

分布式发电对配电网继电保护的影响

满 莹, 龙彦君*

(国网湖南省电力有限公司湘西供电分公司, 湖南 湘西 416000)

摘要: 文章从DG渗透率、并网点及容量切入, 分析对现有保护作用, 重点研究DG接入电网不同位置时, 各区段、馈线故障下继电保护的受影响情况。针对DG不同并入位置制定保护方案, 提出基于实时电网运行状态的自适应保护方法, 通过故障定位、故障类型识别、实时阻抗与电势计算、动态整定系数修正, 实现保护整定值随DG运行状态自动调整, 有效扩大保护范围、避免误动与拒动、提升保护适应性, 保障电网稳定。最后经MATLAB仿真验证分析结论, 形成具参考价值的保护方案。

关键词: DG; 继电保护; 重合闸; 短路电流

中图分类号: TM77

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2511F007

CSTR: 32400.14.ncdqh.2511F007

Impact of Distributed Generation on Relay Protection in Distribution Networks

Man Ying, Long Yanjun*

(State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Xiangxi Power Supply Branch, Hunan Xiangxi 416000, China)

Abstract: This paper analyzes the impact of distributed generation (DG) penetration rate, grid connection location, and capacity on existing protection, with a focus on the influence of DG integration at different locations on relay protection under faults in different sections and feeders. Protection schemes are developed for different DG integration locations, and an adaptive protection method based on real-time grid operating states is proposed. Through fault location, fault type identification, real-time calculation of impedance and electric potential, and dynamic correction of setting coefficients, the proposed method enables protection settings to be automatically adjusted according to DG operating states. It can effectively expand the protection range, avoid maloperation and failure to operate, improve protection adaptability, and ensure grid stability. Finally, the analysis conclusions are verified by MATLAB simulation, forming a protection scheme with reference value.

Keywords: distributed generation; relay protection; reclosing; short circuit current

全球电力负载多依赖大电网供应, 但随着人们对电能质量、稳定性要求提升, 大量非线性负荷与新能源变流器并网加剧系统扰动, 不仅提升调控难度、易出现局部谐波谐振, 潮流越限、同步失稳还会引发连锁跳闸, 诱发大面积停电(如“8.14美加大停电”“印度电网崩溃”)。传统大电网收益低, “集中式+分布式”共存模式因损失小、成本低获推广。单一发电限制电网灵活性, 分布式发电(distributed generation, DG)虽让配电网变为多端供电网络、提升灵活性, 但也改变故障短路电流与潮流分布, 冲击电网稳定性, 增加规划复杂度^[1]。

1 分布式发电研究概述

分布式发电是相对于传统大容量集中式发电的分散式、小容量、就近接入、就地消纳发电方式,

收稿日期: 2025-11-16; 修回日期: 2026-04-22

是配电网重要组成部分。特点为: 用清洁能源、功率小、主要接入10 kV配电网或0.4 kV母线, 但会干扰电网稳态与暂态特性。现有限流适配措施分为3类。

系统侧措施: 故障时断开DG与系统联系并保持信息同步, 便于后续并网; 通过缩减DG装机实现故障电流抑制, 但会制约分布式电源整体建设规模。

设备侧措施: DG后加电抗器虽能限流, 却会产生大压降影响保护; 依靠逆变器控制实现故障限流理论可行, 现阶段工程技术尚不成熟。

保护与限流装置措施: 优化整定值可保电能质量与保护正常; 加装阻抗限流器能提升保护灵敏度与可靠性。

实验证明DG接入电网不受地域限制, 剪灵活性高、成本低, 多采用清洁能源且能削峰填谷, 可提

升供电可靠性与环保效益^[2]。未来 DG 将成电网主流运行模式，对传统电网冲击大，也会增加电网结构复杂度与挑战。

2 分布式电源并网后配电网的保护

DG 并网后，配电网由单端电源变为多端电源，故障特征与保护动作逻辑发生根本性改变，目前尚无统一完善的保护程序可完全消除其影响。本节基于传统三段式电流保护，分位置提出适配保护方案。

2.1 传统电网的三段式电流保护^[3]

2.1.1 电流速断保护（电流Ⅰ段）

1) 短路特性分析。

据图 1 可知： k 处出现故障（三相短路）时，经过保护 1 处电流大小为：

$$I_k = \frac{E}{Z_{\Sigma}} = \frac{E}{Z_k + Z_s} \quad (1)$$

式中： E 为电网的相电压； Z_s 为系统电源的等效阻抗； Z_k 为故障处到保护 1 处等效阻抗。

根据式 1 可得短路电流的多少与系统电源接入的阻抗有关，接入越多短路电流越小^[4]。还有与故障范围大小有关，故障点与系统连接的母线距离越长，短路电流越小。

2) 动作电流的整定。

整定公式为：

$$I_{\text{act.1}}^{\text{I}} = K_{\text{rel}}^{\text{I}} \cdot I_{\text{K.B.max}}^{(3)} = K_{\text{rel}}^{\text{I}} \cdot \frac{E_{\text{XX}} / \sqrt{3}}{Z_{\text{Z.min}} + ZL_{\text{AB}}} \quad (2)$$

式中： $K_{\text{rel}}^{\text{I}}$ 为可靠系数，取值为 1.2~1.3； $I_{\text{K.B.max}}^{(3)}$ 为线路末端最大三相短路电流； Z 为线路单位长度阻抗； E_{XX} 为系统线电压； $Z_{\text{Z.min}}$ 为最大运行方式下阻抗； L_{AB} 为该方式下 AB 线路的实际总长度。

2.1.2 限时电流速断保护（电流Ⅱ段）

整定公式：

$$I_{\text{act.1}}^{\text{II}} = K_{\text{rel}}^{\text{II}} \cdot I_{\text{act.1}}^{\text{I}} = K_{\text{rel}}^{\text{II}} \cdot K_{\text{rel}}^{\text{I}} \cdot I_{\text{K.C.max}}^{(3)} \quad (3)$$

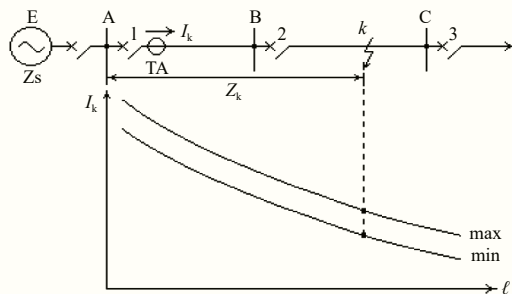


图1 电流速断保护分析图形

式中：可靠系数 $K_{\text{rel}}^{\text{II}}$ 取值为 1.1~1.2； $I_{\text{act.1}}^{\text{I}}$ 为相邻线路电流速断保护整定值； $I_{\text{K.C.max}}^{(3)}$ 为母线 C 处三相短路时的最大短路电流。

对保护 1 的电流Ⅱ段，灵敏系数 K_{sen} ：

$$K_{\text{sen}} = \frac{I_{\text{K.B.min}}^{(2)}}{I_{\text{act.1}}^{\text{II}}} \quad (4)$$

式中： $I_{\text{K.B.min}}^{(2)}$ 为 AB 线路末端最小方式下两相短路电流； K_{sen} 系数取值为 1.3~1.5。

2.1.3 定时限过流保护（电流Ⅲ段，一般作后备保护）

整定按照避开经过保护的最大电流计算：

$$I_{\text{set}} = \frac{K_{\text{rel}} \cdot K_{\text{ss}}}{K_{\text{re}}} \cdot L_{\text{max}} \quad (5)$$

式中： K_{rel} 为Ⅲ段的可靠系数，取值为 1.15~1.25； K_{ss} 为自启动系数大于 1， K_{re} 为返回系数，取值为 0.85~0.95， L_{max} 为常规线路最大负荷电流。

2.2 DG 并入电网故障出现在其下游的保护方案

本文分析基于 10 kV 配电网、中性点经消弧线圈接地（小电流接地系统）。

2.2.1 DG 并入电网馈线首端

DG 接入起始处时，电网输出功率、电源负载及容量均会增加^[5]。由前述分析可知，某处发生故障时，故障前保护所经电流增大，保护灵敏度随之提升。须注意的是，若 DG 输出电流与系统电源输出电流之和超过保护整定值，本不应动作的断路器会出现误动，导致保护选择性失效。

如图 2 所示，DG 未接入时，电网依赖三段式保护配合处理故障，P1、P3 处首端保护电流整定值由下一段线路保护的电流值决定。DG 并入后，二者保护配合精度下降，该现象与 DG 供电电流占比相关，可用贡献比 β 表示^[6]。

$$\beta = \frac{I_{\text{DG}}}{I_{\text{S}} + I_{\text{DG}}} \quad (6)$$

式中： I_{DG} 为 DG 提供的故障电流分量； I_{S} 为主系

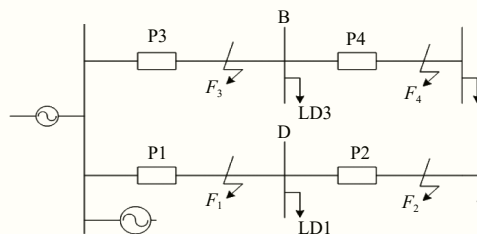


图2 DG 并入电网首端处分析图形

统电源提供的故障电流分量。系统电源提供的电流通常固定，因此贡献比主要取决于 DG 容量。DG 接入首端处，当贡献比 $\beta \leq 10\%$ 时，DG 引起的保护电流误差 $< 5\%$ ，可忽略影响；当 $\beta > 10\%$ 时，故障电流偏差超出保护允许误差范围，易引发越级误动^[7]。

此时，可通过适当增大首端保护动作电流定值，降低其灵敏度，保证选择性。

2.2.2 DG 并入电网馈线中端

当 DG 并入中端母线 F 且该母线发生故障时，保护 1 处基本不受影响。而处受系统电源与 DG 输出电流的共同作用，其电流值大于无 DG 接入时的情况；若流经 QF2 的电流超出保护动作整定值，会导致 QF2 误跳闸，丧失保护选择性，见图 3。

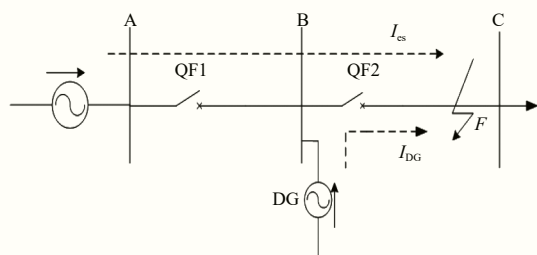


图3 DG 并入电网中端的分析图形

针对此情况，可采取以下措施：1) 调高 QF2 的动作电流整定值；2) 合理限制 DG 接入容量，降低故障电流贡献，确保 QF2 处电流始终低于动作值，保障保护正常工作；3) 增大线路阻抗以降低电流，但此方法会显著增加电网电能损耗、扩大压降，破坏系统平衡^[8]。

2.3 DG 并入电网故障出现在其上游的保护方案

如图 4 所示，DG 上游发生短路故障时，对保护无影响，无须改进保护器件。但当 F 处发生非金属性接地故障时，DG 持续向 F 输送电流；DG 持续向故障点馈入电流，抬升故障点电压，导致主系统侧故障电流减小，保护可能拒动。

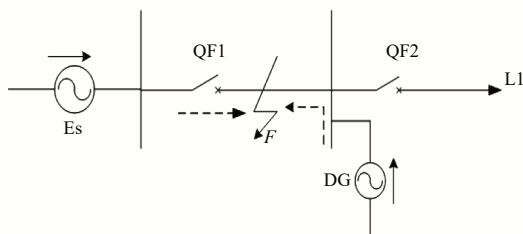


图4 故障出现在 DG 上游时分析图形

短路故障时 F 处无电压，F 与系统间压降为系统电压；而非金属性故障时，F 与系统间压降骤减，输出至 F 点的电流大幅降低，无法满足动作要求，导致保护拒动，故障难以切除。

为应对此类情况，可通过合理设计 QF1 的动作电流、降低动作门槛，提升其灵敏度，确保故障时能快速准确动作（可有效保护电网）；也可限制 DG 容量，降低故障点 F 的残压，保证保护可靠动作。

2.4 DG 并入电网馈线末端线路时的保护方案

F₂ 处发生短路故障时，电压为零，前端保护正常工作，DG 并入对保护无影响，无需处理。若发生非金属性接地故障，则与前述图 5 故障特征与前述分析相同，解决方案类似。

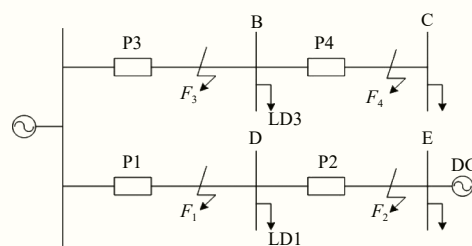


图5 DG 接入馈线末端时分析图形

相邻馈线故障时，部分电流由 DG 输出，下方馈线保护会流经反向电流。常规保护无反向电流检测装置，若 DG 输出电流过大，会导致该保护误动。

针对此问题，可在保护处增设方向过流保护及方向判别器件，使线路流经反向电流时保护不动作；同时控制 DG 并入电网的容量，多保护协同配合，维持电网运行正常。

2.5 自适应保护

该保护方法针对传统保护方式的弊端提出，经不断完善后，可识别电网故障类型并采取对应保护手段，甚至能察觉电网不正常运行状态，发出信号启动保护。前文已分析 DG 并入电网后多种故障带来的问题，此新方法的应用对电网保护具有重要作用与意义。

自适应保护以三段式电流保护为基础，实时采集电网运行参数，动态修正整定系数，自动适配 DG 接入状态，解决传统保护整定固定、适应性差的问题。

2.5.1 在 DG 并入电网的场景下，其 I 段整定值设定为：

$$I_{d1} = K_k I_{d,max}^{DG} = K_k \frac{K_{d1} E_s}{Z_{s,min} + ZL} \quad (7)$$

式中： $I_{d,max}^{DG}$ 为 DG 助增后的本线路末端最大三相短路电流； K_{d1} 为故障系数，三相短路一般为 1，两相短路取 $\sqrt{3}/2$ 。 K_k 为可靠系数，取值为 1.1~1.3； E_s 系统等效电势； $Z_{s,min}$ 为系统最小运行方式阻抗； L 为被保护线路长度。

2.5.2 保护范围计算：

$$\alpha = \frac{K_k Z_s - Z_{s,min}}{K_k ZL} \quad (8)$$

式中： α 为故障点到系统母线距离与线路全长比值； Z_s 为系统实际运行阻抗； $Z_s > Z_{s,min}$ ，说明 α 易受 K_{d1} 和 Z_s 的影响，保护很大程度上依靠系统运转和出现问题的类型。

2.5.3 自适应的整定计算：

$$I_{set,ad} = \frac{K_{k1} \cdot K_{d1}}{Z_s + (1 - \alpha)ZL} \cdot E_s \quad (9)$$

保护范围：

$$L_{ad} = \alpha L \quad (10)$$

式中： α 随系统运行状态实时变化，不受故障类型影响，保护范围比传统固定整定扩大约 20%，有效避免 DG 引起的误动与拒动。

该保护与传统保护模式相近，但 DG 并入电网后，各位置保护范围不同，自适应保护可根据故障

调整系数，选取最优方案，扩大保护范围。

自适应保护计算流程：1) 故障定位，监测电压跌落幅值，超过阈值启动；2) 故障类别识别，通过正负零序分量判断故障类型，确定 K_{d1} ；3) 参数计算，实时计算系统电势、阻抗与故障电流；4) 动作判断，对比整定值与实测电流，执行跳闸/合闸。

3 系统实验研究

3.1 搭建模型

搭建 10 kV 辐射状配电网模型，系统电压为 10 kV，线路为 PI 型等效，长度 3 km。 $Z = 0.45 \Omega/\text{km}$ ，负荷为三相阻感负荷，200 kW + j100 kvar。DG 类型为三相电压源型逆变器等效，容量为 3 MW/6 MW。故障设置为三相短路，0.1~0.3 s；仿真步长 $T_s = 50 \mu\text{s}$ 。

图 6 为不同位置电流的简单模型测试。DG 为配电网中小容量电源模块，可用小容量三相电源替代接入电网。仿真中仅三相故障时间设为 0.1~0.3 s，其余模块保持默认设定。

3.2 接入不同位置的仿真

3.2.1 无 DG 接入时发生三相故障

基于 MATLAB 故障波形模拟见图 7。按照图 6 仿真模型，从 2 个信号源得到的波形如图 7 所示。故障电流由主系统单独供给，三段式保护动作可靠，无拒动/误动。

3.2.2 在电网首端处加入小容量 DG

小功率的三相电源接入首端处时，相当于加大

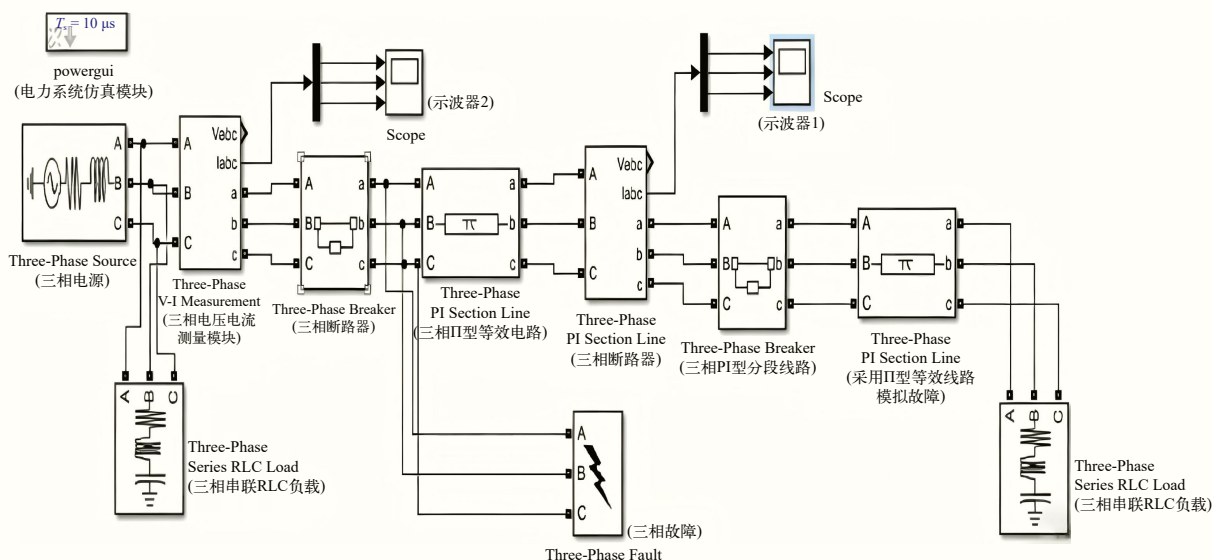


图6 仿真搭建的模型

系统电源的容量,得到图 8。对比 DG 接入前后的波形图可知 DG 并入前后,保护 2 处的电流变化极小;故障时无电流流经保护 2,不动作,故 DG 接入对保护 2 无影响。而保护 1 处电流则大幅提升,须通过与设定动作值的比较,来判断是否触发保护动作。

当增大 DG 接入容量后,加大 DG 输出功率,如图 9 所示,保护 1 处电流再次大幅增大,而保护允许的最大电流保持不变;当电流超过该最大值时,

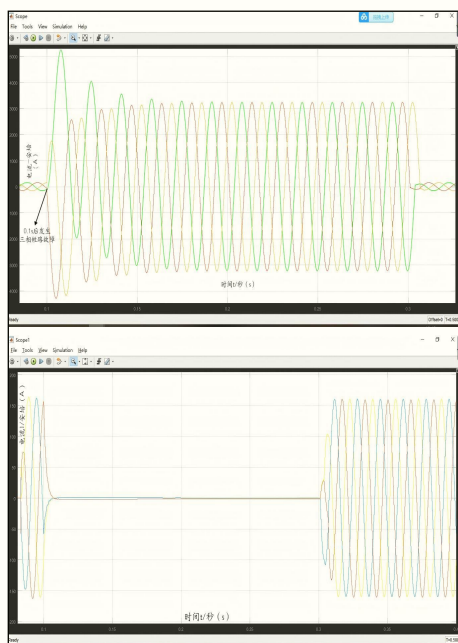


图7 无 DG 接入时发生三相故障波形图

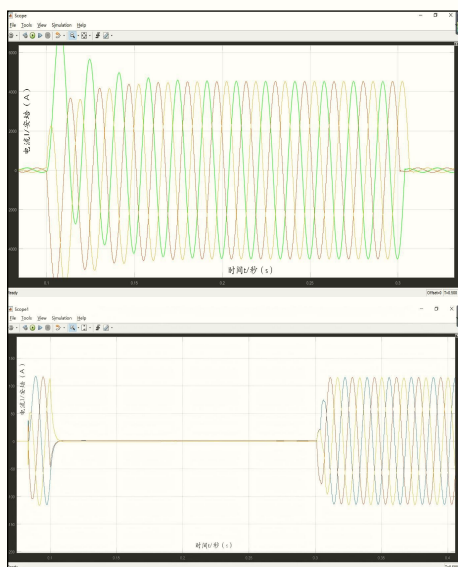


图8 DG 接到电网的首端处仿真波形图

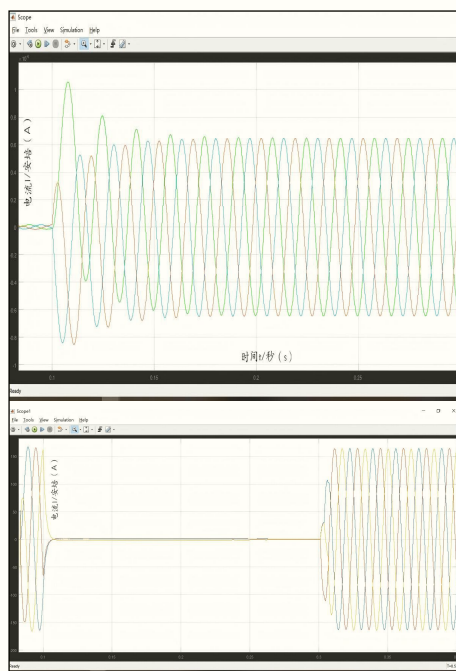


图9 DG 输入容量小幅度加大仿真波形图

断路器会跳闸断开电路以切除故障,但此动作属于误动,保护缺乏自主判断与选择性。

针对此问题,可参照故障阶段的电流大小,通过适当调高保护动作整定值,或降低 DG 并入电网的容量,确保保护能正确启动,消除影响电网稳定性的不确定因素^[9]。

3.2.3 DG 接入中端

DG 并入到中间位置,下端出现故障时,保护 1 与 2 处波形见图 10。加大 DG 输出容量,继续观察波形变化见图 11。

由此可知,DG 在电网中端并入时,其上游保

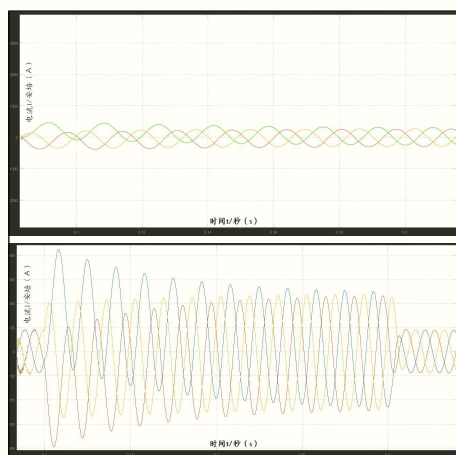


图10 DG 接入电网中端仿真波形图

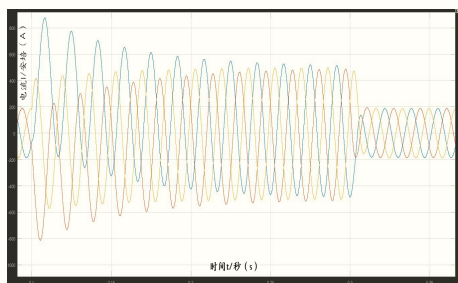


图11 DG 容量加大仿真图

护流经的电流仍由系统供给 DG 接入无干扰；而下游保护流经电流会随 DG 并入容量增加而增大，超出整定值时保护会动作，导致选择性丢失。

针对此情形，可采用与 DG 接入首端处相近的解决方法，还可通过串入电阻降低电流值，以保障保护正常工作。

3.2.4 DG 接入电网末端

建立如图 5 的仿真模型，本馈线出现故障，观察保护 1、2 波形变化见图 12。增加 DG 容量，继续仿真观察见图 13。

由此可见，DG 在电网末端并入时，故障发生时，故障线路及对应保护会流经与原系统反向的电流，且该电流随 DG 容量增大而变大。由于反向电流无法被保护监测，即便达到临界值，保护也不会动作，即出现拒动现象。若相邻线路发生故障，故障特性与上述分析一致，可采用相同方法

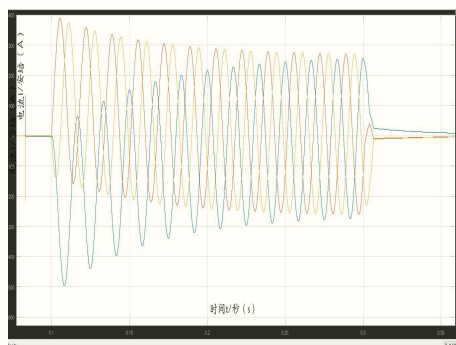


图13 加大容量后仿真波形图

处理。

3.3 自适应保护仿真验证

根据图 2 来搭建模型，分别就 F_1 、 F_2 、 F_3 测量短路电流。其中 α 代表 F 点到起始处距离占本段线长的百分比。下面分别就 α 取 20%、50%、80%、90% 测量各处保护的电流大小，同时 DG 容量分别设定 3、6 MW。

据表 1 可知：令 DG 输入不变， α 的值越大，经过保护的电流却变小，整定值也跟着变小。从数据来看： $\alpha \leq 80\%$ 时，检测电流 $>$ 整定值，保护可靠动作； $\alpha = 90\%$ 时，检测电流 $<$ 整定值，保护退出，有效保护范围约 83%；（理论推导与仿真拟合一致）仿真数据相对误差按式（11）计算：

$$\gamma = \frac{I_{\text{test}} - I_{\text{set}}}{I_{\text{set}}} 100\% \quad (11)$$

仿真数据相对最大误差 $\gamma = 2.87\% < 3\%$ ，模型具有良好复现性与合理性。

表1 自适应保护仿真结果 单位：kA

DG容量/MW	$\alpha/\%$	保护1		保护2		保护3	
		检测电流	整定值	检测电流	整定值	检测电流	整定值
3	20	3.875	3.654	2.982	2.845	3.914	3.887
3	50	3.421	3.325	2.845	2.781	3.654	3.548
3	80	3.224	3.154	2.666	2.612	3.551	3.467
3	90	3.126	3.028	2.456	2.541	3.299	3.379
6	20	3.877	3.654	3.012	2.927	4.103	3.921
6	50	3.422	3.325	2.854	2.743	3.658	3.569
6	80	3.224	3.154	2.663	2.601	3.471	3.401
6	90	2.869	3.028	2.498	2.551	3.258	3.361

（下转第 50 页）

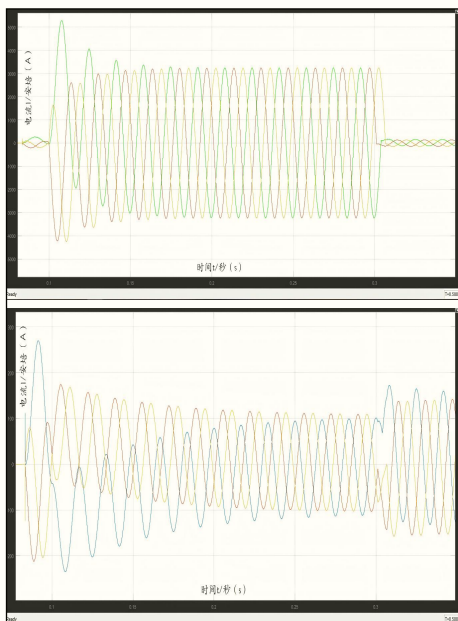


图12 DG 接入后端仿真图

心, 供电半径短, 线路损耗小。用地方面, 庆云变电站用地面积 $4\,100 \sim 4\,900\text{ m}^2$ 的标准区间内。站址实施过程中, 跟周边道路、综合管廊等基础设施一同规划建设, 避免了重复开挖和资源浪费, 有效保障了区域重点产业的用电需求, 见图 3。



图3 110kV 庆云变电站实景图

5 结束语

武汉电网做分析对象, 对现行相关标准进行了分析, 并结合国土空间规划的要求以及城市更新的现实背景, 提出了适应新型电力系统发展需要的 110kV 变电站用地分类控制标准与形式分类导则。搭建了一套基于规划量化分析平台的选址协同优化方法, 该方法在武汉一流电网建设的实际应用中,

(上接第 38 页)

4 结束语

本章通过仿真验证分析准确性, 故障电流都随着 DG 容量大小而变化, 基本成正比关系。随着 DG 容量变大, 每个保护都有误动或者拒动的潜在风险。尤其是 DG 接入末端时, 保护经过与正常时相反电流, 保护无法识别。同时可以根据故障出现在 DG 方向, 调整定值大小, 或者减少 DG 输入容量, 来降低 DG 并入带来的影响。自适应保护可实时动态整定, 有效扩大保护范围, 适配 DG 高渗透场景; 仿真验证表明, 所提方案可消除 DG 对继电保护的不利影响, 满足配电网安全运行要求。

参考文献

- [1] 陆梓萌, 廖玉茗, 杨磊, 等. 计及源荷不确定性的直流互联系统概率化阻抗建模与稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(19):113-122.

选址的科学性、合理性和用地集约化水平都得到了检验。今后应结合碳排放、电网智能化的新要求, 研究变电站与城市规划建设发展的协同^[10]。

参考文献

- [1] GB/T 50293—2014 城市电力规划规范[S].
- [2] 国家电网有限公司. 国家电网有限公司输变电工程通用设计: 新型电力系统 35~110kV 变电站分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2024.
- [3] 倪宇翔, 陈方伟, 方信. 零碳目标下模块化变电站集成设计优化研究[J]. 农村电气化, 2026(2):30-33.
- [4] 李国斌. 基于智能化的 110kV 变电站的设计研究[J]. 中国设备工程, 2022(4):24-25.
- [5] 麻敏华, 张雪莹, 张跃, 等. 大容量 110kV 变电站建设方案研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(13):136-139.
- [6] 杨宇宁. 城市电网 110kV 智能变电站建设研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(12):13-16.
- [7] 王安, 薛峰, 聂建春, 等. 智能变电站模块化建设在内蒙古电网的应用[J]. 电力勘测设计, 2022(8):39-44.
- [8] 关林坤, 王锋, 贾怡良, 等. 城市 110kV 智能变电站总布置设计研究[J]. 大众科技, 2022, 24(1):32-34.
- [9] 顾蕙华, 曹与哲, 徐菁菁, 等. 110kV 城市变电站结合建设方案[J]. 电力与能源, 2023, 44(1):44-47, 79.
- [10] 唐冀, 张笑迪. 基于零碳城市规划与碳平台技术创新的零碳变电站系统研究[J]. 农村电气化, 2025(3):40-47.

作者简介

周新 (1986), 男, 本科, 高级工程师, 从事城市电网规划设计研究工作, E-mail: 164114947@qq.com.

(责任编辑: 张峰亮)

- [2] 董学琴. 含分布式新能源的主动配电网保护方法及可靠性研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2024.
- [3] 郭贤珊, 张国华, 李健栋, 等. 构网型变流器技术发展现状与工程应用[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(22):1-19.
- [4] 胡兆华. 基于分布式电源并网条件下配电网继电保护研究[J]. 电气技术与经济, 2025(7):51-54.
- [5] 陈昊天. 海洋牧场直流微电网供电系统控制策略研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [6] 苑吉河, 张曦, 黄虎, 等. 基于电流序分量的多源配电网故障定位方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5):204-210.
- [7] 丁然, 杨道罗. 考虑光伏电源接入的配电网继电保护方案探析[J]. 电工技术, 2023(16):57-59.
- [8] 卢玥. 基于仿生启发算法的智能微电网负荷预测与分布式调度方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [9] 周攀. 配电网层次化保护技术研究[D]. 成都: 西华大学, 2023.

作者简介

满莹 (1997), 女, 本科, 工程师, 研究方向为变电检修继电保护, E-mail: 1024001738@qq.com.

龙彦君 (1996), 男, 本科, 工程师, 研究方向为变电检修继电保护, E-mail: 1378917016@qq.com.

(责任编辑: 张峰亮)