

10 kV配电网合环的分析与应用

配电网合环操作可以大幅提高供电可靠性，分析配电网合环的条件，全面归纳出八种典型接线方式变电站低压侧10 kV配电网合环计算模型，总结出配电网合环的稳态、暂态计算方法，并对某实际配电网进行计算应用，形成配电网合环的技术原则，对配电网合环具有指导作用。

肖辉耀 高可夫/湖南省电力公司长沙供电分公司



肖辉耀/工程师

目前大多数用户一般是通过10 kV配电网供电，为保证可靠供电，越来越多的配电线路设计成联络线或手拉手线路，采用“闭环接线，开环运行”的方式。在经济高速发展、生活水平日益提高的现代社会，人们对电力可靠供电的要求大幅提高，日常检修工作或方式变更若不能合环操作就存在停电转负荷的情况，其数量占停电次数的较高比例，虽然停电时间不长，但造成用户停电次数增加，特别是检修复电时停电调电的开始时间受检修工作进度影响，其不确定性引起计划发布的时间与实际时间不同，造成用户生活不便，投诉多，优质服务压力大。

关于配电网合环的研究一直在进行，文献[1-3]针对城市配电网的合环操作进行研究；文献[4]对10 kV配电网合环热翻负荷进行研究；文献[1-5]提出了一种典型接线模式下配电网合环的稳态计算算法；文献[6]提出了复杂配电网合环电流调控的实用化策略；文献[7-8]提出了配电网合环的电力系统暂态分析方法。近年来电网电源数量增长多，网架变化大，特别是配电网合环的接线方式有较多变化。本文从实践中归纳出八种典型接线方式的变电站低压侧（10 kV）直

接合环操作模型，通过分析软件计算出合环线路合环后的潮流等数据，并进行稳态、暂态分析，分析在电网日趋完善的情况下，不经本站和上一级电网合环时低压侧（10 kV）和配电网线路直接合环的可能性，并以此理论为基础提高供电可靠性，减少运行人员的倒闸操作，减少安全风险，延长设备运行寿命，增加由于倒闸操作而节省下来的有效检修工作时间，并增加售电量。

配电网合环的条件分析

（1）线路相序一致

配电线路合环点两侧相序必须一致。新投线路以及线路（包括电缆线路）异动时，具备合环操作条件的，要求合环点两侧核相正确。正确的核对待合环点的相序相位，可以分为三种情况。

1) 变电站内。在新设备投产时，通过在变电站TV分别核相以确保合环点相序、相位的正确性，因变电站的相关设备发生异动的可能性很小，因此在合环前不需要再次进行相序确认。

2) 线路待合环负荷开关。在新设备投产、线路（含电缆线路）异动涉及线路相序可能发生变化时，都要求在负荷开关两侧用一次核相仪器核对相序正确，对于不具备核相相序的情况，也要求在用户侧配电间核对相序。

3) 线路待合环开关站断路器。因开关站均为电缆线路进线，开关站断路器均为全封闭组合电器，不具备一次核相条件，对于这种情况可以通过电缆线路的二次核相解决。

关键词/Keywords

配电网合环·
计算模型·
计算方法·
技术原则·

(2) 潮流分布合理, 设备不过载

1) 通过计算, 确定合环线路的潮流分布是否合理。

2) 进行合环操作的线路, 两侧电压差及总负荷应满足要求。

3) 考虑系统内220 kV均为同一系统。

(3) 继电保护和重合闸装置的要求

1) 对于继电保护, 先要经过计算确认定值, 使正常定值能满足合环操作的要求。目前城区范围的10 kV线路断路器TA电压比大多为600/5或400/5, 主变压器低压侧10 kV断路器为3 000/5或4 000/5, 满足合环操作要求。

2) 进行合环操作时, 重合闸装置考虑不退出运行。但是在线路合环后, 若在用户端发生短路, 短路电流会明显增大, 对用户的断路器切断故障电流不利。

(4) 对设备的要求

1) 环网内电气设备无缺陷。

2) 进行合环操作的线路、断路器要满足相关技术参数。

3) 户外负荷开关(或环网柜开关)进行操作, 须经运行单位确认户外负荷开关是否具备合、解环条件。

配电网合环的计算分析

(1) 典型接线的计算模型

根据配电网的典型接线模式, 建立配电网合环的八种计算模型。

1) 由同一220 kV变电站供电的110 kV变电站低压侧断路器(或母联断路器)合环, 如图1所示。

2) 由同一220 kV变电站或110 kV变电站供电(同母线)的10 kV线路负荷开关(或环网柜开关)合环, 如图2所示。

3) 由同一220 kV变电站供电的110 kV变电站(不同母线)的10 kV线路负荷开关(或环网柜开关)合环, 如图3所示。

4) 由不同220 kV变电站供电的110 kV变电站的10 kV线路负荷开关(或环网柜开关)合环, 如

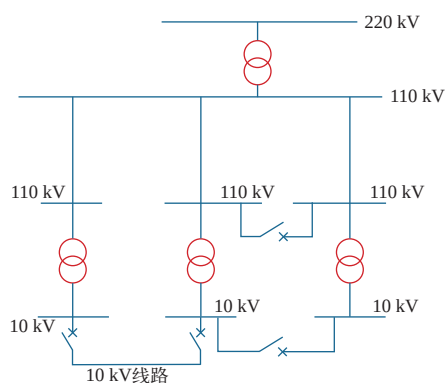


图1 同一220 kV变电站供电的110 kV变电站低压侧断路器(或母联断路器)合环计算模型

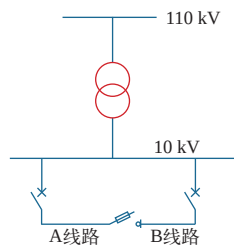


图2 由同一110 kV变电站供电(同母线)的10 kV线路负荷开关(或环网柜开关)合环计算模型

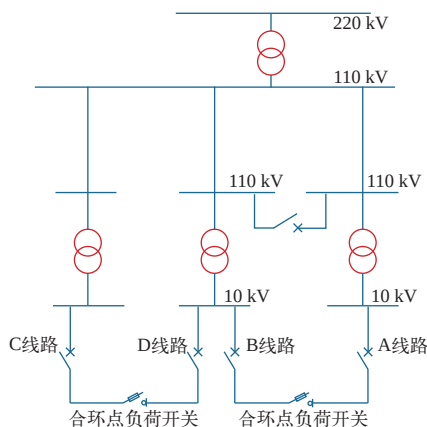


图3 由同一220 kV变电站供电的110 kV变电站(不同母线)的10 kV线路负荷开关(或环网柜开关)合环计算模型

图4所示。

5) 由不同220 kV变电站供电的110 kV变电站低压侧断路器(或母联断路器)合环, 如图5所示。

6) 由同一110 kV变电站供电的35 kV变电站低压侧断路器合环, 如图6所示。

7) 由不同110 kV变电站供电的35 kV变电站低压侧断路器合环, 如图7所示。

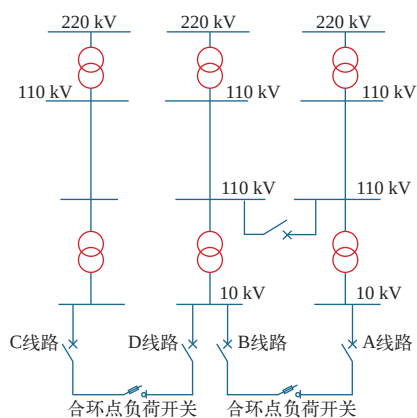


图4 由不同220 kV变电站供电的110 kV变电站的10 kV线路
负荷开关（或环网柜开关）合环计算模型

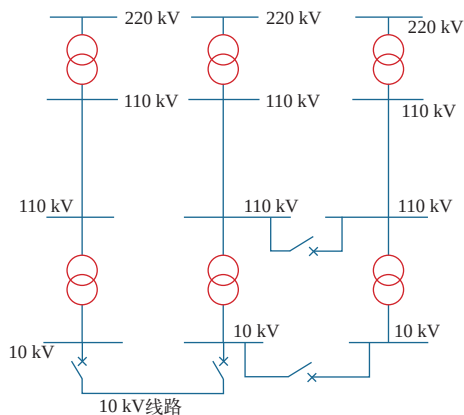


图5 由不同220 kV变电站供电的110 kV变电站低压侧断路器
（或母联断路器）合环计算模型

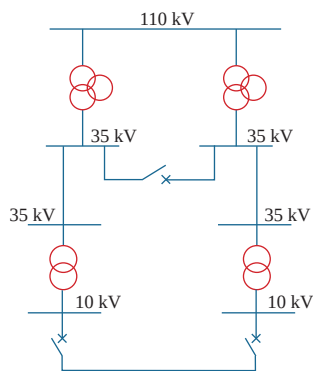


图6 由同一110 kV变电站供电的35 kV变电站
低压侧断路器合环计算模型

8) 考虑小水电丰富地区110 kV变电站的低压侧断路器（或母联断路器）合环，如图8所示。

以上八种模型通过折算，可以等效为如图9所示的模型，线路上分布了较多个负荷。

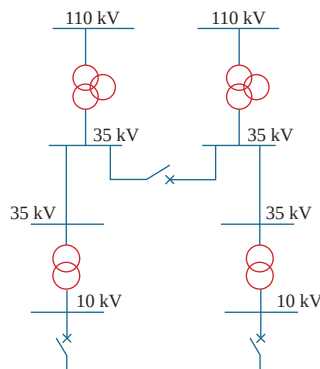


图7 由不同110 kV变电站供电的35 kV变电站
低压侧断路器合环计算模型

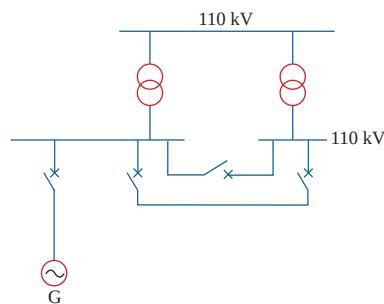


图8 考虑小水电丰富地区110 kV变电站的低压侧断路器
（或母联断路器）合环计算模型

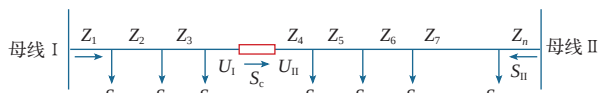


图9 合环潮流的等效计算模型

(2) 合环潮流的计算分析

电力系统潮流计算是电力系统分析中最基础的计算，是进行合环电流判断的基础，不仅能求出合环之路的电流，各个线路上的功率分布、功率损耗以及各个节点的母线电压，而且通过合环电流的计算，调度操作人员可以根据合环电流的大小判断合环操作的可行性。根据如图9所示的等效模型，具体计算步骤如下。

1) 通过闭式电力网潮流计算的力矩法计算合环时的网络自然功率分布

$$S'_I = [S_1 \sum_{i=1}^n Z_i + S_2 \sum_{i=1}^n Z_i + \dots + S_{n-1} Z_n] / \sum Z \quad (1)$$

$$S'_{II} = [S_{n-1} \sum_{i=1}^n Z_i + S_{n-2} \sum_{i=1}^n Z_i + \dots + S_1 Z_1] / \sum Z \quad (2)$$

2) 计算开环点两侧的电压差, 并用电压差和环路阻抗计算出环路内流过的均衡功率

$$S_c = U_n(U_I - U_{II}) / \sum Z \quad (3)$$

3) 将各支路的自然功率和环路均衡功率相加即得环路各处的功率分布, 并检测各点是否存在过载

$$\begin{aligned} S_I &= S'_I + S_c \\ S_{II} &= S'_{II} + S_c \end{aligned} \quad (4)$$

4) 由于10 kV线路阻抗远远大于变电站10 kV母线至系统之间的阻抗, 系统阻抗可以忽略不计, 近似认为合环线路两侧的10 kV母线为等电动势点。两站系统阻抗值虽较大, 但较接近时, 依然可近似认为合环线路两侧的10 kV母线为等电动势点。主变压器容量较小的一侧其阻抗较大, 根据2)、3)可以得知合环后该侧分得的负荷较小, 从而判断会不会引起过载, 根据1)的公式计算结果可以判断会不会造成功率分布的大幅变化。

(3) 合环冲击电流的计算分析

如果电力系统环网并列合环操作时形成的冲击电流太大, 可能对网络中的发电机和合环断路器等设备造成冲击甚至损坏。因此进行并列合环操作时必须预先计算并列合环形成的冲击电流, 从而为运行人员采取相应对策提供依据。

由于电力系统三相对称, 所以只研究其中的一相, 如A相。计算合环暂态冲击的单相等效电路如图10所示。

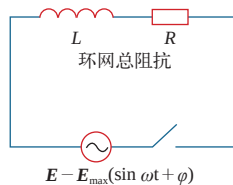


图10 合环暂态冲击计算模型

系统经过简化, 环网阻抗 $Z_{环}$ 简化为 RL 串联支路, 电压激励 E 为A相电压

$$E = \frac{\Delta U \times \angle 30^\circ}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

以系统平衡点为基准, E 超前 ΔU 角度 30° 。

电路的非齐次微分方程为

$$E_{\max} \sin(\omega t + \varphi) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (6)$$

式中, φ 为合环时刻 $t=0$ 时 E 的初始相角。

合环前瞬间电感上没有电流通过, 故电感中的初始电流 $i(0_-) = 0$, 从而通过计算得出冲击电流的完全表达式为

$$\begin{aligned} i(t) = e^{-Rt/L} \{ & \frac{-E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin[\varphi - \tan^{-1}(\frac{\omega L}{R})] \} + \\ & \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin[\omega t + \varphi - \tan^{-1}(\frac{\omega L}{R})] \end{aligned} \quad (7)$$

可以看出 $\varphi - \tan^{-1}(\frac{\omega L}{R}) = 0$ 或 π 的整数倍时, 直

流分量为0, 即合环时没有冲击电流即进入稳态;

当 $\varphi - \tan^{-1}(\frac{\omega L}{R})$ 等于 90° 左右时, 直流分量初始值与周期分量幅值相等, 冲击电流最大。在进行配电网合环操作时, 很难计及合环电压差 E 和 $\varphi - \tan^{-1}(\frac{\omega L}{R})$

的角度, 因此本文考虑最严重的情况下, 即假定合环时刻 E 的初始角度 $\varphi = 0$ 时, 由于配电网中电阻远远小于电抗, 因此可以认为 $\tan^{-1}(\frac{\omega L}{R})$ 近似为 90° 。

因此式(7)可简化为

$$i(t) = \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} [e^{-Rt/L} + \sin(\varphi - 90^\circ)] \quad (8)$$

由式(8)可知, 冲击电流出现的最大时刻为合环后半周期, 也即

$$i_m = (1 + e^{-0.01/T_a}) \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} = k_{im} I_{pm} \quad (9)$$

式中, $E_{\max} / \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ 为循环电流的幅值; i_m 为最大冲击电流; $T_a = L/R$; $k_{im} = 1 + e^{-0.01/T_a}$ 为冲击系数, 它和电力系统中短路电路计算取值相似, 在电力系统中一般取 $k_{im} = 1.8$ 。

上述只是由于电压差引起的冲击电流, 本文考虑的是流经线路的电流, 因此合环冲击电流必须是线路负荷电流与冲击电流的叠加。

配电网合环的实际计算应用

以某城区配电网络为例, 该城区主要由220 kV集里变电站、110 kV关口变电站以及110 kV浏阳变电站的10 kV配电线路供电, 都处在同一个220 kV

系统内。所有进行合环操作的10 kV配电设备参数取自实际情况，运行方式为正常运行方式，只考虑检修高峰期时合环转负荷（暂不考虑事故情况、夏冬负荷高峰期间时合环操作），因此负荷数据均按5月份负荷典型日上午11时取值。按照10 kV系统A类电压的上限10.7 kV、下限10.0 kV的要求，合环点两变电站母线电压差选100~700 V。

计算合环点电压时，可以确定10 kV线路合环点两侧电压相角值基本等于两侧线路分别所在母线的相角值，通过计算，各变电站10 kV母线电压幅值及相角值如表1所示（相角以集里变电站220 kV母线为基准）。

表1 各变电站10 kV母线电压幅值及相角值

母线名称	电压幅值/kV	相角 (°)
集里220	226.000 07	0
集里10 I	10.187 87	-4.624 9
集里10 II	10.188 58	-4.583
浏阳10 I	10.216 77	-6.518 4
浏阳10 II	10.293 92	-5.518
关口10 I	10.226 11	-6.780 2

可见，各变电站10 kV母线电压幅值基本相等，相角差远远小于规定的30°。

对该城区配网合环线路进行分析后，其合环计算模型可以归纳为模型①、②和③三种。采用中国电力科学研究院开发的PSASP潮流计算软件进行计算，计算结果如表2所示。

结束语

通过对配电网合环的理论分析计算和实际应用，可以得出以下结论，这些结论可以作为配电网合环的技术原则进行运用。

1) 本文对合环的分析研究只考虑220 kV为同一系统下的合环情况，对于不同220 kV系统的合环由于涉及系统较大范围的潮流转移以及系统受到干扰后的安全性，因此禁止220 kV不同一系统情况的合环操作。

2) 各合环站点主变压器或线路负荷分配不均时对潮流分布影响显著，将会导致合环电流变化或者改变方向。

3) 电源侧母线电压幅值差以及相角差对合环后潮流分布影响较大，最为理想的合环条件为：①参与合环的变压器、线路参数相等；②合环点两侧负荷分配均匀；③电源侧母线电压幅值、电压相角相等。

4) 合解环过程均会产生冲击电流，但合环冲击电流只发生在进行合环操作的两条线路，对合环线路所在的母线影响很小，冲击电流的大小与合环两侧的电压差、合环时间密切相关，同时也决定合环后稳态电流的大小。计算及实践证明，合解环冲击电流不会造成系统的稳定破坏，也对环流影响不是很大。

表2 某城区10 kV线路合环计算结果

合环线路	模型 分类	额定 电流/A	系统运行情况设置	合环前负荷 潮流/MV·A	合环后负荷潮流 /MV·A	合环时的 冲击功率/MV·A	合环时的 冲击电流/A	合环 结论
关口 I 回 (浏308— 关306)	①	428	关口 I 回由关口变电站302断路器供电， 浏阳变电站342断路器热备用；中等距离、 重负荷且末端互联， $\Delta U \leq 700$ V	$S_{\text{浏}308} =$ 3.653+j1.146 $S_{\text{关}306} = 0$	$S_{\text{浏}308} =$ 1.487+j0.367 $S_{\text{关}306} =$ 2.127+j0.650	$S_{\text{浏}308} =$ -1.919+2.818j $S_{\text{关}306} =$ 5.565-1.793j	$I_{\text{浏}308} = 187$ $I_{\text{关}306} = 321$	能够 合环
邮电 II 回 (浏348— 浏城 II 回浏 346)	②	428	浏城 II 回、邮电 II 回由浏阳变电站不同 10 kV母线供电，开环点在丰斋路口奎文学 校环网309断路器；中等距离、重负荷且中 端互联， $\Delta U \leq 700$ V	$S_{\text{浏}346} =$ 4.15+j1.26 $S_{\text{浏}348} =$ 3.13+0.93	$S_{\text{浏}346} =$ 4.926+j1.379 $S_{\text{浏}348} =$ 2.427+j0.821	$S_{\text{浏}346} =$ 4.162+j1.619 $S_{\text{浏}348} =$ 3.191+j0.581	$I_{\text{浏}346} = 245$ $I_{\text{浏}348} = 178$	能够 合环
大楼 I 回 (集324— 大楼 II 回集 362)	③	428	大楼 I 回、大楼 II 回均由集里变电站供 电，开环点在大楼配电间301断路器；短距 离、中等负荷且中端互联， $\Delta U \leq 700$ V	$S_{\text{集}324} = 0$ $S_{\text{集}362} =$ 0.803+j0.308	$S_{\text{集}324} =$ -0.297+1.158j $S_{\text{集}362} =$ 1.097-0.858j	$S_{\text{集}324} =$ -0.276+1.255j $S_{\text{集}362} =$ 1.076-0.957j	$I_{\text{集}324} = 70.7$ $I_{\text{集}362} = 79.2$	能够 合环

5) 配电网合环运行时, 变电站10 kV母线短路电流会有所增加, 合环后增加的短路电流有可能会超过电网用户侧断路器设备额定遮断容量并构成不利影响, 因此, 应尽量减少合环运行时间。

6) 可能存在的几个误差。①配电网负荷分布较为松散, 支线较多, 在计算中难以考虑每一个分支接线负荷情况, 本文计算上采取的是将负荷集中分布在线路的少数几处, 造成理论计算与实际误差; ②实际运行时, 配电网测得的大多是电流值, 不是 P 值, 这样就需要用电流值和功率因数推导出 P 、 Q 的大小, 而功率因数也非实测值, 所以功率因数的准确与否对合环计算的误差有一定影响, 本文计算取用户的功率因数为0.9; ③变压器分接头位置不准确也会给计算带来误差。

参考文献

- [1] 苑捷. 北京城区配电网合环分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [2] 郭雪丽, 齐昌宵, 史洪彬. 关于城市配网合环操

作的研究 [J]. 电气应用, 2012(23): 18-24.

- [3] 肖白, 邢文洋, 穆钢, 等. 城市中压配电网合环电流分析 [J]. 东北电力大学学报, 2013(1): 84-88.
- [4] 连鸿波, 顾振中, 余浩茹, 等. 10 kV配电网合环倒负荷研究 [J]. 华东电力, 2012, 40(6): 1045-1049.
- [5] 宣科, 贾云清, 祝洪博. 基于Ward/REI等值理论的配网合环稳态电流计算 [J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(1): 43-47.
- [6] 邓哲林, 刘宝柱, 董彬政. 复杂配电网合环电流调控的实用化策略研究 [J]. 现代电力, 2012, 29(6): 11-16.
- [7] 姜瀚书, 孙种也, 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, 94.
- [8] 胡立锦, 常喜强, 周茂, 等. 机电-电磁暂态混合仿真在电网合环分析中的应用研究 [J]. 四川电力技术, 2013(1): 1-6.

(收稿日期: 2014-06-24) EA

全新改版

色彩丰富 凸显主题

2015《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容, 力求赏心悦目。

栏目设置 独具风格

坚持继承与开拓并举, 以丰富内涵充实经典栏目, 持续深化面对面、专家访谈、EA经理人等栏目, 密切关注电气技术的发展和应

专家点评 精辟深刻

每期都将围绕一个热点话题, 隆重推出一场专题讨论的盛宴, 共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂, 针对焦点问题作出评析。

行业案例 生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用, 以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间, 促进应用经验交流。

国内邮发代号: 82-341 国外发行代号: M1409

每期定价: 15.00元 全年定价: 360.00元

电气应用

电气应用 盛情呈现

2015