

中压有源配电网工作接地线安全校核方法

黄伟达^{1,2}, 李天友³, 刘松喜⁴, 黄超艺⁴, 陈宏⁴, 蔡维⁴

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350001; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院技术中心, 福建 福州 350001;
3. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361000; 4. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350001)

摘要:针对当前无源配电网向有源配电网过渡, 配电网网架结构发生变化, 导致运行检修工作中作业安全风险显著增加, 提出一种基于奥迪道克公式的中压有源配电网工作接地线的安全校核方法。将分布式电源分为旋转电机型和逆变型 2 类, 考虑工作人员位于中压侧检修的情况。在此基础上, 根据叠加定理计算因误动、装置等原因在工作接地线处产生的短路电流, 利用奥迪道克公式初选取接地线截面积, 通过计算单相、三相残压对其进行二次校核, 最后根据实际拓扑提供可靠的接地措施。通过实际案例中的应用, 验证该方法的可行性和有效性。

关键词:有源配电网; 运行检修; 接地线; 叠加定理; 奥迪道克公式

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.013 中图分类号:TM727 文章编号:1673-9140(2022)04-0114-11

Research on verification method about the safety of grounding wire in medium-voltage active distribution network

HUANG Weida^{1,2}, LI Tianyou³, LIU Songxi⁴, HUANG Chaoyi⁴, CHEN Hong⁴, CAI Wei⁴

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350001, China; 2. Technology Center of Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350001, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361000, China; 4. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: The transition from passive power distribution network to active power distribution leads to the change of network structure, which results in the significant increase of risk in operation and maintenance work. This paper proposes a verification method about the safety of grounding wire in medium-voltage active distribution network based on Ondendonks formula. Considering the situation that the staff in the medium voltage side for maintenance, the distributed generators are divided into two types, which are rotating machine-based generator and inverter-based generator. On this basis, the short-circuit current generated at the grounding device due to mis-operation and device reasons is calculated according to the superposition theorem. The cross-sectional area of the grounding device is selected by using the Ondendonks formula preliminarily, and then the secondary check is carried out by calculating the single-phase and three-phase residual voltage. Finally, reliable grounding measures can be obtained on the basis of the actual topology. The feasibility and effectiveness of this method are validated by the application in a practical case.

Key words: active distribution network; operation and maintenance; grounding device; superposition theorem; Ondendonks formula

基于风能和太阳能等清洁能源的分布式电源(distributed generation, DG)大量接入配电系统,单电源辐射状供电网络转化为多端多电源网络,配电网的潮流与故障电流特征发生本质上的变化^[1-4]。然而,大量 DG 并网会使得配电网网架结构发生变化,运检检修工作中作业安全风险显著增加。主要风险:①分布式电源用户不受控状态,可能缺乏发电设备运行管理经验,增加了“倒送电”的安全风险;②多端电源的网络架构导致配电系统短路容量增加,若工作接地线仍然参照传统配电网的安全要求进行装设,则工作点处产生的残压不能保证低于人体安全电压。

目前,美、英、日等国家主要从提高接地相应技术标准、提倡不停电作业以及提高人员技术水平^[5-7]等方面解决 DG 接入配网后的检修人员人身安全问题。国内有源配电网检修工作主要依据现行“配电安规”,接地措施仍然参照无源配电网进行,有源配电网工作接地线截面积是否符合新需求且满足安全要求缺乏相应论证。

文献[8]对携带型短路接地线的截面积校核方法进行了推导,计算了不同接地线的截面积,但没有考虑到残压对人身安全的影响且未涉及分布式电源接入;文献[9]根据并网装置将 DG 分类,分析了 DG 的输出特点并提供短路计算时的等效电路模型,为有源配电网短路电流计算提供依据;文献[10]研究了中压配网中性点接地方式与分布式电源接地方式对应关系,提出各种故障工况下接地方式转变对于故障电流、过电压的影响,进而衍生到供电可靠性、人身安全等复杂问题,但未涉及检修现场保障人身安全的接地措施。

综上,在国内外配电安全规程以及学者开展的相关研究中,有源配电网检修作业人身安全内容鲜少提及,工作接地线的安全性缺乏完整的评估方法,面对分布式电源的大量接入,检修人员的人身安全不能得到充分保障。因此,本文提出一种有源配电网工作接地线的安全校核判据,充分考虑接地线在不同装设位置(不同检修地段影响)、不同接地方式(接地方式对于检修人员残压影响)以及 DG 在不同容量下短路电流的大小(DG 对于配网短路电流影响),综合权衡工作点人体残压与安全判断,从而保

障工作接地线的选取符合安全标准。最后通过实例验证方法的可行性。

1 相关理论基础

1.1 分布式电源及其输出电流特性

分布式电源一般指与配电网连接、分散于各用户侧、发电功率为数 kW 到 50 MW 的独立电源^[11-12]。根据与配电网的并网方式不同,可分为旋转电机、逆变型 DG。常用的 DG 并网方式如表 1 所示。

表 1 常用的 DG 并网方式

Table 1 Common modes of grid connection of DG

分类		接入电网形式		
燃料类型	能量转换方式	逆变器	同步电机	异步电机
水电	水轮机	—	√	—
太阳能发电	逆变器	√	—	—
	直驱式	√	—	—
风电	感应式	—	—	√
	双馈式	√	—	√
燃料电池	逆变器	√	—	—
蓄电池	逆变器	√	—	—

旋转电机型 DG 的短路电流特性取决于发电机类型和参数^[13-15]。在发生故障时,由于发电机绕组励磁并不会改变,需要经历一个从冲击电流到逐渐衰减再到稳态的过程,因此,短路情况下可以等效为一个电压源与次暂态电抗的串联。提供的电流为

$$I_i = \frac{U_N}{\sqrt{3} X_d''} \quad (1)$$

式中 U_N 为旋转电机型 DG 的出口电压; X_d'' 为次暂态阻抗。

逆变型 DG 的短路电流特性主要取决于故障阶段采用的控制策略和控制参数^[16-18]。但无论采用何种控制策略,对于自同步的逆变器来说,由于功率器件的过流能力有限,在不同阶段,控制电路将短路电流均控制为 1.2~1.5 倍的额定电流,而本文中重点在于计算接地点的最大短路电流。因此,可以将逆变型 DG 等效为恒定电流源,此时输出电流为

$$I_j = 1.5 I_N = \frac{S_{DG}}{\sqrt{3} U_{DG}} \quad (2)$$

式中 I_N 为逆变型 DG 的额定电流。

1.2 工作接地线

停电、验电和挂接地线是电力作业的三大安全技术措施,是电力系统发、输、变、配电各专业设备检修、试验、停电作业时必备的安全技术步骤^[19]。其中,接地线为通过短路和连接大地作用的金属接地线,由连接线夹、接地线操作杆以及导体连接线三部分组成,如图 1 所示,主要作用:

- 1)将已停电的电气设备与地面进行电气连接,让设备始终保持在一个安全的地电位;
- 2)能够使突然袭来的三相电形成相间短路,减小伤害人体的电量;产生的短路大电流也能够迅速启动二次保护装置,使开关跳闸快速切断电源;
- 3)通过与地连接,消除设备上的剩余电荷,避免感应电压产生高电位电击,防止人体受到伤害。

实际上,采用接地线相间短路和接地是保证电气作业人员免遭电击危害最有效、最直接和最直观的安全防护措施。

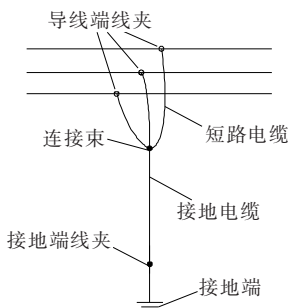


图 1 工作接地线示意

Figure 1 Diagram of short circuit grounding wire

对于工作接地线,可分为短路电缆电阻和线夹接触电阻,根据电力行业 DL-T 879—2004 技术规定,要求每个截面积的短路电缆电阻不大于以下数值,即对于 16、25、35 mm² 等截面,平均每米的电阻值应分别小于 1.24、0.79、0.56 mΩ^[20]。线夹接触电阻与连接点接触面的清洁、连接处的松紧以及接触面的有效连接有关,因此,日常应清理接触面,连接处的安装应按照制造商的建议松紧适当,保证接触面的有效连接。

1.3 奥迪道克公式的工作接地线截面积校核

传统接地线截面积选型基于奥迪道克公式,有源配电网接地线截面积选型参照执行。工作接地线的截面积、熔化电流和承受时间的关系可用奥迪道克(I. E. Ondendonks)公式表述:

$$I_m = S \sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{33t}} \tag{3}$$

式中 I_m 为熔化电流; S 为接地线截面积; t 为承受电流的时间; T_m 为金属的熔化温度; T_a 为环境温度。

取环境温度为定值,将奥迪道克公式进行简化,可得:

$$S \geq I_k \frac{\sqrt{t}}{c} \tag{4}$$

式中 I_k 为流过工作接地线的短路电流稳定值; t 为对应的断电保护时间; c 为接地线所用材料的热短路电流稳定值,其中铜线的值为 264。

根据式(4)形成不同截面积的耐受电流,如表 2 所示,将表 2 转换为时域关系,如图 2 所示。根据电网中的最大短路电流和断电保护时间,形成时域关系图,参照图 2 可初步选取工作接地线的截面积,例如:某配电网中的断电保护时间和最大短路电流对应图 2 中星点,根据时域关系图,星点位于 35、50 mm² 曲线之间,因此,可以初步选取截面积为 50 mm² 的工作接地线。

表 2 不同截面积工作接地线耐受电流

Table 2 Withstand current of different cross sections of short circuit grounding wires

断电保护时间/s	不同截面积(mm ²)接地线耐受电流/A				
	16	25	35	50	70
0.2	9 445	14 758	20 661	29 516	41 322
0.3	7 712	12 050	16 870	24 100	33 739
0.4	6 679	10 436	14 610	20 871	29 219
0.5	5 974	9 334	13 067	18 688	26 134
0.7	5 049	7 889	11 044	15 777	22 087

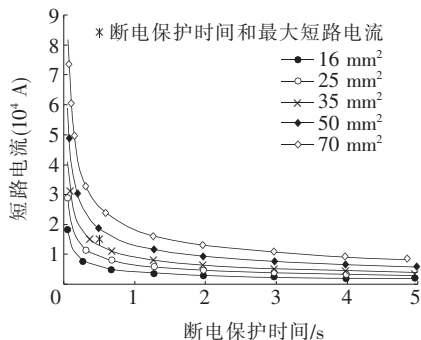


图 2 基于奥迪道克的工作接地线时域关系
Figure 2 Time domain diagram of short circuit grounding wires based on Ondendonk

2 工作点短路电流计算方法

检修停电工作时在工作点附近装设接地线,受限于电源点的增加,误操作或故障概率提升造成接地线处产生短路电流。当分布式电源位于中压侧时,可分为中、低压线路检修这 2 种情况进行计算(本文仅讨论中压线路检修的情况)。

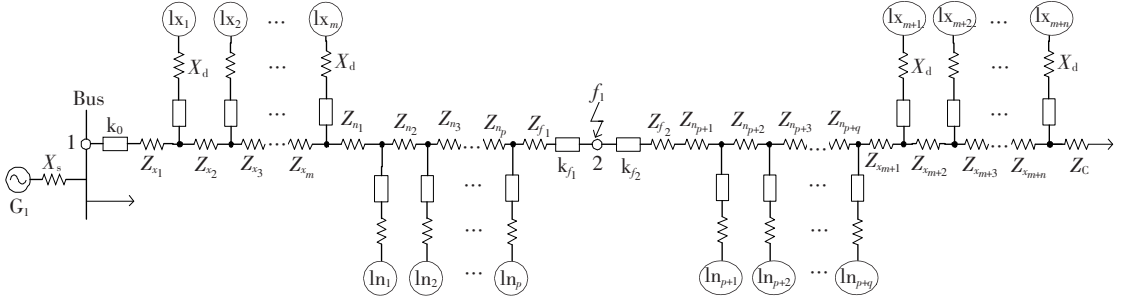


图 3 有源中压配电网模型

Figure 3 The model of active medium voltage distribution network

用母线出口断路器的开断容量近似等效系统的短路容量,可得系统阻抗:

$$X_s = \frac{U_N^2 S_B}{U_B^2 S_C} = \frac{S_B}{S_C}$$

式中 S_B 为基准容量; U_B 为基准电压。

1) 三相短路电流计算方法。

当 k_{f_1} 误动时,工作接地线上游的分布式电源 $lx_1 \sim lx_m, ln_1 \sim ln_p$ 以及系统电源会在工作接地线处产生三相短路电流,可为系统侧提供的短路电流 I_{f_0} 、旋转电机型 DG 提供的短路电流 $I_{f_{x_i}}$ 以及逆变型 DG 提供的短路电流 $I_{f_{n_j}}$ 。

$$I_{f_0} = \left| \frac{I_B}{\sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j} + Z_{f_1} + jX_s} \right| \quad (5)$$

$$I_{f_{x_i}} = \frac{U_N}{\sqrt{3} X_d''} \left| \frac{jX_s + \sum_{i=1}^i Z_{x_i}}{Z_{\Sigma_1}} \right| \quad (6)$$

$$I_{f_{n_j}} = \frac{\sqrt{3} S_{DG}}{2U_{DG}} \cdot \left| \frac{\sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^j Z_{n_j} + jX_s}{Z_{\Sigma_2}} \right| \quad (7)$$

式(5)~(7)中 I_B 为基准电流; Z_{x_i}, Z_{n_j} 分别为各个并网点之间的线路阻抗; Z_{f_1} 为末端逆变型 DG 到接地线的线路阻抗; X_{d_i} 为 DG 侧的总等效电抗,

选取有源中压配电网模型为研究对象,如图 3 所示。设断路器 k_0 的开断容量为 S_k ,母线电压为 U_N, k_{f_1}, k_{f_2} 分别为节点 2 两端断路器,线路全长为 L ,其单位长度阻抗值为 $Z_0, lx_1, lx_2, \dots, lx_{m+n}$ 均为旋转电机型 DG,次暂态电抗为 X_d'' ,DG 到并网点的电抗为 $X_{ds}, ln_1, ln_2, \dots, ln_{p+q}$ 均为逆变型 DG,额定电压为 U_{DG} ,容量均为 S_{DG} ,于节点 2 即 f_1 处挂工作接地线检修。

$$X_{d_i} = X_{ds} + X_d''; Z_{\Sigma_1} = (\dots((jX_s + Z_{x_1}) \parallel jX_{d_1} + Z_{x_2}) \parallel jX_{d_2} + Z_{x_3} \dots) \parallel jX_{d_{i-1}} + (\dots((\sum_{j=1}^p Z_{n_j} + Z_{f_1}) \parallel jX_{d_m} + Z_{x_m}) \parallel jX_{d_{m-1}} + Z_{x_{m-1}} \dots) \parallel jX_{d_{i+1}}; Z_{\Sigma_2} = (\dots((jX_s + Z_{x_1}) \parallel jX_{d_1} + Z_{x_2}) \parallel jX_{d_2} + Z_{x_3} \dots) \parallel jX_{d_m} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j} + Z_{f_1}。$$

若存在的分布式电源 lx_i, ln_j 的数量过多,考虑到式(6)、(7)较为复杂,而且实际上接入配电网中的 DG 容量较小,并网变压器和 DG 自身阻抗较大,相比 2 个 DG 并网点之间线路的阻抗较小,即 $X_{d_i} \gg Z_{x_i}$,因此,在并联计算中 DG 侧阻抗可以忽略。此时 $Z_{\Sigma_1} = Z_{\Sigma_2} = jX_s + \sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j} + Z_{f_1}$,将其代入式(6)、(7)可得:

$$I_{f_{x_i}} = \frac{U_N}{\sqrt{3} X_d''} \cdot \left| \frac{jX_s + \sum_{i=1}^i Z_{x_i}}{jX_s + \sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j} + Z_{f_1}} \right| \quad (8)$$

$$I_{f_{n_j}} = \frac{\sqrt{3} S_{DG}}{2U_{DG}} \cdot \left| \frac{\sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^j Z_{n_j} + jX_s}{jX_s + \sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j} + Z_{f_1}} \right| \quad (9)$$

由叠加定理可得:

$$I_{f\Sigma\text{up}} = I_{f0} + \sum_{i=1}^m I_{fx_i} + \sum_{j=1}^p I_{fn_j} \quad (10)$$

将式(5)、(8)、(9)代入式(10),即可求得上游侧对接地线提供的三相短路电流。

当 k_{f_2} 误动时,工作接地线下游的分布式电源 $lx_{m+1} \sim lx_{m+n}$ 、 $ln_{p+1} \sim ln_{p+q}$ 在工作接地线处会产生三相短路电流。同理,参考式(8)、(9)可得:

$$I'_{fx_i} = \frac{U_N}{\sqrt{3} X''_d} \cdot \left| \frac{\sum_{i=f+1}^{m+n} Z_{x_i} + Z_c}{\sum_{i=m+1}^{m+n} Z_{x_i} + \sum_{j=p+1}^{p+q} Z_{n_j} + Z_{f_2} + Z_c} \right| \quad (11)$$

$$I'_{fn_j} = \frac{\sqrt{3} S_{DG}}{2U_{DG}} \cdot \left| \frac{\sum_{i=m+1}^{m+n} Z_{x_i} + \sum_{j=p+1}^{p+q} Z_{n_j} + Z_c}{\sum_{i=m+1}^{m+n} Z_{x_i} + \sum_{j=p+1}^{p+q} Z_{n_j} + Z_{f_2} + Z_c} \right| \quad (12)$$

则有

$$I_{f\Sigma\text{down}} = \sum_{i=m+1}^{m+n} I_{fx_i} + \sum_{j=p+1}^{p+q} I_{fn_j} \quad (13)$$

将式(11)、(12)代入(13),即可求得下游侧对接地线提供的三相短路电流。

由于 k_{f_1} 、 k_{f_2} 同时误动的可能性极小,因此,不考虑上、下游同时来电的可能性,按照上、下游两者中对接地点提供的最大短路电流进行工作接地线截面积的初步选择,即若 $I_{f\Sigma\text{up}} > I_{f\Sigma\text{down}}$,则 $I_{f\Sigma} = I_{f\Sigma\text{up}}$,若 $I_{f\Sigma\text{down}} > I_{f\Sigma\text{up}}$,则 $I_{f\Sigma} = I_{f\Sigma\text{down}}$ 。

2) 单相接地电流的计算方法。

当工作接地线上游电源突然单相来电时(如跌落保险合闸),工作接地线处出现单相故障(假设 a 相来电),此时单相接地故障的三序网络如图 4 所示; $Z_{x_i(1)}$ 和 $Z_{n_j(1)}$ 、 $Z_{x_i(2)}$ 和 $Z_{n_j(2)}$ 、 $Z_{x_i(0)}$ 和 $Z_{n_j(0)}$ 分别表示对应线路的正、负、零序阻抗; $X_{s(1)}$ 和 $X_{DG(1)}$ 、 $X_{s(2)}$ 和 $X_{DG(2)}$ 、 $Z_{s(0)}$ 和 $Z_{DG(0)}$ 分别表示系统侧、旋转电机型 DG 侧的正、负、零序阻抗; $\dot{U}_{f|0}$ 表示接地点的开路电压; $I_{DG(1)}$ 、 $I_{DG(2)}$ 分别为逆变型 DG 故障时的等效正、负序电流源,为恒定值,其值等于故障时 DG 最大输出电流与故障前 DG 输出电流之差^[10],实际工程中为消除负序和零序分量的不良影响,逆变型 DG 最常采用正序分量控制策略,此时 $I_{DG(2)} = 0$; Z_g 为工作接地线接地电阻。

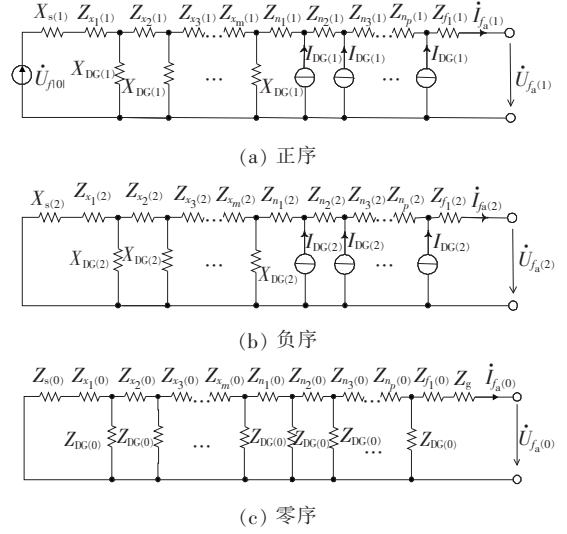


图 4 三序网络

Figure 4 Three sequence network diagram

由基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law, KCL),并考虑到 lx_i 侧正负序阻抗远大于系统支路正负序阻抗,因此,并联计算中将其忽略简化,可得 a 相电压平衡关系:

$$\begin{aligned} & \dot{U}_{f|0} - \dot{U}_{fa(1)} = \\ & \dot{i}_{fa(1)} (jX_{s(1)} + Z_{f_1(1)} + \sum_{i=1}^m Z_{x_i(1)} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j(1)}) - \\ & I_{DG(1)} \left[\sum_{a=1}^p (p-a+1)Z_{n_a(1)} + p(jX_{s(1)} + \sum_{i=1}^m Z_{x_i(1)}) \right] \\ & - \dot{U}_{fa(2)} = \\ & \dot{i}_{fa(2)} (jX_{s(2)} + Z_{f_1(2)} + \sum_{i=1}^m Z_{x_i(2)} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j(2)}) - \\ & I_{DG(2)} \left[\sum_{a=1}^p (p-a+1)Z_{n_a(2)} + p(jX_{s(2)} + \sum_{i=1}^m Z_{x_i(2)}) \right] \\ & - \dot{U}_{fa(0)} = \\ & \dot{i}_{fa(0)} \cdot [(\dots((\dots((Z_{s(0)} + Z_{x_1(0)}) \parallel Z_{DG(0)} + \\ & Z_{x_2(0)}) \parallel Z_{DG(0)} + Z_{x_3(0)} \dots) \parallel Z_{DG(0)} + Z_{n_1(0)}) \parallel Z_{DG(0)} + \\ & Z_{n_2(0)}) \parallel Z_{DG(0)} + Z_{n_3(0)} \dots) \parallel Z_{DG(0)} + Z_{f_1(0)} + 3Z_g] \\ & \text{令 } Z_{\Sigma(1)}, Z_{\Sigma(2)}, Z_{\Sigma(0)} \text{ 分别为} \\ & Z_{\Sigma(1)} = jX_{s(1)} + Z_{f_1(1)} + \sum_{i=1}^m Z_{x_i(1)} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j(1)} \\ & Z_{\Sigma(2)} = jX_{s(2)} + Z_{f_1(2)} + \sum_{i=1}^m Z_{x_i(2)} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j(2)} \\ & Z_{\Sigma(0)} = (\dots((\dots((Z_{s(0)} + Z_{x_1(0)}) \parallel Z_{DG(0)} + \\ & Z_{x_2(0)}) \parallel Z_{DG(0)} + Z_{x_3(0)} \dots) \parallel Z_{DG(0)} + \\ & Z_{n_1(0)}) \parallel Z_{DG(0)} + Z_{n_2(0)}) \parallel Z_{DG(0)} + \\ & Z_{n_3(0)} \dots) \parallel Z_{DG(0)} + Z_{f_1(0)} + 3Z_g \quad (14) \end{aligned}$$

且考虑 $Z_{\Sigma(2)} = Z_{\Sigma(1)}$ 。结合各电压平衡关系并由单相接地故障的边界条件可得 a 相故障电流:

$$I_a = \left| \frac{3\dot{U}_{f|0|} + 6\dot{I}_{DG(1)} \sum_{a=1}^p (p-a+1)Z_{n_a(1)}}{2Z_{\Sigma(1)} + Z_{\Sigma(0)}} + \frac{6\dot{I}_{DG(1)} p (jX_{s(1)} + \sum_{i=1}^m Z_{x_i(1)})}{2Z_{\Sigma(1)} + Z_{\Sigma(0)}} \right| I_B \quad (15)$$

当工作接地线下游电源突然单相来电时,具体计算方法与上游电源类似,此处不再多加赘述,此时 a 相故障电流:

$$I_a = \left| \frac{6\dot{I}_{DG(1)} \sum_{a=p+2}^{p+q} (p-a+1)Z_{n_a(1)}}{2Z_{\Sigma(1)} + Z_{\Sigma(0)}} + \frac{6\dot{I}_{DG(1)} q (Z_{c(1)} + \sum_{i=m+1}^{m+n} Z_{x_i(1)})}{2Z_{\Sigma(1)} + Z_{\Sigma(0)}} \right| I_B \quad (16)$$

同样不考虑上、下游同时来电的可能性,取上、下游单相故障电流中的最大值作为工作接地线处的最终单相故障电流,式(15)、(16)为大电流接地方式的单相故障电流计算方法,小电流接地方式计算公式为

$$I_k = jU_{\Phi} (3\omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L}) \quad (17)$$

式中 U_{Φ} 为系统相电压; C_{Σ} 为输电线路总电容; L 为消弧线圈电感。

3 工作点残压的计算方法

通过对最大短路电流进行工作接地线截面积初选取后,工作接地线可以承受最大短路电流,但在在工作点附近产生的残压可能高于人体安全电压,对作业人员的人身安全造成威胁。因此,对工作点残压的进一步计算可以分成三相和单相来电工况 2 种情况。

3.1 三相来电工况

以文 2.1 中 k_{f1} 误动为例,利用文 1.3 中初步选取的工作接地线短路电缆的截面积,可以得知短路电缆电阻为 R_m ,线夹接触电阻为 R_n ,均为标么值;同样由叠加定理可得,三相来电工况下工作点处的残压水平等于系统电源作用时产生的残压 U_{res0} 、

旋转电机型 DG $1x_i$ 作用时产生的残压 U_{resxi} 、逆变型 DG $1n_j$ 作用时产生的残压 U_{resnj} 之和。

$$U_{res\Sigma} = U_{res0} + U_{resxi} + U_{resnj} \quad (18)$$

其中

$$U_{res0} = \left| \frac{R_m + R_n}{jX_s + \sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j} + Z_{f_1} + R_m + R_n} \right| U_N$$

$$U_{resx_i} = \frac{U_N (R_m + R_n)}{\sqrt{3} X''_d} \cdot \left| \frac{jX_s + \sum_{i=1}^i Z_{x_i}}{jX_s + \sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j} + Z_{f_1}} \right|$$

$$U_{resn_j} = \frac{\sqrt{3} S_{DG} (R_m + R_n)}{2U_{DG}} \cdot \left| \frac{\sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^j Z_{n_j} + jX_s}{jX_s + \sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j} + Z_{f_1}} \right|$$

3.2 单相来电工况

电源侧突然单相合闸会造成接地线处单相故障。假定大地的各向均匀同性,此时工作地点的残压等于地面电势差、工作接地线两端的电压、工作接地线与导线的接触电压之和。由于工作接地线装设处大地表面的电势 $U_g = I_k \cdot Z_g$,而位于工作点大地表面的电势 $U_x = I_k \cdot \int_x^{\infty} \frac{\rho dr}{2\pi r^2} = \frac{I_k \rho}{2\pi x}$,因此,可得残压 $U_{res} = U_g - U_x - I_k (R_m + R_n) = I_k (Z_g + R_m + R_n) - \frac{I_k \rho}{2\pi x}$,又因为 $R_m + R_n \leq Z_g$,最终可得:

$$U_{res} = I_k Z_g - \frac{I_k \rho}{2\pi x} \quad (19)$$

式中 I_k 为工作接地线处的单相接地电流; ρ 为土壤电阻率; Z_g 为工作接地线的接地电阻; x 为工作点与工作接地线之间的距离。

由分析可得,在求得三相和单相残压后,以人体安全电压为阈值,若残压均小于人体安全电压,说明初选取的工作接地线截面积符合安全标准;若两者有其一大于人体安全电压,则应重新选取较大的工作接地线截面积或采取其他保护措施。

4 应考虑的影响因素

4.1 渗透率的影响

对于旋转电机型 DG,出现故障时不考虑电压

降落,用其次暂态阻抗来表示容量的变化^[21],两者之间的关系为

$$X''_d = 0.1 \times \frac{U_{DG}^2}{S_{DG}} \quad (20)$$

由式(20)可得,DG容量越高,次暂态阻抗越小,则提供的短路电流越大。

对于逆变型DG,考虑其容量对额定电流的影响,即

$$I_N = \frac{S_{DG}}{\sqrt{3}U_{DG}} \quad (21)$$

由式(21)可得,由于容量不同, $\ln_1 \sim \ln_j$ 的额定电流也不同,因此,对故障点所提供的短路电流也不同。逆变型DG的容量越大,提供的短路电流也越大,在工作点附近产生的残压也越大。

若要研究DG渗透率对配电网短路电流和残压的影响,则只需将各容量计算所得的 X''_d 、 S_{DG} 代入到式(6)、(7)中,即可求得相对应短路电流和残压。

4.2 不同接地方式的影响

为了保证电网侧的安全、稳定运行,分布式电源的接入和退出应以不改变主网的中性点接地方式为原则^[10]。电网、DG侧不同的接地方式组合对三相短路电流的计算没有影响,但是会使得单相故障电流以及单相残压与传统配电网有明显区别,电网、DG侧不同接地方式组合如图5所示。

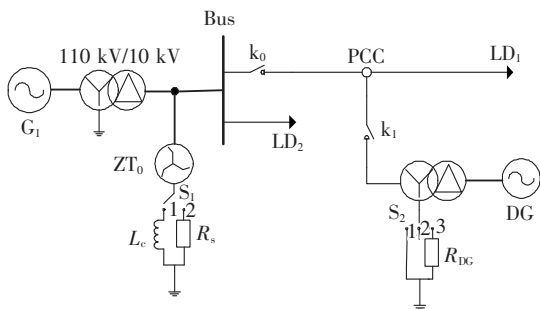


图5 电网侧与DG侧不同接地组合方式

Figure 5 Different grounding combination modes of grid side and DG side

同样以文2.1中 k_{f1} 误动为例,中压配电网中系统电网侧中性点一般采用经消弧线圈接地方式(部分采用经小电阻接地方式)。

4.2.1 消弧线圈接地方式

当系统侧中性点为经消弧线圈接地方式时(图5),DG侧中性点只可能为不接地方式(经消弧线圈

接地方式的经济性较差,且增加调谐复杂度),此时DG侧采用不接地,单相故障电流为系统线路补偿后的对地电容电流,计算方法见式(17),将单相故障电流代入式(19)即可得单相残压。

通过计算可得工作点处的单相接地电流、残压较小,当开展检修工作时,仅需在来电侧挂接可靠的最低要求截面积的接地线即可满足要求,本文不再赘述。

4.2.2 小电阻接地方式

当系统侧经小电阻接地时($Z_{s(0)} = 3R_s$),DG侧可能的接地方式有直接接地、经小电阻接地、不接地3种,具体见图5,当 S_1 合在2的位置时, S_2 分别对应1、3、2的位置。当DG侧采用直接接地时, $Z_{DG(0)} = Z_{ds(0)}$, $Z_{ds(0)}$ 表示DG到并网点的阻抗;当DG侧采用经小电阻接地时, $Z_{DG(0)} = 3R_{DG} + Z_{ds(0)}$;当DG侧采用不接地时, $Z_{DG(0)} \rightarrow \infty$ 。将对应的 $Z_{s(0)}$ 、 $Z_{DG(0)}$ 分别代入式(14)中,得到的结果再代入式(15)、(18)中,可求得各种接地方式配合下的单相接地电流和单相残压。

随着电缆线路的大量应用,系统电容电流不断增大,部分发达城市已改为小电阻接地方式^[22-23],而在小电阻接地方式下,工作点的残压可能达到数千伏,严重威胁到检修人员的人身安全。因此,本文主要以小电阻接地方式为例进行讨论。

4.3 多重接地线的影响

以文2.1中 k_{f1} 误动为例,假设位于节点2所在杆塔挂工作接地线1(图3),短路电缆、接触电阻分别为 R_{m1} 和 R_{n1} ,接地电阻为 R_1 ;位于距节点2约 L (m)处(靠近系统侧)挂工作接地线2,短路电缆、接触电阻分别为 R_{m2} 和 R_{n2} ,接地电阻为 R_2 。

未挂工作接地线2前的三相短路电流按式(10)计算可得,挂工作接地线2后三相短路电流为

$$I_{dun1} = \frac{R_{m2} + R_{n2}}{Z_{12} + R_{m1} + R_{n1} + R_{m2} + R_{n2}} I_{f\Sigma up} \quad (22)$$

式中 $I_{f\Sigma up}$ 为挂工作接地线2前的三相短路电流; Z_{12} 为2个工作接地线之间的线路阻抗。

以系统侧三相来电为例,计算挂双重工作接地线后的三相残压,参考式(18)右边第1项,此时三相残压为

$$U_{res0} = \left| \frac{1}{jX_s + \sum_{i=1}^m Z_{x_i} + \sum_{j=1}^p Z_{n_j} + Z_{f_1} - Z_{12}} \right| \cdot \left| \frac{R_{m1} + R_{n1}}{Z_{12} + R_{m1} + R_{n1}} \right| U_N$$

改用双重工作接地线后单相残压的变化可表示为

$$U'_{res} = I_a \left(Z_{g2} - \frac{\rho}{2\pi x} \right) \cdot \left| \frac{Z_{g1}}{Z_{g1} + Z_{12} + Z_{g2}} \right| \quad (23)$$

式中 I_a 为挂工作接地线 2 前的单相接地电流; x 为工作点距工作接地线 1 的距离。

由式(22)可得,在挂多重工作接地线后,三相短路电流减小到了原电流的 $(R_{m2} + R_{n2}) / (Z_{12} + R_{m1} + R_{n1} + R_{m2} + R_{n2})$ 倍,因此,三相残压也会相应减小。由式(23)可得,单相残压减小到了原单相残压的 $Z_{g1} / (Z_{g1} + Z_{12} + Z_{g2})$ 倍,也可以得到减小额外工作接地线的接地电阻和增大各工作接地线之间的线路长度,都能够增加抑制残压的效果。

5 实例计算验证

当前,国内外已经涌现出一大批 20 kV 典型配电网,如:江苏、青海、浙江等省的风电、光伏较发达,均已形成了一定规模的 20 kV 典型有源配电网。浙江省共计 800 余条 20 kV 线路,接入 DG 的线路

占比超过 50%^[24-26]。

以浙江电网 20kV 闻澜 C5332 线为例,如图 6 所示,其中,所接变电所尖山变的主变压器额定容量为 80 MV·A,采用 ZN 型接线方式;中性点经电阻 R_1 接地, $R_1 = 20 \Omega$; $DG_1 \sim DG_4$ 均为 20 kV 光伏发电,容量分别为 2.94、2.23、3.85、3.81 MW;三雷支线 10# 的配电变压器容量为 500 kV·A, f_1 处挂接地线检修, f_1 与 48# 支线之间的距离为 70 m。

当在 f_1 处挂接工作接地线进行检修(中压侧检修)时,根据文 2 中方法,计算短路电流,如表 3 所示;20 kV 配电网中短路电流与各截面积耐受电流曲线对比如图 7 所示。

结合表 3、图 7 分析可得,下游侧只需使用 16 mm² 的工作接地线;对于上游侧,当断电保护时间为 0.5 s 时,最大三相短路电流点位于实线与点实线之间,可得 25 mm² 的工作接地线能承载该配电网可能产生的最大短路电流;当断电保护时间为 0.75 s 时,最大三相短路电流点位于虚线与实线之间,此时只有 35 mm² 以上的工作接地线才能承载最大短路电流,取断电保护为 0.7 s。因此,在检修工作中,上、下游初步选取截面积分别为 35、16 mm² 的工作接地线,能否投入使用,需对三相、单相残压进一步计算。

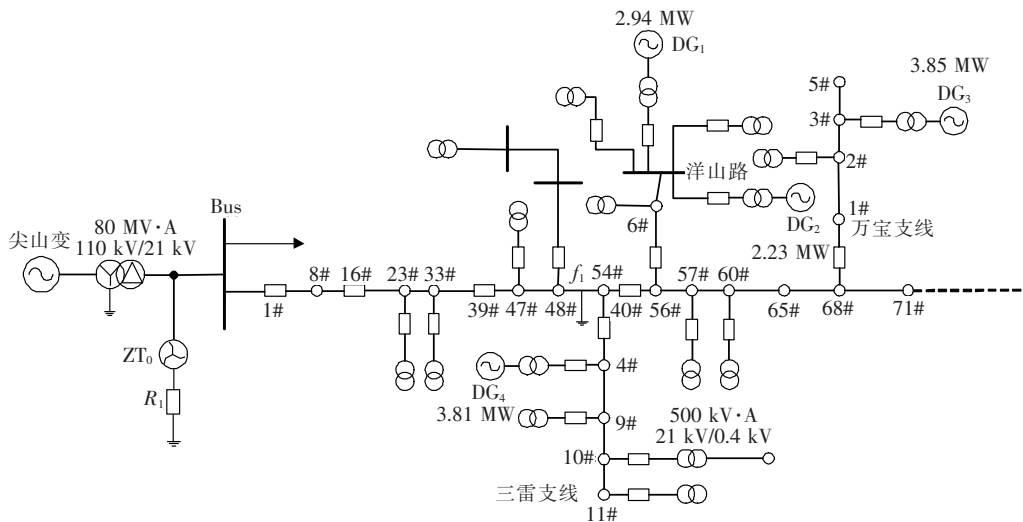


图 6 20 kV 闻澜 C5332 线线路

Figure 6 Circuit diagram of 20 kV Wenlan C5332 line

表 3 不同 DG 装设位置下短路电流计算结果

Table 3 Calculation results of short circuit current under differentn positions of DG

DG 装设位置	三相短路电流	单相接地电流
工作接地线上游	8 324.63	1 798.23
工作接地线下游	209.14	9.24
工作接地线上、下游	8 324.63	1 798.23

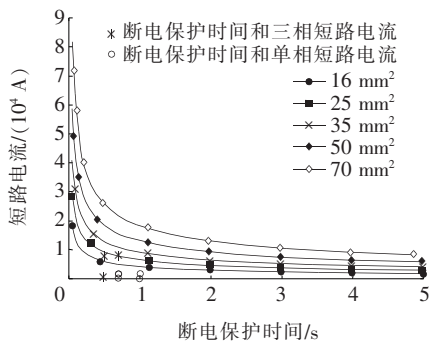


图 7 短路电流与各截面耐受电流曲线对比

Figure 7 Comparison of short circuit current and withstand current curve of each cross section

设 $\rho = 50 \Omega/m$, 工作点距工作接地线 1 m, 工作接地线的接地电阻 $Z_g = 8 \Omega$, 工作接地线设为 3 m。由文 1 可得上、下游工作接地线的短路电缆电阻 R_m 分别为 1.68、3.72 m Ω , 线夹接触电阻 R_n 均为 5 m Ω , 残压计算结果如表 4 所示。

表 4 不同 DG 装设位置下残压计算结果

Table 4 Calculation results of residual pressure under differentn positions of DG

DG 装设位置	三相残压	单相残压
工作接地线上游	96.23	4 845.93
工作接地线下游	2.24	9.24
工作接地线上、下游	96.23	4 845.93

由表 4 可得, 下游侧单相、三相残压均小于人体安全电压, 因此, 16 mm² 的工作接地线符合安全要求。而对于小电阻接地的系统侧, 三相残压的最大值为 96.23 V, 单相残压为 4 845.93 V, 远远超过人体安全电压, 此时若增加截面积, 采用 50 mm² 的工作接地线, 则 $R_m = 1.2 \text{ m}\Omega$; 降低线夹接触电阻至 $R_n = 3 \text{ m}\Omega$, 计算可得三相残压仍有 60 V, 而单相残压几乎没有影响。

若继续采用更大截面积的工作接地线, 一方面降低三相残压的效果不明显、携带不方便, 另一方面线夹接触电阻与接触面的清洁程度、连接松紧有关,

并不能保证取最小值。根据 $R = k\rho/S$ (R 为接地电阻, k 为系数, ρ 为土壤电阻率, S 为接地极的有效表面积), 可以采用人工降低土壤电阻率或者增加临时接地极与土壤的接触面积, 以减小接地电阻, 或者采用多重接地线减小工作点附近的单相、三相残压, 方法如下。

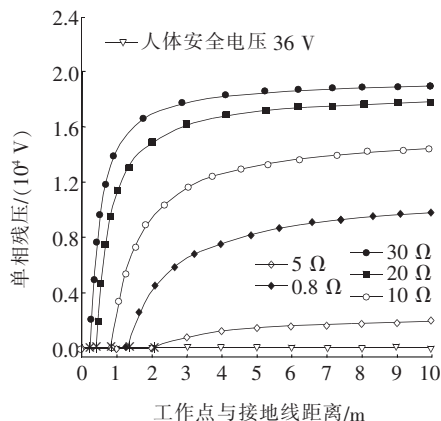
在距 48 号支线 25 m 处挂 35 mm² 的工作接地线 3, 短路电缆、接触电阻分别为 1.68、5 m Ω , 如表 5 所示, 计算结果表明, 在检修过程中, 挂接多重接地线能有效降低单相、三相残压, 而且, 额外挂接的工作接地线的接地电阻越小、2 个工作接地线之间的距离越长, 则对残压的抑制效果更为有效。但是单相残压在降低后依旧远远超过人体安全电压, 单相残压主要由单相故障电流和接地电阻决定。

表 5 使用双重接地线后的残压计算结果

Table 5 Influence of double grounding wire on residual voltage

双重接地线方法	三相残压/V	是否符合要求	单相残压/V	是否符合要求
使用方法前	96.23	否	4 845.93	否
使用方法后	33.98	是	2 260.53	否
残压降低率/%	64.69	—	53.35	—

以上游突然来电为例, 计算结果如图 8 所示, 可得工作点距离接地线越近, 单相残压越小; 接地线的接地电阻越小, 单相残压也越小。



注: * 表示各曲线与人体安全电压线的交叉坐标点, 从左至右依次为(0.250 6,36)、(0.399 3,36)、(0.797 6,36)、(1.277 0,36)、(2.021 0,36)

图 8 距离、接地电阻与单相残压的关系

Figure 8 Relationship between distance, grounding resistance and single phase residual voltage

对于接地电阻为 $30\ \Omega$ 的情况,工作点与接地线的距离应始终保持在 $0.25\ \text{m}$ 以内,才能保证人身安全。但是此距离非常小,在实际检修过程中很难保证,因此,应尽可能地减小接地线的接地电阻。接地电阻由土壤的电阻率和接地极决定,正常情况下约为 $20\ \Omega$ 左右,此时可以采用人工降低土壤电阻率或者增加临时接地极与土壤的接触面积,以减小接地电阻,从而降低单相残压,保证作业人员在检修区域内的人身安全。

6 结语

本文通过对有源中压配电网检修的相关安全技术进行理论分析和实例计算,提出了一种有源配电网工作接地线截面积的校核方法。

1) 计算有源配电网在工作接地线处可能产生的最大短路电流,基于奥迪道克公式形成不同截面积耐受电流时域关系图,将最大短路电流与时域关系图相结合,按照不熔断的原则初选取工作接地线的截面积;

2) 计算工作点附近可能产生的三相、单相残压,以人体安全电压为阈值,评估所选取的工作接地线是否符合安全标准,若不符合则重新选取较大截面积的工作接地线,直至残压水平低于人体安全电压。

本文在传统无源配电网的基础上进行改进,从检修作业安全性进行考虑,取得了一定研究成果,为大规模分布式电源接入配电网检修作业人身安全性评价具有一定指导意义。下一步,拟对分布式电源短路电流进行进一步估算。

参考文献:

- [1] 苗友忠,李顺昕,雷为民,等.考虑用户负荷类型的含分布式电源的配电网可靠性评估[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):93-99.
MIAO Youzhong, LI Shunxin, LEI Weimin, et al. Reliability evaluation of distribution network with distributed generation considering customer sectors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 93-99.
- [2] ACKERMANN T, KNYAZKIN V. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002.
- [3] 段建东,孙茜,陈鲁鹏,等.基于改进和声搜索算法的有源配电网优化调度[J].高压电器,2021,57(11):1-9.
DUAN Jiandong, SUN Qian, CHEN Lupeng, et al. Optimal dispatching of active distribution network based on improved harmony search algorithms[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 1-9.
- [4] 据泽立,朱跃,蒲路,等.配电网电压综合补偿方法研究[J].高压电器,2020,56(4):235-240.
JU Zeli, ZHU Yao, PU Lu, et al. Study on the voltage integrated compensation method of distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 235-240.
- [5] IEEE C2—2017. National electrical safety code[S].
- [6] IEEE Std 1048—2016. IEEE guide for protective grounding of power lines[S].
- [7] 東京電力株式会社. 配電用線路運用ルール[R]. 東京: 東京電力株式会社, 2013.
- [8] 朱建军,余光凯,刘庭,等.铜包铝复合材料用于特高压携带型短路接地线的轻型化方案研究[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):170-177.
ZHU Jianjun, YU Guangkai, LIU Ting, et al. Research on lightweight scheme of copper-clad aluminum composites in UHV portable earthing and short-circuiting wires[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 170-177.
- [9] ASHTI R, DAISY M, SHAKER H R, et al. Impedance based fault location method for four-wire power distribution networks[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 1342-1349.
- [10] 刘健,张志华,李云阁,等.基于故障相接地的配电网单相接地故障自动处理[J].电力系统自动化,2020,44(12):169-177.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, LI Yunge, et al. Automatic processing of single-phase grounding fault in distribution network based on fault phase grounding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 169-177.
- [11] 江兴月.含分布式电源的配电网潮流和短路统一分析方法[D].天津:天津大学,2007.
- [12] 潘晴宇.考虑分布式电源接入的变电站规划关键技术研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):98-97.
PAN Qingyu. Research on key technologies of substa-

- tion planning considering distributed power access[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(6): 98-97.
- [13] 张伊, 陈启鑫, 夏清, 等. 基于分布因子法的主动配电网成本分摊方法[J]. *中国电力*, 2020, 53(4): 13-21.
ZHANG Yi, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Active distribution network cost allocation method based on distribution factor method[J]. *Electric Power*, 2020, 53(4): 13-21.
- [14] 杨杉, 同向前, 刘健, 等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(7): 1977-1982.
YANG Shan, TONG Xiangqian, LIU Jian, et al. Short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(7): 1977-1982.
- [15] BOUTSIKA T N, PAPATHANASSIOU S A. Short-circuit calculations in networks with distributed generation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(7): 1181-1191.
- [16] 谢林枫, 王红星, 刘军成, 等. 基于电能质量约束的智能配电网分布式电源消纳能力研究[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(4): 41-47.
XIE Linfeng, WANG Hongxing, LIU Juncheng, et al. A study on the distributed generation accommodation capacity of the smart distribution network based on power quality constraints[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(4): 41-47.
- [17] 张博, 唐巍, 蔡永翔, 等. 基于一致性算法的户用光伏逆变器和储能分布式控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 86-94.
ZHANG Bo, TANG Wei, CAI Yongxiang, et al. Distributed control strategy of residential photovoltaic inverter and energy storage based on consensus[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 86-96.
- [18] 李颖超. 有源配电网馈线故障区段定位方法与实现技术[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [19] 李金雄. 携带型短路接地线应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 8.
- [20] DL/T 879—2004. 带电作业用便携式接地和接地短路装置[S].
- [21] 谌江波, 陈碧云, 王楚通. 含超导元件的配电网继电保护方案研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(8): 84-90.
CHEN Jiangbo, CHEN Biyun, WANG Chutong. Distribution grid relay protection scheme with superconducting device[J]. *Smart Power*, 2020, 48(8): 84-90.
- [22] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. *电网技术*, 2004, 28(16): 86-89.
LIU Mingyan. Selection of neutral grounding modes in power distribution network[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(16): 86-89.
- [23] SHEIDAEI F, AHMARINEJAD A. Multi-stage stochastic framework for energy management of virtual power plants considering electric vehicles and demand response programs[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 120: 106047.
- [24] BARICEVIC T, TUNJIC A, MIHALEK E. et al. AHP method in prioritizing investments in transition of MV network to 20 kV[C]//20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2009), Prague, Czech Republic, 2009.
- [25] 魏庆海, 吕鸣镝, 周莉梅, 等. 配电网采用 20 kV 供电的前景分析[J]. *电网技术*, 2008, 32(23): 61-66.
WEI Qinghai, LÜ Mingdi, ZHOU Limei, et al. Prospective analysis of adopting 20 kV voltage in distribution system[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(23): 61-66.
- [26] 程杰, 向铁元, 张贺, 李敏. 20 kV 电压等级经济性比较论证[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2011, 23(5): 125-130.
CHENG Jie, XIANG Tieyuan, ZHANG He, et al. Comparison and demonstration on the economical efficiency of 20 kV voltage series[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2011, 23(5): 125-130.