

配电网合环热倒方式及其对配电网影响

徐洪海，皇甫晨晨，刘文松，彭中山

(江苏宏源电气有限公司，江苏 南京 211103)

摘要：围绕国家“双碳”战略目标，配电网将加速向灵活互联、柔性可控的能源互联网资源配置平台转型升级，而在这一过程中需要重点解决配电网合环热倒的问题。探讨了配电网无法合环热倒的场景及原因，对目前已有的配电网合环热倒方式进行了研究，对不同合环热倒方式的经济效益及其对配电网的影响进行了对比分析，剖析了合环时短路故障对配电网的影响。在此基础上，总结出目前最适合我国配电网的合环热倒方式。

关键词：合环；热倒方式；配电网

The hot swap mode of distribution network closure and its impact on the distribution network

XU Honghai, HUANGFU Chenchen, LIU Wensong, PENG Zhongshan

(Jiangsu Hongyuan electric Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: Focusing on the national dual carbon strategy goal, the distribution network will accelerate its transformation and upgrading to a flexible, interconnected, and controllable energy internet resource allocation platform. It is necessary to focus on solving the problem of grid integration and hot swapping. This article explores the reasons why the distribution network cannot be closed for hot swapping, studies the existing methods of closed loop hot swapping, compares and analyzes the economic benefits of different closed loop hot swapping methods and their impact on the distribution network, and analyzes the impact of short circuit faults on the distribution network during closed loop. On this basis, the most suitable closed-loop hot swapping method for China's distribution network is summarized.

Key words: loop closing; hot inversion method; distribution network

0 引言

“十四五”期间，我国提出要建设国际领先型城市配电网，提高网架互供互转能力，全面消除无联络、无转供线路。同时明确提出，供电企业要开展综合停电和配电网故障快速抢修复电管理工作，推广不停电作业技术，减少停电时间、次数和影响范围，到2025年末，城网供电可靠率不低于99.977%，用户年平均停电时间不超过2 h。

因此，为提高配电网供电可靠性，有必要对合环热倒的方式进行深入研究，分析不同合环热

倒方式的经济效益以及对配电网的影响，从而选择最适合我国配电网的合环热倒方式。

1 无法合环热倒的场景及原因

1.1 主变压器接线方式不同

由于供电半径、投资成本限制等原因，目前输电线路中仍然存在大量的35 kV主变压器^[1]，基于降低主变压器高压侧绝缘水平并提高主变压器低压侧载流量的考虑，35 kV及以上主变压器的联结组别一般采用Yd接，因此经过35 kV主变压器的

10 kV线路与直接从110 kV主变压器出线的10 kV线路间往往会存在一个固定的 30° 相角差,如图1所示。此时若将10 kV线路A和线路B进行合环热倒,在合环的瞬间会产生较大的冲击电流和稳态电流,引起保护动作,降低配电网供电可靠性。

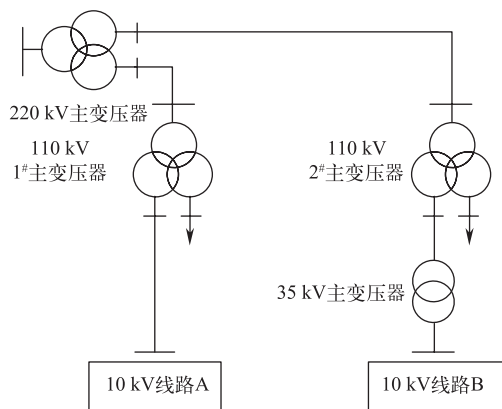


图1 35 kV及以上电网存在接线方式不同的主变压器

Fig. 1 Transformers with different wiring methods in 35 kV and above power grids

1.2 供电分区不同

随着城市化的深入发展,我国已形成电网分区供电的格局,即110 kV站点双侧电源隶属于开环运行状态下的不同220 kV站点。如图2所示,两个220 kV站点没有组成环网运行,在10 kV侧若进行合解环操作,使得开环运行的区域直接合环运行,有一定几率出现合环潮流过大,甚至过载而引起线路跳闸,严重的可能烧毁配电网设备,对电网造成不可逆的损失。

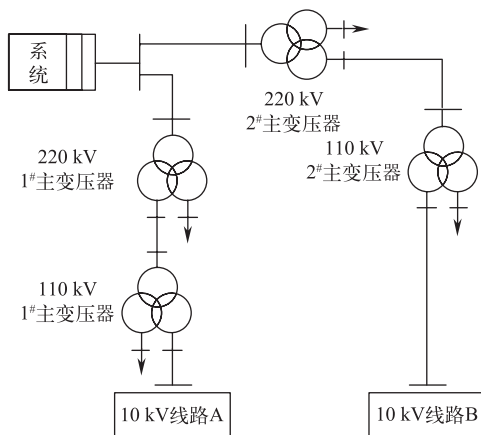


图2 不同分区的10 kV配电网线路

Fig. 2 10 kV distribution network lines in different zones

2 合环对配电网的影响

2.1 不同合环热倒方式对配电网的影响

合环方式分为主动式合环热倒和被动式合环热倒两类。

主动式合环热倒是主动调节联络点两侧相位和幅值,使其符合合环条件的方法,即在两条10 kV线路的联络点增加可以主动调节两条线路间相位差和压差的装置,从而实现两条线路合环时无冲击电流,合环后的稳态电流也远小于线路保护的整定值,不会引起保护动作。因此,在两条10 kV线路不发生短路等故障的情况下,主动式合环热倒方式不影响配电网的稳定运行。

被动式合环热倒不对联络点的相位差和压差进行直接调节或补偿,而是通过实时监测、仿真分析以及保护控制等方式来实现两条线路间的合环热倒。这种方式对数据的实时性、控制系统的可靠性和开关动作的离散性等均有较高的要求,任何一个环节的失误,均会导致合环热倒失败,引起继电保护动作或越级跳闸,危及电网的运行安全。因此被动式合环热倒方式相较于主动式合环热倒方式存在较大的风险隐患。

2.2 短路故障对合环运行的配电网影响

无论是主动式合环还是被动式合环,配电网线路均经历一个短时合环运行的过程,所以电力线路在短时合环运行过程中,系统发生短路故障时需要对配电网的影响进行分析^[3-4]。

以三段式电流保护整定计算为例,如图3所示:单侧电源放射状网络,AB和BC均设有三段式电流保护。已知:线路AB长30 km,BC长50 km,最大负荷电流为400 A,电抗为 $0.4 \Omega/\text{km}$; 10 kV母线最大负荷电流为300 A,自启动系数取2; T1变压器联结组别为Yd11,归算至被保护线路电压等级的阻抗为 28Ω ;系统最大电抗为 6.7Ω ,系统最小电抗 5.5Ω 。经计算得到结果见表1。

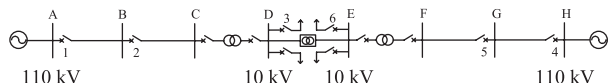


图3 实例等效电网合环运行示意图

Fig. 3 Example equivalent grid closed loop operation diagram

表1 电流保护整定值

Tab. 1 Current protection setting value

线路	无时限电流保护	限时电流速断保护	过电流保护
110 kV	4.93 kA/0 s	2.5 3kA/0.5 s	1149.42 A/2 s
10 kV	/	/	847.06 A/0.5 s

当左侧电源110 kV线路B点发生短路时，右侧电源最大短路电流为

$$I_{kB\max}^{(3)} = \frac{115}{\sqrt{3} \times (5.5 + 130 \times 0.4 + 2 \times 28)} = 585 \text{ A}$$

该值小于4、5、6三处保护的整定值，右侧电路的继电器不会触发。当左侧电源10 kV线路D点发生短路时，右侧电源最大短路电流为

$$I_{kD\max}^{(3)} = \frac{115}{\sqrt{3} \times (5.5 + 80 \times 0.4 + 28)} = 1014 \text{ A}$$

该值小于4、5两处保护的整定值，但大于6处过电流保护的整定值，因此继电器会触发，导致此条线路停电，故障穿越到另一侧引起故障蔓延。

综上所述，为降低短路故障对合环时配电网的影响，应尽量将合环开关的动作电流整定值设定为所有线路开关中最小，当右侧110 kV、10 kV线路发生短路故障时，跳开合环开关，使两侧电网恢复到未合环之前的状态，避免出现故障穿越。

3 合环热倒方式

3.1 主动式合环热倒方式

(1) 基于双VSC柔性合环装置

双VSC合环装置的结构如图4所示^[5]，采用两个静止同步补偿器（STATCOM）背靠背桥接在线路联络开关两侧，通过交直流的变换使合环开关QF₂两侧电压满足交流合环条件实现合环，或者通过QF₄直流开关实现直流合环。

(2) 基于电磁式移相调压系统

以移相调压变压器为基础^[6]，通过调节串

联在线路中的移相调压变压器的档位改变两条10 kV线路合环开关两侧的相位差和压差，使其达到合环的条件，实现合环热倒，如图5所示。

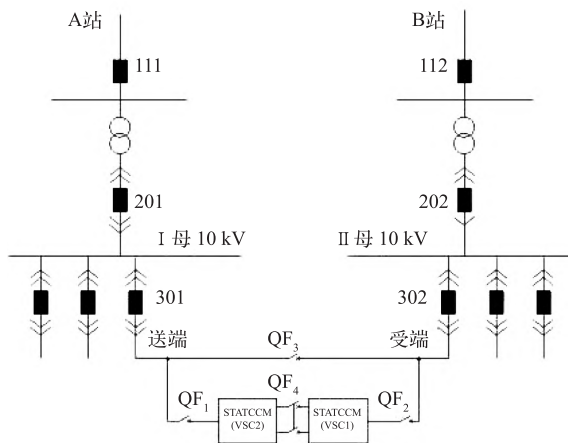


图4 双VSC合环装置结构图

Fig. 4 Structure diagram of dual VSC loop closing device

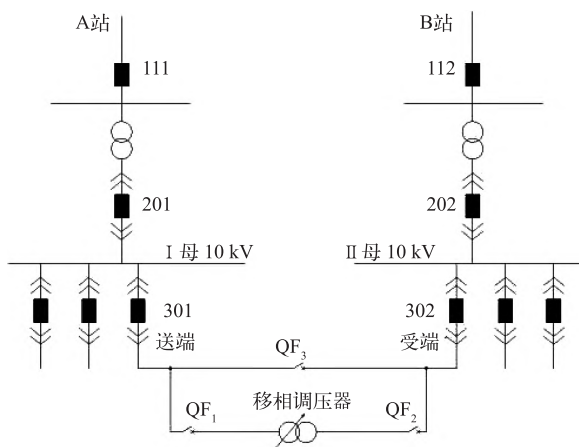


图5 基于移相调压变压器的合环结构图

Fig. 5 Loop closing structure diagram based on phase-shifting and voltage regulating transformer

3.2 被动式合环热倒方式

(1) 基于检同期装置

通过在两条10 kV线路的联络点安装检同期装置，实时监测联络开关两侧的相位差和压差，自动计算追踪最佳合环时刻，并提前发送合环指令，从而控制联络开关在最佳合环时刻合环。

(2) 基于转移负荷法

在不同分区供电的配电网系统中，通过改变站点两侧区域的负荷分配，即通过深度优先算法找到边界站点两侧220 kV电站最短路径以及分割

出各个分区运行区域，再进行110 kV负荷转移，从而减小边界站点双侧220 kV站点中110 kV母线的电压相角差，达到限制合环潮流的目的，实现合环热倒^[2]。

(3) 基于快速投切装置

该方式一般用于配电站房中，通过同时对两个10 kV进线开关和一个联络开关两端的电压进行高速测量，利用快速投切装置合上高压母联开关，同时断开Ⅱ段母线进线开关，实现合环热倒，如图6所示。

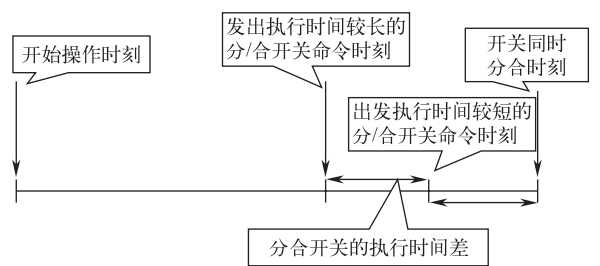


图 6 快速投切装置原理图
Fig. 6 Schematic diagram of fast switching device

(4) 基于保护跳闸原理

由于两条10 kV线路间存在相位差和压差，

在合环的瞬间产生冲击电流，通过调整合环开关和解环开关的保护定值，使合环开关的保护可以躲过冲击电流，而解环开关的保护定值和动作时限在所有线路开关中最小，合环后在冲击电流的作用下立刻跳开解环开关，实现两条10 kV线路合环热倒。

4 经济效益分析

不同合环热倒方式的经济效益分析见表2。

5 结束语

对于目前配电网存在的两种无法合环热倒的场景，常用的方法是采用主动式或被动式合环热倒方式来实现配电网的不停电合环转供。综合对这两大类合环热倒方式以及对配电网的影响进行对比分析，可以发现主动式合环热倒方式无论是适用范围还是对配电网的影响都要优于被动式合环热倒方式。其中，基于双VSC柔性合环具有柔性灵活调节的优势，而就成本和维护便利性而言，主动式合环热倒方式中基于电磁式移相调压的方式更具优势。

表 2 不同合环热倒方式经济效益分析

Tab. 2 Analysis of different ring closing hot swapping methods

方案类型	部署方式	对配网影响	维护便利性	适用场景	成本
基于双 VSC 柔性合环装置	桥接在联络开关两侧，占地面积 30 m ² 左右	无涌流，无须调整线路保护定值	采用的是电力电子元器件，易损坏，需要定期进行维护	适用于有任意相位差和压差的场景	高
基于电磁式移相调压系统	桥接在联络开关两侧，占地面积 15 m ² 左右	几乎无涌流，无须调整线路保护定值	采用的是移相调压变压器，基本不需要进行维护	适用于有较大相位差和压差的场景	一般
基于检同期装置	部署在合环开关旁，基本不占面积	存在较小涌流，无须调整线路保护定值	维护方便	只适用于基本没有压差和相位差的场景	低
基于转移负荷法	不需要部署额外设备	存在一定的涌流，根据仿真结果调整线路保护定值	无需维护，但每次操作前都要对配电网线路进行仿真验证	只适用于不同分区的配电网线路，且受到网架结构限制	低
基于快速投切装置	需要在站房内部署快速投切控制装置	存在瞬时的涌流，无须调整线路保护定值	对装置的可靠性要求较高，因此需要定期进行检查	适用于有任意相位差和压差的场景	低
基于保护跳闸原理	不需要部署额外设备	存在较大的涌流，需要调整线路保护定值	无需维护，但对线路开关的动作可靠性要求较高，需要定期检查	适用于有较大相位差和压差的场景	低

参考文献

- [1] 章坚民, 相炜, 罗刚, 等. 配电网30°相角差线路不停电转供的解决方案及关键分析[J]. 电力系统自动化, 2018(1): 74-80.
- [2] 周维阳, 刘天琪, 郝文斌, 等. 基于转移负荷法的城市电网合环[J]. 电子技术与软件工程, 2017(12): 246-247.
- [3] 么鲁宁. 谈10 kV配网合环操作的条件及其对馈线保护的影响[J]. 测试工具与解决方案, 2017: 99-100.
- [4] 王辉, 徐文强, 王炜康. 配电网合环倒电对继电保护的影响研究[J]. 电气开关, 2022(1): 1-4.
- [5] 杨用春, 牛超群, 唐健雄, 等. 基于双VSC的柔性合环装置的交直流侧合环控制策略研究[J]. 华北电力大学学报, 2023(2): 1-9.
- [6] 徐志, 蒋羽鹏, 覃日升, 等. 移相变压器用于配电网合环转供电的控制方案及控制方法[J]. 变压器, 2022(12): 28-35.

作者简介

徐洪海(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、一二次融合技术等。

(收稿日期: 2023-04-21)