

[主动配电网]

考虑多模式配电特征的主动配电网运行可靠性评估方法

文/陈建凯¹ 杨勇¹ 杨伟炳¹ 王宇玲² 李正伟²

1. 余姚市供电公司; 2. 天地电研(北京)科技有限公司

提出考虑多模式配电特征的主动配电网运行可靠性评估方法。先获取主动配电网在正常运行模式和重载运行模式下的修复率、故障率及停运概率等运行特征作为可靠性评估指标, 然后采用序贯蒙特卡洛模拟法模拟主动配电网运行状态, 最后模拟过程中记录并统计配电网可靠性指标, 评估配电网运行可靠性。

在电力系统中, 主动配电网作为连接分布式能源、储能装置、可控负荷与用户的关键环节, 其运行可靠性直接关系到电力供应的稳定性和用户用电的满意度。近年来, 国内外学者在配电网可靠性评估中展开了大量的研究工作, 并取得一些研究成果。如文献[1]中基于K折验证数据处理方法, 设计一种配网可靠性评估方案, 可最大限度地保障评估结果的准确性, 但是这种方法难以全面覆盖配电网所有可能的故障场景, 在一些罕见或者极端情况下, 配电网可靠性评估结果容易出现偏差; 再如文献[2]中根据广义随机Petri网构建了配电网可靠性评估模型, 可以显著提升评估效率, 但是该模型会随配电网规模的扩大而变得异常复杂, 实际应用中难以处理大规模配电网可靠性评估数据, 评估结果的准确性受到限制。随着电网运行模式的多样化, 主动配电网的运行特性变得日益复杂, 这对传统的配电网可靠性评估方法提出严峻挑战。因此, 考虑多模式配电特征的主动配电网运行可靠性评估方法的研究仍具有重要的理论意义和实际应用价值。

获取主动配电网多模式配电特征指标

主动配电网作为智能电网的重要组成部分, 其运行模式因分布式能源接入、负荷变化及系统调

度策略的调整而展现出高度的多样性与复杂性。因此, 为全面且准确地评估主动配电网的运行可靠性, 首先需要获取其在不同运行模式下的关键特征指标^[3]。

主动配电网的运行模式多样, 其中正常运行模式和重载运行模式是两种最为典型的场景。在正常运行模式下, 主动配电网的运行特征主要表现为: 故障率相对较低且修复率相对较高, 由于配电网内负荷平稳、元件运行状态良好, 有助于保持配电网的稳定运行和可靠性, 而且一旦元件发生故障, 能够迅速得到修复并恢复运行; 元件的停运概率相对较低, 由于元件故障率较低且修复率较高, 有助于保障配电网的持续供电能力和可靠性。当主动配电网进入重载运行模式时, 其运行特征主要表现为: 故障率相对较高且修复率相对较低, 由于配电网负荷增加, 元件承受的压力增大, 导致故障率上升, 同时高负荷下配电网维修资源紧张、维修难度增加, 导致修复率降低; 元件停运概率相对较高, 由于元件故障率较高且修复率较低, 导致配电网供电可靠性下降, 甚至引发大面积停电等严重后果。因此, 在这两种模式下, 本文选择元件修复率、故障率以及停运概率这几个特征作为评估主动配电网运行可靠性的指标, 具体计算公式为

$$\begin{cases} \eta_1 = \frac{\eta_0 \cdot (1 - \gamma_1)}{1 - \lambda} \\ \eta_2 = \frac{8760 \cdot (1 - \lambda) \cdot (I_1 - I_2) \cdot \mu_3 + \eta_4 \cdot (1 - \gamma_2) \cdot T_0 \cdot (I_3 - I_2) \cdot \mu_3}{8760 \cdot (1 - \lambda) \cdot (I_3 - I_1)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{8760}{T_0} \\ \mu_2 = \mu_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_1 = \frac{\eta_1}{\eta_1 + \mu_1} \\ P_2 = \frac{1 - P_3}{I_3 - I_2} \times I_1 + \frac{P_3 \cdot I_3 - I_2}{I_3 - I_2}, I_2 < I_1 < I_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中, η_1 、 η_2 分别为正常运行模式和重载运行模式下,主动配电网中元件的等效故障率; μ_1 、 μ_2 分别为正常运行模式和重载运行模式下,主动配电网中元件的等效修复率; P_1 、 P_2 分别为正常运行模式和重载运行模式下,主动配电网中元件的等效停运概率; η_0 为正常运行模式下主动配电网元件的历史统计故障率,单位次/年; γ_1 为元件在恶劣气候下的故障次数占总故障次数的比值; λ 为恶劣气候百分比; I_1 为主动配电网中元件通过的电流; I_2 、 I_3 分别为元件在正常运行条件和风险运行条件下的通过电流的上限值; μ_3 为主动配电网元件的历史统计修复率; η_4 为重载运行模式下主动配电网元件的历史统计故障率,单位次/年; T_0 为元件在正常气候条件下的历史统计故障修复时间; P_3 为正常条件下元件停运概率历史统计值。

这些指标的具体数值不仅反映了主动配电网在当前运行状态下的性能水平,还为后续的可靠性评估提供了有力的数据支持。

序贯蒙特卡洛模拟法评估配电网运行可靠性

序贯蒙特卡洛模拟法作为一种强大的随机抽样技术,特别适用于处理此类具有时间依赖性和随机性的主动配电网可靠性评估问题。因此,本文引入序贯蒙特卡洛模拟法,通过模拟配电网状态随时间的变化,逐步推进模拟时钟,从而捕捉配电网状态的动态演变过程,评估主动配电网运行可靠性,其示意图如图1所示。

基于此,本文采用序贯蒙特卡洛模拟法评估配电网运行可靠性的具体流程如下。

1) 初始化模拟环境,将模拟时钟设置为初始

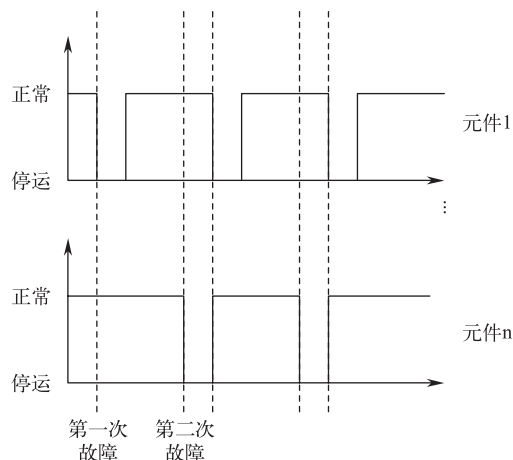


图1 主动配电网运行状态模拟过程

时刻 $t=0$,并依据元件状态持续时间的抽样原理,为配电网中每个非电源元件生成独立的状态变化循环序列。

2) 对配电网内所有元件的状态变化循环序列进行时间排序,以确定在模拟过程中哪个元件将首先发生故障,根据时间顺序推进模拟时钟,继续寻找并处理下一个即将发生故障的元件,如图1所示,假设元件1首先进入停运状态,而其他元件则保持正常运行,当元件1的故障修复完成后,模拟时钟继续推进,直至元件 n 发生故障并停运,而其余元件保持正常,依此类推,即可得到主动配电网的状态变化全过程。

3) 在上述主动配电网运行状态模拟过程中,遍历所有元件,建立各元件的统计数据表,该表记录了不同元件的故障情况、恢复情况等数据,所以根据该表即可计算并汇总故障率、恢复率及停运概率等主动配电网多模式配电特征指标,全面评估配电网的运行可靠性。

仿真实验

1. 实验数据

本章旨在通过仿真实验,对比三种不同的主动配电网可靠性评估方法。考虑多模式配电特征的主动配电网运行可靠性评估方法(实验组方法)、基于K折验证的主动配电网运行可靠性评估方法(对照组一方法)以及基于Petri网的主动配电网运行可靠性评估方法(对照组二方法)的实际应用性能。

1) 以元件故障率为主动配电网可靠性评估实

验参数，从某实际主动配电网的历史故障记录信息中，随机抽取10个不同元件的故障率数据，作为实验数据，具体情况见表1。

表1 实验配电网元件运行可靠性参数

元件编码	元件名称	故障率/(次/年)
A	配电变压器	0.032
B	智能断路器	0.025
C	自动重合闸装置	0.028
D	分布式电源控制器	0.016
E	馈线终端单元	0.027
F	电压调节器	0.032
G	负荷开关	0.038
H	远程终端单元	0.042
I	保护继电器	0.035
J	隔离开关	0.040

2) 在Intel Core i7处理器、16 GB RAM的高性能计算机上搭建实验仿真环境，操作系统为Windows 10，仿真软件采用MATLAB R2020a，结合电力系统仿真工具箱Power System Toolbox。

3) 在仿真实验环境下，分别采用实验组方法和对照组方法进行该主动配电网的可靠性评估，记录并对比评估结果。

2. 结果分析

在本次仿真实验中，以主动配电网中10个代表性元件的故障率为运行可靠性评估参数。图2给出了实验组方法和对照组方法对这10个元件故障率的评估结果。

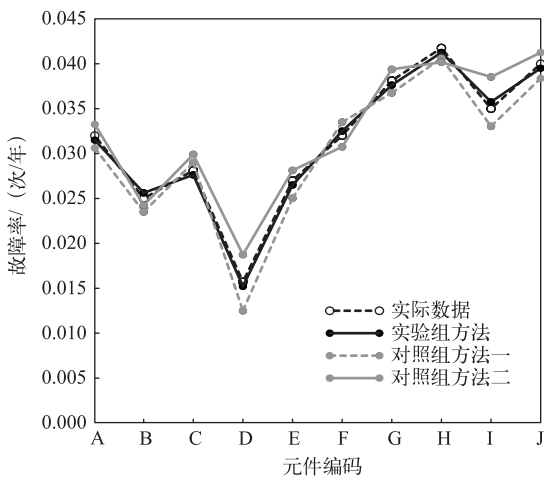


图2 主动配电网运行可靠性评估结果对比

可以看出，在主动配电网中10个代表性元件的可靠性评估中，实验组方法与对照组方法在整体趋

势上和实际故障率数据均保持较好的一致性。但是，与对照组中两种方法相比，实验组方法在评估准确度与稳定性表现更优越，特别是在处理具有复杂自动化特征的元件（分布式电源控制器、电压调节器和保护继电器）时，本文设计方法所得评估结果和实际数据之间拟合度最高。因此可以认为，本文设计的考虑多模式配电特征的主动配电网运行可靠性评估方法是有效且正确的，在实际应用中可以获得更全面、准确的配电网运行可靠性评估结果。

结束语

本文围绕主动配电网运行可靠性评估方法展开深入研究。首先确定了主动配电网在不同运行模式下的配电特征指标，以全面把握配电网在各种状态下的可靠性表现。然后，采用序贯蒙特卡洛模拟法，对主动配电网的运行状态进行了模拟，以此为基

础对配电网的运行可靠性进行了深入评估。未来将继续积极探寻更为高效的模拟算法，以缩短评估时间，满足实时性要求，为配电网的规划与管理提供更加及时、有效的决策支持。EA

(收稿日期：2025-05-07)

参考文献

[1] 郭登科, 米文涛, 庄飞虎, 等. 基于K折验证的配电网故障转供可靠性评估研究[J]. 电气传动, 2022, 52(8): 74-80.

[2] 李宏仲, 郭相辰. 基于Petri网的配电网信息物理系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 347-359.

[3] 张璐, 余顺江, 王辰, 等. 计及VSC运行方式与故障恢复优化的交直流混合配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 292-303.

[4] 郭元皓. 基于改进PSO算法的分布式储能系统的配电网运行电压优化研究[J]. 电气应用, 2024, 43(2): 32-38.

[5] 张昊. 提高配电网新能源消纳比例的分布式储能系统优化配置方法[J]. 电气应用, 2022, 41(3): 56-63.

[6] 刘旭, 王纪元, 焦坤, 等. 基于图论分析的配电网主网运行联合规划系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(08): 161-164.