DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)01-0049-04.

基于智能微网的有源配电网故障自愈技术

张宗包

(深圳供电局有限公司,广东 深圳 518000)

摘 要:现有的配电网故障自愈技术的有功功率损耗较大。为此,提出基于智能微网设计有源配电网故障自愈技术。建立有源配电网故障自愈函数模型,明确目标函数,设定约束条件;基于智能微网模糊获取有功网损,求解隶属度指标上界与下界,实现有源配电网故障的自愈。通过对比实验分别测试三种故障自愈技术的效果。结果表明:在单点故障测试与多点故障测试中,所提的故障自愈技术的电压值最大最小值均大于其他两种方法,在迭代过程中有功功率损耗的最优解分别为21.8 kW和61.2 kW,均小于另两种方法。所研究方法配电网故障自愈效果较其他方法更好。

关键词:智能微网;有源配电网;分布式电源;电网故障自愈;故障自愈

中图分类号:TP183;TM77 文献标识码:A 文章编号:1003−7241(2025)01−0049−04

Fault Self-healing Technology of Active Distribution Network Based on Intelligent Microgrid

ZHANG Zong-bao

(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000 China)

Abstract: The existing fault self-healing technology of distribution network has large active power loss. Therefore, the fault self-healing technology of active distribution network based on Intelligent microgrid is proposed. It establishes the fault self-healing function model of active distribution network, clarifies the objective function and sets the constraints. The active power loss is obtained based on Intelligent microgrid fuzzy, and the upper and lower bounds of membership index are solved to realize the self-healing of active distribution network fault. The effects of three fault self-healing technologies are tested by comparative experiments. The results show that in the single point fault test and multi-point fault test, the maximum and minimum voltage values of the proposed fault self-healing technology are greater than those of the other two methods, and the optimal solutions of active power loss in the iterative process are 21.8 kW and 61.2 kW respectively, which are less than those of the other two methods. Experiments show that the self-healing effect of distribution network fault obtained by the research method is better than other methods.

Keywords: intelligent microgrid; active distribution network; distributed power supply; power grid fault self-healing; Fault self-healing

0 引言

在通信技术不断发展、电力控制技术以及高压输电技术逐代寻优之后,我国的电网技术已经进入新的时代。由于煤炭能源逐渐短缺,以可再生能源(风能、水能等)为主要能源形式的分布式能源被不断接入电网系统,其造成的用电效率以及电能质量的下降成为了现在电网系统中首要解决的问题。由于电网系统的体量与日俱增,传统的运维技术已经很难在电网高速运行的过程中应对突发状况,因此需要探寻一条可以令电网自行免疫抵抗不良状态的方法,使电网在应对简单突发状况时,可以自行痊愈,而不是所有难题都由工作人员协调。这样可以大幅度减轻电网运维人员的工作压力,同时减少由人工造成的调度失误。在文献[1]中,使用智能分布式馈线自动化技术作为配电网故障自愈的技术手段,分析各类配电网故障类型,分门别类归纳其自愈特点,最终将一个故障实例作为实验对象,将该分布式技术应用于该实例中,以矩阵模块为中心,建立仿真实验。虽然该技术拥有较高的容错能力,但是其智能性较差,只能解决较为最简单的故障。文献[2]解决了传统故障数据在采集过程中易出现偏差的问题,并设计了一个以免疫原理为基础的电网故障自愈技术。计算负荷加权系数,建立目标函数,并设定约束条件,使用随机数作为抗体的基础参量,引入动态算法限制开关运动的次数,并优化传感器中的数据类别,实现配电网自愈技术的分析与应用。文献[3]提出了一种孤立网络化微电网(NMG)系统的日前自愈方法。该方法基于两级柔性能源管理系统(EMS)。上层EMS负责正常运行MGs的优化调度,而下层EMS则帮助MGs在自愈和孤岛模式下运行故障。当MG中发生断层时,它将其分为两个区域。并网区从其他正常运行的MG获得电

收稿日期:2023-12-15

力支持。为了应对操作不确定性，采用了随机规划方法，模拟在24小时调度时间范围内运行，给出了正常运行和故障MGs在正常、自愈和孤岛运行模式下的模拟结果。

结合以上方法，本文提出了基于智能微网的有源配电网故障自愈技术，并提高了故障自愈的效果。

1 基于智能微网设计有源配电网故障自愈技术

1.1 建立有源配电网故障自愈函数模型

1.1.1 目标函数

有源配电网中通常会大量接入分布式能源，包括光伏发电机、风力发电机、燃气轮机等，有些分布式能源中还包括储能电池作为电力的存储装置[4]。如果系统中的负荷难以被完全控制，则可以通过切断分路开关的方式，将配电网与支路并联在一起，此时等效负荷的目标函数为：

$$\max f(i)=\frac{\sum_{i=1}^{n}K_p\times h_i}{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i} \tag{1}$$

式中，$\max f(i)$表示配电网与支路的并联负荷有功功率最大值；K_p表示节点p的等效电压；h_i表示故障节点的等级指标；λ_i表示节点负荷等级[5]。当λ_i小于1时，表示节点i为故障区域节点，当λ_i大于1时，该节点为非故障节点。在故障部位负荷恢复的最大值可以使用公式(2)表示：

$$\max f(p)=\frac{\sum_{i=1}^{n}K_p^{\,i}}{\sum_{i=1}^{n}(y_i+p_i)} \tag{2}$$

式中，$\max f(p)$表示故障部位负荷经由自愈后恢复功率的最大值；K_p^i表示i节点的供电负荷等级；y_i和p_i分别表示i节点该故障部位自愈后的系统最小网损与负荷功率[6−7]。结合以上两个公式，可以得到自愈前后有源配电网的负荷总量。

1.1.2 约束条件

在有源配电网中，凡是加入了分布式电源的电力节点均会产生大量的潮流约束，同时还会导致电压与电流发生变化，因此该目标函数的约束条件极为复杂。在辐射状区域，配电网的约束条件为：

$$\begin{cases} f_i+f_j=k_p, i=1,2,\cdots,n \\ \sum_{i=1}^{n}f_i=\sigma_k, i=1,2,\cdots,n \\ f_k=0, k=1,2,\cdots,n \\ 0\le k_p\le 1 \\ \sum_{i=1}^{n}f_j=h_n, j=1,2,\cdots,n \end{cases} \tag{3}$$

式中，f_i和f_j分别表示正常供电情况下的节点有功功率以及供电故障区域的节点有功功率；k_p表示故障区域节点电压；σ_k表示配电网中辐射状约束的系统参数；h_n表示节点在故障自愈过程中的电流指标；f_k表示配电网中第k条支路的实际潮流有功[8]。在保证孤岛稳定性的同时，需要严格保证发电功率与负荷功率的平衡，可以得到：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n}K_{p,d}\times\xi_i\ge\sum_{j=1}^{n}K_{p,d}\times\xi_j \\ K_{p,d}\ge K_p+K_d \end{cases} \tag{4}$$

式中，$K_{p,d}$表示孤岛内所有节点功率的有功输出；K_p和K_d分别表示经过分布式电源后的功率输出，或者没有经过分布式电源的功率输出；ξ_i和ξ_j则分别表示节点内的输出有功与输出无功。在实现了约束条件的前提下，可以得到该有源配电网故障自愈的函数条件，并建立函数模型。

1.2 基于智能微网模糊处理有功网损

有功网损在模糊化处理系统中的数据时，总是喜欢将原网络中的开关作为短路网损，并设定网损的模糊指标，网损越小，电网的故障处理效果越好。因此可以通过网损增大隶属值的方式，建立隶属度的函数模型，结果如图1所示。

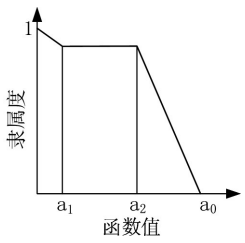


图1 隶属函数示意图

如图1所示，对应三个函数值的隶属度，可以建立相应的表达式：

$$\begin{cases} h_i=1, 0\le f_i(x)<a_1 \\ h_i=k_1f_1+a_2, a_1\le f_i(x)<a_0 \\ h_i=0, f_i(x)\ge a_0 \end{cases} \tag{5}$$

式中，h_i表示函数的隶属度，其总共有三类数值，分别是1、0、[0,1]，当隶属度为1时，函数值在0−a_1之间，当隶属度为0时函数值在a_0之后，当隶属度在[0,1]之间时，函数值为a_1−a_0之间的任何数值。因此可以将得到各目标在智能微网中的综合适应度，以欧式距离求解优化后的隶属度指标，可以得到下限与上限之间的公式为：

$$\begin{cases} d_{\max}=\sqrt{\dfrac{(f_i^+-f_i^-)^2}{(g_i^++g_i^-)^2}} \\ d_{\min}=\sqrt{\dfrac{(f_i^++f_i^-)^2}{(g_i^+-g_i^-)^2}} \end{cases} \tag{6}$$

式中，$d_{\max}$和$d_{\min}$分别表示实际隶属度与同理想值之间差异程度的上限与下限；f_i^+和f_i^-分别表示有功网损的理想

值与可接受值；g_i^+和g_i^-则分别表示无功网损的理想值与可接受值。综合以上公式，可以将有功网损的数值模糊处理，最终得到一个优化后的配网自愈指标。

1.3 设计故障自愈算法

通过以上有源配电网的故障自愈目标函数以及约束模型，还有有功网损的模糊优化技术，可以得到本文故障自愈的算法，其流程如图2所示。

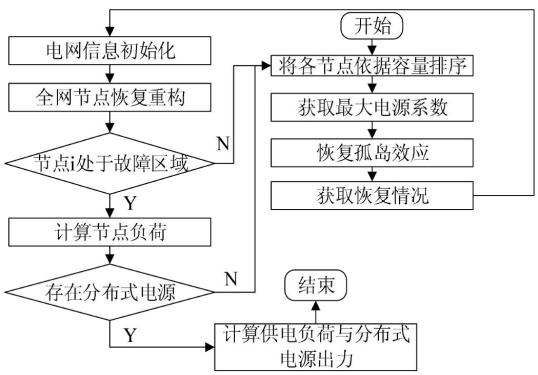


图2 算法流程

如图2所示，本算法的重点内容就在于对节点内故障区域以及是否含有分布式电源的统计与判断。当节点处于故障区域时，则可以直接得到节点负荷的计算，但是当节点未处于故障区域，则需要首先计算其故障位置，基于孤岛效应获取电网节点自愈恢复的排序指标，然后再去进行下一步的程序。此后，还需要判断该区域内是否含有分布式电源，若含有分布式电源，则系统内的计算方式符合以上公式中的求解方法，可以直接计算电源的出力负荷。

2 实验研究

2.1 配电网故障节点设置

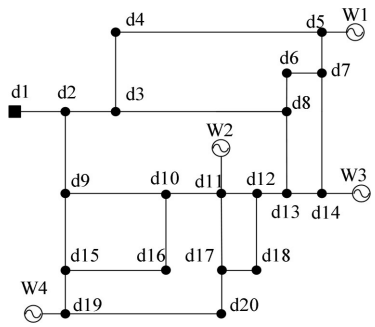


图3 配电网故障节点

为验证本文设计的有源配电网故障自愈技术的有效性，设计如下实验，将其与现有的几种故障自愈技术相对比，判断该技术是否实现了优化。设计一个IEEE20节点系统作为测试案例，将其放置于MATLAB软件中设计算法程序，得到如图3所示的配电网故障节点示意图。

如图3所示，将d1处作为配电网的接入口与平衡节点，在电网内部共有19个节点作为分压节点。电压等级为12.34 kV，其总功的有功负荷与无功负荷分别为4 325 kW和2 123 kW，电压的上限与下限则分别为1.14 p.u.和0.83 p.u.。结合以上配网参数，在IEEE20节点系统中引入分布式电源，分别在d5、d19、d14三个节点接入系统，得到不同接入点的信息如表1所示。

表1 分布式电源接入信息

接入点编号	容量/kVA	功率	电源类型
d5	400	0.8	不含蓄电池
d11	400	0.8	不含蓄电池
d14	500	0.9	含蓄电池
d19	500	0.9	含蓄电池

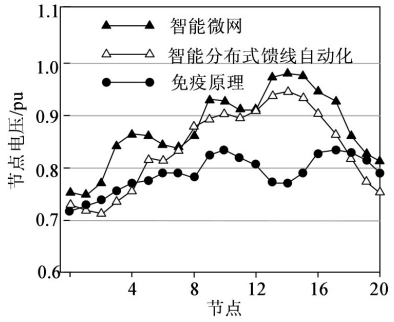
在接入分布式电源后，系统内各节点的负荷系数与负荷等级也会随之发生改变，其重要程度会转变为如表2所示。

表2 节点负荷信息

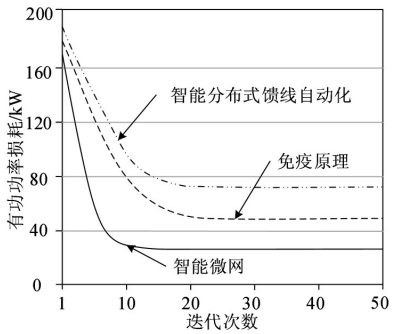
负荷等级	负荷系数	节点
Ⅰ级	15	d4、d7、d10、d12、d13、d15、d17、d20
Ⅱ级	10	d3、d6、d8、d9、d12、d16、d18
Ⅲ级	5	d1、d2

如表2所示，20个节点分别分为三种负荷等级，且三种等级的负荷系数分别为15、10、5。

2.2 配电网单点故障自愈



(a) 节点电压



(b) 有功功率损耗

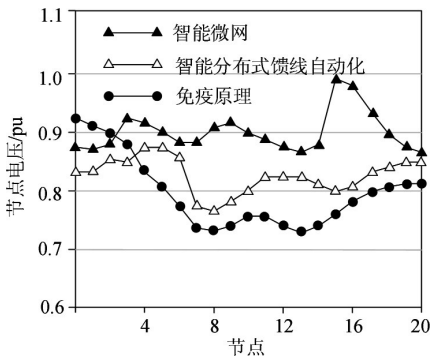
图4 配电网单点故障

系统内故障的类型可以大致分为两种，分别是单点

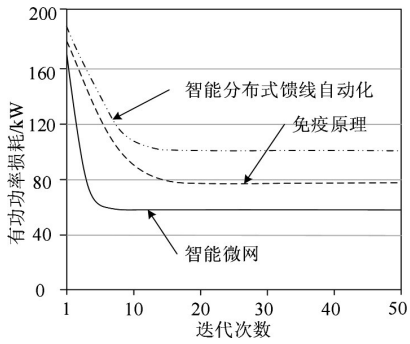
故障与多点故障，假设IEEE20系统内发生单点接地故障，故障区域为d3−d4之间的线路，算法的迭代次数为50次。在传统的配电网故障自愈技术中，通常都是用了智能算法，本文将所设计的智能微网作为故障自愈的实验组技术，传统的两种方法为基于智能分布式馈线自动化技术的电网故障自愈方法和基于免疫原理的电网故障自愈方法，分别测试这三种方法下各节点的电压以及有功功率损耗。在单点故障重构时，节点电压的分布与有功功率损耗结果如图4所示。

如图4所示，该配电网内，三种故障自愈技术下各节点电压差别较大，其中智能微网技术的最低电压为0.75 p.u.，最高电压为0.98 p.u.；智能分布式馈线自动化技术的最低节点电压为0.71 p.u.，最高电压为0.95 p.u.；免疫原理下最低节点电压为0.72 p.u.，最高电压为0.84 p.u.。依据以上数据可知，智能微网技术的节点最高电压与最低电压均高于其他两种方法。随着迭代次数的增加，系统的有功功率损耗不断下降，到一定次数后，有功功率损耗会降低到一定的数值，然后保持不动。其中智能微网技术在第10次迭代时就达到了最低值28.9 kW，智能分布式馈线自动化技术在第20次迭代时达到功率损耗的最小值21.8 kW，免疫原理在第15次迭代时达到有功功率损耗的最小值72.5 kW。本文故障自愈技术的功率损耗远小于其他两种方法，可见该技术得到了优化。

2.3 配电网多点故障自愈



(a) 节点电压



(b) 有功功率损耗

图5 配电网多点故障

设定该配电网的多点故障区域为d3−d4、d6−d8、d9−d10，同样设最大迭代次数为50，分别获取多点故障自愈算法下，各节点的电压与有功功率损耗，得到图5。

如图5所示，智能微网技术的最大与最小节点电压分别为0.99 p.u.和0.87 p.u.，智能分布式馈线自动化技术节点电压的最大与最小值分别为0.88 p.u.和0.77 p.u.，免疫原理方法的节点电压最大最小值分别为0.92 p.u.和0.73 p.u.。在50次迭代中，有功功率损耗距单点故障有一定的提高，三种技术的损耗分别为61.2 kW、78.6 kW、102.3 kW。由此可见，配电网多点故障下本文设计的智能微网技术优于其他两种方法，实现了故障自愈性能的提升。

3 结束语

本文通过智能微网设计了一种有源配电网的故障自愈技术，通过建立故障自愈模型，构建了目标函数并设定约束条件，同时将智能微网作为配电网有功网损的模糊处理方法，最后设计了用于电网系统的故障自愈算法。结合实验可知，该系统在单点故障以及多点故障中均可以得到较好的故障点重建结果，但是配电网的多点故障所得数值明显较单点故障差，因此可以在下一阶段的研究中，重点优化配电网中多点故障的自愈性能。

参考文献：

[1] 陈锦龙，杜江，郭萌，等.基于智能分布式馈线自动化的配电网故障快速自愈方法[J].机械与电子，2021，39(12)：3−7.

[2] 梁瑞尤，黄志鹄，陈智广.免疫原理的智能配电网自愈系统关键技术分析[J].自动化与仪器仪表，2020(6)：201−204.

[3] Ahmadi S E，Rezaei N，Khayyam H.Energy management system of networked microgrids through optimal reliability−oriented day−ahead self−healing scheduling[J].Sustainable Energy Grids and Networks，2020(23)：100387.

[4] 胡天彤，白首华.基于有源换相换流器的交直流智能配电网控制策略[J].高电压技术，2021，47(12)：4493−4501.

[5] 程梦竹，张新慧，徐铭铭，等.基于多目标加权灰靶决策的有源配电网故障区段定位方法[J].电力系统保护与控制，2021，49(11)：124−132.

[6] 郑涛，马龙，李博文.基于馈线终端装置信息畸变校正的有源配电网故障区段定位[J].电网技术，2021，45(10)：3926−3935.

[7] 王泰棚，张若思，陈征，等.典型园区综合能源示范系统智能微网储能配置设计效果研究[J].电气时代，2020(12)：32−36.

[8] 李钰洋，王增平，赵乔.基于贝叶斯全解析模型与多因素降维的有源配电网分布式故障区段定位方法[J].电网技术，2021，45(10)：3917−3927.

作者简介：张宗包(1985−)，男，硕士，高级工程师，研究方向：电力系统自动化。