

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212135

谐振接地系统对地电容与消弧线圈 电感统一测量方法*

谢大为¹ 王京景¹ 朱争高² 丁超¹ 李生虎²

(1. 国网安徽省电力有限公司电力调度控制中心 合肥 230022; 2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘要: 配电网对地电容的准确测量有助于保证消弧线圈的补偿效果,降低故障对配电网的损害。提出一种基于信号注入法与快速傅里叶变换的谐振接地系统对地电容与消弧线圈电感统一测量方法。首先建立中性点电压与系统对地电容、消弧线圈电感关系。其次向中性点接入非工频电流源,利用快速傅里叶变换得到中性点电压关于电流源频率分量,消除工频误差。然后根据等效电路实现系统对地电容与消弧线圈电感的统一测量。最后通过 Simulink 搭建仿真模型进行分析。结果表明,该方法适用于消弧线圈直接接地、消弧线圈并联电阻接地和串联电阻接地运行方式。三相不对称条件下,对地电容与消弧线圈电感最大误差分别为 0.11% 和 0.1%;三相对称条件下,最大误差分别为 1.3% 和 1.8%。

关键词: 配电网;参数测量;对地电容;消弧线圈;信号注入法;快速傅里叶变换

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Unified measurement method for ground capacitance and arc suppression coil inductance of resonant grounding system

Xie Dawei¹ Wang Jingjing¹ Zhu Zhenggao² Ding Chao¹ Li Shenghu²

(1. Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The accurate measurement of the ground capacitance is helpful to ensure the compensation effect of the arc suppression coil and reduce the damage of the fault to the distribution network. A unified measurement method for ground capacitance and arc suppression coil inductance of resonant grounding system based on signal injection method and fast Fourier transform is proposed. Firstly, the relationship between the neutral voltage and the system parameters is established. Secondly, the non-power frequency current source is connected to the neutral point, and the current source frequency component of the neutral point is obtained by using the fast Fourier transform to eliminate the power frequency error. Then the unified measurement of ground capacitance and arc suppression coil inductance is realized according to the equivalent circuit. Finally, the simulation model is built by Simulink, which shows that this method is suitable for various types of arc suppression coils. In the three-phase asymmetry condition, the maximum errors of ground capacitance and arc suppression coil inductance are 0.11% and 0.1% respectively, and the maximum errors are 1.3% and 1.8% respectively in three-phase symmetry condition.

Keywords: distribution network; parameter measurement; ground capacitance; arc suppression coil; signal injection method; fast Fourier transform

0 引言

配电网发生单相接地故障可能导致弧光过电压^[1-2]、击穿设备等严重后果^[3]。谐振接地系统中消弧线圈可补偿电

容电流^[4-6],限制过电压。系统对地电容的准确测量有助于保证消弧线圈的补偿效果^[7],降低故障对电网的损害。

现有的对地电容测量方法可分为直接法和间接法。直接法需要人为设置故障,实际工程中较少应用。间接法主

收稿日期:2022-11-19

* 基金项目:国网安徽省电力有限公司科技项目(52120022000A)、国家自然科学基金(51877061)项目资助

要包括中性点参数扰动法与信号注入法。赵军等^[8]调节中性点接地阻抗改变中性点电压值,计算得到配网对地电导与对地电容。靳维等^[9]通过调节消弧线圈电阻和电感保持零序电压相位不变,由其幅值比例得到电容电流。闫腾飞等^[10]利用牛拉法求解改变电阻后保持中性点电压相位不变的消弧线圈电感量。中性点参数扰动法通过改变消弧线圈阻抗求解对地电容,要求系统三相不对称,且对不同类型的消弧线圈适用范围较小。信号注入法主要包括三频率法、两频率法和谐振法。三频率法^[11]可用来测量电容电流,但频率选取范围对结果影响较大。针对 50 Hz 工频分量对三异频率带来较大误差,周求宽等^[12]从电容器组注入不同频率电流。曾祥君等^[13]调节中性点注入电流频率,由频率谐振点计算配网对地参数。喻锴等^[14]、王毅等^[15]采用双电压互感器测量电容电流,提高了测量精度但需要附加更多设备。宋晓燕等^[16]在 PT 开口三角处分别注入高频和低频的电压信号,测得零序电流计算配网对地电容,但中性点工频不平衡电压对测量结果造成影响。为了消除工频信号干扰,贺良华等^[17]设计级联陷波器处理中性点电压。信号注入法通过注入非工频信号测量对地电容。但存在难以获得准确谐振点、电压互感器影响测量精度、易受工频电压干扰等问题。且现有对地电容测量均将消弧线圈电感作为已知量,但部分消弧线圈正常运行时会自动调整电感,因此将消弧线圈电感作为已知定值将给系统对地电容的测量带来误差。

为解决上述问题,本文提出一种谐振接地系统对地电容及消弧线圈电感统一测量方法。首先,基于等效电路推导中性点电压与消弧线圈电感和线路对地电容关系。其次向中性点注入非工频电流信号,利用快速傅里叶变换(fast fourier transform,FFT)得到中性点电压关于电流源频率的分量,消除工频信号误差。进而根据电流信号通路的电路关系实现对地电容与消弧线圈电感的统一测量。最后,通过仿真证明了所提方法的有效性。

1 配电网谐振接地原理

配电网谐振接地系统拓扑结构如图 1 所示。其中, $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ 为系统三相电源电势, C_A, C_B, C_C 为三相对地电容, G_A, G_B, G_C 为三相对地电导, \dot{U}_0 为中性点电压, L 为消弧线圈电感, R_{N1} 与 R_{N2} 分别为消弧线圈串联电阻与并联电阻,可通过开关 K_1, K_2 的配合实现消弧线圈直接接地、串联电阻接地和并联电阻接地,通过开关 K_3 接入非工频电流源 I 。

开关 K_3 断开时,中性点未注入电流信号。以 K_1, K_2 断开,消弧线圈串联 R_{N1} 接地为例,由基尔霍夫电流定律得:

$$\dot{U}_A(j\omega C_A + G_A) + \dot{U}_B(j\omega C_B + G_B) + \dot{U}_C(j\omega C_C + G_C) + \dot{U}_0\left(\frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_{N1}}\right) = 0 \quad (1)$$

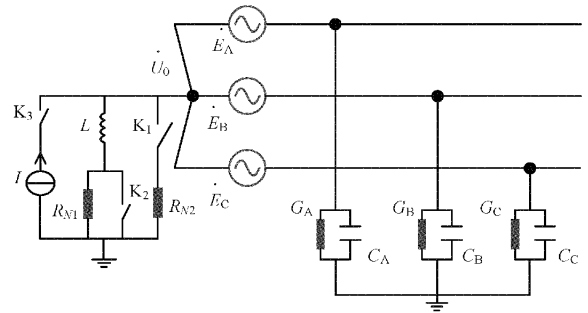


图 1 中性点经消弧线圈接地系统等效电路

式中: \dot{U}_A, \dot{U}_B 和 \dot{U}_C 为各相电源电势和中性点电压之和,即:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{U}_0 \end{cases} \quad (2)$$

以 A 相为参考,由式(1)、(2)得:

$$\dot{U}_0 = -\frac{j\omega C_A + G_A + \alpha^2(j\omega C_B + G_B) + \alpha(j\omega C_C + G_C)}{j\omega C_\Sigma + G_\Sigma + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_{N1}}} \dot{E}_A \quad (3)$$

式中: $\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, G_Σ 和 C_Σ 分别为线路三相总对地电导与三相总对地电容。

2 信号注入法求解参数

按照控制方式,消弧线圈主要可分为随调式和预调式。前者远离谐振点运行,认为不带阻尼电阻;后者采取串联或并联电阻的方式避免谐振。因此考虑到消弧线圈结构,其接地方式可分为 3 种:1)直接接地;2)串联电阻接地;3)并联电阻接地。

对图 1 等效电路,开关 K_3 闭合时,电流源向系统注入非工频电流。 K_1, K_2 均闭合时,消弧线圈并联 R_{N2} 接地; K_1 断开、 K_2 闭合时,消弧线圈直接接地,这 2 种接地方式下电流源电流信号的流通回路可统一表示如图 2 所示,其中 $R_{N2} = \infty$ 时为消弧线圈直接接地。

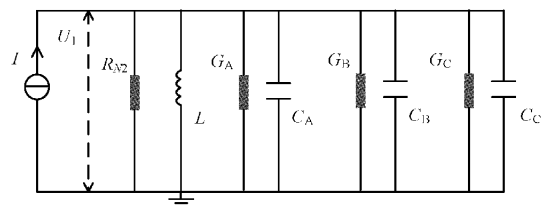


图 2 电流源电流信号通路

对图 2 进一步化简可得图 3。

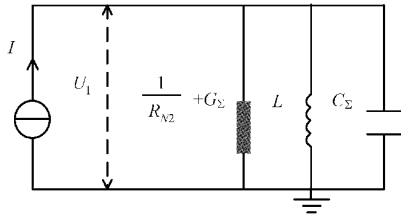


图 3 电流源电流信号通路等效电路

则中性点电压的电流源频率分量 \dot{U}_1 与线路导纳关系为:

$$\frac{\dot{I}}{\dot{U}_1} = \left(\frac{1}{R_{N2}} + G_{\Sigma}\right) + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C_{\Sigma} = \left(\frac{1}{R_{N2}} + G_{\Sigma}\right) + j\left(\omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L}\right) \quad (4)$$

式中: \dot{I} 为电流源电流, 为已知量。 \dot{U}_1 为中性点电压的电流源频率分量, 可通过第 3 节快速傅里叶变换得到。因此, 由 \dot{I} 与 \dot{U}_1 比值可得到系统导纳数值表达式, 令实部为 M , 虚部为 N , 即:

$$Y = \frac{\dot{I}}{\dot{U}_1} = M + jN \quad (5)$$

由式(4)、(5)实部、虚部对应相等可得:

$$\begin{cases} M = \frac{1}{R_{N2}} + G_{\Sigma} \\ N = \omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L} \end{cases} \quad (6)$$

因此通过向中性点注入一个非工频电流信号, 测得中性点电压关于该频率的分量即可得到一个关于 L 和 C_{Σ} 的等式, 因此通过改变电流源频率, 先后向系统输入 2 个非工频的电流信号, 即可得到关于 L 和 C_{Σ} 的两组方程, 进而可得到各自准确值:

$$\begin{cases} N_1 = \omega_1 C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega_1 L} \\ N_2 = \omega_2 C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega_2 L} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)得:

$$\begin{cases} C_{\Sigma} = \frac{N_2 - \frac{\omega_1 N_1}{\omega_2}}{\omega_2 - \frac{\omega_1}{\omega_2}} \\ L = \frac{1}{\omega_1(\omega_1 C_{\Sigma} - N_1)} \end{cases} \quad (8)$$

K_1 、 K_2 均断开时, 消弧线圈为串联电阻接地方式, 采用式(4)~(8)方法可解得:

$$\begin{cases} L^2 = \frac{-[AB^2(C+D)+C-D]}{2ACD} \\ \pm \frac{\sqrt{[AB^2(C+D)+C-D]^2 - 4A^2B^4CD}}{2ACD} \\ C_{\Sigma} = \frac{N_1 + \frac{\omega_1 L}{R_{N1}^2 + \omega_1^2 L^2}}{\omega_1} \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} A = \frac{M_1 - M_2}{R_{N1}} \\ B = R_{N1} \\ C = \omega_1^2 \\ D = \omega_2^2 \end{cases} \quad (10)$$

由上述分析可知对于消弧线圈的 3 种接地方式, 通过注入两次非工频电流信号, 再得到中性点电压关于电流源频率的分量, 即可实现参数的统一测量。

但接入电流源后, A、B、C 三相电源频率为 50 Hz, 电流源频率为非工频, 直接测量得到的中性点电压不再为单一工频正弦信号, 如何获得中性点电压关于电流源频率的分量是统一测量的关键。

现有研究通过电压互感器二次侧注入特定频率信号并测量反馈电压实现参数测量, 但须计算互感器漏电阻、漏电感值, 而且不同频率下上述参数并非常数, 因此无法从原理上完全消除互感器漏阻抗引起的测量误差。

为提高测量精度, 本方法对中性点电压进行快速傅里叶变换得到反馈电压, 避免了电压互感器漏阻抗带来的误差, 提高了测量精度, 且减少了测量设备, 降低了操作难度。

3 FFT 求中性点电压特定频率分量

傅里叶变换将信号视为一系列正弦信号的叠加, 用来分析信号频谱, 得到某一信号不同频率的分量。本文中中性点电压为离散信号, 故可采用离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 分析中性点电压频谱, DFT 需满足狄利克雷条件, 即中性点电压 U_0 在一个周期内间断点与极大值极小值点均为有限个, 且绝对值可积^[18], 即:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |U_0(n)| < \infty \quad (11)$$

式中: N 为中性点电压采样点个数, 为有限值, 式(11)条件成立。则对 U_0 进行 DFT 得 $u(k)$:

$$\begin{cases} u(k) = \sum_{n=0}^{N-1} U_0(n) W_N^{kn} \\ W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $k=0, 1, \dots, N-1$; W 为单位向量。

对于采样点较多的信号, DFT 运算速度较慢, FFT 可将离散信号按采样点排序奇偶性分为 2 个序列, 减少了计算量, 中性点电压离散序列 $U_0(k)$ 的 2 个子序列为:

$$\begin{cases} U_1(k) = [U_0(0), U_0(2), \dots, U_0(N-2)] \\ U_2(k) = [U_0(1), U_0(3), \dots, U_0(N-1)] \end{cases} \quad (13)$$

式中: $i=0, 1, \dots, (N-1)/2$ 。

式(13)可进一步转化为:

$$u(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} U_1(n) W_{N/2}^{kn} + W_N^{kn} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} U_2(n) W_{N/2}^{kn} = U_1(k) + W_N^k U_2(k) \quad (14)$$

根据 FFT, 中性点电压信号可分解为工频分量与电流源频率分量:

$$\dot{U}_0 = U_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + U_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (15)$$

式中: f_1, f_2 分别为工频和电流源频率, U_1, U_2 为各分量幅值, φ_1, φ_2 为各分量相位。

为保证注入的电流信号不影响系统正常运行, 参考工程经验, 选取 20~100 Hz 内的非工频作为电流源的频率。对于电流源的幅值, 应保证注入信号不能引起保护装置误动作, 且能被设备采集到。参考工程经验, 有效值选取范围为 0.1~0.5 A^[19]。

4 算例分析

我国配电网谐振接地系统中存在多种不同类型的消弧线圈, 按接地方式可分为直接接地, 串联电阻接地和并联电阻接地; 且配网运行状态可分为三相对称运行与三相不对称运行, 为检验算法适用性, 对消弧线圈多种运行方式与配网运行状态进行仿真分析。

基于 Matlab/Simulink 搭建 10 kV 配网仿真模型如图 4。参数设置主要参考文献[9], 其中三相线路使用集中参数模型, 每相对地绝缘电阻设置为 120 kΩ, A 相和 B 相对地电容设为 0.5 μF, C 相设为 0.6 μF, 模拟系统三相不对称。则线路三相总对地电导为 0.000 025 S, 三相总对地电容为 1.6 μF, 设置消弧线圈 10% 过补偿, 电感值为 5.762 7 H, 消弧线圈串联电阻 R_{N1} 为 50 Ω, 并联电阻 R_{N2} 为 600 Ω。

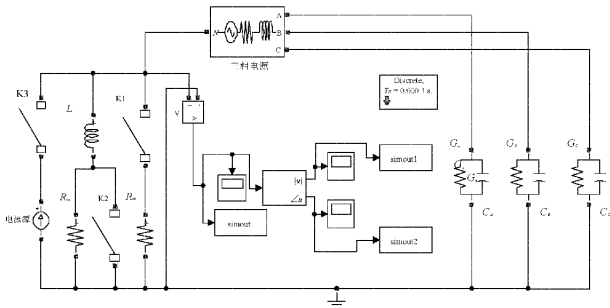


图 4 参数测量仿真图

首先闭合开关 K_1, K_2 , 模拟中性点经消弧线圈并联电阻接地, 分 2 次向系统接入非工频正弦电流信号, 设置电流源幅值为 0.2 A, 频率分别为 40 Hz 和 60 Hz, 2 次测量的中性点电压如图 5、6 所示。

接入非工频电流源后, 中性点电压不再为单一工频正

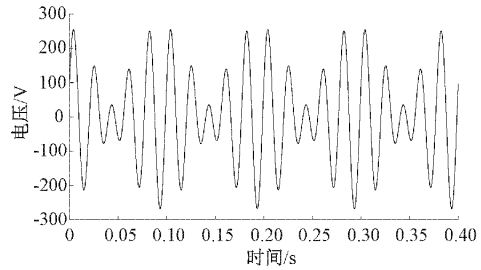


图 5 接入 40 Hz 电流源后中性点电压

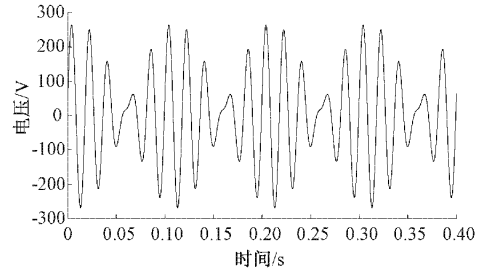


图 6 接入 60 Hz 电流源后中性点电压

弦信号。为得到中性点电压关于电流源频率的分量, 采用 FFT 对中性点电压信号进行频谱分析, 可得中性点电压的电流源频率分量如图 7、8。其中, 40 Hz 分量幅值为 116.5 V, 相位为 9.7°, 60 Hz 分量幅值为 117.8 V, 相位为 -4.8°。

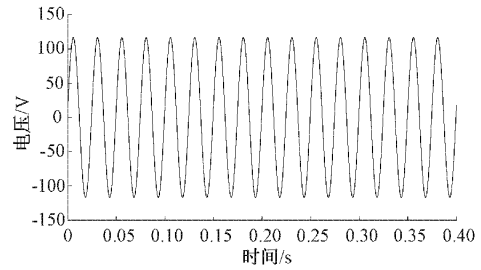


图 7 中性点电压 40 Hz 分量

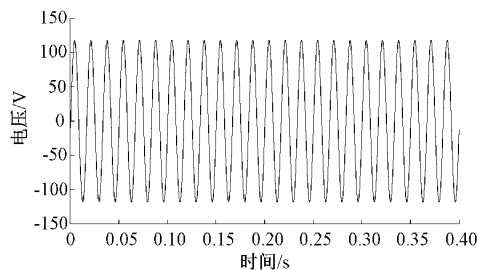


图 8 中性点电压 60 Hz 分量

将以上数据代入式(8)得到线路对地电容与消弧线圈电感测量值如表 1。接着调节开关 K_1, K_2 , 分别模拟消弧线圈直接接地、消弧线圈串联电阻接地, 分别分两次向系统接入非工频正弦电流信号, 设置电流源幅值为 0.2 A, 频率分别为 40 Hz 和 60 Hz, 得到线路对地电容与消弧线圈电感测量值如表 1。表 1 为三相不对称条件下对于消弧线圈

3 种接地方式的参数测量结果。

表 1 三相不对称条件下测量结果

消弧线圈 接地方式	实际	测量	误差/ %	实际	测量	误差/ %
	电感/ H	电感/ H		电容/ μF	电容/ μF	
直接接地	5.762 7	5.765 8	0.054	1.6	1.598 9	0.069
串电阻接地	5.762 7	5.768 7	0.100	1.6	1.598 2	0.110
并电阻接地	5.762 7	5.757 0	0.099	1.6	1.599 0	0.063

由表 1 测量结果可知,本文所提方法能实现对地电容与消弧线圈电感的统一测量,适用于多种类型的消弧线圈,且误差较小,对地电容的最大误差仅为 0.11%,消弧线圈电感最大测量误差仅为 0.1%。

为测试所提方法适用性,将 C 相电容设置为 0.5 μF ,则三相对地电容变为 1.5 μF ,模拟系统三相对称运行,仍先后注入幅值为 0.2 A,相位分别为 40 Hz 和 60 Hz 的电流信号,测得配网三相对称条件下对于消弧线圈 3 种接地方式的参数测量结果如表 2。

表 2 三相对称条件下测量结果

消弧线圈 接地方式	实际	测量	误差/ %	实际	测量	误差/ %
	电感/ H	电感/ H		电容/ μF	电容/ μF	
直接接地	5.762 7	5.764 5	0.031	1.5	1.504 9	0.330
串电阻接地	5.762 7	5.823 3	1.050	1.5	1.518 9	1.260
并电阻接地	5.762 7	5.866 7	1.800	1.5	1.480 5	1.300

由表 2 可知,三相对称条件下测量误差略大于三相不对称运行条件,最大误差分别为 1.3% 与 1.8%,但测量结果仍在工程测量允许的误差范围内,达到工程测量的精度要求。

5 结 论

本文提出一种基于信号注入法与 FFT 的谐振接地系统对地电容与消弧线圈电感统一测量方法。首先向中性点注入非工频电流信号,进而通过 FFT 得到中性点电压特定频率分量,消除工频信号与附加设备带来的误差,实现了对地电容与消弧线圈电感的统一测量。仿真结果证明了所提方法的有效性与适用性。

相比现有研究,该方法测量对地电容不需要已知消弧线圈参数,实现了对地电容与消弧线圈电感的统一测量。

在消弧线圈多种接地方式、系统三相不对称或三相对称运行状态下,该方法均能适用,且附加设备少,操作简单。

三相不对称条件下,对地电容与消弧线圈电感最大误差仅为 0.11% 与 0.1%;三相对称条件下,对地电容与消弧线圈电感最大误差分别为 1.3% 与 1.8%。

该测量方法但仍存在部分问题,如三相对称条件下测量误差略大于三相不对称条件,后续研究可通过改进 FFT 算法提升测量精度、测量参数加入对地电导与消弧线圈电阻以提升算法适用性。

参考文献

- [1] 叶远波,汪胜和,谢民,等.高阻接地故障时消弧线圈并联小电阻接地的控制方法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):181-186.
- [2] WAQAR A, BI T, JIA K. A review of single phase adaptive auto reclosing schemes for EHV transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 205-214.
- [3] 孟祥忠,陈文聪,李金宝.中压配电网单相断线故障检测及定位的研究[J].电子测量技术,2020,43(6):32-37.
- [4] 杜政奇,王敬华,张新慧.基于参数优化 VMD 和能量相似度的配电网故障区段定位方法[J].电子测量技术,2022,45(8):95-101.
- [5] 陈再航,刘晓波,聂远航,等.基于自适应 VMD 的含 DG 配电网谐振接地故障选线方法[J].国外电子测量技术,2022,41(1):146-152.
- [6] 李云阁,权立,刘健,等.可控配电网单相间歇电弧接地装置[J].电网与清洁能源,2021,37(7):1-7,24.
- [7] 薛永端,李广,徐丙垠.利用熄弧后暂态信息测量谐振接地系统的对地电容[J].电工技术学报,2020,35(7):1521-1528.
- [8] 赵军,袁雪琼,扈海洋,等.基于变电阻电压扰动的配电网对地参数精确测量新方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(17):51-56.
- [9] 靳维,袁朋生,张洋,等.基于调整中性点接地阻抗的配电网电容电流测量方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(7):37-41.
- [10] 闫腾飞,李康,李晓波,等.基于牛顿-拉夫逊法的配电网电容电流测量新方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(7):1-5.
- [11] 周求宽,姚骏,刘衍,等.基于三频率法的配电网电容电流测量新方法[J].电测与仪表,2017,54(10):44-49.
- [12] 周求宽,张旭俊,张科杰,等.电力行业标准异频法公式勘误与电容电流测试新方法[J].电力系统自动化,2017,41(1):161-167.
- [13] 曾祥君,刘玉玲,喻银.改进的配电网对地参数谐振测量方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(3):3-11.
- [14] 喻银,邹豪,曾祥君,等.谐振接地配电网对地绝缘参数双端谐振测量新方法[J].电力系统自动化,2020,44(12):154-161.
- [15] 王毅,陈晓红,刘丰,等.配电网电容电流测量新方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):150-155.
- [16] 宋晓燕,孙岩洲,宋紫嫣,等.基于零序 PT 二次侧注入信号的配电网电容电流测量新方法[J].电力系统保护

- 与控制,2014,42(19):134-138.
- [17] 贺良华,葛来,孙宝金.基于谐振频率预测模型的配电网电容电流测量方法[J].电力系统自动化,2018,42(2):143-147,159.
- [18] 邓志祥,潘建兵,黄灿英,等.基于傅里叶变换与最大关联距离相结合的配电网故障选线新方法[J].电网与清洁能源,2022,38(4):95-103.
- [19] 林凡勤,杨晶晶,孙华忠,等.基于信号注入法的主从式消弧线圈柔性补偿控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(12):10-17.

作者简介

谢大为,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统分

析与控制。

E-mail:dwxie@163.com

王京景,博士,工程师,主要研究方向为运行分析与控制。

E-mail:dwxie@163.com

朱争高(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为风电并网电力系统分析与控制。

E-mail:2021110323@mail.hfut.edu.cn

丁超,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网运行。

E-mail:26615464@qq.com

李生虎,教授,博导,主要研究方向为含风电、HVDC、FACTS 电力系统的建模分析和稳定控制。

E-mail:shenghuli@hfut.edu.cn