

新型实用合环潮流算法在配电网中的应用

戴晖, 孙波

(淮安供电公司, 江苏淮安 211700)

摘要:针对配电网系统中合环潮流计算难度大难题,提出了一种新型实用的两阶段法计算配电网合环潮流,即第一阶段运用叠加原理,将合环后环状配电网转化为纯辐射状配电网,用前推回代法对纯辐射状配电网潮流计算,从而得到合环开关两侧电压差;第二阶段不断修正合环开关两侧负荷功率,以支路功率为变量,重新运用前推回代法求解纯辐射状网络潮流,直至达到整体收敛,并利用迭代法推算出上级电网等值阻抗。实际算例仿真结果表明,该方法具有良好的收敛性和准确性。

关键词:两阶段法;叠加原理;前推回代法;合环潮流

中图分类号:TM712

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2015)01-0047-03

目前国内 10 kV 和 20 kV 配电网系统多采用闭环设计、开环运行的供电方式^[1]。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,造成停电。因此合环潮流计算需要很高的准确性,以达到提高供电可靠性和配网安全运行的目的。传统的配电网潮流算法主要为:回路阻抗法^[2]、前推回代法^[3]和改进牛顿法^[4]。对于配电网环网的潮流计算,文献^[5]提出分布系数法的潮流计算方法,该方法由于是手工计算,只适合简单网络的合环潮流;文献^[6]提出了计算环状配电网的三相潮流“两阶段”法。该方法以支路电流为变量,计算存在一定的误差。文中提出了以支路功率为变量的基于叠加原理和前推回代法的两阶段算法计算配电网合环潮流。

1 基于支路功率为变量的前推回代法

文献^[7]对如图 1 所示的辐射状配电系统,配电网潮流前推回代算法的第 m 步迭代过程如下。

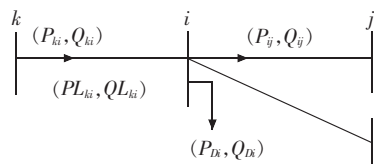


图 1 辐射状配电系统

节点 i 的前推计算公式为:

$$P_{ki}^{(m+1)} = P_{Di}^{(m)} + \sum_{j \in C_i} P_{ij}^{(m+1)} + [PL_{ki}^{(m+1)}] \quad (1)$$

$$Q_{ki}^{(m+1)} = Q_{Di}^{(m)} + \sum_{j \in C_i} Q_{ij}^{(m+1)} + [QL_{ki}^{(m+1)}] \quad (2)$$

$$[PL_{ki}^{(m+1)}] = r_{ki} \frac{[\sum_{j \in C_i} P_{ij}^{(m+1)} + P_{Di}^{(m)}]^2 + [\sum_{j \in C_i} Q_{ij}^{(m+1)} + Q_{Di}^{(m)}]^2}{[V_i^{(m)}]^2} \quad (3)$$

$$[QL_{ki}^{(m+1)}] = x_{ki} \frac{[\sum_{j \in C_i} P_{ij}^{(m+1)} + P_{Di}^{(m)}]^2 + [\sum_{j \in C_i} Q_{ij}^{(m+1)} + Q_{Di}^{(m)}]^2}{[V_i^{(m)}]^2} \quad (4)$$

式中: (r_{ki}, x_{ki}) 为支路 ki 的阻抗; P_{Di} 为节点 i 的负荷功率; C_i 为与节点 i 相连的子节点集合; $[(PL_{ki}^{(m+1)}), (QL_{ki}^{(m+1)})]$ 为馈线支路 ki 上的功率损耗。

回代节点 i 电压时, 节点 k 作为节点 i 的父节点, 其电压已经在本次迭代中算出, 节点 i 的回代公式为:

$$\dot{V}_i^{(m+1)} = \dot{V}_k^{(m+1)} - \dot{I}_{ki}^{(m+1)} (r_{ki} + jx_{ki}) \quad (5)$$

$$\dot{I}_{ki}^{(m+1)} = \frac{P_{ki}^{(m+1)} - jQ_{ki}^{(m+1)}}{\hat{V}_k^{(m+1)}} \quad (6)$$

式中: \hat{V}_k 为节点 k 复电压的共轭。

迭代终止判据为: 判断相邻 2 次迭代电压差的模分量的最大值 $\max_i |\Delta \dot{V}_i|$ 是否小于给定的收敛指标 ε , 即:

$$\max_i |\Delta \dot{V}_i| \leq \varepsilon \quad (7)$$

2 新型合环潮流计算

2.1 利用叠加原理分解合环配电网

由于前推回代法只适用于辐射型网络, 因此对于合环后的环网, 利用叠加原理对前推回代法进行改进, 在合环点处将环网打开, 对合环开关两侧负荷功率进行修正, 如图 2 所示。

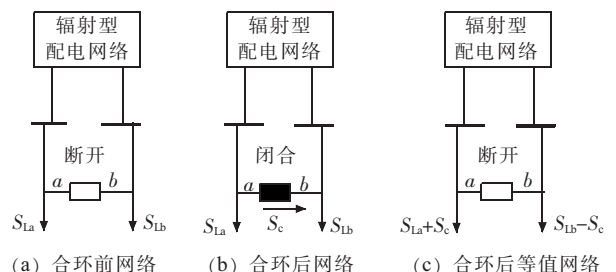


图 2 配电网合环模型

图 2(a)中 a 、 b 为待闭合合环开关的两侧节点,合环前所带负荷分别为 S_{La} 、 S_{Lb} ;图 2(b)为合环后示意图,合环开关闭合后由 a 、 b 两侧节点电压差所产生的环网功率 S_c ,相应的电流为 I_c 。若合环前 $U_a > U_b$,为模拟合环时的状态在节点 a 添加一个电流源,方向为流出,在节点 b 添加一电流源,方向为流入,大小均为 I_c 。图 2(c)为合环后等值网络,将环网功率 S_c 分别转移到负荷点 a 、 b 上,即 a 节点负荷为 $S_{La} + S_c$, b 节点负荷为 $S_{Lb} - S_c$ 。若合环前 $U_a < U_b$,则电流源的符号相反。

应用戴维南定律将图 2(b)中原辐射型网络等效为一个理想电压源 \dot{U}_{OC} 和一个串联内阻 Z_{ab} ,如图 3 所示。其中电压源 \dot{U}_{OC} 的值为合环前 a 和 b 节点的电压差 $\dot{U}_a - \dot{U}_b$ 。 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 可在合环前通过前推回代法进行潮流计算得到。 Z_{ab} 为戴维南等效阻抗。当网络中所有电源电势都为零时,所加的单位电流只流经环路上支路。所以 Z_{ab} 即为从母线 I 到母线 II 合环线路中所有支路阻抗和。合环后稳态环流 I_c 为:

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_{OC}}{Z_{ab} + Z_{eq}} \quad (8)$$

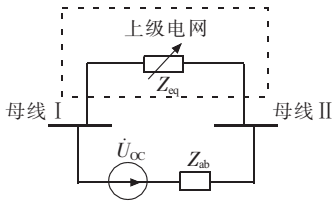


图 3 合环稳态环流计算等值电路

配电网合环涉及上级电网,所以需对上级电网进行等值, Z_{eq} 为上级电网等值阻抗,这样可以求得环网功率 S_c ,难点是 Z_{ab} 的求取。

2.2 迭代法求上级电网等值阻抗

针对从不同变电所引出 2 条出线的环网,配电网合环网络与上级电网之间存在边界节点的特点,文中利用迭代法求取上级电网等值阻抗 Z_{eq} 。根据母线 I、II 参数,选取电压值高的一侧为平衡母线,可计算出母线 II 处的电压幅值为:

$$U_2' = \left[\left(U_1 - \frac{P_1 r l + Q_1 x l}{U_1} \right)^2 + \left(\frac{P_1 r l - Q_1 x l}{U_1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

式中: P_1 为流过母线 I 的有功功率; Q_1 为无功功率。 $z = r + jx$ 为根据实际上级电网的特点,设定的虚拟线路单位长度的阻抗; l 为虚拟线路长度。设计误差函数 U_{er} 则为:

$$U_{er} = U_2 - U_2' \quad (10)$$

当 U_{er} 的绝对值小于指定误差极限时,认为迭代已经收敛;当 $U_{er} > 0$ 时,则在下一次迭代对 l 增加步长 Δl ;当 $U_{er} < 0$ 时,则在下一次迭代时对 l 减小步长 Δl 。

当迭代过程中, U_{er} 的值来回震荡时,可以根据变步长系数 p_r 将步长 Δl 缩小,即 $\Delta l = \Delta l p_r$,继续进行迭代,便可求出 l 的值,进而可以求出 Z_{eq} 。

2.3 配电网合环潮流计算步骤

配电网合环潮流计算分两阶段迭代,第一阶段迭代按式(1—7)计算纯辐射型网络潮流和 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 值,第二阶段迭代以环路功率为变量叠加修正,按式(11—14)修正合环开关两侧节点负荷功率,第 $m+1$ 次迭代过程如下:

$$\dot{U}_{OC}^{(m)} = \dot{U}_a^{(m)} - \dot{U}_b^{(m)} \quad (11)$$

$$\dot{I}_c^{(m)} = \dot{U}_{OC}^{(m)} / (Z_{ab} + Z_{eq}) \quad (12)$$

$$S_{La}^{(m+1)} = S_{La}^{(m)} + \dot{U}_a^{(m)} \dot{I}_c^{(m)} \quad (13)$$

$$S_{Lb}^{(m+1)} = S_{Lb}^{(m)} - \dot{U}_b^{(m)} \dot{I}_c^{(m)} \quad (14)$$

$$\max_i \left| U_{OC}^{(m+1)} \right| \leq \varepsilon' \quad (15)$$

初始化 $S_{La}^{(0)}$ 、 $S_{Lb}^{(0)}$ 分别为合环开关两侧节点负荷, $\dot{I}_c^{(m)}$ 为合环稳态电流的共扼值,式(15)为迭代终止判据,即在 $m+1$ 次迭代时,合环开关两侧节点的电压差小于给定的收敛指标 ε' 。计算配电网合环潮流的步骤如下。

阶段一:

(1) 读入网络参数,建立节点链接表。

(2) 按式(9)、(10)通过迭代法求得上级电网的等值阻抗 Z_{eq} 。通过拓扑分析从合环点向上搜索,将合环支路的阻抗与上级电网的等值阻抗 Z_{eq} 相加而得合环环路的总阻抗。

(3) 按式(1—7)通过前推回代计算纯辐射网络潮流。按式(11)计算断开合环点处开口电压。

(4) 按式(12)求得合环稳态环流。

阶段二:

(1) 按式(13)、(14)修正合环开关两侧节点负荷功率。

(2) 检查迭代终止判据式(15),若不满足则转到阶段一中(3)、(4)。

3 算例分析

选取淮安盱眙 10 kV 配网系统的 3 个典型的馈线联络开关合环算例进行了计算。在 PC 机上用 VB6.0 进行了该算法的程序编制。算例中两阶段的收敛判据 ε 、 ε' 都为 10^{-5} 。算例结果(见表 1 和表 2)表明,准确率较高,满足工程要求。

从表 1 可以,看出文中算法计算出的合环馈线电流值与测量值比较接近,但是仍然存在一定的误差,主要有以下几个方面:

表 1 计算结果

算例	母线	10 kV 母线电压 /kV	合环前馈线电流 /A	合环潮流计算值 / (kV·A)	合环后馈线电流 /A		误差 /%
					计算值	测量值	
1	I	10.2	135	759+j180.1	78.3	83	5.66
	II	10.1	0	586+j168.3	60.8	58	4.83
2	I	10.3	0	683+j127.5	72.6	75	3.20
	II	10.1	251	2532+j963.4	275.4	269	2.38
3	I	10.0	169	1547+j436.9	176.8	181	2.32
	II	10.3	73	893+j167.3	92.5	95	2.63

表 2 迭代过程中的功率修正量 kV·A

算例	迭代次数	a 端功率修正量	b 端功率修正量
1	1	216.34+j135.6	-234.8-j170.1
	2	46.381-j17.34	65.432+j16.72
	3	-0.3473-j0.5132	0.5437+j0.4812
	4	-0.0028+j0.0013	0.0326-j0.0027
	5	$2.68 \times 10^{-6} + j1.32 \times 10^{-7}$	$-4.32 \times 10^{-7} - j1.96 \times 10^{-6}$
2	1	-1080.3-j690.35	1270+j730.96
	2	42.826+j13.64	-49.381-j18.48
	3	0.5241-j0.5287	-0.6321+j0.3572
	4	0.0043-j0.0027	-0.0029+j0.0036
	5	$-2.57 \times 10^{-6} - j1.59 \times 10^{-5}$	$3.96 \times 10^{-6} + j1.17 \times 10^{-5}$
3	1	-302.08-j803.26	207.17+j603.65
	2	56.436+j11.991	-59.735-j14.568
	3	-0.998-j0.392	0.751+j0.531
	4	0.00739+j0.00528	-0.00824+j0.00746
	5	$-2.64 \times 10^{-6} + j3.25 \times 10^{-5}$	$-3.29 \times 10^{-6} + j5.38 \times 10^{-6}$

(1) 由于无法获取上级电网模型,因此无法准确获得上级电网的阻抗,采用迭代法虽简化了上级电网,但求得的等值阻抗对合环潮流计算存在一定的误差。

(2) 数据采集与监视控制系统遥测量、遥信量的准确程度影响计算精度。

(3) 功率因数无法获得。由于实际运行时,网测的数据有些是电流值,不是 P 、 Q 值,需要用电流值和功率因数推导出 P 、 Q 值,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。该方法取功率因数为 0.9。

从表 2 中可以看出,随着迭代次数的增加,合环开关两侧功率修正量的值逐渐减小。在第二阶段迭代到 5 次左右功率修正量的值几乎接近零。可见文中提出的算法具有很好的收敛性,从而提高了计算速度。

4 结束语

根据实际配网中的特性,提出的以支路功率为变量的基于叠加原理和前推回代法的两阶段算法,较好解决了配电网合环潮流计算难度大、误差大的难题,提高了合环潮流计算的准确性,在实际合环操作中,对调度员能否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] 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): 34-35.
- [2] 车仁飞, 李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 74-79.
- [3] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 一种求解环状配电网潮流的有效算法—两阶段法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(5): 5-9.
- [4] 李家睿. 复杂配电网网络等效及合解环潮流计算研究[D]. 上海: 上海交通大学硕士论文集, 2012.
- [5] WILLIS H L. 配电系统规划参考手册[M]. 范明天, 等译. 北京: 中国电力出版社, 2013: 122-126.
- [6] 季晓明, 成乐详. 基于突变理论的配电网规划方案综合评估[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(5): 51-54.
- [7] 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(22): 77-80.

作者简介:

戴 晖(1984), 男, 江苏徐州人, 工程师, 从事电网规划和智能配电网方面工作;

孙 波(1977), 男, 江苏洪泽人, 高级工程师, 从事电网规划方面工作。

A New Practical algorithm of Load Flow Calculation for Loop Distribution Networks

DAI Hui, SUN Bo

(Huaian Power Supply Company, Huaian 211700, China)

Abstract: The paper presents a two-stage power flow calculation method for the distribution network with loops. In the first stage, the meshed network is converted into a pure radial network by applying the superposition principle. Then the forward/backward sweep method is employed to attain the voltage differences across the loop switch of the radial distribution networks. In the second stage, continuously modifying the load power across the loop switch, the forward/backward sweep method is employed to attain the power flow of the radial distribution networks once again and finally tends to the global convergence. Last the iteration method is used to attain equivalent impedance of the high-voltage power grid. Simulation results on some actual distribution grids verify the astringency and accuracy of the proposed method.

Key words: two-stage method; superposition principle; forward/backward sweep method; loop power flow.