

## 城市中压配电网合环操作分析与决策

肖白<sup>1</sup>, 赵龙安<sup>1</sup>, 张宇<sup>1</sup>, 穆钢<sup>1</sup>, 林子钊<sup>2</sup>, 黄剑<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001)

**摘要:** 以南方某城市中压配电网运行风险评估的工程实例为背景, 以提高城市电网的供电可靠性为目的, 提出了在线路或变压器检修时能否对城市中压配电网进行合环操作的决策方案。给出了合环操作示意图, 并据此对城市中压配电网的合环操作问题进行了分析。阐明了合环操作的最终目的是为了转带负荷后再解环运行的观点, 进而提出了判断是否可以执行合环操作的决策方案, 解释了不能合环的原因, 揭示了合环后电流过大的机理, 并给出了应对措施, 创造了更有利于合环的条件。实例分析验证了决策方案的可行性和有效性。

**关键词:** 城市中压配电网; 合环操作; 决策方案; 应对措施; 电磁环网

### Analysis and decision of loop closing operation in urban mid-voltage distribution network

XIAO Bai<sup>1</sup>, ZHAO Long-an<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, MU Gang<sup>1</sup>, LIN Zi-zhao<sup>2</sup>, HUANG Jian<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Shenzhen Power Supply CO., LTD, Shenzhen 518001, China)

**Abstract:** On the basis of an engineering project of mid-voltage distribution network operation risk assessment in a south city, for the purpose of improving the reliability of power supply for the urban network, a decision scheme of whether the loop closing operation for urban mid-voltage distribution network can be executed during overhauling the line or transformer is presented. This paper shows a schematic diagram of loop closing operation and accordingly analyzes loop closing operation in urban mid-voltage distribution network, clarifies the ultimate goal of looping closing is for the point that with a load transfer after loop opening system and then puts forward a decision scheme to judge whether can execute loop closing operation, construction reasons of can not execute loop closing operation, interprets the principle of excessive posterior loop current, and gives countermeasures to create beneficial conditions to loop closing operation. The analyses of examples show that the decision scheme is correct and effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177009).

**Key words:** urban mid-voltage distribution network; loop closing operation; decision scheme; countermeasures; electromagnetic loop network

中图分类号: TM723; TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0133-06

## 0 引言

我国城市中压配电网广泛采用闭环设计、开环运行的供电方式<sup>[1-4]</sup>, 即具有双电源供电甚至多电源供电的结构<sup>[5]</sup>, 这提高了供电的灵活性, 也为允许执行合环操作提供了基本条件<sup>[6-7]</sup>。因此, 当某个母线、开关、馈线或者相关二次变需要检修的时候, 通过合环操作, 将该母线、开关或馈线上的负荷不停电地转移到与之相连的其他母线或馈线上, 可以提高供电可靠性<sup>[8]</sup>。但有些情况下, 若执行合环操

作会产生较大的合环电流, 从而可能导致保护装置误动或超设备额定值, 影响到配电网的安全运行<sup>[9]</sup>。

针对此问题, 已有的研究主要集中关注合环点两侧的电压幅值和相角相差是否过大<sup>[10-15]</sup>, 进而判断该运行条件下能否合环。但关于由网络结构决定的负荷转供和电磁环流对合环操作影响方面的论述却很少。

本文对合环操作基本理论进行了介绍, 讨论了合环操作前应考虑的因素, 提出了是否允许执行合环操作的决策方案, 阐明了不能合环的原因, 揭示了合环后电流过大的机理, 并给出了应对措施。最后通过实例分析, 证明了该决策方案能够创造更有利于合环的条件, 进而提高了供电的可靠性。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51177009); 南方电网公司科技项目 (K-GD2011-058)

### 1 城市中压配电网合环操作的分析

合环操作是指将线路、变压器或开关(断路器)串构成的网络闭合运行的电气操作。

合环操作的典型系统接线如图 1 所示, DL1 与 DL3 分别为两条城市中压配电线路(线路 1 和线路 2)出口的断路器, 它们在主要运行方式下处于闭合状态; DL2 为线路 1 和线路 2 之间的联络开关, 它在主要运行方式下处于断开状态; 当 DL2 闭合后, 流过线路首端的电流  $i_h$  由电磁环流  $i_{dc}$ , 本线路负荷电流  $i_l$ , 以及可能转带对方线路负荷(甚至包括对方母线上部分负荷)电流  $i_t$  三部分合成。

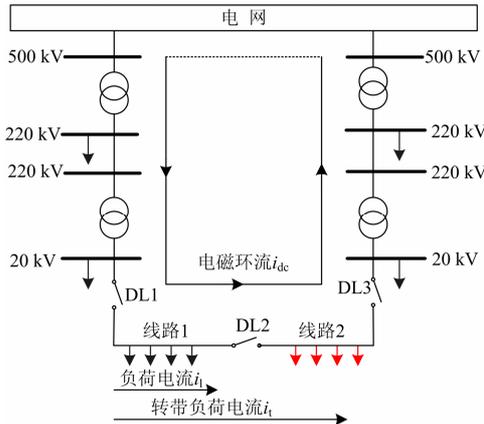


图 1 合环操作的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of loop closing system

在执行合环操作前, 操作人员通常会考察合环开关两侧电压的幅值和相位是否接近, 例如文献[10]就指出调度部门按照规程通常采用规定的功角差(20°)和电压差(20%)来判断是否可以合环。或者根据仿真结果, 来判断在执行合环操作之后是否会出现环网内各元件过载的情况<sup>[13-15]</sup>, 各母线电压是否会超过规定值, 以及继电保护与安全自动装置的配置与整定是否能够满足环网运行的要求, 从而决定是否执行合环操作<sup>[16-19]</sup>。但是以往这些研究对于不能合环的原因, 以及如何创造条件以便能够合环的研究还不够深入。

### 2 城市中压配电网合环操作的决策方案

为了更准确地找到不能执行合环操作的原因, 并对不能合环的情况采取应对措施, 使其有可能合环运行(例如图 1 中 DL2 合闸后, DL1 和 DL3 都不会因过负荷而跳闸), 并且还能够解环运行(例如图 1 中 DL3 断开后, DL1 不会因为过负荷而跳闸), 提出了相应的城市中压配电网合环操作分析与决策方案, 其具体技术路线如图 2 所示。

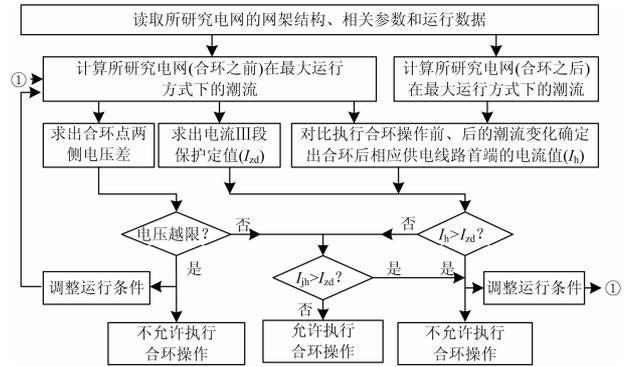


图 2 合环操作分析与决策技术路线图

Fig. 2 Technology flow chart of analysis and decision of the loop closing system

首先, 在合环之前进行最大运行方式下的潮流计算, 确定合环点两侧电压的幅值和相位的大小, 以及它们之间的差值。

其次, 通过仿真计算得到合环(图 1 中 DL2 合闸)之后环网中的潮流分布。判断合环后电流和电压在调整保护定值后是否越限, 即可否合环。

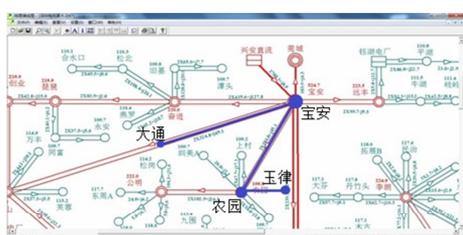
然后, 通过仿真计算得到解环后(图 1 中 DL1 或 DL3 断开)线路首端的最大负荷电流( $i_{lh}$ ), 并判断其是否超过调整后的保护定值或转带负荷线路的额定电流, 即可否解环。

最后, 对于不能合环的情况给出原因(主要是网架结构和负荷分布导致的负荷转带与电磁环流), 并据此先将合环线路上级变电站之间的输电线路进行联络(即在输电系统中实现大部分负荷转移), 并对配电系统进行电压调整和无功平衡, 在同时满足上述合环、解环的要求后才能够执行合环操作。

### 3 实例分析

针对我国南方某城市中压配电网, 在夏季最大运行方式下进行合环操作的分析, 限于篇幅, 这里只给出三个实例, 其中合环线路所在变电站的 110 kV 及以上电气接线见图 3。该市中压配电网处于 20 kV 和 10 kV 两个电压等级并存的过渡阶段。

按前述理论, 分别仿真计算出合环与解环后两条线路首端的电流, 并根据这些电流中的最大值来调整对应的定时限过电流保护(即电流保护 III 段)整定值, 然后分别将这三个电流与该保护定值和线路的额定容量进行对比, 来判断是否可以执行合环操作或转带负荷后的解环操作。



(a) 大通变电站和玉律变电站之间的系统接线



(b) 农科变电站和上步变电站之间的系统接线



(c) 岗厦变电站和通心岭变电站之间的系统接线

图3 合环操作线路所在变电站 110 kV 及以上电气接线

Fig. 3 110 kV and above electric connection of the loop closing operation line of substation

### 3.1 计算结果

实例 1 玉律变电站与大通变电站(见图 3(a)) 20 kV 线路之间合环及解环的相关计算条件与结果见表 1, 大通 2 号线和玉律 3 号线合环后的线首电流均未超过各自的线路保护定值, 即能够满足合环和解环的操作要求, 因此可执行合环操作。

实例 2 农科变电站与上步变电站(见图 3(b)) 10 kV 线路之间合环及解环的相关计算条件与结果见表 2, 因为两条线路的保护定值都超过了线路的额定电流值, 即无法配出相应的保护, 而且农科 6 号线合环后的线路首端电流也超过了该线路额定电流值, 所以不能执行合环操作。另外需说明的是, 虽然在不同线路首端解环, 对侧线路上的最大功率都相等, 但由于两者的母线电压不同, 所以线首电流也不相等。

实例 3 岗厦变电站与通心岭变电站(见图 3(c)) 10 kV 线路之间合环及解环的相关计算结果见表 3, 因为通心岭 8 号线的保护定值超过了线路的额定电流值, 即无法配出相应的保护, 并且其线首电流超过了该线路额定电流值, 所以不能执行合环操作。

表 1 大通站、玉律站合环及解环计算结果

Table 1 Loop closing and opening system calculation results of Datong substation and Yulu substation

220/20 kV 变电站名称	大通		玉律	
20 kV 线路名称	大通 2 号线		玉律 3 号线	
线路型号及额定值	YJV22-3*300 mm <sup>2</sup> 、电缆 500 A			
运行状态	合环前	合环后	合环前	合环后
线首功率/MVA	4.2+j1.6	2.7+j0.1	3.8+j1.6	5.3+j3.2
线首电流/A	124.16	74.28	113.36	170.21
线首电压幅值/kV	20.9	20.9	21.0	21.0
线首电压相角/(°)	-42.67	-42.21	-42.53	-42.13
合环点电压幅值/kV	20.9	21.0	21.0	21.0
合环点电压相角/(°)	-42.75	-42.27	-42.61	-42.27
解环线首功率/MVA	8.0+j3.3		8.0+j3.2	
解环线首电流/A	237.92		238.02	
电流 III 段保护调整前	165.55		151.15	
保护整定值/A 调整后	330.44		330.58	

表 2 农科站、上步站合环及解环计算结果

Table 2 Loop closing and opening system calculation results of Nongke substation and Shangbu substation

110/10 kV 变电站名称	农科		上步	
10 kV 线路名称	农科 6 号线		上步 8 号线	
线路型号及额定值	YJV22-3*300 mm <sup>2</sup> 、电缆 500 A			
运行状态	合环前	合环后	合环前	合环后
线首功率/MVA	2.9+j1.3	12.5+j1.6	3.3+j1.3	-6.3+j1.1
线首电流/A	180.42	717.53	202.75	-365.58
线首电压幅值/kV	10.2	10.1	10.1	10.1
线首电压相角/(°)	-51.1	-51.5	-52.1	-51.6
合环点电压幅值/kV	10.2	10.1	10.1	10.1
合环点电压相角/(°)	-51.1	-51.6	-52.2	-51.6
解环线首功率/MVA	6.3+j2.7		6.3+j2.7	
解环线首电流/A	391.81		395.73	
电流 III 段保护调整前	240.56		270.33	
保护整定值/A 调整后	—		—	

表 3 岗厦站、通心岭站合环及解环计算结果

Table 3 Loop closing and opening system calculation results of Gangxia substation and Tongxinling substation

110/10 kV 变电站名称	岗厦		通心岭	
10 kV 线路名称	岗厦 1 号线		通心岭 8 号线	
线路型号及额定值	YJV22-3*300 mm <sup>2</sup> 、电缆 500 A			
运行状态	合环前	合环后	合环前	合环后
线首功率/MVA	3.1+j0.7	-2.9+j4.8	2.1+j0.3	8.3-j3.7
线首电流/A	181.67	-320.57	120.07	514.37
线首电压幅值/kV	10.1	10.1	10.2	10.2
线首电压相角/(°)	-65.06	-64.55	-61.36	-63.18
合环点电压幅值/kV	10.1	10.1	10.1	10.1
合环点电压相角/(°)	-65.20	-63.18	-61.51	-63.18
解环线首功率/MVA	5.3+j1.0		5.3+j1.0	
解环线首电流/A	308.31		308.31	
电流 III 段保护调整前	252.32		166.76	
保护整定值/A 调整后	445.24		—	

### 3.2 不能合环原因的分析

根据表 2 和表 3 中的相关结果,可以得到实例 2 和实例 3 中的合环端口电压幅值差( $\Delta u$ )和相角差( $\Delta\delta$ )的数值大小,见表 4。容易看出,两条馈线联络开关处(即预想合环的端口)电压幅值差和相角差虽然满足文献[10]提出的合环要求,但仿真合环结果却表明有线路过载,即不能合环。那么导致线路过载的原因是什么呢?

表 4 合环端口电压的幅值差和相角差

Table 4 Voltage amplitude difference and voltage phase difference of looped power network port

实例名称	实例 2	实例 3
$\Delta u/\text{kV}$	0.1	0.1
$\Delta\delta/^\circ$	1.1	3.7

实例 2 和实例 3 中合环线路的保护定值  $i_{\text{set}}$ 、合环后的电磁环流  $i_{\text{dc}}$ ,以及转移的负荷电流  $i_l$  的计算结果见表 5。

表 5 合环及解环的电流计算结果

Table 5 Current calculation results of loop closing and opening system

		实例 2		实例 3	
		农科 6 号线	上步 8 号线	岗厦 1 号线	通心岭 8 号线
合环	$i_l$	180.42	202.75	181.67	120.07
	$i_{\text{dc}}/\text{A}$	31.22	-31.22	-107.94	107.94
$i_h$	$i_l/\text{A}$	505.89	-334.36	-212.63	286.36
	$i_l$	189.06	212.25	187.05	126.64
解环	$i_{jh}$	202.75	183.48	121.26	181.67
	$i_l/\text{A}$				

实例 2 中的农科变电站和上步变电站均由鹏城变电站、紫荆变电站(500/220/34.5 kV)供电,如图 3(b)所示,农科变电站(110/10.5 kV)经由梅林变电站、龙塘变电站、鹏城 B 变电站(220/110 kV)连接至 500 kV 鹏城变电站;上步变电站(110/10.5 kV)经由八卦岭变电站、清水河变电站、鹏城 A 变电站(220/110 kV)连接至鹏城变电站。10 kV 线路农科 6 号线和上步 8 号线所组成的环网中电磁环流  $i_{\text{dc}}$  为 31.22 A,农科 6 号线转带了上步 8 号线上的负荷电流  $i_l$  为 505.89 A,这说明转带的负荷太多是导致合环后电流过大的主要原因。

实例 3 中的岗厦变电站和通心岭变电站由鹏城变电站和紫荆变电站供电,如图 3(c)所示,岗厦变电站(110/10.5 kV)经由滨河变电站、皇岗变电站、梅林变电站、龙塘变电站、鹏城 B 变电站(220/110 kV)分别连接至紫荆变电站和鹏城变电站;通心岭变

站(110/10.5 kV)经由中航 B 变电站、清水河 B 变电站、鹏城 A 变电站(220/110 kV)连接至鹏城变电站。10 kV 线路岗厦 1 号线和通心岭 8 号线组成的环网结构复杂,合环后环网中电磁环流  $i_{\text{dc}}$  为 107.94 A,通心岭 8 号线转带岗厦 1 号线的负荷电流  $i_l$  为 286.36 A。可见,此时转带的负荷过多以及电磁环流较大是导致合环后线路电流过大的主要原因。

综上,实例 2 和实例 3 不能合环的主要原因是由于当前的网架结构和负荷水平所导致的合环后转带的负荷电流过大,甚至电磁环流同时也较大。

### 3.3 应对措施

针对在合环操作后城市中压配电线路上负荷电流大量转移的问题采取应对措施。如果网络条件允许,先将合环线路上一个电压等级变电站之间的输电线路进行联络,再执行合环操作。通过这样的处理达到有可能在合环前,通过上级变电站之间输电线路的联络先转移部分负荷电流,进而减少合环后中压线路中转移的负荷电流和电磁环流,使合环后电流不超过保护定值,满足合环运行的条件。

在实例 2 中,将农科变电站和上步变电站之间或者其上级变电站之间的 110 kV 输电线路进行联络,再对两站之间的中压配电线路(农科 6 号线与上步 8 号线)进行合环分析。如图 3(b)所示,分别选择农科与上步(距合环线路最近)、梅林与清水河 B(距合环线路最远)的 110 kV 线路进行联络。该条件下的计算结果见表 6,农科 6 号线与上步 8 号线均无法配出相应的保护,所以不能执行合环操作。

表 6 调整后农科站、上步站合环及解环计算结果

Table 6 Loop closing and opening system calculation results of Nongke substation and Shangbu substation after adjusting

110 kV 联络变电站		农科和上步		梅林和清水河 B	
10 kV 线路名称		农科 6 号线	上步 8 号线	农科 6 号线	上步 8 号线
合	线首功率/MVA	4.3+j0.9	1.9+j1.7	5.6+j0.5	0.6+j2.1
环	线首电流/A	258.82	150.20	331.22	129.99
解	线首功率/MVA	6.3+j2.7	6.3+j2.7	6.3+j2.7	6.3+j2.7
环	线首电流/A	399.72	403.80	399.72	407.97
电	流 III 段保 调整前	359.47	287.28	460.03	293.21
护	整定值/A 调整后	—	—	—	—

在实例 3 中,同理考虑两种极端情况,即分别选择岗厦与通心岭、滨河与中航 B 的 110 kV 线路进行联络。该条件下的计算结果见表 7,岗厦 1 号线和通心岭 8 号线上的最大电流均不会超过各自的保护定值,所以可以执行合环操作。

表7 调整后岗厦站、通心岭站合环及解环计算结果  
Table 7 Loop closing and opening system calculation results of Gangxia substation and Tongxinling substation after adjusting

110 kV 联络变电站	岗厦和通心岭		滨河和中航 B	
10 kV 线路名称	岗厦 1 号线	通心岭 8 号线	岗厦 1 号线	通心岭 8 号线
合 线首功率/MVA	2.0+j2.5	3.3+j1.2	2.5+j0.4	2.8+j0.5
环 线首电流/A	179.46	196.83	144.73	162.59
解 线首功率/MVA	5.3+j1.0	5.3+j1.0	5.3+j1.0	5.3+j1.0
环 线首电流/A	308.31	305.29	308.31	305.29
电流 III 段保 调整前	252.32	262.44	249.84	225.82
护整定值/A 调整后	410.97	406.95	410.97	406.95

需指出,该方法在合环线路的上一电压等级的两个变电站之间可同级联络时才能应用,而且即使具备此条件,若两条线路上的负荷电流之和超过线路额定电流的 75%,则该方法也会不起作用。

## 4 结论

本文提出了一种城市中压配电网合环操作的分析方法和决策方案。阐明了不能合环的原因,指出了即使合环端口电压的幅值差和相角差不大,也有可能不允许执行合环操作,此时负荷转供电流过大是导致这个结果的重要原因,并提出了应对措施。实例分析结果表明该决策方案可以创造更有利于合环的条件,能够提高城市电网供电的可靠性。

## 参考文献

- [1] 姚莉娜,张军利,刘华,等. 城市中压配电网典型接线方式分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 26-29.  
YAO Li-na, ZHANG Jun-li, LIU Hua, et al. Analysis of typical connection modes of urban middle voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 26-29.
- [2] 汲亚飞,赵江河. 辐射型中压配电网合环分析系统的设计与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 58-69.  
JI Ya-fei, ZHAO Jiang-he. Design and research on the loop closing operation analysis system medium voltage in radial distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 58-69.
- [3] 朱雨晨,赵冬梅,刘世良,等. 基于机电暂态-电磁暂态混合仿真的电网合环分析计算系统[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 73-79.  
ZHU Yu-chen, ZHAO Dong-mei, LIU Shi-liang, et al. Loop closing analytical calculation system based on electromagnetic-electromechanical transient simulation for power network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 73-79.
- [4] 叶清华,唐国庆,王磊,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, 26(22): 66-69.  
YE Qing-hua, TANG Guo-qing, WANG Lei, et al. Development and application of the analysis system for closed loop operation of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 26(22): 66-69.
- [5] 仇志华,徐丙垠,陈青,等. 基于串补有功最小的双电源配电环网潮流优化控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 88-92.  
ZHANG Zhi-hua, XU Bing-yin, CHEN Qing, et al. Research on the optimal control method for normally closed loop distribution power flow with dual sources based on the minimization of series compensated active power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 88-92.
- [6] 葛少云,李晓明. 基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 124-127.  
GE Shao-yun, LI Xiao-ming. Study on surge current due to closing loop in distribution network based on thevenin's equivalent[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2007, 19(6): 124-127.
- [7] 赵洪山,陈博. 电力系统内-外点优化潮流算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 129-134.  
ZHAO Hong-shan, CHEN Bo. Interior-exterior point method for optimal power flow[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 129-134.
- [8] 李红伟,李云峰,马海斌,等. 一种基于回路分析法的弱环配电网潮流直接算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 6-10.  
LI Hong-wei, LI Yun-feng, MA Hai-bin, et al. A direct power flow algorithm for weakly meshed distribution system based on loop-analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 6-10.
- [9] 张立梅,唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.  
ZHANG Li-mei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.

- [10] 李江华. 浅析 10 kV 配网合环产生环流的原因及预防措施[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 199-201.  
LI Jiang-hua. Simple analysis of the reason and protective step of 10 kV distribution network causing circumfluence[J]. Power System Technology, 2006, 30(S): 199-201.
- [11] 刘蔚, 宁文辉, 黄东山, 一种改进的辐射状配电网潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 1-4.  
LIU Wei, NING Wen-hui, HUANG Dong-shan. A modified power flow calculation method for radial distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 1-4.
- [12] 吕志鹏, 罗安, 蒋雯倩, 等. 多逆变器环境微网环流控制新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 40-47.  
Lü Zhi-peng, LUO An, JIANG Wen-qian, et al. New circulation control method for micro-grid with multi-inverter micro-sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 40-47.
- [13] 邹俊雄, 周冠波, 付轲, 等. 10 kV 配网合环转电计算模型与试验分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 144-148.  
ZOU Jun-xiong, ZHOU Guan-bo, FU Ke, et al. Electromagnetic loop closing calculation model and experimental analysis on 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 144-148.
- [14] 程林, 刘文颖, 王维州, 等. 电磁环网中无功环流的分析与控制[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 63-67.  
CHENG Lin, LIU Wen-ying, WANG Wei-zhou, et al. Analysis and control of reactive circular power flow in looped electromagnetically coupled power networks[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 63-67.
- [15] 夏翔, 周昱甬, 邱伟成. 地区弱电磁环网合环潮流探讨[J]. 继电器, 2004, 32(23): 28-31.  
XIA Xiang, ZHOU Yu-yong, QIU Wei-cheng. Power flow analysis of closing interconnection switches for weakly meshed networks in regional grid[J]. Relay, 2004, 32(23): 28-31.
- [16] 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.  
XIA Xiang, XIONG Jun, HU Lie-xiang. Analysis and control of loop power flow in regional power network[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 76-80.
- [17] 卢志刚, 程慧琳, 冯磊. 基于支路功率选取的功率扩展潮流计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 208-215.  
LU Zhi-gang, CHENG Hui-lin, FENG Lei. Extended-power load flow calculation based on selection of branch power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 208-215.
- [18] 张明, 毕鹏翔, 刘健, 等. 辐射状配电网支路电流法潮流计算的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 41-44.  
ZHANG Ming, BI Peng-xiang, LIU Jian, et al. Research on convergency of branch current method based power flow calculation for radial distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 41-44.
- [19] 付轲, 蔡泽祥, 邱建, 等. 10 kV 电网电磁合环操作安全性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(4): 71-76.  
FU Ke, CAI Ze-xiang, QIU Jian, et al. Safety assessment methods of loop closing operation in 10 kV distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2010, 22(4): 71-76.

---

收稿日期: 2013-11-27

作者简介:

肖白(1973-), 男, 博士, 教授, 长期从事电力系统规划、风险评估、继电保护的研究与教学工作; E-mail: xbxiaobai@126.com

赵龙安(1988-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统规划、风险评估方面的研究工作;

张宇(1987-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统规划、风险评估方面的研究工作。