

## 热倒母线操作合闸可靠性在线预警技术研究

黄哲忱<sup>1</sup>, 袁宇波<sup>1</sup>, 张小易<sup>1</sup>, 张明<sup>2</sup>, 汪思满<sup>3</sup>

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019;

3. 国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153)

**摘要:**热倒母线操作中的隔刀可靠拉合检测与防误操作预警一直是变电站日常运维中的难题。提出基于差动原理的隔刀电流计算方法, 研究不同系统运行方式、隔刀接触电阻对隔刀电流分配、三相不平衡程度的影响, 充分利用母联间隔、线路间隔的状态信息, 构建基于隔刀电流、母联间隔三相不平衡度的预警判据, 结合母差保护、后台监控系统等研究热倒母线操作远程预警技术, 通过改进常规站、智能站母差保护模型, 五防系统对热倒母线操作中的隔刀拉合不可靠问题进行预警, 通过仿真、实际变电站运行数据验证了该方法的可靠性、安全性。

**关键词:**热倒母线操作; 变电运维; 五防闭锁; 母差保护

**中图分类号:** TM77

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)01-0065-05

热倒母线操作中隔刀可靠拉合的检测与预警一直是变电站日常运维中的难题。220 kV 变电站中, 通过远方操作, 合上母联开关, 母差保护投互联, 采用等电位操作原则, 先合上一组母线侧隔刀, 再拉开另一组母线侧隔刀, 在不停电的情况下实现倒母线<sup>[1-3]</sup>。由于隔刀接触不良、制造、安装等原因<sup>[2-4]</sup>, 拉合时可能因为机械卡塞而没有可靠合上, 检查时难以检出, 存在带负荷拉隔刀的隐患<sup>[4]</sup>, 对电力系统的安全运行造成了影响。文中结合实际运行中出现的问题<sup>[4-7]</sup>, 参考常规站和智能站的五防系统闭锁逻辑<sup>[8-10]</sup>, 研究合闸可靠性的在线预警技术, 在五防系统中设计集成隔刀拉合防误操作闭锁模块, 通过仿真和运行数据, 对不同运行方式下母联、隔刀接触电阻进行验证。

### 1 基于母线小差的隔刀电流计算方法

隔刀合闸不可靠时导致隔离开关触头接触电阻增大, 在倒闸操作中引起诸多异常现象, 主要体现在隔刀电流和母联电流值上<sup>[3,4]</sup>。母联电流可以通过安装在母联支路上的电流互感器直接测得, 1 隔刀(QS1)和 2 隔刀(QS2)各自的电流可以通过差动原理得到。

在各个支路断路器(QF)上安装的电流互感器(如图 1 所示)可以测得各个支路的电流。对于进行倒闸操作的支路  $n$ , 由基尔霍夫电流定律可知:

$$\sum_{\substack{i \in \mathbf{I}, \\ i \neq n}} \dot{I}_{fi} - \dot{I}_{ML} + \dot{I}_{1G} = 0 \quad (1)$$

式中:  $\dot{I}_{fi}$  为编号为  $i$  的支路电流;  $\mathbf{I}$  表示 I 母上所有

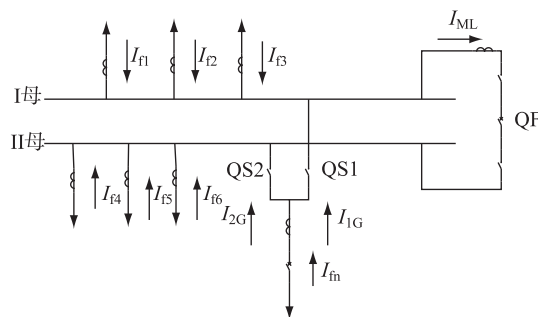


图 1 电流互感器安装位置

支路的编号所构成的集合;  $\dot{I}_{ML}$  为母联电流;  $\dot{I}_{1G}$  为 1 隔刀电流。由于各个支路和母联电流可测, 可以计算出隔刀 1 的电流。同理可得 2 隔刀上的电流:

$$\sum_{\substack{i \in \mathbf{II}, \\ i \neq n}} \dot{I}_{fi} + \dot{I}_{ML} + \dot{I}_{2G} = 0 \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{II}$  表示 II 母上所有支路的编号所构成的集合。由式(1)和(2)可知, 在倒闸操作中, 小差计算结果为隔刀电流, 不停用则保护出口。因此, 倒闸操作中会将母差投互联, 程序不计算小差。在预警模块中, 利用了母差计算模块计算隔刀电流, 但是保护不出口。

### 2 三相平衡时合闸可靠性判别

#### 2.1 三相平衡时小电流判据

当三相平衡时, 热倒母线操作时各个支路的单相等值电路如图 2 所示。由 I 母 1 隔刀接触电阻  $R_1$ 、II 母 2 隔刀接触电阻  $R_2$  及母联开关电阻  $R_{ML}$  构成的回路, 应用基尔霍夫电压定律有:

$$R_{ML} \dot{I}_{ML} = R_1 \dot{I}_{1G} - R_2 \dot{I}_{2G} \quad (3)$$

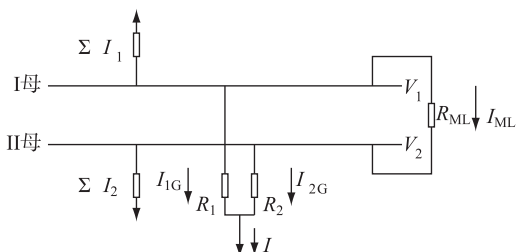


图2 双母线单相等值电路

对于倒闸操作的支路  $n$  由基尔霍夫电流定律得:

$$\dot{I}_{1G} + \dot{I}_{2G} = \dot{I} \quad (4)$$

则隔刀电流为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{1G} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dot{I} + \frac{R_{ML}}{R_1 + R_2} \dot{I}_{ML} \\ \dot{I}_{2G} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \dot{I} - \frac{R_{ML}}{R_1 + R_2} \dot{I}_{ML} \end{cases} \quad (5)$$

当隔刀(以2隔刀为例)非可靠合闸时,相应隔刀的接触电阻  $R_2$  显著增大,即  $R_2 \gg R_1$ ,且  $R_2 \gg R_{ML}$ ,则由式(5)可知  $\dot{I}_{2G} \approx 0$ 。在不同运行方式下,母联有电流通过,母线存在压差,影响倒闸支路的隔刀电流分配。母线压差较小的运行方式下,母联无电流,即  $I_{ML} \ll I$ ,当隔刀可靠合闸时,则

$$\begin{cases} \dot{I}_{1G} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dot{I} \\ \dot{I}_{2G} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \dot{I} \end{cases} \quad (6)$$

则  $I_2/I_1 = R_1/R_2$ ,2隔刀与1隔刀上的电流大小接近。正常情况下,母联GIS的电阻大约为  $100 \mu\Omega$ ,整个母联支路的电阻大约为  $300 \mu\Omega$ 。当压差不大(典型值  $I_{ML} < 0.1 I$  时)且三相平衡时,可使用判据:

$$I_{2G} > I_e \quad (7)$$

当式(7)成立时,说明可靠合闸。 $I_e$  的整定与运行方式相关,可依据母联电流  $I_{ML}$  整定,典型值可以取  $0.1 I_{ML}$ 。当两条母线压差较大,即母联电流  $I_{ML}$  较大时,则需要采用三相不平衡判据。

## 2.2 不同运行方式下小电流判据仿真

建立三相平衡时单相等值电路的仿真模型,模型参数依据不同运行方式确定。与运行方式相关的模型参数有:I母电压、II母电压、I母其余支路有功潮流、II母其余支路有功潮流、I母其余支路无功潮流、II母其余支路无功潮流。

220 kV 主变容量大约  $540 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,倒闸的支路按有功潮流 96 MW,无功潮流 30 MVar(单相有功潮流 32 MW,无功潮流 10 MW)。母联电阻  $300 \mu\Omega$ 。

正常可靠合闸时,隔刀电阻  $100 \mu\Omega$ ;合闸不可靠时,隔刀接触电阻  $100 \Omega$ 。表1为不同运行方式下模型参数。

表1 三相平衡时仿真参数

模型参数	I母与II母 无压差	I母电压 高于II母	I母电压 低于II母
I母电压/kV	220	220.000 1	220
II母电压/kV	220	220	220.000 1
I母其余支路 有功潮流/MW	96	12	96
I母其余支路 无功潮流/MVar	30	3	30
II母其余支路 有功潮流/MW	96	96	12
II母其余支路 无功潮流/MVar	30	30	3

上述模型参数结果如表2所示,只考虑1隔刀和2隔刀的电流幅值,未列出电流相角。由表2可知,在不同运行方式下,当三相平衡时,若2隔刀电流非常小时,表明合闸不可靠。

表2 三相平衡时仿真结果

		A		
模型参数		I母与II母 无压差	I母电压 高于II母	I母电压 低于II母
正常 合闸	1隔刀 电流幅值	76.20	573.18	427.88
	2隔刀 电流幅值	76.20	427.88	573.18
合闸 不可靠	1隔刀 电流幅值	152.39	152.39	152.39
	2隔刀 电流幅值	0.00	0.00	0.00

仿真结果验证了:在压差不大的运行方式下,1隔刀和2隔刀合闸可靠时,2个隔刀均有电流通过,当合闸不可靠时,2隔刀电流非常小。

## 3 三相不平衡时合闸可靠性判别

### 3.1 基于不平衡度的合闸不可靠判据

对式(1)和式(2)作坐标变换,其余支路三相平衡,零序电流为0,则对于两个隔刀有:

$$I_{ML0} = I_{1G0} = I_{2G0} \quad (8)$$

即母联的零序电流即为两个隔刀的零序电流。

三相不平衡度定义为任意两相电流幅值的最大与最大电流幅值的比值<sup>[11,12]</sup>。包括母联断路器三相不平衡度:

$$\Delta I_{ML} = \frac{\max\{|I_{ML \cdot i}| - |I_{ML \cdot j}|\}, i = a, b, c, j = a, b, c, i \neq j\}}{\max\{|I_{ML \cdot a}|, |I_{ML \cdot b}|, |I_{ML \cdot c}|\}} \quad (9)$$

倒闸间隔I母隔刀三相电流不平衡度为:

$$\Delta I_{1G} = \frac{\max\{| |I_{1G,i}| - |I_{1G,j}| |, i = a, b, c, j = a, b, c, i \neq j\}}{\max\{|I_{1G,a}|, |I_{1G,b}|, |I_{1G,c}| \}} \quad (10)$$

倒闸间隔 II 母隔刀三相电流不平衡度为:

$$\Delta I_{2G} = \frac{\max\{| |I_{2G,a}| - |I_{2G,b}| |, i = a, b, c, j = a, b, c, i \neq j\}}{\max\{|I_{2G,a}|, |I_{2G,b}|, |I_{2G,c}| \}} \quad (11)$$

对于母联、隔刀电流的三相不平衡度,典型值取 5%~10%,即超过典型值时,可判定三相不平衡。

### 3.2 合闸不可靠时隔刀三相电流波形分析

合闸后三相等值电路仿真模型参数同表 1。设 A 相接触不良,接触电阻变为 100  $\Omega$ ,B 相、C 相保持不变。仿真结果表明,I 母与 II 母压差、负载连接方式对电流波形几乎没有影响。合闸不可靠时接触电阻选为 1  $\Omega$  或 100  $\Omega$  对最终波形也几乎没有影响。

I 母、II 母无压差,选用三相星型接地负载,母联电流、1 隔刀电流、2 隔刀电流如表 3 所示。2 个隔刀及母联电流波形如图 3 所示。

表 3 单相合闸不可靠时仿真结果 A

测量量	A 相	B 相	C 相	零序电流
I 隔刀电流	29.92	95.73	95.73	21.93
II 隔刀电流	0.00	65.81	65.81	21.94
母联电流	119.66	53.85	53.85	21.96

对 A 相、B 相同时合闸不可靠情况进行仿真,接触电阻为 1  $\Omega$ ,仿真结果如表 4 所示。2 个隔刀及母联电流波形如图 4 所示。

表 4 两相合闸不可靠时仿真结果 A

测量量	A 相	B 相	C 相	零序电流
I 隔刀电流	29.97	29.95	95.73	21.92
II 隔刀电流	0.03	0.03	65.82	21.93
母联电流	119.70	119.63	53.85	21.94

仿真结果验证了:(1)母联零序电流与 1 隔刀、2 隔刀零序电流相等;(2)当单相、两相合闸不可靠时,合闸不可靠的相电流为会明显偏小,母联合闸不可靠相电流会偏大。

## 4 合闸可靠在线预警流程

2 隔刀合闸的可靠性主要反映在 2 个隔刀电流的分配、隔刀电流的三相不平衡度,在五防系统内安装合闸可靠评估模块<sup>[13,14]</sup>,对 2 隔刀合闸可靠性

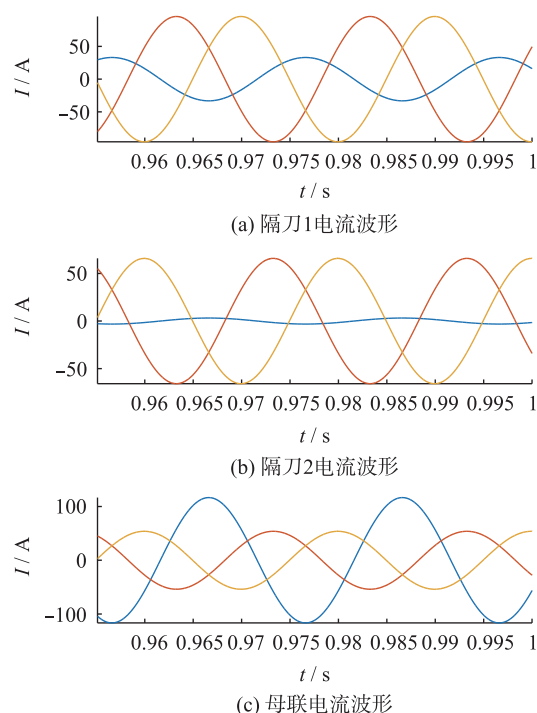


图 3 单相合闸不可靠时电流波形

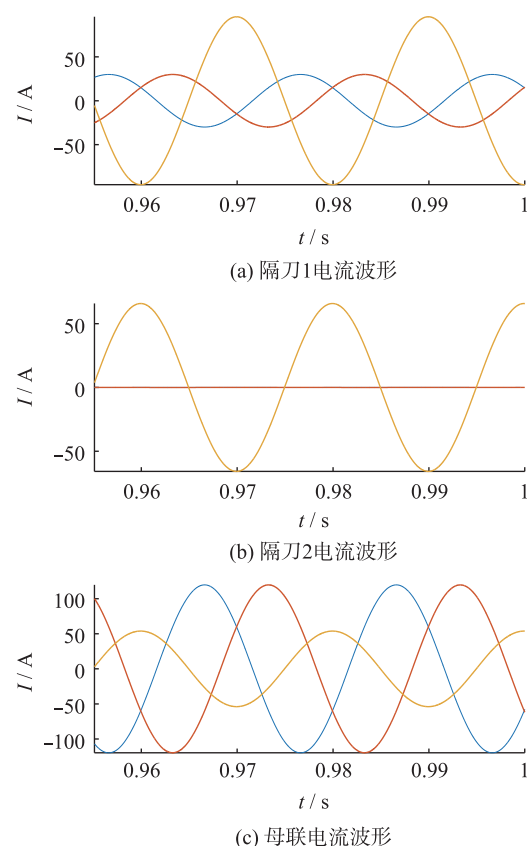


图 4 两相合闸不可靠时电流波形

进行预警,合闸操作可靠评估判定的流程如图 5 所示,其步骤如下:

步骤 1,合上另一组隔刀前,母差保护小差先退出,但是计算模块保持工作,报文制造(MMS)协议向监控后台发送倒闸操作开始的情况,启动五防闭

锁。在现场利用测量设备测量母联电流以及各个支路上的电流,利用母差保护的计算模块进行计算。

步骤2,当母联上无电流时,根据测量的母联电流以及各个支路上的电流,利用差动原理计算两组隔离刀电流,转至步骤4。

步骤3,当母联上有电流时,根据母联电流判断两组隔离刀电流中是否存在三相不平衡,如果是,则判定合闸不可靠,热倒操作不安全,启动隔离刀零序电流闭锁,发出告警,不解除五防闭锁,评估结束;如果不是,则根据测量的母联电流以及各个支路上的电流,利用差动原理计算两组隔离刀电流。

步骤4,判断两组隔离刀电流是否均超出各自整定的电流范围,如果有一组超出,则判定热倒操作不安全,发出告警,不解除五防闭锁,评估结束;如果未超出,则判定合闸可靠,热倒操作安全,解除五防闭锁,评估结束。

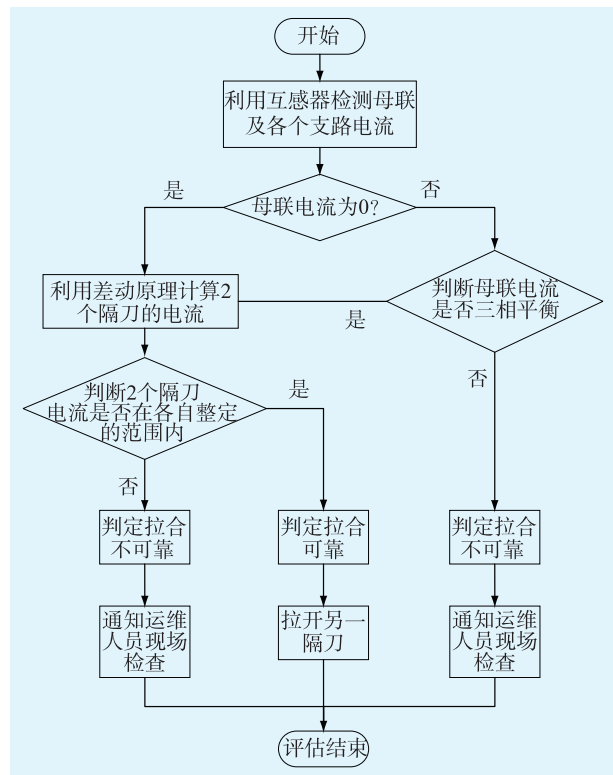


图5 合闸操作可靠评估判定流程

## 5 倒闸操作合闸预警实例分析

### 5.1 变电站运行方式

某变电站倒闸操作前运行方式如图6所示,220kV母联开关处于运行状态;间隔*i*通过2个隔离刀跨接在I母、II母运行(正在执行倒排操作)。此时合上II母的隔离刀(2隔离刀),准备拉开I母的隔离刀(1隔离刀)。

### 5.2 隔离刀电流计算

拉开I母上的1隔离刀之前,由故障录波器记录

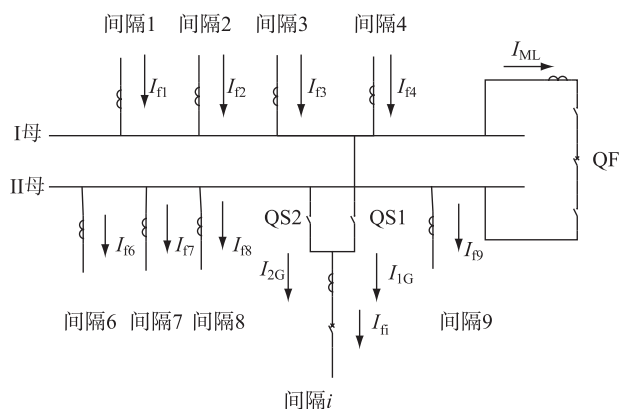


图6 某变电站运行方式示意图  
的各个支路电流如表5所示。

表5 某变电站合闸后各支路电流

支路	A相/A	B相/A	C相/A	三相不平衡度/%
母联电流	0.222 ∠-83.927	0.283 ∠178.602	0.466 ∠44.931	52.36
I母间隔1	0.207 ∠30.283	0.204 ∠-89.923	0.204 ∠151.013	1.45
I母间隔2	0.756 ∠29.204	0.788 ∠-93.213	0.778 ∠144.809	4.06
I母间隔3	0.277 ∠35.955	0.277 ∠-81.778	0.288 ∠159.206	3.82
I母间隔4	0.577 ∠-150.370	1.203 ∠88.946	0.594 ∠-30.397	52.04
II母间隔 <i>i</i>	0.878 ∠26.307	0.908 ∠-94.993	0.435 ∠147.306	52.09
II母间隔6	0.744 ∠-147.695	0.824 ∠89.356	0.755 ∠-34.440	9.71
II母间隔7	0.449 ∠32.221	0.441 ∠-89.042	0.443 ∠146.623	1.78
II母间隔8	0.296 ∠33.865	0.282 ∠-79.179	0.300 ∠157.238	6.00
II母间隔9	0.874 ∠-153.357	0.800 ∠89.166	0.887 ∠-28.120	9.80

由母联电流较大并且不平衡即可初步判定拉合不可靠,需要进行现场检查。根据其余各支路电流,计算I母小差和II母小差电流如表6所示。

表6 某变电站隔离刀电流

支路	A相/A	B相/A	C相/A	不平衡度/%
I母小差	1.266 ∠58.655	1.327 ∠-62.971	0.869 ∠177.072	34.5
II母小差	0.884 ∠-123.979	0.904 ∠115.192	0.902 ∠-2.715	2.2

经计算,I母小差计算结果的三相不平衡度为34.5%,高于典型值,可初步判定合闸不可靠,发出预警信息,闭锁拉开1隔离刀的操作。现场检查为2隔离刀C相接触不良,调取合闸后录波图形,图7为

叠加的 I 母、II 母各个支路三相电流波形。

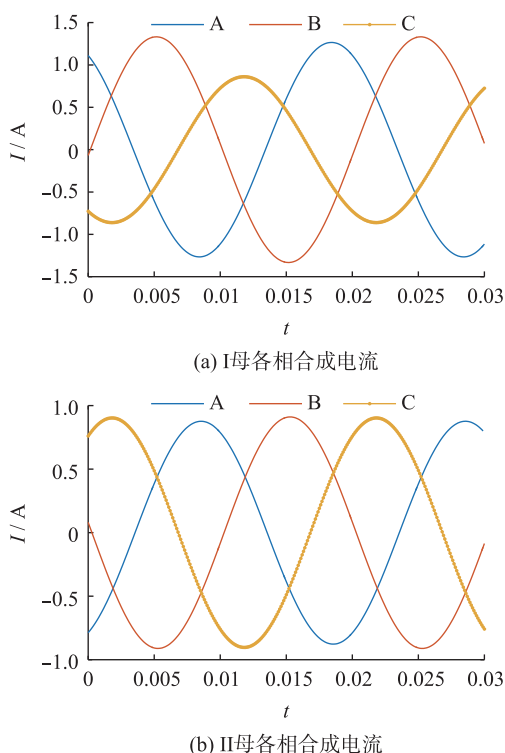


图7 I母 II母各支路三相电流叠加波形

图7显示,II母各个支路叠加的电流波形三相不平衡不明显,而I母各个支路叠加的电流波形C相电流波形明显偏小,这是因为I母小差计算结果为I母各支路电流之和(为零)加上2隔刀电流。与仿真结果一致。

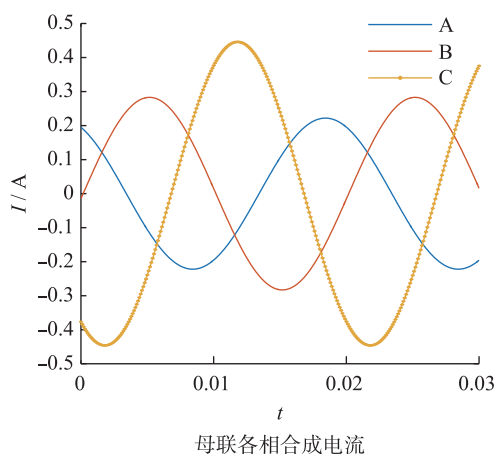


图8 母联各相电流波形

如图8,由故障录波器记录的母联电流波形显示,A相、B相的电流接近,C相电流明显偏大。与仿真结果一致。

## 6 结束语

文中提出一种隔刀电流计算方法,通过检测母联电流和各个支路电流计算隔刀电流,基于母联电

流和隔刀电流大小准确地判断热倒母线操作中隔刀是否可靠合闸,并在合闸不可靠时发出闭锁拉开隔刀的操作,发出预警信息。仿真结果和案例表明,常规运行方式下操作时,该方法能够有效判断隔刀是否可靠合闸,避免带负荷拉开隔刀的操作。后续将针对实际运行时系统有可能就存在三相不平衡,进一步研究判断隔刀合闸可靠的整定值。

### 参考文献:

- [1] 胡宇航,丁海龙,唐敏.一种隔离开关操作机构缺陷的改进措施[J].江苏电机工程,2015,34(1):13-14,17.
- [2] 孙晓敏.变电站倒闸操作过程中隔离开关故障处理方法[J].广东电力,2011,24(7):84-89.
- [3] 李石.一起倒闸操作中母线电压异常现象分析[J].继电器,2007(12):71-72.
- [4] 于立涛,王萍,夏晓滨.一起特殊故障引起母差保护动作的分析[J].电力系统自动化,2007,12:105-107.
- [5] 衡思坤,张自伟,周光宇,等.变电站作业安全管控系统研究[J].江苏电机工程,2016,35(2):31-33,38.
- [6] 刘奇,林少华,黄志元.220 kV 母线保护动作分析及事故处理[J].电力系统保护与控制,2010,38(17):153-157,163.
- [7] 胡巨,陈宏辉.一种新型的变电站在线式五防系统的实现[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):118-121.
- [8] 智全中,秦广召,娄伟,等.五防系统在智能化变电站中应用分析[J].电力系统保护与控制,2009,37(23):108-111.
- [9] 宋杰,靳希,鲍伟等.基于 IEC61850 的智能继电保护装置协同测试系统的研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(5):59-63,68.
- [10] 呼士召,潮铸,钟华赞,等.电网调度操作的风险后果值建模及应用[J].电力系统自动化,2016,40(7):54-60.
- [11] GB/T 15543—2008 电能质量三相电压不平衡[S].北京:中国国家标准化管理委员会,2008.
- [12] GB/T 15543—1995 电能质量三相电压允许不平衡度[S].
- [13] 五一清,杨志强,高海龙.综合自动化变电站中隔离刀闸防误操作的闭锁等略分析[J].电力自动化设备,2011,(5):137-140.
- [14] 龚森.变电站电动刀闸状态监测及预警系统研究与应用[D].广州:华南理工大学,2015.

### 作者简介:



黄哲忱

黄哲忱(1989—),男,江苏常州人,工程师,从事电力系统继电保护研究工作;

袁宇波(1975—),男,江苏丹阳人,博士,研究员级高工,从事电力系统继电保护研究工作;

张小易(1978—),男,河南许昌人,高级工程师,从事调度自动化、二次专业相关技术研究工作;

张明(1976—),男,江苏南京人,高级工程师,从事电网调度工作;

汪思满(1972—),男,江苏盐城人,高级工程师,从事母线保护的研究与开发工作。

(下转第78页)

- [6] 梁海平, 芦佳硕, 顾雪平. 基于恢复路径转移系数的电网黑启动分区策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 1-7.
- [7] 张磊, 张璨, 林振智, 等. 大停电后电力系统黑启动分区两步策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 14-21.
- [8] 梁海平, 顾雪平. 基于节点电压相近度的黑启动子系统划分方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 81-86.
- [9] 顾雪平, 韩忠晖, 梁海平. 电力系统大停电后系统恢复的优化分区算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 41-46.
- [10] 门冉, 高小涛, 盛昌栋. 含分布式风光电源的配电系统故障恢复策略[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(1): 9-12.
- [11] MOTA A A, MOTA L T M, MORELATO A. Dynamic Evaluation of Reenergization Times During Power Systems Restoration[C]//IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, Latin American, Sao Paulo, 2004.
- [12] SARMADI S A N, DOBAKSHARI A S, AZIZI S, et al. A Sectionalizing Method in Power System Restoration Based on WAMS[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 02(1): 190-197.
- [13] 林振智, 文福拴, 周浩. 基于复杂网络社团结构的恢复子系统规划算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 12-16.

作者简介:



陈祺炜

陈祺炜(1994—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生在读, 研究方向为电力系统安全防御和系统恢复;

吴熙(1987—), 男, 江苏靖江人, 副研究员, 研究方向为电力系统低频振荡、次同步振荡、新能源发电技术、FACTS建模与分析;

李海峰(1973—), 男, 河北怀安人, 研究员级高级工程师, 从事电网调度运行管理工作;

罗凯明(1978—), 男, 贵州惠水人, 高级工程师, 从事电网调度运行管理工作;

刘林(1985—), 男, 江苏泰州人, 博士, 从事电网调度运行管理工作。

## Recovery Network and Partition Optimization Algorithm of Isolated Networks Under the Full Black State

CHEN Qiwei<sup>1</sup>, WU Xi<sup>1</sup>, LI Haifeng<sup>2</sup>, LUO Kaiming<sup>2</sup>, LIU Lin<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Dispatch and Control Center, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The isolated grid which is splitting after the grid fault has become an important part of the power system. Giving priority to the isolated grid restoration has the advantage of simplifying calculation, accelerating the recovery and restoring the important load in time. It needs to be divided into several partitions in the total black state. This paper is aimed at the rapidity and stability of the restoration, comprehensively considering isolated network partitioning strategy and the restoration skeleton, introducing the shortest path algorithm and integer linear programming, proposing a new optimization algorithm for isolated network partitioning. The algorithm makes the shortest start time of unit as the objective function, constructed by the active power and reactive power balance of the unit to simplify a complex multi objective nonlinear programming problem as a single objective and multi constrained linear programming problem. New England 10-Machine 39-Bus System is used as an example to verify the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** black-start; isolated network partition; parallel recovery; recovery network

(上接第 69 页)

## Research of Online Alerting Technology for Bus Switching Reliability

HUANG Zhechen<sup>1</sup>, YUAN Yubo<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoyi<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>2</sup>, WANG Siman<sup>3</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

3. Nanjing Guodian Nanzi Grid Automation Co. Ltd., Nanjing 211153, China)

**Abstract:** Reliable pull-up detection and prevention of misuse warning in the operation of heat-drop bus has been a difficult problem of daily operation and maintenance of substations. In this paper, a computation method is proposed based on research on influence of system operation and contact resistor on switch currents and unbalance of three phase. With state information in bus coupler and transmission line collected, a remote forewarning method for bus switching is studied based on switcher current and degree of three-phase unbalance. The technology combined with bus protection and background monitoring system, is integrated in the model of bus protection of traditional substation or smart substation, and installed in five-anti system to forewarning the danger in bus switching. The reliability of the method is verified by simulation and operation data of actual substation.

**Key words:** bus switching; substation operation; five-anti lock; bus protection