

配电网同杆并架线路接地故障中性点电压计算分析

宋云东¹, 苑舜^{1,2}, 赵春芳¹

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110023; 2. 国家电力监管委员会东北监管局, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 基于同杆并架线路的谐振接地配电网, 若一个系统发生单相接地故障, 该系统中性点电压会通过耦合电容传递给非故障系统, 可能导致消弧线圈的误动作。针对此问题, 通过理论分析得到影响非故障系统中性点位移电压的主要因素及变化趋势; 建立准确的电缆出线为主及架空线(对地电容不平衡)为主的变电站计算模型, 通过计算得到单相接地故障与非故障时两种系统中性点电压值。分析得如果同杆并架线路不超过 5 km 且其他系统参数设置恰当时, 系统不会发生耦合电容引起的消弧线圈误动。

关键词: 配电网; 同杆并架; 中性点电压

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0040-04

Calculation and Analysis on Ground-fault Neutral Point Voltage of Distribution Lines on Same Pole in Distribution Network

SONG Yun-dong¹, YUAN Shun^{1,2}, ZHAO Chun-fang¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China;

2. Northeast China Bureau of SERC, Shenyang 110006, China)

Abstract: For the distribution lines on same pole in a distribution network with neutral grounding, when single-phase grounding fault occurs in one system, the neutral point voltage transmits to the other normal system via coupling capacitor of distribution line on the same pole, and the voltage may result in the Peterson coil misoperation. In order to solve the problem, the main factors that affect the neutral point displacement voltage of the normal system are analyzed theoretically in this paper, the variations of the factors are obtained, and models of respective cable feeder lines substation and overhead lines substation are established. Therefore, the neutral point voltages of single-phase grounding fault and normal state are obtained by the models. If the length of the distribution lines on same pole is less than 5 km and other system parameters are set suitably, the Peterson coil misoperation induced by coupling capacitor doesn't occur in the system.

Key words: distribution network; distribution line on same pole; neutral point voltage

0 引言

在架空线为主的配电网中, 为增加输电能力, 同杆并架在配电网中是较为普遍的现象。近年来, 随着城市配电网发展, 线路走廊越来越紧张, 原有的架空线大部分被地下电缆替代, 但还存在一部分架空线, 且大都是同杆并架架空线路。配电网中同杆并架线路不仅常见, 而且形式多样, 如相同电压等级和不同电压等级的并架线路^[1,2], 笔者所研究的同杆并架线路为相同电压等级。

在我国配电系统中常见的中性点接地方式有 3 种: 中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和中性点经小电阻接地^[3-5]。国内系统电容电流较大的城市配电网, 一般不选择中性点不接地方式, 除少部分配

电自动化程度较高的城市采用中性点经小电阻接地, 其他城市大都采用中性点经消弧线圈接地系统接地方式^[6-9]。因此笔者主要研究中性点经预调式消弧线圈接地系统中, 同杆并架线路对系统中性点电压的影响。文[10]提到同杆并架线路系统中一条线路发生接地故障, 可能会引起另一条线路所在系统故障, 笔者对这类问题也进行了相关研究, 并通过计算证实了同杆并架线路长度只要不超过 5 km, 可以通过一定限制方法控制由于同杆并架线路引起消弧线圈的误动, 从而避免过电压。

1 同杆并架线路间谐振分析

如图 1, 某变电站两母线分列运行, 同杆并架两线路分别是两母线的出线。C 和 C' 分别为母线系

收稿日期: 2008-05-19; 修回日期: 2008-12-23

作者简介: 宋云东(1978), 男, 博士研究生, 主要从事中压电缆网过压、配电网可靠性与选线技术研究。

统和母线系统的对地电容; C 为同杆并联线路之间的电容; L 和 L 分别为安装在母线系统和母线系统中消弧线圈的电感, R 和 R 分别为安装在母线系统和母线系统中消弧线圈的阻尼电阻。

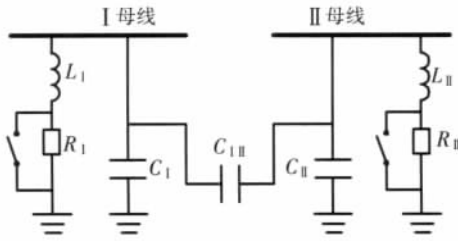


图1 同杆并架线路耦合示意图

当母线中某条出线发生单相接地故障,可简化为图2。图2中 u_{N1} 和 u_{N2} 分别为母线和母线的中性点电压, u_{N2} 也可以认为是母线故障相的相电压(金属性故障); R_0 和 R_0 分别为母线和母线系统的零序电阻^[11]。

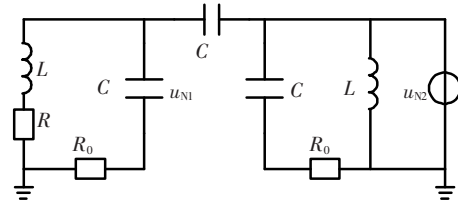


图2 同杆并架线路发生单相接地故障时的原理图

文[10]中图3为图2的简化等值电路,即图2中消弧线圈的阻尼电阻及回路中其他零序电阻被忽略。且根据消弧线圈的补偿情况分为3类进行阐述:完全补偿时,系统可能出现虚拟接地;过补偿时,系统中性点可能出现非常高的串联谐振过电压;欠补偿时,系统中性点不会出现过电压。上述的零序电阻特别是消弧线圈的阻尼电阻是否可以被忽略下面进行研究。

2 系统中性点电压计算

由于除阻尼电阻以外的零序电阻相对于阻尼电阻较小,从而只考虑阻尼电阻影响,所以可将图2简化为图3所示电路。

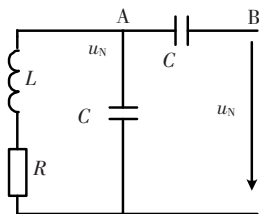


图3 等值电路

2.1 忽略阻尼电阻时中性点电压

如文[10]图3所示,不考虑阻尼电阻,则 u_{N1} 可以通过式(1)计算得到

$$u_{N1} = \frac{Z_{0A}}{Z_{0B}} u_{N2} = \frac{1}{1 + \frac{C}{C} + \frac{1}{j\omega C} \frac{1}{j\omega L_1}} u_{N2} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C} \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j\omega C} u_{N2} \quad (1)$$

$$u_{N1} = \frac{1}{1 + \frac{C}{C} + \frac{1}{j\omega C} \frac{1}{j\omega L_1}} u_{N2} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C} \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j\omega C} u_{N2} \quad (1)$$

若系统发生单相接地故障,设定 u_{N2} 为相电压,根据式(1)可以得到系统中性点电压与其消弧线圈 L 的关系,见图4。其中 $C = 44.1 \mu\text{F}$, $C = 0.18387 \mu\text{F}$, $\omega = 100\pi$ 。得到的结论与文[10]分析结果相同。由图4结合式(1)可得,在过补偿状态下, u_{N1} 最大为相电压,只要恰当控制消弧线圈的脱谐度,可以从理论上将中性点电压控制在较小的范围内。

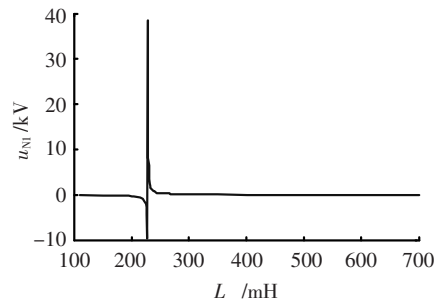


图4 u_{N1} 与 L 的关系

2.2 考虑阻尼电阻时中性点电压

如图3所示,考虑阻尼电阻,由式(2)可得 u_{N1}

$$u_{N1} = \frac{Z_{0A}}{Z_{0B}} u_{N2} = \frac{1}{\frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C} \frac{1}{\frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C} u_{N2} = \frac{u_{N2}}{1 + \frac{C}{C} + \frac{1}{j\omega C} \frac{1}{R + j\omega L_1}} \quad (2)$$

若系统发生单相接地故障,设定 u_{N2} 为相电压,根据式(2)可以得到系统中性点电压与其消弧线圈 L 的关系见图5,其中 $C = 44.1 \mu\text{F}$, $C = 0.18387 \mu\text{F}$, $\omega = 100\pi$, $R = 28 \Omega$ 。显然所得结果与不考虑阻尼电阻的差别很大,中性点电压较低,如果仅有同杆并架线路耦合作用不会导致消弧线圈误动作。

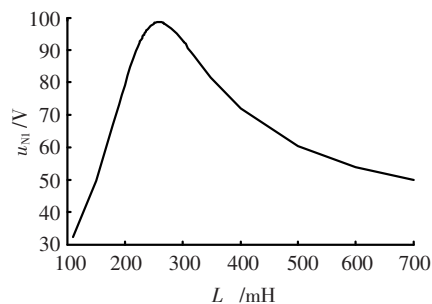


图5 考虑阻尼电阻时 u_{N1} 与 L 的关系

2.3 阻尼电阻对中性点电压的影响

系统参数为 $L = 229.75 \text{ mH}$, $C = 44.1 \mu\text{F}$, $C = 0.18387 \mu\text{F}$ 。利用式(2)得阻尼电阻对中性点电压的影响见图6。随着阻尼电阻的增大,中性点电压是减小的。仅从减小中性点电压的角度而言,阻尼电阻越大越好。

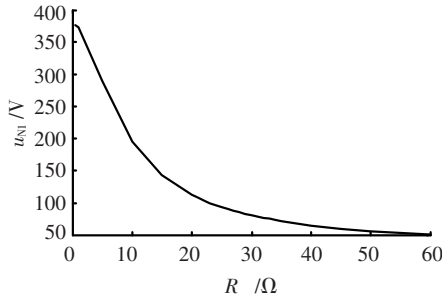


图6 u_{N1} 与 R 的关系

2.4 耦合电容大小对中性点电压的影响

系统参数为 $L = 229.75 \text{ mH}$, $C = 44.1 \mu\text{F}$, $R = 28 \Omega$ 。利用式(2)得中性点电压与同杆并架线路耦合电容的关系见图7。显然,随着线路长度的增加,耦合电容的增大会使得中性点电压不断升高。消弧线圈启动条件是系统中性点电压为35%相电压(对于预调式消弧线圈)。图7中,当 $C = 1.4535 \mu\text{F}$ 时,中性点电压为2200V,即理论上同杆并架线路电容为此值时,中性点电压才到达消弧线圈的启动条件。一般城市配电网的供电半径为2~3km,则其耦合电容 $C < 0.1 \mu\text{F}$,此时理论上中性点电压为180V,显然不可能达到消弧线圈的启动条件。

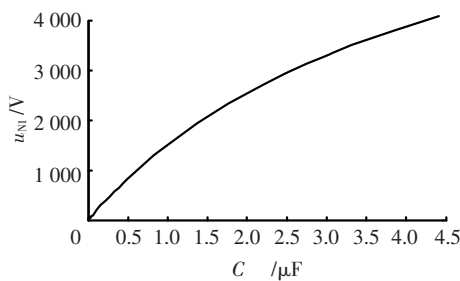


图7 u_{N1} 与 C 的关系

2.5 小结

由上述计算分析得同杆并架线路其中一个系统发生单相接地故障后,影响另一个系统中性点电压的因素及规律。计算分析过程中假定三相线路对地电容平衡,得同杆并架线路某一系统发生故障时,对另一个系统的影响不大。实际配电网三相线路对地电容是不平衡的,因此,需要综合不平衡电容对中性点电压的影响。下面运用EMTP计算软件建立不同配电网的计算模型,进行大量计算并将总结出同杆并架线路对配电网中性点电压的影响。

3 仿真计算

3.1 模型的建立

变电站的主接线图见图8,两母线由两主变供电,分列运行,母线电容电流为80A,母线电容电流为60A。两母线的出线以电缆线路为主,虚线框内的线路为同杆并架线路。

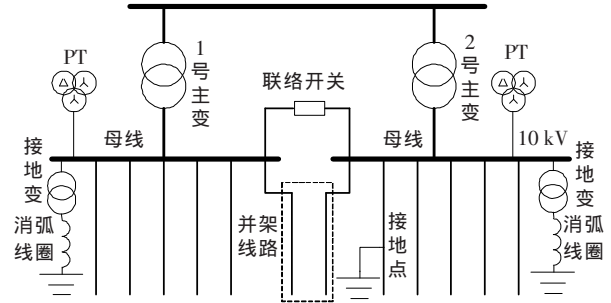


图8 变电站的主接线图

由变电站主接线利用EMTP计算软件,建立仿真计算模型。其中主变压器使用BCTRAN模块实现,建立了恰当的接地变压器模型,电缆线路和同杆并架线路都是使用J.Marti模型实现,建立正确的电压互感器(PT)模型^[12-14]。因此,该模型可以有效模拟混合电缆网实际运行,计算结果具有较高准确性。

3.2 中性点电压计算

同杆并架线路的排列方式一般有两种:一字排列及平行排列,见图9。母线安装有消弧线圈, $R = 20 \Omega$, $L = 297 \text{ mH}$,母线消弧线圈的参数 $R = 10 \Omega$, $L = 228 \text{ mH}$ 。在母线非故障状态及母线系统发生单相接地故障(A、B、C相分别接地)时,得母线中性点的位移电压,见表1。

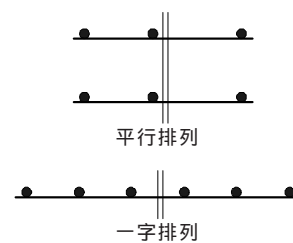


图9 导线的两种排列方式

由表1得在线路长度不超过5km时,无论系统是否发生单相接地故障,中性点电压都不会达到消弧线圈的启动值。对比两种线路的排列方式可得,在线路长度较短时,一字排列方式比平行排列方式的中性点电压低。城市配电网中,由于供电半径较小,因此,同杆并架线路应该选择一字排列方式较为适合。电缆线路对地电容平衡度较好,因此,系统在非故障运行状态下,中性点电压较低。

如果变电站出线是以架空线为主,对地电容不平衡严重,可能导致中性点电压升高^[15,16]。假如A相、B相对地电容 $C_A = C_B = 14.95 \mu\text{F}$,C相对地电容

表1 两种排列方式下系统中性点电压

类别	平行排列/V		一字排列/V		
	最大值	稳定状态	最大值	稳定状态	
1 km	A 相接地	570.91	570.91	528.89	528.89
	B 相接地	470.13	470.13	458.63	458.63
	C 相接地	498.98	498.98	480.55	480.55
	正常	511.98	511.98	488.74	488.74
2 km	A 相接地	633.00	633.00	550.07	550.07
	B 相接地	468.38	435.04	419.21	408.06
	C 相接地	496.79	496.79	456.70	456.70
	正常	514.70	514.70	471.02	471.02
3 km	A 相接地	695.35	695.35	572.44	572.44
	B 相接地	469.80	405.04	403.26	357.52
	C 相接地	502.80	502.80	466.06	466.06
	正常	517.48	517.48	456.37	456.37
4 km	A 相接地	757.93	757.93	595.83	595.83
	B 相接地	471.46	381.45	390.54	307.09
	C 相接地	516.89	516.89	481.62	481.62
	正常	520.21	520.21	445.11	445.11
5 km	A 相接地	820.72	820.72	620.30	620.30
	B 相接地	473.56	365.60	380.01	256.88
	C 相接地	538.32	538.32	511.12	511.12
	正常	522.87	522.87	437.50	437.50
10 km	A 相接地	1 166.50	1 166.50	652.66	652.66
	B 相接地	509.90	509.90	399.63	225.73
	C 相接地	749.80	749.80	849.09	849.09
	正常	536.94	536.94	371.02	371.02
20 km	A 相接地	1 978.30	1 978.30	1 050.00	906.37
	B 相接地	1 095.30	1 095.30	973.52	954.03
	C 相接地	1 458.50	1 458.50	1 846.80	1 846.80
	正常	559.97	559.97	804.14	804.14
30 km	A 相接地	2 552.00	2 552.00	1 287.40	777.05
	B 相接地	1 773.40	1 773.40	1 692.40	1 692.40
	C 相接地	1 894.70	1 894.70	2 395.00	2 395.00
	正常	547.96	547.96	987.41	987.41

$C_C=14.2 \mu\text{F}$,其他参数同上,计算结果见表2。显然非故障状态下以架空线路为主的变电站中性点电压比以电缆线路为主的变电站中性点电压高;架空线系统中,当发生单相接地故障时,由于同杆并架线路电容耦合作用导致的电压升高不明显,且A相发生故障时,中性点电压比非故障状态下中性点电压低。随着同杆并架线路长度增加会使中性点电压升

表2 对地电容不平衡系统中性点位移电压

线路长度	故障类型	最大值/V	稳定值/V
1 km	A 相故障	1 011.90	986.91
	B 相故障	1 031.30	1 031.30
	C 相故障	1 018.30	1 018.30
	无故障	1 011.80	1 011.80
	A 相故障	1 026.30	973.46
2 km	B 相故障	1 066.20	1 066.20
	C 相故障	1 041.30	1 041.30
	无故障	1 026.20	1 026.20
	A 相故障	1 058.60	974.03
3 km	B 相故障	1 114.30	1 114.30
	C 相故障	1 093.00	1 093.00
	无故障	1 058.50	1 058.50
	A 相故障	1 077.30	964.04
4 km	B 相故障	1 150.90	1 150.90
	C 相故障	1 126.10	1 126.10
	无故障	1 077.20	1 077.20
	A 相故障	1 126.60	982.14
5 km	B 相故障	1 216.90	1 216.90
	C 相故障	1 195.50	1 195.50
	无故障	1 126.50	1 126.50

高明显。但是当长度不超过5 km时,只要消弧线圈选用恰当的电阻,是可以避免由于同杆并架耦合电容导致消弧线圈误动的。

对于文[10]中的事故,也可能是由于线路耦合电容较大及架空线路对地电容不平衡二者共同作用引起的消弧线圈误动作,产生较高的过电压。

4 结语

存在同杆并架线路的中性点经预调式消弧线圈接地配电网中,只要选择消弧线圈的脱谐度及阻尼电阻恰当,即可避免同杆并架线路配电网发生单相接地故障时由于线路耦合作用引起的消弧线圈误动作,从而防止过电压的产生。所以在设计和运行时应该注意以下几点:中性点经消弧线圈接地时,一定要采用过补偿;阻尼电阻要尽量大(在满足故障电压恢复速度的基础上);同杆并架线路长度一定要短(小于5 km);导线长度短时尽量采用一字排列导线。

参考文献:

- [1] 胡丹晖,蔡汉生,涂彩琪,等. 500 kV 同杆并架双回线路电气特性研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 21-23.
- [2] 黄爱华,郑旭,钱广忠. 同杆并架多回路技术的应用[J]. 华东电力, 2006, 34(8): 60-63.
- [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] 周原,赵立进,康鹏,等. 贵州省10 kV 城市配电网中性点接地方式[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 61-65.
- [5] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.
- [6] SONG Yun-dong, YUAN Shun, ZHAO Chun-fang, et al. Analysis and Selection of Neutral Grounding Modes in Cable Distribution Network [C]// Powereng 2007, Setúbal, Portugal, 2007: 518-521.
- [7] 董振亚. 城市配电网中性点接地方式的发展和改进[J]. 中国电力, 1998, 31(8): 38-41.
- [8] 陆国庆,姜新宇,梅中健,等. 配电网中性点接地的新途径[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 32-35.
- [9] 林志超. 中压电网系统中性点接地方式的选择与应用[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 60-64.
- [10] 孙海新,甄利,谢达. 10 kV 消弧线圈补偿系统线路耦合谐振分析[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 65-67.
- [11] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 中国电力出版社, 2004.
- [12] DOMMEL H W. EMTP Theory Book [M]. Protland, Oregon, USA: Bonneville Power Administration, 1986.
- [13] 周念成,赵渊,郑昭阳. 基于EMTP的电流互感器饱和特性仿真及分析[J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 240-243.
- [14] 徐政. 免费使用的电磁暂态分析程序——ATP-EMTP 程序介绍[J]. 电网技术, 1999, 23(7): 64-65.
- [15] 陈秀娟,陈维江,颜湘莲,等. 油田35 kV 配电系统三相电压不平衡问题研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 15-18.
- [16] 赵美莲,姚铁兵. 中性点不接地系统电压不平衡的几种现象分析[J]. 山西电力, 2005(1): 55-57.