

配电网合环冲击电流的暂态过程分析与仿真

李晓柯, 李祥发
(洛阳供电公司, 河南 洛阳 471000)

摘要:在进行配电网合环操作分析时,以往只考虑合环后稳态电流是否越限,而忽略了合环冲击电流的暂态过程。针对这一不足,在理论分析的基础上,结合配电网特点建立了数学模型,推导出了合环冲击电流的计算方法,并探讨了影响合环冲击电流的主要因素。最后利用 PSCAD/EMTDC 软件对实际算例进行了暂态仿真计算。计算和仿真波形结果验证了该方法的正确性和有效性,对实际电网的调度运行具有一定的指导意义。

关键词:配电网;合环;冲击电流;暂态仿真

中图分类号:TM734;TM76

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)05-0067-04

Transient analysis and simulation of surge current due to closing loop in distribution network

LI Xiao-ke, LI Xiang-fa
(Luoyang Power Supply Company, Luoyang 471000, China)

Abstract: Aiming at the shortcoming in closing loop operation analysis, which focused on the steady-state current and ignored the transient process of surge current, the mathematics model was established and calculation method was proposed for surge current based on theoretical analysis. Furthermore, the influencing factors determining the loop current were discussed. Actual examples and transient simulation results verify the correctness and validity of the proposed method, which could provide significant reference to the distribution network operation and dispatching.

Key words: distribution network; closing loop; surge current; transient simulation

0 引言

我国城市配电网普遍采用闭环设计、开环运行的供电模式^[1]。随着经济的快速发展,社会对电力企业供电可靠性的要求越来越高。在线路检修、事故处理和负荷转移时,通过选择适当的供电路径进行合环操作,可以保证配电网对用户的可靠供电,减少停电时间和范围。但在合环瞬间,系统将产生很大的冲击电流,稳定后,环网中还可能产生较大的环流,这将可能造成某些电气设备或线路过载,甚至造成继电保护装置动作跳闸,从而对整个电网的安全

运行造成严重的影响^[2]。因此在合环之前,通过计算合环电流以确定能否进行合环操作,具有十分重要的意义。

以往针对配电网合环的研究主要以分析合环稳态电流为主,而对合环暂态过程的研究较少^[3]。本研究通过建立典型配电网合环系统的数学模型,从理论上推导出合环暂态至稳态的全电流数学表达式,得出合环最大冲击电流和最大有效值电流的计算公式,并分析影响合环冲击电流的因素。最后,利用电力系统软件 PSCAD/EMTDC 对实际算例进行暂态仿真计算,以验证理论分析的正确性和有效性。

1 合环暂态过程分析

1.1 计算模型

一种典型的配电网合环情况如图 1(a) 所示。正常方式下,合环联络开关在断开位置,网络为开环运行。当进行合环操作时,由于合环前母线 1 和 2 之间存在电压差,因此在合环瞬间将产生一个较大的冲击电流。而整个环路呈感性,故合环至稳态应是一个振荡衰减的暂态过程^[4]。为分析计算方便,根据配电网参数和本身结构的特点本研究对系统作如下简化:忽略线路电纳;合环支路使用集中参数模型,不考虑合环开关在线路中的位置分布及作用。简化后的等值电路模型如图 1(b) 所示,图中的 R 和 L 为环网中所有电气元件的电阻和电感之和。

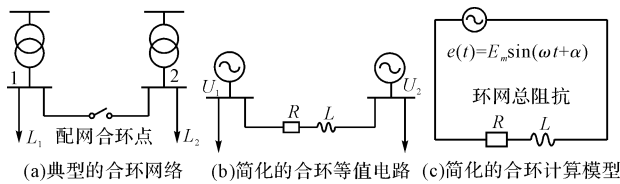


图 1 配电网合环示意图

1.2 理论分析

由于电力系统三相对称,本研究以 A 相为例进行研究,计算合环冲击电流暂态过程的单相等值电路模型如图 1(c) 所示。图中合环点两侧电压差等效为 A 相相电压 $e(t)$ 。

设 $\Delta \dot{U}$ 为合环点两侧电压相量差,则有:

$$\dot{E} = \frac{\Delta \dot{U} \angle -30^\circ}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

合环电路的时域微分方程为:

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \alpha) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

式中 α —合环时刻 $t=0$ 时 $\dot{E}$ 的初始相角,它由该时刻合环点两侧电压的相角差决定。

在本研究中,利用拉普拉斯变换,将时域非线性微分方程转换为复频域中的代数方程进行求解。

对式(2)两边取拉普拉斯变换,得:

$$E(s) = RI(s) + sLI(s) - Li(0_-) \quad (3)$$

合环前,合环支路上没有电流通过,故电感中的初始电流 $i(0_-)$ 为零。因此有:

$$I(s) = \frac{E(s)}{R + sL} = \frac{E_m(\omega \cos \alpha + s \sin \alpha)}{(s^2 + \omega^2)(R + sL)} \quad (4)$$

令:

$$I(s) = \frac{As}{s^2 + \omega^2} + \frac{B}{s^2 + \omega^2} + \frac{C}{s + R/L} \quad (5)$$

比较式(4)、式(5)中 s 的系数,并根据三角函数公式化简,并且环路阻抗功率因数角 $\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$,

合环稳态电流幅值 $I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$ 。可推导出:

$$\begin{cases} A = E_m \left(\frac{R \cos \alpha}{R^2 + \omega^2 L^2} + \frac{\omega L \sin \alpha}{R^2 + \omega^2 L^2} \right) = I_m \cos(\alpha - \varphi) \\ B = E_m \left(\frac{R \sin \alpha}{R^2 + \omega^2 L^2} - \frac{\omega L \cos \alpha}{R^2 + \omega^2 L^2} \right) = I_m \sin(\alpha - \varphi) \\ C = E_m \left(\frac{\omega L \cos \alpha}{R^2 + \omega^2 L^2} - \frac{R \sin \alpha}{R^2 + \omega^2 L^2} \right) = -I_m \sin(\alpha - \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

对式(5)进行拉普拉斯反变换并代入式(6),得到时域中合环电流的完全表达式为:

$$\begin{aligned} i(t) &= A \sin \omega t + B \cos \omega t + C e^{-\frac{R}{L}t} \\ &= I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \end{aligned} \quad (7)$$

由于三相对称,只需将 $(\alpha - 120^\circ)$ 和 $(\alpha + 120^\circ)$ 代替式(7)中的 α 就可以得到 B 相和 C 相全电流表达式。由上述分析可见,三相中的直流电流是不相等的,它们的起始值也不可能同时达到最大或为零。三相中的稳态合环电流为 3 个幅值相等、相角相差 120° 的交流电流。

2 合环冲击电流的计算

从式(7)中可以看出,合环电流由交流分量 i_{ac} 和直流分量 i_{dc} 两部分组成^[5]:

$$\begin{cases} i_{ac}(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \\ i_{dc}(t) = -I_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \end{cases} \quad (8)$$

其中, i_{ac} 为合环稳态环流周期分量,其幅值 I_m 的大小取决于合环点两侧电压差和环网总阻抗; i_{dc} 为呈指数规律衰减的非周期分量,其起始值 i_{dc0} 取决于合环时刻的初始状态,衰减时间常数由环路中电阻 R 与电感 L 的比值决定。直流分量值越大,合环电流瞬时值也就越大,在合环点两侧电压幅值差和环路阻抗一定的情况下,其大小由合环点两侧电压相角差所决定。

合环瞬间($t=0$ 时) A 相的电流相量图如图 2 所示,此时 I_{dc} 在 t 轴上的投影为 i_{dc0} 。当 α 满足 $\alpha - \varphi = 90^\circ$ 时, I_{dc} 与时间轴平行, i_{dc0} 的绝对值达到最大值 I_m , 环路中将出现较大的冲击电流,这是最恶劣的合环情况。这种情况下合环电流的最大瞬时值,即为最大冲击电流 i_M ,它将在合环操作约 1/2 个周期(0.01 s)后出现,由此可得:

$$i_M = (1 + e^{-0.01R/L}) I_m = k_M I_m \quad (9)$$

式中 k_M —冲击系数。

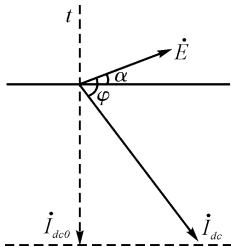


图2 初始状态合环电流相量图

对于具体的配网环路,最大冲击电流值等于稳态环流幅值乘以一个固定的系数,工程计算中一般取1.8~1.9。从上述分析可以看出,合环瞬时冲击电流的大小与合环点两侧电压差近似成正比,与环路总阻抗近似成反比,还与电压的相角差有密切关系^[6]。因此,为保证合环安全,应调整运行方式以尽量减小合环点两侧电压的幅值差和相角差。

在配电网电流速断保护中,电流的整定值取的是有效值,因此需计算在合环暂态过程中的最大有效值电流 I_M 。容易得出, I_M 也是发生在合环后的 1/2 个周期内,其值为:

$$I_M = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + 2(k_M - 1)^2} \tag{10}$$

3 实际算例仿真计算

本研究选取某市市区 10 kV 配电系统典型线路联络开关合环算例(如图 3 所示),通过调度 SCADA 系统获取电网实际运行工况(线路、变压器参数、负荷、变压器分接头位置等),利用电力系统电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建系统模型,对合环冲击电流的暂态过程进行仿真计算。

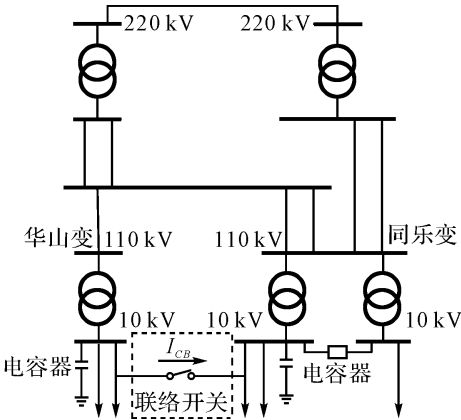


图3 配电网合环系统

合环以后三相冲击电流的暂态波形如图 4 所示。由图可见,三相的瞬时电流并不是同时达到最大,三相

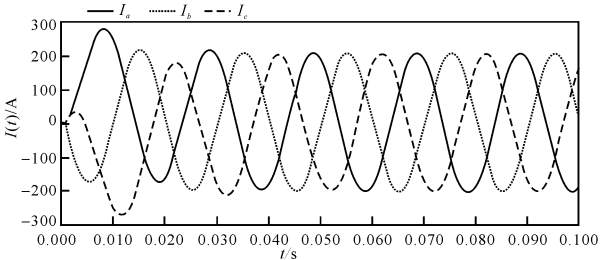


图4 三相合环冲击电流暂态波形

的冲击电流 A 相较大而 B 相较小,A 相最大瞬时电流出现在合环操作约 1/2 个周期(0.01 s)后;三相的稳态合环电流幅值相等,相角差 120°。这与第 2 节中的理论分析是一致的。合环电流的分相计算结果如表 1 所示。通过仿真计算,可得出影响合环冲击电流的主要因素有:合环点两侧电压幅值差、相角差以及整个环网的总阻抗。

表 1 三相合环电流计算结果

相别	电压差/kV	相角差/deg	冲击电流/A	稳态电流/A
A 相	0.432	3.01	280.439	145.135
B 相	0.432	3.01	216.003	145.124
C 相	0.432	3.01	274.901	145.112

当通过仿真计算发现合环电流超过设备容量限额或不能满足继电保护要求时,可通过调整变压器分接头、投切电容器、调整负荷分布和改变环网参数等方法控制合环电流的大小,以保证合环操作的安全^[7-9]。其中调整变压器分接头是比较有效也最为常用的方法,因为变压器的阻抗由其分接头位置所决定,当一个配网系统运行方式和负荷确定以后,通过改变变压器分接头可以有效地减小合环点两侧电压差,从而减小合环电流的大小。其调整的原则是根据潮流计算结果,将电压幅值较高一侧的电压降低、幅值较低一侧的电压升高,尽量使合环点两侧电压幅值接近。通过调整主变档位来降低配电网合环冲击电流的计算结果如表 2 所示,主变档位调整前后的冲击电流对比仿真波形如图 5 所示(以 A 相为例,其中虚线是调整后的电流暂态波形)。可见,通过改变变压器分接头调整合环点两侧电压相量差,对合环冲击电流的控制有显著的作用。

表 2 变压器分接头调整前后合环电流计算结果

	电压差/kV	相角差/deg	冲击电流/A	稳态电流/A
调整前	0.548	4.45	537.047	270.889
调整后	0.205	1.20	92.815	49.672

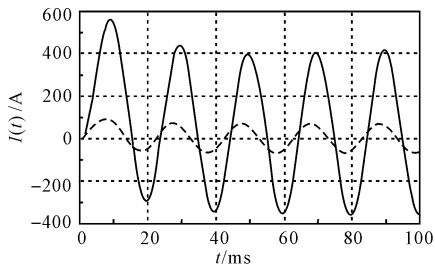


图 5 调整变压器分接头对合环冲击电流的影响

4 结束语

配电网合环操作时,除了要考虑合环稳态电流值,合环瞬间冲击电流的影响也不容忽视。如冲击电流过大,会使线路和电气设备承受巨大的电动力冲击,致使导线变形、设备损坏,也有可能造成继电保护误动,导致合环操作失败^[10]。本研究在合环暂态过程理论分析的基础上,基于调度 SCADA 系统获取的电网数据,结合某市市区 10 kV 配电网典型合环系统建立等值模型,对合环冲击电流进行了仿真计算。研究中指出了影响合环电流大小的主要因素是合环点两侧电压幅值差、相位差以及环网总阻抗;探讨了若不满足合环安全条件时可以采取的措施,并特别分析了调整合环点两侧电压差对控制合环冲击电流的作用。仿真计算结果表明,本研究所用的方法可以有效地分析配网合环暂态过程,弥补了以往研究中的不足,所采用的数学模型是正确的、可行的。在实际工作中,本研究可以为调度运行人员进

行合理的合环操作提供决策依据,从而提高供电可靠性,保证配电网更加安全、经济地运行。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 苑 捷. 配电网合环操作的研究[J]. 陕西电力,2007,35(4):36-39.
- [3] 刘 磊,禹华然,金 鑫. 合环潮流的暂态过程分析[J]. 机电工程,2008,25(10):74-76.
- [4] 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.
- [5] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [6] 王伟灿,周显甫. 电力系统合环电流的分析及控制对策[J]. 供用电,2002,23(4):26-28.
- [7] 杨志栋,刘 一,张建华. 北京 10 kV 配电网合环试验与分析[J]. 中国电力,2006,39(3):66-69.
- [8] 于建辉,周 浩,陆 华. 杭州 10 kV 配电网合环问题的研究[J]. 机电工程,2007,24(10):54-57.
- [9] 王 庆,应庆强,摆存曦. 银川地区 10 kV 配电网合环电流及计算方法的研究[J]. 陕西电力,2007,35(2):41-44.
- [10] 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.

[编辑:柴福莉]

(上接第 63 页)

电也提出了新的要求。本设计通过多次试验、提升,解决了强电、弱电相互干扰的难点问题,设置“三遥接口”,上位机可方便实现对稳压器的遥控、遥测和遥信。通过实际产品的制作、测试,达到了预期的设计要求,并经过用户的使用,效果很好,已在一些移动无人值守站得到应用。在 10 kVA ~ 150 kVA 这一功率段,完全可以代替电刷调压式大功率稳压器,但成本稍高。

参考文献 (References):

- [1] DIERIKX E F. A MEMS-Stabilized AC voltage reference source[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2007,56(2):313-315.
- [2] 崔树清. 一种新型交流稳压电源的设计[J]. 通信电源技

术,2007,24(5):63-64,66.

- [3] 江友华,顾胜坚,方 勇. 无触点交流稳压器的特性研究及功率流分析[J]. 电力电子技术,2007,41(8):7-9.
- [4] 庄瑞飘,周熙文. 新型节能微电脑控制大功率交流电源研究与设计[J]. 仪器仪表学报,2005(2):710-713.
- [5] 官 威,刘 军,邓 焰,等. 基于谐振软开关的大功率高压直流电源[J]. 机电工程,2008,25(7):61-64.
- [6] 何立民. 单片机应用技术选编[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000.
- [7] 余锡存,曹国华. 单片机原理及接口技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [8] 温州康宏科技有限公司. SJW、DJW 系列交流稳压器产品说明书[M]. 温州康宏科技有限公司,2008.

[编辑:柴福莉]