

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.220

智能配电网故障后自愈能力评估研究

张雪霏¹, 李智威¹, 姜英涵², 唐学军¹, 董力通², 孙利平¹, 周秋鹏¹

(1. 国网湖北省电力有限公司 经济技术研究院, 武汉 430000; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 100000)

摘要:自愈能力作为智能电网的主要特征具有重要的研究意义,但迄今为止尚未有全面的智能配电网自愈能力衡量标准。现有的智能配电网自愈评估主要存在量化指标不全面、忽视自愈过程中的不确定性等问题,导致评估不准确,估值高于实际结果。为了解决上述问题,提出自愈可信度、自愈率、自愈速度和自愈效益4个量化指标,涵盖了配电网故障后负荷恢复的速度、可持续时间和经济效益等因素。在上述指标的基础上,利用信息熵的方法提出了一个综合评价指标——自修复性能;引入不确定性理论来定量描述自愈的不确定性,以解决在自愈评估过程中的不确定性和样本不足的问题。最后,利用构建的含7个区段的配电系统结构进行仿真分析,验证了所提评价指标和评估方法的有效性和准确性。

关键词:自愈;不确定性;量化指标;评估;智能配电网

中图分类号: TP181

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)11-119-10

Self-healing capability evaluation of smart distribution network after fault

ZHANG Xuefei¹, LI Zhiwei¹, JIANG Yinghan², TANG Xuejun¹, DONG Litong²,
SUN Liping¹, ZHOU Qiupeng¹

(1. State Grid Hubei Economic Research Institute, Wuhan 430000, P. R. China; 2. State Grid State Power Economic Research Institute, Beijing 100000, P. R. China)

Abstract: The self-healing characteristic is a key aspect of smart grids and holds important research significance. However, a comprehensive measurement standard for assessing the self-healing ability of smart distribution networks has not yet been established. Existing evaluations of self-healing in smart distribution networks suffer from various issues, such as incomplete quantitative indicators and neglecting uncertainties in the process of self-healing. These problems leads to inaccurate evaluation and higher-than-actual results. To address these challenges, four quantitative indexes, namely, self-healing credibility, self-healing rate, self-healing speed and self-healing benefit are proposed. These indicators encompass factors such as the speed of load recovery, duration of sustainability, and economic benefits following faults in the distribution network. Being built upon these indicators, a comprehensive evaluation metric called “self-repair performance” is proposed using the method of information entropy. Uncertainty theory is introduced to quantitatively describe the uncertainty of self-healing so

收稿日期: 2021-09-02 网络出版日期: 2021-11-05

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5400-202056131A-0-0-00)。

Supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (5400-202056131A-0-0-00).

作者简介: 张雪霏(1993—),女,硕士研究生,主要从事电力行业技术经济分析研究,(E-mail)wuyue7210@163.com。

通信作者: 李智威,男,博士,高级工程师,(E-mail)w1104299678@163.com。

as to solve the problems of uncertainty and insufficient samples in the evaluation process. A simulation analysis is conducted on a constructed power distribution system with 7 sections to validate the effectiveness and accuracy of the proposed evaluation indexes and method.

Keywords: self-healing; uncertainty; assessment index; assessment; smart distribution grid

智能配电网具有经济、可靠、效率高、交互好、自愈等优点,因而得到了广泛的研究和发展^[1-6]。随着智能电网的发展和地区电力市场配电网电压水平的提高,人们对配电系统的期望正在大幅上升。然而,由于配电网的薄弱结构和明显特征,例如长馈线、径向拓扑和组件的多样性,它们更容易受到配电网故障、攻击等事件的影响。因此,随着智能配电网工作环境变得越来越复杂,电网需要具备有效的恢复策略,以便在发生严重事件时能够快速恢复其负载。自愈技术就像配电网的免疫系统,它对保证配电网的安全稳定运行具有重要作用。对智能配电网的自愈进行全面和客观的评估是为了提高对智能配电网的建设,从而准确地分析电网自愈中存在的问题,并为电网自愈能力的提高提供指导。国内外学者已经从不同的角度评估了智能电网,并建立了智能电网评估索引系统。文献[7]中指出现有技术只有在恢复最大负载的故障隔离阶段的表现令人满意,而且它们在处理与典型故障性质不同的重大事件时面临严重困难。因此,在高影响事件之后,不能通过采用传统的恢复方法来实现系统的期望功能,以适应新的能源需求,并使低能耗客户能够更好地利用电网。文献[8-9]中提出了一个在线智能电网框架来评估运营可靠性对基础结构的影响,这个框架是理解和分析大规模复杂的网络物理系统的一个重要步骤。文献[10-11]中提出的电网评估系统,以及“两类”网格指标系统,在科学上反映了资源的影响和环境发展的优化程度。文献[12]中提出了电网发展的优化程度、电网发展指标系统衡量经济发展、电网发展速度、建设规模、发展质量和效率[13]等评价体系。对于电网的自愈问题,国内外学者也进行了专门的研究。文献[14]中提出了一种智能电网的自愈方法,该方法使用组合潮流控制器并能在电网故障下获得连续的潮流。在该方法的控制算法中,应用反向电流网络代替迭代算法,应用节点分析法代替优化方法,并且重新安排潮流。文献[15]中提出了一种基于熵权的多层次模糊评价方法来评价智能电网的自愈过程,该方法既考虑了评价指标在专家主观评价中的重要性,又考虑了评价指标所包含的各种客观信息。文献[16]中提出了配电网各区段故障后的自愈恢复率、自愈恢复速度、自愈控制操作复杂度和自愈可持续时间的评价方法,但是没有考虑到自愈过程的经济效果和电网组件的不确定性。上述文献中对智能配电网的自愈评价指标进行了全面的分析和研究,但没有考虑到以下2个主要问题:1)在自愈过程中缺乏对电网组件的不确定性的考虑,导致评价指标不具备有效性和准确性;2)电网自愈缺乏更加实际趋于经济化的指标。

笔者提出了包括自愈可靠性、自愈率、自愈速度和自愈效益在内的量化评价指标,并对其进行了定量评价。当出现自修复过程的不确定性时,需要大量的样本数据来评估自修复能力。然而,由于电网测量设备限制,很难获得足够的样本数据或全面的自我修复。因此,使用不确定性理论[17]来解决数据样本数据缺少等问题。

本研究的主要贡献包括:1)给出了自愈的综合评估指标,包括可靠性、范围、速度和自愈能力,并给出了它们的计算方法;2)考虑了自愈评价指标的不确定性,从而提高评估结果的准确性。

1 智能配电网自愈可信度

电网系统发生故障后,在负载恢复过程中,需要多个开关元件协同工作。显然,若开关能正常工作,负载能够成功恢复将是可靠的。因此,开关元件的可靠性决定了负载的自愈可信度。然而,开关元件的可靠性是不确定的,它受到开关的使用和流经的电流的影响。因此,需要计算电网组件的可靠性,然后根据一系列相关组件的可靠性得到负载的自愈可信度。

1.1 自愈结果的表示

系统的状态不是自愈的就是非自愈的^[18]。因此,文中选择用布尔值来表示系统的状态。为了方便起见,组件的状态由系统定义为

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{组件 } i \text{ 正常,} \\ 0, & \text{组件 } i \text{ 非正常.} \end{cases} \quad (1)$$

同样,使用布尔系统定义自愈结果:

$$X_{p_i} = \begin{cases} 1, & \text{负载 } p_i \text{ 可以自愈,} \\ 0, & \text{负载 } p_i \text{ 无法自愈.} \end{cases} \quad (2)$$

假设负载自愈的成功与开关元件 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 有关, n 表示开关的数量,这些开关的结构关系用布尔函数表示。当且仅当 $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1$ 时, $X_{p_i} = 1$; 当且仅当 $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ 时, $X_{p_i} = 0$ 。

1.2 自愈可信度

故障发生后,开关的正常运行是恢复的关键。定义元件的不定性指标来表示元件正常的不确定性度量,即 $x_i=1$ 的不确定性度量是 a_i , $x_i=0$ 的不确定性度量是 $1 - a_i$ 。负载的自愈与一系列开关元件的正常运行密不可分,定义负载的自愈可信度值 $R_{\text{MBE}} = M_{\text{bc}} = M\{f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1\}$ 为指示自愈故障的不确定性测量值^[19]。 R_{MBE} 公式计算条件如下:

$$R_{\text{MBE}} = \begin{cases} \min_{1 \leq i \leq n} v_i(x_i), & f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1 \\ 1 - \min_{1 \leq i \leq n} v_i(x_i); & f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$v_i(x_i) = \begin{cases} a_i, & x_i = 1, \\ 1 - a_i, & x_i = 0. \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4),如果开关元件的关系是串联的, $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_n$, $R_{\text{MBE}} = M\{x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_n = 1\} = a_1 \wedge a_2 \wedge \dots \wedge a_n$, 其中 \wedge 表示逻辑 AND。如果开关元件的关系是并联, $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1 \cup x_2 \cup \dots \cup x_n$, 其中 \cup 表示逻辑 OR; 如果开关元件之间的关系是至少有一个开关正常工作,则愈合成功,修复成功, $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1 - \max[x_1, x_2, \dots, x_n]$, 有 $R_{\text{MBE}} = 1 - \max[a_1, a_2, \dots, a_n]$ 。

1.3 部件可靠性的不确定性

根据文献[20],电网组件对外界环境的抵御能力不一样导致组件的可靠性是不确定的,其值在一个范围内不断波动。文献[21]中利用模糊度隶属函数来定义组件的可靠性和组件的使用时间在区间范围的波动情况。

2 自愈评价体系

目前,在电网自愈的评估中,经常用自愈评分 R_{SHR} 来描述电网的功率恢复。传统的自愈评分标准^[16]计算如下:

$$R_{\text{SHR}} = \frac{\sum_{t=1}^{T_c} (\omega_1 P_{I,t} + \omega_2 P_{II,t} + \omega_3 P_{III,t}) \Delta t}{\sum_{t=1}^{T_c} (\omega_1 L_{I,t} + \omega_2 L_{II,t} + \omega_3 L_{III,t}) \Delta t} \times 100\% \quad (5)$$

式中: ω_1, ω_2 和 ω_3 分别是负载 1、负载 2 和负载 3 的权重系数; $P_{I,t}, P_{II,t}, P_{III,t}$ 表示在 t 时刻恢复了的各级负荷; $L_{I,t}, L_{II,t}$ 和 $L_{III,t}$ 表示在 t 时刻每个级别要求的负荷; T_c 代表发生故障的持续时间。但是,这个指标没有考虑故障后开关元件的状态,也没有考虑此时元件是否能正常工作,最终是否能恢复电负荷,即自愈是否能实现。因此,结果比实际的自愈状况要好。为了解决这个问题,将在下面介绍自我愈合技术。

根据第 1 节介绍的自愈可信度,考虑自愈可信度的自愈评分的计算方法为:

$$R'_{\text{SHR}} = \frac{\sum_{t=1}^{T_c} \left(\omega_1 \sum_{k_i \in M_I} N_{\text{bc},k_i} P_I + \omega_2 \sum_{k_i \in M_{II}} N_{\text{bc},k_i} P_{II} + \omega_3 \sum_{k_i \in M_{III}} N_{\text{bc},k_i} P_{III} \right) \Delta t}{v_{t=1}^T (\omega_1 L_{I,t} + \omega_2 L_{II,t} + \omega_3 L_{III,t}) \Delta t} \quad (6)$$

式中: M_I, M_{II} 和 M_{III} 分别为第一类负荷、第二类负荷和第三类负荷; P_I, P_{II} 和 P_{III} 分别为第一类、第二类负荷和第三类负荷的功率; N_{bc,k_i} 表示 k_i 的自愈可信度; R'_{SHR} 为考虑自愈可信度的自愈评分。基于不确定理论的配电网自愈评估方法,与恢复相关的各分量的可靠度为 0~1,则负荷的自愈可信度可由式(3)计算,得到 $0 \leq N_{\text{bc},k_i} \leq 1$ 。

因此,修正后的自愈率值会小于初始值,更符合电网的实际自愈率。

2.1 自愈恢复速度

智能电网技术可以定义为自愈系统,减少劳动力,旨在为所有消费者提供可持续、可靠和优质的能源,快速找到现有系统中问题的解决方案。为了减少用户停电的时间,降低停电带来的经济损失,智能电网技术要求以最快的速度恢复发生无故障区段的供电。在计算系统的自愈速度时,考虑到不同负载的恢复方式对自愈的影响程度不同,把负载分为正常负载和非正常负载。非正常负载的自愈速度通常被认为是0,见式(7)。否则,普通的保护方法需要相对较长的时间,导致非正常负载不能自愈。

$$R_{SHS,S} = 0。 \quad (7)$$

正常的负载采取保护措施后,会经历一段漫长的自我愈合过程。此外,如果电路上有分布式电源,可以通过分布式电源实现孤岛自愈。无论如何,它都可以提供2个进程:故障定位和解决恢复。所以,正常负载的自愈速度 $R_{SHS,N}$ 表示为故障区定位时间 S_1 和故障隔离及非故障区功率恢复时间 S_2 之和:

$$R_{SHS,N} = S_1 + S_2。 \quad (8)$$

显然,自愈速度指数越小,自愈速度更快。根据不确定性理论,不确定数据 ξ 可以根据专家测试数据获得。专家的实验数据表示为 $(t_1, \pi_1), (t_2, \pi_2), \dots, (t_n, \pi_n)$, t_1, t_2, \dots, t_n 是专家提供的一系列时间, $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$ 是表示专家提供的可信度的值。根据专家的测试数据,可以获得不确定数据 $\mathbf{z}(t)$ 经验不确定分布:

$$\mathbf{z}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_1; \\ \pi_i + \frac{(\pi_{i+1} - \pi_i)(t - t_i)}{t_{i+1} - t_i}, & t_i \leq t \leq t_{i+1}, 1 \leq i < n; \\ 1, & t > t_n。 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)是不确定数据分布的结果。计算不确定分布期望值的公式为:

$$F(\phi) = \frac{\pi_1 + \pi_2}{2} x_1 + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{(\pi_{i+1} - \pi_{i-1})}{2} x_i + \left(1 - \frac{(\pi_{n-1} + \pi_n)}{2}\right) x_n, \quad (10)$$

$$R'_{SHS,N} = F(\phi_1) + F(\phi_2)。 \quad (11)$$

式中: ϕ_1 代表定位故障的时间; ϕ_2 代表处理故障和恢复供电的时间。

2.2 自愈的效益

为了解决电网自愈缺乏更加实际趋于经济化的指标问题,计算了零件失效时的损失。居民区、商业区和工业区因自愈降低的损失分别用式(12)(13)和(14)计算。

$$S_r = \sum_{t=1}^{T_r} \left(\theta_r \sum_{p_i \in M_r} N_{bc,ki} P_{rc} \right), \quad (12)$$

$$S_c = \sum_{t=1}^{T_c} \left(\theta_c \sum_{p_i \in M_c} N_{bc,ki} P_{co} \right), \quad (13)$$

$$S_i = \sum_{t=1}^{T_i} \left(\theta_g \sum_{p_i \in M_i} N_{bc,ki} P_{gi} \right)。 \quad (14)$$

式中: M_r, M_c, M_i 分别为居民区、商业区和工业区的负载数量; $\theta_r, \theta_c, \theta_g$ 分别为居民区、商业区和工业区的等效电价; P_{rc}, P_{co}, P_{gi} 分别为居民区、商业区和工业区当前负载功率。为了进一步提高电网系统的稳定性,考虑在自愈过程中负载和组件发生故障的次数,自愈效益的具体公式如下:

$$R_{BEN} = \sum_{k=1}^{Y^*} (1 + R_A)^{-k} \left\{ \sum_{l \in L_{cn}} \partial_l \left[\sum_{t=1}^{T_c} (S_r + S_c + S_i) \Delta t \right] \right\}。 \quad (15)$$

式中: R_A 表示年利率; Y^* 代表电网的预期寿命; Len 为分段数量; ∂_l 为该部门一年中的失败次数。从式(15)可以看出,电网的自愈效益和地区的电费呈正相关的关系。

2.3 综合评价指标

自愈可信度、自愈率、自愈速度和自愈效益在前面的章节中已经定义,并从4个不同的角度测量了智能配电网的自愈性能。为了便于直观地描述配电网的自愈性能,需要一个综合的指标。事件的信息熵是一个

事件^[22]中信息量的客观度量。利用信息熵可以提高评价的客观性,它可以解决无法计算每个单元评估的问题。因此,可以使用综合方法来构建这个综合指标,将信息熵定义为自愈修复综合性能指数。信息熵的中心值越大,提供的信息量就越少,并且在综合评估指数中,所有的值都越小。

1)为了消除指标之间的不可公度性,将指标规范化。

$$z_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij}, \tag{16}$$

式中: z_{ij} 为指标 y_{ij} 的标准化指标; m 为指标个数。

2)计算每个指标的信息熵 E_j

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m z_{ij} \ln z_{ij}, \tag{17}$$

式中,当 $z_{ij}=0, z_{ij} \ln z_{ij}=0$ 。

3)计算每个指标的权重系数 α_j

$$\alpha_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{k=1}^n (1 - E_k)}. \tag{18}$$

4)计算自愈综合绩效指标值 R_{SHP}

$$R_{SHP} = \alpha_1 M_{bc} + \alpha_2 R'_{SHR} + \alpha_3 R'_{SHS} + \alpha_4 R_{BEN}. \tag{19}$$

3 算例分析

为了证明所提出方法的有效性,构建了如图 1 所示的 13 节点 7 段的智能配电网测试案例^[23],并通过 Matlab 进行了验证。

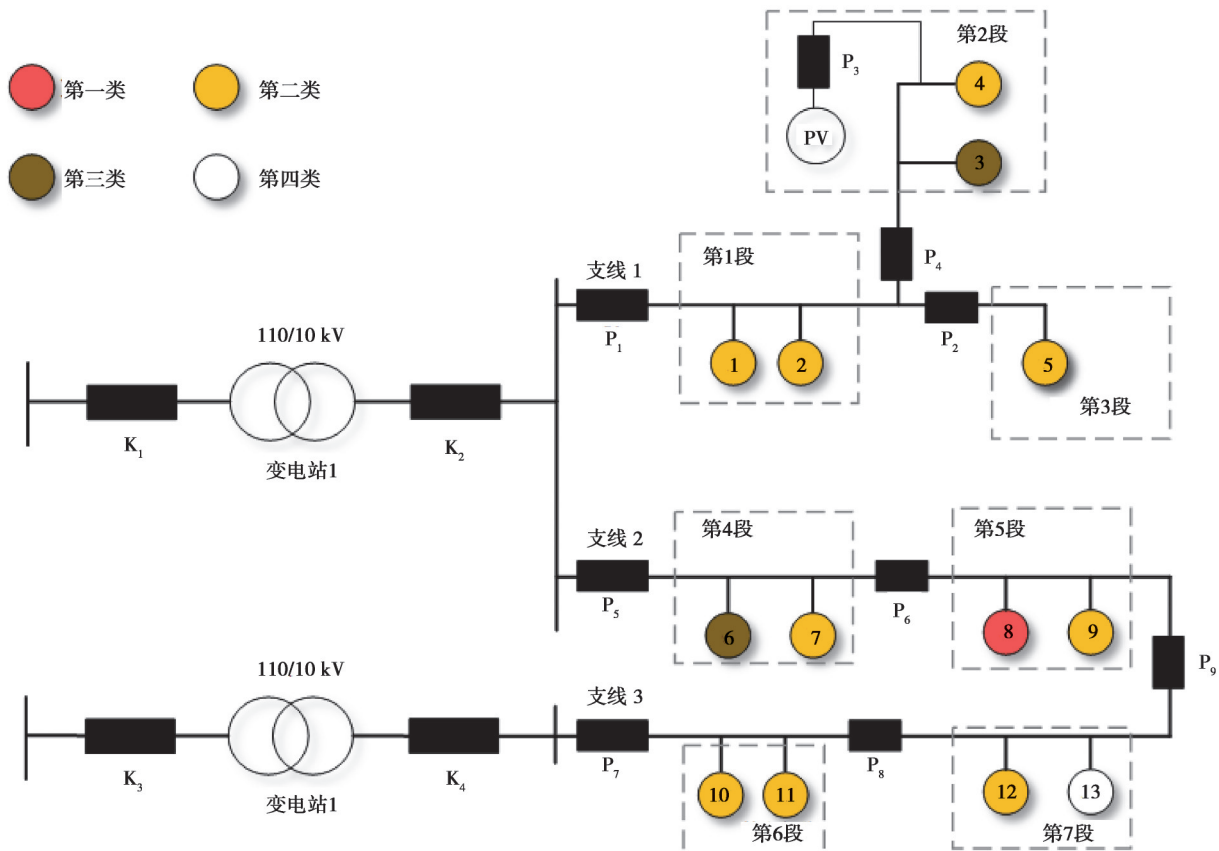


图 1 13 节点 7 段配电系统结构

Fig. 1 Distribution system structure of 13 nodes and 7 sections

现实生活中的配电网系统节点的数目庞大,为了简化计算,可以将这些节点划分为多个小区域,分别计算每个小区域的自愈性。假设本例中电网项目的生命周期为50 a,即年利率 R_A 为5%。居民电价、商业电价和工业电价分别为0.6元/(kW·h)、0.9元/(kW·h)和1.3元/(kW·h)。在这个例子中有3个输电线:支线2和支线3通过触点开关9加倍加速,触点开关9为敏感负载提供实时自修复条件;支线1是居民使用,支线2是商业使用,支线3是工业使用。居民、商业、工业每天的用电量如图2所示。

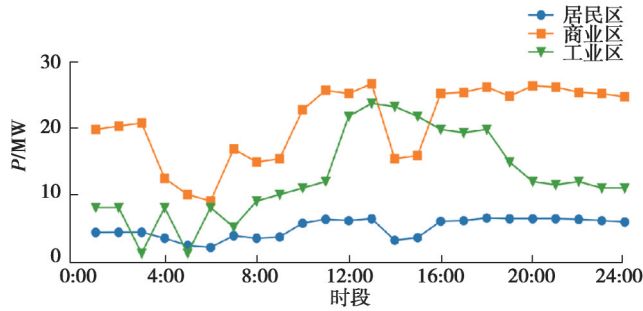


图2 用电量折线图

Fig. 2 Electricity consumption

P_1 、 P_5 和 P_7 是内部断路器。 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 是变压器两侧的开关。 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_6 和 P_8 是线路上的交换机。系统最大负荷为52 MW,其中节点1、2、4、5、7、9、10、11、12的负荷为三级负荷,3、6为二级负荷,8、13为一级负荷;节点13是敏感节点的负载。根据其他专家的判断,第一、第二和第三类负载的权重系数分别为0.65、0.25和0.10,敏感负载和第三类负载的权重系数分别为0.75和0.25。光伏发电系统的容量为1 MW,负载的功率如图3所示。开关使用时间和分段故障率如图4所示。

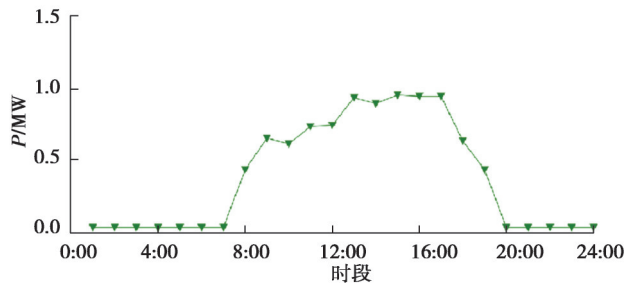


图3 光伏电站一天的功率折线图

Fig. 3 Photovoltaic power station power of a day

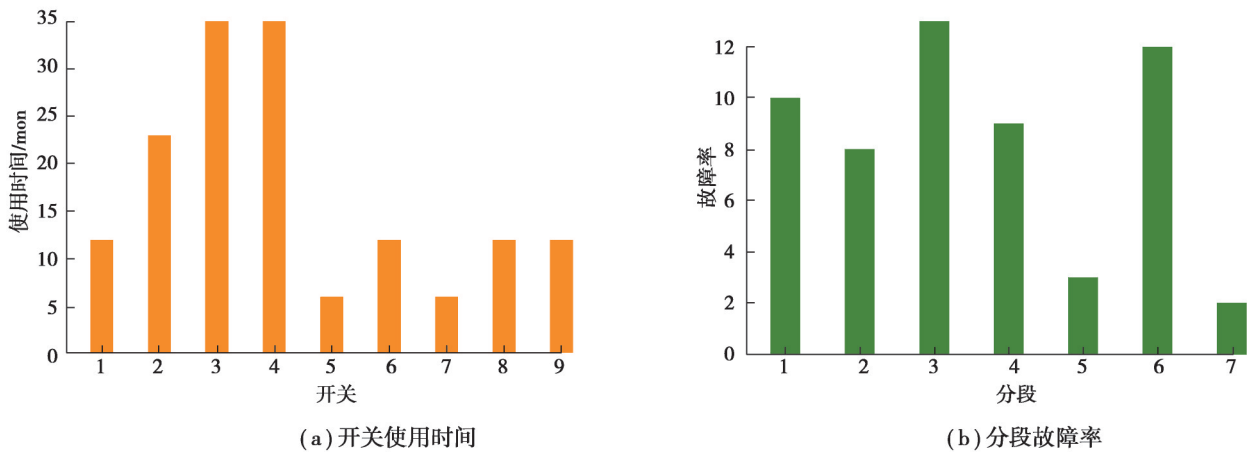


图4 开关使用时间和分段故障率结果图

Fig. 4 Results of switch service time and segment failure rate

4 仿真结果及讨论

选择时刻 12 点,分别在 6 段设置故障,然后对自愈过程进行分析。 $P_1 \sim P_9$ 的可靠性利用隶属函数计算得到。根据式(3),计算出各截面失效后各荷载的自愈可信度。结果显示在第 1 段自愈和在第 2 段发生故障的自愈可信度为 0.928,同理可得第 2 段、第 4 段和第 6 段的自愈可信度分别为 0.918、0.970 和 0.971。同一段负载的自愈可信度是一样的。第 1 段故障后, P_1 断开,影响第 2 段和第 3 段供电。在第 1 段发生故障期间, P_1 不能关闭。但是,第 3 段将无法恢复电力,自愈可信度可信为 0。如果第 4 段发生故障,可以通过打开 P_6 和关闭 P_9 来恢复第 5 段的电力。因为 P_5 、 P_6 和 P_9 的部分组件可靠性高,所以第 5 段的自愈可靠性高。最后计算系统的自愈可信度。根据式(6),计算考虑可信度的自愈评分,根据式(5)计算不考虑可信度的自愈评分,将故障时间设置为 30 min,结果如图 5 所示。

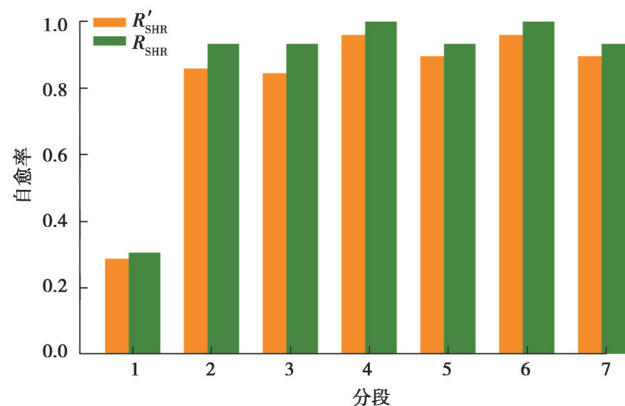


图 5 分段故障自愈率柱状图

Fig. 5 Histogram of segmental fault self-healing rate

根据故障率,考虑可信度,得到系统的自愈率。根据文献[23]提供的故障定位时间专家实验数据(13,0)(15,0.6)(18,1),故障隔离时间专家实验数据(40,0)(45,0.4)(48,1),负载传递时间专家实验数据(53,0)(60,0.4)(68,1)和孤岛运行时间专家实验数据(80,0)(90,0.5)(100,1),然后根据式(10)计算每个截面失效后考虑不确定性的自愈速度,结果如图 6 所示。

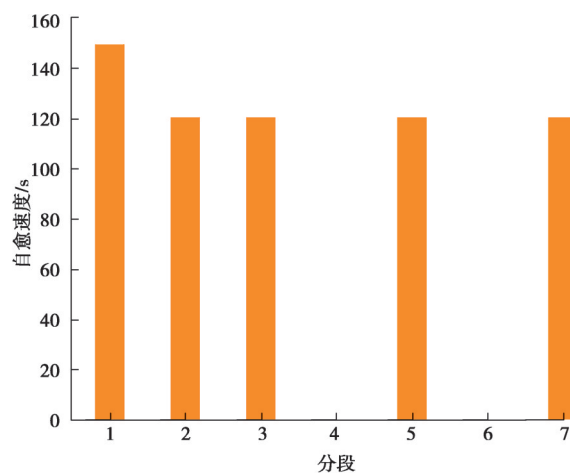


图 6 分段自愈速度柱状图

Fig. 6 Histogram of segmental self-healing rate

根据图 6 的自愈速度,得到考虑不确定性的系统自愈速度。根据式(11)计算系统的自愈效益系数,计算全天不同时间的自愈评价指标,结果如图 7 所示。

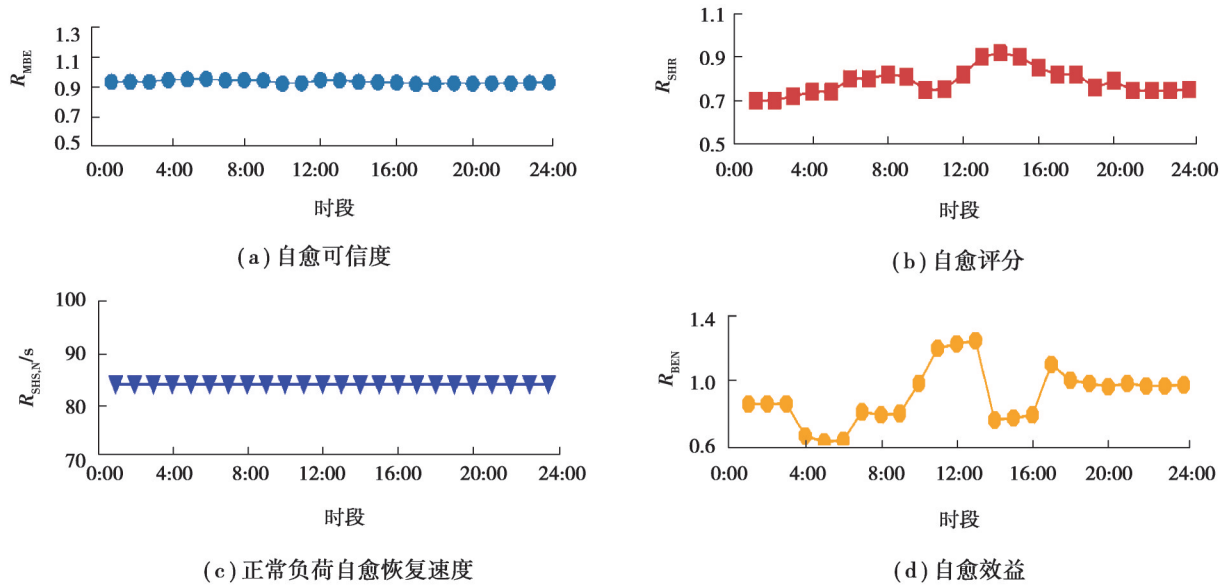


图7 一天不同时段自愈评价指标对比图

Fig. 7 Comparison of self-healing evaluation indexes at different times of the day

从图7(a)中可以看出,智能配电网的自愈可信度比较稳定,因为配电网的可靠性与器件可靠性有关。当负载非常小,流经器件的电流很小,此时自愈能力很高。从图7(b)中可以看出,8点和14点的自我修复能力已经达到了很高的水平,因为自我修复的可预测性在很长一段时期内都很高,而且有足够的能力来帮助电厂提供足够的修复能力。图7(c)是24小时电网正常负荷的自愈速度,非正常负载的自愈速度为零。图7(d)是电网负载的自愈效益。然而,自愈率越大,自愈效益不一定变高,因为自愈效益的大小和用电负荷存在关系。图7(b)和图7(d)表明,从凌晨到3点,自愈效益系数的变化不大,但从3点到6点的变化非常大。发生变化的主要原因是该时段的用电负荷突然变高。在19个月的负荷中,自愈速率越高,自愈效率越低;当用电负荷相差较大的时候,自愈效率和自愈率之间的关系会随着负荷差异发生变化。根据式(12)~(15)计算自愈效益,用式(19)计算电网一天的自愈综合性能,同理计算得到居民区、商业区和工业区的自愈综合性能,结果如图8所示。

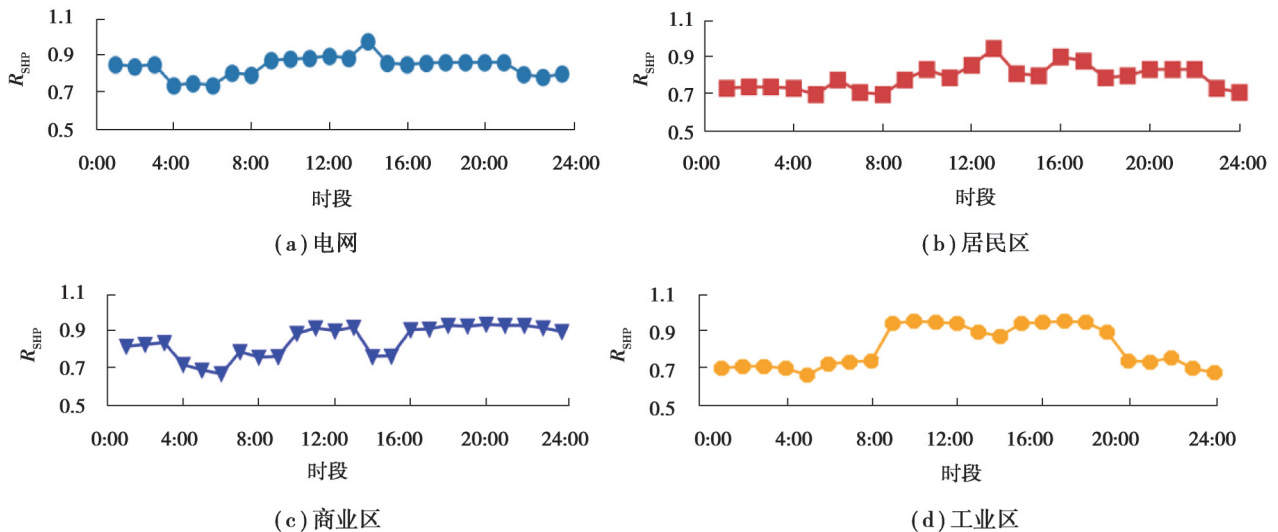


图8 自愈的综合性能比较图

Fig. 8 Comprehensive performance comparison of self-healing

从图 8 可以看出,电网的自愈综合性能在夜间较弱,需要改进。此外,电网商业区的自愈综合性能高于工业区,居民区的自愈综合性能最低。

5 结束语

考虑了自愈过程的不确定性,建立了 4 个指标,即自愈可信度、自愈率、自愈速度和自愈效益,运用自愈综合性能的综合评价方法对智能自愈配电网进行了综合评价。实例表明,在智能配电网中,自愈评估系统可以科学有效地评估电网的性能,为智能配电网故障后的自愈能力评估提供有效参考,并为改善电网的自我愈合性能提供有针对性的指导。

参考文献

- [1] 祁琪,姜齐荣,许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4664-4676.
Qi Q, Jiang Q R, Xu Y P. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664-4676. (in Chinese)
- [2] Le J, Wang C, Zhou W, et al. A novel PLC channel modeling method and channel characteristic analysis of a smart distribution grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 14.
- [3] Zhang B H, Hao Z G, Bo Z Q. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-7.
- [4] 贾冠龙,陈敏,赵斌,等. 柔性多状态开关在智能配电网中的应用[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1760-1768.
Jia G L, Chen M, Zhao B, et al. Application of flexible multi-state switch in intelligent distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1760-1768. (in Chinese)
- [5] 裴宇婷,秦超,余贻鑫. 基于 LightGBM 和 DNN 的智能配电网在线拓扑辨识[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(9): 939-950.
Pei Y T, Qin C, Yu Y X. Online topology identification for smart distribution grids based on LightGBM and deep neural networks[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(9): 939-950. (in Chinese)
- [6] Mirshekali H, Dashti R, Keshavarz A, et al. A novel fault location methodology for smart distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1277-1288.
- [7] Corporation IBM. IBM end-to-end security for smart grids[R]. New York: IBM Corporation, 2009.
- [8] U.S. Department of Energy. Smart grid system report[R]. New York: U.S. Department of Energy, 2009.
- [9] Davis K R, Davis C M, Zonouz S A, et al. A cyber-physical modeling and assessment framework for power grid infrastructures [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2464-2475.
- [10] 赵良. 适应智能电网发展的电网规划评价模型与方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
Zhao L. Research on power grid planning evaluation model and method suited to smart grid development[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016. (in Chinese)
- [11] De Quevedo P M, Contreras J, Mazza A, et al. Reliability assessment of microgrids with local and mobile generation, time-dependent profiles, and intraday reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 61-72.
- [12] 倪敬敏,何光宇,沈沉,等. 美国智能电网评估综述[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 9-13, 66.
Ni J M, He G Y, Shen C, et al. A review of assessment of smart grid in America[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 9-13, 66. (in Chinese)
- [13] 李晖. 电网发展评估方法与模型研究[EB/OL]. (2012-05-31) [2021-10-29]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbname=SNAD&filename=SNAD000001435737>.
Li H. Research on evaluation method and model of power grid development [EB/OL]. (2012-05-31) [2021-10-29]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbname=SNAD&filename=SNAD000001435737>. (in Chinese)
- [14] 李天友,徐丙垠. 智能配电网自愈功能与评价指标[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 105-108.
Li T Y, Xu B Y. Self-healing and its benchmarking of smart distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 105-108. (in Chinese)

- [15] Zhao H R, Li T Y, Fu L W, et al. The research on comprehensive benefits evaluation of smart grid self-healing[C]//2012 China International Conference on Electricity Distribution, September 10-14, 2012, Shanghai, China. IEEE, 2012: 1-12.
- [16] 李振坤, 赵向阳, 朱兰, 等. 智能配电网故障后自愈能力评估[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 789-796.
Li Z K, Zhao X Y, Zhu L, et al. Evaluation of self-healing ability for smart distribution network after failure[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 789-796. (in Chinese)
- [17] 应益强, 付蓉, 黄校娟, 等. 基于不确定性优化理论的电网三级电压控制策略[J]. 电器与能效管理技术, 2019(8): 60-66.
Ying Y Q, Fu R, Huang X J, et al. Three-level voltage control strategy for power grid based on uncertainty optimization theory [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(8): 60-66. (in Chinese)
- [18] Falahati B, Fu Y, Wu L. Reliability assessment of smart grid considering direct cyber-power interdependencies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1515-1524.
- [19] 陈艳波, 谢瀚阳, 王金丽, 等. 基于不确定测度的电力系统抗差状态估计(一)理论基础[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 8-15.
Chen Y, Xie H, Wang J, et al. Uncertain measure based robust state estimation of power system: Part one theoretical principle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1):8-15. (in Chinese)
- [20] Halilčević S S, Gubina F, Gubina A F. The uniform fuzzy index of power system security[J]. European Transactions on Electrical Power, 2010, 20(6): 785-799.
- [21] 陈艳波, 刘洋, 张籍, 等. 基于改进SEC模型的新一代智能变电站设计方案评价[J]. 2017, 41(4): 1308-1314.
Chen Y B, Liu Y, Zhang J, et al. An evaluation method of design scheme for new generation smart substation based on improved SEC[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1308-1314. (in Chinese)
- [22] Wei L, Yuan Z X, Yan Y Y, et al. Evaluation of energy saving and emission reduction effect in thermal power plants based on entropy weight and PROMETHEE method[C]//2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), May 28-30, 2016, Yinchuan, China. IEEE, 2016: 143-146.
- [23] Logenthiran T, Srinivasan D, Shun T Z. Demand side management in smart grid using heuristic optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1244-1252.

(编辑 罗敏)