

南沙配电网合环运行短路电流计算与限制研究

黄晓彤¹, 王雪峰¹, 温鸿源², 李玉荣¹, 朱建全²

(1. 广州供电局有限公司, 广州 510640; 2. 华南理工大学 电力学院, 广州 510640)

摘要: 系统研究了配电网合环运行的短路电流计算方法与限制措施, 并在南沙配电网进行实际应用。首先, 提出了合环运行短路电流的计算模型, 并综合考虑不同短路点以及短路形式对短路电流的影响, 给出了一种较为全面的配电网合环运行短路电流计算方法。该方法能准确计算合环线路的最大短路电流, 并明确该短路电流出现的位置和短路方式。再次, 对比分析了各种短路电流限制措施在配电网合环运行中的适用性, 确定了在配电网合环运行中进行短路电流限制的原则和实施步骤, 给出了加装串联电抗器参数的详细计算方法。最后, 将所提方法应用于南沙配电网合环线路的短路电流计算与限制中, 结果表明了所提方法的可行性与有效性。

关键词: 配电网; 合环运行; 短路电流; 限流

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0122-05

Calculation and Restriction of Short-circuit Current in the Loop-closed Operation of Nansha Distribution Network

HUANG Xiaotong¹, WANG Xuefeng¹, WEN Hongyuan², LI Yurong¹, ZHU Jianquan²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510640, China;

2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The calculation and restriction of short-circuit current in the loop-closed operation of distribution network is studied in this paper, and then is applied in Nansha distribution network. First, the calculation model of short-circuit current in the loop-closed operation is presented. Then, taking into account the impact of short-circuit point and short-circuit form, a comprehensive calculating method of short-circuit current is given, which can provide the biggest short-circuit current. Its short-circuit point and form can be made clear as well. Secondly, the applicability of restriction measures of short-circuit current for the loop-closed operation of distribution network is analyzed one by one. Afterwards, the principle and implementation details are determined. The calculation of reactor parameters is also presented. Finally, the proposed method is applied in the Nansha distribution network, the results show its feasibility and validity.

Key words: distribution network; loop-closed operation; short-circuit current; current restriction

中压配电网处于电网末端, 对于电力的安全、可靠供应具有重要意义^[1]。据统计, 广州地区由于中压配电网不具备合环转供电条件而造成的计划停电时间占总停电时间的80%左右。为了提高供电可靠性, 广州供电局一方面正在大力改造中压配电网, 提供合环转供电的条件, 减少计划内的停电时

间; 另一方面借鉴国外先进电力企业的经验, 尝试通过对10 kV配电网进行合环运行减少故障停电时间。南沙新区作为南方电网合环运行的试点单位, 目前正在着力进行10 kV配电网合环运行的研究和试点应用工作。

短路电流超标是限制配电网合环运行的一大瓶颈。在合环运行模式下, 提供短路电流的支路数增多, 短路电流也将急剧增大, 致使开关设备、导线、互感器等送变电设备将面临更高的热稳定和动稳定要求。当短路电流水平超过了这些设备可以承受的范围时, 将严重影响电网的安全运行^[2-4]。

收稿日期: 2016-01-01

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(0165HK1200429)

作者简介: 黄晓彤(1969), 男, 广东揭阳人, 工程师, 工程硕士, 主要研究方向为电力设备运行与控制(e-mail)huangxt@guangzhou.csg.cn。

短路电流的解决需要明确以下两个方面的问题: (1) 短路电流是否超标; (2) 如何限制超标的短路电流。这就要对短路电流大小进行计算, 并提出相应的短路电流限制措施。目前关于配电网开环运行的短路电流计算与限制方法已经较为成熟^[5], 但有关配电网合环运行情况下的短路电流计算与限制的研究仍未见报道。在开环运行时, 已有的工程方法一般只计算某一确定的短路电流值。但是在配电网合环运行过程中, 短路点以及短路形式多样, 它们对应的短路电流的大小是不同的。只有对这些情况进行全面的考虑, 才能计算出危害最大的短路电流。在短路电流的限制方面, 也需要根据合环运行的特点确定短路电流的限制方式, 并对该方式下的参数值进行计算。

本文从南沙配电网合环运行的实际需求出发, 对配电网合环运行的短路电流计算方法开展研究, 并提出相应的短路电流限制措施。最后将所提的理论方法应用于南沙配电网, 为配电网的合环运行短路电流问题的解决提供依据。

1 短路电流计算

1.1 短路电流计算模型

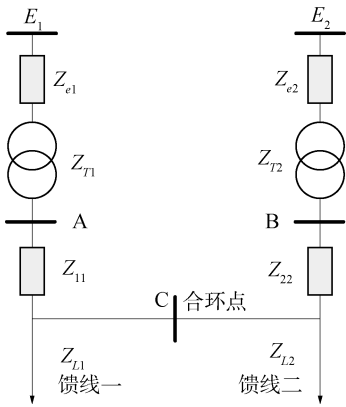


图 1 配电网合环线路的短路电流计算模型

Fig. 1 Calculation Model of Short-circuit Current in Loop-closed Lines

按照 10 kV 中压配电网的接线结构, 两根不同供电电源的馈线以一定的方式进行连接便可形成合环运行模式。在这种模式下, 短路电流由两条馈线提供。根据戴维南等效定理, 可以将给合环点两侧馈线提供电能的变电站及其背后的系统可分别用一个电压源串联一个电阻等效代替, 此时便可得到合

环运行的短路电流计算模型, 具体如图 1 所示。其中, A、B 均为母线, C 为合环点。

在上图所示的合环运行短路电流计算模型中, 变电站背后系统的等效参数可以通过广州地区电网继电保护整定计算软件平台获取。在最大方式下, 南沙配电网 110 kV 主变和 220 kV 主变背后系统的等效阻抗分别取 0.30 Ω 和 0.34 Ω; 在最小方式下, 这两种等效阻抗取 0.35 Ω 和 0.39 Ω。变压器和线路的阻抗参数可根据具体型号计算。

1.2 短路电流计算方法

在图 1 所示的配电网合环运行短路电流计算模型中, A、B、C 三处均可能出现短路现象, 每处短路的形式又可分为三相短路、两相接地短路、两相短路和单相短路四种形式。在不同的短路点发生不同形式的短路现象时, 合环线路的短路电流值是不同的, 必须对这些情况分别进行计算, 并对比计算结果方可确定出最大的短路电流。以下以 A 点短路为例, 对不同短路形式下的短路电流计算方法进行分析。

首先画出 A 点短路的三序网络, 具体如图 2 - 4 所示。

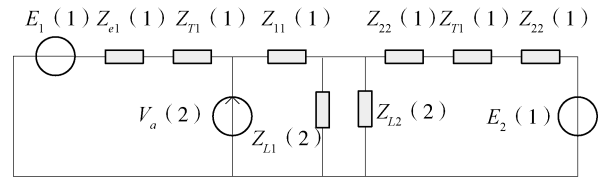


图 2 正序网络

Fig. 2 Positive Sequence Network

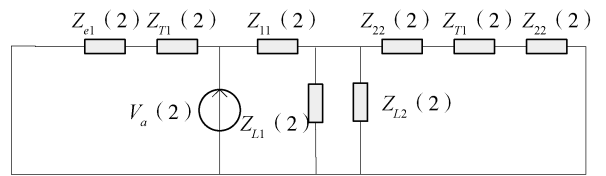


图 3 负序网络

Fig. 3 Negative Sequence Network

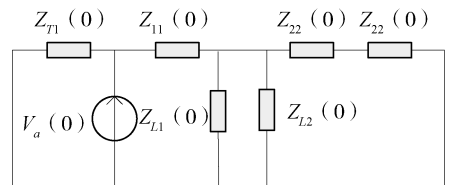


图 4 零序网络

Fig. 4 Zero Sequence Network

由图 2 ~ 图 4 便可计算出正序等效阻抗 $X_{ff(1)}$ 、

负序等效阻抗 $X_{ff(2)}$ 和零序等效阻抗 $X_{ff(0)}$ 。再根据正序等效定则,两相接地短路、两相短路和单相短路这三种不对称短路形式的短路电流正序分量的计算公式可统一写为^[6]:

$$i_{fa(1)}^{(n)} = \frac{V_f^{(0)}}{j(X_{ff(1)} + X_{\Delta}^{(n)})} \quad (1)$$

式中: n 代表短路的类型; $I_{fa(1)}^{(n)}$ 为类型 n 的短路电流的正序分量; $V_f^{(0)}$ 为短路故障前短路点的电压; $X_{ff(1)}$ 为正序电抗; $X_{\Delta}^{(n)}$ 为附加阻抗; 其值可通过表 1 进行计算。

表 1 不同短路类型的附加阻抗值

Table 1 Additional Impedance Values of Various Short-circuit Forms

短路类型 $f^{(n)}$	$X_{\Delta}^{(n)}$
三相短路 $f^{(3)}$	0
两相短路接地 $f^{(1,1)}$	$\frac{X_{ff(2)} X_{ff(0)}}{X_{ff(2)} + X_{ff(0)}}$
两相短路 $f^{(2)}$	$X_{ff(2)}$
单相短路 $f^{(1)}$	$X_{ff(2)} + X_{ff(0)}$

由于各种短路方式下短路电流的绝对值与它的正序分量的绝对值成正比,故短路电流 $I_f^{(n)}$ 为:

$$I_f^{(n)} = m^{(n)} I_{fa(1)}^{(n)} \quad (2)$$

式中: $m^{(n)}$ 为类型 n 的短路电流的比例系数,其值可通过表 2 的公式进行计算。

表 2 不同短路类型的比例系数

Table 2 Proportional Coefficients of Various Short-circuit Forms

短路类型 $f^{(n)}$	$m^{(n)}$
三相短路 $f^{(3)}$	1
两相短路接地 $f^{(1,1)}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{ff(2)} X_{ff(0)}}{(X_{ff(2)} + X_{ff(0)})^2}}$
两相短路 $f^{(2)}$	$\sqrt{3}$
单相短路 $f^{(1)}$	3

2 短路电流限制

2.1 短路电流限制方式

经过上述的配电网合环运行的短路电流计算,如发现短路电流超标,就需要采取相应的短路电流限制措施,方可确保配电网合环运行的可靠性。限制短路电流的方法包括母线分列运行、采用高阻抗设备、变压器中性点接小电抗、加装串联电抗器等。以下分别对这些方式进行分析,从中确定南沙配电网合环运行的短路电流限制方式。

母线分列运行方式通过改变系统联结方式增大阻抗,从而实现对短路电流的限制。该方法不需增加设备投入,经济性较高,操作上也易于实现。但是母线分列运行与合环运行在形式上相悖,这从根本上决定了南沙配电网合环运行的短路电流限制不能采取母线分列运行方式。

高阻抗设备方式通过提高变压器等设备的阻抗限制短路电流。该方法限制短路电流的效果明显,但是需要重新更换设备,且高阻抗设备的造价也比普通设备高,这使得采用高阻抗设备限制短路电流的方式的经济性偏低。

变压器中性点接小电抗方式可以显著减小单相短路电流,但是该方法容易造成变压器中性点的电压偏移并引发中性点绝缘问题。此外,对于两相短路电流和三相短路电流大于单相短路电流的电网,该方法的短路电流限制效果并不明显。

串联电抗器方式通过加装串联电抗器增加回路的阻抗,从而实现短路电流的限制。目前串联电抗器的生产技术已比较成熟,并在 10~35 kV 配电网中得到了大量的应用。该方法短路电流限制效果明显,但也在一定程度上增加了网损。考虑到南沙配电网目前正处于配电网合环运行的研究和示范点应用阶段,安全问题比较突出,拟采用技术上更为成熟的加装串联电抗器的方法解决短路电流超标的问题。

2.2 串联电抗器的参数计算

在图 1 所示的配电网合环运行模型中,在 A、B、C 三处加装串联电抗器均可增大回路的阻抗,达到限制短路电流的效果。在对 A、B、C 三处进行不同方式的短路电流计算后,若只有一处的短路电流超标,则直接在该处加装串联电抗器,将其限制在允许值以内;若有多处同时发生短处电流超标,则先在短路电流最为严重的点加装串联电抗器以限制其短路电流,再对其它点的短路电流进行校核,使所有点的短路电流均不越限。其中,电抗器的参数可通过下式进行计算:

$$x_L \% = \left(\frac{I_B}{I_{Nbr}} - x'_{*\Sigma} \right) \frac{I_N U_B}{I_B U_N} * 100 \% \quad (3)$$

式中: $x_L \%$ 为电抗百分数; I_B 、 U_B 分别为基准电流和基准电压; I_N 、 U_N 分别为电抗器的额定电流和额定电压; I_{Nbr} 为断路器的开断电流; $x'_{*\Sigma}$ 为电源与电抗器之间的等效电抗。

式(3)中的电抗百分数还可转化成标么值的形式:

$$x_{*L} = \frac{x_L \% I_B U_N}{100 I_N U_B} = \frac{I_B}{I_{Nbr}} - x'_{*\Sigma} \quad (4)$$

式中: x_{*L} 为电抗器的电抗标么值。

3 算例分析

以南沙电网为例,对四个典型的合环线路的短路电流进行计算与限制。基准容量设为 1 000 MVA,基准电压设为 10.5 kV,串联电抗器的额定电流和额定电压分别为 0.4 kA 和 10.5 kV,断路器的开断电流为 20 kA。这四条线路的合环形式和阻抗参数如表 3~表 4 所示,短路电流的计算结果以及串联电抗器的参数如表 5~表 9 所示。

表 3 各合环线路的结构

Table 3 Connection Mode of Various Loops

合环线路	合环点	1 侧馈线	2 侧馈线
合环线路 1	广安 4 号综合楼	飞沙 F14 线	虎桥 F17 线
合环线路 2	小虎开关	黄阁 F29 线	小虎 F1 线
合环线路 3	银利开关	虎桥 F18 线	黄阁 F27 线
合环线路 4	下坭 1#断路器	太石 F1 线	立信 F7 线

表 4 各合环线路的阻抗值

Table 4 Impedances of Loop Lines

线路	$RT(p.u.)$	$XT(p.u.)$	$RL(p.u.)$	$XL(p.u.)$
飞沙 F14 线	0.068 6	3.640 0	11.237 0	2.593 14
虎桥 F17 线	0.025 6	1.492 9	20.995 8	6.979 0
黄阁 F29 线	3.000 0	2.560 3	14.051 3	3.978 1
小虎 F1 线	0.070 5	2.240 0	22.521 0	5.490 3
虎桥 F18 线	0.102 54	5.998 3	15.791 2	4.892 5
黄阁 F27 线	0.055 3	2.560 3	7.120 7	3.411 9
太石 F1 线	0.099 6	2.600 0	24.668 9	12.057 4
立信 F7 线	0.027 2	0.656 3	23.244 8	12.610 5

表 5 合环线路 1 的短路电流计算结果

Table 5 Calculation Results of Short-circuit Current in Loop 1

短路类型	短路电流/kA		
	A 处	B 处	C 处
单相短路	1.895 6	1.942 7	1.747 8
两相短路	14.967 3	23.427 2	8.957 5
两相接地短路	14.965 1	23.420 1	8.958 5
三相短路	16.828 1	26.044 5	10.160 0

从表 5 可以看出,合环线路 1 的 B 处发生三相

短路时出现了短路电流超标的现象,短路电流达到 26.044 5 kA。从表 9 可以看出,为了限制短路电流,须在 B 处安装一个串联电抗器,其百分数为 0.7%,标么值为 0.962 5。

从表 6 可以看出,合环线路 2 的 A 处和 B 处发生两相短路、两相接地短路和三相短路时均出现了短路电流超标的现象。按照本文所提的串联电抗器配置的原则,在短路电流相对更为严重的 B 处安装串联电抗器。从表 9 可以看出,其电抗百分数为 0.8%,电抗标么值为 1.1。经检验,A 处仍存在短路电流超标的现象,进一步在该处安装电抗百分数为 0.6%,电抗标么值为 0.825 的串联电抗器,则其短路电流也得到了有效的抑制。

表 6 合环线路 2 的短路电流计算结果

Table 6 Calculation Results of Short-circuit Current in Loop 2

短路类型	短路电流/kA		
	A 处	B 处	C 处
单相短路	1.932 1	1.964 9	1.760 2
两相短路	22.486 8	23.705 3	10.081 0
两相接地短路	22.475 4	23.698 3	10.077 7
三相短路	24.689 1	26.489 0	11.450 0

表 7 合环线路 3 的短路电流计算结果

Table 7 Calculation Results of Short-circuit Current in Loop 3

短路类型	短路电流/kA		
	A 处	B 处	C 处
单相短路	1.806 8	1.965 4	1.704 7
两相短路	10.335 6	20.980 7	7.514 8
两相接地短路	10.330 7	20.980 1	7.518 1
三相短路	11.371 2	23.829 0	8.534 8

表 8 合环线路 4 的短路电流计算结果

Table 8 Calculation Results of Short-circuit Current in Loop 4

短路类型	短路电流/kA		
	A 处	B 处	C 处
单相短路	1.629 2	1.665 1	1.181 4
两相短路	18.541 8	18.777 0	4.076 9
两相接地短路	18.528 4	18.768 6	4.069 4
三相短路	20.022 3	20.740 8	4.478 8

从表 7 可以发现,合环线路 3 在 B 处发生两相短路、两相接地短路和三相短路时均出现了短路电流超标的现象。从表 9 可以看出,为了限制短路电流,须在 B 处安装一个串联电抗器,其百分数为

0.5%，标幺值为0.6875。

从表8可以看出，合环线路4在A处和B处发生三相短路时均出现了短路电流超标的现象。在短路电流相对更为严重的B处安装串联电抗器，其电抗百分数为0.8%，电抗标幺值为1.1。经检验，在B处安装了该串联电抗器后，A处的短路电流也得到了抑制。

表9 各合环线路的串联电抗器参数

Table 9 Parameters of Reactors of Various Loops

合环线路	安装位置	电抗百分数/%	电抗标幺值/p. u.
合环线路1	B处	0.7	0.9625
合环线路2	A处	0.6	0.8250
合环线路2	B处	0.8	1.1
合环线路3	B处	0.5	0.6875
合环线路4	A处	0.8	1.1

4 结论

本文研究了配电网合环运行的短路电流计算方法及限制措施，并将其应用于南沙电网，主要得出了如下结论：

1)提出了配电网合环运行的短路电流计算方法，该方法全面考虑了不同短路点以及不同短路方式的影响，既能计算出合环线路中可能出现的最为严重的短路电流，又能确定合环线路中由于短路电流超标而引起的安全性最为薄弱的环节，为短路电流的限制提供了重要依据。

2)提出了短路电流的限制措施，包括短路电流的限制方式、串联电抗器的安装方式以及参数计算方法等，能对短路电流进行有效限制，提高合环运行的安全性。

3)将所提的方法在南沙电网进行实际应用，能较为有效地解决南沙配电网合环运行的短路电流

问题。

参考文献：

- [1] 吴振辉, 彭晓涛, 沈阳武, 等. 一种配电网环型供电模型及其合环运行方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 57-63.
WU Zhenhui, PENG Xiaotao, SHEN Yangwu, et al. Study on a Loop Power Supply Model and Its Loop-Close Operation Mode for Distribution Network [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 57-63.
- [2] 张红. 一种辐射型配电网短路电流实用算法[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 38-41.
ZHANG Hong. A Practical Algorithm of Short Current Calculation for Radial Distribution Networks [J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 38-41.
- [3] 车仁飞, 李仁俊, 李玉忠. 基于叠加原理的配电网短路电流计算[J]. 电力系统自动化, 2001, 24(12): 22-24.
CHE Renfei, LI Renjun, LI Yuzhong. Short-Circuit Calculation of Distribution Network Based on Superposition Theorem [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 24(12): 22-24.
- [4] 范忠, 张慧媛. 基于GIS数据平台的配电网短路电流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 76-79.
FAN Zhong, ZHANG Huiyuan. Approach to Short-circuit Current Calculation in Distribution System Based on GIS Platform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 76-79.
- [5] 赵天意. 低压配电网主电源短路电流计算[J]. 低压电器, 2007(9): 39-42.
ZHAO Tianyi. Calculation of Short Current for Low Voltage Grid Distribution [J]. Low Voltage Apparatus, 2007(9): 39-42.
- [6] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.

(责任编辑 林希平)

(上接第121页 Continued from Page 121)

- [4] CHRIS R. Microservices: Decomposing Applications for Deployability and Scalability. [2014-05-25]. http://www.infoq.com/articles/microservices-intro?utm_source=infoq&utm_medium=popular_links_homepage#U4-QbLLNKmI. gmail.
- [5] 王海吉, 解文艳, 姜雯君. 企业级管理信息系统的数据技术管控体系研究[J]. 现代计算机, 2015(10下): 53-56.

WANG Haiji, XIE Wenyan, JIANG Wenjun. Research on The Data Technology Control System of Enterprise MIS [J]. Modern Computer, 2015(Late-October): 53-56.

(责任编辑 高春萌)