

基于注入信号的发电机定子 对地电容测量方法

黄路明^{1,2}, 熊 锋³, 巫晓云², 陈豪威⁴

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国网江西省电力有限公司赣州供电分公司, 江西 赣州 341000;
3. 湖南烟叶复烤有限公司永州复烤厂, 湖南 永州 425000; 4. 国网湖北省电力有限公司检修公司鄂东运维分部, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 定子绕组对地电容作为发电机的一项重要参数, 其准确测量可为发电机定子接地保护方案的制定提供重要依据。在此背景下, 对发电机定子绕组故障分支进行分割, 并对电压互感器内部结构进行研究, 提出一种采用电流信号注入形式的发电机定子绕组对地电容实时测量方法。首先, 通过从电压互感器低压开口三角形侧注入电流信号, 流经电压互感器高压侧及绕组对地电容构成回路; 然后, 分别测量电压互感器低压开口三角形侧电压和低压星型侧电压; 最后, 基于构成回路的简化电路以及注入的电流信号、测得的电压信号计算出定子绕组对地电容大小。该法避免了电压互感器短路阻抗对测量结果的影响, 经 PSCAD/EMTDC 仿真结果和实验结果表明, 该测量方法过程安全、接线简单、结果准确。

关 键 词: 发电机保护; 单相接地故障; 注入电流法; 定子对地电容测量

DOI: 10. 19781/j. issn. 1673-9140. 2021. 02. 010 中图分类号: TM77 文章编号: 1673-9140(2021)02-0083-06

Real-time measurement scheme of large-scale generator stator winding to ground capacitance

HUANG Luming^{1,2}, XIONG Feng³, WU Xiaoyun², CHEN Haowei⁴

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Ganzhou Power Supply Company, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Ganzhou 341000, China; 3. Hunan Tobacco Redrying Company Limited Yongzhou Redrying Plant, Yongzhou 425000, China; 4. East Hubei Operation and Maintenance Branch of Maintenance Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: The stator winding-to-ground capacitor is an important parameter of generator, and its accurate measurement can provide important basis for the stator grounding protection scheme. On the background, the fault branch of generator stator winding is divided, and the internal structure of voltage transformer is studied. Then, a real-time measurement method for the stator winding to ground of generator based on the injected current signal is proposed. Firstly, the current signal is injected from the low-voltage triangle side of voltage transformer for the generator and flows through the high-voltage side of the voltage transformer and the capacitance of the winding to ground. Secondly, the low-voltage triangle-side voltage and the low-voltage star-side voltage of the voltage transformer is measured respectively. The simplified circuit and the injected current signal and the measured voltage signal calculate the stator winding capacitance to ground. This method avoids the influence of the short-circuit impedance of voltage transformer on the measurement results. The PSCAD/EMTDC simulation and experimental results show that the measurement method is safe in process, simple in wiring, and accurate in results.

Key words: generator protection; single-phase earth fault; injection current method; stator ground capacitance measurement

收稿日期: 2019-01-16; 修回日期: 2019-04-07

基金项目: 湖南省教育厅重点项目(18A124)

通信作者: 黄路明(1996-), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护研究; E-mail: hlm_156@163.com

定子单相接地是发电机最为常见的一类故障^[1-2]。发电机的价格高昂、维修难度大,当其接地故障电流超过一定阈值时,定子接地保护必须及时动作,从而有效防止发电机的定子铁芯被损毁,甚至发展为相间、匝间短路等危害程度更高的故障类型^[3-5]。同时,发电机的跳闸对于电力系统的安全稳定运行将带来十分不利的影响,在保障发电设备安全性的前提下,应当尽量保持其并网运行。因此,合理地制定发电机定子接地的保护方案显得尤为关键,方案应实现功能包括:当定子接地电流超过安全阈值时,保护动作以保障设备的安全;反之则只发出报警信号,允许其继续并网运行一段时间,从而避免发电机突然跳闸对电网的稳定运行带来冲击。接地点故障电流计算的准确度和定子对地电容参数的准确度息息相关,因此,研究适用于发电机定子对地电容值的测量技术能为定子接地保护的方案设计提供重要依据。

目前,国内外对发电机定子绕组对地电容测量鲜有研究,借鉴配电网对地电容测量方法对现有测量方案进行分析。文献[6]提出了一种在电压互感器(voltage transformer, TV)开口三角形侧串联一个电感,注入频率变化的电流,寻找系统对地电容与该电感发生谐振时的频率,从而计算配网对地电容值的方案,该方案未考虑 TV 自身短路阻抗的影响,有一定的测量误差。文献[7]考虑 TV 漏阻和漏感对测量结果的影响,将其归算为一未知阻抗,从 TV 低压开口三角侧注入电流,测量返回电压以计算系统对地电容,该方案忽略了 TV 自身阻抗频率特性的影响,测量误差明显。针对上述问题,文献[8]采用经 TV 低压开口三角形侧注入 3 个异频电流,并测得各频率电流作用下 TV 低压开口三角形侧返回电压,从而计算得出配电网对地电容的方案,但此方法涉及 3 个频率信号,频率选取组合困难,因此存在一定的误差,且测量范围较小。

该文提出一种基于注入电流信号的发电机定子绕组对地电容测量方法,能有效消除电压互感器短路阻抗对测量结果的干扰,且无需考虑注入频率选取组合对测量结果的影响,经详细的理论推导以及仿真验证分析该文所提出方法的可行性。

1 定子绕组的分割

发电机定子绕组单相接地故障如图 1 所示。当

分析发电机定子接地时需要将绕组进行分割,详细分割方案见文献[9]。假定发电机每相有 x 个并联支路,以故障处为分界,通过电角度 α 将故障支路分割成接近中性点的子绕组 m 和接近机端的子绕组 n ,而余下的 $x-1$ 个非故障支路等效为一个绕组 P 。定子绕组对地电容的表示方式主要包括准分布参数^[10]、经 Taylor 展开后的集中参数^[11]这 2 种表示方式。在该研究中,采用集中参数电路对定子绕组对地电容进行分析和计算,用准分布参数模型^[12]对分析结果进行仿真验证,并进行实验验证和分析。

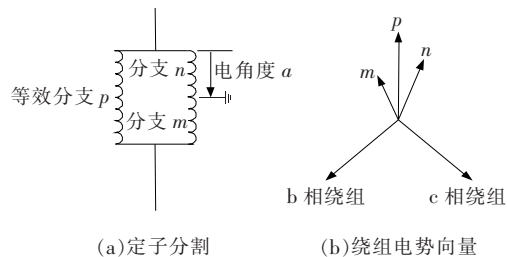


图 1 发电机定子单相接地故障示意

Figure 1 Generator stator single-phase ground fault schematic

2 定子绕组对地电容测量原理

定子对地电容测量原理如图 2 所示,左侧为三相五柱式 TV 等效回路,右侧为定子绕组等效回路。若从 TV 低压开口三角形侧注入一个电流 \dot{I}_0 ,可于 TV 低压开口三角形侧测得返回电压 \dot{U}_0 ,并在其高压侧绕组测得感应电流 \dot{I}_1 ,在低压星形侧测得感应电压 \dot{U}_2 和电流 \dot{I}_2 。

假设 TV 高压侧的绕组匝数为 N_1 ,低压星形侧的绕组匝数为 N_2 ,低压开口三角形侧的绕组匝数

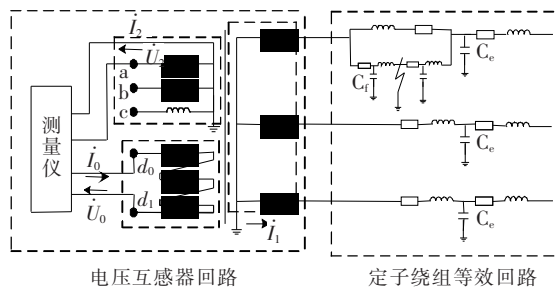


图 2 定子对地电容测量原理

Figure 2 Schematic diagram of stator winding to ground capacitance measurement

为 N_3 , TV 的励磁电流为 \dot{I}_m , 则有

$$N_3(\dot{I}_0 - \dot{I}_m) = N_1\dot{I}_1 + N_2\dot{I}_2 \quad (1)$$

对地电容测量原理等效示意如图 3 所示。由于 TV 的短路阻抗及定子绕组对地容抗相对于其励磁阻抗 Z_m 小得多, TV 的励磁电流 \dot{I}_m 可以忽略; 此外, 由于 TV 低压星型侧的负载阻抗较高, \dot{I}_2 近似为零, 因此, 电流 \dot{I}_1 大小由注入电流 \dot{I}_0 决定, 式(1)可以简化为

$$\dot{I}_1 = N_3\dot{I}_0/N_1 \quad (2)$$

\dot{I}_1 是 TV 高压侧的感应零序电流, 无法流通于电源与负载之间, 只流经定子绕组对地电容而产生闭合回路。忽略定子绕组的对地泄漏电阻, 测量原理等效示意图 3, 其中 R_1 、 L_1 分别为 TV 高压侧的漏阻和漏感; R'_2 、 R'_3 、 L'_2 、 L'_3 分别为低压星型侧、开口三角形侧的漏阻、漏感归算至高压侧后值; R_m 、 L_m 分别为 TV 励磁电阻和电感; L_n 为消弧线圈等效电感; C_f 为定子单相接地故障后的单相对地电容; \dot{I}'_0 、 \dot{U}'_0 、 \dot{U}'_2 分别为 \dot{I}_0 、 \dot{U}_0 、 \dot{U}_2 折算到高压侧后值。

由于 TV 低压星型侧的感应电流接近于零, 故认为其励磁电压和低压星型侧电压相同, 忽略 TV 励磁阻抗^[13], 电路简化成如图 4 所示。

设 TV 各参数均为三相对称, 测得低压开口三角形侧的返回电压为 \dot{U}_0 , 低压星型侧的感应电压为 \dot{U}_2 , 高压侧/低压星型侧的变比为 $k_1 = N_1/N_2$, 高压侧/低压开口三角形侧的变比为 $k_2 = N_1/N_3$, 则由

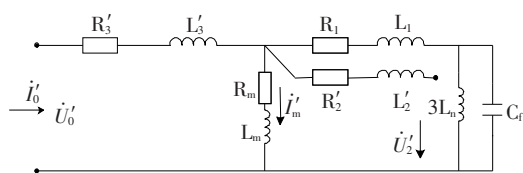


图 3 测量原理等效示意

Figure 3 Measurement principle equivalent diagram

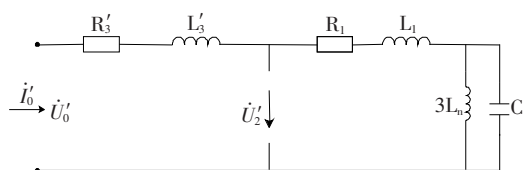


图 4 测量原理简化等效电路

Figure 4 Measuring principle simplifies equivalent circuit

图 4 可得:

$$\frac{\dot{U}'_0}{\dot{I}'_0} =$$

$$R_1 + R_3 + j\left(\omega L_1 + \omega L'_3 + \frac{3\omega L_n}{1 - 3\omega^2 L_n C_f}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\dot{U}'_2}{\dot{I}'_0} = R_1 + j\left(\omega L_1 + \frac{3\omega L_n}{1 - 3\omega^2 L_n C_f}\right) \quad (4)$$

开口三角绕组计算阻抗:

$$Z_0 = \frac{\dot{U}'_0}{\dot{I}'_0} = k_2^2 \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} \quad (5)$$

低压星型绕组计算阻抗:

$$Z_2 = \frac{\dot{U}'_2}{\dot{I}'_0} = k_1 k_2 \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} \quad (6)$$

分别对式(3)、(4)取虚部得:

$$\text{Im } Z_0 = \omega L_1 + \omega L'_3 + \frac{3\omega L_n}{1 - 3\omega^2 L_n C_f} \quad (7)$$

$$\text{Im } Z_2 = \omega L_1 + \frac{3\omega L_n}{1 - 3\omega^2 L_n C_f} \quad (8)$$

TV 高压侧绕组漏感为

$$L_1 = \frac{N_1 \varphi_{1\sigma}}{I_1} = N_1^2 \Delta_{1\sigma} \quad (9)$$

低压开口三角形绕组漏感为

$$L_3 = \frac{N_3 \varphi_{3\sigma}}{I_0} = N_3^2 \Delta_{3\sigma} \quad (10)$$

归算到高压侧后为

$$L'_3 = k_2^2 N_3^2 \Delta_{3\sigma} = N_1^2 \Delta_{3\sigma} \quad (11)$$

式中 $\varphi_{1\sigma}$ 、 $\varphi_{3\sigma}$ 分别为 TV 高压侧、低压开口三角形侧的漏磁通; $\Delta_{1\sigma}$ 、 $\Delta_{3\sigma}$ 分别为高压侧、低压开口三角侧漏导。

TV 的漏磁通主要通过绝缘介质形成闭合回路, 所以其漏磁导为一常量, 并且只和 TV 绕组的尺寸大小和绝缘介质的磁导率有关。由于 TV 不同绕组的线圈间隔较小, 一般认为它们的漏磁路近似相等, 故漏导 $\Delta_{1\sigma}$ 和 $\Delta_{3\sigma}$ 也近似相同^[13]。因此, TV 高压侧和低压开口三角形侧的漏感归算至同侧后的大小近似相同, 即

$$L_1 \approx L'_3 \quad (12)$$

将式(5)~(8)、(12)联立, 即可求得故障后单相定子绕组对地电容:

$$C_f = \frac{1}{3\omega^2 L_n} + \frac{1}{\omega \left(\text{Im} k_2^2 \frac{\dot{U}_0}{I_0} - 2\text{Im} k_1 k_2 \frac{\dot{U}_2}{I_0} \right)} \quad (13)$$

由以上分析可知,从 TV 低压开口三角形侧注入一个角频率为 ω 的电流,分别测得 TV 低压开口三角形侧电压 \dot{U}_0 、低压星形侧电压 \dot{U}_2 ,可以由式(13)计算发电机定子接地故障对地电容值。该方法在测量过程中消除了 TV 短路阻抗的影响,极大地提升了发电机定子对地电容测量的精确度。

3 注入信号的频率选取

该文所提出方法主要是通过测量得到 TV 低压开口三角侧和低压星型侧的等效输入阻抗从而计算发电机定子绕组对地电容值。由于定子绕组对地电容的容抗 X_c 随注入信号频率的不同而发生变化,由文 2 中的分析可知,输入阻抗测量过程中产生的细微偏差将导致定子对地电容的计算产生较大误差,因此,注入信号的频率选取将给测量结果的精确度带来较大影响。

由式(5)、(6)、(13)可知:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{3L_n(\text{Im} Z_0 - 2\text{Im} Z_2)}{\text{Im} Z_0 - 2\text{Im} Z_2 + 3L_n} \quad (14)$$

在测量过程中, Z_0 和 Z_2 产生误差所导致的定子绕组对地电容计算误差为

$$\Delta X_c = \frac{3L_n(\text{Im} \Delta Z_0 - 2\text{Im} \Delta Z_2)}{\text{Im} \Delta Z_0 - 2\text{Im} \Delta Z_2 + 3L_n} \quad (15)$$

对式(14)、(15)求导得:

$$\left| \frac{dX_c}{dC} \right| = \frac{1}{\omega C^2} \approx \frac{\Delta X_c}{\Delta C} \quad (16)$$

即得:

$$\Delta C \approx \omega C^2 \Delta X_c = 2\pi f C^2 \Delta X_c \quad (17)$$

当定子对地容抗的测量误差 ΔX_c 不变时,由方程(17)可得,当增大注入电流信号的频率 f 时,定子对地电容的计算误差 ΔC 也随之变大,反之减小频率 f 时则测量误差随之变小。但从另一方面分析,当频率 f 减小时,TV 的励磁阻抗也随之减小,当小到一定阈值时,TV 的励磁阻抗不可忽略,因此,在可以忽略 TV 励磁阻抗的前提下,应当尽量选择较大的测量频率。经过计算分析和仿真模拟,当

接地故障电流的大小超过 100 A 时,频率 f 应大于 40 Hz;而当接地故障电流的大小低于 10 A 时,频率 f 应小于 30 Hz。

4 仿真实验

该文在电力系统暂态仿真软件(power systems computer aided design/electromagnetic transients including direct current, PSCAD/EMTDC)中搭建发电机准分布电容参数模型^[14-15]。如图 5 所示,定子各分支的绕组分为 N (该文中 $N=6$)个单元电路。定子绕组的电势、漏感、电阻和接地电容均等分配至每个单元。故障相绕组按文 1 所述方法进行绕组分割,健全相的分支合并等同于一个分支,接地相的健全分支也合并为一个分支。搭建三相五柱式 TV 模型,其高压侧与低压星形侧变比为 $k_1=100$,高压侧与低压开口三角形侧变比为 $k_2=100\sqrt{3}$ 。消弧线圈电感值取为 $L_n=2.031\text{H}$ 。

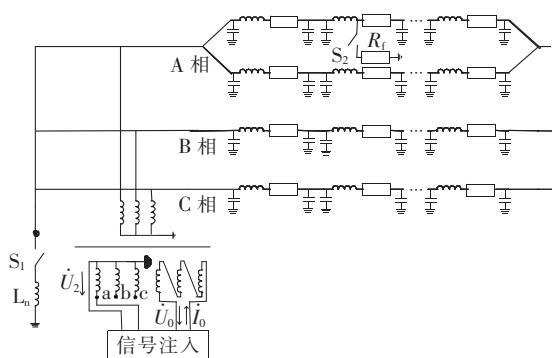


图 5 发电机定子绕组故障仿真模型

Figure 5 Generator stator winding fault simulation model

从 TV 低压开口三角形侧注入信号电流,测得低压星形侧的感应电压和低压开口三角侧的返回电压,计算发电机定子绕组对地电容值。发电机定子绕组接地故障电容测量的仿真结果如表 1 所示,仿真所得结果误差不超过 2%,测量精度较高;谐振法^[16]测量定子对地电容值与实际值比较如表 2 所示,此方法误差高达 10.2%,主要原因是由于该方法在测量过程中忽略了 TV 自身短路阻抗的影响,所计算电容与实际电容相比存在较大的误差;多频率法^[17]测量电容值与实际值的比较如表 3 所示,此方法对注入电流的频率选取要求较高,测量结果受注入频率选取影响较大,甚至在计算过程中会出现负数开根号的情况,导致结果不存在,该测量方法存

表 1 仿真结果

Table 1 Simulation results

实际电容 值/ μF	注入电流幅值/ 相位(A/($^\circ$))	注入信号 频率/Hz	幅值/相位(V/($^\circ$))		仿真测得电 容值/ μF	相对误 差/%
			开口三侧电压	二次星型侧电压		
5.2	1/0	30	1.21/-62.3	1.23/-76.02	5.263	1.20
7.5	1/0	25	0.82/-36.1	0.98/-46.8	7.536	0.48
9.0	1/0	25	0.73/-51.3	0.85/-42.8	8.921	0.87
12.0	1/0	20	0.66/-21.1	0.71/-29.01	12.193	1.60

表 2 谐振法测量电容值与实际值的比较

Table 2 Simulation results of resonance method

电容实际值/ μF	串联电感值 L_1 /mH	串联电感值 L_2 /mH	谐振频率 f_1 /Hz	谐振频率 f_2 /Hz	电容测量值/ μF	测量误差/ %
0.5	1.0	7.2	41.1	15.3	0.51	2.0
1.0	2.2	8.4	19.6	10.1	1.05	5.1
2.0	3.6	9.6	10.8	6.6	1.93	3.5
5.0	4.8	10.8	5.9	4.0	4.49	10.2
10.0	6.0	12.0	3.8	2.7	10.67	6.7

表 3 多频率法测量电容值与实际值比较

Table 3 Simulation results of Multi-frequency method

选取频率/ Hz	仿真测得电容值/ μF				
	$c=0.5$	$c=1$	$c=2$	$c=5$	$c=10$
10/20/120	0.492	0.987	1.926	4.962	9.83
10/40/120	0.486	1.012	1.958	5.013	10.21
20/40/120	0.509	1.025	1.969	5.026	*
20/80/120	0.513	1.038	2.013	5.097	*
40/80/120	0.517	1.052	2.035	*	*

注: * 表示计算结果为复数开平方,无意义,即测量失败。

在一定的局限性。该文所提方法有效避免了 TV 短路阻抗的影响,且不用考虑注入频率选取组合对测量结果的影响,测量结果准确,可为发电机定子接地故障保护方案的制定提供重要依据。

5 结语

该文给出了一种基于注入电流的发电机定子对地电容实时测量方法。由 TV 低压开口三角形侧注入电流,分别测得 TV 低压开口三角形侧返回电压和低压星形侧感应电压;基于发电机接地故障后的零序等效网络,结合注入的电流信号和测得的电压信号,可得出发电机定子对地电容值;分析了注入信号的频率选择问题;最后进行了仿真和实验验证。由定子绕组对地电容计算公式(13)可知,该文所提方法在测量过程中避免了 TV 短路阻抗的干扰,且

只需注入一个单频信号,无需考虑注入信号频率选取组合对测量结果的影响,在测量过程中不影响发电机的正常工作,测量过程安全、线路简单、结果精确。通过理论推导和仿真验证,表 1 的结果验证该方法的测量误差小于 2%,能满足发电机接地保护方案制定的需求,进一步保障发电机组的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 林成,王媛媛,曾祥君,等. 基于分级绝缘的高压发电机定子单相接地故障保护[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):7052-7060+7139.
LIN Cheng, WANG Yuanyuan, ZENG Xiangjun, et al. Stator single phase ground fault protection of power-formers based on grading insulation[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(23):7052-7060+7139.
- [2] 黄少锋,贾文超. 大型汽轮发电机定子单相接地故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(9):35-40.
HUANG Shaofeng, JIA Wenchao. A new fault location method for stator single-phase ground fault in large turbine generator[J]. Power System Protection and Control,2017,45(9):35-40.
- [3] Zieliowski M, Fulczyk M. Analysis of operating conditions of ground-fault protection schemes for generator stator winding[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2003,18(1): 57-62.
- [4] 毕大强,王祥珩,桂林,等. 基于零序电压故障暂态分量

- 的发电机定子单相接地保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 39-44.
- BI Daqing, WANG Xiangyan, GUI Lin, et al. Protection scheme based on the fault transient component of zero-sequence voltage under the stator ground fault of generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 39-44.
- [5] 王媛媛, 曾祥君, 龙立宏, 等. 基于泄漏电流的选择性水轮发电机定子单相接地保护方案[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 89-93.
- WANG Yuanyuan, ZENG Xiangjun, LONG Lihong, et al. A leakage current based selective single-phase grounding fault protection scheme for stator winding of hydrogenerator[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 89-93.
- [6] 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.
- JIN Wei, YUAN Pengsheng, ZHANG Yang, et al. A method of measuring capacitive current in distribution network based on adjusting the neutral grounding impedance[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 37-41.
- [7] 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.
- SONG Xiaoyan, SUN Yanzhou, SONG Ziyan, et al. A new method of distribution network capacitive current measurement based on injecting signals into the secondary side of the zero sequence PT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 134-138.
- [8] 王国友, 邢亮, 李伟霞, 等. 一种新型的电容电流在线测量系统设计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 142-147.
- WANG Guoyou, XING Liang, LI Weixia, et al. A novel design scheme for the online measurement system of capacitance current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 142-147.
- [9] Reichmeider P P, Querrey D, Gross C A, et al. Partitioning of synchronous machine windings for internal fault analysis[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(4): 372-375.
- [10] Megahed A I, Malik O P. Simulation of internal fault in synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1306-1311.
- [11] Holmberg P. Modeling the transient response of windings, laminated steel cores and electromagnetic power devices by means of lumped circuits[D]. Uppsala, Sweden: Uppsala University, 2000.
- [12] 王育学, 尹项根, 张哲, 等. 基于接地电流的大型发电机定子接地保护及精确定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 147-154.
- WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A novel protection and precise location method based on grounding currents for stator ground faults large generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 147-154.
- [13] 曾祥君, 许瑶, 陈博, 等. 中性点不接地配电网电容电流实时测量新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 78-81+91.
- ZENG Xiangjun, XU Yao, CHEN Bo, et al. A novel measuring method of capacitive current for insulated neutral distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 78-81+91.
- [14] 张琦雪, 王祥珩, 陈佳胜, 等. 组合型接地方式对注入式定子接地保护的影响[J]. 中国电力, 2018, 51(11): 96-103.
- ZHANG Qixue, WANG Xiangyan, CHEN Jiasheng, et al. Influence of the combination-type grounding scheme on voltage-injected stator ground fault protection[J]. Electric Power, 2018, 51(11): 96-103.
- [15] 孙晓艳, 高阳, 彭力. 计及损耗的双馈感应风力发电机高电压穿越控制策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 33-39.
- SUN Xiaoyan, GAO Yang, PENG LI. High voltage ride through control strategy for doubly-fed induction generator considering loss[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 33-39.
- [16] 曾祥君, 易文韬, 刘张磊, 等. 注入信号精确谐振测量配电网电容电流新技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 77-80.
- ZENG Xiangjun, YI Wentao, LIU Zhanglei, et al. A novel technique of capacitive current resonance measurement with signal injected for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 77-80.
- [17] 曾祥君, 刘玉玲, 喻锴. 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.
- ZENG Xiangjun, LIU Yuling, YU Kun. An improved resonance measurement method of grounded parameters for distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 3-11.