

# 辐射型配电网合环稳态电流计算方法研究

汲亚飞, 赵江河

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 对辐射型配电网合环操作引起合环稳态电流进行计算和分析对配电网的安全运行有重要意义。研究了辐射型配电网合环稳态电流的计算方法。采用基于关联矩阵的电压电流迭代方法对合环前的支路潮流分布情况进行计算, 进而结合叠加原理求得合环后各支路的电流分布情况。针对澳门电网 (CEM) 11 kV 辐射型配电网的典型实例, 对其合环前后的电流分布进行计算, 并将计算结果与实测结果进行比较, 验证了本文方法的准确性和实用性。最后分析了母线节点的电压相角差和幅值差变化对合环后电流分布的影响。

**关键词:** 辐射型配电网; 叠加原理; 合环稳态电流; 潮流; 相角差

## Calculation of the loop closing steady-state current in radial power distribution network

Ji Ya-fei, ZHAO Jiang-he

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Calculating and analyzing to the steady-state current caused by loop closing operations in radial power distribution networks are extraordinary important to the safe operations. This paper studies the calculation method of loop closing steady-state current in radial distribution networks. The voltage and current iterative method based on associated matrix is introduced to calculate the power flow distributed in each branch before the loop closing operation, and then the superposition principle is involved to obtain the current distribution after the loop closing operation. To the typical example in Macau-CEM 11kV power distribution networks, of which the current distribution before and after loop closing operation is calculated, the accuracy and practicability of the method proposed are certified by the comparisons between calculation results and measurement results. Finally, this paper analyzes the influence to the current value after operations led by the variations of bus node voltage phase angle difference and amplitude difference.

**Key words:** radial power distribution network; superposition principle; loop closing steady-state current; power flow; phase angle difference

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)12-0015-05

## 0 引言

中压配电网的馈线通常呈辐射状分布, 一般采用环网设计、开环运行的供电方式。当进行网内故障处理、负荷转移和设备检修时, 可以通过合环操作以减少停电时间, 但由此引起的合环电流, 将对配电网的安全运行产生很大的影响。在合环操作前, 对合环操作产生的稳态电流进行计算和分析, 可以为配电网的运行可靠性评估提供理论依据, 并能帮助调度相关人员进行正确的决策, 以避免操作引起设备过载和保护跳闸, 提高供电的安全性和可靠性。

合环后, 配电网的两处馈线通过合环开关闭合而组成环形网络。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, 采用叠加法进行计算<sup>[1-3]</sup>。因此, 合环电流计算的核心是配网的潮流计算, 与输电网不同, 辐射型配电网的线路阻抗比

( $R/X$ )较大, 导致网络的雅克比矩阵的条件数较大, 采用传统的牛顿-拉夫逊法 (N-R)、PQ 分解法等方法计算时, 程序收敛性不够理想。许多学者根据辐射型配网的以上特点提出了一些新方法或改进方法<sup>[4-7]</sup>, 收到了良好的效果。

本文采用基于关联矩阵的电压电流迭代方法对合环前的支路潮流分布情况进行计算, 进而采用叠加原理计算合环后的稳态电流分布, 使计算具有良好的收敛性, 便于开发出实用的合环计算分析程序。通过对澳门 11 kV 配电网合环操作典型实例的计算分析, 并将计算结果与现场实测数据进行比较, 证明了本文计算方法的准确性和实用性。

## 1 计算方法简介

### 1.1 辐射型配电网馈线支路的潮流计算

辐射型配电网各母线上的馈线呈辐射型分布,

每条从母线出线的馈线支路由若干段线路和若干负荷节点组成，每个负荷节点的出线通过配电变压器降压后向用户供电，如图 1 所示。

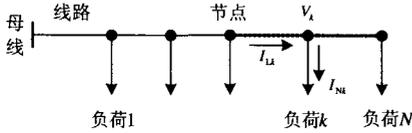


图 1 辐射型电网的馈线结构

Fig. 1 Feeder branch of radial power distribution network

若除去母线节点，则每条馈线支路可看作由  $N$  个节点和  $N$  段线路组成，设各条负荷出线流出电流的列向量为  $\dot{I}_N$ ，其各元素可以由负荷的功率和节点电压求得：

$$\dot{I}_{Nk} = \frac{\dot{S}_k^*}{\dot{V}_k^*} \quad (1)$$

设  $N$  段线路上电流的列向量为  $\dot{I}_L$ ，对各节点列写 KCL 方程可得  $\dot{I}_L$  和  $\dot{I}_N$  的关系满足：

$$\dot{I}_N = \mathbf{A}\dot{I}_L \quad (2)$$

其中： $\mathbf{A}$  为节点一支路关联矩阵，由于馈线支路中节点数和线路数相等，则  $\mathbf{A}$  为方阵，其结构为：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ \vdots & & \ddots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

设馈线母线节点电压为  $\dot{V}_b$ ，各节点电压的列向量为  $\dot{V}$ ， $N$  段线路中各条线路两端电压差列向量为  $\Delta\dot{V}$ ，则  $\Delta\dot{V}$  与各节点电压的关系为：

$$\Delta\dot{V} = \begin{bmatrix} \dot{V}_b \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{A}^T\dot{V} \quad (4)$$

$\Delta\dot{V}$  与  $N$  段线路电流的关系为：

$$\Delta\dot{V} = \mathbf{Z}_L\dot{I}_L \quad (5)$$

其中： $\mathbf{Z}_L$  为各线路阻抗矩阵：

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{L1} & 0 \\ & \ddots \\ 0 & \mathbf{Z}_{LN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

结合式 (4) 和式 (5)，可得：

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_b \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{A}^T\dot{V} = \mathbf{Z}_L\dot{I}_L \quad (7)$$

利用式 (7) 可求得各节点的电压列向量  $\dot{V}$ 。

式 (1)、(2)、(7) 构成潮流的迭代计算过程。两次迭代计算的节点电压的差值作为迭代计算的收敛条件。迭代计算的流程如图 2 所示。

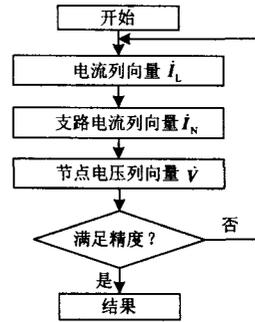


图 2 树状支路潮流计算流程图

Fig. 2 Flow chart of power flow calculation for tree-like branch

各节点电压分布求出后，进而可以求出中压配电网的馈线上的潮流分布情况。

### 1.2 合环电流的计算

两条待合环的馈线如图 3 所示。正常情况下，合环开关断开，两条馈线独立运行。进行检修或切负荷等工作时，将合环开关闭合。由于开关两侧存在电压差，因此，当合环开关闭合时，环路中将产生合环电流。

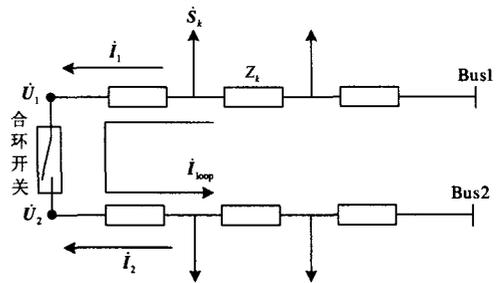


图 3 合环操作示意图

Fig. 3 Diagram of loop closing operation

根据叠加定理，闭合合环开关后，流经各条支路的电流由两部分叠加而成：一部分是合环前的电流，另一部分是合环后由开关两侧的电压差产生的环流。对于合环前的电流分布，可以使用上文介绍的配电网树状分支的潮流计算方法进行计算。对于环流部分，则需要采用戴维南定理<sup>[8]</sup>对网络进行等效。

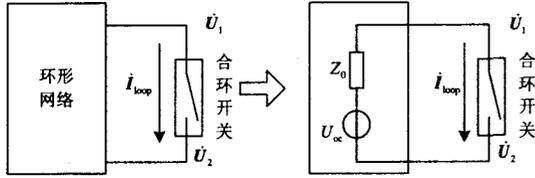


图4 环形网络的戴维南等效

Fig. 4 Diagram of Thevenin equivalence to loop circuit

如图4所示。戴维南电路的等效电源 $U_{oc}$ 等于合环开关两侧的开路电压差, 即:

$$\dot{U}_{oc} = \Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 \quad (8)$$

假设母线出线的两个节点之间的电压差合环前后保持不变, 则等效电源近似为恒定电压源。戴维南等效电路的等效阻抗 $Z_0$ 的计算方法为: 从合环开关两侧看进去, 将负荷置零, 电压源置成短路状态时的环路阻抗。因此, 等效阻抗 $Z_0$ 应等于环路中的各条线路的阻抗之和。设环路中 $N$ 条线路, 则:

$$Z_0 = \sum_{i=1}^N Z_i \quad (9)$$

可根据戴维南等效电路计算环流:

$$\dot{i}_{loop} = \frac{\dot{U}_{oc}}{Z_0 + Z_s} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{Z_0 + Z_s} \quad (10)$$

则:

$$\dot{i}'_{1k} = \dot{i}_{1k} + \dot{i}_{loop} \quad (11)$$

$$\dot{i}'_{2k} = \dot{i}_{2k} - \dot{i}_{loop} \quad (12)$$

其中:  $Z_s$ 为开关支路的阻抗,  $\dot{i}'_{1k}$ ,  $\dot{i}'_{2k}$ 分别为第一条馈线上第 $k$ 条线路上合环前后的电流,  $\dot{i}_{2k}$ ,  $\dot{i}'_{2k}$ 为第二条馈线上的第 $k$ 条线路上合环前后的电流。从而求得合环后环路各段线路的电流分布情况。

配电网合环电流计算流程如图5所示。

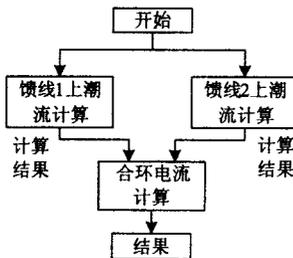


图5 合环电流计算流程图

Fig. 5 Flow chart of loop closing current

## 2 实例计算与分析

以澳门电网 (CEM) 11 kV 配电网的典型实例

为算例进行计算分析。图6所示为CEM 11 kV 配电网的某条环路, 该环路中由8个开关柜(称为“PT”)组成。每个开关柜有1到多个11 kV 出线至11 kV/0.4 kV 变压器向用户供电, 开关柜左右各有一个开关。正常运行情况下, 环路上只有一个开关断开, 其他开关闭合, 从而构成2条馈线独立运行, 断开的开关作为合环开关。当需要进行合环操作时, 将合环开关闭合, 在这个过程中, 线路中将产生合环电流。

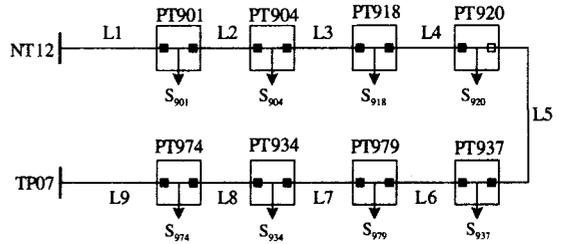


图6 澳门CEM 11 kV 配电网的典型环路

Fig. 6 Typical loop circuit of CEM 11 kV distribution in Macau

图6中环路的各参数如表1~表3所示。表1给出了环路中各开关柜的出线负荷情况。表2给出了环路中各线路的长度。表3给出了环流的母线节点电压, 本例中, 两个节点位于同一母线上, 因此, 两节点的电压参数相同。CEM 11 kV 配电网线路均由300 mm<sup>2</sup>单芯电缆构成, 线路的阻抗为0.13 + j 0.097 Ω/km, 对地电容为0.172 μF/km。

表1 典型环路的负荷参数

PT 编号	901	904	918	920	937	979	934	974
负荷 kVA	16.0	36.0	12.0	28.0	163	23.0	41.0	3.0

表2 典型环路的线路长度

线路编号	L1	L2	L3	L4	L5
长度/km	0.11	0.69	0.31	1.11	0.45
线路编号	L6	L7	L8	L9	
长度/km	1.05	0.40	0.77	0.99	

表3 典型环路的母线节点电压

母线节点编号	NT12	TP07
电压有效值/kV	10.9	10.9
电压相角/deg	-2.3	-2.3

采用上文介绍的方法对图 6 的典型实例进行计算, 计算结果如表 4 所示。由于环路上的电流最大值只可能出现在支路 L1 或 L9 上, 因此, 判断系统是否过载只需判断 L1 和 L9 支路电流是否超过允许值即可。L1 和 L9 上合环前后电流的计算结果和实测值如表 5 所示, 由表看出, 合环前后两条支路上电流的计算值与实测值的误差约在 10% 左右, 在系统实际运行中, 这个误差水平是可以接受的。

表 4 合环前后电流计算结果

Tab.4 Current calculation results before and after loop closing operation

线路	合环前电流/A	合环后电流/A
L1	4.47	7.96
L2	3.94	7.43
L3	2.04	5.53
L4	1.41	4.90
L5	0.00	3.49
L6	8.22	4.73
L7	9.43	5.94
L8	11.60	8.11
L9	11.75	8.27

表 5 L1 和 L9 支路电流计算值与实测值的比较

Tab.5 Comparisons between calculation and measurement of the branch in L1 and L9

线路	合环前			合环后		
	计算值 /A	实测值 /A	误差 / (%)	计算值 /A	实测值 /A	误差 / (%)
L1	4.47	4.80	6.9	7.96	7.10	12.3
L9	11.75	10.90	7.8	8.27	7.70	8.1

在图 6 的典型实例中, 环路的两端节点位于同一母线上, 因此两者不存在电压差, 合环前后电流相差并不大。

当环路的两端节点位于不同的母线时, 由于系统对两侧馈线母线的等值阻抗不同, 将引起环流。另外, 当两侧馈线母线所带负荷不同, 也将产生环流。但是, 这两种情况下所产生的环流, 归根到底是由于两侧馈线母线的电压差所引起的。

为分析这种情况, 设节点 NT12 的电压幅值为额定电压 11 kV, 相角为零。第一种情况, 令节点 TP07 的电压幅值为 11 kV, 改变节点 TP07 的电压相角, 令其在 0 到 10° 范围内变化, 线路 L1 和 L9 的合环后电流幅值变化趋势如图 7 所示。第二种情况, 令节点 TP07 的电压相角与 NT12 相同, 均为零, 改变节点 TP07 的电压幅值, 由于通常配电网允许电

压偏移为  $\pm 7\%$ <sup>[7]</sup>, 因此, 令电压幅值取值范围为 11 ~ 11.8 kV, 则线路 L1 和 L9 的合环后电流幅值变化趋势如图 8 所示。

由图 7 和图 8 可以看出, L1 和 L9 线路电流幅值随电压相角差和幅值差的增大而增大, 对于本文的典型实例来说, 线路电流幅值随母线节点电压相角差和幅值差的变化而近似呈线性变化。

在辐射型配电网实际运行过程中, 通常两同电压等级的母线之间电压幅值差并不大, 因此, 电压有幅值对电流幅值的计算结果影响不大, 相比之下, 电压相角的变化对电流幅值计算结果有较大的影响。因此, 在进行合环操作时, 不可忽略电压相角差对合环电流大小的影响而错误地认为: 若母线两节点电压幅值相差很小, 就不会产生较大的合环电流。

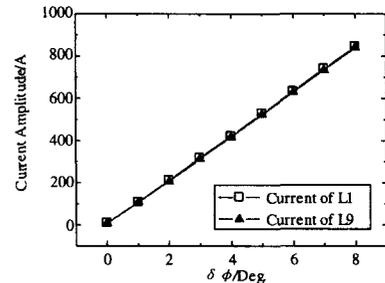


图 7 母线节点 TP07 电压相角变化与线路电流的关系

Fig. 7 Relationship between bus node voltage TP07 phase angle change and line current

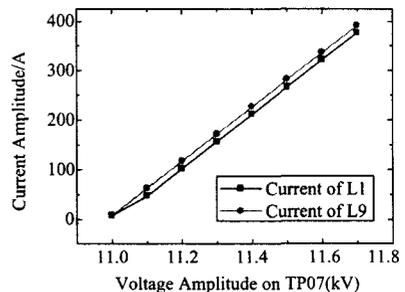


图 8 母线节点电压 TP07 幅值变化与线路电流的关系

Fig.8 Relationship between bus node voltage TP07 voltage amplitude change and line current

### 3 结束语

本文采用基于关联矩阵的电压电流迭代方法和叠加原理对辐射型配电网合环前后的馈线支路电流分布情况进行计算, 计算方法收敛性较好。对澳门 11 kV 配电网合环操作典型实例进行了计算, 并将计算结果与实测数据进行了比较, 计算值与实测值的误差在 10% 左右, 满足一般实际工程精度要求。

在母线节点电压相角差和幅值差变化两种情况下, 分别对合环后电流幅值的变化情况进行了分析。母线节点电压相角差的变化对电流有幅值计算结果影响相对较大。在辐射型配电网实际运行中, 进行合环操作时, 不可忽视电压相角差对合环电流大小的影响。本文对合环稳态电流进行了计算和研究, 合环电流还包括合环冲击电流分量, 需要另行研究。

### 参考文献

- [1] 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 Lie-xiang. Analysis and Control of Loop Power Flow in Regional Power Network[J]. Power System Technology,2004,28(22):58-60.
- [2] 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 Qing-hua, TANG Guo-qing, 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.
- [3] 强兴华. 地区电网合环操作的潮流近似计算[J]. 江苏电机工程, 2002, 21(5):39-40.  
QIANG Xing-hua. Approximate Flow Calculation During Closed Loop Operation in Local Electric Network[J]. Jiangsu Electric Engineering,2002,21(5):39-40.
- [4] 张尧, 王琴, 宋文南,等. 树状网的潮流算法[J].中国电机工程学报, 1998, 18(3):217-220.  
ZHANG Rao, WANG Qin, SONG Wen-nan ,et al.A Load Flow Algorithm for Radial Distribution Power Networks[J]. Proceedings of the CSEE,1998,18(3):217-

220.

- [5] 孙宏斌,张伯明,相年德.配电网潮流前推回推法的收敛性研究[J].中国电机工程学报,1999,19(7):26-29.  
SUN Hong-bin , ZHANG Bo-ming , XIANG Nian-de.Study on Convergence of Back/forward Sweep Distribution Power Flow[J].Proceedings of the CSEE, 1999,19(7):26-29.
- [6] 索南加乐, 李怀强, 单亚洲, 等. 辐射配网潮流技术在环网中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(12):1272-1275.  
SUONAN Jia-le, LI Huai-qiang, SHAN Ya-zhou, et al.Reliable Power Flow Technique for Meshed Distribution Networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(12): 1272-1275.
- [7] 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 Convergence of Branch Current Method Based Power Flow Calculation for Radial Distribution Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6):41-44.
- [8] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社, 1999.
- [9] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.

收稿日期: 2008-05-15; 修回日期: 2008-08-26

### 作者简介:

汲亚飞(1983-), 男, 助理工程师, 研究方向为配电网自动化, 电力系统接地防雷技术和电磁暂态技术; E-mail: jiyafei@gmail.com

赵江河(1957-), 男, 高级工程师, 研究方向为配电网自动化。

(上接第 14 页 continued from page 14)

YANG Ping, MA Rui-qing, ZHANG Yun-an. A Novel Method for Modeling and Simulation of PMSM System Based on Matlab[J]. Micromotors, 2005, 38(5): 38-41.

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2009-02-24

### 作者简介:

刘婷婷(1981-), 女, 博士研究生, 从事车辆智能检测与控制技术研究; E-mail: liutingting817@163.com

谭 彧(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 从事车辆电子控制及智能化技术研究;

吴 刚(1977-), 男, 讲师, 从事机电一体化技术研究。