

不同量测数据情形的配电网合环操作计算及应用

苗培青¹, 于耿曦², 纪双全², 李越¹, 黄伟², 王钰²

(1. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250000; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 在合环操作时, 为了避免引起很大的稳态电流和冲击电流, 使线路过载和越限, 要进行合环操作分析和计算。合环操作时可能涉及到主网, 在获取主网数据时会遇到多种不同的情况。根据合环操作是否涉及到主网, 将合环电流计算分为配网合环计算和主配网拼接合环计算两种情况。当进行主配网拼接合环计算时, 根据获取的数据类型分成三种不同情况分别进行了建模与分析, 以实现合环电流的计算。采取等值网络模型来分析计算合环网络, 详细研究了合环稳态电流计算以及合环冲击(暂态)电流计算的方法, 根据合环分析计算的思路和流程编制开发了合环操作软件, 在实际应用中验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 配电网; 合环; 等值网络; 合环稳态电流; 合环冲击电流

Calculation and application of distribution network closing loop operation in different situation of measurement data

MIAO Peiqing¹, YU Gengxi², JI Shuangquan², LI Yue¹, HUANG Wei², WANG Yu²

(1. Shandong Electric Power Company Economic Research Institute of the State Grid, Jinan 250000, China;

2. School of Electronic and Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to avoid generating large loop current and impact current which would make circuit overload, closing loop operation must execute under the guide of analysis and calculation. Closing loop operation in distribution network involves transmission network, whose measurement data may be incomplete when they are obtained by the distribution network. Based on whether the closing loop involves transmission network, the paper classifies the loop into two kinds. When dealing with the calculation of closing loop involving transmission network, the paper classifies the combination of measurement data of the transmission network into three different situations, and then provides specific model and analysis for each situation. The paper comes up with the equivalent network to simplify the looped network, introduces the method for calculating the loop closing steady-state current and impulse current, and brings up the thought and process for the analysis and calculation of closing loop operation, which provide the theoretical support for the closed loop operation software.

This work is supported by Economic and Technical Research Institute in Shandong Province Electric Power Company (No. SDJYY20130301).

Key words: distribution network; closed loop operation; equivalent network; loop closing steady-state current; loop closing impulse current

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0137-08

0 引言

国内 10 kV 配电网一般采用闭环设计、开环运行的供电方式, 在倒负荷和检修时, 通过合、解环操作可以减少停电时间, 提高供电可靠性。但由此

引起的合环电流可能使馈线开关保护误动, 造成用户停电^[1], 甚至引发安全事故, 因此应对合环操作进行量化分析和计算, 为实际配电网系统的合环操作进行提供决策支持。配电网合环操作的主要风险来自于合环电流, 所以目前合环操作的分析和计算都是针对合环电流进行的。在计算合环电流之前需要得到配电网馈线的潮流分布, 环网的潮流不易直接求得, 常见的思路是根据合环前的潮流情况, 采

基金项目: 国网山东省电力公司经济技术研究院项目 (SDJYY20130301)

用叠加法计算^[2-5]。根据潮流计算结果,可以得到合环点两侧电压,结合环路等值阻抗,求得合环电流。

合环操作所形成的环网同时涉及到输电网和配电网,但实际上会出现主网数据缺失的问题,使配电网合环电流的计算受到影响。文献[6]中使用迭代法求上级电网等值阻抗。文献[7-10]详细介绍了合环电流的计算模型;文献[11]提出了合环后潮流调整的措施;文献[12-13]着重介绍了合环操作决策软件的模块设计和数据流向;文献[14-16]比较了几种配电网潮流计算的方法;文献[17]主要对北京城区配电网合环进行分析,文献[18]主要对郑州220 kV电磁环网的解环进行规划研究,具有工程实际意义。上述文献分别提出了配电网合环操作决策软件的不同开发思路,但并没有考虑到主网数据缺失的情况下如何进行合环操作分析和计算。因此本文以此为出发点,综合考虑了主网数据缺失的不同情况下如何进行合环电流分析。

本文的合环分析计算包括路径搜索、潮流计算、阻抗等值、电流计算等方面的内容。考虑到主配网拼接时数据完整性的不同,根据获取的数据类型分成三种不同情况分别进行了建模与分析,以实现合环电流的计算。本文还将涉及到输电网和配电网的合环网络简化为一个等效网络,并用迭代法求出主网的等值阻抗。其中计算合环稳定电流采用对合环循环电流叠加的方法通过对上述内容的定量分析和计算,可为实际系统的合环操作提供决策支持。

1 合环路径搜索

确定网络结构图中各闭合支路和节点的编号并进行关联。将合环操作点设置为初始节点和终止节点,从初始节点开始搜索一直找到终止节点,再由终止节点反推到初始节点,完成合环路径搜索。将电气图转换为节点支路图,并为节点编号。

配电网的合环情况如图1所示,环网路径搜索从联络开关开始,向上级电网搜索环路,直到搜到完整环路为止。在搜索到多个环时,取最小路径的环,即环路上节点最少的环。为计算方便,在求解环路潮流与电流时实际用的环路是从10 kV母线处等效的环路,并非实际的环路。等效的环路有以下两种方式求解。

1) 如若主网结构模型数据完整,则将10 kV以上的环路中设备等值为一个阻抗 Z_{eq} , Z_{eq} 可根据搜索到的环路上设备等值求出。

2) 如若主网结构模型数据缺失,则搜索到10 kV为止,也认为形成了一个10 kV的环网,上级电网

用等效阻抗 Z_{eq} 来代替。

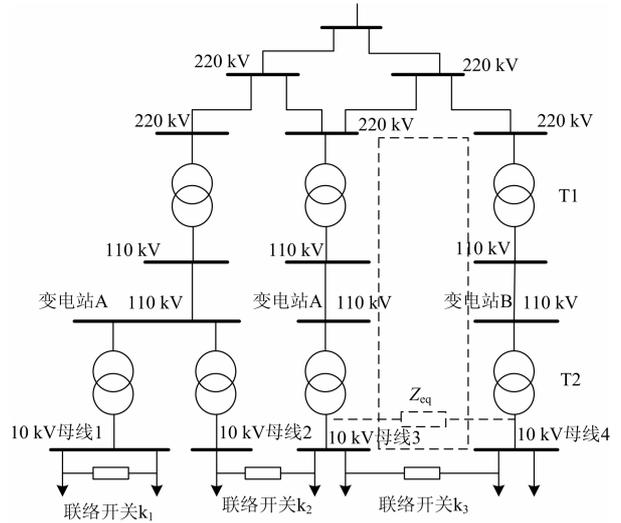


图1 配电网合环情况示意图

Fig. 1 Schematic diagram of closing loop operation in distribution network

2 合环前潮流计算

在进行合环电流计算时,必须先进行合环前潮流计算,从而得到合环点联络开关两端的电压差,进而计算合环电流。如果配电网合环操作产生的环网涉及到了主网,进行潮流计算时,可将环网分为主网和配网两部分分别计算。

电力系统的量测分为遥信和遥测两种。遥测是模拟量的量测结果,包括支路功率或电流、节点电压等。遥信是开关的量测结果,即开关(断路器)或刀闸的开合状态,变压器的档位等。

主网部分的潮流计算根据量测数据完整情况的不同,分为三种方案。

2.1 方案一

方案一适用于可以得到主网遥信数据和遥测数据的情况下,此时数据较齐全,可以直接对主网进行潮流计算。如果合环操作产生的环网涉及到了主网,进行潮流计算时,可将环网分为主网和配网两部分分别计算。将主网220 kV的变电站的入线端等效为电源点,配网部分等效为负荷,对主网部分用牛拉法进行潮流计算,得到10 kV母线电压的幅值和相角,再以10 kV母线为电源点,用前推回代法计算配电网部分的潮流,以得到合环点两侧电压差 ΔU 。

2.2 方案二

方案二适用于只可得到主网的遥信数据的情况下,此时只可以得到主网的开关开合状态或变压器的档位等信息,不能得到主网的实时支路电流功率

和节点电压。

如果环涉及到了主网, 且环网的电源点为 110 kV 电压等级的单端供电环网, 即可根据主网的静态数据修正合环馈线配网 10 kV 母线的电压差。以图 2 为例, 具体方法如下。

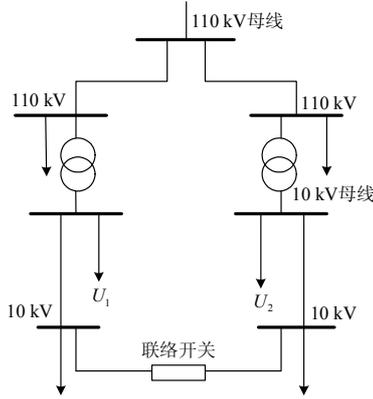


图 2 典型的合环简化图

Fig. 2 Simplified diagrams for closing loop operation

根据 10 kV 母线的入线负荷、电压幅值量测, 可以得到 10 kV 母线 1 和母线 2 与 110 kV 母线的电压相角差。

$$\delta_1 = \arctan \frac{P_1 X_1 - Q_1 R_1}{U_1 + \frac{P_1 R_1 + Q_1 X_1}{U_1}} \quad (1)$$

$$\delta_2 = \arctan \frac{P_2 X_2 - Q_2 R_2}{U_2 + \frac{P_2 R_2 + Q_2 X_2}{U_2}} \quad (2)$$

式中: P_1 、 Q_1 和 P_2 、 Q_2 分别为 10 kV 母线 1 和母线 2 的入线负荷的有功量和无功量; R_1 、 X_1 和 R_2 、 X_2 分别为 10 kV 母线 1 和母线 2 到 110 kV 母线的电阻值和电抗值; U_1 和 U_2 分别为 10 kV 母线 1 和母线 2 的电压幅值。

因此, 两个 10 kV 母线之间的相角差为 $\theta_2 - \theta_1 = \delta_2 - \delta_1$ 。

如果环网不满足上述的条件, 则按照方案三中所描述的方法计算潮流。

2.3 方案三

方案三适用于主网的遥信数据和遥测数据均不可得的情况下, 此时相当于主网的开关状态和支路电流、功率和节点电压都无法得知。

当量测值相角与主网数据均无法得知, 则利用 10 kV 母线电压幅值量测 U_1 、 U_2 , 根据工程经验值

估计 U_1 、 U_2 相角, 利用前推回代法求出联络开关量测的电压 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b , 估算出支路上潮流分布。在开发的模块中, 工程经验值应该可以人工进行配置, 并根据性能评估的结果调整该值。

结合上述三种方案, 合环前潮流计算的流程图如图 3 所示。

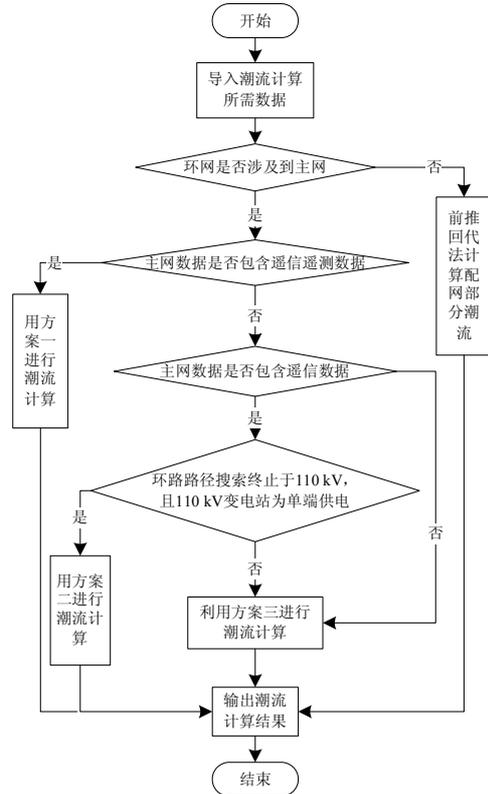


图 3 合环前潮流计算流程图

Fig. 3 Flow chart of load flow calculation before closing loop operation

3 合环电流计算

3.1 合环点等值阻抗

同样由于解合环的分析计算涉及到输电网和配电网, 而输电网的电网结构有时难以获取, 就要根据不同情况来求取合环点的等值阻抗。

(1) 主网结构已知

在已知主网结构情况下, 搜索到最小路径环网, 如图 1 中所示, 联络开关 k_3 闭合所形成的回路可上搜到 220 kV 电压等级, 将 10 kV 母线电压以上环路部分的所有设备的阻抗和(折算到 10 kV 电压等级)等效为 Z_{eq} 。

U_{T1N1} 、 U_{T1N2} 、 U_{T2N1} 、 U_{T2N2} 分别表示变压器 T1、T2 的高压侧、低压侧额定电压; $U_{S1}(\%)$ 、 $U_{S2}(\%)$ 分别表示变压器 T1、T2 的短路电压百分比; S_{N1} 、

S_{N2} 分别表示变压器 T1、T2 的额定容量。 U_{T1N1} 、 U_{T1N2} 、 U_{T2N1} 、 U_{T2N2} 分别为变压器 T1、T2 的高压侧电压和低压侧电压。图 1 所示环路变压器、线路阻抗折合到 10 kV 侧为

变压器 T1:

$$X_{T1} = \frac{U_{S1}(\%)U_{T1N2}^2}{100S_{N1}} \left(\frac{U_{T2N2}}{U_{T2N1}} \right)^2 \quad (3)$$

110 kV 线路:

$$Z_{L1} = z_1 L_1 \left(\frac{U_{T2N2}}{U_{T2N1}} \right)^2 \quad (4)$$

变压器 T2:

$$X_{T2} = \frac{U_{S2}(\%)U_{T2N2}^2}{100S_{N2}} \quad (5)$$

10 kV 线路:

$$Z_{L2} = z_2 L_2 \quad (6)$$

联络线阻抗(同一站联络开关或相距很近可忽略不计):

$$Z_{ab} = z_{ab} L_{ab} \quad (7)$$

220 kV 以上电压等级的线路、变压器参数可按照上述公式进行推导。

假设环路两侧线路与变压器参数相同, 环网 10 kV 以上电网等效阻抗 Z_{eq} 为

$$Z_{eq} = (X_{T1} + Z_{L1} + X_{T2}) \times 2 \quad (8)$$

图 7 所示的环路总阻抗为 $Z = Z_{eq} + Z_{L2} \times 2 + Z_{ab}$ 。

(2) 主网结构未知

对于环网涉及到主网的情况, 联系配电网合环网络与上级电网之间存在边界节点的特点, 利用迭代法来求取主网等值阻抗 Z_{eq} 。

由图 4 所示, 首先根据实际主网的情况, 设定主网中同一型号线路占大部分的线路的单位阻抗 $z_{eq} = r + jx$, 单位 Ω/km ; 并设定主网虚拟路线的长度为 l , 单位为 km ; 然后, 根据母线 1、2 的参

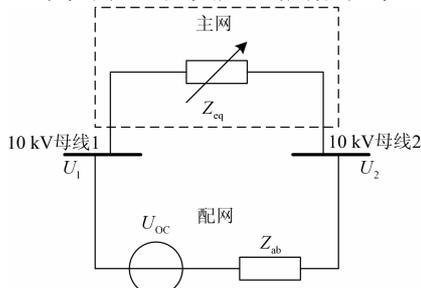


图 4 合环稳态电流计算等值电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of closed loop steady-state current calculation

数, 选取电压值高的一侧为始端, 如母线 1 电压值高, 由始端电压 U_1 , 可计算出母线 2 处的电压幅值为

$$U_2' = \sqrt{\left(U_1 - \frac{P_1 r l + Q_1 x l}{U_1} \right)^2 + \left(\frac{P_1 x l - Q_1 r l}{U_1} \right)^2} \quad (9)$$

式中: P_1 为流过母线 1 的有功功率, 单位 kW; Q_1 为无功功率, 单位 kvar;

这时计算前后母线 2 的电压幅值误差函数为

$$\Delta U_2 = U_2 - U_2' \quad (10)$$

如果 $|\Delta U_2|$ 大于给定误差极限 ε , 当 ΔU_2 大于零时, 则在 l 上增加 Δl ; 当 ΔU_2 小于零时, 则在 l 上减小 Δl , 代入式(9)、式(10)中进行迭代计算。在迭代过程中, 若 ΔU_2 的值来回振荡时, 可以按比例将 Δl 缩小, 再代入迭代。如果 $|\Delta U_2|$ 小于给定误差极限 ε , 则认为迭代结束。估算求解 Z_{eq} 流程图如图 5 所示。

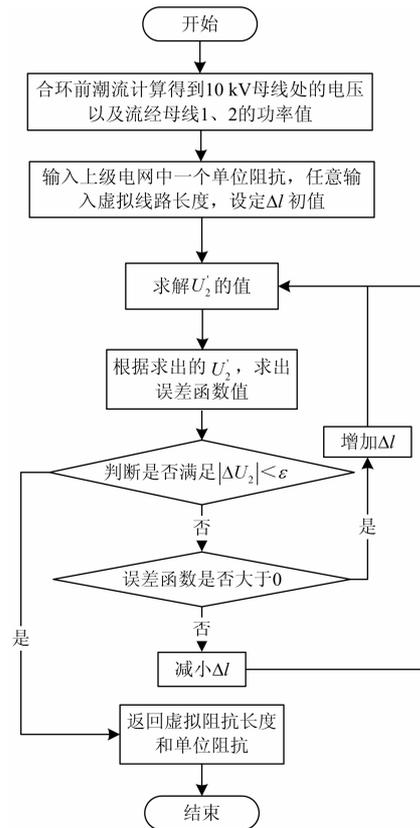


图 5 求解等值阻抗的流程图

Fig. 5 Flow chart for solving the equivalent resistance

3.2 合环循环电流计算

如图 6 所示, 合环前支路 13 侧的电流为 i_1 , 支路 24 侧的电流为 i_2 。合环后支路 13 和支路 24 的电流由两部分叠加而成: 一部分是合环前支路的负

荷电流；另一部分是合环点两侧电压差 $\Delta \dot{U}$ 引起的循环电流。假设 $U_1 > U_2$ ，则循环电流 \dot{I}_c 由节点 1 流向节点 2。

支路 13 侧的电流为

$$\dot{I}_{13} = \dot{I}_1 + \dot{I}_c \quad (11)$$

支路 24 侧的电流为

$$\dot{I}_{24} = \dot{I}_2 - \dot{I}_c \quad (12)$$

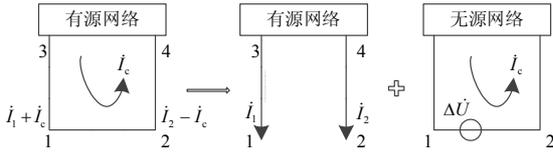


图 6 稳态合环电流的叠加计算

Fig. 6 Superposition calculation of closed loop steady-state current

循环电流为

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_{oc}}{Z_{ab} + Z_{eq}} \quad (13)$$

母线 a 侧环网功率为

$$S_C = \dot{U}_a^{(m)} \cdot \hat{I}_c^{(m)} \quad (14)$$

母线 b 侧环网功率为

$$S_C = \dot{U}_b^{(m)} \cdot \hat{I}_c^{(m)} \quad (15)$$

3.3 合环冲击电流计算

当合环操作时形成的暂态冲击电流太大，可能对网络中的发电机和合闸断路器等设备造成影响甚至破坏。所以进行并列合环操作时必须预先计算合环形成的暂态冲击电流。简化环网得到图 7 中合环暂态冲击电流的单相等值简化模型。

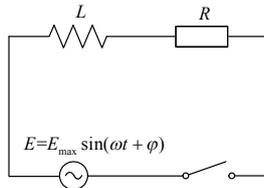


图 7 合环暂态冲击电流的单相等值简化模型

Fig. 7 Simplified model of closed loop impulse current in single phase

系统经过简化，环网阻抗简化为 R 、 L 。串联支路等效激励 E 为 A 相电压。

$$|E| = U_{oc} \quad (16)$$

$$E_{max} = \sqrt{2}|E| \quad (17)$$

式中， E_{max} 为等效电源的最大值。

冲击电流的周期分量(循环电流)为

$$i_p = \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t + \varphi - \alpha) \quad (18)$$

冲击电流的自由分量为

$$i_{ap} = \left[-\frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\varphi - \alpha) \right] e^{-t/T_a} \quad (19)$$

冲击电流的完全表达式为

$$i(t) = i_{ap} + i_p = \left[-\frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\varphi - \alpha) \right] e^{-t/T_a} + \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t + \varphi - \alpha) \quad (20)$$

式中： $\alpha = \tan^{-1}(\omega L / R)$ 为整个环网回路的阻抗角，取值范围为 $0 \sim \pi/2$ ； φ 为合环时刻 $t=0$ 时 \dot{E} 的初始相角。

取算例中大宿站出线线路合环为例，其中电阻 R 为 1.82Ω ，电抗 ωL 为 1.50Ω ($\omega=100\pi$)，图 8 即为 $\varphi=0$ 情况下的冲击电流波形图。

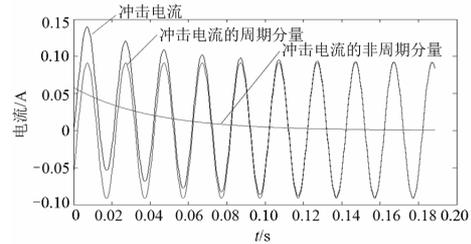


图 8 冲击电流仿真波形图

Fig. 8 Simulation waveform of closed loop impulse current

当合环回路近似等于纯电感回路，即 $\tan^{-1}(\omega L / R) = \pi/2$ ，且 $\varphi=0$ 时，暂态电流最大，合环冲击电流的最大值为

$$i_m = (1 + e^{-0.01/T_a}) \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} = k_m I_{pm} \quad (21)$$

式中， $k_m = 1 + e^{-0.01/T_a}$ 为冲击系数，一般取 $k_m = 1.8$ 。

假定非周期分量在 t 时间为中心的一个周期内恒定不变，因此其有效值等于其瞬时值， $i_{ap} = I_{ap}$ 。周期分量认为其周期内幅值是恒定的，它的有效值为 $I_p = I_{pm} / \sqrt{2}$ ，也为合环操作中循环电流的有效值 ($I_p = I_c$)。则最大冲击电流的有效值为

$$I_M = \sqrt{(I_{ap})^2 + I_p^2} = \sqrt{I_p^2 + [(k_m - 1)\sqrt{2}I_p]^2} = 1.51I_p \quad (22)$$

3.4 合环电流的校验

在完成合环前后的潮流计算，以及冲击电流、稳态电流计算后，按照以下原则判断本次合环操作的合理性：

(1) 合环冲击电流未超过线路的速断保护的启

动电流;

(2) 合环稳定电流未超过线路的热稳定限值、过电流的启动电流;

(3) 环路上未发生任何设备越限或重载的情况。

合环后同时满足以上所有条件的, 则建议可以进行合环操作。否则不建议进行合环操作。

合环电流计算部分的流程如图 9 所示。

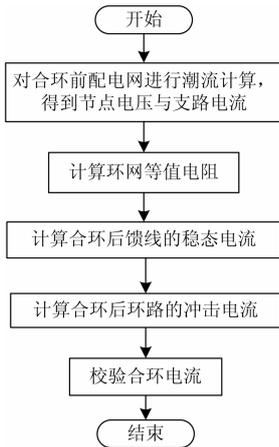


图 9 合环电流计算的流程图

Fig. 9 Flow chart of closed loop current calculation

4 算例

选取 110 kV 大塑站作为研究对象, 其 10 kV 合环接线如图 10 所示, 因为是较低电压等级 10 kV 配电出线的合环, 且 220 kV 母线实际电压相近, 在计算中把 220 kV 母线等值为一个节点, 作为无穷大系统。合环点为大塑站 10 kV 出线 213 清源一(清源 101 母线)与 10 kV 出线 385 清源二(清源 102 母线)的联络开关。进行简单的网络简化。

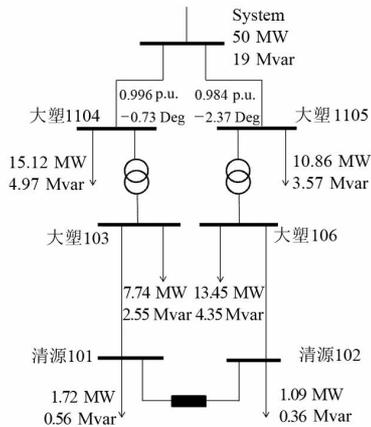


图 10 简化的大塑合环计算模型

Fig. 10 Simlified model of closing loop operation for Dasu station

4.1 数据完备情况下的合环计算

当主网的遥信数据和遥测数据都可以得到, 线路阻抗如表 1 所示, 母线数据如表 2 所示, 负荷数据如表 3 所示。可以按 2.1 节所述方法进行计算, 得到计算结果如表 4。

表 1 大塑站合环系统线路阻抗表

Table 1 Impedance data of Dasu substation closing loop operation

母线 1	母线 2	是否 变压器	电阻 标么值 R	电抗 标么值 X
清源 101	清源 102	否	0	0
大塑 1105	大塑 106	是	0.195	3.460 3
大塑 1104	大塑 103	是	0.149	3.238 1
大塑 106	清源 102	否	0.090 7	0
大塑 103	清源 101	否	0.090 7	0
System	大塑 1105	否	0	1.614 3
System	大塑 1104	否	0	0.519 0

表 2 大塑合环系统母线数据

Table 2 Bus data of Dasu substation closing loop operation

名称	电压标么值	电压幅值/kV	角度/Deg
System	1	115	0
大塑 1104	0.996	114.486	-0.73
大塑 1105	0.984	113.179	-2.37

表 3 大塑合环系统负荷数据

Table 3 Load data of substation closing loop operation

	合环馈 线有功 负荷/ MVA	合环馈 线无功 负荷/ MVA	变压器	变压器	变压器	变压器
			低压侧 有功 负荷/ MVA	低压侧 无功 负荷/ MVA	高压侧 有功负 荷/MVA	高压侧 无功负 荷/MVA
清源 101	1.72	0.56	7.74	2.55	15.12	4.97
清源 102	1.09	0.36	13.24	4.35	19.86	3.57

表 4 大塑合环系统计算结果

Table 4 Calculation results of Dasu substation closing loop operation

计算结果	清源 101 出线	清源 102 出线
合环前电压/kV	10.805∠-2.34°	10.585∠-5.06°
合环点两侧电压差 Δu /kV	0.5525∠62.94°	
合环点电压差引起的环流 I _c /kA	0.3270∠-23.66°	
合环后稳态电流 I _s /kA	0.4022∠-14.04°	-0.2880∠-32.81°
合环瞬时的最大冲击电流 I _m /kA	0.497 1	

合环点处联络开关的速断保护整定值为 2 400 A, 馈线的过电流保护整定值为 900 A, 均未越限。

4.2 遥测数据缺失情况下的合环计算

主网的遥测数据无法得到, 只可以得到遥信数

据时,数据情况如表 5,此时可以按 2.2 节所述方法进行计算。得到两条母线之间的相角差修正值为 2.8° , 再进行潮流计算和合环电流计算。计算结果如表 6。

表 5 无遥测信息时大塑站配电网合环数据情况

Table 5 Data of Dasu substation closing loop operation without transmission network's telemetry information

名称	电压幅值量测/kV	母线负荷/MVA	上级阻抗/ Ω
大塑 103	10.81	9.46+j3.11	0.149+j3.7571
大塑 106	10.58	13.24+j4.71	0.195+j5.0703

表 6 无遥测信息时大塑站配电网合环计算结果

Table 6 Calculation results of Dasu substation closing loop operation without transmission network's telemetry information

计算结果	清源 101 出线	清源 102 出线
合环前电压/kV	10.81 \angle 2.25°	10.58 \angle 0.01°
合环点两侧电压差 Δu /kV	0.4771 \angle 62.31°	
合环点电压差引起的环流 i_c /kA	0.2824 \angle -24.29°	
合环后稳态电流 i_s /kA	0.3617 \angle -14.39°	-0.2400 \angle -34.46°
合环瞬时的最大冲击电流 i_m /kA	0.426 4 (与实际误差相差 13.6%)	

合环点处联络开关的速断保护整定值为 2 400 A, 馈线的过电流保护整定值为 900 A, 均未越限。

4.3 主网数据无法得到时的合环计算

主网的遥测数据和遥信数据均无法得到时, 只有根据配电网的数据进行估算, 误差会较大。如表 7 所示。

表 7 无主网数据时大塑站配电网合环数据

Table 7 Data of Dasu substation closing loop operation without transmission network's remote and telemetry information

名称	电压幅值量测/kV	母线负荷/MVA
大塑 103	10.81	9.46+j3.11
大塑 106	10.58	13.24+j4.71

给出相角差的经验值为 $2^\circ \sim 3^\circ$, 根据 3.1 节所述方法求得主网的等值阻抗值为 $Z_{eq} = 0.82 \Omega$ 。合环瞬时的最大冲击电流为: $i_m = 0.399 - j0.515$ (kA)。

5 结论

本文针对主网和配网拼接时数据情况的不同, 提出了潮流计算和合环电流计算的不同方案, 提高了合环软件应用的适应性。文中采用简化的等值网络来代替实际环网网络, 可在主网数据缺失时应用迭代法求取主网的等值阻抗, 该方法具有计算简单、实用、精度高的特点。采用了叠加循环电流的方法计算合环稳态电流, 并对合环冲击电流的模型进行

了研究和分析, 并给出了冲击电流的仿真波形。

对于合环的分析和计算, 本文给出了较为完整全面的解决方案和模型。对调度员能否进行合环操作起到了指导作用, 提高了合环操作的可靠性、安全性, 具有一定的理论和工程实用价值。

参考文献

- [1] 杨期余. 配电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 1-54.
YANG Qiyu. Distribution power system[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] 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): 58-60.
XIA Xiang, XIONG Jun, HU Liexiang. Analysis and control of loop power flow in regional power network[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 58-60.
- [3] 叶清华, 唐国庆, 王磊. 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 Qinghua, TANG Guoqing, WANG Lei. Development and application of the analysis system for closed loop operation of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 66-69.
- [4] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 发配输全局潮流计算[J]. 电网技术, 1998, 22(12): 39-46.
SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande. Global power flow calculation[J]. Power System Technology, 1998, 22(12): 39-46.
- [5] 曹亮, 孔峰, 陈昆薇. 一种配电网的实用潮流算法[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 58-60.
CAO Liang, KONG Feng, CHEN Kunwei. A practical algorithm of load flow calculation for distribution networks[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 58-60.
- [6] 王秀云, 杨劲松, 熊谦敏. 一种配电网合环实用潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 23-26.
WANG Xiuyun, YANG Jinsong, XIONG Qianmin. A practical algorithm of load flow calculation for loop distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 23-26.
- [7] 龙妮莉. 配电网合环操作的研究及决策软件的开发[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
LONG Weili. The research on loop closing operation in distribution network and the development of decision software[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.

- [8] 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 Shaoyun, LI Xiaoming. Study on surge current due to closing loop in distribution network based on Thevenin's Equivalent[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2007, 19(6): 124-127.
- [9] 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 Junxiong, ZHOU Guanbo, 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.
- [10] 汲亚飞, 赵江河. 辐射型配电网合环稳态电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 15-19.
JI Yafei, ZHAO Jianghe. Calculation of the loop closing steady-state current in radial power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 15-19.
- [11] 余娟, 颜伟, 李文沅. 配电网合环网络模型及其馈线电流的计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(25): 76-81.
YU Juan, YAN Wei, LI Wenyuan. The model of the closed loop distribution network and the current calculation of its feeders[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(25): 76-81.
- [12] 钱兵, 程浩忠, 杨镜非, 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.
QIAN Bing, CHENG Haozhong, YANG Jingfei, et al. Research on object-oriented and visual assistant decision-making software for power system linkage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(2): 8-11.
- [13] LI Fangxing, BROADWATER R P. Software framework concepts for power distribution system analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 948-956.
- [14] 汪宇霆, 张焰, 张益波. 基于改进回路电流法的配电网潮流通用算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 57-61.
WANG Yuting, ZHANG Yan, ZHANG Yibo. A general load flow method for distribution systems based on improved loop-current method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 57-61.
- [15] 张学松, 于尔铿. 配电网潮流算法比较研究[J]. 电网技术, 1998, 22(4): 45-49.
ZHANG Xuesong, YU Erkeng. Comparison study of distribution network power flow algorithms[J]. Power System Technology, 1998, 22(4): 45-49.
- [16] TENG J H. A direct approach for distribution system load flow solution[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 882-887.
- [17] 苑捷. 北京城区配电网合环分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
YUAN Jie. The research on loop closing operation in distribution network of Beijing urban area[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [18] 白宏坤, 李干生. 郑州 220 kV 电磁环网解环规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 127-132.
BAI Hongkun, LI Gansheng. Study on open-loop planning of 220 kV electromagnetic ring in Zhengzhou[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 127-132.

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-03-27

作者简介:

苗培青(1959-), 男, 研究生, 高级工程师, 主要从事电网规划设计咨询等方向的研究工作; E-mail: taianmpq@sina.com

于耿曦(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制, 电力系统规划与可靠性等;

纪双全(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制, 电力系统规划与可靠性等。