

# 基于配电自动化的合解环决策分析研究

崔景顺 杨火平 余卫东 余 湘

(国网四川省电力公司遂宁供电公司 四川 遂宁 629000)

**摘要:** 配电线路基本实现了手拉手供电后,通过合解环操作可以实现不停电负荷转移,该环节有效提高了供电可靠性。但是,合解环操作后的系统运行状态未知,使得该操作承载一定风险。应用辅助分析系统,希望有效地减少合解环的盲目性,提高不停电负荷转移的成功率,进而提高供电可靠性,使配电网的运行管理更加可靠、合理、高效。

**关键词:** 智能配电网;合解环;自动化;决策分析

中图分类号: TM71 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)05-0014-08

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.05.004

## Research on Decision Analysis of Closing and Breaking Loop Based on Distribution Automation

Cui Jingshun, Yang Huoping, Yu Weidong, Yu Xiang

(State Grid Suining Electric Power Supply Company, Suining 629000, Sichuan, China)

**Abstract:** After the distribution line is basically realized by hand-in-hand power supply, the uninterrupted power load can be transferred through the closing and breaking loop operation, which effectively improves the reliability of power supply. However, the operating state of the system after closing and breaking loop operation is unknown, which makes the operation bear certain risks. The auxiliary system analysis is applied to effectively reduce the blindness of closing and breaking loop and improve the success rate of the uninterrupted power load transfer, and then to improve the reliability of power supply, which make the operation and management of distribution network more reliable, reasonable and efficient.

**Key words:** smart distribution grid; closing and breaking loop; automation; decision analysis

## 0 引 言

配电运行是智能电网中连接主网和面向用户供电的重要组成部分,但又是目前装备较薄弱的环节。随着农网改造的深入,大部分线路已实现双电源供电,一般采用闭环设计、开环运行的供电方式。当系统发生故障或者计划检修时,通过合解环操作实现不停电负荷转移是提高配电网供电可靠性的有效措施,是配电网自动化的重要应用。由于合解环操作后的系统负荷是未知的,因此合解环操作对电力系统来说,存在潜在的危险性。

合解环操作可以大幅度地减少停电时间,在提高供电可靠性的同时,又保证了电网供电的灵活性;但另一方面,合解环操作对电网的稳定运行也有很大的影响。合环点两侧的电压矢量差在合

环瞬间消失,由此产生的合环稳态电流及冲击电流可能引起线路过载或保护误动作;解环后负荷的突然增加,馈线末端电压过低也会影响供电质量,严重时甚至造成导线变形、电气设备损害,导致合环操作失败,造成大面积的停电事故,直接影响电网的稳定安全运行。正是由于合解环操作后配电网运行状况的不确定性,大多数供电公司仍采用“先断后通”的冷倒方式进行负荷转移,这样势必会造成用户停电次数增多、停电时间加长,严重影响供电可靠性。与此同时,现有的配电自动化(distribution automation, DA)工作应用水平较低,没有发挥应有的作用,合解环操作可行性大都依赖调度人员的经验判断,造成不停电负荷转移操作的安全性得不到保证,大大限制了其作用的发挥。因此,迫切需要一个辅助决策分析软件来协助调度人员调度运行。

# 1 系统研究的理论背景与现实基础

## 1.1 合解环操作潜在危险性分析

由于合解环操作存在潜在的危险性,且对于大部分地区配电网来说还缺乏有力的理论依据和分析软件来指导这种操作,所以不停电负荷转移操作的安全性得不到保证,限制了其作用的发挥<sup>[1-2]</sup>。配电网合环操作示意图如图1。

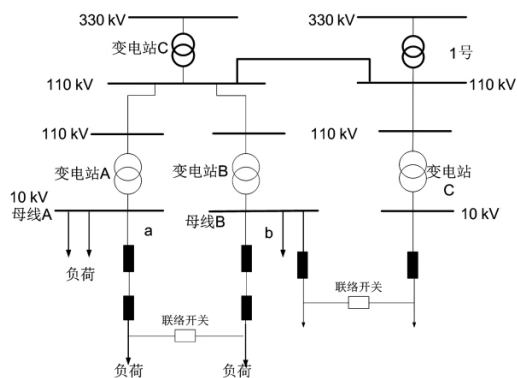


图1 配电网合环操作示意

如图1所示,变电站A与变电站B同属于上级变电站,母线A的10 kV馈线与母线B的10 kV馈线实现了手拉手供电。当母线A发生故障或者计划检修时,可通过合解环操作,将母线A上的全部或部分负荷转移到母线B上,以保证用户的不间断供电。

由于合环前,出线a、b由不同的母线供电,a、b负荷分布不同,那么在合环点两侧势必存在一定的电压差。而经过合环操作,合环点两侧为等电位,合环瞬间电压差消失,该电压差将产生一个合环环路电流,合环环路电流与线路负荷电流叠加,形成合环稳态电流。若合环稳态电流过大,可能引起过流保护误动作。而在合环瞬间,合环点两侧的电压差发生突变,这个暂态过程也将产生一个冲击电流,若冲击电流过大,或冲击电流的衰减常数未躲过速断保护的延时时间,将引起速断保护的误动作。

解环开关解环后,原母线A所带的全部或部分负荷转由母线B单端供电,流经母线B及相关馈线的负荷电流突然增大且末端电压降低,也可能引起供电质量的下降和保护误动作<sup>[3]</sup>。

## 1.2 县级电网配电自动化配置特点

中国配电网网架结构基础比较薄弱。但近年来随着农网改造的深入,配电网的规模持续增长,网架结构得到了加强,为建设配电自动化提供了

良好的基础。与此同时,中国从20世纪90年代开始大力推进配电自动化的试点工作,经过十多年的发展,配电自动化水平有了长足的进步。部分城市配电管理系统的建设涵盖了地理信息系统、生产管理系统,并实现了与配电监控系统、企业资源规划等系统的接口,初步建成了智能配电网的公共支撑平台。

但是从配电网自动化的实施现状来看,目前主要有以下问题:配电自动化应用范围小,实用化水平低;缺乏统一的标准体系,存在重复建设;信息孤岛众多,信息集成度低;生产管理与企业管理系统联动较弱,信息集成与共享存在壁垒<sup>[4]</sup>。而县级电网在网架结构、设备投入和自动化实施水平上更为落后。

# 2 S县电网自动化的现状及数据分析

截止目前,S县供电分公司实现了县域基本配电自动化,全县户通电率达到了100%,农网改造面积达到了98%。S县城区3条主干线路,都已实现配网线路自动化,并都已经实现手拉手供电,甚至出现了多条互供的情况,为带电倒负荷提供了可能性。

S县供电公司现有2套采集变电站数据的系统和1套配电自动化系统,分别为四方华能CSCD2000S县级调度自动化系统、南京华瑞杰HRJ9200远程无线监测系统和西安兴汇TAS-2000配电线路故障诊断及运行监控系统。

## 2.1 变电站数据采集系统

四方华能电网调度自动化系统,是具有统一支撑平台的调度数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)、高级应用软件、馈线自动化(feeder automation, FA)以及基于地理信息系统的配网管理的新一代调度自动化系统。系统配置灵活,具有很强的通用性、兼容性和扩展性,可提供除S县某110 kV变电站外的各变电站的一次接线图、系统运行工况(5 s采集一次)及简单潮流计算结果,见图2。

南京华瑞杰远程无线监测系统,可提供S县某110 kV变电站9回出线的相关遥信、遥测量,包括开关状态、三相电压、三相电流、有功负荷、无功负荷等数据,无线监测系统见图3。

## 2.2 配电线路运行监控系统

配电运行监控系统是通过馈线终端(feeder -

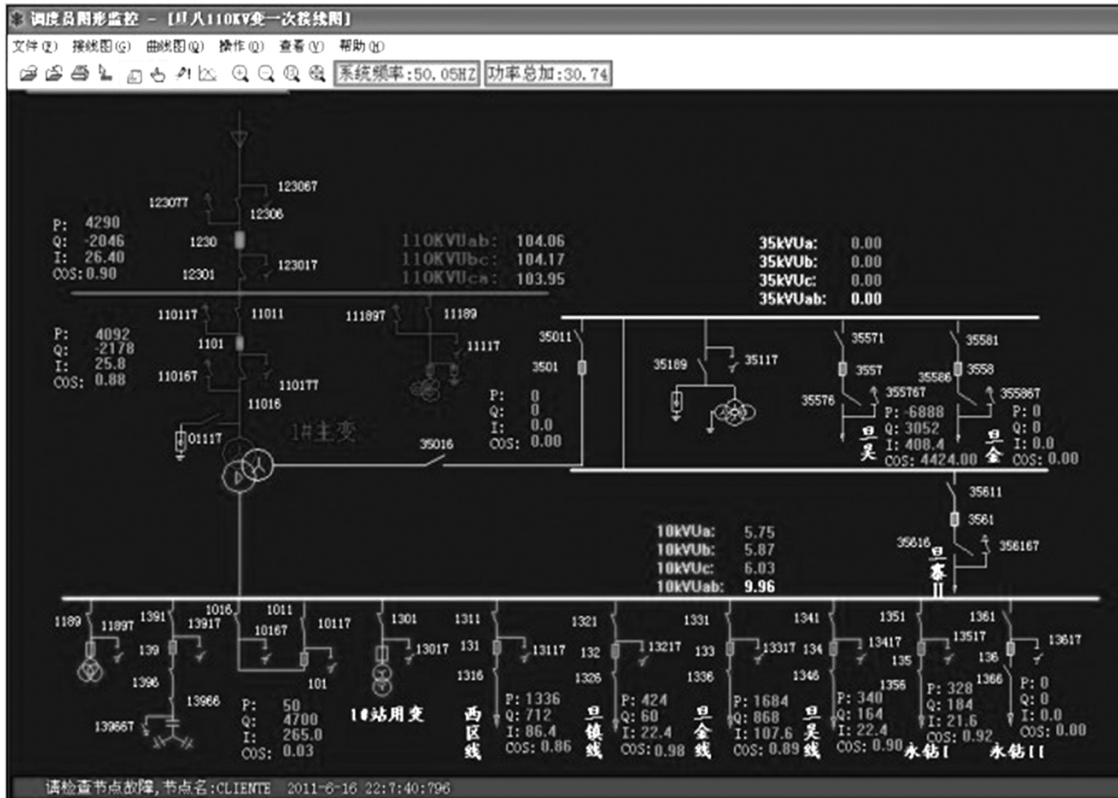


图 2 县调自动化系统

馈线	终端	模拟量时标	Uab	Ubc	Ia	Ib	Ic	Pz	Qz	状态量时标	Yx1	Yx2	工况
141志新线	141志新线	2011-11-10 02:01:00	0	0	0	0	0	0	0	2011-11-10 01:59:50	分闸	分闸	退出
143志城I线	143志城I线	2011-11-15 10:34:00	9890	9870	183.6	182.4	181.6	3111.2	722.4	2011-11-15 10:28:52	分闸	分闸	投入
145志烈线	145志烈线	2011-11-15 10:34:00	10250	10270	53.6	53.6	56	933.6	282.4	2011-11-15 10:28:50	分闸	分闸	投入
146志城II线	146志城II线	2011-11-15 10:34:00	10330	10300	220	224.8	220	3916	566.4	2011-11-15 10:28:51	分闸	分闸	投入
147志烈线	147志烈线	2011-11-15 10:34:00	10330	10300	100.8	100	87.2	-1665.6	-440	2011-11-15 10:28:51	分闸	分闸	投入
149志宁	149志宁	2011-11-15 10:34:00	10310	10270	216	216	212	3246.4	1884.8	2011-11-15 10:28:51	分闸	分闸	投入
153武沟	153武沟	2011-11-15 10:34:00	10300	10340	8.8	8.8	8.8	167.2	-4	2011-11-15 10:28:50	分闸	分闸	投入
154志台	154志台	2011-11-15 10:34:00	9820	9860	196.6	201.6	200	2850.4	1797.6	2011-11-15 10:28:51	分闸	分闸	投入
155志康	155志康	2011-08-31 08:28:35	0	0	0	0	0	0	0	2011-08-31 08:28:35	分闸	分闸	退出

图 3 S 县远程无线监控系统

terminal unit ,FTU) 在线采集线路负荷电流、单相接地故障及相间短路故障信息,通过移动公网 GSM/GPRS 将检测数据上传至软件管理系统,在线掌握线路运行状态、远程控制断路器的分合,当发生单相接地或相间短路故障时,可将故障区段隔离或切除。该系统主要由配电自动化管理系统和前端采集装置两部分组成。

配电自动化管理系统,主要用于接收、分析处理线路上各 FTU 发回的在线检测数据,实时监控线路的运行状况,分合断路器进行负荷调控。当发生线路短路故障时,系统可快速确定故障区段,并远程控制 FTU 隔离或切除相应故障区段。

前端采集装置安装在馈线分段开关处,由前端装置、直流源、高压取电单元和通讯单元四部分组成,具有遥信、遥测、遥控和故障电流检测功能,实时监测配电线路运行状况,并将检测数据及故障信息(短路、单相接地等故障)发送到软件管理系统。

### 3 基于现有信息平台的潮流算法研究

对县级配电网来说,配电网自动化的实施水平不高,在进行合解环决策在线分析时,很难从地方调度中心获得整个系统的所有实时信息,且系统实时潮流计算的需求并不能满足,因此应结合 S 地区电

网特点,建立合解环操作的简化模型,提出可采用的合环稳态电流、合环冲击电流、解环负荷电流、解环末端电压的计算方法。

### 3.1 基于叠加原理的合环稳态电流的计算

配电网一般采用闭环设计、开环运行的网络结构,系统正常运行时,网络结构成辐射状,系统发生故障或者检修时,才会出现短暂的环网运行。对于环形配电网的处理,很多专家学者提出了不同解决方案,其基本思想都是解开环网,将环网转化为辐射型的常规网络,其中叠加法是常用的一种处理方法<sup>[5-6]</sup>。

叠加法将合环运行看做在开环运行的两端叠加一个电压源,大小与开环点两侧的电压差相等,方向相反,将合环运行分解为开环运行和含有一个电压源的附加分量。根据叠加定理,合环后的网络等效于合环前的辐射型有源网络和含电压源的等值环状网络的叠加。那么,合环后各支路的稳态潮流可以认为是由两部分叠加而成:一部分是合环前辐射型网络各支路的初始潮流;另一部分是由合环开关两端电压矢量差引起的循环潮流。

基于叠加原理的合环稳态电流不需要进行合环后的潮流计算,只需要合环前的潮流计算结果就可求出合环稳态电流的大小。环网阻抗 $Z_{环}$ 采用工程上的近似计算方法,近似等于涉及合环线路中的变压器及线路阻抗之和。

### 3.2 冲击电流及解环潮流的计算

合环瞬间,合环点两侧的电压差消失,将产生一个暂态的冲击电流,因此合解环决策分析过程中,不仅需要分析校验合环稳态电流,还需考虑合环瞬间的暂态过程,研究冲击电流是否造成设备速断保护越限<sup>[7]</sup>。

冲击电流是合环暂态过程中出现的合环电流的最大瞬时值,幅值大且持续时间短。正常情况下系统三相对称运行,因此对冲击电流的分析只需建立单相等值模型<sup>[8]</sup>。

负荷转供后,调度人员在进行网络拓扑分析基础上,应尽快进行解环操作,恢复网络的辐射状结构,且在恢复的过程中不允许出现设备过载或电压过低的现象。

在现有数据采集条件下无法得到线路负荷的精确分布,大多数地区SCADA系统无法采集到配电网的配电变压器负荷情况,而只能采集到变电站10kV出线负荷。为适应现有状况,在计算解环后线路

电流时,将负荷集中于几个负荷点,也可根据这些主要负荷点的位置建立配电网负荷模型,进行解环后线路电流的计算。

## 4 合解环决策分析软件的实现

配电网合解环决策分析系统,是在现有智能配电网信息平台的基础上对合解环后系统潮流进行分析,进而辅助调度人员进行合解环决策分析。根据前面对系统的研究,在Visual Graph和SQL Server环境中开发了基于Windows操作系统的可视化合解环决策分析软件。

下面对S县10kV配电网系统进行合解环决策分析。S县城区志新线和志城干线经志新干线70号联络开关实现手拉手供电,为不停电合解环操作提供了现实条件。在该系统中,两条10kV母线隶属于同一110kV,且母线电压相当,所以在计算中将两条10kV母线视为同一节点,并将其以上的主网部分视为无穷大系统。系统建模见图4。

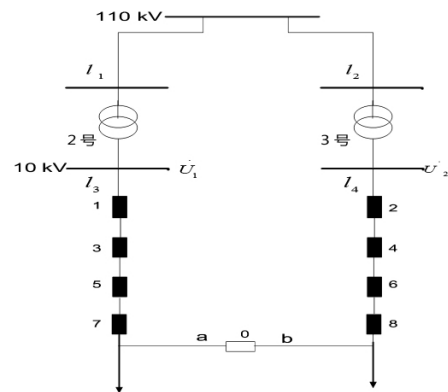


图4 系统建模

对合解环过程进行潮流计算时,需要用到以下数据:

1) 变电站名称、主变压器参数(折算到10kV侧)和分接头位置。

$$Z_T = R_T + jX_T = \frac{P_K U_N^2}{1000S_N^2} + j \frac{U_K \% U_N^2}{100S_N}$$

式中: $P_K$ 为变压器空载损耗; $U_K\%$ 为短路电压百分比; $S_N$ 为变压器额定容量; $U_N$ 为折算侧额定电压(10kV)。

2) 线路参数,包括线路名称、线路型号、长度、载流量。

$$Z_l = (r + jx) l$$

式中:  $r + jx$  为线路单位长度的阻抗参数;  $l$  为线路长度。

3) 馈线分段开关的名称、开关状态。

4) 出线出口开关及馈线分段开关的保护整定值,包括过流保护整定值、速断保护整定值。

5) 合环前出线出口开关及馈线分段开关处的负荷电流大小。

6) 合环前合环点两侧的电压矢量差。

#### 4.1 合解环系统接线

涉及本次合解环操作的志新线和志城线分别隶属于S县某110 kV变电站的1号和2号主变压器。1号主变压器容量为31.5 MVA,2号主变压器容量为40 MVA。在合解环操作前,通过投切电容调整两侧10 kV母线电压,并适当调整合环点两侧的负荷大小和功率因数,使合环点两侧压差不至过大,导致合解环操作失败。

此次合解环操作时,上级网络在正常方式下运

行,10 kV联络线路与上级网络的联络途径如图5所示。

#### 4.2 合解环决策分析过程

操作向导中采用变电站-线路-合解环点三级选择,选择合解环线路及合解环开关,并进行自动拓扑遍历,自动判断存在可执行操作的合环开关,并将其拓扑进行高亮显示。这对操作者有了一定的指导意义,通过最合理的合解环方式,实现故障线路的隔离和治愈。合解环线路、开关的选择如图6所示。

所选合解环线路、合解环开关存在合环环路,进入开关通讯状态检查、所有监测点FTU召回数据,各监测点数据反馈正常,因此判断FTU通信正常,进入相序检查。FTU反馈的数据包括设备安装地点、杆塔号、开关状态、三相负荷电流、c相相电压等。前端装置通信状态监测及合环点相序状态检测分别见图7、图8。

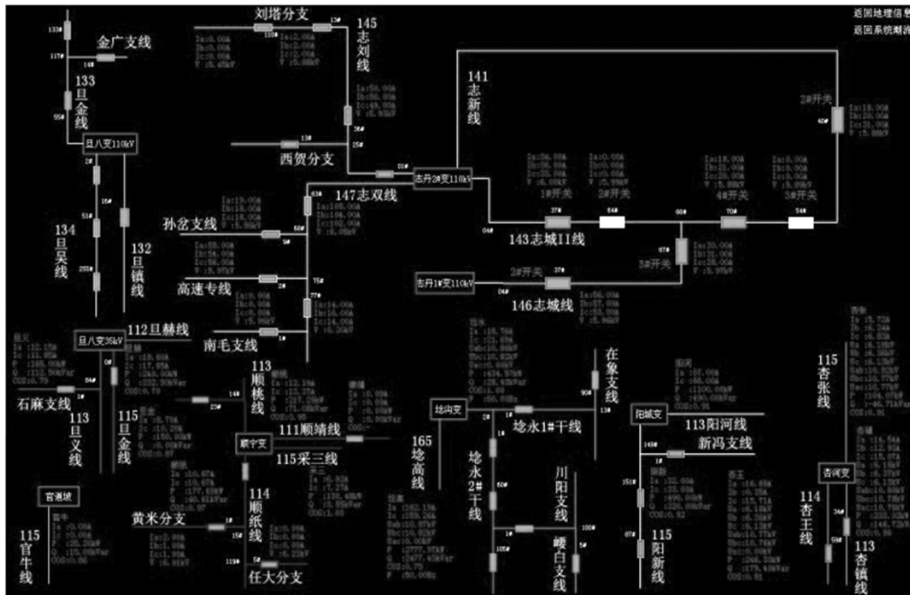


图5 系统接线

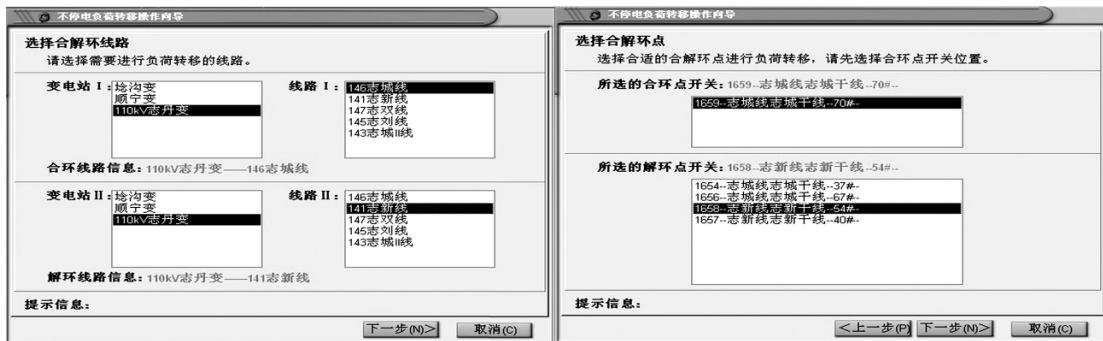


图6 合解环线路、开关的选择

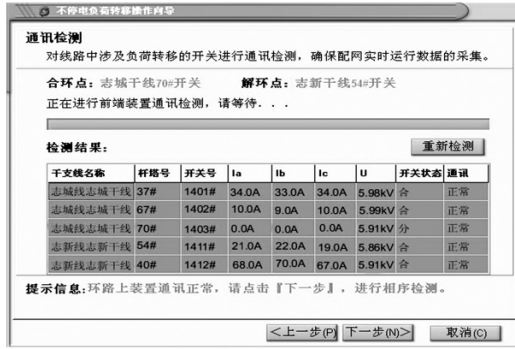


图 7 前端装置通信状态监测



图 8 合环点相序状态检测

读取 141 志新线干线 54 号开关联测的遥测数据,进行合环开关处的相序测试,合环点两侧的 a 相电压矢量差为 0.162 kV, c 相电压矢量差为 0.182 kV,因此判定合环开关两侧相序一致,不需重新标定相序。

合环计算校验是分别计算环路阻抗、合环稳态电流、合环冲击电流,并将合环稳态电流与开关过流保护校验,冲击电流与开关速断保护校验,判断此次合环是否安全。计算时取  $\Delta U = 0.182 \text{ kV}$ ,求得  $I_c = 54.9 \text{ A}$ ,  $I_c = 54.9 \text{ A}$ ,  $I_M = 99.4 \text{ A}$ ,与原有负荷电流叠加,求得各监测点处的稳态电流和冲击电流大小,并分别与过流保护门限、速断保护整定值进行比较,判定此次合环操作不会引起开关误跳,因此不需要修改保护整定值,即合环校验成功。假如两项校验均通过,工作人员避免现场操作,远程即可实现开关分、合闸操作。合环计算校验、合环校验成功后,计算单端供电校验的系统截图见图 9 和图 10。

合环校验成功后,计算单端供电时的负荷电流、末端电压,并与开关过流保护、末端电压保护进行校验,判断此次解环是否安全。合环校验与单端供电校验通过后,工作人员不需要到现场进行分合闸操作,只需发送指令至前端装置,即可实现开关分、合闸操作。分合闸操作前需要进行操作人与监护人双

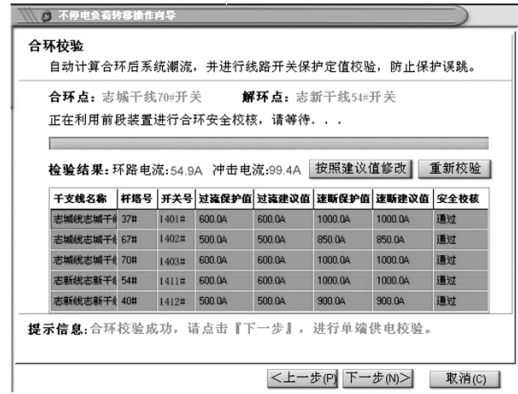


图 9 合环校验



图 10 解环校验

用户验证,以保证分合闸操作的安全性和可记录性。合解环操作后,拓扑图自动进行开关状态的变更,并显示最新采集的线路运行数据。不停电负荷转移操作向导及操作人确认界面见图 11。

### 4.3 数据分析

从系统数据库中读取合环前、合环后的各节点遥测数据以及由计算得出的系统环路电流数据 ( $I_c = 54.9 \text{ A}$ ),各节点环流稳态电流数据如表 1 所示。

由表 1 可见,该系统计算所得的各节点合环稳态电流数据与实测电流数据相差不大,最大误差为 13.5%,满足现场工程实际的要求。将合环前后各节点的遥测数据进行计算,求得各节点实测环流的平均值,再与系统计算环流大小进行对比,计算出误差较小在合理范围内,满足现场的应用要求,数据如表 2 所示。

从系统数据库中读取解环前后各节点的遥测数据、系统计算数据,进行比对发现如表 3 所示。

由表 3 可知该系统计算所得解环后各节点负荷数据与实测值相差不大,最大误差为 20%,在合理范围内,满足现场的应用要求。

本次试验,在合环、解环操作后对各节点的负荷

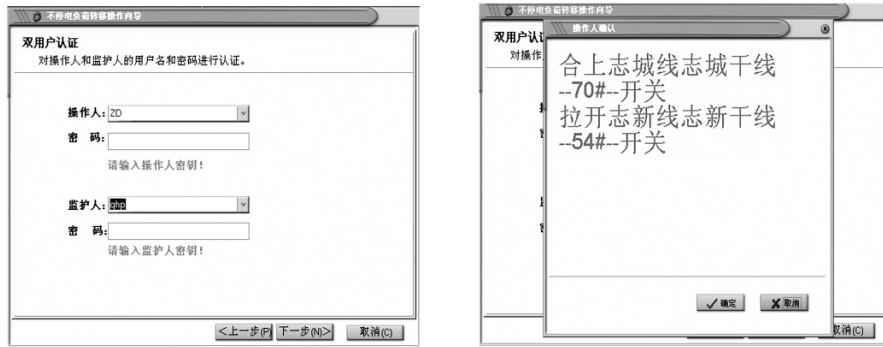


图 11 远程操作双用户认证及操作确认

表 1 各节点合环前后负荷数据

数据类型	参 数	志成线 37 号	志成线 67 号	志成线 70 号	志新线 54 号	志新线 40 号
合环前节点 遥测值	$I_a / A$	34	10	0	21	68
	$I_b / A$	33	9	0	22	70
	$I_c / A$	34	10	0	19	67
	$U_c / kV$	5.98	5.99	5.91	5.86	5.91
计算所得节点合 环稳态电流值	$I_a / A$	88.9	64.9	54.9	33.9	13.1
	$I_b / A$	87.9	63.9	54.9	32.9	15.1
	$I_c / A$	88.9	64.9	54.9	35.9	12.1
合环后各 节点遥测值	$I_a / A$	92	65	54	34	15
	$I_b / A$	88	61	52	30	16
	$I_c / A$	89	63	55	35	14

表 2 各节点合环环流数据

测量点	$I_A / A$	$I_B / A$	$I_C / A$	$I_{avg} / A$
志城 37 号	58	55	55	56
志城 67 号	55	52	52	53
志城 70 号	54	52	55	53.7
志新 54 号	55	52	54	53.7
志新 40 号	49	49	52	50
计算环流				53.3

表 3 各节点解环负荷数据

数据类型	参 数	志成线 37 号	志成线 67 号	志成线 70 号	志新线 54 号	志新线 40 号
计算所得解环 后各节点 电流值	$I_a / A$	56	29	20	0	53
	$I_b / A$	58	31	22	0	51
	$I_c / A$	54	28	20	0	49
解环后各节点 实测电流值	$I_a / A$	56	30	18	0	54
	$I_b / A$	57	31	21	0	54
	$I_c / A$	53	27	19	0	55

数据进行了召测,并与系统计算值进行比对,验证了此方法的准确性。利用计算所得的各节点合、解环稳态电流数据与过流保护整定值进行比较,合环冲击电流数据与速断保护整定值进行比较,判断是否可以安全合解环。实验结果表明,该系统提供的合解环决策结果正确,可以为工作人员提供较为准确的潮流数据,提供了合解环决策分析的数据基础,进而辅助调度人员进行合解环决策判断。但是在整个

计算过程中采用了一些简化,这些简化可能对计算结果带来了一定的误差:

1) 变压器的实际分接头位置不能获取,故系统忽略分接头的影响,直接折算到 10 kV 侧的额定变压器阻抗,对上级网络等值阻抗的计算会产生一定的影响;

2) 配电网中线路节点很多,不同杆号间采用的线路型号往往不同,但在计算中统一采用钢芯铝绞

线 LGJ-95 的电阻率(0.38 Ω/m) 进行计算,对环路阻抗的计算带来一定误差;

3) 配电线路中,尤其是 10 kV 配电网,线损很大,不同型号导线衔接点很多,对环路阻抗的计算带来一定误差;

4) 终端设备 FTU 有其自身的采样精度,所设计系统的合解环潮流计算是基于 FTU 采集的馈线实时数据,对计算结果可能造成一定影响;

5) 在计算中采用了一定的负荷等效方法,并认为在合解环过程中系统负荷未发生较大变化,对合解环潮流计算带来一定的影响。

## 5 结 语

首先对配电网合解环操作决策分析的理论基础进行了研究,并对系统的运行状况、配电网自动化实施状况进行了深入分析,在此基础上研究和实现了基于现有智能配电网信息平台的合解环决策分析系统,下面将工作进行一定的总结:

1) 对配电网合解环操作进行网络模型、合环潮流的计算、解环潮流的计算等研究分析,并选择出适合实际系统设计和实时的算法,为系统的设计和开发提供了理论基础。

2) 对现有馈线终端 FTU 进行研究,分析其馈线分段开关负荷电流采集原理,并在此基础上完善 FTU 的现有功能,实现对合环点压差数据的测量及合环点相序的判断。

3) 通过对 110 kV 变电站内的 10 kV 馈线联络开关进行合解环计算分析,由潮流计算结果及设备

保护验证分析得出,可以进行此次不停电负荷转移合解环操作。以实例分析说明了所设计系统具有合解环决策分析的功能,具有工程实用价值。

结合现场的实际运行情况,系统的改进应该从负荷等效、算法优化两个方面着手。总体来说,所开发的基于现有智能配电网信息平台的合解环决策分析系统可以完成系统合解环决策分析,可以辅助系统调度人员进行合解环决策判断,指导正确的合解环操作,系统的设计、开发具有一定的工程实用价值。

### 参考文献

[1] 李乃湖,倪以信,孙舒捷,等. 智能电网及其关键技术综述[J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 1-7.

[2] 黄盛. 智能配电网通信业务需求分析及技术方案[J]. 电力系统通信, 2010, 31(6): 10-12.

[3] 陆一鸣,刘东,柳劲松,等. 智能配电网信息集成需求及模型分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 1-4.

[4] 王伟灿,周昱甬. 电力系统合环电流的分析及控制对策[J]. 供用电, 2002, 19(4): 26-28.

[5] 孙宏斌,张伯明,相年德. 配电潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 26-29.

[6] 陈泉. 中小城市配网自动化系统的研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.

[7] 刘健. 变结构耗散网络——配电自动化新算法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

[8] 李苏苏. 基于配网潮流的合环电流分析与控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.

作者简介:

崔景顺(1989), 硕士研究生、电气工程师,研究方向为输配电运检技术。(收稿日期: 2018-05-25)

(上接第 13 页)

[4] 赵晓东. 一起两点接地故障引起主变保护动作的分析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2015, 20(1): 41-43.

[5] 张笑. 配电网短路故障计算方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.

[6] 付锦,丁蓝,张淦水. 区外异相接地故障引起主变差动保护动作的分析[J]. 电工技术, 2017(8): 70-72.

[7] 许彬. 基于 PSCAD 的 220 kV 线路开关雷击故障的电磁暂态分析[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 116-120.

[8] 张登花,杜浩良,郭宇隼,等. 10 kV 复合故障分析[J]. 电工技术, 2015, 8(11): 10-11.

[9] 陈忠源,王延伟,孟杰,等. 电流互感器故障案例分析

及防范措施[J]. 变压器, 2017, 54(9): 76-79.

[10] 王绪昭. 一种小接地电网两点接地短路的微机测距算法[J]. 河北电力技术, 1987(6): 55-59.

[11] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[12] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

作者简介:

朱凤娟(1987), 硕士、工程师,主要从事电力系统调控运行管理、继电保护整定计算等工作。

(收稿日期: 2018-06-27)