

文章编号:1671-6833(2012)04-0069-04

城市配电网电容电流补偿研究

王金凤¹, 包毅¹, 程跃森², 杨淑霞², 郭含³, 陈杨¹

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000;
3. 禹州供电公司, 河南 禹州 461670)

摘要: 城市配电网中电缆出线日益增多, 导致负荷低谷时出现容性无功倒送以及单相接地时故障电流过大. 在理论分析和计算的基础上, 利用 MATLAB 仿真平台下的电力系统工具箱搭建全电缆出线的变电站仿真模型. 通过仿真模拟, 确定补偿参数, 综合治理后夜容性无功过剩及单相接地故障电流过大的问题. 仿真结果表明: 装设并联电抗器后, 空载时母线处及短路时故障点的电容电流都有明显下降. 同时也定量计算出不同电缆出线长度时所需电抗器的参数, 为工程应用提供参考.

关键词: 电缆; 电容电流; 电抗器; 配电网

中图分类号: TM71

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.04.016

0 引言

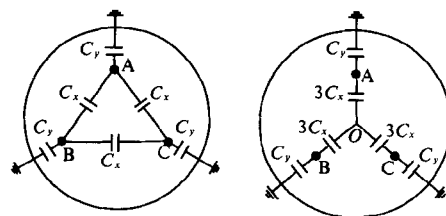
近几年, 由于大规模城网改造, 原有的以架空线为主的配网系统正逐步被电缆取代, 使配电网电容电流大幅度增加, 容性无功的增加导致低谷负荷时配网电压升高, 造成电压超标^[1]. 统计表明, 北京、上海已出现后夜容性无功过剩, 直接影响发电厂正常运行, 发电厂夜间不得不采用进相运行方式, 造成电网损耗增大. 当发生单相接地时, 由于电容电流较大, 电弧不能自熄, 严重威胁中压电网的安全运行. 根据有关规程规定: 当 10 kV 配网系统接地电流超过 10 A 时, 应装设消弧线圈. 由于电缆长度不断增加, 目前河南省城区变电站配网接地电容电流大多已超过 50 A, 郑州市区某站的电容电流甚至达到 150 A 以上, 随着出线回路以及电缆长度的增加, 电容电流有进一步增大的趋势, 消弧线圈也越做越大, 有的刚刚安装投运就需要增大容量. 消弧线圈容量的增大虽然可以减少单相接地电流, 但无法解决容性无功过剩问题. 通过在 10 kV 母线上采用三相电抗器的方式, 正常运行时补偿电缆对地电容的容性无功; 当发生单相接地时, 也可大幅减少接地电容电流,

限制了接地过电压, 在一定程度上可降低消弧线圈的容量^[2-4].

1 电缆电容的计算分析

电缆线路参数与金属护套接地方式、互联和换位有关. 为便于分析, 笔者仅对金属护套内无电流的情况进行讨论, 认为各相电容参数相同.

图 1 为电缆电容分布示意图. 如图 1(a) 所示, 电缆导体之间、导体与电缆外皮之间均存在电容. 设单位长度电缆导体之间的部分电容为 C_x , 导体与电缆外皮之间的部分电容为 C_y , 根据“星形—三角形变换”法则, 图 1(a) 又可转换为与其等效的图 1(b).



(a) 原分布示意图 (b) “星形—三角形”变换后等效图

图 1 电缆电容分布示意图

Fig. 1 Distribution map of the cable capacitance

当输电线路加以正序电压 $\dot{V}_{a(1)}$ 时, 在 A 相回路,

收稿日期: 2012-01-20; 修订日期: 2012-04-20

基金项目: 河南省重大科技攻关资助项目(102101210100)

作者简介: 王金凤(1977-), 女, 郑州大学讲师, 博士, 主要研究方向为电力系统分析与运行, E-mail: wangjinfeng@zzu.edu.cn.

单位长度上产生的正序电容电流

$$\begin{aligned}\dot{I}_{a(1)} &= j\omega 3C_x \dot{V}_{a(1)} + j\omega C_y \dot{V}_{a(1)} \\ &= j\omega (3C_x + C_y) \dot{V}_{a(1)}.\end{aligned}\quad (1)$$

因此输电电缆正(负)序电容为

$$C_{(1)} = C_{(2)} = I_{a(1)} / V_{a(1)} = 3C_x + C_y, \quad (2)$$

式中: C_y 为一芯对铅包的电容; C_x 为芯对芯间的电容; C 为一芯对中性点电容, 单位均为 F/km.

$\dot{V}_{a(1)}$ 和 $\dot{I}_{a(1)}$ 分别表示电压和电流的相量, $V_{a(1)}$ 和 $I_{a(1)}$ 为对应的标量^[5].

线路加以零序电压 $\dot{V}_{a(0)}$ 时, 通过 O 点不能产生零序回路, 零序电流只能通过电容 C_y 经大地形成回路, 因此在 A 相回路每单位零序电流 $\dot{I}_{a(0)}$ 为

$$\dot{I}_{a(0)} = j\omega C_y \dot{V}_{a(0)}, \quad (3)$$

因此, 输电电缆零序电容为

$$C_{(0)} = I_{a(0)} / V_{a(0)} = C_y. \quad (4)$$

2 线路补偿设计

在相同的电压下, 采用电缆线路的电容电流可达架空线路的数倍. 图 2 为电缆正常运行时电容电流的分布图, 由图 2 知, 线路始端每相(例如 A 相)的电容电流 \dot{I}_{cA0} 可用式(5)表示^[6-7],

$$\begin{aligned}\dot{I}_{cA0} &= \dot{I}_{cAy} + \dot{I}'_{cAx} = j\omega C_y l \dot{U}_{A\phi} + j3\omega C_x l \dot{U}_{A\phi} \\ &= j\omega (C_y + 3C_x) l \dot{U}_{A\phi} = j\omega C l \dot{U}_{A\phi}.\end{aligned}\quad (5)$$

式中: \dot{I}_{cy} 、 \dot{I}_{cx} 分别为相对地、相间电容电流; \dot{I}'_{cx} 为线间电容合成的线电容电流; l 为线路长度; \dot{U}_{ϕ} 为相电压, V.

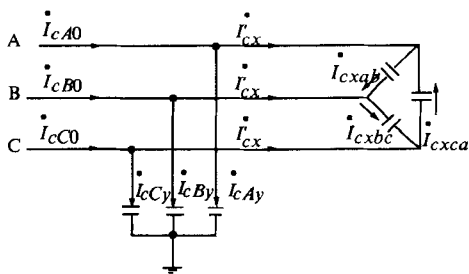


图 2 正常情况下的电容电流分布

Fig. 2 The distribution of capacitive current under normal circumstances

当电缆线路发生单相接地时, 故障点流过的电容电流 \dot{I}_{cd} 可用式(6)表示,

$$\begin{aligned}\dot{I}_{cd} &= \dot{I}_c + \dot{I}'_{cx} = \sqrt{3} \dot{I}_{cy} + j3\omega C_x l \dot{U}_{\phi} \\ &= \sqrt{3} \dot{I}_{cy} + j3\omega C_x l \dot{U}_{\phi} = j3\omega C_y l \dot{U}_{\phi} + j3\omega C_x l \dot{U}_{\phi}\end{aligned}$$

$$= j3\omega (C_x + C_y) l \dot{U}_{\phi} \quad (6)$$

当电缆总长度较大时, 故障点电流达到较大值, 假定在母线上设置并联电抗器(Y形连接). 装设电抗器后, 正常运行时, 由于电抗器电流与容性电流方向相反, 流入系统容性功率减小. 发生单相接地时, 由于部分容性电流通过对应相的电感形成回路, 使得故障点流回电流减小. 由式(6)可推得故障点流过电流减小为

$$\dot{I}_{cd} = j3(\omega(C_x + C_y)l - \frac{1}{\omega L}) \dot{U}_{\phi}. \quad (7)$$

3 算例及仿真分析

根据以上对电缆电容电流的补偿分析, 利用 MATLAB 仿真平台下的电力系统工具箱搭建一个全电缆出线的变电站仿真模型. 变电站 10 kV 母线侧加装三相并联电抗器, 对空载正常运行和单线接地两种方式进行仿真^[8]. 该模型中, 三相电源容量为 300 MVA, 主变一次侧电压等级为 110 kV, 连接方式为 Yg, 频率为 50 Hz, A 相初相角为零, 内阻为 0.892 9 Ω ; 变压器采用 Three-phase Transformer(Two Windings)模型, 共有 6 回出线. 线路 1、线路 2、线路 3、线路 4、线路 5、线路 6 长度分别为 8.5、7、8、9、10 和 10.5 km, 线路总长 53 km. 仿真中采用的电缆线路为 YJV22—3 \times 300 型号交联聚乙烯电力电缆. 单位长度电缆线路的电气参数见表 1.

表 1 电缆线路电气参数

Tab. 1 Electrical parameters of cable line

电气参数	电阻 /($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电感 /(mH $\cdot \text{km}^{-1}$)	电容 /($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
正序	0.103	0.219	0.289
零序	0.927	0.988	0.163

(1) 正常空载情况下仿真情况

正常空载运行时, 电缆线路对地电容电流峰值将达 $I_{c0} = 45.1$ A, 母线各相电流有一定畸变. 系统总的容性无功 $Q_c = \sqrt{3} UI = 552.4$ kvar.

按 75% 的补偿度在母线上并联三相电抗器, 即电抗器容量 $Q_l = 75\% Q_c = 414$ kvar, 并联电抗器的额定电流 $I_l = 75\% I_{c0} = 33.825$ A, 仿真验证说明了补偿前后母线电流的区别, 空载运行且无并联电抗器时, 电容电流较大; 装设并联电抗器后, 电容电流明显下降, 峰值回落到接近 10 A.

(2) 单相接地情况下仿真情况

设定在线路 6 近母线处发生 A 相单相接地故障, 在 0.02 s 时刻故障开始, 对有无并联电抗

器2种情况进行仿真.从图3和图4可以看出,单相接地时故障相母线电流峰值 I_{cd} 达到90.5 A,接近正常空载时的 I_{c0} (45.1 A)的2倍.

接入电抗器后母线处故障相电流峰值在故障瞬间短暂冲击后,迅速降落,稳定在11 A左右.从图5和图6对比可见,无并联电抗器时,故障点接地电流峰值稳定在69 A左右,接地点处若燃起电弧将难以熄灭,引起过电压.接入并联电抗器后,接地点处电流峰值在故障发生瞬间短暂冲击后,迅速降落,有效值已经在10 A以下.

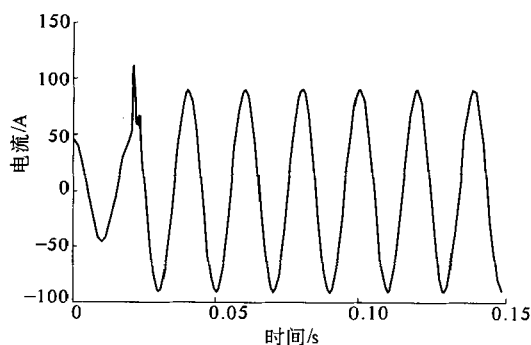


图3 单相接地时故障相母线电流(无并联电抗器)

Fig. 3 Fault phase bus current When single-phase grounded (No reactor)

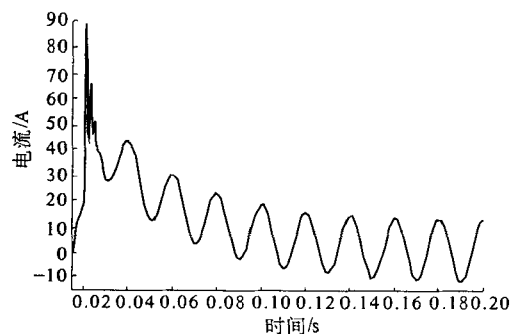


图4 单相接地时故障相母线电流(有并联电抗器)

Fig. 4 Fault phase bus current when single-phase grounded (Reactor existing)

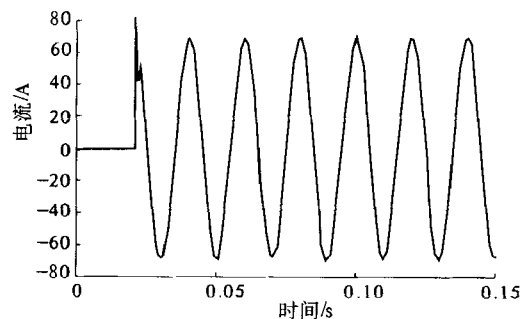


图5 单相接地时接地点电流(无并联电抗器)

Fig. 5 Grounding current when single-phase grounded (No reactor)

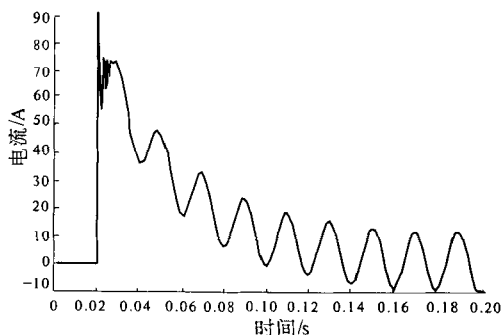


图6 单相接地时接地点电流(有并联电抗器)

Fig. 6 Grounding current when single-phase grounded (Reactor existing)

4 电抗器参数的选择

为了简化分析,上述仿真没有考虑中性点接消弧线圈,只选取了6条配电线路.现代城市配电网中,变电站10 kV母线侧每段出线一般在15~20回,每回线路干线加支线等效长度在8~15 km,则电缆出线总长度达120~300 km.考虑到变电站投运初期,出线回数不多,可将电缆出线总长度定为50~300 km.此外,消弧线圈在配电网接地电流大于150 A的情况下,补偿效果已经不佳,在变电站后期出线增多、接地电流增大的情况下,可考虑加装并联电抗器,配合消弧线圈一起使用,达到更好的补偿效果.若接地点电流超过300 A时,可考虑采用中性点经小电阻接地,以便保护装置能够及时的切除故障.

通过仿真计算得出不同电缆出线长度情况下接地点电流和电抗器参数,如表2所示.当电缆出线长度超过50 km时可在母线上加装并联电抗器,电抗器可采用磁阀式可控电抗器,利用直流电流控制铁芯的饱和程度实现连续平滑地调节电抗器的电抗值,以适应不同电缆出线长度时对电容补偿的要求.

表2 电缆出线长度不同时接地点电流和电抗器电感

Tab. 1 Grounding current and inductance of reactor when the length of cable is different

电缆长度/km	补偿前接地点电流/A	补偿后接地点残流/A	电抗器电感值/H
50	54.1	3.5	1.263
100	109.6	4.2	0.652
150	162.7	4.3	0.423
200	205.1	5.7	0.315
250	256.9	8.5	0.254
300	297.6	9.6	0.206

5 结论

在城市配电网电缆比例增大的情况下,笔者采用在变电站母线上并联三相电抗器的方式,对正常空载和单相接地故障情况的母线电流和故障处电流进行了理论分析和仿真计算,结论如下:

(1)在后半夜负荷较轻的情况下,投入并联电抗器,利用其感性电流补偿母线上过大的容性电流,解决轻载时线路容性无功过剩的问题,避免因此而造成的配电网电压升高和发电机的进相运行,提高了系统稳定性,减少网损;

(2)当发生单相接地故障时,可大幅减少接地点的电容电流,有效降低消弧线圈的容量,配合消弧线圈达到更好的补偿效果;

(3)计算出不同电缆出线长度时,所需电抗器的电感参数,为工程应用提供参考。

参考文献:

[1] 骆敏,祝达康,徐敬友,等. 电缆运行对电力系统电

压的影响及其对策[J]. 供用电, 2006, 23(2): 7 - 10.

[2] 颜秋容,刘欣,王学锋,等. 铁路 10kV 电缆贯通线电容电流补偿度研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(2): 85 - 88.

[3] 要焕年,曹梅月. 电缆网络的中性点接地方式问题[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 84 - 89.

[4] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

[5] 李润先. 中压电网系统接地实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[6] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.

[7] 陈立军. 10 kV 配电网单相接地电容电流的工程计算方法探讨[J]. 继电器, 2006, 34(15): 83 - 85.

[8] 王晶,张有兵. 电力系统的 MATLAB/SIMULINK 仿真与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.

Compensation for Capacitive Current in Urban Distribution Network

WANG Jin-feng¹, BAO Yi¹, CHENG Yao-sen², YANG Shu-xia², GUO Han³, CHEN Yang¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Sanmenxia Power Supply Company, Sanmenxia 472000, China; 3. Yuzhou Power Supply Company, Yuzhou 461670, China)

Abstract: There are more and more cable lines in urban power distribution network, as a result, the capacitive reactive power is sent back when the load is light, and the fault current is very large when one phase is shortened. This paper established a model of a whole cable line transformer substation by using the PSB of MATLAB on the basis of the theoretical analysis and calculation. Through the simulation and reasonable selection of the parameters, the two problem are solved synthetically. The simulation results have shown that the capacitive current is reduced obviously at both the bus under no-load and failure point. At the same time, the parameters of the required reactor when the length of cable line is different, which can provide reference for engineering applications.

Key words: cables; capacitive current; reactor; distribution network