

配电线路旁路作业负荷转移特性的分析研究

10 kV配电网是电力基础设施, 配电线路旁路作业法可以在确保用户不停电的情况下进行作业。基于10 kV配网线路旁路作业法的电磁暂态过程计算模型, 对不同作业方式下的负荷转移特性进行仿真计算和试验验证, 分别讨论作业方式、线路长度和投切相等因素对暂态过程和稳态状态的影响, 为提高配电线路安全可靠, 并为配电线路旁路作业法操作过程提供参考依据。结果表明: 负荷开关操作和人工分相操作方式下负荷转移特性相近, 旁路条件下的带负荷断接线路是安全的。同时计算得出作业过程中, 空载旁路电缆投切操作和空载架空线路退出操作会产生较高幅值的过电压和过电流, 总结得出旁路作业稳态分流公式。这些研究成果为旁路作业法的开展提供理论依据。

何书华/国网福州供电公司 苏梓铭 刘 庭/中国电力科学研究院



何书华/工程师

关键词/Keywords

10 kV配电线路·
旁路电缆·
带电作业·

配电线路带电作业已成为保证配电网安全运行, 提高供电可靠性的基本技术方法之一, 常规项目包括更换绝缘子、避雷器、横担、熔断器、修补导线、断引线和接引线等, 对于较为复杂的检修、施工项目, 如带电更换变压器、检修或更换故障线段等工作, 为达到用户不停电的目的, 需通过旁路作业等不停电作业方式来完成。

配电线路旁路作业法可以在确保用户不停电的情况下进行作业。当架空线路需要检修时, 可在检修线路跨接装配临时旁路电缆线路, 再将负荷转移至临时旁路电缆线路, 断开被检修线段, 保持对线路用户不间断供电。当故障检修完毕后, 再将负荷转移至架空线路, 恢复正常运行状态。在这一负荷转移过程中, 在旁路电缆和架空线路上可能出现过电压和过电流, 因此需分析研究负荷转移的特性和规律, 并采取必要的安全

措施, 防止过电压、过电流和电弧等可能产生的影响和危害, 确保作业人员的安全。图1为旁路作业法原理示意图。

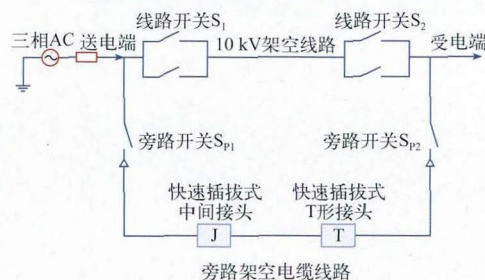


图1 旁路作业法原理示意图

旁路作业暂态过程仿真计算

1. 10 kV配电网等效参数及计算模型

以某110 kV火电厂为仿真实例, 该火电厂装有3台机组和2台主变压器, 由一回线路与110 kV变电站连接。该变电站通过主变压器向10 kV及35 kV线路供电。变电站中有2台25 MV·A的主变压器, 配电网中10 kV线路出线8回, 35 kV线路出线4回。

2. 旁路电缆搭接过程仿真计算

(1) 采用负荷开关三相同期搭接空载旁路电缆

根据所建立的模型进行仿真计算, 左侧旁路开关 S_{p1} 合上时, 此时相当于合空载线路, 设开关在电压为峰值时合闸, 此时得到的架空线路与旁路电缆波形如图2和图3所示。

从图3中波形可以看出, 在合上开关瞬间, 开关断口的暂态电流值较大, 最大暂态电流值为146 A, 因此, 旁路设备中的断路器需具有良好的耐受冲击电流的能力。

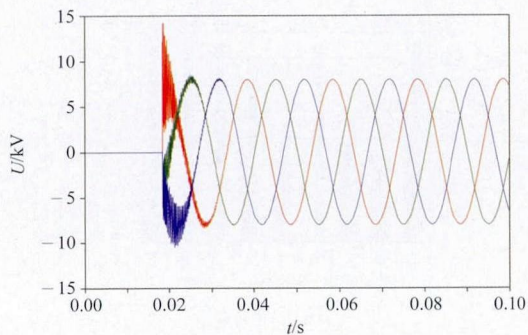


图2 旁路电缆上三相电压波形

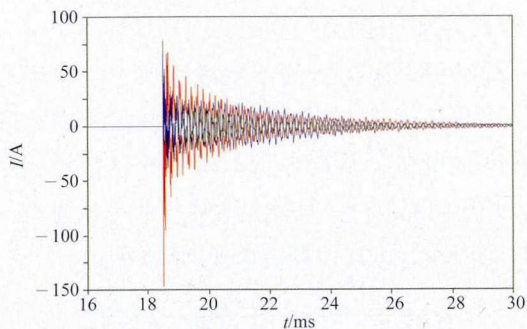


图3 合上瞬间开关上的暂态电流波形

在 S_{p1} 合上后,再合上 S_{p2} ,此时无过电压和过电流出现。

合闸相角对空载电缆搭接暂态过程的影响如图4所示。

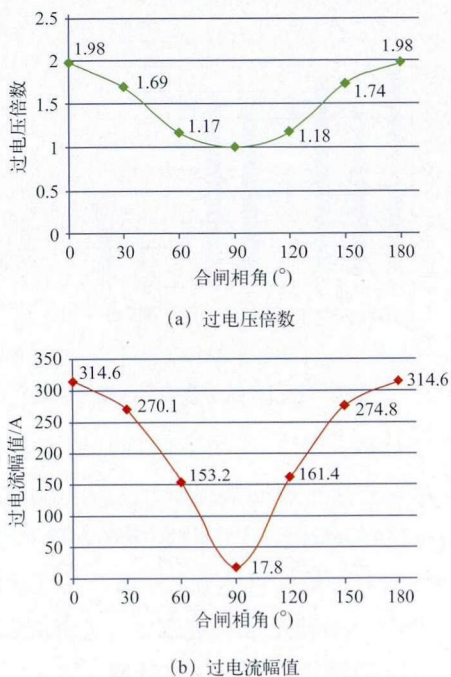


图4 合闸相角对空载电缆搭接过程影响

从图4可知,在电压峰值合闸,过电压和过电流均会达到峰值,最大过电压倍数为1.98倍,最大过电流为314.6 A;电压过零时刻合闸,过电压和过电流均降到最小,最小过电压倍数为1.2倍,最小过电流为17.8 A。

线路长度对空载电缆搭接暂态过程的影响如图5所示。

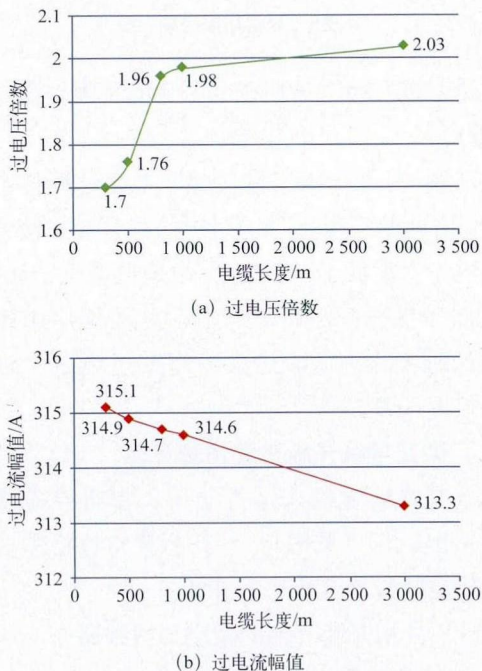
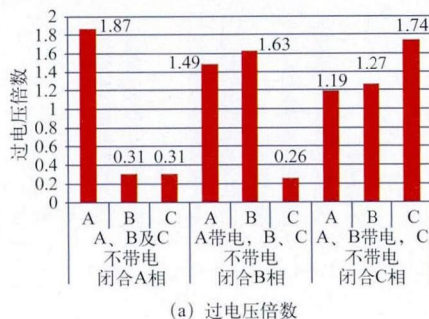


图5 电缆长度对空载电缆搭接过程影响

从图5可知,过电压随着电缆线路长度的变长而增大,最高达到2倍。过电压不超过2.03倍,过电流幅值基本上不随电缆长度的增加而改变。

(2) 采用作业人员手动操作方式分相搭接旁路电缆

作业人员手动操作,分相搭接空载旁路电缆过程仿真计算结果如图6所示。仿真计算中旁路电



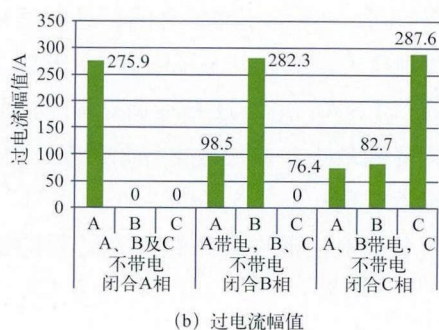


图6 分相搭接空载电缆

缆线路长度1 km，A相在电压峰值合闸，合闸间隔0.045 s。

从图6可知，人工搭接旁路电缆过程将产生最高1.87倍过电压和287.6 A过电流。分相搭接旁路电缆过电压水平低于2倍，旁路电缆电流小于300 A。人工操作搭接旁路电缆与负荷开关操作相比，可认为两种操作方式下旁路电缆的过电压、过电流水平接近一致。

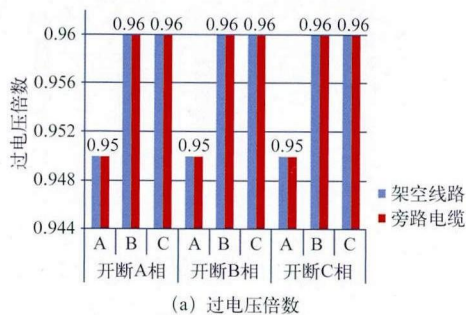
3. 架空导线开断过程仿真计算

当旁路电缆投入运行之后，需将待检修架空线路退出运行（见图1）。开断架空线路需要作业人员使用断线器分相进行开断。

(1) 分相开断一侧的架空导线线路

当旁路电缆与架空线路并联运行后，需人工剪断架空线路，在剪断过程中线路接触电阻会不断发生变化。使用时变电阻模拟变化的接触电阻，分析该操作过程的安全性。仿真计算中考虑断口接触电阻变化，开断间隔0.5 s。仿真计算结果如图7所示。

从图7可知，旁路条件下带负荷剪断架空线路操作没有在架空线路和旁路电缆上产生过电压，也没有产生过电流。



(a) 过电压倍数

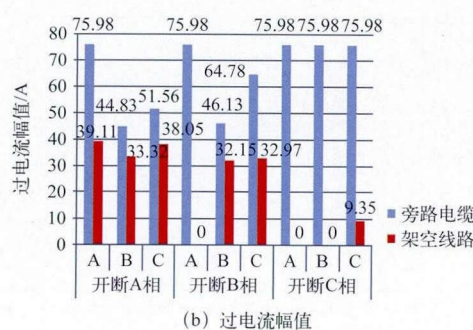
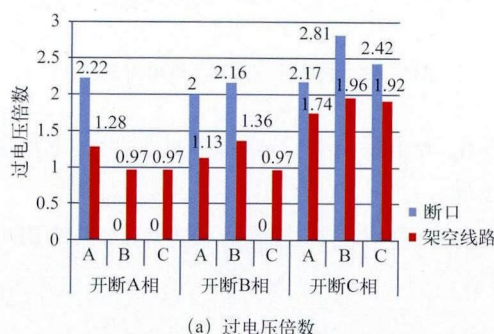


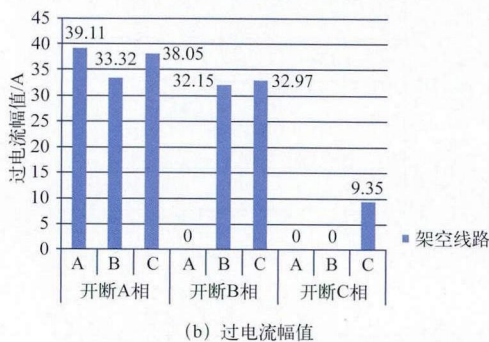
图7 带负荷开断架空线路

(2) 分相开断另一侧的架空导线线路

此时需退出运行的架空线路属于空载运行状态，可将其视作电容性负载，因此需考虑空载线路分闸过电压。从严分析，考虑断口接触电阻变化，开断间隔0.5 s，切除过程中发生一次重燃，线路长度1 km。仿真计算结果如图8所示。



(a) 过电压倍数



(b) 过电流幅值

图8 分相开断空载架空线路

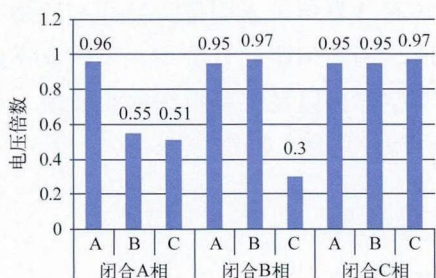
通过计算得出，三相不同期开断空载架空导线，在考虑一次重燃的情况下开关断口的过电压倍数最高可达到2.81倍，其变化范围为2.02~2.81倍；架空导线过电压最高可达到1.96倍，其变化范围为0.96~1.96倍；旁路电缆无过电压、过电流出现。

4. 架空导线投入过程仿真计算

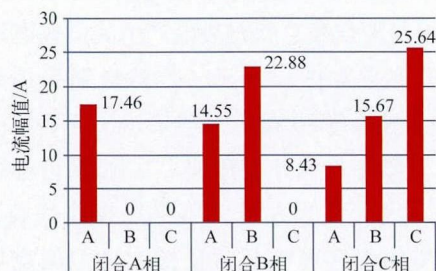
当架空线路检修完成之后，需要将线路投

入运行, 由于架空线路上没有开关, 因此三相线路的投入是靠带电作业人员使用带电作业工具进行操作的, 每相线路的投入会存在一个操作时间差。仿真计算中, 架空线路长度1 km, A相在电压峰值合闸, 合闸间隔0.045 s。

分相搭接空载架空线路仿真计算结果如图9所示。



(a) 电压倍数



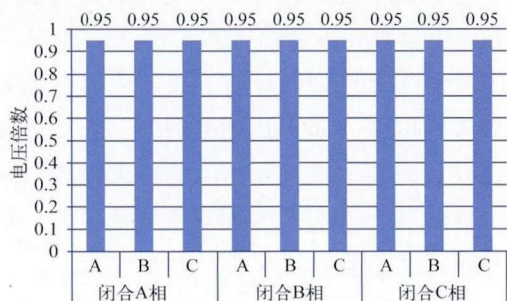
(b) 电流幅值

图9 分相搭接空载架空线路

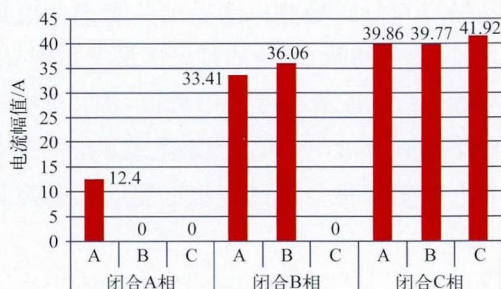
从图9中可以看到, 由于空载架空线路对地电容较小, 人工分相搭接空载架空线路过程没有过电压产生, 也没有出现合闸涌流。

分相带负荷搭接另一侧架空线路仿真计算结果如图10所示。

从图10中可以看到, 分相带负荷搭接另一侧架空线路过程中, 也没有过电压和过电流出现。



(a) 电压倍数



(b) 电流幅值

图10 分相带负荷搭接架空线路

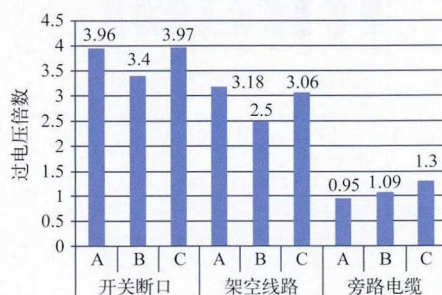
5. 旁路电缆退出过程仿真计算

(1) 采用负荷开关三相同期退出旁路电缆

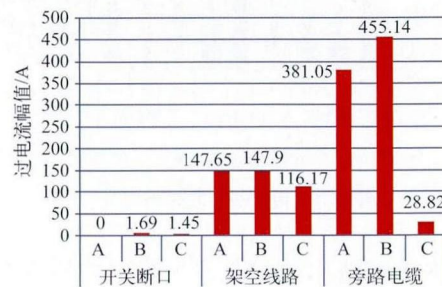
在使用负荷开关开断一侧的旁路电缆时, 根据仿真计算, 无过电压和过电流, 可以不作考虑。

在使用负荷开关开断另外一侧的旁路电缆时, 退出运行的旁路电缆线路处于空载运行状态, 可以将其视作电容性负载, 因此需要考虑空载线路分闸过电压。

在检修范围内, 使用负荷开关基本不会发生电弧重燃, 但为了从严分析, 在仿真计算中假定分断过程中发生了一次重燃, 取旁路电缆线路长度1 km, 架空线路长度0.9 km。仿真计算结果如图11所示。



(a) 过电压倍数



(b) 过电流幅值

图11 三相同期开断空载旁路电缆

从图11可知, 旁路电缆退出并考虑一次重燃的情况下, 开关断口承受的过电压最大达到4倍, 架空导线上过电压最高可达3.18倍, 流过架空导线的过电流幅值为147.90 A; 旁路电缆承受的过电压倍数为1.30倍, 但是流过旁路电缆的过电流高达455.14 A。

(2) 采用作业人员手动操作方式分相退出旁路电缆

在分相开断一侧的旁路电缆时, 根据仿真计算, 无过电压和过电流, 可以不作考虑。

在分相开断另外一侧的旁路电缆时, 需要考虑空载线路分闸过电压。

在检修范围内, 使用负荷开关基本不会发生电弧重燃, 但为了从严分析, 在仿真计算中假定分断过程中发生了一次重燃, 取旁路电缆线路长度1 km, 架空线路长度0.9 km。仿真计算结果如图12所示。

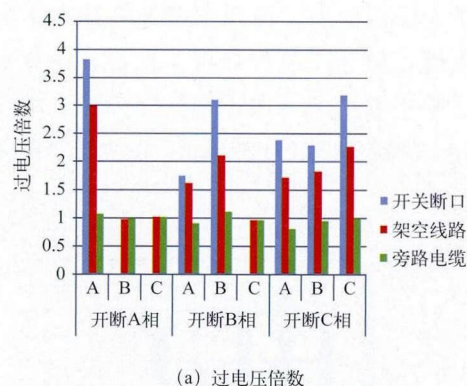
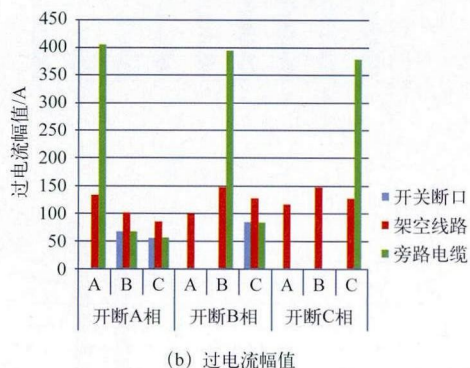


图12 分相开断空载旁路电缆

旁路电缆退出过程, 开关断口将承受3.83倍的过电压, 架空线路将承受2.99倍的过电压和幅值为147.94 A的过电流; 旁路电缆线路上无过电压产

生, 但是通过旁路电缆的过电流幅值为406.23 A, 可认为人工分相开断和负荷开关三相同期开断的过电压、过电流水平接近一致。

旁路作业稳态过程仿真计算

针对不同架空导线与旁路电缆的长度组合、截面组合和材料组合进行稳态电流的分流仿真计算, 仿真计算结果表明架空导线和旁路电缆并联运行时, 两条回路的分流与其阻抗成反比。对照常见架空导线以及旁路电缆的阻抗值, 得出旁路电缆分流检验公式如表1所示。

旁路作业试验

1. 断接试验

试验测量带电断接旁路电缆至架空导线时, 断接处电缆与架空线之间充放电产生的电容电流。

试验布置如图13所示。空载电缆采用截面积50 mm²柔性电缆50 m, 一端采用快速插拔旁路电缆终端与旁路负荷开关连接, 一端采用电缆户外终端及引线。试验人员采用绝缘操作杆将10 kV空载电缆的引线进行开断及接入模拟架空导线试验, 试验过程记录电缆终端及引线处电压波形。



图13 空载旁路电缆断接试验示意图

开断、接入试验过程可以听到断接处电缆与架空线之间充放电产生的电弧电流（火花放电）声音, 且肉眼可观察到火花放电。测量到的空载电缆稳态电容电流小于0.1 A。

由试验结果可知, 开断、接入电容电流较小的空载柔性电缆（50 m以内）时, 不会产生较高的过电压, 开断、接入处产生的电弧电流（火花放电）能量较小, 在采取安全措施情况下, 可以进行开断、接入操作。

2. 稳态分流试验

试验采用40 V/5 kA低压大电流发生器, 架空

表1 旁路电缆分流检验公式

待检修的架空绝缘导线			架空线路与旁路电缆分流之比		
截面积/mm ²	导体材料	待检修长度L ₁ /m	所使用的旁路电缆的长度L ₂ /m	使用的旁路电缆截面积为	使用的旁路电缆截面积为
					35 mm ² 50 mm ²
35	铝、钢芯 铝绞线 (软铜)	100	200	1 : 0.9 (1 : 0.6)	1 : 1.22 (1 : 0.82)
		150	250	1 : 1.08 (1 : 0.72)	1 : 1.46 (1 : 0.78)
		200	300	1 : 1.2 (1 : 0.8)	1 : 1.62 (1 : 1.08)
		300	400	1 : 1.35 (1 : 0.9)	1 : 1.83 (1 : 1.22)
		400	500	1 : 1.44 (1 : 0.96)	1 : 1.95 (1 : 1.3)
		500	600	1 : 1.5 (1 : 1)	1 : 2.03 (1 : 1.36)
35		待检修架空导线导体为铝或钢芯铝绞线		1 : (1.8 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (2.44 $\frac{L_1}{L_2}$)
		待检修架空导线导体为软铜		1 : (1.2 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (1.63 $\frac{L_1}{L_2}$)
50		待检修架空导线导体为铝或钢芯铝绞线		1 : (1.38 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (1.86 $\frac{L_1}{L_2}$)
		待检修架空导线导体为软铜		1 : (0.95 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (1.28 $\frac{L_1}{L_2}$)
70		待检修架空导线导体为铝或钢芯铝绞线		1 : (1.03 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (1.39 $\frac{L_1}{L_2}$)
		待检修架空导线导体为软铜		1 : (0.76 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (1.03 $\frac{L_1}{L_2}$)
120	快速 检验 公式	待检修架空导线导体为铝或钢芯铝绞线		1 : (0.73 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (0.98 $\frac{L_1}{L_2}$)
		待检修架空导线导体为软铜		1 : (0.62 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (0.83 $\frac{L_1}{L_2}$)
150		待检修架空导线导体为铝或钢芯铝绞线		1 : (0.7 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (0.95 $\frac{L_1}{L_2}$)
		待检修架空导线导体为软铜		1 : (0.57 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (0.78 $\frac{L_1}{L_2}$)
185		待检修架空导线导体为铝或钢芯铝绞线		1 : (0.61 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (0.82 $\frac{L_1}{L_2}$)
		待检修架空导线导体为软铜		1 : (0.55 $\frac{L_1}{L_2}$)	1 : (0.74 $\frac{L_1}{L_2}$)

导线采用240 mm²的钢芯铝绞线，旁路电缆采用50 mm²柔性电缆，中间加装直通快速插拔接头，两端装有绝缘线夹。架空导线长6.2 m，旁路电缆及连接器总长8.4 m。试验示意图如图14所示。

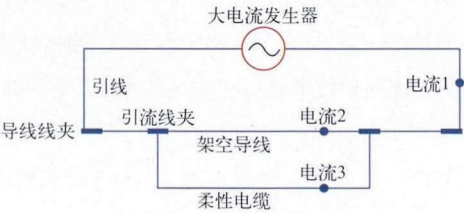


图14 稳态分流试验示意图

分别计算和测量架空导线和柔性电缆的阻抗值，对回路通以稳态工频电流，测量回路总电流、架空导线和旁路柔性电缆分流情况，得到试验结果如表2所示。

表2 并联稳态分流试验结果

总电流/A	架空导线电流/A	旁路电缆电流/A
96.9	69.9	26.2
174.3	127.3	47.4
209	152.1	56.4

由试验结果可知，架空导线和旁路柔性电缆分流与其阻抗成反比，与仿真计算结果一致。

3. 断线过程分流试验

在旁路电缆与架空导线并联运行的情况下，模拟人工剪断架空导线过程。分别在剪断一半铝绞线、剪断全部铝绞线和仅留一半钢芯的条件下，测量架空导线与旁路电缆分流情况。试验结果如表3所示。

由试验结果可知，在剪断线之前，断线点局部电阻的减小对整体的分流基本无影响。在架空

表3 断线过程分流试验结果

电流	断线 之前	剪断一半 铝绞线	剪断全部 铝绞线	仅留一半 钢芯	剪断 导线
架空导线电流/A	80.9	82.0	73.2	63.1	0
旁路电缆电流/A	30.5	31.0	39.3	44.6	112.2
总电流/A	112.2	112.2	112.2	112.2	112.2

导线断线的瞬间, 架空导线电阻变为无穷大, 但由于旁路电缆的存在, 整个回路电阻并未发生突变, 因此, 无过电压和过电流产生。试验结果与仿真计算结果一致。

结束语

由本文论述可得出如下结论:

1) 通过计算和试验验证配电线路旁路作业的负荷转移特性, 说明旁路作业是安全可行的。

2) 10 kV配电网带电作业安全防护用具考虑的最大过电压为4.5 (pu), 由于人工断接空载旁路电缆、架空导线过程产生的过电压均小于该值, 因此按照带电作业要求进行安全防护, 可有效保护作业人员安全。

3) 由于人工断接空载旁路电缆的过程会产生过电流, 流过空气间隙的电弧电流较大时, 会对附近的作业人员产生不利影响, 需要采取相应的防护措施, 如采用带电作业用消弧开关等。

4) 旁路作业采用正确的操作流程及规定的工器具可以确保作业人员的安全。

参考文献

- [1] DL/T 676—1999 带电作业绝缘鞋(靴)通用技术条件[S].
- [2] DL/T 778—2001 带电作业用绝缘袖套[S].
- [3] DL 779—2001 带电作业用绝缘绳索类工具[S].
- [4] DL/T 803—2002 带电作业用绝缘毯[S].
- [5] DL/T 853—2004 带电作业用绝缘垫[S].
- [6] DL/T 854—2004 带电作业用绝缘斗臂车的保养维护及在使用中的试验[S].
- [7] DL/T 858—2004 架空配电线路带电安装及作业工器具设备[S].
- [8] DL/T 876—2004 带电作业绝缘配合导则[S].
- [9] DL/T 877—2004 带电作业用工具、装置和设备使用的一般要求[S].
- [10] DL/T 878—2004 带电作业用绝缘工具试验导则[S].
- [11] DL/T 880—2004 带电作业用导线软质遮蔽罩[S].
- [12] DL/T 972—2005 带电作业用工具、装置和设备的质量保证导则[S].
- [13] DL/T 975—2005 带电作业用防机械刺穿手套[S].
- [14] DL/T 976—2005 带电作业用工具、装置和设备预防性试验规程[S].
- [15] DL/T 1125—2009 10kV带电作业用绝缘服装[S].
- [16] GB/T 2900.55—2002 电工术语 带电作业[S].
- [17] GB/T 17622—2008 带电作业用绝缘手套通用技术条件[S].
- [18] GB/T 18037—2008 带电作业工具基本要求与设计导则[S].
- [19] GB/T 18857—2008 配电线路带电作业技术导则[S].
- [20] GB/T 25725—2010 带电作业工具专用车[S].
- [21] GB/T 25726—2010 1000kV带电作业用屏蔽服装[S].
- [22] 胡毅, 王力农, 等. 送配电带电作业的发展与标准制订[J]. 高电压技术, 2003, 29(4): 18-20.
- [23] 胡毅, 王力农, 等. 配电线路带电作业方式及安全防护[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 34-35.
- [24] 胡毅. GB/T 18857—2002 配电线路带电作业技术导则标准编写说明[J]. 电力标准化与计量, 2003, 46(4): 8-11.
- [25] 罗俊华, 聂定珍, 等. 35 kV及以下架空绝缘电缆过电压保护技术[J]. 高电压技术, 2000, 26(3): 40-43.
- [26] 郑传广, 刘凯, 刘庭, 等. 10 kV配电线路旁路作业电磁暂态过程仿真计算研究[J]. 电工电气, 2013(3): 7-12.

(收稿日期: 2015-04-15) EA