

中性点不接地配电网故障过电压分析

毕见广, 郭永基, 孙元章, 董新洲

(清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 针对中性点不接地配电网系统, 分析了发生单相接地故障时的过电压特性, 着重分析了网络不对称参数对过电压特性的影响, 给出了故障时网络电压的变化特点, 利用电力系统仿真计算软件 NETOMAC, 对上述分析进行了仿真计算。并利用 MATLAB 对仿真数据进行分析, 验证了结论的正确性。

关键词: 配电网; 过电压; 仿真; 中性点不接地

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)12-0001-04

1 概述

中性点不接地配电网, 当发生单相接地故障时, 非故障相对地的电压将升高, 电压升高的程度和变化规律, 直接影响着此类系统的故障特性, 从而影响到系统的绝缘状况以及配网保护设备的特性如值设定和动作等情况, 另外非故障相的过电压与因接地故障所形成的跨步电压也密切相关。所以对中性点不接地系统进行严格、准确的故障过电压特性分析, 对于提高配电网的规划水平, 改善运行的经济性、可靠性和安全性都是十分必要的。

目前, 有关配电网过电压特性分析的文章^{[1][2]}很多, 但这些分析都是基于一个基本假设, 即系统的各种元件参数和线路的结构参数都是对称的。因此可以采用对称分量法^[3]进行正序、负序和零序分解, 对非对称故障进行分析。正常运行时, 系统三相电压是对称的。发生单相接地故障时电压的幅值和相位都发生了变化, 故障相电压降低, 非故障相电压幅值上升, 且上升的幅度是相同的。

但我国现行的配电网, 多数都没有经过完全的交叉换位, 所以网络参数一般是不对称的, 负荷也往往是不对称的, 如果用对称分量法来分析不对称故障时, 三序分量不是解耦的, 就不方便进行不对称故障分析。正是由于网络参数的不对称, 使得当系统发生单相故障时电压的变化不符合上述规律。相分量法^{[4][5]}可以充分表示参数不对称的网络结构, 并进行各种故障分析。本文利用相分量法和计算机仿真计算, 对中性点不接地配电网, 网络参数对称和不对称两种情况进行分析。特别分析了网络结构参数不对称对非故障相过电压的影响, 给出了故障时网络三相电压的变化规律。通过电力系统仿真计算软件 NETOMAC 和 MATLAB, 对分析结果进行了仿

真验证。

2 对称配电网故障过电压分析

在简单的配电网中, 假定网络的电源 \dot{E}_A , \dot{E}_B 和 \dot{E}_C 是对称的, 线路对地的电容是相等的, 即 $C_A = C_B = C_C$, 并假定网络的中性点 O 是不接地的, 如图 1 所示。

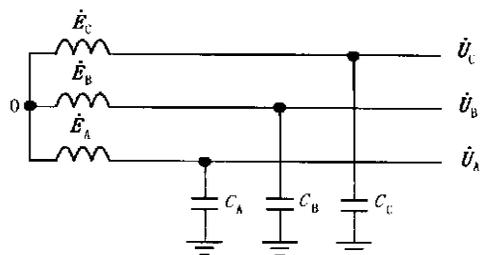


图1 简单三相配电网

当系统正常运行时, 由于电源电压和线路参数都是对称的, 所以中性点电压 $\dot{U}_0 = 0$, 线路电压 \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C 也是对称的, 相量如图 2(a) 所示。当系统发生金属性单相接地故障时, 故障相 A 相的电压 $\dot{U}_0 = 0$, 系统的中性点电压发生了偏移, 此时系统的中性点电压 \dot{U}_0 为系统正常时 A 相电压的负值, 即 $\dot{U}_0 = -\dot{E}_A$ 。由图 1 的电路知道, 非故障相 B 相和 C 相的电压 \dot{U}_B 和 \dot{U}_C 分别为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{U}_0 + \dot{U}_B = \dot{U}_B - \dot{E}_A = \dot{E}_A e^{-j150^\circ} \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_0 + \dot{U}_C = \dot{U}_C - \dot{E}_A = \dot{E}_A e^{+j150^\circ} \end{aligned} \quad (1)$$

故障时的电压相量如图 2(b) 所示。从故障相量图和公式 (1) 可以看出, 在系统发生故障时, 故障相的电压为零, 非故障相的电压幅值都上升了 $\sqrt{3}$ 倍, 二者的上升幅度是相同的, 它们之间的相位差是 60° , 此时三相对地的电压是不对称的, 但三相之间的线电压仍然保持对称。因此, 根据国家标准, 这种

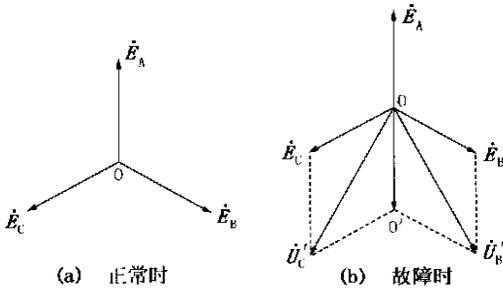


图2 对称网络电压相量图

系统允许带故障运行一段时间,并在此时间内快速查找故障原因和位置并切除故障。

3 不对称配电网故障过电压分析

在我国的实际配电网中,多数连接到输电网上,相对于配电网而言,输电网的参数采用对称参数表示,但配网的架空线路一般都不经过完全交叉换位,甚至根本就没有交叉换位,各相参数是不相同的,各相的阻抗及对地导纳都不完全相等。在这些参数中,对中性点电压影响最大的是线路对地的分布电容。假设图1的网络中三相对地的电容分别是 C_A, C_B, C_C ,且 $C_A > C_B > C_C$ 。

在正常运行时,根据戴维南定理推出,中性点对地的电压 \dot{U}_0 为:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (2)$$

其中, Y_A, Y_B, Y_C 分别为三相对地的导纳。

以A相为基准,忽略电导,式(2)可以改写成:

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_A \cdot \frac{C_A + 2C_B + C_C}{C_A + C_B + C_C} \quad (3)$$

其中 $\dot{U}_B = \dot{U}_A e^{j120^\circ}$

从式(3)可以看出,线路的分布电容,直接影响系统中性点电压,当 C_A, C_B, C_C 各不相等时,中性点对地的电压 \dot{U}_0 的幅值是不等于零的,相位发生了变化。所以,对于线路参数不对称的配电网,在系统正常运行时,中性点的电压就产生了偏移,根据式(1)可知,A、B、C相对地的电压幅度不再相等,互相的相位也不是 120° ,即系统各相对地电压是不对称的。图3展示了是当 $C_A > C_B > C_C$ 时,系统电压的相量图。

设在A相发生单相接地故障, $Y_A = 0$,此时由于接地故障引起的参数不对称,较线路结构参数的不对称要大得多,所以系统中性点电压偏移,主要是由于短路故障造成的。忽略次要因素,则根据式(3)可

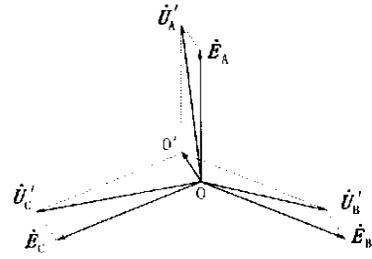


图3 不对称网络电压相量图

以近似得到中性点电压 \dot{U}_0 :

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_A \cdot \frac{2C_B + C_C}{C_B + C_C} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,中性点对地的电压偏移的幅值和相位与线路对地的电容的大小密切相关,从而影响到故障时非故障相电压幅值升高和相位变化的程度, C_B 和 C_C 的大小改变, \dot{U}_0 以及 \dot{U}_B, \dot{U}_C 都随着发生变化。如图4的相量所示,当B相对地的电容大于C相对地电容时, \dot{U}_0 在相位上更接近 \dot{U}_B ,同时B相过电压的幅值较C相过电压的幅值高;反之,则 \dot{U}_0 在相位上更接近 \dot{U}_C ,B相过电压的幅值较C相过电压的幅值低。从这里可以看出,对中性点不接地系统来说,由于各相对地的电容不一样,使得非故障相电压幅值升高和相位变化的程度都不一样,与对称系统的非故障相电压的等幅上升的结论是不同的。

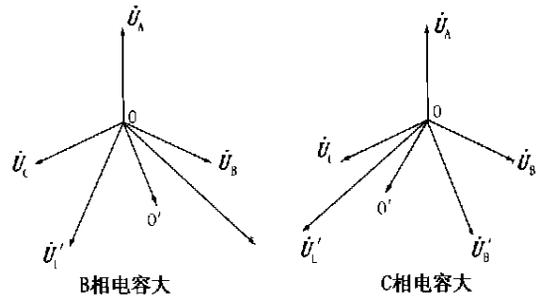


图4 不对称网络故障时的电压相量图

4 发生单相故障时,线路中各相电压变化分析

从以上分析可以看出,中性点不接地配电网,当发生单相接地故障时,系统产生了零序电压和不对称电压,即在故障点故障相的电压为零,非故障相的电压幅值升高,当参数不对称时,两个非故障相电压升高的程度也不一样,同时相位发生了与对称网络不同的变化;在电源点,电源 $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ 是对称的。也就是说,从电源点到故障点,故障相A相的

电压由 \dot{E}_A 变化到故障点的零,非故障相电压分别由电源电压 \dot{E}_B 和 \dot{E}_C 变化到故障点的电压 \dot{E}'_B 和 \dot{E}'_C 。尽管网络参数是不对称的,但对每相线路来讲,其分布参数是均匀变化的,即线路上各相的电压是由电源点线性的变化到故障点电压,图5的相量图,直观地描述了故障时,线路上电压的变化情况,三个相量分别代表电源相量、线路上某一点的相量和故障点的相量。

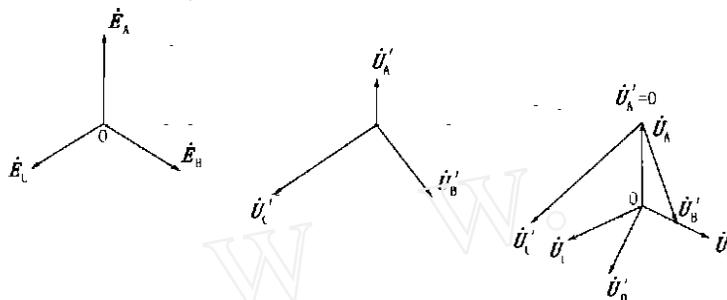


图5 不对称网络故障时线路的电压相量图

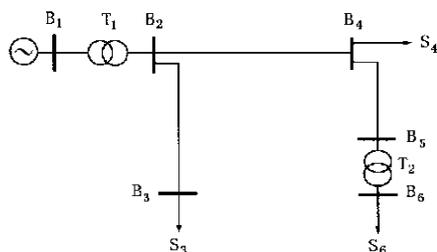


图6 仿真网络结构

5 NETOMAC 仿真分析

为了验证线路参数不对称对系统故障过电压的影响,针对图6的放射型网络结构模型,利用NETOMAC仿真计算软件进行了大量的仿真,并通过MATLAB对仿真的数据进行了分析计算。在模型中,电源和变压器采用对称参数表示,负荷是对称的,所有线路均采用平行排列的架空线,没有进行交叉换位,所以用相分量法表示。这样的模型可以充分地反映参数不对称与故障过电压的关系。

表1 正常运行时电压

节点	A相		B相		C相	
	幅值	相角/(°)	幅值	相角/(°)	幅值	相角/(°)
B1	1.0000	0.00	1.0	240.00	1.0000	120.00
B2	0.9999	24.84	0.9989	269.47	0.9929	149.12
B22	0.9591	26.06	0.97027	272.44	0.9733	146.33
B24	0.9166	23.23	0.9398	265.76	0.9520	143.66
B3	0.8284	17.49	0.8702	262.47	0.9060	138.48

为了较全面地了解故障过电压特性,分别对不同长度的网络,进行了仿真计算和数据分析,得到了在正常运行和故障时系统中各点的电压相量。

表1和表2列出了线路的长度为112km,在节点B3发生单相故障时,节点B1、B2、B3、B22和B24的电压,其中B22、B24是在B2到B3线路上的两个点,B22距离B2长度分别为线路长度1/3,B24距离B2的长度为线路长度的2/3,表1是系统正常运行时的电压,表2是故障时各节点的电压。

比较表1和表2的数据可以看出,由于电源是采用“无穷大”电源模拟,所以其电压是对称的,而线路上其他各点电压,由于网络参数不对称,在正常运行时系统电压就有轻微的不对称;当发生单相接地故障时,从节点B1到B3,故障相电压由电源电压逐渐变化到故障点的零电压,两个非故障相的电压幅值都上升了,但二者都不是正常电压的 $\sqrt{3}$ 倍,不符合对称网络非故障相电压等幅上升的分析结论。此时线路上B相电压的最大幅值是正常电压的1.4861倍,比对称网络的上升幅度 $\sqrt{3}$ 要小,而C相电压最大值达到正常电压的2.005倍,明显超过了正常电压的 $\sqrt{3}$ 倍。另外,从表2中B2到B3各点的电压相角可以看出,故障时各相之间的相位差发生了变化,A、B两相的相位差约为 160° ,B、C两相的相位差约为 -58° ,C、A两相的相位差约为 -104° ,这与对称网络单相故障时,线电压相位保持 120° 的对称相差是不同的。

表2 故障电压

节点	A相		B相		C相	
	幅值	相角/(°)	幅值	相角/(°)	幅值	相角/(°)
B1	1.0000	3.49	1.000	243.47	1.0000	123.49
B2	0.5131	63.27	1.4861	226.11	2.0005	168.95
B22	0.3841	63.09	1.4654	225.58	1.9338	167.61
B24	0.2518	62.87	1.4367	225.24	1.8601	166.31
B3	0.0000		1.3566	225.12	1.6938	163.78

通过改变线路的长度,观察线路长度变化对故障过电压的影响,也就是观察分布电容对过电压的影响。图7的四个图分别是线路长度为128km、64km、32km和16km时,线路上各点非故障相电压的变化曲线,横坐标分别表示B1、B2、B22、B24和B3节点,纵坐标表示电压的幅度,每个图上边上的曲线表示C相电压,下面的曲线表示B相的电压。

由图7可以看出,当线路长度较短时,由于线

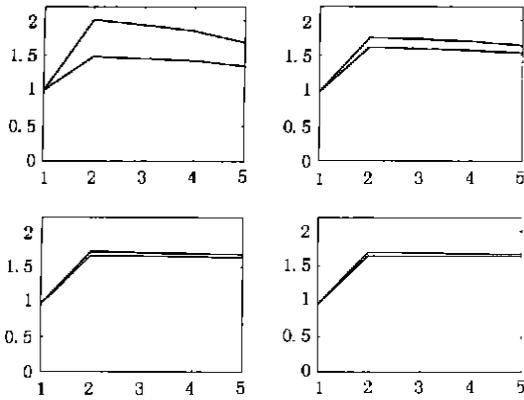


图7 电压变化曲线

路分布参数不对称所引起的非故障相的过电压程度就是不相等的,但二者的相对差别不大。当线路的长度为 14km 时,B 相的最高电压为正常电压的 1.68 倍,C 相的最高电压为正常电压的 1.72 倍。随着线路的长度增加,线路之间参数不对称的绝对数值增大,从而使得非故障相的电压差别逐渐增大,如线路长度为 128km,B、C 两相的最高电压分别为正常电压的 1.4861 倍和 2.005 倍。并且相对故障相,电容小的相比电容大的相电压升高的幅度大,如平行排列的架空线,A、B 两相之间的电容较 C、A 两相的电容大,当 A 相接地故障时,C 相电压比 B 相的电压高,因此电容大的 B 相的电压升高的程度低,电容小的 C 相的电压升高的程度高。

6 结语

对于中性点不接地,线路没有经过完全交叉换位配电网,系统的故障过电压与线路的分布电容的大小直接的影响,并随着线路的长度增加影

响的程度增大,当线路较长时,非故障相过电压程度可能达到正常电压的 2 倍以上,各相之间的相互相位差也不是 120° ,明显出现电压不对称的情况。因此,在配电网的规划设计以及运行等方面,包括绝缘、跨步电压、保护设定等等,仅仅考虑故障电压上升 $\sqrt{3}$ 倍是不够的,必须考虑到不对称电压的因素。通过电力系统仿真计算软件 NETOMAC 和 MATLAB 仿真计算证明所有结论是正确的。

参考文献:

- [1] Lakervi E, Holmes EJ 著,范天明,张祖平,岳宗斌译.配电网规划与设计(第二版).北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地.北京:中国电力出版社,2000.
- [3] 何仰赞,温增银,等.电力系统分析(第2版).武汉:华中理工大学出版社,1996.
- [4] Laughton M A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase co-ordinates part 1 system representation in phase frame of reference. PROC IEE, 1968, 115(8).
- [5] Laughton M A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase co-ordinates part 2 Fault analysis. PROC IEE, 1969, 116(5).

收稿日期: 2001-06-21

作者简介: 毕见广(1946-),男,博士研究生,主要研究方向是配电系统故障分析和保护; 郭永基(1934-),男,博士生导师,主要研究方向是电力系统稳定性和可靠性; 孙元章(1954-),男,博士生导师,主要从事 FACTS、电力系统非线性控制、电力系统安全经济控制的研究; 董新洲(1963-),男,副教授,主要从事继电保护的教授和研究。

Over-voltage analysis of faulted distribution networks with insulated neutral

BI Jian-guang, GUO Yong-ji, SUN Yuan-zhang, DONG Xin-zhou
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In accordance with distribution networks with insulated neutral point, over-voltage characteristics is analyzed when the line is single-line grounded in this paper. Especially, the influence of asymmetrical parameters on over-voltage is mentioned. The variation of the line-voltages is analyzed when the line is faulted. Simulation and calculation verifies the validity of analysis by means of NETOMAC and MATLAB.

Key words: distribution network; over-voltage; simulation; insulated neutral