

不同接地方式配电系统的单相接地故障仿真分析

陈亚,任建文

(华北电力大学电气工程学院,河北 保定 071003)

摘要: 首先介绍了配电网的3种接地方式(不接地、经电阻接地、谐振接地)的原理和特点,然后利用MATLAB仿真平台,对某10 kV配电网的这三种接地方式进行了仿真比较,针对该配电网的输电线单相接地问题给出了较为准确的数值仿真解,指出了中性点经消弧线圈接地方式是目前比较合理的接地方式。

关键词: 配电网; 谐振接地; 消弧线圈; 仿真

中图分类号: TM727 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)05-0067-05

0 引言

10 kV配电网中性点的接地方式是一个涉及面非常广的综合性问题,它不仅是一个技术问题,还是一个经济问题。首先,从技术的角度而言,它与整个电力系统的供电可靠性、人身安全、设备安全、绝缘水平、继电保护以及通信干扰和接地装置等技术问题有密切的关系。其次,配电网中性点接地方式的选择必须与整个系统发展的现状和发展规划进行技术经济比较,必须全面考虑其技术经济指标。随着电力工业的迅速发展和对供电质量要求的提高,选择一种有效的中性点接地方式是十分重要的。

1 配电网中性点接地方式

传统的配电网接地方式有3种:中性点不接地、经电阻接地及谐振接地。下面对这3种接地方式的原理及其特点做一个简单介绍^[1,4,5]:

中性点不接地,实际上是经过集中于电力变压器中性点的等值电容(绝缘状态欠佳时还有泄漏电阻)接地的,其零序阻抗多为一有限值,而且不一定是常数。此时,系统的零序阻抗呈现容性,因接地程度系数 $k < 0$, U 可能高于相电压,故非故障相的工频电压升高会略微高过线电压。最早的城市配电网由于规模不大,多采用中性点不接地方式。在这种接地方式下,系统发生单相接地故障时,流过故障点的电流为线路的电容性电流。在规模不大的架空线路网架结构中,这个值是相当小的,对用户的供电影响不大。而且各相间的电压大小和相位维持不变,三相系统的平衡性未遭破坏,允许继续运行一段时间(2h以内)。但是这种接地方式有一个极大的缺陷,就是当接地电流超过一定值时容易产生弧光接地过电压,将使系统的安全性受到很大的影响,对系

统绝缘水平要求提高。近几年国家和地方大力投资进行城网、农网改造,电网规模扩大,电缆线路不断增加,6~35 kV中压配电网原有的中性点不接地方式已不再适宜,并已逐渐被其他接地方式取代。

对于中压电网来说,中性点经电阻接地的最初出发点,主要是为了限制电弧接地过电压。电阻接地方式可以避免不接地方式中弧光接地过电压的产生,同时由于增大了故障线路的接地电流,使得故障选线可以很方便地实施,进而实现快速跳闸,使非故障线路不需要长时间承受过电压,降低了绝缘水平要求。对于以电缆为主又能实现环网供电的城市配电网,这是一种较为理想的接地方式。因为以电缆线路为主的电网发生单相接地故障时,流过故障点的电容电流很大,容易发展为相间故障,且多为永久性接地故障,需要及时跳闸,切除故障线路。而环网供电可保证供电的连续性,最大限度地减少停电范围。从目前国内农网及城网的发展情况看,依然是架空线路占多数,或架空线路和电缆混合电网,环网供电水平较低。这些情况决定了国内配电网以中性点经消弧线圈接地,也就是通常所说的谐振接地方式为主要的接地方式。

谐振接地系统即中性点经消弧线圈接地的电力系统。因为消弧线圈是一种补偿装置,故通常又被称为补偿系统。消弧线圈是一种铁心带有空气间隙的可调电感线圈。它装设于配电网的中性点。瞬间单相接地故障可经消弧线圈动作消除,保证系统不断电;永久单相接地故障时消弧线圈动作可维持系统运行一定时间,可以使运行部门有足够的时间启动备用电源或转移负荷,不至于造成被动;系统单相接地时消弧线圈动作可有效避免电弧接地过电压,对全网电力设备起保护作用;由于接地电弧的时间缩短,使其危害受到限制,因此也减少了维修工作

量;由于瞬时接地故障等可由消弧线圈自动消除,因此减少了保护错误动作的概率;系统中性点经消弧线圈接地可有效抑制单相接地电流,因此可降低变电所和线路接地装置的要求,且可以减少人员伤亡,对电磁兼容性也有好处。同时由于消弧线圈还会使故障相恢复电压上升速度变慢,保证电弧的熄灭和避免发生重燃,从而具有降低过电压水平,使瞬时性接地故障自动消除等优点。补偿电网在正常运行期间,为了限制中性点位移电压的升高,要求非自动消弧线圈适当的偏离谐振点运行。否则,预调式的自动消弧线圈一般应加限压电阻,以利于电网的安全运行。

2 系统建模和实现

2.1 输电线路模型和实现

架空输电线路的参数 R 、 L 、 C 是沿输电线路均匀分布的,一般不能当作集中参数元件处理,有些参数还是频率的函数。研究短路和潮流时只需要工频正序、零序参数,它们可以从手册中查到或者用简单的公式推出^[2]。

MA TLAB 6.5 里面的 SimPowerSystems (电力系统工具箱) 提供了输电线路的两种数学模型,分别是集中参数 π 型和基于 Bergeron's traveling wave method (贝杰龙的行波法) 的分布参数模型。两种数学模型需要的序阻抗参数定义为

$$\begin{cases} Z_0 = Z_s + 2Z_m \\ Z_+ = Z_s - Z_m \end{cases}$$

式中: Z_0 和 Z_s 分别为线路零序阻抗和正序阻抗。

图 1、2 是工具箱中的两种数学模型对输电线路仿真实现。虽然架空线路一般不能当作集中参数元件处理,但是当线路长度不超过 300 km 时,可不考虑线路的分布参数特性,而只用将线路参数简单的集中起来的电路表示^[6],所以在本文中用图 2 来模拟三相架空线路:

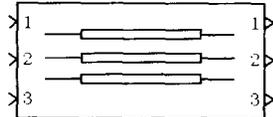


图 1 分布参数线路模型

Fig 1 Distributed parameters line model

本文中,还用到下面这种支路模型来模拟三相电缆线路,见图 3。

2.2 接地点的建模和实现

对接地点的建模,MA TLAB 工具箱提供了专门

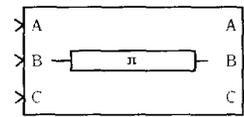


图 2 型线路模型

Fig 2 line model



图 3 三相串联 RLC 支路

Fig 3 Three-phase series RLC branch model

的实现途径,接地点的位置通过接地模块与输电线的直接连接实现;接地发生时刻通过 Breaker 模块内部参数 Switching times (转换时间) 来整定,如图 4 所示(注:图中的 R 模拟接地电阻)。

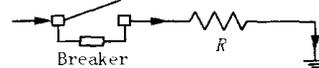


图 4 接地点模型

Fig 4 Ground fault model

2.3 系统集成后的模型

小电流接地系统是电力传输网的中间环节,根据电网络分割理论和等效代换理论,可将小电流接地系统从整个网络中分立出来。为突出主要因素,将小电流接地系统的入端简化为无穷大容量的三相电压源。如母线中性点有消弧线圈接地的系统,可将消弧线圈简化为电感和电阻,电感的数值可根据系统的接地电容电流和消弧线圈的补偿度计算得到(在下面的仿真实例中采用过补偿 10%)。图 5 是对整个小电流接地系统在 MA TLAB 仿真平台下的实现。

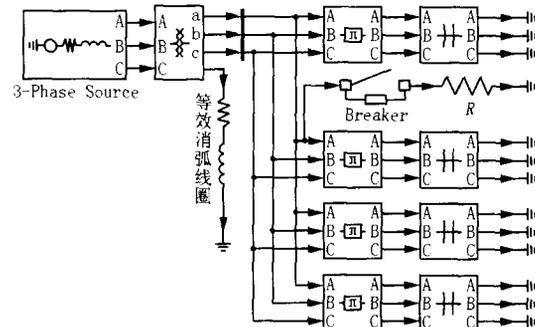


图 5 某小电流接地系统模型

Fig 5 Model of power system with ungrounded neutral

3 仿真实例

本文利用 MATLAB 仿真工具箱对某一 10 kV 配电网进行仿真。仿真了该配电网发生单相接地故障时,在中性点各种接地方式下系统的各相电压电流以及中性点电压的变化情况。

该电网中的变压器采用 Three - phase Transformer(Two Windings)模型,变比取 38.5 kV/10.5 kV,为 wye-wye 连接方式。母线带 4 条出线,这 4 条出线均是架空线路和电缆线路的混合线路。架空线路用 型线路模拟,电缆用集中电容表示。线路参数如表 1 和表 2 所示。假定系统在 0~0.04 s 时系统三相对称运行,在 0.04 s 时传输线发生单相接地(假定是 A 相故障)^[3]。

表 1 线路长度

Tab 1 Line length		km			
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	
电缆线路	1.670	0.967	1.185	2.530	
架空线路	6.257	13.13	4.895	9.438	

表 2 线路正序及零序参数一览表

Tab 2 Positive- and zero-sequence parameters of the lines

	$R_0 / (\Omega / km)$	$L_0 / (mH / km)$	$C_0 / (\mu F / km)$
架空线路	0.6	4.15	$5.2e-3$
电缆线路			0.27
	$R_1 / (\Omega / km)$	$L_1 / (mH / km)$	$C_1 / (\mu F / km)$
架空线路	0.45	1.19	$9.49e-3$
电缆线路			

当过渡电阻为 1 时,仿真得出的波形如下,其中图 6 和图 7 是中性点不接地时的波形,图 8 和图 9 是中性点经电阻接地时的波形,图 10 和图 11 是中性点经消弧线圈接地时的波形。

在仿真过程中,可通过改变过渡电阻值的大小来仿真电力系统单相接地的不同情况,表 3 到表 5 给出了当过渡电阻值分别为 0、10、100、2 k 和 (即无故障)时的各相电压电流值。

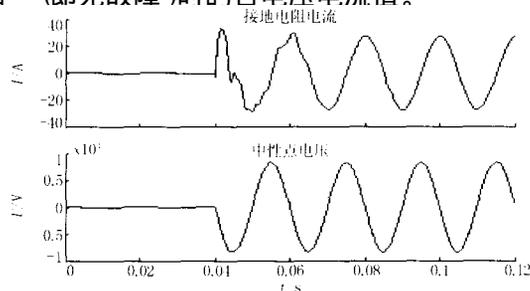


图 6 接地电阻电流和中性点电压波形(不接地时)

Fig 6 Waveforms of the grounded resistance current and the neutral point voltage (ungrounded)

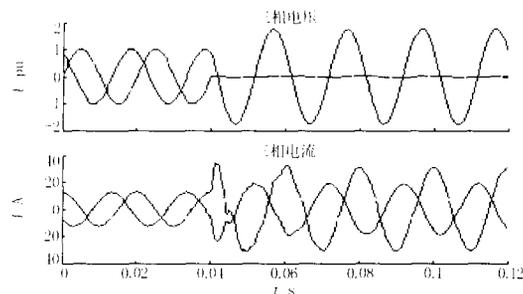


图 7 三相电压和三相电流波形(不接地时)

Fig 7 Waveforms of three-phase voltage and current (ungrounded)

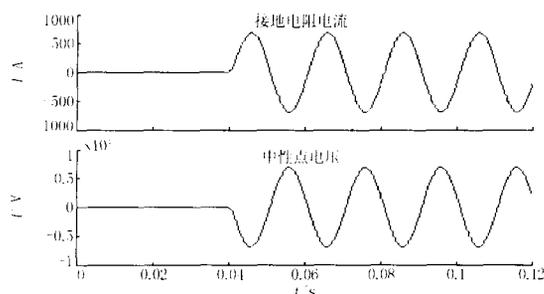


图 8 接地电阻电流和中性点电压波形(经电阻接地)

Fig 8 Waveforms of the grounded resistance current and the neutral point voltage (through a resistance)

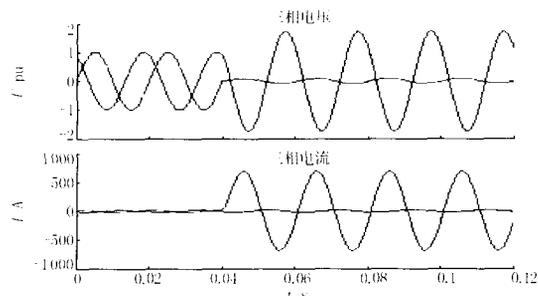


图 9 三相电压和三相电流波形(经电阻接地)

Fig 9 Waveforms of three phase voltage and current (through a resistance)

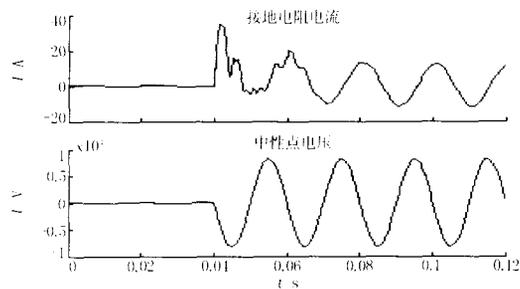


图 10 接地电阻电流和中性点电压波形(经消弧线圈接地)

Fig 10 Waveforms of the grounded resistance current and the neutral point voltage (through extinction coil)

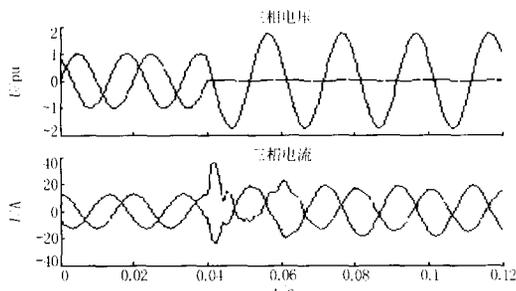


图 11 三相电压和三相电流波形 (经消弧线圈接地)

Fig 11 Waveforms of three-phase voltage and current (through extinction coil)

从上面的波形及表 3 到表 5 可以看出,如果发生单相接地故障,在过渡电阻大小相等的情况下,中

表 3 经消弧线圈接地时的电压电流

Tab 3 Voltages and currents when grounded through extinction coil

$R_g /$	I_a	I_b	I_c	I_{sum}	U_a	U_b	U_c	I_g	I_l	U_0
0	14.483	18.697	18.286	16.148	1.83e-5	1.7267	1.7453	10.977	16.064	0.8213
10	14.449	18.621	18.771	16.080	0.0134	1.7371	1.7512	10.940	16.078	0.8206
100	14.358	17.656	19.236	15.814	0.1320	1.6615	1.7936	10.779	15.843	0.8085
2 k	12.615	10.893	15.572	5.6887	0.9252	0.8432	1.3231	3.7771	5.5527	0.2814
	12.474	12.472	12.482	0.0108	1.0048	1.0045	1.0056	0.0082	0.0108	0.0006

表 4 不接地时的电压电流

Tab 4 Voltages and currents when ungrounded

$R_g /$	I_a	I_b	I_c	U_a	U_b	U_c	I_g	U_g	U_0
0	30.681	18.754	18.773	3.33e-5	1.7506	1.7520	27.156	0.2716	0.8273
10	30.661	18.572	18.937	0.0333	1.7329	1.7676	27.133	271.33	0.8265
100	29.333	16.530	19.760	0.3148	1.5258	1.8389	25.697	2569.7	0.7828
2 k	13.181	11.455	13.753	0.9921	0.8925	1.1480	4.0501	8100.2	0.1234
	12.476	12.472	12.478	1.0049	1.0047	1.0052	0.0082	8204.6	0.0003

表 5 经电阻接地时的电压电流

Tab 5 Voltages and currents when grounded through a resistance

$R_g /$	I_a	I_b	I_c	I_{sum}	U_a	U_b	U_c	I_g	I_r	U_0
0	748.37	15.814	19.662	750.91	0.0009	1.4803	1.8111	748.84	750.98	0.7510
10	396.23	14.301	15.820	397.48	0.4858	1.2506	1.3773	396.25	397.49	0.3975
100	75.258	12.825	12.979	74.501	0.9097	1.0488	1.0585	74.269	74.503	0.0745
2 k	13.119	12.496	12.501	4.0942	0.9998	1.0073	1.0076	4.0815	4.0943	0.0041
	12.477	12.475	12.478	0.0082	1.0048	1.0050	1.0050	0.0082	0.0082	8.23e-6

注:表 3 到表 5 的数据均为最大值,其中电压为标么值,电流为有名值。 R_g 为接地电阻, I_a 、 I_b 、 I_c 和 U_a 、 U_b 、 U_c 分别为变压器二次侧各相电流和电压, I_{sum} 为三相电流之和, I_g 和 U_g 分别为流过接地点的电流和电压, U_0 为中性点电压, I_l 为流过中性点所接消弧线圈的电流, I_r 为流过中性点所接电阻的电流。

5 结论

配电网中性点接地方式是一个涉及电力系统各方面的综合性问题。本文对配电网中性点不接地、经消弧线圈和电阻接地三种接地方式进行了仿真比较。

性点采用经电阻接地方式时流过故障相的电流最大,流过接地点的电流最大。而中性点采用经消弧线圈接地方式时,由于可形成一个与接地电流的大小接近相等但方向相反的电感电流,它与电网的接地电容电流相互补偿,所以使得流过故障相的电流最小,流过接地点的电流最小,从而消除接地处的电弧及其危害。

从表 3 到表 5 还可以看出,随着接地电阻的增大,采用这三种接地方式时,流过故障相和过渡电阻的电流都逐渐减小,当系统发生金属性接地故障(即 $R_g = 0$) 时,流过故障相电流和过渡电阻的电流值最大,因此对系统造成的危害也最大。

MA TLAB 仿真平台的出现,使电力系统工程师从繁琐的建模、编程中解放出来。它概念清晰,操作简单,有广阔的应用拓展空间。通过对小电流接地系统的数值仿真研究,可以克服理论分析上的抽象性,帮助电力系统分析应用人员形象直观地理解系统的运行特性。

随着电网的发展,加之接地继电保护选择性难题的攻克,中压电网中性点采用谐振接地(经消弧线圈接地)的优越性已逐渐显示出来。而且自动跟踪补偿装置或自动调谐装置使消弧线圈的功能和应用又上了一个新台阶,这必将使谐振接地方式成为中压电网中性点接地方式的发展方向。

参考文献:

- [1] 杜丁香,徐玉琴. 配电网谐振接地方式的控制[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(12): 54-56
DU Ding-xiang, XU Yu-qin. The Control of Resonant Grounded Distribution Network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(12): 54-56
- [2] 程祥,李朝晖. 变电站小电流接地数值仿真研究[J]. 水电能源科学, 2001, 19(2): 48-50
CHENG Xiang, LI Zhao-hui. Simulation Study on Single Ground Fault of Transmission Line[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2001, 19(2): 48-50
- [3] 杜丁香. 自动补偿电网单相接地故障选线原理的研究(硕士学位论文)[D]. 保定:华北电力大学, 2002
DU Ding-xiang. Study on the Principle of the Faulted Line Selection in an Auto-compensating Network, Thesis[D].

- Baoding: North China Electric Power University, 2002
- [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
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonant Grounded of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000
- [5] 曾文慧. 10 kV 中压电网中性点谐振接地方式[J]. 四川电力技术, 2002, (5): 38-40
ZENG Wen-hui. Resonant Grounded in a 10 kV Middle-voltage Network[J]. Sichuan Electric Power, 2002, (5): 38-40
- [6] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京:中国电力出版社, 1995.
CHEN Heng. Steady-state Analysis of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

收稿日期: 2004-07-02; 修回日期: 2004-09-13

作者简介:

陈亚(1979-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: cyncepu@163.com

任建文(1962-),男,博士,副教授,主要从事人工智能、电网调度自动化等方面的研究工作。

Simulation study of single-phase ground fault of different grounded distribution networks

CHEN Ya, REN Jian-wen

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Theory and characteristic of three kinds of grounded modes including ungrounded, grounded through a small resistance, resonant grounded are presented. After simulating and comparing these three grounded modes of a 10 kV distribution network with the graphics simulating software MATLAB, this paper derives resonant grounded is a rather proper grounded mode.

Key words: distribution network; resonant grounded; extinction coil; simulation

(上接第 66 页 continued from page 66)

收稿日期: 2004-06-16; 修回日期: 2004-07-09

作者简介:

张兵海(1968-),男,高级工程师,主要从事发电机变压器保护和线路保护的试验研究工作。

Configuration and setting research on back-up protection of turbine generator with self-shunt excitation

ZHANG Bing-hai

(Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Different from the traditional three-stage excitation, the excitation power of self-shunt excitation generator derives from the generator busbar by the excitation transformer. When phase-to-phase short-circuit fault occurs, the fault current will reduce quickly, further come to zero especially at the time of three-phase short-circuit fault happens at the generator terminal, because the generator start voltage reduces, and the excitation power will disappear in the following. So the principle, configuration and setting of the back-up protection should be different. In addition, this paper takes an overlook at the phase-to-phase fault back-up protection devices working on turbine generator units with self-shunt excitation, and details the methods of protection settings.

Key words: self-shunt excitation; generator; back-up protection