格数据,以告警方式提醒运维人员问题数据,提高电网状态估计相应的时效性,提高南京电网状态估计指标。主要方案如下:

(1) 电网状态估计 FTP 时态结果文件的自动提取与存储。

基于江苏省公司 FTP 状态估计结果文件,定期进行新文件的探测、数据解析、提取及存储入库工作,为电网状态估计历史数据分析建立支撑。

(2) 开发电网状态估计历史数据的查询分析功能。

开发网页式的在线电网状态估计结果查询系统,建立并优化电网状态估计结果大数据的分析查询语句,满足状态估计不合格数据分析与历史追溯需求。

(3) 建立电网状态估计不合格数据语音与短信报警功能。

针对电网状态估计的不合格结果提供定期扫描设置,增加语音报警和短信报警功能,满足调度自动化工作人员对电网状态估计时效性需求。

#### 3.2.2 基础数据平衡自动分析与校核工具

针对遥测突变等遥测异常的问题,根据“三大平衡”校验规则对 EMS 系统遥测数据进行校验,通过母线、主变、线路功率平衡以及数据运行经验策略,过滤系统异常造成的突变或错误数据,并可对

异常提醒,为统计分析提供更为可靠的基础数据。

以母线平衡为例,其平衡率的计算采用“正出负进”<sup>[1]</sup>的原则,即流出母线为正,流进母线为负。

$$M = \text{ABS} \left( \frac{P_- - P_+}{P_-} \times 100\% \right) (\pm 2\% \text{ 以内为合格}) \quad (1)$$

式中: $M$  为母线平衡率; $P_-$  为计算时间段内,流进母线的电量,即受进电量总和; $P_+$  为计算时间段内,流出母线的电量,即送出电量总和。

按照公式(1)对变电站母线平衡率进行实时计算:

母线平衡率  $M \leq 2\%$  以内为合格(绿色,不告警),  $2\% < M \leq 4\%$  黄色预警,  $M > 4\%$  红色告警,基础数据平衡自动分析与校核流程如图 2 所示。

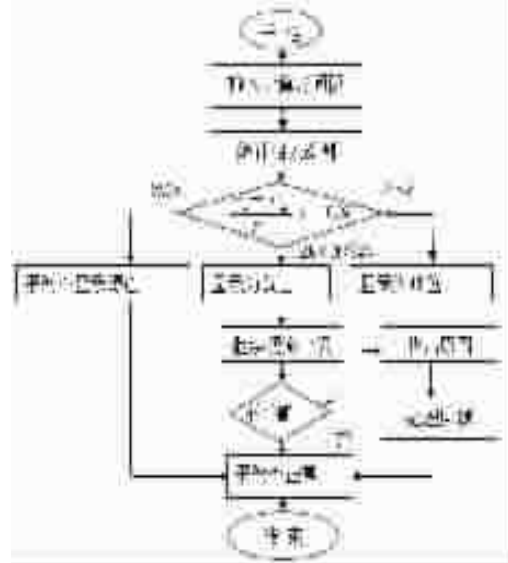


图 2 基础数据平衡自动分析与校核流程图

变压器平衡与线路平衡的原理同母线平衡类似,变压器平衡主要计算变压器的变损及变损率,而线路平衡则是通过运算线路两侧的电量数据,从而计算出线路之间的损耗数额和线损率,即平衡率。

### 3.3 重要计算量准确性校核工具的实施方案

针对 EMS 系统中网供负荷数据等计算量数据缺乏有效的甄别和校验机制的问题,主要通过对南京网供负荷、地区负荷等计算量进行计算的同时对每个分量的遥测数据质量标志进行分析,判断是否存在分量“工况退出”、“遥测数据不变化”等引起计算量计算结果不正确的情况,并提示自动化人员深入分析引起分量遥测数据“质量标志”不正常的原因,做到实时分析、实时预警。

### 3.4 基于电能量系统供电量的 EMS 积分电量校核工具的实施方案

针对电量系统中供电量数据缺乏有效的校核手段的问题,根据 EMS 积分电量和电表采集电量相近规则,以日为单位,将电能量系统(简称 pbs)的关口电量与 OPEN3000 调度自动化系统(简称 cms)中

的关口积分电量的每个分量进行自动对比,及时发现关口电表的问题。

校核工具分别从电能量系统中取出每块相关关口电表的电量值,从调度自动化系统中取出相对应的遥测积分值。

$$\epsilon = \frac{P_{\text{ems}} - P_{\text{pbs}}}{P_{\text{pbs}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\epsilon$ 为差值百分比。

按照公式(2)计算差值百分比 $\epsilon$ 的同时,列出计量点所在的EMS系统的主变和母线平衡结果,如EMS系统该遥测积分电量相关的主变和母线均平衡,且其与电量数据的差值百分比的绝对值超过1%,则认为某个电量数据有误。如果EMS系统该遥测积分电量相关的主变和母线存在不平衡现象,则首先分析EMS系统遥测数据的准确性,再结合电能量系统表计采集进行分析。

#### 4 结束语

自动化基础数据质量校核工具在南京供电公司开发使用后,调度自动化基础数据质量得到了明显提升,电网状态估计遥测合格率、电量系统供电关口电量同期统计率等指标保持了良好水平,自动化系统缺陷及时性得到提高,2014年1-6月监控告警信号总数同比减少了7.8%,实际应用表明,南京调度自动化基础数据质量校验规则符合电网实际应用要求,为电网安全稳定运行提供了可靠的技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 张永健. 电网调控与调度自动化[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 陆路,杜积贵,全思平,等. 变电站遥信功能自动校验系统[J]. 江苏电机工程,2012,31(2):40-43.

#### 作者简介:

朱红勤(1981),女,江苏南通人,工程师,从事电力系统自动化工作;

王赫(1981),男,辽宁大连人,工程师,从事变电运维管理工作。

## 全新“武器”轮番上阵

今年秋检期间,江苏电力检修公司引进大量先进技术确保各项工作安全、高效、优质完成。2014年10月8日,在500 kV 泰斗、兴斗线 364.5 m 高的江阴大跨越南塔检修作业现场,国网江苏电力检修公司输电检修中心员工余波蹲在一种新型的飞车内逐渐滑向光缆的缺陷处。“大跨越往往采用阻尼线加防振锤组合的防振方式,普通飞车不能通过阻尼线夹。为此,单位专门组织研制了这种阻尼飞车,大大方便了员工作业。”班长刘福云说。不同于普通的飞车,这种阻尼飞车在正常两个主动轮中间还设有一个从动轮。行驶到阻尼线夹处,飞车逐渐停下,余波拉了一下飞车上的杠杆,中间的从动轮下压导线,前主动轮抬了起来,轻松地越过了阻尼线夹。整个出线加消缺过程仅仅用了40多分钟就完成了。“以往都是用脚勾方式出线,需要一步一步往前走,整个过程通常需要一个半小时以上,对工作人员的心理和体力都是较大的考验。现在使用阻尼飞车,既省力又大大提高了工作效率。”余波说。“这个抱箍看着不起眼,作用却很大。”9月22日,在220 kV 水乡变电站内220 kV 水松线隔离开关更换现场,国网江苏电力检修公司苏州分部变电检修二班王文勇说。水松线隔离开关为GW22/23型,其关节轴承原材料由不锈钢制成,在实际运行和操作过程中,因为不锈钢材质较脆,容易断裂。为此,8月初起苏州分部对所辖220 kV 变电站所有此型号隔离开关的轴承进行了逐步更换。但GW22/23型隔离开关基本安装在母线下方,在母线不停电情况下更换开关轴承,如采用常规的绳子绑扎法来固定其上下导电臂,万一绳子松动,上下导电臂会自动弹回,进而导致隔离开关自动合闸,存在安全隐患。“对此,我们公司相关专家和现场施工人员反复研究试验后制作了一种抱箍。”王文勇说。

随后,他将隔离开关上下导电臂牢牢固定在母线搭接排下方,再拴上捆扎绳,确保上下导电臂不会自动弹回。截至目前,国网江苏电力检修公司已用此装置成功更换轴承180个,确保了更换工作顺利开展。“220 kV 生祠变220 kV 母联2610开关的压力值已降至0.062万千帕,张班长您快过来看一下。”10月14日9时45分,国网江苏电力检修公司泰州运维站检修班班长张顺接到运维人员陆子渊的电话。张顺立即组织检修人员赶赴现场。“若压力值进一步降低将会引起开关分合闸闭锁,这种情况十分紧急。”张顺神情紧张地说。10时45分,检修人员到达现场,经检查初步判断开关存在泄漏问题。但是由于现有设备限制,无法确定具体泄漏点位置。这时,张顺想到前期自己参加了公司组织的GF306型SF<sub>6</sub>气体泄漏红外成像仪培训,该仪器可以辅助检查开关泄漏点。当日下午,泰州运维站就派人赴扬州分部借用仪器。10月15日6时30分,检修人员赶赴生祠变现场,列出最有可能发生漏气的几个位置,并利用气体泄漏红外成像仪逐个检测。两个多小时后,最终确定开关泄漏点位于SF<sub>6</sub>压力表背部底座处。张顺和其他检修人员立即实施设备带电补气 and 初步消缺处理。12时30分,开关检测及补气工作全部完成,生祠变220 kV 母联2610开关SF<sub>6</sub>压力恢复正常。

# 配电通信网技术及维修案例

周俊礼

(南京供电公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:**溧水供电公司的配网通信是利用光纤接入,在农村 10 kV 和 400 V 配电线路上架设一段延伸光缆,实行远程集中抄表,抄表人员从此不用去(用户家里)现场,实现在办公室就能集中抄表,大大地减轻了抄表人员的劳动强度。该项目工作是从 2009 年开始试点的,到目前为止已经扩大为可以集中抄表近十几个大型小区,基本上涵盖了溧水城区所有的住宅大型小区,这是配网通信网工作的第一步。

**关键词:**配网通信技术;网络交换机;远程集中抄表;网络接口

中图分类号:TM727

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0078-03

## 0 引言

农村配电通信技术,在南京溧水供电公司得到应用。它首先要解决的是远程抄表,即抄表人员不用去现场(用户电表所在处),在办公室的电脑上,就能看到用户所用的电量,从而完成了集中抄表。

在住宅用户密集的小区,引用电力网桥集中采集电度量,通过交换机汇集各部分小区,从光纤上传送到集抄中心,集抄中心用一台电脑,作为集中抄表管理机,管理机中安装有集抄程序,它能采集成千上万的居民用户电度表的电度量。

## 1 远程集中抄表的构成

### 1.1 配电网通信的构成

溧水县供电公司目前有十几个住宅小区使用了集中抄表。它们是利用现有变电站的通信光缆和设备资源,再将光缆延伸,延伸的光缆是架设在 10kV 和 0.4kV 的电力线路上的,不外乎这两种情况,系统构成如图 1 所示。

### 1.2 集中抄表的原理组成

目前配网通信的主要任务是集中抄表,图 2 所

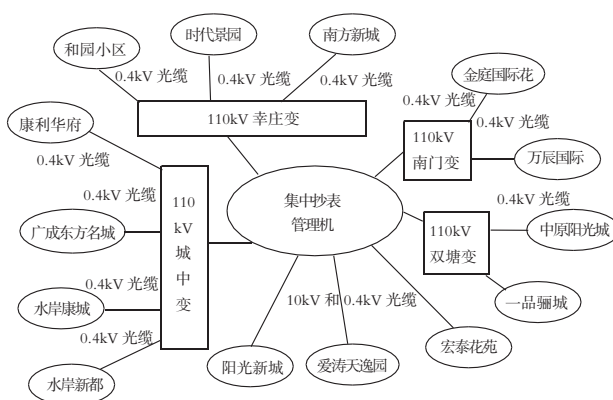


图 1 远程集中抄表系统构成

示画出了某居民小区住宅楼的集中抄表原理框图。

从图 2 中可以看出:集抄管理机中的信息,首先接到(带路由功能的)核心交换机上,从核心交换机的多个端口,分别接到通往各小区的光收发器,光收发器将电信号调制为光信号,通过光纤线路传输到小区配电间,再由光收发器将光信号解调为电信号,从 RJ-45 接口送到小区网络交换机,小区交换机分配到各幢住宅楼的电力网桥上,从电力网桥再分配到各幢楼房的单元(楼梯口)集中电表箱,那是通过 RS-232 送到每个单元的集中电表箱,与电表

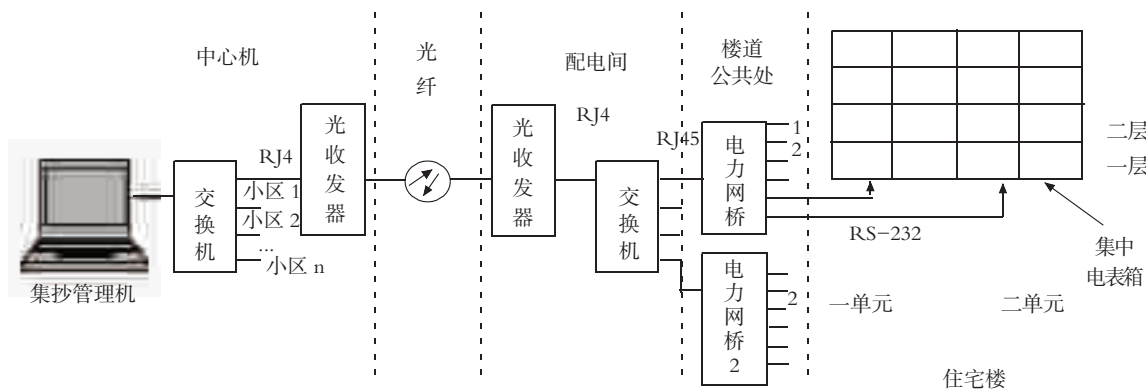


图 2 远程集中抄表框图

上的 RS-232 接口相连,如图 3 所示。

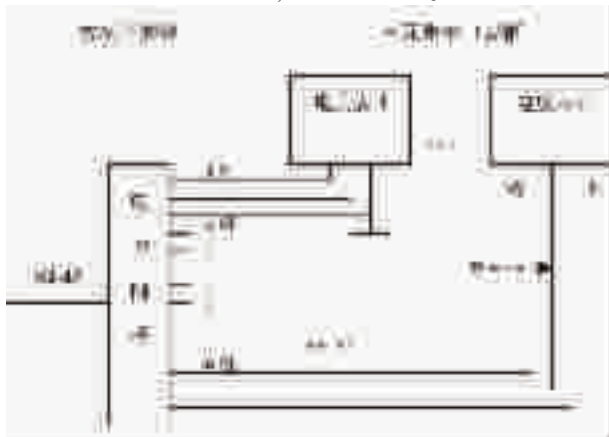


图 3 用户端集中抄表

## 2 配电通信网的测试

### 2.1 集抄中心到个交换机的测试

安装好的集中抄表系统,首先要对它进行测试,才能投入使用。用 ping 命令测试,只能从集抄中心测到配电间的交换机, ping 每个配电间交换机的 IP 地址,如:

```
C:\>ping 192.168.0.107
```

```
Pinging 192.168.0.107 with 32 bytes of data:
```

```
Reply from 192.168.0.107: bytes=32 time<1ms
```

```
TTL=128
```

出现 4 个相同的 IP 包,表示正常。

### 2.2 电力网桥到单元电表箱的测试

从楼房公共处的电力网桥到单元集中电表箱是 RS-232 的接口,对 RS-232 接口的测试很简单,如图 4 所示,只要将末端的 A、B 两点连接起来,始端接到 PC 机的 COM 口上,用测试软件发一批数据包,接收后进行比较,得出百分比。RS-232 的测试软件很多,可以从网上下载。



图 4 RS-232 测试

在实际应用中,有时为了判断故障需要用到两端对测。两端对测时,不仅看是否收到数据,还要看接收端测试的数据结果,必须与发送端发出的数据一致,否则就是两端设备波特率设置不同,就不能正常通信。

### 2.3 电力网桥使用注意事项

(1) 一台电力网桥设备,最多支持 24 个采集端口,即可采集 24 个电表,一个单元如果超过了 24 个电表,就要加一台(或多台)电力网桥。

(2) 从交换机到电力网桥的长度,一般不能超过 90 m。

## 3 维护实例

了解集中抄表原理后,就可以采用相应的方法,来检修故障。下面通过实例,说明各段落故障的排除方法。

### 3.1 网络故障维修

网络故障在集抄中心的核心交换机到配电房交换机之间,当所有用户都不能上传信息时,才能怀疑出现了此类故障,这时先检查核心交换机的面板指示灯状态。举例如下:

(1) 故障现象:全部信息不通,整个网络中没有一个用户电表有上传信息。

(2) 初步分析:①核心交换机故障;②用户侧交换机故障;③集中抄表管理机电脑硬、软件故障。

(3) 故障压缩:①在集抄中心管理机输入端口, Ping 任何一个配电间的交换机都不通;②拔掉核心交换机上所有用户配电间的网络线,逐一插上再 Ping;③当插到南方新城、时代景园以及和园这根网络线时,又出现了全部中断故障。

(4) 故障处理:好像电路中有短路一样,一旦插上那根线立刻都中断。因为南方新城有好多高层住宅,它的用户电表多,所以先到南方新城去检查:发现 1 号交换机的 12 口输出线接到 2 号交换机的 1 口输入,将这根线断开后,1 号交换机工作正常,接上时,1 号交换机的负荷指示剧增,一会功夫便不能工作。

(5) 原因分析:经过反复试验,确认是 1 号交换机 12 口连接到 2 号交换机 1 口的网线,引起的故障。于是立即查找出了这两个交换机之间的备用网线,发现 1 号交换机 24 口与 2 号交换机的 13 口被连通了,如图 4 所示。立刻想起了 1 号交换机的网络生成树出问题了,使两个交换机之间的连接构成回路,就会出现死循环。

故障点:经查是南方新城 1 号交换机的网络生成树设置被修改。

结论:两个交换机之间的两条网线不能同时连通。

### 3.2 光缆故障维修

一个小区的网络信号,是从集抄中心交换机端口分路,通过光缆、光收发器送到小区配电间的,光路传输过程中发生故障,会使整个小区的用户采集不到电度量,检查的重点是光缆、光收发器以及小区的交换机等等。举例如下:

(1) 故障现象:某小区所有用户全都无法采集

到电度量。

(2) 初步判断:①两端光收发器故障;②光缆故障;③小区交换机故障。

(3) 故障压缩:①首先在采集中心,将对应该小区光收发器的网线从交换机的端口拔下,插到别的接口上,任意 Ping 小区交换机网关等地址都不通。②到小区配电间,在其交换机的任意一个端口接入手提 PC 机 Ping 不通;又接在小区光收发器端口上还是 Ping 不通,至此可以断定是光路故障。注意:在这两步判断过程中,可以先看一看光收发器的指示灯状态,大致认定故障范围。

(4) 故障处理:在中心机房用光时域反射仪(OTDR)和光功率计测试光纤时,发现其中一根光纤的衰减很大,并且发现其衰减值或大或小的变化。迅速赶到该配电间,问现场人员刚才动什么了,回答是:刚才检修时动了尾纤,经检查发现尾纤没有圈好,是乱塞在柜子里的,经过反复试验发现是尾纤较乱,有的小圈曲率半径太小,导致光衰减很大,将其放松并均匀圈大扎住后,恢复正常。

(5) 原因分析:光(尾)纤的曲率半径小到一定数值,光的衰减增大,会使光收发器接收到的光信号减弱,导致网络中断。故障点:尾纤很乱,最小的圈子,曲率半径不到 2.5 cm。

结论:光纤的曲率半径,理论上要求大于或等于 17 cm,实际使用中一般只要保证大于 5 cm,并且圈的均匀就不会出现故障。

### 3.3 用户故障维修

如果一个用户的电表信息传不上来,那就要深入到小区,检查该用户电表是否有问题导致没有信息上传,还是电表到电力网桥以及它们之间连接线出了故障。举例如下:

(1) 故障现象:某小区单一用户电表的电度量无法上传。

(2) 初步判断:①用户电表以及点表内采集电路故障,导致无信息送出;②电表内 RS-232 接口烧坏;③小区电力网桥到用户之间的线路某处断线:

④电力网桥对应该用户的端口坏。

(3) 故障压缩:①首先到小区检查电力网桥检查对应的端口,看指示(绿)灯是否亮,若指示灯不亮,就测量 RS-232 收端对地的电压,正常在 7~9 V;②如果测不到电压,则到用户端去检查电表的 RS-232 接口;③如果 RS-232 线是好的,那么只有怀疑电表坏了。

(4) 故障处理:到小区检查电力网桥对应指示(绿)灯不亮时,再检查 RS-232 的三根线之间没有电压,当检查到收端对地的电压为 0 V 左右时;去检查电表及其电表内 RS-232 接口时,发现接口的三根线中,其中接地线松动,用手一瓣就断了。

(5) 原因分析:地线断线 RS-232 不能构成回路,当然不能把电表信息上传到集抄中心。

故障点:在用户电表内的 RS-232 的地线松动烧断。

结论:对于电表及内部的 RS-232 接线中,接地线不能马虎,它和收、发线作用一样,松动或断开时,就不能传递信息了。

## 4 结束语

配网通信技术解决了远程抄表的问题,抄表工作人员不用去现场,在办公室就能很轻松地进行集中抄表,大大地减轻了抄表工作人员的劳动强度。溧水供电公司从 2009 年开始试点,实行远程集中抄表,到目前为止已经扩大到近二十多个大型住宅小区,涵盖了溧水城区所有最大的住宅小区,这些大型小区都可以集中抄表。

集中抄表是配电网通信技术实现的第一步,并且这仅仅在溧水城区住宅密集小区的试用,还有待推广到农村,配网通信网工作任务道远。

### 参考文献:

[1] 电脑报社.组网局域网[M].重庆:重庆出版社.2003.7.

作者简介:

周俊礼(1958),男,南京溧水人,高级工程师,长期从事电力系统通信运行、维护工作。

## 迎峰度冬 加强安全施工

近期,气温逐渐下降,辖区居民用电负荷增加,为保障居民冬季用电安全,聚能农电公司栖霞供电所加强对各个台区农网工程的安全施工,确保迎峰度冬平稳进行。

2014年11月11日下午,由栖霞所技术员带队,所长、副所长、安全员一同前往方庄施工现场,对工程队施工安全进行突击检查。抵达现场后,该所安全员首先对施工队工作票进行了检查,技术员及所长对施工现场安全措施进行检查,发现该施工队对安全工作夜是相当重视,各项安全措施准备有序、到位,并未发现违章现象。

同时,供电所检查人员对施工队队长提出了施工工作要求,要求该施工队在施工期间要绷紧安全这根弦,做好工作票制度,严格执行公司要求的各项安全措施,不仅要抓进度更好抓好安全工作。

摘自《江苏电力信息网》

# 基于可靠性的110 kV输电线路停电优化方案

李懂理,刘倩,丛云

(南京供电公司,江苏 南京 210019)

**摘要:**110 kV输电线路是高压输电网向中低压配电输送负荷的桥梁,是城市电网的重要组成部分。随着社会经济的发展,用电负荷的日益增长,电网运行人员和电力用户对可靠性的要求越来越高。与此同时电网改造、市政工程等引起的输电线路停电却不断增加。如何在保证工程正常进行的前提下,最大限度的降低电网风险,提高可靠性,优化停电方案就成为关键。本文在介绍变电站可用系数、输电回路可用系数、变电站电源综合可靠系数三个可靠性指标和基于可靠性的停电方案编制原则的基础上,通过立临时塔、拆搭头、线路搭接三个典型案列来说明怎样根据具体情况来编制合理的停电方案以提高可靠性指标以及在实际工作中应注意的问题。

**关键词:**可靠性;指标;输电线路;停电方案

中图分类号:TM732

文献标识码:B

文章编号:1009-0665(2014)S2-0081-04

## 0 前言

110 kV输电线路是高压输电网向中低压配电输送负荷的桥梁,是城市电网的重要组成部分。随着社会经济的发展,用电负荷的日益增长,电网运行人员和电力用户对系统可靠性的要求越来越高。同时随着城市的发展,输电线路走廊日趋紧张,输电线路同杆双回架设已成为趋势。同杆双回架设在节省输电走廊的同时却给输电线路检修带来不便。与此同时电网改造、市政工程等引起的输电线路停电却不断增加。目前输电线路绝大部分都为同杆双回架设,由于部分同杆架设的两回线路为同一变电站仅有的两回电源,两回线路不能同时停电。同时由于可靠性的要求部分输电线路不能全停或者长时间停电,因此工程施工前就需要编制合理的停电方案,最大限度的降低电网风险,提高可靠性指标。目前大部分110 kV输电线路以220 kV变电站作为电源馈供一个或多个110 kV变电站,部分110 kV线路作为220 kV变电站间的110 kV联络线。由于电力负荷密度的增加,110 kV线路经常T接多个110 kV变电站。目前对于可靠性的研究较多并逐渐成熟,可靠性的指标也逐渐完善。对于输电线路停电方案的编制方面,多数是从技术可行性和现场安全的角度去研究,甚少考虑电网可靠性的要求。本文在介绍可靠性指标和基于可靠性停电方案编制原则的基础上,通过立临时塔、拆搭头、线路搭接三个典型案列来说明怎样根据具体情况来编制合理的停电方案以提高可靠性指标以及在实际工作中应注意的问题。

## 1 可靠性指标及编制原则

### 1.1 可靠性指标

与输电线路停电方案编制有关的可靠性指标包括变电站可用系数、输电回路可用系数、变电站电源综合可靠系数

#### 1.1.1 变电站可用系数

变电站可用系数 = (可用时间 / 统计时间) × 100%

#### 1.1.2 输电回路可用系数

回路可用系数指统计时间与停运时间(不含调度停运时间,同时考虑折算系数)的差值同统计时间比值的百分数。

输电回路可用系数 =  $[1 - (\sum \text{回路停运时间} \times \text{折算系数}) / \text{统计时间}] \times 100\%$ 。

当回路功能部分丧失时,该回路停运事件应统计折算系数。

输电回路的折算系数 = 实际停运侧数 / (总侧数 - 1)

#### 1.1.3 变电站电源综合可靠系数

变电站电源综合可靠系数 =  $[(\sum \text{变电站电源可靠率} \times \text{时间}) / \text{统计时间}] \times 100\%$

单电源变电站:变电站电源可靠率 = 电源进线可靠率

双电源变电站:变电站电源可靠率 =  $1 - (1 - \text{电源进线一可靠率})(1 - \text{电源进线二可靠率})$

### 1.2 编制原则

基于可靠性的停电方案的编制原则就是通过各种方法提高工作期间的各项可靠性指标。

1.2.1 尽量减少变电站的全停时间,提高变电站可用系数。

1.2.2 尽量减少工作期间输电回路中停电变电站的数量,提高输电回路可用系数。

1.2.3 尽量不减少变电站的进线电源数,提高变电站电源综合可靠系数。

## 2 典型案例

### 2.1 同杆双回线路下方立塔施工的停电方案

#### 2.1.1 案例

110 kV 高山线、殷山线为 110 kV 东山变仅有的两路电源,高山线 #42 塔(同杆殷山线 #52)需更换,新立铁塔在原双回路线路下方,立塔时需双回路停电。由于高山线、殷山线为 110 kV 东山变仅有的两路电源,东山变负荷无法全部转移,调度要求双回线路不能同时停电。如图 1。

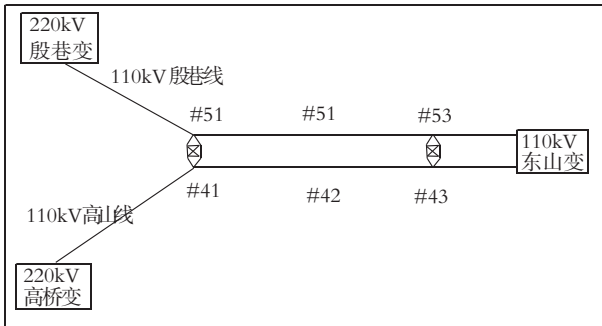


图 1

#### 2.1.2 停电方案

这种情况下需做临时塔,分三次停电。

第一次停电停高山线,在高山线 #42 塔右侧(面向东山变方向,下同)新立临时塔一基,将高山线 #41-#43 杆导线迁移到临时塔上。如图 2。

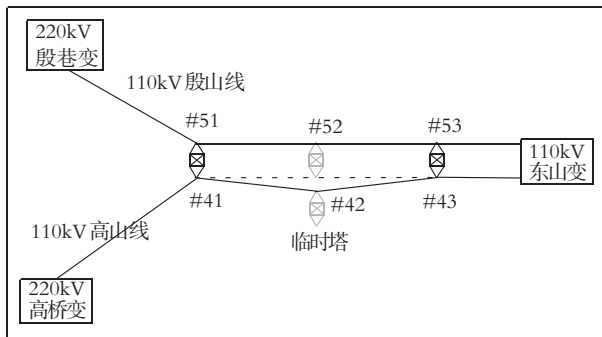


图 2

第二次停电停殷山线,在殷山线下方组立殷山线新 #52 塔,将殷山线 #51-#53 塔导线迁移到新 #52 塔上,拆除老 #52 塔。如图 3。

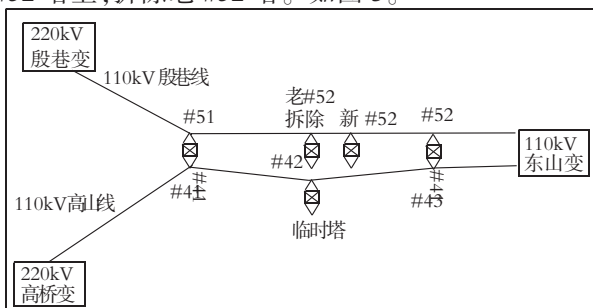


图 3

第三次停电停高山线,将高山线 #41-#43 杆导线由临时塔迁移到新立 #42 塔上,临时塔拆除。如图 4。

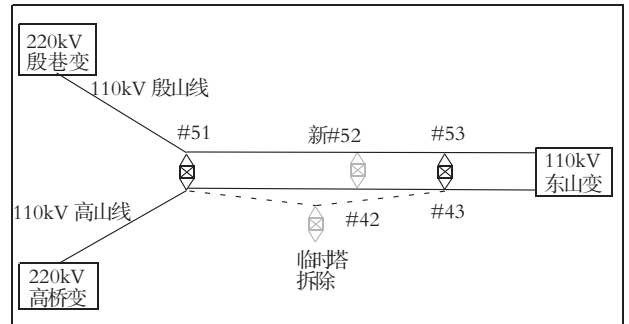


图 4

#### 2.1.3 指标分析

在此方式下分析东山变的变电站可用系数。

如双回路全停立塔假定需要 2 天;当月按 30 天统计,当月东山变的变电站可用系数 =  $[(30-2)/30] \times 100\% = 93.3\%$ 。

如采用此方案停电检修,变电站不需全停,当月东山变的变电站可用系数 = 100%。

由数据可以看出采用此方案可较大提高变电站的可用系数。

#### 2.1.4 小结

此停电方案适合同杆双回不能同时停电的线路。此方案需做临时塔,增加了临时塔的费用,实际工程中为了降低费用,临时塔右侧的横担不安装,或采用单回路铁塔,或者采用水泥杆。

此方案实施时应注意以下几点:

(1)应先停靠近临时塔侧的线路。

(2)临时塔塔位在可能的情况下应距离原线路一定距离以保证在停电前将临时塔组立完成,这样可以减少线路停电时间。

(3)将线路移至临时塔时应考虑前后耐张铁塔的转角度数、档距是否满足杆塔的使用条件或者直线杆塔兼小角度转角时转角度数不宜大于 3 度,同时还应考虑尽量减少导线因不够长而接续或新放,这就要求临时塔塔位不能离原线路太远。

(4)虽然临时塔的使用时间很短,但应以常规铁塔的标准来建立以保证线路的安全运行。

## 2.2 线路中段部分线路检修的停电方案

### 2.2.1 案例

110 kV 殷民线 #40-#41 杆间电缆故障,需将殷民线停电处理。由于电缆故障定位及处理时间较长,需要殷民线停电 10 天时间。殷民线停电期间 110 kV 吉龙变、110 kV 民营变、110 kV 小龙湾变均为单电源,如果另一电源发生故障将导致 110 kV 变电站全停,运行方式较为薄弱。如图 5。

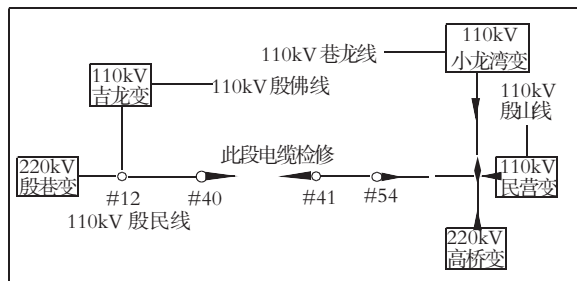


图 5

### 2.2.2 停电方案

这种情况下需拆线路搭头,由220变电站经部分线路供相应的110 kV变电站。此方案需分三步。

第一步殷民线短时全线停电,拆除殷民线#40、#41杆电缆搭头并保持断开。如图6。

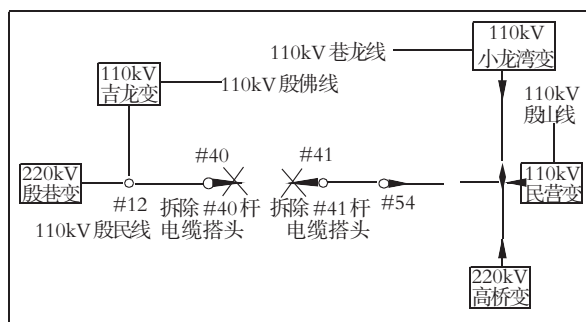


图 6

第二步,殷民线除#40-#41杆间电缆外线路其它杆段送电,由220殷巷变供110 kV蛟龙变,220高桥变供110 kV民营变、110 kV小龙湾变, #40-#41杆间电缆检修。如图7。

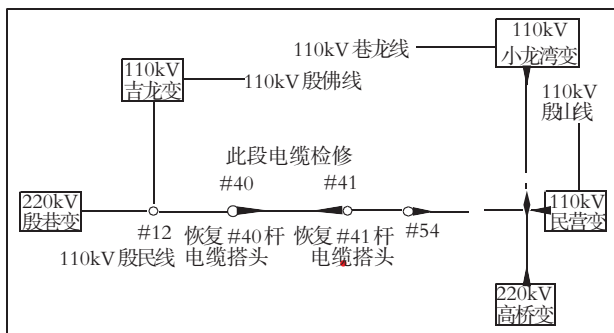


图 7

第三步电缆检修完工后,殷民线短时全线停电,恢复殷民线#40、#41杆电缆搭头,线路恢复正常运行方式。如图8。

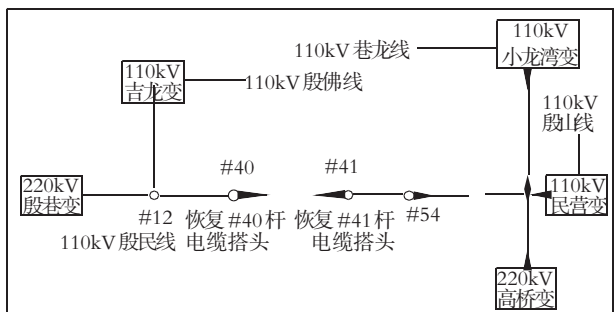


图 8

### 2.2.3 指标分析

在此方式下分析殷民线的输电回路可用系数。

在线路拆搭头、恢复搭头时整条线路停电,包括每次工作的前备用、后备用时间在内,拆搭头、恢复搭头时整条线路停运的时间按4小时计算,共计8小时;电缆检修工作时间 $10 \times 24 = 240$ 小时;当月(30天)统计时间 $30 \times 24 = 720$ 小时。

如整条线路停电检修,当月殷民线的输电回路可用系数 $= [1 - (240 \times 1) / 720] \times 100\% = 66.7\%$ 。

如采用此方案停电检修,当月殷民线的输电回路可用系数 $= [1 - (8 \times 1 + 240 \times 0) / 720] \times 100\% = 98.9\%$ 。其中此方案下电缆检修时的折算系数 $= 0 / (5 - 1) = 0$ 。

由数据可以看出采用此方案可较大提高输电回路的可用系数。

### 2.2.4 小结

此停电方案适合含有支线且检修杆段不在电源侧的线路。

此方案实施时应注意以下几点:

(1) 拆除的搭头可以是电缆搭头也可以是线路耐张杆塔搭头。

(2) 为了保证检修工作的安全距离,拆除搭头的位置可以前后移动,只要不超过分支点就可以。

(3) 此方案可能有变电站失去一路电源,但拆搭头位置应尽可能的使更多的变电站的电源点不减少,即输电回路的折算系数降低。

## 2.3 两条同杆线路部分杆段同时检修的停电方案

### 2.3.1 案例

110 kV苏殷线#51-#53杆段与110 kV殷天线#3-#1杆段同杆架设,110 kV苏殷线#53至殷巷变电缆与110 kV殷天线#1-殷巷变电缆同沟敷设,现110 kV苏殷线#53至殷巷变电缆与110 kV殷天线#1-殷巷变电缆需同时停电检修,由于停电时间较长,殷天线停电期间110 kV天井山变为单电源,如果另一电源发生故障将导致110 kV天井山变全停,运行方式较为薄弱。如图9。

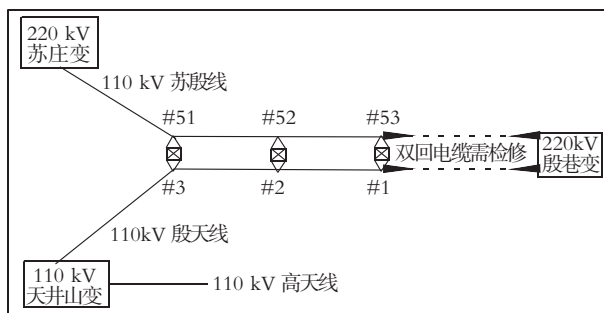


图 9

### 2.3.2 停电方案

这种情况下由于苏殷线可由220 kV苏庄变供

电, 可将殷天线与苏殷线搭接, 110 kV 天井山变由 220 kV 苏庄变经苏殷线、殷天线供电。此方案需分三步。

第一步苏殷线、殷天线同时停电, 拆除苏殷线 #52 塔、殷天线 #2 塔搭头并保持断开, 将殷山线在 #2 塔加号侧与苏殷线搭通。如图 10。

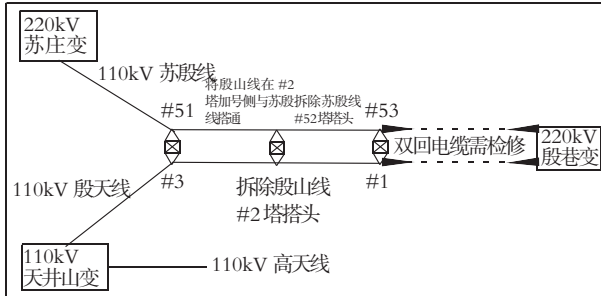


图 10

第二步苏殷线苏庄变 #52 塔、殷山线 #2 塔 - 天井山变送电, 苏殷线 #52 塔、殷天线 #2 塔搭头并保持断开, 苏殷线、殷天线殷巷变侧保持检修状态, 苏殷线 #53 至殷巷变电缆与殷天线 #1 - 殷巷变电缆便可同时停电检修。如图 11。

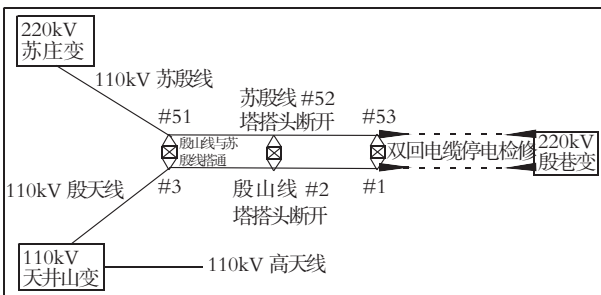


图 11

第三步电缆检修完工后, 苏殷线、殷天线同时停电, 恢复苏殷线 #52 塔、殷天线 #2 塔搭头, 拆除殷山线与苏殷线的搭接线, 完工后两条线路即可正常送电, 线路恢复正常运行方式。如图 12。

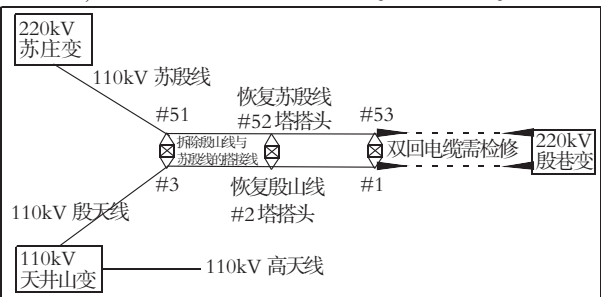


图 12

### 2.2.3 指标分析

在此方式下分析天井山变的变电站电源综合可靠系数。

在线路搭通、拆搭接线时殷天线停电, 包括每次工作的前备用、后备用时间在内, 拆搭头、恢复搭头时殷天线整条线路停运的时间按 4 小时计算, 共计 8 小时; 电缆检修工作时间  $10 \times 24 = 240$  小时; 当

月 (30 天) 统计时间  $30 \times 24 = 720$  小时; 假定天井山变的两条电源进线殷天线、高天线的可靠率均为 0.99。

高天线单线供天井山变时: 天井山变的变电站电源可靠率 = 0.99。

高天线、殷天线双线供天井山变时: 天井山的变电站电源可靠率 =  $1 - (1 - 0.99)(1 - 0.99) = 0.9999$ 。

如不采用搭接方案, 当月天井山变的变电站电源综合可靠系数 =  $\{[0.9999 \times (720 - 240) + 0.99 \times 240] / 720\} \times 100\% = 99.66\%$ 。

如采用搭接方案, 当月天井山变的变电站电源综合可靠系数 =  $\{[0.9999 \times (720 - 8) + 0.99 \times 8] / 720\} \times 100\% = 99.979\%$ 。

由数据可以看出采用此方案可较大提高变电站电源综合可靠系数。

### 2.3.4 小结

此停电方案适合两条线路同杆架设或距离较近的线路。

此方案实施时应注意以下几点:

(1) 拆除的搭头可以是电缆搭头也可以是线路耐张杆塔搭头。

(2) 为了保证检修工作的安全距离, 拆除搭头的位置可以前后移动, 只要不超过搭通点就可以。

(3) 线路搭通应保证同相位搭通, 搭通后应进行核相工作以确保相位正确。

## 3 实际编制方案时应注意问题及建议

3.1 在编制输电线路停电方案时除应从输电线路本身考虑技术性和安全性, 还应兼顾大局尽量提高整个系统的可靠性。

3.2 上文所述三个案例均为较简单的典型案例, 实际工作中遇到的问题相对复杂一些, 例如临时塔, 拆搭头、搭通线的数量较多。

3.3 对于一些较为复杂的停电方案可能同时需要以上三种方法中的两个或三个同时使用。

3.4 制定停电方案时要与调度运方沟通以确定哪些线路、变电站可以停电或长时间停电, 哪些不能。

3.5 制定停电方案时要与调度保护沟通以确定线路运行方式改变后保护是否满足要求。

3.6 停电方案要提前到设计时就考虑, 以便确定施工方案设计和临时方案设计。

3.7 在制定停电方案前要对现场进行勘察, 同时需对相关的设备运行方式进行了解, 只有对以上两点了解清楚后才能因地制宜的制定出切实可行的停电方案。

参考文献:

(下转第 89 页)

# 南京苏南现代化电网评估指标体系研究

李 晨,肖 晶,王自桢,周恒俊,李 雪,饶 莹

(南京供电公司,江苏 南京 210019)

**摘 要:**为服务南京苏南现代化示范区规划建设,本文提出了通过构建苏南现代化电网评价指标体系来回答“什么样的电网是苏南现代化电网,现状电网与现代化电网的差距在哪,怎么系统的、分步骤的构建苏南现代化电网”等关键问题的思路和方法,并分别通过构建“全系统、分步骤、可操作”的电网版指标体系和“可感知、可参与、可评价”的社会版指标体系,来寻找电网现代化与城市现代化的内在联系,诠释苏南现代化电网的内涵和外延。通过苏南现代化指标体系的构建,清晰的绘制了南京苏南现代化电网的实施路线图,也为全国全省电网现代化建设开辟一条新的途径。

**关键词:**苏南;现代化;电网;指标体系

**中图分类号:**TM715

**文献标识码:**B

**文章编号:**1009-0665(2014)S2-0085-05

## 0 引言

2013年4月底,《苏南现代化建设示范区规划》(简称《苏南规划》,下同)获国务院批复,成为我国首个以现代化建设为主题的区域规划。本文在南京开展城市饱和负荷研究、基于可靠性的电网规划、智能高效运行评估指标体系等研究的基础上,提出了构建与苏南现代化建设示范区规划相适应的现代化电网评估指标体系的思路和方法,以便为全国全省实现电网现代化提供借鉴。

## 1 现代化电网评价的意义和要求

### 1.1 评价意义

如何满足苏南现代化全方位的发展要求,助力苏南现代化规划实践,实现电网社会价值的最大化成为现代化电网规划建设的关键问题。鉴于此,构建科学、合理、系统的南京苏南现代化电网的评估指标体系势在必行。

### 1.2 苏南现代化对电网的新要求

(1)适应支撑能源结构优化调整。要求电网增强对分布式光伏等新能源的适应能力。

(2)有力助推社会经济转型升级。要求电网进一步提高电网的供电可靠性水平和供电质量,支撑相关产业转型升级。

(3)有机融入城乡一体发展。要求电网在注重差异化发展的基础上,更加注重发展的系统性和协调性,有机融合城乡电网,全面提升电网的发展水平。

(4)主动服务生态民生改善。要求电网更加注重与周边环境的和谐统一,更加主动的服务社会和民生改善,以更优质的服务、更先进的技术让民众得

实惠,让社会更美丽。

### 1.3 苏南现代化电网内涵和外延

#### (1)苏南现代化电网的内涵。

分析苏南现代化对电网的新要求,与传统配电网相比较,“现代化”电网应朝着具备安全、可靠的电网网架结构,优质的电能质量和供电服务水平,成本和效益均衡,信息化、自动化和互动化兼备,让社会和民众更加满意的总体方向和总体目标发展,主要表现为电网的“安全性、可靠性、优质性、经济性、智能性”5大方面<sup>[1,2]</sup>。

#### (2)苏南现代化电网的外延。

苏南现代化电网的外延是从社会和民众的需求角度出发,从社会和民众最关心的电网发展目标给出现代化电网对于城市的表现形式。主要表现为:配网发展方向,是否顺应社会和科学技术发展方向,与政府、企事业单位、民众等社会元素的愿景一致;配网内部提升,能否解决社会最关心的问题,能否能促进社会进步、惠及大众、反哺于社会。

## 2 苏南现代化指标体系构建

### 2.1 核心理念

为寻找电网现代化与城市现代化的内在联系,搭建电网现代化为城市现代化服务的支撑桥梁和联系纽带,本文提出了构建电网版和社会版两套指标体系。电网版指标体系反映现代化电网的内涵,旨在从电网专业技术角度出发,以满足城市现代化“五位一体”发展需求为导向,系统、全面、深入的构建以“可靠性为核心、智能化为导向、全生命周期为经济校核”指标体系,全面指引电网现代化发展。

社会版指标体系反映现代化电网的外延,由电网版指标体系转化而来,旨在从城市和民众的直接感知度出发,由电网关键指标入手,构建以“可感知、

可评价、可参与”的现代化指标体系,全面支撑苏南现代化示范区建设。

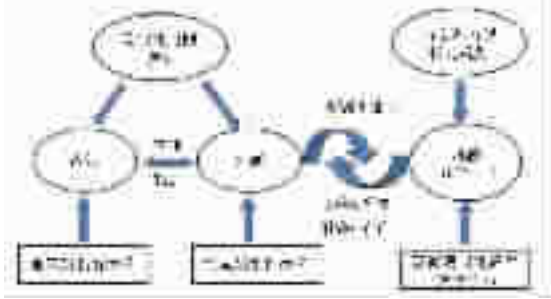


图1 苏南现代化电网指标体系核心理念图

## 2.2 电网版指标评价体系

### 2.2.1 构建原则

从 SMART 准则的基本要求出发,结合南京苏南现代化电网的界定,遵循客观性、系统性、实用性、科学性原则构建南京苏南现代化电网指标体系<sup>[3-5]</sup>。

### 2.2.2 指标体系和评估方法

依据指标体系的构建原则,构建指标体系如表1所示,整个指标体系包含四级指标,其中一级指标即苏南现代化电网,包含安全性、可靠性、经济性、优质性和智能性五个二级指标,在二级指标的基础上,衍生出15个三级指标,三级指标又进一步细化为47个四级指标。南京苏南现代化电网指标体系采用层次分析法、模糊综合评价法和德尔菲法相结合的综合评价方法。

### 2.2.3 多指标综合评估方法

南京苏南现代化电网指标体系中包含许多崭新的电网评价指标,如可控分布式电源容量占比、电网信息互动用户占比等,现有的评估方法已不能满足该指标体系对评估方法的适用性和可操作性的要求<sup>[6-8]</sup>,本文在南京苏南现代化电网指标体系建立的基础上,采用层次分析法、模糊综合评价法和德尔菲法相结合的综合评估方法作出一个全局性、整体性的判断<sup>[9,10]</sup>。即选用鲁棒性较强的层次分析法对递阶层次结构的各级指标权重进行设置,采用模糊综合评价法对单个评估指标进行状态判断,采用概率统计方法与德尔菲法相结合的方法来确定评估指标的判据,具体步骤如下所述:

(1)设置评估指标的权重。

①根据对各层指标两两之间重要程度的分析形成判断矩阵;

②计算判断矩阵的最大特征根及其对应的特征向量;

③将判断矩阵最大特征根对应的特征向量归一化,得到各单层指标相对与其直接上级指标的单排序权重;

④进行单排序一致性校验,如通过校验则继续

步骤⑤,如未通过一致性校验则返回步骤①;

⑤进行层次总排序一致性校验,如通过校验则继续步骤⑥,如未通过一致性校验则返回步骤①;

⑥基于单排序权重的计算结果求得各单项指标的层次总排序权重 $\alpha_i$ 。

(2)设定指标的评分标准。

对于定量指标,为表征指标评分随指标值变化的走势,需设定指标评分曲线,设定方法如下:首先是确定关键评分点以及关键评分点所对应的评分值,对于可取得较大数据样本的评估指标可采用概率统计方法或者概率统计与德尔菲法相结合的方法来获得评分值,其它指标则可采用德尔菲法,利用专家经验确定关键评分点的评分值;其次确定评估指标关键评分点在平面直角坐标系(x轴为指标值,y轴为评分值)中的坐标值,以此为基础可绘制得到该指标的评分曲线,此即为模糊综合评估方法中的隶属度函数曲线;最后基于评分点坐标值,利用分段线性插值的方法可得到相邻两个评分点之间的分段函数。

对于定性指标,将指标的性能级别(优、良、中、较差、差)分别对应关键评分点,可由性能级别和评分的对应关系得到该指标的评分值。

(3)计算分析评估对象的各项指标,依据步骤(2)相关标准对指标评分。

对评估对象的电网进行详细的调研和分析,计算定量指标的指标值 $r_i$ ,分析定性指标所处的性能级别,依据步骤(2)中的评分标准得到各项指标的评分 $r_i$ 。

(4)综合评分。

基于步骤(1)得到的权重和步骤(3)得到的指标评分值,计算评估对象的综合评价值 $S$ ,计算方法如下式所示,式中 $n$ 为低层指标总个数。

$$S = \sum_{i=1}^n r_i \alpha_i$$

$\alpha_i$ :各单项指标的层次总排序权重

$r_i$ :各项指标的评分

### 2.2.3 评估结果分析

通过上述多指标综合评估方法对2012年南京、北京、上海电网进行评估,将南京电网评估结果与北京、上海电网评估结果做一个横向对比,可以发现南京离北京、上海电网仍有一定的距离。在各分项指标上,南京与北京、上海的安全性评估指标、优质性评估指标差距较小,在可靠性指标、经济性指标上有一定的差距,而在智能性评估指标上的差距较大,如图2所示。

表 1 南京苏南现代化电网版指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	四级指标
苏南现代化电网(47)	A.安全性(6)	A1.供电能力(2个)	A1-1.容载比 A1-2.重载设备占比
		A2.转供能力(2个)	A2-1.输电网 N-1 通过率 A2-2.中压配电线路 N-1 通过率
		A3.适应能力(2个)	A3-1.分布式电源消纳率 A3-2.微网接入能力
	B.可靠性(6)	B1.系统可靠性(2)	B1-1.用户平均停电次数 B1-2.供电可靠率
		B2.设备可靠性(2)	B2-1.输变电系统可用系数 B2-2.设备故障停电率
		B3.管理与技术可靠性(2)	B3-1.不停电作业占比 B3-2.状态检修覆盖率
	C.经济性(10)	C1.综合经济性(4)	C1-1.综合线损率 C1-2.电网峰谷差率 C1-3.最大负荷(大于 80%)持续时间占比 C1-4.万元产值综合能耗下降率
		C2.建设经济性(2)	C2-1.单位资产年售电量 C2-2.单位资产年最大供电负荷
		C3.运行经济性(4)	C3-1.配电网轻载设备占比 C3-2.配电网主变负载不均衡度 C3-3.配电网线路负载率与经济运行负载率的偏差 C3-4.每万元电网投资年运行维护费用
		D1.电能质量(3)	D-1.综合电压合格率 D-2.谐波合格率 D-3.三相电压不平衡度
D.优质性(9)	D2.优质服务(3)	D2-1.故障抢修时间达标率 D2-2.客户业扩服务时限达标率 D2-3.第三方客户满意率	
	D3.发展协调性(3)	D3-1.单位变电容量占地面积 D3-2.单位输电容量通道宽度 D3-3.市场占有率	
	E1.信息化水平(6)	E1-1.智能化变电站占比 E1-2.用电信息采集率 E1-3.输变电设备在线监测覆盖率 E1-4.自动化终端覆盖率 E1-5.智能电表覆盖率 E1-6.营配调数据集成清理准确率	
E.智能性(16)	E2.自动化水平(5)	E2-1.智能调度技术支持能力 E2-2.配电网故障正确动作率 E2-3.自动电压控制系统(AVC)可调无功容量占比 E2-4.配网信息自动统计率 E2-5.停电信息自动发布率	
	E3.互动化水平(5)	E3-1.可控分布式电源容量占比 E3-2.可调电源容量占比 E3-3.动态电价用户占比 E3-4.可控负荷的容量占比 E3-5.电网信息互动用户占比	

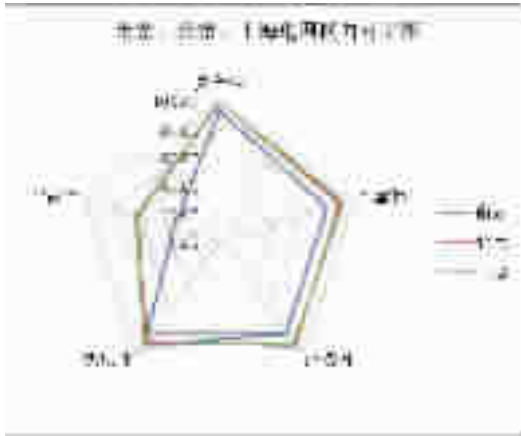


图2 南京、北京、上海电网横向对比图

### 2.2.5 分阶段设定实施目标

根据南京电网实际以及苏南现代化示范区建设要求,为指引现代化电网目标实现,通过与北京、上海等先进电网的横向对比,设定关键的发展阶段评分:指标体系总评分在90分至95分之间为基本建成“世界一流”的现代化电网。指标体系总评分在95分至100分之间为全面实现电网现代化,并在此基础上提出了南京电网“三步走”战略:第一步,到2015年,全面推进现代化电网规划建设,对应指标体系评分在85分至90分之间;第二步,到2020年,基本建成“世界一流”的现代化电网,对应指标体系评分在90分至95分之间;第三步,到2030年,全面实现电网现代化,对应指标体系评分在95分至100分之间。

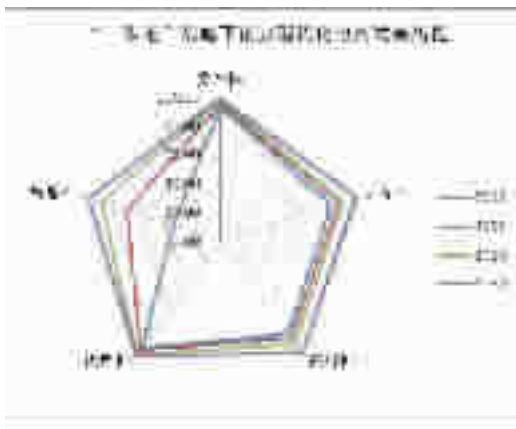


图3 “三步走”战略下南京电网现代化发展历程

## 2.3 社会版指标评价体系

### 2.3.1 构建原则

(1)注重目标导向,与苏南现代化“五位一体”建设内容及指标体系相对应,搭建电网现代化与苏南现代化的桥梁。

(2)按照民众“可感知、可参与、可评价”的原则构建,对配网内涵性指标体系进行了翻译和简化,反映了电网发展服务于社会的根本目的。

(3)指标体系由政府、社会、大众关心的电网关键指标组成,可以使城市和电网的决策者、参与者关注与现代化相关的关键问题和发展方面,从而形成共同的发展理念,实现相互支撑、相互支持。

### 2.3.2 指标体系

依据构建原则,提出社会版指标体系,其中第一层级是电网发展的总体目标,即实现电网最大社会价值,第二层级是电网外部表现5大发展方向,包含可靠电力“放心”、优质电力“贴心”、和谐电力“惠心”、智能电力“省心”、绿色电力“安心”(简称“五心”电网),第三层,在“五心”电网要求基础上,进一步衍生出15个基层指标,详细情况见表2所示。

表2 南京苏南现代化电网社会版指标体系

一级指标	二级指标 (“五心”电网)	基层指标
实现社会 价值最大化	可靠电力放“心”	用户平均停电时间
		用户平均停电次数
		综合电压合格率
	优质电力贴“心”	故障抢修响应时间
		客户业扩服务时限达标率
		居民户均用电容量
	和谐电力惠“心”	单位GDP电能消耗
		接入电网半径
		电动汽车充电桩密度
	智能电力省“心”	智能用电覆盖率
		智能电表覆盖率
		电网信息互动用户占比
	绿色电力安“心”	清洁能源发电容量占比
		清洁能源并网消纳率
		电力环保达标率

社会版指标体系应注重为政府、社会、大众提供一个较为形象的指标评价描述方法,指标评价计算可以采用加权方法进行,具体权重设定应广泛征询政府主管部门、企事业单位、居民代表等相关方意见,并采用德菲尔等方法进行系统分析后确定。

## 4 结束语

苏南现代化指标体系从苏南现代化“五位一体”的发展要求出发,构建了“全系统、分步骤、可操作”的电网版指标体系和“可感知、可参与、可评价”的社会版指标体系两套互为一体的指标体系,并应用层次分析法、模糊综合评价法和德尔菲法相结合的多指标综合评估方法,对现状和规划电网进行量化评分,回答了“什么样的电网是苏南现代化电网,现状电网与现代化电网的差距在哪,怎么系统的、分步骤的构建苏南现代化电网”等关键问题,为苏南现代化电网建设提供了有效的途径。

参考文献:

- [1] 何光宇,孙英云,梅生伟,等.多指标自趋优的智能电网[J].电力系统自动化,2009,33(17):1-5.
- [2] 倪敬敏,何光宇,沈 沉,等.美国智能电网评估综述[J].电力系统自动化,2010,34(8):9-13.
- [3] 谭 伟,何光宇,刘 锋,等.智能电网低碳指标体系初探[J].电力系统自动化,2010,34(17):1-5.
- [4] 王 彬,何光宇,等.智能电网评估指标体系的构建方法[J].电力系统自动化,2011,35(23):1-5.
- [5] 孙 强,葛旭波,刘 林,等.国内外智能电网评估体系对比分析[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(6):105-110.
- [6] 肖 峻,高海霞,葛少云,等.城市中压配电网评估方法与实例研究[J].电网技术.2005,29(20):77-81.
- [7] 肖 峻,崔艳妍,王建民,等.配电网规划的综合评价指标体系与方法[J].电力系统自动化. 2008,32(15):36-40.
- [8] 刘璐洁,胡 荣,符 杨,等.基于节约理念的配电网规划方案综合评价[J].电网技术.2008,32(16):66-70.
- [9] 顾基发.评价方法综述.科学决策与系统工程[M].北京:中国科学技术出版社,1990,22-26.
- [10] 何永秀,等.电力综合评价方法及应用[M].北京:中国电力出版社,2011.10.
- [11] 黎灿兵,梁锦照.电网差异化规划新方法[J].电力系统自动化,2009(24):36-40.

---

作者简介:

- 李 晨(1980),男,江苏溧阳人,高级工程师,从事电网规划设计工作;
- 肖 晶(1981),女,江苏徐州人,高级工程师,从事电网规划设计工作;
- 王自桢(1982),男,江苏江阴人,工程师,从事配电网规划设计工作;
- 周恒俊(1984),男,江苏扬中人,工程师,从事电网规划设计工作;
- 李 雪(1979),女,江苏淮安人,高级工程师,从事电网规划设计工作;
- 饶 莹(1982),女,江苏如皋人,高级工程师,从事电网规划设计工作。

---

(上接第 84 页)

- [1] 国家电网公司. 电力可靠性理论基础 [Z]. 北京:中国电力出版社,2012.8.
- [2] 国家电网公司. 输变电设施及系统可靠性管理 [Z]. 北京:中国电力出版社,2012.6.
- [3] GB50545-2010. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范 [S].
- [4] 谢 君. 电网运行方式及设备检修的可靠性评估 [D]. 合肥:

合肥工业大学,2006.

---

作者简介:

- 李懂理(1984),男,工程师,长期从事输电线路运行与检修工作;
- 刘 倩(1985),女,长期从事输电线路输电线路施工管理工作;
- 丛 云(1980),女,工程师,长期从事用户可靠性管理工作。

---

## 江苏电网拓展超高压带电作业方式 应用绝缘斗臂车,安全系数更高作业时间更短

2014年11月3日,江苏省电力公司检修公司完成500 kV常牌5202线导线断股等电位修复工作,这是国内首次利用绝缘斗臂车完成超高压带电作业。

本次作业使用的绝缘斗臂车,目前为全国范围内唯一可用于超高压线路带电作业车辆。该车最大作业高度可达37.5 m,工作斗可容纳4人同时作业,最大载重达900 kg,最高可用于660 kV输变电设备带电作业。鉴于国内尚无经验可循,江苏电力检修公司联合江苏电科院多次进行耐压试验研究,并在停役线路上多次进行模拟作业。今年3月,该公司在湖北武汉带电作业培训基地,应用绝缘斗臂车在500 kV实训线0001号塔上实际带电更换耐张塔屏蔽环,取得了第一手操作实践经验。

本次作业前,江苏电力检修公司专业人员在现场勘察中,结合导线下方地形条件,提出了利用绝缘斗臂车进行500 kV带电作业消缺的方法。在对操作流程进行多轮研讨、作业危险点进行全面分析后,该公司制定了详细周密的作业指导书。本次作业中,在地面工作负责人的指挥下,工作斗上两名等电位作业人员一人精细操作、一人密切注意工作斗与导线距离,当距离达到50 cm时,用电位转移棒快速钩住导线,完成电位转移,进入电场。工作人员在工作斗内完成缺陷消除工作,全程耗时仅50分钟。如采用传统带电作业法完成本次缺陷消除工作,等电位作业人员需首先利用绝缘软梯荡入电场,然后走线至工作区域,并与2到3名地面工作人员配合完成工器具吊装,全程耗时需2个多小时,作业安全风险较大。与传统带电作业方式相比,绝缘斗臂车带电作业具有安全系数高、作业人员工作强度低、作业空间舒适、作业时间短等优点。

据悉,以往绝缘斗臂车多用于220 kV及以下电压等级、杆塔高度较矮的线路上,本次开展的绝缘斗臂车带电作业,一方面是对500 kV带电作业方式的拓展,另一方面也为今后国内开展类似作业积累了有益经验。江苏电力检修公司今年还将安排2次相关试点作业,积累实战经验,为明年在超高压线路带电作业中深化应用绝缘斗臂车奠定基础。

摘自《江苏电力信息网》

## 10 kV 电缆线路不停电作业应用研究

陈庭记, 颜 昕, 许洪华  
(南京供电公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:** 10kV 电缆线路不停电作业是南京电网提高供电可靠性的重要手段之一。文章对南京供电公司开展不停电作业的近期现状进行概括, 探讨了不停电作业的经济社会效益, 并对今后的不停电作业提出了工作建议。

**关键词:** 电缆线路; 不停电作业; 经济效益; 社会效益

中图分类号: TM732

文献标识码: B

文章编号: 1009-0665(2014)S2-0090-03

## 0 引言

电力资源紧张是近期我国经济建设过程中重要的需求矛盾之一。经济社会的快速发展, 居民生活对供电可靠性、稳定性提出了更高的要求、更大的用电量需求, 同时对停电时间、次数的限度也提出了更强烈的要求<sup>[1,2]</sup>。因此, 电缆线路不停电作业对于提高供电可靠性和优质服务水平具有十分重要的意义。随着南京城市配网的迅速发展, 电缆线路不断增加, 架空线入地电缆增多, 配电电缆不停电作业成为提高供电可靠性的重要手段之一。对于配电网电缆线路实施不停电作业, 可以减少停电的时间跨度、减少供电量损失, 减少网架的结构缺陷影响<sup>[4-6]</sup>。

南京供电公司在网、省公司不停电作业的指导原则上, 落实《电力安全工作规程》的要求, 以“安全第一、预防为主、综合治理”工作方针, 结合南京地区工作实际开展配电不停电作业工作。本文结合南京 10 kV 电缆线路不停电作业的现状, 分析了不停电作业的经济效益、社会效益, 并指出了目前存在问题。

## 1 10 kV 电缆线路不停电作业近期现状

南京作为江苏省政治、经济、教育的中心, 连通南北交通枢纽, 充分发挥着现代化城市的作用。随着城市建设的迅速发展, 南京配电网电缆线路随之不断增加, 截止 2012 年 12 月, 南京市配网已建成电缆线路 8974.6 km, 共有环网柜 5940 座、电缆分支箱 2423 座, 城市中心区电缆化率已达到 86.3%。

2012 年, 南京供电公司共开展不停电作业共计 2557 次, 其中开展第一类作业项目 156 次, 第二类作业项目 2313 次, 第三类作业项目 85 次, 第四类作业项目 3 次; 开展配网工程 1099 次, 用户工程

1308 次, 消除危急缺陷 123 次、严重缺陷 2 次、一般缺陷 19 次, 共计减少停电时户数 63126.5 时户; 增加供电量 16695328.5 kW·h。

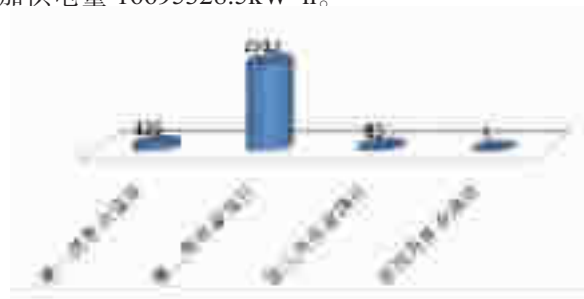


图1 2012年不停电作业项目种类统计

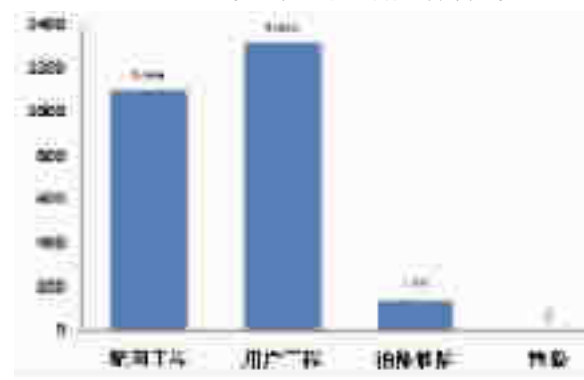


图2 2012年不停电作业项目属性情况统计

在 2011 年-2012 年, 南京公司电缆线路共停电作业 657 次(施工、检修等预安排停电 305 次、故障停电 352 次), 造成停电中压户数 13344 户, 供电量损失 842.3 万 kW·h。

表1 2011-2012年电缆线路停电作业情况统计

时间	停电次数	停电户数	停电时户数	缺供电量
2011	376	7974	33170.73	4872651
2012	281	5370	32494.68	3550503
合计	657	13344	65665.41	8423154

2011 年底, 公司一方面推进作业设备配备, 另一方面做好应急旁路布缆车等旁路作业装备配置需求, 自行研制了不停电作业用消弧开关。与此同时, 为了更好的宣贯新技术, 新设备, 不停电作业班组进

行了电缆不停电作业各项学习培训工作。班组与相关技术专家组织了旁路作业业务讲座,有针对性的培训了旁路作业的原理、作业流程、装备使用、作业要领等关键技术。

2012年,南京供电公司根据《10 kV 电缆线路不停电作业技术导则》等,选定了带电断、接空载电缆连接引线等3类6个作业项目作为新项目开展试点工作。根据《南京供电公司电缆不停电作业方案》实施计划,在项目旁路作业设备到位后,结合生产工作实际,公司立即着手电缆不停电作业各项项目的试点应用。2012年4月,公司采用应急旁路配变车,运用临时取电作业方法,成功实现夫子庙灯会的应急保电。此项作业的开展,同样可实现对配网柱上变压器的不停电抢修作业。2012年6月在浦口地区开展了旁路不停电作业检修线路的工作。2012年9月21日,在国家电网公司配网不停电作业工作推进会上,南京供电公司实现了不停电检修10 kV 电缆线路环网柜作业现场演示工作,综合演示“带电断、接空载电缆连接引线”、“旁路检修电缆线路设备”两项试点项目。本次演练实际操作表演步骤准确、细节明显、特色鲜明,起到了良好的示范作用,得到国家电网公司和各省市公司同行的高度肯定。

南京供电公司技术人员已经掌握了带电断、接空载电缆连接引线、旁路检修电缆线路设备、临时取电作业三项新项目的技术要领。公司将不断总结经验,让新项目在模拟的过程中不断完善,从理论到实践多次结合,在确保作业安全的前提下稳步推进。

## 2 10 kV 电缆线路不停电作业效益分析

### 2.1 经济效益

#### 2.1.1 提高供电可靠性带来效益

2011-2012年期间,公司城市供电可靠率平均为99.975%,配网电缆线路各类停电工作对可靠性的影响每年平均达0.0062%。如在各类电缆检修、施工过程中采取电缆不停电作业,可将公司城市配电网供电可靠率提高至99.982%,用户年平均停电时间可以减少32.6分钟。

#### 2.1.2 增加供电量提高公司营业收入

推广电缆不停电作业后,减少公司配网电缆线路的停电次数,减少配网供电量损失,增加公司营业收入。2011-2012年,公司电缆线路各类停电共造成电量损失842.3万kW·h。如在各类电缆检修、施工过程中采取电缆不停电作业,可以减少此部分电量损失,按照每千瓦时0.6元计算,平均每年可给提高公司营业收入252.7万元。

### 2.2 社会效益

#### 2.2.1 进一步提升供电服务质量

不停电作业能够以用户的最大福利为出发点,减少停电次数和时间,进一步提高了政府和老百姓对电力行业的满意率。

#### 2.2.2 保障南京地区经济建设快速发展

不停电作业提升了供电可靠性,对于政府招商引资和发展经济建设提供了供用电强有力保障和支撑,进而促进南京的经济建设快速发展。

#### 2.2.3 构筑和谐社会、节约型社会的需要

五大调整后,公司在整合配网运检、建设工作的基础上,定期开展停电平衡会,梳理下一阶段工作项目,对于满足不停电作业要求的工作,一律按照不停电作业工作开展,进而提升公司配电不停电作业次数。公司克服配电不停电作业人手紧张的困难,在各项成资本项目,客户工程,应急抢修,带电消缺方面,取得了较好的工作成绩。特别是在南京配网自动化试点项目是运行期间,积极开展配电自动化设备的带电消缺工作,满足了配网自动化设备运行要求和质量提升。

## 3 10 kV 电缆线路不停电作业今后工作建议

### 3.1 加强对不停电作业的规划分析

根据南京城市电网发展及对应的供电可靠性指标等,对南京电网整体的不停电需求进行分析,制定相应的长短期不停电作业的发展规划,有序推进不停电作业的持续开展。实行规划先行、建设支撑、管理推进、科技引领的管理模式。

### 3.2 加强不停电作业的应用

一方面加强专业队伍建设,增加了18名配电不停电作业人员,另一方面继续完善不停电作业的培训体系,实现10 kV 电缆线路不停电作业的标准化作业流程。

### 3.3 加强不停电作业专业管理

继续建立和完善不停电作业安全管理、奖励及停电作业审批等制度,引入一批不停电作业新装备、探索不停电作业新技术新方法的推广应用,逐步加大配网事故抢修、消缺工作中不停电作业比例。

### 3.4 加强不停电作业的装备管理

南京供电公司在石城供电抢修服务队内部成立电缆不停电作业应急抢修工作小组,合理分配不停电作业装备,充分利用石城抢修服务队的平台优势,在服务队内部成立电缆不停电作业应急抢修工作小组,制定电缆不停电作业应急抢修工作流程和规范,24小时待命,充分发挥新装备的作用,缩短停电时间,提升南京配网的可靠性。

### 3.5 加强不停电作业人员管理

积极开展配电不停电作业理论知识和新技术的学习工作,加强配电不停电作业人员应变能力和实际工作能力的培训,建立作业人员培训计划,定期培训,安排取证,定岗定人。

## 4 结束语

本文总结了南京不停电作业的现状,分析了不停电作业的经济社会效益,并对今后工作提出了建议。南京公司开发推广不停电作业新型项目,增加不停电作业工作数量,提升不停电作业能力水平,为南京电网的可靠安全发展贡献一份坚强力量。电缆线路不停电作业应用经验,对于提高供电可靠性、提升优质服务水平具有十分重要的指导意义和借鉴价值。

### 参考文献:

[1] 张锦秀,蓝耕,陈伟明,等.10 kV 架空配电线路综合不停电

作业探讨[J].上海电力,2003(2):123-124.

[2] 周晓虹.不停电作业的技术创新与管理[J].上海电力,2010(4):311-313.

[3] 蔡俊宇.几种配网不停电作业技术的比较[J].农村电气化,2008(7):5-6.

[4] 冯德,侯跃.配电线路自动化技术介绍[J].内蒙古电力技术,2002(20):20-22.

[5] 赵飞,陈英,张洋.10 kV 架空线路不停电作业方法的研究[J].农村电工,2008(11):26-27.

[6] 范晓华,虞劫.不停电作业的模块化研究[J].科技资讯,2011(12):130-131.

### 作者简介:

陈庭记(1975),男,江苏南京人,工程师,主要研究方向为电网运行、智能电网;

颜昕(1975),男,江苏南京人,工程师,主要研究方向为电网运行、智能电网;

许洪华(1981),男,山东临沂人,工程师,主要研究方向为电网调度、分布式能源等。

## 国网江苏电力加快电能替代步伐

### 实施电能替代项目 1793 个,替代增售电量 40.48 亿 kW·h

“谢谢你们在电能替代上提供的帮助,这些年来为我们节省了使用成本和维修成本约 8100 余万元。”2014 年 9 月 22 日,江苏太仓市供电公司的工作人员来到太仓港苏州现代货箱码头有限公司,对码头上的 35 台“油改电”轮胎式集装箱门式起重机进行“义诊”时,货箱码头公司技术部经理李世锋感激不已。

2007 年,在太仓市供电公司的支持下,太仓港码头 35 台使用柴油的轮胎吊实施“油改电”技术升级。如今不仅收回成本,而且减少码头碳排放量 9100 余吨、二氧化硫 320 余吨、氮氧化物 270 余吨。这是国网江苏省电力公司大力推进电能替代,积极拓展售电市场的一个缩影。

2014 年,国网江苏电力紧紧抓住国家治理大气污染契机,主动参与省政府大气污染防治行动计划方案的编制,明确电能替代在防治行动计划中清洁能源替代的主要地位,鼓励供热管网覆盖范围外的燃煤小锅炉,采用电锅炉等清洁能源替代。

江阴市是江苏省内首个推进县域热电整合的城市。江阴市供电公司主动走访政府及相关部门、关停涉及企业,询问意见、建议,根据政府对热电整合的不同要求和企业实情开展好后续服务工作。江阴热电整合所涉及的华西老电厂和华强特钢热电厂分别在 3 月、7 月关停。同时,华强特钢热电厂、海澜集团自备电厂也已顺利关停并接入电网。关停后每年可减排氮氧化物 1100 吨、二氧化硫 1300 吨、烟尘 500 吨。

在依托政府积极争取优惠政策的同时,国网江苏电力还科学制定了推广策略,对各种电能替代技术进行优劣势分析、经济性比较,提出了针对性建议,实行差异化的电能替代推广策略。其中,在滨江临海的负荷集中区推广热泵、蓄能技术;在冶金、机械制造业聚集区和陶瓷、玻璃、茶叶等主要生产地区推广电窑炉、锅炉等电热处理技术;在苏北欠发达地区推广农业生产和农村生活电气化技术。

值得一提的是,国网江苏电力把经济性较好的岸电技术作为新的突破口,在连云港港口集团进行试点,通过主动服务上门、无偿提供技术支持、优化增容方案等配套服务,促进了项目顺利实施。目前连云港港口已率先建成高压岸电替代系统,共建成 5 套设备,可供 8 个泊位使用,总设备容量约 8000 kW。该系统已在“中韩之星”轮、“富强中国”轮等十余条船上成功应用。其中仅“中韩之星”一条轮船,全年新增售电量 100 万 kW·h,新增电费收入约 80 万元,相较于原燃油辅机发电的运行方式节约运行成本约 216 万元,每年减少排放约为二氧化碳 2430 吨,二氧化硫 62 吨,氮氧化物 70 吨。为了加快推进电能替代,国网江苏电力为每一个电能替代项目开辟绿色通道,实行专人负责制,为客户提供上门办理用电或增容申请等服务,缩短内部工作流程,为电能替代客户推广提供全方位服务。以连云港港口集团岸电工程为例,该公司通过主动服务,简化流程,比原计划提前 30 天送电。

目前,国网江苏电力共推动实施电能替代项目 1793 个,替代增售电量已超过 40.48 亿 kW·h,增加售电收入 28.7253 亿元。

摘自《江苏电力信息网》

# 同步相量测量技术在配网合环的实用化应用研究

李 凯<sup>1</sup>,张玉林<sup>2</sup>,杜红卫<sup>2</sup>,韩 韬<sup>2</sup>,许洪华<sup>1</sup>

(1.南京供电公司,江苏 南京 210019;2.国网电力科学研究院,江苏 南京 210000)

**摘要:** 配电网主站系统合环计算对不停电合环转供提供辅助决策的功能,实现在线实时状态下合环线路的合环冲击电流计算及合环稳态潮流计算,校验合环后的稳态电流是否导致设备过载,合环冲击电流是否导致保护的误动作造成停电事故,给出合环操作是否合理可行的结论。本文利用同步相量测量技术采集母线电压矢量值应用于合环计算研究,其目标是通过同步相量测量装置能够同步精确采集到现场的电压矢量值来提高合环计算的精度和准确度,减少合环误操作,实现在线实时合环计算实用化的目的。

**关键词:** 合环潮流计算;同步相量测量技术

**中图分类号:** TM71

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2014)S2-0093-04

## 0 引言

在合环操作时,可能产生较大的环流,这将直接影响到电网的安全稳定运行。操作过程造成网络结构的改变,在回路中形成电气环网和复杂的电磁环网,导致无法控制的网络环流;同时操作过程可能由于状态的差异而造成安全上的严重后果:设备过负荷,冲击电流导致保护跳闸,继电保护非正确动作,短路电流冲击电气设备。因此开发一套适合在线合环潮流计算系统成为调度部门的迫切需求,满足在10 kV线路合环的需要。

合环计算程序在多个现场进行了多个案例的实际操作测试,由于条件的限制,配网负荷功率值从用电信息采集系统获得,延时一个小时会导致2-5个百分点的误差,部分配网负荷功率数据不完整会导致5-10个百分点的误差,主网端口阻抗计算精度不够,配网设备表建模不完整,10kV母线相角从主网状态估计和潮流计算取得,有3分钟的延时会导致2-3个百分点的误差,导致配网程序合环计算结果仍然存在较大的误差,离实际运行的要求还有一定的距离。更为严重的是,由于主网模型维护的问题导致主网潮流计算的母线相角误差过大或者10kV母线在主网侧的端口等值阻抗计算误差过大,会导致合环计算结果错误而无法使用。如何提高潮流计算和合环计算精度达到实用化效果是一个难题。

电压幅值影响无功功率的流动,无功从电压幅值高的一端流向电压幅值低的一端,电压相角影响有功功率的流动,有功从相角超前流向相角滞后的一端,因此准确获取合环开关两端的电压幅值和相角对合环计算具有重要的意义。从目前我国配电网

发展情况看,量测数据比如配网变压器的功率采集不完整,配网线路参数不完整,数据采集冗余度低,限制配网高级应用功能,如何能够在目前配网条件下通过改进一些措施实现配网实用化的合环潮流计算应用功能,需要不断的技术研究和探索。

## 1 方案研究

经过大量的测试分析得出:合环计算结果精度主要与母线电压幅值、相角、端口阻抗值、网络建模和参数、负荷量测数据等有关,而10 kV母线电压幅值、相角和端口阻抗有时影响合环电流计算精度的主要影响因素,因此我们急需解决母线电压幅值、相角、端口阻抗值的精度值。目前合环计算中的10 kV母线电压相角是读取主网潮流计算的数据,数据有3分钟左右的延时不可避免,且有一定的误差;端口阻抗值是通过主网利用节点导纳矩阵计算获得。在目前条件下,在保证配网模型足够准确,负荷量测数据足够完整,配网开关量测足够完整准确的情况下,潮流计算及合环计算计算精度已基本经达到最好的精度范围。为进一步提高合环计算的精度,只能采取更加有效的措施更加精确得到合环开关两端的电压幅值和相角。本方案中选择利用装置采集母线电压矢量值应用于合环计算的研究。其目标是通过同步相量测量装置能够精确采集到现场的电压矢量值来提高合环计算的精度,同时分析出从EMS获得的母线的相角,计算的主网端口阻抗值对合环计算的偏差值,从而有效提高合环计算精度。

合环计算程序分为辅助计算功能和高级决策功能。并分两个阶段实施。

程序第一阶段实施其基本计算功能,主站系统合环计算实现在线实时状态下线路潮流计算,合环前对合环线路的合环冲击电流计算,合环前对合环

收稿日期:2014-09-04;修回日期:2014-10-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)

项目(2012AA050214)

线路合环后的稳态潮流计算。通过合环计算校验合环后的稳态电流是否避免设备过载,合环瞬时的暂态冲击电流是否导致保护的动作,造成大面积的停电事故。最终给出合环操作是否合理可行的结论。

程序第二个阶段实施其高级应用功能,即决策功能。程序能够为合环操作提供有效的决策功能。当合环线路不满足合环操作的条件而又需要进行合环操作时,该程序能够向调度人员提供有效的措施,并且实时监控使其合环线路能够满足合环操作条件,安全高效的进行合环操作。

## 2 同步相量测量装置设计

同步相量是以标准时间信号作为采样过程的基准,通过对采样数据计算而得的相量称为同步相量。因而,各个节点的相量之间存在着确定统一的相位关系。使异地信号可以在相同的时间坐标下比较。

同步相量测量装置是通过基于 GPS 同步时钟的相量测量装置(Phasor Measurement Unit: PMU),同步采集电网各关键节点的电压电流相量,这些同步相量数据不需要如同原始波形的采集密度就可对电网的动态运行状态进行实时精准的状态预测,为输电线路的低频振荡及故障分析等工作提供足够的数,为系统事后分析提供详实而同步的数据。PMU 是电力系统实时动态监测系统及广域测量系统的核心单元。

其主要功能有:

(1) 测量变电站每条线路三相电压、三相电流、开关量,通过计算获得:A 相电压同步相量  $U_a/\Phi_{ua}$ ;B 相电压同步相量  $U_b/\Phi_{ub}$ ;C 相电压同步相量  $U_c/\Phi_{uc}$ ;正序电压同步相量  $U_1/\Phi_{u1}$ ;A 相电流同步相量  $I_a/\Phi_{ia}$ ;B 相电流同步相量  $I_b/\Phi_{ib}$ ;C 相电流同步相量  $I_c/\Phi_{ic}$ ;正序电流同步相量  $I_1/\Phi_{i1}$ ;开关量。

(2) 同步相量数据传输。

装置根据通信规约将同步相量数据传输到主站,传输的通道根据实际情况而定,如:2 M/10 M/100 M/64 K/Modem 等,传输通信链路一般采用 TCP/IP。

## 3 合环理论分析

### 3.1 合环开关两侧的电压矢量差

准确的计算出合环后流过合环开关两侧的稳态合环电流,必需要准确的计算出合环开关两侧的电压矢量差值。理论上我们通过潮流计算程序计算的到合环开关两侧电压矢量值,但是受限于配网建

模的准确性,配网线路参数的准确性,配网负荷功率值采集的准确性和完整性,往往计算得到的合环开关两侧的电压矢量值是有误差的。

为了能更加准确的得到合环开关两侧的电压矢量值,我们通过合环开关两端安装同步相量测量装置,准确的采集到合环开关两侧的电压矢量值,从而准确的得到合环开关两侧电压矢量差值。

### 3.2 端口阻抗的分析

本方案通过 PDZ840 准确采集到合环开关两端配网母线的电压幅值和电压相角、功率值,针对从不同变电所引出两条出线的环网,配电网合环网络与上级电网之间存在边界节点的特点,分析理论计算的合环开关两端的等值阻抗  $Z_{eq}$  的准确度。为提高合环计算精度提供实际的依据。

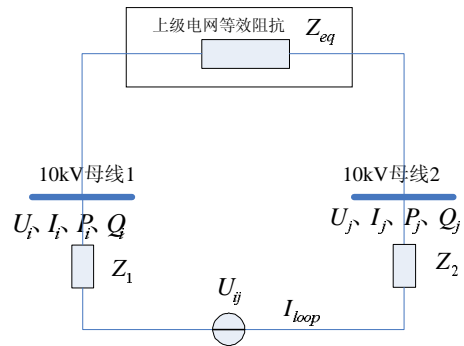


图 1 等效电路图

选取电压值高的一侧为始端,由始端电压  $U_i$

$$\dot{U}_{ij} = \dot{U}_i - \dot{U}_j \quad (1)$$

$$\dot{I}_{loop} = \dot{U}_{ij} / (Z_{eq} + Z_1 + Z_2) \quad (2)$$

在联络开关合上时,利用同步相量测量装置可以采集到联络开关两侧电压矢量值  $\dot{U}_i$ ,  $\dot{U}_j$  和流过联络开关的稳态合环电流  $\dot{I}_{loop}$ , 通过式 8 可以得到  $Z_{eq}$  的准确值,然后比较通过计算的得到的 10 kV 母线主网测得端口阻抗值的误差大小,从而得到合环电流计算误差值。

该算法的优点是在采集的合环开关两端配网母线的电压幅值和电压相角、功率值比较准确的情况下,比较得到的合环开关两端的等值阻抗值的准确度。从而为提高理论上合环计算的准确度提供可靠的依据。

### 3.3 同步相量测量装置应用于合环计算

在建模准确,线路参数比较准确的情况下, $U_{ij}$  直接影响合环稳态电流值的精度。通过采用同步相量测量装置能够准确得到  $\dot{U}_{ij}^{(m)}$  的值,因此能大大提高合环稳态电流值的  $I$  精度值。因此安装同步

测量装置对合环计算的有很重要的意义和很强的实用价值。

下面来进行具体分析,在合环前,端口电压为  $U_{ij}$ ,阻抗为  $Z_i$ ,如图 2 所示。

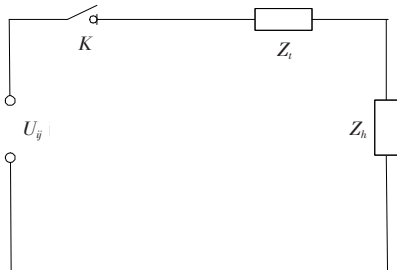


图 2 合环后的简化环路电路

合环操作后,阻抗变为  $Z=Z_i+Z_h$ ,

$$\dot{I}_{ij}^{(m)} = \frac{\dot{U}_{ij}^{(m)}}{Z_i+Z_h} \quad (3)$$

由  $S_{ij}^{(m)} = U_i^{(m)} I_{ij}^{(m)}$ , 即可求出合环点  $i$  端的合环潮流值  $P_{ij}$  和  $Q_{ij}$ 。

由  $S_{ji}^{(m)} = U_j^{(m)} I_{ji}^{(m)}$ , 即可求出合环点  $j$  端的合环潮流值  $P_{ji}$  和  $Q_{ji}$ , 等效后的注入量计算公式分别为:

$$\begin{aligned} P_i^{(m+1)} &= P_i^{(m)} + P_{ij}^{(m)} \\ Q_i^{(m+1)} &= Q_i^{(m)} + Q_{ij}^{(m)} \\ P_j^{(m+1)} &= P_j^{(m)} + P_{ji}^{(m)} \\ Q_j^{(m+1)} &= Q_j^{(m)} + Q_{ji}^{(m)} \\ \left| \dot{U}_{ij}^{(m+1)} \right| &< \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

为了计算合环冲击潮流在其它支路设备上的分布,我们可以利用稳态潮流计算的程序,将合环冲击潮流的影响等效为合环支路两端的逻辑母线的有功无功的注入量的变化。由上式可知,合环稳态电流值直接决定合环线路稳态潮流值  $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$ 。同时影响合环支路两端的逻辑母线的有功无功的注入量的值。从而影响到合环后合环冲击潮流在其它支路设备上的分布。

#### 4 同步相量测量装置应用方案实施

为了获得合环端电压矢量值,同步相量测量装置现场安装实施方案:

将同步相量测量装置安装在 10 kV 母线上,采集 10 kV 母线电压幅值和相角。通过配网潮流计算,得到合环点两侧的电压的幅值和相角。

由同步相量测量装置采集到的电压矢量值通过以太网或光纤传输到主站系统,主站系统接收到数据以每秒一次频率写入实时库中。合环潮流计算程序实时读取实时库中的数据进行合环潮流计算。

系统配置:

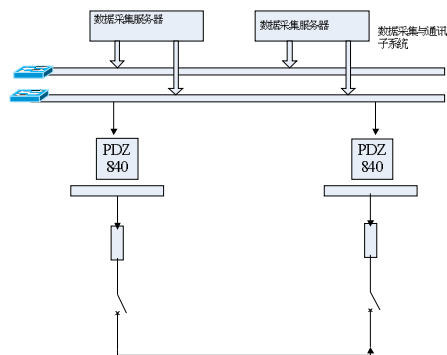


图 3 方案示意

终端配置:同步相量测量装置数台。(按不同实现模式将会有不同配置)。

主站配置:

- (1) 基于同步相量采集的特殊规约处理模块;
- (2) 带时标实时数据处理模块;
- (3) 基于实时幅值和相角信息采集的精确潮流计算;
- (4) 主网端口阻抗计算模块。
- (5) 基于实时幅值和相角信息采集的合环潮流计算程序。

#### 5 案例分析

本文以扬州配电网实际运行线路做合环操作,测试通过 EMS 转发母线电压计算得到的合环电流,与通过 PDZ 同步相量测量装置采集到的电压矢量值计算得到的合环电流,进行对比分析。

##### 5.1 EMS 转发母线电压计算合环电流

读取主网转发合环端口阻抗值,读取主网转发的母线电压幅值和相角,通过潮流计算得到合环开关两测的电压幅值和相角,进行合环计算,保存计算结果,并记录计算时间。结果如表 1、表 2 所示。计算时间:15:58:31。

##### 5.2 同步相量测量装置采集电压矢量值计算合环电流

读取 PDZ-840 装置采集到的母线电压幅值和相角,通过潮流计算得到合环开关两侧的电压幅值和相角,读取主网转发合环端口阻抗值,进行合环计算,保存计算结果,并记录计算时间。结果如表 3、表 4 所示。计算时间:16:01:31。

通过两种方法得到合环计算结果误差,可明显看出:PDZ-840 同步相量测量装置采集到的母线电压幅值和相角计算得到合环电流误差要低于主网转发的母线电压幅值和相角计算得到的合环电流。

#### 6 结束语

本技术利用同步相量测量装置采集母线电压

表 1 电压值表

站内母线	EMS 转发合环前母线电压		合环开关两侧电压		EMS 转发合环后母线电压	
	幅值 /kV	相角 /°	幅值 /kV	相角 /°	幅值 /kV	相角 /°
南城 1# 线 224 开发变 10 kVⅧ 段母线	10.34	-8.062	10.339	-8.203		
吴州 1# 线 136 出线侧吕桥变 10 kVⅧ 段母线	10.23	-3.429	10.226	-3.444		
差值			0.86	-4.759		

表 2 合环线路合环计算值表

变电站	出线开关	合环前电流			合环中电流		
		计算值 /A	测量值 /A	误差率 /%	计算值 /A	测量值 /A	误差率 /%
吕桥变	吴州 1# 线 136	156	157		283	256	10.5
开发变	南城 1# 线 224	13	14		408	336	21.4
南城环网柜 101 开关					394		

表 3 电压值表

站内母线	PDZ-840 采集合环前母线电压		合环开关两侧电压		PDZ-840 采集合环后母线电压	
	幅值 /kV	相角 /°	幅值 /kV	相角 /°	幅值 /kV	相角 /°
南城 1# 线 224 开发变 10 kVⅧ 段母线	10.542	-79.99	10.33	-91.98		
吴州 1# 线 136 出线侧吕桥变 10 kVⅧ 段母线	10.368	-75.71	10.23	-87.76		
差值			0.76	-4.22		

表 4 合环线路合环计算指标

变电站	出线开关	合环前电流			合环中电流		
		计算值 /A	测量值 /A	误差率 /%	计算值 /A	测量值 /A	误差率 /%
吕桥变	吴州 1# 线 136	159	160		247.89	256	3.1
开发变	南城 1# 线 224	13	14		364.11	336	8.3
南城环网柜 101 开关					350		

矢量值和功率值应用于合环计算,通过同步相量测量装置和主站系统,通过新型智能终端的功能支持,使目前的解合环应用软件计算精度进一步提高,达到实用化的目的。通过配网主站产品和智能配网终端产品的有机集成,以此为出发点,开发出适合配网应用的特色功能,配网安全高效运行有着非常重要的意义。

配电网合环时穿越电流过大导致保护动作是目前配电网中的一个新的难题,目前国内外尚未见有效的解决手段。本文利用同步相量测量技术来分析合环电流问题,具有很好的理论研究价值和现实应用前景。可以解决配电网合环倒电时穿越电流不可测的难题,实现对用户的不失电倒电,提高对用户的供电可靠性,增加了电力企业的经济效益,提高了供电公司的优质服务水平。本项目尝试利用智能配网终端的同步相量数据去解决合环电流问题是个创新,在算法判据、辅助决策等方面都有较好的研究和发展空间。

#### 参考文献:

- [1] 李苏苏,胡彬.配电网合环冲击电流的计算和分析.南方电网技术研究.2006,2(1):45-47.
- [2] 叶清华,唐国庆,等.配电网合环操作环流分析系统的开发和应用[J].电力系统自动化,2002,6(22):66-69.
- [3] 毕鹏翔,刘健,张文元.配电网重构的改进支路交换法[J].中国电机工程学报,2001,21(8):98-103.
- [4] 于建辉,周浩,陆华.杭州 10 kV 配电网合环问题的研究[J].机电工程,2007,24(10):54-57.
- [5] 陈霄,王磊,李扬.配电网合环冲击电流的分析.中国高等学校电力系统及其自动化专业第二届学术年会论文集,677-679.
- [6] 夏翔,熊军,胡列翔.地区电网的合环潮流分析与控制[J].电网技术,2004,28(22):76-80.
- [7] 余娟,颜伟,李文沅,等.配电网合环网络模型及其馈线电流的计算[J].中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE),2005,25(25):76-81.

#### 作者简介:

李凯(1979),男,南京人,高级工程师,主要研究方向为电网运行、智能电网、分布式能源等;  
张玉林(1983),男,南京人,工程师,主要研究方向为电力调度自动化、分布式能源等。