

# 附加电阻测量电网绝缘阻抗的新方法

赵建文

(西安科技大学电控学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对现有电网绝缘阻抗测量方法不能准确地检测区分电网阻抗中的对地绝缘电阻和对地电容的问题, 提出了附加电阻测量电网绝缘阻抗新方法的原理, 给出了对地绝缘电阻和对地电容的计算公式; 利用 Matlab 仿真试验证明了测量方法的正确性。该方法在电网某一相附加适当的接地电阻后, 检测零序分量, 测量出电网的对地绝缘电阻和对地电容。该原理方法准确、易实现、适用性广, 可用于不同的小电流接地系统。基于此方法, 利用微机很容易实现电网绝缘阻抗测量的智能化。

**关键词:** 附加电阻; 绝缘阻抗; 仿真; 方法; 测量

## New measuring method of insulation impedance based on additional resistant method

ZHAO Jian-wen

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The existing insulation impedance survey methods are unable to examine the difference between insulation resistant and distributing capacitance. This method puts forward a new insulation impedance survey method with a resistant adding single-phase line and the calculating expressions of insulation resistant and distributing capacitance. The correctness of the new method is proved by using simulation software MATLAB. After adding a suitable resistant to one phase line of power network, through checking the zero-sequence parameters, insulation resistant and distributing capacitance can be calculated. This method is of precision, easy actualization and extensive application. At the same time, it can be used for measurement of different low current grounding systems. Based on this new method, the insulation impedance survey will be intelligitized by microprocessor.

**Key words:** additional resistant; insulation impedance; simulation; method; measurement

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2006)24-0052-04

## 0 引言

对地绝缘电阻和对地分布电容, 是电网的绝缘阻抗两个部分, 是涉及电网安全运行的重要参数。电网的绝缘阻抗在很大程度上决定了电网有功泄漏电流和电容电流; 是影响电网人身触电电流、单相接地电流大小的主要因素; 是漏电保护, 接地保护、调谐等装置设置研究的依据。在有消弧线圈的谐振接地系统中, 电容电流的准确测量是消弧线圈合理调节的核心问题。在电网运行时, 绝缘电阻和对地电容受外界因素的影响而不断变化, 必须经常测量。

## 1 绝缘阻抗测量的现状

在文献和实际中, 多提到的是电容电流的测量方法, 如单相直接金属性接地法<sup>[1]</sup>、中性点外加电压法、中性点外加电容法、相对地附加电容法<sup>[2]</sup>、

调谐法<sup>[3]</sup>、不平衡电压实时测量法<sup>[4]</sup>、注入信号法<sup>[5,6]</sup>等。其实, 电容电流是对地电容在电网运行时的作用效应形式, 通过测量到的电容电流可进一步计算出对地电容来, 可见, 各种对电容电流的测量方法实质上是测量对地电容的方法。

在各种测量方法中, 除单相直接金属性接地法外, 其它测量方法都忽略了对地绝缘电阻的影响, 以系统的全电流(或全绝缘阻抗)来近似逼近电容电流(或对地电容)。换句话说, 不能区分绝缘电阻和对地电容, 这在绝缘电阻的影响极小时尚可, 但实际系统的绝缘电阻不可能完全忽略, 由此使绝缘参数的测量产生误差。另外, 现有测量方法在计算过程中附加元件均参加运算, 外加元件的标称值与实际值误差直接影响求得的电网绝缘参数的精确度。单相直接金属性接地法比较直观, 可以测出电网的绝缘电阻和对地电容, 能区分出残流的有功分量和无功分量, 但金属性接地具有某种危险性。

还有, 现有各种测量方法分别适用于某种特定中性点运行系统, 通用性差。

因此, 研究一种能区别检测电网的对地绝缘电阻和对地电容的方法显得极为必要; 同时, 这种电网绝缘阻抗的测量方法最好具有通用性, 能够应用于中性点不同运行方式的电网; 且安全, 准确。

## 2 附加单相对地电阻测量绝缘阻抗的原理

附加单相对地电阻测量绝缘阻抗的方法 (简称附加电阻法), 是在电网的某一相经电阻接地, 造成系统的不对称, 使线路中出现零序分量, 通过检测零序电压、零序电流的有功分量和无功分量, 或通过检测零序电压、零序电流及之间的相位角, 测取对地绝缘电阻和对地电容。计算公式在不同中性点运行电网中略有差别。

### 2.1 中性点经消弧线圈接地系统中附加电阻法测量

在中性点经消弧线圈接地的系统, 某相附加电阻  $R_r$  后, 利用对称分量法分析可得系统的零序有功、无功网络如图 1。在图 1 中, 零序电流被分解为零序有功电流  $I_{0p}$ 、零序无功电流  $I_{0q}$ ; 零序有功电流为流过对地绝缘电阻的零序电流, 零序无功电流为流过消弧线圈的电感电流  $3I_{L0}$  和流过对地电容的零序电流  $3I_{C0}$  之和。据零序有功、无功网络可得出对地绝缘电阻和对地电容的计算公式为:

$$r = \frac{3U_0}{I_{0p}}$$

$$C = \begin{cases} \frac{1}{3\omega^2 L} + \frac{I_{0q}}{3\omega U_0} & (3\omega C > \frac{1}{\omega L}, \text{ 欠补偿}) \\ \frac{1}{3\omega^2 L} & (3\omega C = \frac{1}{\omega L}, \text{ 谐振状态}) \\ \frac{1}{3\omega^2 L} - \frac{I_{0q}}{3\omega U_0} & (3\omega C < \frac{1}{\omega L}, \text{ 过补偿}) \end{cases}$$

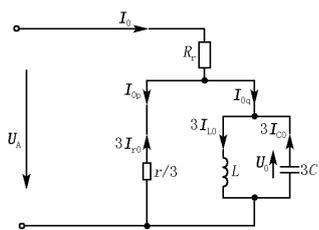


图 1 零序有功、无功网络

Fig.1 Zero-sequence active and reactive network

对于消弧线圈, 无论是固定式、手动式、还是自动调式, 其电感  $L$  的大小可知, 零序电压  $U_0$ 、零序有功电流  $I_{0p}$ 、零序无功电流  $I_{0q}$  可容易地检测出来, 故通过上式就能容易地计算出绝缘电阻  $r$ 、对地电容  $C$ 。上式是通过零序电流的有功和无功分量来测取电网绝缘阻抗的, 我们称为附加电阻电流分量法。

零序有功电流与零序电压的负向量同相位, 零序无功电流与零序电压的负向量垂直。图中的  $\phi$  为零序有功电流与零序全电流的夹角, 也是零序电流零序电压负向量的夹角; 且  $I_{0p} = I_0 \cos \phi$ ,  $I_{0q} = I_0 \sin \phi$ 。故此可得到计算对地绝缘电阻和对地电容的另一形式:

$$r = \frac{3U_0}{I_0 \cos \phi}$$

$$C = \begin{cases} \frac{1}{3\omega^2 L} + \frac{I_0 \sin \phi}{3\omega U_0} & (3\omega C > \frac{1}{\omega L}, \text{ 欠补偿}) \\ \frac{1}{3\omega^2 L} & (3\omega C = \frac{1}{\omega L}, \text{ 谐振状态}) \\ \frac{1}{3\omega^2 L} - \frac{I_0 \sin \phi}{3\omega U_0} & (3\omega C < \frac{1}{\omega L}, \text{ 过补偿}) \end{cases}$$

上式确定绝缘阻抗是通过检测零序电压和零序电流的相位差来实现的, 被称为附加电阻相位法。

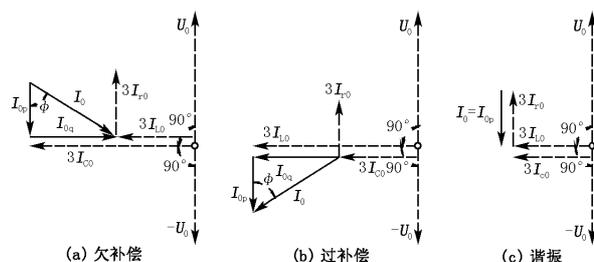


图 2 零序网络向量图

Fig.2 Vector diagram of zero-sequence network

### 2.2 附加电阻法在其它小电流接地系统中的应用

附加电阻法不仅用于谐振电网的绝缘阻抗测量, 而且可用于其它小电流接地系统的测量。在中性点不接地系统中, 电流分量法的计算公式为:

$$r = \frac{3U_0}{I_{0p}}, \quad C = \frac{I_{0q}}{3\omega U_0}; \quad \text{相位法的计算公式为:}$$

$$r = \frac{3U_0}{I_0 \cos \phi}, \quad C = \frac{I_0 \sin \phi}{3\omega U_0}。 \text{中性点经电阻接地系统}$$

中，电流法的计算公式为： $r = \frac{3U_0 R_N}{I_{0p} R_N - U_0}$ ，

$C = \frac{I_{0q}}{3\omega U_0}$ ；相位法的计算公式为：

$r = \frac{3U_0 R_N}{I_0 \cos\varphi R_N - U_0}$ ， $C = \frac{I_0 \sin\varphi}{3\omega U_0}$ ，注意公式中的  $R_N$

指中性点的接地电阻。

### 3 仿真实验

仿真利用 Matlab 软件实现。仿真的电路模型以某小煤矿的供配电系统为原型。该系统的电缆的动力线芯截面积  $s = 35 \text{ mm}^2$ ，动力线芯电阻  $r_0 = 0.56 \text{ } \Omega/\text{km}$ ，绝缘电阻  $r_g = 70 \text{ k}\Omega \cdot \text{km}$ ，导体电

抗  $x_0 = 0.64 \text{ } \Omega/\text{km}$  ( $L_0 = 0.2038 \text{ H}/\text{km}$ )，导体工作取电容  $c_0 = 0.200 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$ 。系统变压器的变比  $U_{1N}/U_{2N} = 10/0.4 \text{ kV}$ ，电阻  $R_T = 10 \text{ m}\Omega$ ，感抗对应电感  $L_T = 0.0968 \text{ mH}$ 。

在仿真实验中，针对中性点经消弧线圈接地的系统，中性点经电阻接地和中性点不接地三种不同的系统，分别对附加大小不同的电阻、电阻附加的不同点，不同长度的线路，不同的补偿方式等情况进行了验证。仿真数据较多，表 1~表 3 是部分仿真数据。在数据表中，电压单位 V，附加电阻的单位为  $\Omega$ ，对地电阻单位为  $\text{k}\Omega$ ，电流单位 A，相角单位度 ( $^\circ$ )，对地电容单位  $\mu\text{F}$ 。

表 1 中性点经消弧线圈接地系统欠补偿方式下线路首端附加不同电阻的测量值状态

Tab.1 Metrical data of resonance grounding power systems which added resistant to line's forepart and lacked compensating

$R_r$	$U_0$	$I_0$	$\varphi$	$r$	$\Delta r\%$	$C$	$\Delta C\%$
100	224.7	0.032 2	53.09	34.86	-0.40	0.403 4	0.85
200	222.7	0.031 93	53.11	34.86	-0.40	0.403 4	0.85
400	222.7	0.031 93	53.11	34.86	-0.40	0.403 4	0.87
600	215.1	0.030 83	53.11	34.86	-0.40	0.403 4	0.85
800	211.3	0.030 29	53.20	34.94	-0.18	0.403 6	0.90
1000	207.6	0.029 76	53.24	34.97	-0.09	0.403 6	0.90
1200	203.9	0.029 24	53.27	34.98	-0.05	0.403 7	0.92
1400	200.3	0.028 72	53.31	35.01	+0.05	0.403 7	0.92

表 2 中性点不接地系统线路末端附加不同电阻的测量值

Tab.2 Metrical data of neutral ungrounded power systems which added resistant to line's terminal

$R_r$	$U_0$	$I_0$	$\varphi$	$r$	$\Delta r\%$	$C$	$\Delta C\%$
100	212.21	0.082 031	77.19	35.00	+0.00	0.400 1	+0.03
200	2101	0.081 171	77.19	35.01	+0.02	0.400 1	+0.03
400	204.91	0.079 21	77.19	35.01	+0.02	0.400 1	+0.03
600	199.11	0.076 971	77.19	35.00	+0.00	0.400 1	+0.03
800	192.91	0.074 561	77.19	35.01	+0.02	0.400 1	+0.03
1000	186.31	0.072 031	77.19	35.00	-0.01	0.400 2	+0.05
1200	179.61	0.069 451	77.19	34.99	-0.03	0.400 3	+0.07
1400	172.91	0.066 861	77.19	34.99	-0.03	0.400 4	+0.11

表 3 中性点经电阻接地系统不同长度线路附加电阻的测量值

Tab.3 Metrical data of neutral point via resistance grounding power systems which added resistant to different length lines

线路长度	$U_0$	$I_0$	$\varphi$	$r$	$\Delta r\%$	$C$	$\Delta C\%$
0.5	45.10	0.226 5	1.07	140.86	+0.61	0.099	-0.44
1	44.09	0.222 5	2.14	69.81	-0.28	0.200 0	+0.00
2	42.13	0.214 9	4.24	34.52	-1.38	0.400 4	+0.08
3	40.29	0.207 9	6.30	23.27	-0.27	0.601 1	+0.18
4	38.54	0.201 4	8.31	17.55	+0.33	0.801 8	+0.22
5	36.89	0.195 5	10.27	13.98	-0.16	1.003 0	+0.30

从仿真结果可看出：无论线路的长短（表 3），无论附加电阻的附加位置和大小（表 1~表 3），无论何种补偿方式，所有的小电流接地系统，都能准确测量对地绝缘电阻和对地电容。即只要检测出零

序电压、零序电流及二者相位差（或检测出零序电流的有功分量和无功分量），就可计算出绝缘电阻和对地电容。附加电阻法测量绝缘参数具有通用性。

## 4 结束语

本文提出的附加电阻测量电网绝缘阻抗的方法具有以下特点:

1) 只要附加电阻得当, 供电系统相当于正常不对称运行, 测量装置的安全性高, 对电网的正常运行的影响程度低。

2) 绝缘阻抗的计算式中不含附加电阻, 附加电阻的标称值与实际值的误差不会对绝缘参数的测量计算产生误差, 附加电阻测量绝缘参数的原理精度高, 误差不超过 $\pm 1\%$ 。

3) 附加电阻测量绝缘阻抗的方法可应用于中性点不接地的系统、中性点经消弧线圈间接地的系统、中性点经电阻接地的系统等小电流接地电网, 该装置具有广泛的适应性。

4) 电流分量法和相位法虽表现形式不同, 但测量的实质是一样的。具体实施时, 电流分量法要求直接测取零序电流的有功和无功分量, 计算过程简单, 适用于微机测量系统; 相位法要求能测取零序电压和零序电流的相位, 涉及三角函数的计算, 用微机实现测量时, 算法复杂, 对 CPU 要求较高, 可考虑用于人工测量。

5) 附加电阻值的选取综合考虑电网的安全性和测量的灵敏性; 如 6 kV 电网, 附加电阻值可选为 500  $\Omega$ ~1000  $\Omega$ , 容量按短时工作考虑, 选 2~3 kW。

6) 基于附加电阻的测量方法的公式, 利用 DSP 等专用计算机很容易实现电网绝缘阻抗测量的智能化。

## 参考文献

- [1] 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.  
LI Run-xian. Practical Grounding Technology of Medium Pressure Network [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 郑南雁, 楚方求, 程友发. 10 kV 系统对地电容电流的测试 [J]. 继电器, 2000, 28(9): 56-58.  
ZHENG Nan-yan, CHU Fang-qiu, CHENG You-fa. Measuring of Ground Capacitive Current of 10 kV System [J]. Relay, 2000, 28(9): 56-58.
- [3] 连鸿波, 裴善鹏, 曲铁龙, 等. 谐振接地电网的电容电流自动跟踪测量 [J]. 郑州大学学报, 2005, 26 (2) : 51-54.  
LIAN Hong-bo, PEI Shan-peng, QU Yi-long, et al. Automatic Tracing of Grounding Capacitance Current in Resonance grounding Power Systems [J]. Journal of Zhengzhou University, 2005, 26 (2) : 51-54.
- [4] 袁进伶, 张涛. 6~66 kV 电力系统电容电流自动跟踪补偿及接地选线装置原理及应用 [J]. 中国电力, 1998, 31 (1) : 67-68.  
YUAN Jin-ling, ZHANG Tao. Theory and Application of Capacitive Current Automatic Tracing Compensation and Grounded Line Selection in 6-66 kV Power System [J]. Electric Power, 1998, 31 (1) : 67-68.
- [5] 欧阳旭东, 孙岩洲, 邱毓昌. 配电网对地电容电流的注入信号测量法 [J]. 电力电容器, 2004, (1): 39-40.  
OUYANG Xu-dong, SUN Yan-zhou, QIU Yu-chang. Measurement of Capacitive Current in Power Distribution Network Using Current Injection Methods [J]. Power Capacitor, 2004, (1): 39-40.
- [6] Griffel D, Harmand Y, Leitloff V, et al. A New Deal for Safety and Quality on MV Network [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(4): 1428-1433

收稿日期: 2006-08-08; 修回日期: 2006-10-10

作者简介:

赵建文 (1973-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事供配电安全方面的教学与研究。E-mail: xkdzhaojw@163.com

## (上接第 51 页 continued from page 51)

- DING Xiao-ying, WANG Xi-fan. Transmission Loss Modification in Location Marginal Prices Calculation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 14-18.
- [9] Shu T, Gross G. Transmission Loss Compensation in Multiple Transaction Networks [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 909-915.
- [10] 张永正, 文福拴, 严正, 等. 电力市场阻塞管理综述 [J]. 电网技术, 2003, 27(8): 1-9.  
ZHANG Yong-zheng, WEN Fu-shuan, YAN Zheng, et al. A Survey of Transmission Congestion Management in Electricity Markets [J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 1-9.
- [11] Singh H, HAO Shang-you, Papalexopoulos A. Transmission Congestion Management in Competitive Electricity Markets [J]. IEEE Transactions, 1998, 13(2): 672-680.
- [12] 李卫东, 孙辉, 武亚光. 输电成本计算中损耗分摊原则的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 85-89.  
LI Wei-dong, SUN Hui, WU Ya-guang. Research on Rule for Losses Allocation in Transmission Cost Calculation [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 85-89.
- [13] 刘琳, 侯志俭. 输电阻塞情况下电能记价 LMP 方法 [J]. 华东电力, 2004, 32(8): 26-29.  
LIU Lin, HOU Zhi-jian. LMP Method for Electricity Pricing During Power Transmission Congestion [J]. East China Electric Power, 2004, 32(8): 26-29.
- [14] 江辉, 彭建春. 支路损耗分摊方法在输电网损公正分配中的应用 [J]. 电网技术, 2003, 27(6): 7-12.  
JIANG Hui, PENG Jian-chun. Application of Branch Power Loss Allocation Method in Fair Allocation of Transmission Power Losses [J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 7-12.
- [15] Bernard J T, Guertin C. Nodal Pricing and Transmission Losses [Z]. 2002.
- [16] 王承民, 蒋传文. 电力市场均衡与网损分摊 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 35-38.  
WANG Cheng-min, JIANG Chuan-wen. Network Losses Allocation Method Based on the Market Equilibrium Principle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 35-38.

收稿日期: 2006-07-18; 修回日期: 2006-10-16

作者简介:

王永强 (1976-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力市场、电力系统分析方面的学习工作; E-mail: lyghall@163.com

侯志俭 (1942-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力市场、电力系统运行与控制等方面科研与教学工作。