

配电网合环转供电研究及辅助软件开发

韦 斌¹ 杨丰任² 曹 松¹

(1. 国网重庆南川区供电有限责任公司, 重庆 408400;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 经过长期的发展, 国内配电网普遍形成了“闭环设计, 开环运行”的供电模式, 为了提高供电可靠性, 合环转供电已成为电力公司的常用手段。介绍了配电网合环电流计算方法, 以及减小合环操作风险的相关措施; 基于所提出的方法开发了配电网合环辅助决策软件, 并将其应用于某地区实际配电网的合环转电计算分析, 对保证配电网合环操作具有重要意义。

关键词: 配电网; 合环操作; 合环电流; 辅助决策软件

Abstract: After a long period of development, the "closed-loop design, open-loop operation" mode has been generally formed for domestic distribution networks. In order to improve power supply reliability, closing loop operation has become the common use of power companies. The calculation method of closing loop current and the relevant measures of reducing the risk from closing a loop are introduced. Based on the proposed method, an aided decision-making software of closing a loop in a distribution network is developed. The software is applied to the calculation and analysis of closing loop current in an actual distribution network, and is of good practical value and guiding significance.

Key words: distribution network; loop closing operation; closing loop current; aided decision-making system

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)03-0067-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.03.015

近年来, 随着经济社会的发展, 人们对配电网供电可靠性的要求日益增高。在故障或检修时, 合环转供电已成为电力公司的常用手段。在线路检修和倒负荷时, 首先合上联络开关形成短时“合环运行”, 然后隔离故障检修段, 实现了正常线路段不停电的情况下转移负荷, 减少停电时间。但是, 合环过程可能使系统面临一定的冲击, 过大的电流可能使设备过载或者保护动作^[1]。

国内对于配电网合环转供电的研究已有不少成果, 主要集中在合环电流计算方面。文献[2-3]采用直接法计算合环稳态电流, 适合粗略快速计算单环结构的合环电流。文献[4]采用叠加法计算合环稳态电流, 其准确性取决于合环阻抗。文献[5]采用潮流法计算合环稳态电流。文献[6-9]建立了数学模型计算合环冲击电流, 推导合环冲击电流的计算方法, 并采用暂态软件进行仿真计算或根据现场试验情况, 以此指导配电网合环操作。文献[10-12]针对合环决策仿真软件研究, 开发了基于稳态分析的合环辅助决策软件, 但没有分析合环冲击电流。

配电网合环操作存在的风险, 仅凭借长期实际运行管理经验而不经计算分析来评估是不够的。判断配电网是否能够合环, 相应的辅助计算分析必不可少。下面将介绍配电网合环电流计算方法, 以及减小合环操作风险的相关措施, 并基于提出的方法开发了配电网合环辅助决策软件, 对配电网合环操作具有一定指导作用。

1 配电网合环方式

根据上级电网结构、联络开关位置的不同, 配电网常见的合环方式可以分为以下3种情况:

1) 同一电压等级不同变电站的中压馈线合环, 如2个110 kV变电站的10 kV馈线合环, 或2个220 kV变电站的10 kV馈线合环等, 如图1所示。

2) 不同电压等级的2个变电站中压馈线合环, 如220 kV变电站的10 kV馈线与110 kV变电站的10 kV馈线合环, 或110 kV变电站的10 kV馈线与35 kV变电站的10 kV馈线合环等, 如图2所示。

3) 同一变电站内的中压馈线或母线联络开关

合环 如图3所示。



图1 同一电压等级不同变电站的中压馈线合环

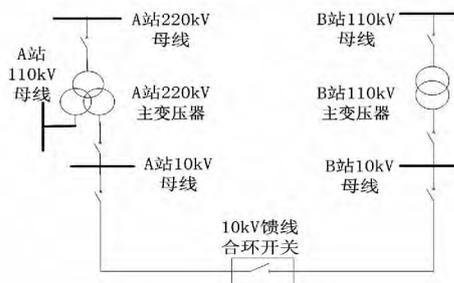


图2 不同电压等级的2个变电站中压馈线合环

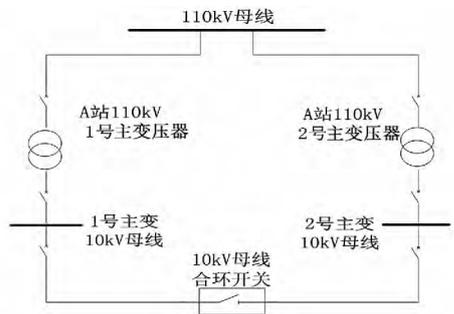


图3 同一变电站内的中压馈线或母线联络开关合环

2 配电网合环电流计算

合环操作后,合环开关处会流过合环稳态电流和合环冲击电流,并改变合环线路上的潮流分布,准确计算合环后的稳态电流和冲击电流对于判断能否合环至关重要。

2.1 合环稳态电流计算

为校验合环稳态电流是否满足系统运行要求,采用了牛顿法计算合环前后的潮流。在实际计算中,可以主要针对涉及合环回路的局部网络进行潮流计算。

2.2 合环冲击电流计算

系统在正常运行方式下三相对称运行,合环操作不考虑故障状态和非正常运行状态,可对其中一相进行分析。根据戴维南定理,从合环端口向网络看,合环冲击电流暂态计算模型如图4所示。

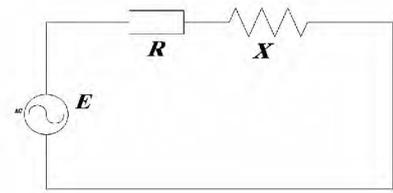


图4 合环冲击电流计算等效电路

合环后,图4所示电路的非齐次微分方程为

$$U_m \sin(\omega t + \delta) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

式中: U_m 表示合环开关两端电压向量差的峰值; R 、 L 分别表示合环等值电阻、等值电感; δ 表示合环时开关两端电压相角差。

这是一个一阶常系数、线性非齐次微分方程,解得合环冲击电流全电流表达式为

$$i = I_c + I_p = I_m \sin(\omega t + \delta - \varphi) + Ce^{-\frac{t}{T_a}} \quad (2)$$

式中: I_c 为稳态合环电流,称为交流分量或周期分量; I_p 又称直流分量或非周期分量,它按指数规律衰减; I_m 为合环稳态电流峰值; $\varphi = \arctan(X/R)$, 为合环等值阻抗的阻抗角; C 为直流分量起始值; T_a 为衰减时间常数, $T_a = L/R$ 。

由于电路中存在电感,根据楞次定律,通过电感的电流不能发生突变,即合环前瞬间的电流必须等于合环后瞬间的电流。合环电流不但有周期分量,也有为保持合环前后电流不发生突变的非周期分量。合环电流周期分量是一个稳定的正弦变化量,而非周期分量为衰减的直流分量,当直流衰减至0时,合环进入稳态,合环电流仅有周期分量存在。合环前,合环等效电路电感上的电流为0,即当 $t=0$ 时 $i=0$, 所以有

$$C = -I_m \sin(\delta - \varphi) \quad (3)$$

合环冲击电流的全电流表达式可进一步表示为

$$i = I_m \sin(\omega t + \delta - \varphi) - I_m \sin(\delta - \varphi) e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (4)$$

当 $\delta - \varphi = 0$ 或者 $\delta - \varphi = \pi$ 的倍数时,直流衰减分量为0,即合环后立刻过渡到稳态;当 $\delta - \varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ 时,合环冲击电流有最大值,此时的最大值为

$$i = -I_m \cos\omega t + I_m e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (5)$$

合环冲击电流非周期分量的衰减不但与本支路的 T_a 有关,也受其他支路的 T_a 以及网络中电流分布的影响。精确计算需求解整个网络的微分方程组,求解过程复杂繁琐,工程计算中并不实用。下面根据戴维南定理及合环前后的潮流计算等值阻抗 Z_{eq} 。

对合环前的网络进行潮流计算,得到合环前的网络开环电压为

$$U_{oc} = U_a - U_b \quad (6)$$

式中, U_a 和 U_b 分别为联络开关两侧节点 a 和 b 合环前的电压。

然后,对合环后的网络进行潮流计算可以得出流过联络开关的稳态环流 I_{ab} , 则等值阻抗为

$$Z_{eq} = \frac{U_{oc}}{I_{ab}} \quad (7)$$

根据上式计算等值阻抗 $Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$, 那么合环点的衰减时间常数为

$$T_a = \frac{X_{eq}}{\omega_c R_{eq}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5), 合环电流最大瞬时值将在合环后约半个周期(0.01 s)出现, 冲击电流最大瞬时值和最大有效值分别为

$$i_M = (1 + e^{-0.01/T_a}) \quad (9)$$

$$I_M = \frac{I_m}{\sqrt{2}} (1 + 2e^{-0.02/T_a})^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

2.3 非合环支路冲击电流计算

非合环支路是除了合环联络开关所在支路以外的支路; 部分非合环支路冲击电流可能比合环支路的冲击电流更大, 因此, 有必要计算分析合环支路冲击电流对非合环支路电流的影响。

对非合环支路的暂态过程进行分析, 可推导出其合环后的电流表达式为

$$i_k = I_{k1} \sin(\omega t + \alpha_{k1}) + C_k e^{-\frac{t-t_0}{T_k}} \quad (11)$$

式中: I_{k1} 和 α_{k1} 分别为非合环支路 k 在合环后的稳态电流幅值和初相角; C_k 和 T_k 分别为非周期分量初始值和衰减时间常数(近似计算时可取合环支路的衰减时间常数 T_a); t_0 为合环时刻。

设合环前支路 k 的电流为

$$i_{k0} = I_{k0} \sin(\omega t + \alpha_{k0}) \quad (12)$$

式中 I_{k0} 和 α_{k0} 分别为非合环支路 k 在合环前的稳态电流幅值和初相角。由于合环前后电流不能突变, 直流分量初始值应为

$$C_k = I_{k0} \sin(\omega t_0 + \alpha_{k0}) - I_{k1} \sin(\omega t_0 + \alpha_{k1}) \quad (13)$$

分别令 $A_k = I_{k0} \cos \alpha_{k0} - I_{k1} \cos \alpha_{k1}$, $B_k = I_{k0} \sin \alpha_{k0} - I_{k1} \sin \alpha_{k1}$, 则式(13)可以写成

$$C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \sin(\omega t_0 + \varphi_k) \quad (14)$$

式中 $\varphi_k = \arctan\left(\frac{B_k}{A_k}\right)$ 。当 $\omega t_0 + \varphi_k = \pm \frac{\pi}{2}$ 时, 直流分

量初始值达到最大:

$$|C_k|_{\max} = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (15)$$

设非合环支路冲击电流最大值在 t_1 时刻出现, 则

$$t_1 = \frac{\frac{n}{2}\pi - \alpha_{k1}}{\omega} \quad (16)$$

式中 n 的取值为满足以下 2 个条件的最小奇数: 1) $t_1 > t_0$; 2) $I_{k1} \sin(\omega t_1 + \alpha_{k1})$ 与直流分量 C_k 正负相同。则冲击电流最大瞬时值及最大有效值分别为

$$i_{kM} = I_{k1} + |C_k|_{\max} e^{-\frac{t_1-t_0}{T_k}} \quad (17)$$

$$I_{kM} = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_{k1}^2 + 2C_{k\max}^2 e^{-2(\frac{t_1-t_0}{T_k})})^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

由式(10)、式(18)即可计算合环开关处的冲击电流以及任意支路上的冲击电流有效值。

3 配电网合环条件

为了避免合环电流影响系统的安全稳定运行, 合环操作不能引起主变压器或线路过载以及保护元件的动作, 因此, 合环电流应满足以下条件:

- 1) 合环后的稳态电流应不使设备过载, 且小于过电流保护整定值;
- 2) 合环支路及非合环支路冲击电流应小于相关限时速断保护电流整定值。

为了保证合环操作顺利进行, 避免过大的合环稳态电流及冲击电流出现, 合环操作需尽量满足以下要求:

- 1) 合环线路的 10 kV 母线的相序相同, 相位相近;
- 2) 合环点两侧的电压差值尽可能小;
- 3) 参与合环的 2 个变电站到合环点的综合阻抗不宜相差过大;
- 4) 2 个合环馈线负荷之和不能超过其中一回馈线的最大载流量。

在合环前一般需要计算合环稳态电流和冲击电流, 或进行合环试验, 根据计算和试验结果确定合环时允许的相位差和电压差。进行合环操作时, 若相位差和电压差不符合允许要求, 须采取适当措施进行调整。

4 减小合环电流措施

合环点两端电压存在幅值、相位差异是导致环

流增大、保护动作、设备烧毁的一个重要原因。利用仿真可以找出减小环流的一些措施,合理控制合环后的电流,使之在尽量不影响供电可靠性的同时,对电力设备和电力系统的影响达到最小,减少事故的发生。

1) 调节变压器变比

合环稳态电流的大小与联络开关两侧的开环电压差成正比关系,可以通过减小开环压差减小合环电流。设联络开关两侧电压为 U_1 与 U_2 , 则

$$\begin{cases} U_1 = U_{H1} / (k_1 k_2 k_3 \dots) \\ U_2 = U_{H2} / (k'_1 k'_2 k'_3 \dots) \end{cases} \quad (19)$$

式中: U_{H1} 和 U_{H2} 为开关两侧的上级电压; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k'_1 、 k'_2 、 k'_3 ... 为变压器变比。

可见,对于网络结构、运行方式、负荷水平一定的系统,通过调节变压器分接头的位置可以调节联络开关两侧开环电压,减小合环开关两侧电压差值,进而减小合环电流。

2) 在负荷水平较低时进行合环

合环后的网络潮流等于合环之前各支路的初始潮流与合环开关两端电压相量差引起的增量叠加,在负荷水平较低时,合环前的电流较小,在电压差不大的情况下合环电流不会显著增大。同时,系统传输功率造成母线间存在相位差,负荷水平较低时,母线间的相位差相对较小,此时进行合环操作,合环电流也相对小。另外,在负荷水平较低时合环,线路、变压器有更多的容量消纳转供负荷,合环风险降低。

3) 投入限流电抗器

调节变压器分接头或在负荷水平较低时进行合

环操作,都是从减小开环电压差(相位差或幅值差)的角度来减小合环电流。合环电流的大小与合环等值阻抗成反比关系,为减小合环电流,可以通过投入电抗器以增大合环等值阻抗,限流电抗器的投入对维护系统运行的稳定性有很好的作用。

4) 调节电容器补偿

改变电容器的无功投入容量,即改变了系统的无功负荷。在实际运行中,电容器的投切往往是成组进行的,折合成的容性电流与感性电流合成后产生的是一个矢量值,作为参与计算的合环变压器其他线路负荷。调节电容器补偿容量必然带来合环电流的变化。

5 合环辅助决策软件开发

基于 CEES 供电网计算分析及辅助决策软件平台,建立合理的合环潮流计算模型,开发相应的合环辅助决策软件,用于指导中压配网系统的合环转供电操作。

1) 图形化建模

软件提供“所见即所得”的图形化操作界面,用于构建电网模型。绘图面板支持多级图元选择,不同设备按照不同电气标准有不同图元显示方式,可通过二级面板进行选择。支持所见即所得地进行图元的添加、删除、定位、联接、放大缩小、显示或隐藏网格、更改设备规格(大小)、更改设备方向、更改符号、显示或隐藏保护设备、输入(电气)属性值、设置工作状态等操作。

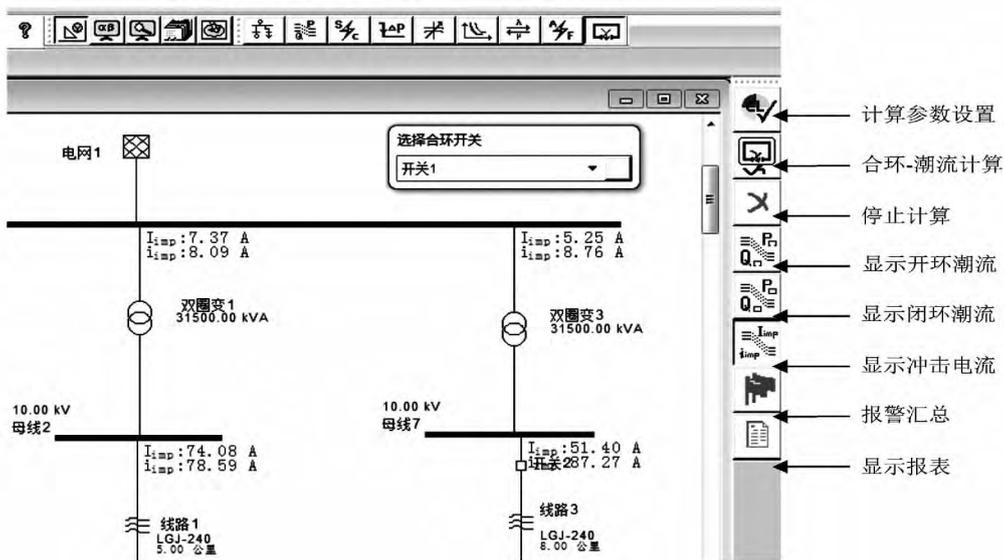


图5 合环计算状态

表1 某地区城区配电网合环计算结果

开关序号	稳态电流有效值/A	冲击流有效值/A	联络线路名	稳态电流有效值/A	冲击流有效值/A	二段保护值/A	三段保护值/A	能否合环
1	19.19	19.73	线路1	227.84	47.13	1 920	756	能
			线路2	110.88	111.00	2 160	600	
2	157.88	167.31	线路3	366.62	371.07	1 800	840	能
			线路4	207.44	370.93	1 800	840	
3	124.07	124.56	线路5	130.36	261.92	1 800	600	能
			线路6	497.62	497.76	1 800	840	
4	62.31	63.25	线路7	436.26	436.41	1 800	840	能
			线路8	311.41	370.93	1 800	840	
5	71.91	78.44	线路7	182.91	185.47	2 160	840	能
			线路6	397.5	411.01	2 160	804	

2) 合环计算分析

根据实际电网建模,切换至合环计算功能,进行合环电流计算分析。合环计算功能状态如图5所示,计算工具面板包含了计算参数设置、合环计算、停止计算、开环潮流、合环潮流、冲击电流、报警汇总和显示报表等功能。

6 算例

经过近几年大规模的配电网建设和改造,某城区配电网的健康水平有了明显提高,城网改造中产生了一定的双电源或多电源供电模式。为了进一步提升电网供电可靠率,可以对满足要求的联络线路进行不停电的合环操作。基于开发的软件平台根据实际电网进行建模,对线路进行合环仿真计算,校验合环电流是否越限。

在线路最大负荷情况下,对该地区城区中压线路联络点进行合环计算,部分结果如表1所示。由表1可见,城区合环开关及联络线路首端的合环稳态电流、冲击电流均未超过保护整定值,能够进行不停电的合环转供电操作。

7 结论

由于配电网合环开关两侧母线电压存在电压幅值、相位等差异,以及短路阻抗差太大等原因,可能导致合环操作中产生过大合环电流,引起速断保护或过流保护的误动,扩大停电面积,影响供电可靠性。

采用目前普遍的常规潮流程序,基于合环前及合环后网络的潮流计算,提出一种计算合环冲击电流的有效方法,并开发相应的合环辅助决策软件,更好地指导调度部门进行相关的合环操作。同时,供电公司应进一步完善城市网架结构,健全运行维护

体系,建立完善配电网合环相关制度标准,加强人员培训及积累合环操作经验,使合环工作趋于常态化,保证配电网安全稳定运行,进一步提升供电可靠率。

参考文献

[1] 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(S1): 199 - 201.

[2] Xueli Guo, Jiuju Du, Changxiao Qi. Study and Application of Switching Operation of 10 kV Lines Ring Network in Urban Power Distribution Network [C]. Electricity Distribution (CIGRE), 2012 China International Conference on 2012: 1 - 6.

[3] 幸荣霞, 姚爱明. 环网合环操作的分析[J]. 浙江电力, 2007, 26(1): 66 - 69.

[4] 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, 27(22): 76 - 80.

[5] 连鸿波, 顾振中, 余浩斌等. 10 kV 配电网合环倒负荷研究[J]. 华东电力, 2012, 40(6): 1045 - 1049.

[6] 姜瀚书, 孙翀也, 贾彦兵, 等. 10 kV 配电网合环电流暂态过程的分析与仿真[J]. 黑龙江电力, 2011, 33(2): 88 - 90.

[7] 李晓柯, 李祥发. 配电网合环冲击电流的暂态过程分析与仿真[J]. 机电工程, 2010, 27(5): 67 - 70.

[8] 刘磊, 禹化然, 金鑫. 合环潮流的暂态过程分析[J]. 机电工程, 2008, 25(10): 74 - 76.

[9] 陈霄, 王磊, 李扬. 配电网合环冲击电流的分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 40 - 42.

[10] 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.

[11] 钱兵, 程浩忠等. 电网合环辅助决策软件研究[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(3): 8 - 11.

[12] 贺翔, 刘永强, 樊利民. 基于主网 GIM 的配电网合环潮流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 23(3): 36 - 39.

作者简介:

韦 斌(1975), 助理工程师, 从事配电运维工作;
杨丰任(1990), 硕士研究生, 主要研究方向为配电网规划与运行。
(收稿日期: 2016 - 01 - 23)