

含分布式电源的城市电网故障分析方法研究

马子钦, 廖凯, 杨健维

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 分布式电源大规模接入城市电网会给城市电网的故障特征带来一定的影响, 其出力的随机性会引起故障特征的不确定。针对现有故障分析方法未考虑出力随机性的影响, 提出一种基于蒙特卡洛法的含分布式电源的城市电网故障分析方法。首先, 基于分布式电源出力的概率模型, 利用蒙特卡洛法进行随机抽样; 然后, 通过 PQ 控制和低电压穿越策略下的故障模型进行计算, 形成故障电压、短路电流的概率分布; 最后, 通过算例进行仿真分析。结果表明, 分布式电源接入城市电网后故障特征具有概率特性, 该方法计及分布式电源出力随机性的影响, 可得故障电压、短路电流的概率分布, 可对城市电网故障特性分析以及整定值的选取提供依据。

关键词: 分布式电源; PQ 控制; 蒙特卡洛法; 概率分布

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)02-0012-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.02.003

Research on Failure Analysis Method of Urban Power Grid with Distributed Generation

Ma Ziqin, Liao Kai, Yang Jianwei

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Large-scale access of distributed generation to urban power grid will have certain impact on the fault characteristics of urban power grid, and the randomness of its output will cause uncertainty of the fault characteristics. Aiming at the fact that the existing random analysis methods do not consider the influence of output randomness, a failure analysis method for urban power grid with distributed generation based on Monte Carlo method is proposed. Based on the probabilistic model of distributed generation output, Monte Carlo method is used for random sampling, and then the fault model under PQ control and low-voltage ride-through strategy is used to calculate the probability distribution of fault voltage and short-circuit current. Finally, it is verified with a calculation example. The results show that the fault characteristics of distributed generation connected to urban power grid have probabilistic characteristics. The proposed method can obtain the probability distribution of fault voltage and short-circuit current, and can provide a basis for the analysis of fault characteristics of urban power grid and the selection of setting values.

Key words: distributed generation; PQ control; Monte Carlo method; probability distribution

0 引言

随着全球化石能源短缺、温室效应加剧, 大力发展可再生能源成为了城市电网发展的主要趋势。其中以风能、太阳能为主的分布式电源逐渐接入城市电网, 而分布式电源出力具有随机性, 这对电网故障

时的潮流情况带来了不确定性影响, 使得传统故障分析方法难以适应^[1-2]。故障分析方法是保护配置的基础, 因此分布式电源出力的随机性有必要在故障分析中深入考虑, 以得到更为准确的故障分析结果, 保障城市电网的可靠安全运行。

分布式电源常通过电力电子器件接入电网, 即逆变型分布式电源。目前, 针对含分布式电源城市电网的故障分析, 许多学者做了大量研究。其中主要分为两个方面: 1) 考虑分布式电源的控制策略,

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51525702); 国家自然科学基金项目(U1766208, 51807168, 61603311); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018GF04)

包括 PQ 控制、V/f 控制与下垂控制³⁻⁴, 同时计及低电压穿越特性、限流环节等; 2) 从分布式电源的出力入手, 考虑分布式电源输出的随机性, 反映故障潮流的真实情况。

对于第 1 个方面, 目前已有大量的研究成果。文献 [5] 在考虑逆变型分布式电源低电压穿越特性基础上, 提出限制输出电流与功率的控制策略。文献 [6] 考虑逆变型分布式电源的 PQ 控制策略, 将多个分布式电源进行等值, 并对故障网络分区, 简化了含多逆变型分布式电源复杂网络的计算。文献 [7] 分析 PQ 控制策略对短路电流的影响, 提出适用于稳态以及次暂态的故障求解模型。文献 [8-9] 基于 V/f 控制策略, 建立了含分布式电源网络的故障等值模型。上述文献在故障分析中考虑了逆变型分布式电源的控制策略, 但其出力大小受环境因素具有随机性, 使得故障时的潮流情况也是不确定的, 从单一运行点计算不能确切地反应实际情况。

对于第 2 个方面, 目前的研究工作较少, 文献 [10] 利用蒙特卡洛法对分布式电源输出功率、故障点位置等进行随机抽样, 利用故障模型计算短路电流的概率分布。蒙特卡洛法通过大量抽样运算具有普遍性, 但该文献在计算中未考虑分布式电源的控制策略与低电压穿越特性等。

综合上述研究成果, 考虑分布式电源出力的随机特性以及控制策略, 提出一种基于蒙特卡洛法的故障分析方法。该方法运用蒙特卡洛法对分布式电源出力的概率模型进行随机抽样, 基于 PQ 控制及低电压穿越策略的故障计算方法对故障电压与短路电流的概率分布进行求解; 最后, 通过算例对所提故障分析方法进行仿真验证。

1 分布式电源的概率模型

高比例分布式电源的并网改变了城市电网的基本特征。一方面, 城市电网结构发生变化, 由传统单电源网络发展为多电源网络, 电网潮流复杂化; 另一方面, 分布式电源如风力发电、光伏发电受自然因素影响出力具有随机性。下面主要介绍风机、光伏出力的概率模型以反映其随机性特征。

1.1 风机出力概率模型

风力发电机组的出力大小与风速有关, 通常采用双参数威布尔分布来描述风速的变化情况^[11]。

$$f(v) = \frac{a}{b} \left(\frac{v}{b}\right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{b}\right)^a\right] \quad (1)$$

式中: v 为实际风速; a 和 b 分别为双参数威布尔分布的形状参数与尺度参数。

风机出力与风速的关系为

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v > v_{co} \\ P_N \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_N & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_w 为风电机组出力; v_{ci} 、 v_r 、 v_{co} 分别为风电机组的切入风速、额定风速、切出风速; P_N 为风电机组的额定功率。

结合式 (2) 可得风机出力的概率密度函数为

$$f(P_w) = \frac{a}{c_1 b} \left(\frac{P_w - c_2}{c_1 b}\right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{P_w - c_2}{c_1 b}\right)^a\right] \quad (3)$$

式中: $c_1 = P_N / (v_r - v_{ci})$; $c_2 = -c_1 v_{ci}$ 。

1.2 光伏出力概率模型

据大量统计资料表明, 一段时间内大部分地区的光照强度变化可近似看作服从 Beta 分布^[12]。

$$f\left(\frac{r}{r_{max}}\right) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{max}}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中: r 和 r_{max} 分别为这段时间内的实际光照强度与最大光照强度; Γ 为伽马函数; α 和 β 为 Beta 分布的形状参数。

光伏发电机组出力与光照强度的关系可由式 (5) 表示, 结合式 (4) 可得光伏出力的概率密度函数, 见式 (6)。

$$P_p = \gamma A \eta \quad (5)$$

$$f\left(\frac{P_p}{P_{pmax}}\right) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_p}{P_{pmax}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_p}{P_{pmax}}\right)^{\beta-1} \quad (6)$$

式中: P_p 和 P_{pmax} 分别为光伏发电机组的实际出力和最大出力; A 为光伏板面积; η 为转换效率。

2 基于蒙特卡洛法的含分布式电源的城市电网故障分析方法

分布式电源出力的随机特性使得传统基于某一运行点的故障分析方法难以满足实际情况, 同时其输出受控制策略影响也呈现不同的故障特征。这里提出基于蒙特卡洛法的含分布式电源的城市电网故障分析方法, 利用蒙特卡洛法生成服从出力分布的数据代入考虑 PQ 控制策略的故障计算中, 解决现

有方法未考虑控制策略或出力随机性等问题。

2.1 逆变型分布式电源等值模型

分布式电源种类繁多,根据并网方式可分为旋转型分布式电源和逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generation, IIDG)两种。其中旋转型分布式电源采用同步机并网,可直接接入电网;逆变型分布式电源则通过电力电子变流器接入电网^[13]。目前城市电网中大多数分布式电源为逆变型,这里主要研究逆变型分布式电源。

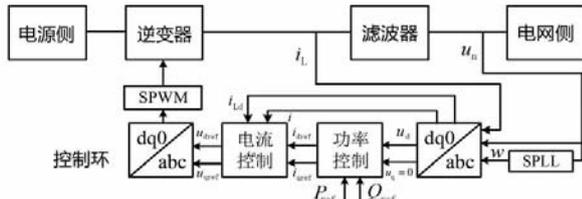


图1 基于PQ控制策略的分布式电源并网结构

逆变型分布式电源通常采用PQ控制策略进行并网,如图1所示。在此控制下,逆变器的输出电流跟随参考值发生变化,可由式(7)表示。

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{P_{ref}}{u_d} \\ i_{qref} = \frac{Q_{ref}}{u_d} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率参考值和无功功率参考值; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为逆变器输出的有功参考电流和无功参考电流; u_d 为电网侧电压的d轴分量。

城市电网正常运行时,在考虑可再生能源充分利用的基础上,逆变型分布式电源不输出无功功率。在电网发生故障时,逆变型分布式电源提供的故障电流与其并网点电压和有功功率参考值有关。同时逆变型分布式电源还需具有无功支撑能力的低电压穿越特性与限流环节^[14]。为满足该要求,分布式电源输出电流满足式(8)一式(10)。同时,逆变器优先输出无功电流,以保证电网的稳定性。

$$I_{q\cdot f} = \begin{cases} 0, & \frac{U_f}{U_N} > 0.9 \\ \min\left[2\left(1 - \frac{U_f}{U_N}\right)I_N, 2I_N\right], & \frac{U_f}{U_N} \leq 0.9 \end{cases} \quad (8)$$

$$I_{d\cdot f} = \min\left[P_{ref}/U_f, \sqrt{(2I_N)^2 - I_{q\cdot f}^2}\right] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_f &= (I_{d\cdot f}\cos\theta + I_{q\cdot f}\sin\theta) + \\ &j(I_{d\cdot f}\sin\theta - I_{q\cdot f}\cos\theta) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: U_N 、 U_f 分别为节点额定电压与故障电压; I_N 为分布式电源输出的额定电流; $I_{q\cdot f}$ 、 $I_{d\cdot f}$ 分别为故

障时分布式电源输出的无功电流和有功电流; \dot{I}_f 为逆变器输出的电流; θ 为并网点电压的相角。

2.2 基于蒙特卡洛法的城市电网故障分析方法

对于电网的故障计算可通过节点电压方程进行求解,而在含逆变型分布式电源的电网发生故障时,分布式电源的输出电流与并网点电压和有功参考值有关,则需对方程进行迭代求解^[15]:

$$Y\dot{U}_f^{(k)} = \dot{I}_f^{(k-1)} \quad (11)$$

$$\begin{cases} I_{q\cdot f}^{(k)} = \begin{cases} 0, & \frac{U_f^{(k)}}{U_N} > 0.9 \\ \min\left[2\left(1 - \frac{U_f^{(k)}}{U_N}\right)I_N, 2I_N\right], & \frac{U_f^{(k)}}{U_N} \leq 0.9 \end{cases} \\ I_{d\cdot f}^{(k)} = \min\left[P_{ref}/U_f^{(k)}, \sqrt{(2I_N)^2 - I_{q\cdot f}^{(k)2}}\right] \\ \dot{I}_f^{(k)} = (I_{d\cdot f}^{(k)}\cos\theta^{(k)} + I_{q\cdot f}^{(k)}\sin\theta^{(k)}) + \\ j(I_{d\cdot f}^{(k)}\sin\theta^{(k)} - I_{q\cdot f}^{(k)}\cos\theta^{(k)}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\max |U_f^{(k)} - U_f^{(k-1)}| < \varepsilon \quad (13)$$

式中: Y 为节点导纳矩阵; k 为迭代次数。

由上述计算模型可得网络故障电压电流值。而在计及分布式电源出力的随机性时,可将修正方程式中的有功参考值看作服从相应的概率分布,利用蒙特卡洛法进行随机抽样,将生成的样本值带入到PQ控制策略下的故障计算模型,得到一系列电压电

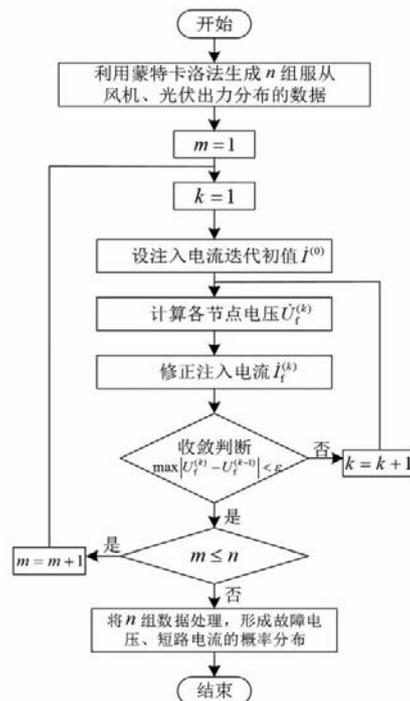


图2 算法流程

流值,通过统计分析形成故障电压、短路电流的概率分布。蒙特卡洛法通过大量抽样计算来获取系统空间的随机状态,不限制系统规模,适用于城市电网的计算分析。

综上,基于蒙特卡洛法的含分布式电源的城市电网故障分析方法流程图如图2所示。

3 算例分析

3.1 仿真场景设定

利用所提方法进行仿真分析。如图3所示, DG1、DG2 为风电机组, DG3、DG4 为光伏电站,具体参数设置如下。

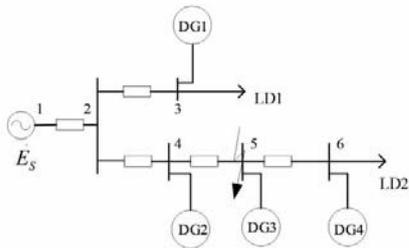


图3 算例模型

1) 风机出力满足威布尔分布,风电机组额定功率为1 MW,切入风速、切出风速、额定风速分别为4 m/s、25 m/s、15 m/s,实际风速表见文献[16]。

2) 光伏出力满足Beta分布,光伏电站最大光强为250 W/m²,总光伏面积为35 000 m²,转换效率为15%,参数 α 、 β 分别为0.45、9.19^[17]。

设定支路4-5末端发生三相短路,过渡电阻为1 Ω ,利用所提方法对故障网络进行分析。

3.2 基于蒙特卡洛法的故障分析方法仿真结果

通过所提方法对节点5电压幅值和支路4-5短路电流的概率密度函数与累积分布函数曲线进行计算,结果如图4、图5所示。

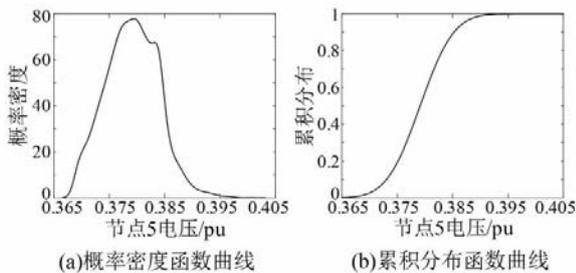


图4 节点5电压概率分布

由图4、图5可知,故障后电压、电流具有波动性,节点5电压范围为0.364~0.397 pu,支路4-5

短路电流范围为4.29~4.55 pu。此电压电流的概率分布表示在考虑风机出力呈威布尔分布、光伏出力呈Beta分布时,该网络发生故障后,电压电流所出现的范围区间,不同数值出现的概率不同。可见在计及风电、光伏出力随机性时,城市电网故障潮流也具有概率特性。

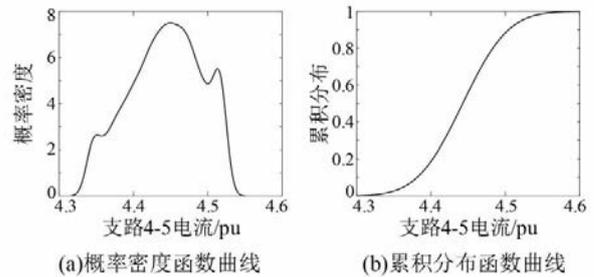


图5 支路4-5短路电流概率分布情况

同时在图3所示电网中,设风电机组和光伏机组出力分别为550 kW、65 kW,利用Matlab/Simulink对故障网络进行仿真分析,以一相为例得到节点5电压和支路4-5电流的有效值,如表1所示。

表1 仿真结果

参数	节点4电压/(pu)	支路4-5电流/(pu)
有效值	0.383	4.43
允许范围	0.364~0.397	4.29~4.55

节点4电压与支路4-5短路电流幅值有效值分别为0.383 pu、4.43 pu,满足在计及出力随机性后故障电压电流的范围内,证明该方法可得含分布式电源的城市电网故障后电压电流的波动区间,即该故障分析方法考虑了分布式电源出力的概率特性,而不仅以固定出力值参与计算分析,符合实际情况,可对保护整定值的设置等提供一定的参考。

4 结 语

在考虑分布式电源出力的概率特性基础上,提出了一种基于蒙特卡洛法的含分布式电源的城市电网故障分析方法。通过理论分析与仿真验证,得出如下结论:

1) 在含逆变型分布式电源的故障计算模型中,逆变型分布式电源提供的故障电流与其有功参考值有关,可将该有功参考值看做服从出力分布进行故障分析计算。

2) 所提方法考虑了分布式电源出力的随机特性在故障分析中的影响,不以单一基准点为例,可得

故障电压与短路电流的概率分布,同时该方法利用抽样计算,具有普遍性,对故障特性分析以及保护装置整定值的配置具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):184-192.

[2] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1289-1298.

[3] 吴争荣,王钢,李海锋,等. 计及逆变型分布式电源控制特性的配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):92-96.

[4] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.

[5] Camacho A, Castilla M, Miret J, et al. Active and Reactive Power Strategies with Peak Current Limitation for Distributed Generation Inverters during Unbalanced Grid Faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3):1515-1525.

[6] 洪树斌,范春菊,陈实,等. PQ控制策略下多逆变型电源的故障等值方法[J]. 电网技术,2018,42(4):1101-1109.

[7] 张林利,彭克,苏建军,等. 含逆变型分布式电源的配电网故障分析通用计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(7):75-80.

[8] 郭文明,牟龙华,刘爽,等. U/f控制微电源的故障控制策略和故障模型分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(4):1125-1136.

[9] 曾德辉,潘国清,王钢,等. 含V/f控制DG的微电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2604-2611.

[10] Bracale A, Caramia P, Fazio A R D, et al. Probabilistic

Short Circuit Analysis in Electric Power Distribution Systems Including Distributed Generation [C] //Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2012), 8th Mediterranean Conference on. IET, 2012.

[11] Hetzer J, Yu D C. An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2):603-611.

[12] Abouzahr I, Ramakumar R. An Approach to Assess the Performance of Utility - interactive Photovoltaic Systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(2):145-153.

[13] 李桓,彭克,张新慧,等. 基于IIDG电流相位控制的配电网故障电流抑制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):180-186.

[14] 李文立. 含分布式电源配电网的故障特性分析与保护方案研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.

[15] 潘国清,曾德辉,王钢,等. 含PQ控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):555-561.

[16] 陈光,戴攀,周浩,等. 计及入网电动汽车和分布式电源配电系统重构[J]. 电网技术,2013,37(1):82-88.

[17] 郑海峰. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[D]. 天津:天津大学,2006.

作者简介:

马子钦(1996),硕士研究生,研究方向为城市电网故障诊断;

廖凯(1989),博士,副教授,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等;

杨健维(1983),博士,副教授,研究方向为新能源电力系统保护与控制、城市电网安全预警、电动汽车并网。

(收稿日期:2020-02-24)

(上接第11页)

的发电负荷响应指标响应快速,跟随性良好,改进后的控制方案的综合性能优于常规控制方法。

参考文献

[1] 邱金鹏. 基于AHP-FCM的热电联产投资风险评估[J]. 四川电力技术,2019,42(2):91-94.

[2] 孙近文. 大中型风电场混合储能系统优化配置及先进控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.

[3] 王琪. 风电规模化并网条件下供热机组优化控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.

[4] 王岑娇. 热电联合系统统一能量管理模型研究[D]. 沈

阳:沈阳工业大学,2019.

[5] 徐飞,闵勇,陈磊,等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5063-5072.

[6] 荣爽. 促进供暖期风电消纳的多热源容量规划与协调调度策略[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

作者简介:

叶晨(1992),硕士研究生,主要研究领域为新能源发电与控制技术;

唐志东(1980),高级技师,主要研究领域为新能源发电与控制技术。

(收稿日期:2019-12-12)