Research on Power Grid Emergency Repair Management and Control Technology Based on Data Fusion and Intelligent Analysis Algorithm

FENG Wei*, LIU Heng, GAO Hao, ZUO Fang, WU Chong
(State Grid Xiaogan Electric Power Supply Company, Xiaogan Hubei 432000, China)

Abstract: The classification and influencing factors of the emergency repairs of the distribution network under the background of data fusion are analyzed. The system architecture is proposed for data fusion of the optimization strategy, scheduling resources, emergency repair resource allocation, and emergency repair strategy data in the distribution network. Aiming at the multi-fault repairs of the distributed power distribution network, a mathematical model with the goal of minimizing load loss and repairing fault time is established. The failure loss is calculated based on the principle of expected power shortage, and multiple repair teams are considered for different distribution networks, including the repair time of the fault. The intelligent analysis algorithm is used to solve the model, and an improved symbiosis search algorithm based on the cloud model is proposed. Finally, a simulation analysis is carried out using the IEEE33 node model to illustrate the effectiveness of the emergency repair strategy and algorithm.

Key words: data fusion; intelligent algorithm; power distribution emergency repair; management and control analysis
EEACC: 7220; 8140 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.02.033

基于数据融合与智能分析算法的电网抢修管控技术研究

冯 伟*, 刘 恒, 高 皓, 左 方, 伍 冲
(国网孝感供电公司, 湖北 孝感 432000)

摘 要: 首先针对数据融合背景下, 配电网故障抢修的分类以及影响因素进行了分析。针对配电网络中的优化策略、调度资源、抢修资源分配、抢修策略数据等方面的数据融合提出了体系架构。针对含分布式电源配电网多故障抢修建立了以负荷损失最小和抢修故障用时最小为目标的数学模型, 以期望缺电量为原则计算故障损失, 并考虑了多组抢修小队对不同配电网故障的抢修时间。利用智能分析算法求解该模型, 提出了基于云模型的改进共生生物搜索算法。最后利用 IEEE33 节点模型进行了仿真分析, 说明了抢修策略和算法有效性。

关键词: 数据融合; 智能算法; 配电抢修; 管控分析
中图分类号: TM732; TP301.6 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2023)02-0510-06

随着电网规模不断扩大, 电力系统供应的可靠性逐渐提升, 而配电网络节点众多, 发生故障的概率也更高, 直接影响着整体电力系统的可靠性。因此提升配电系统供电可靠性是我国电网面临的主要挑战。配网一旦发生故障, 由于节点负荷较多, 应当进行紧急抢修, 恢复供电网络。目前, 我国主要电力公司都针对配电网抢修、检修等工作积极开展研究, 有效地提升了配电网络抢修效率, 提升了配电网的运行可靠性。针对分布式电源较多的配电网络, 配电故障定位尤其困难, 再加上配电队伍以及抢修策略的原因, 配电网抢修优化仍然值得进一步提升。

目前针对配电网故障抢修主要集中在策略优化、系统建设等方面, 大多从网络结构、设备状态等方面出发, 文献[1]针对配电网灾后动态抢修滚动优化决策方法进行了研究。文献[2]研究了考虑地理特征的配电网震后恢复优化模型与算法。文献[3]研究了全景全息配网抢修指挥系统。文献[4]针对配电网多故障抢修中应急电源车的优化调度进行了研究。文献[5]提出了基于网格化的极端灾后配电网电力-通信协调恢复策略。文献[6]设计了配电网故障主动抢修指挥监控平台。

在配电网数据融合方面, 文献[7]研究了基于信息化平台的配电网工程数字化管理, 其中包含了数据融合体系。文献[8]利用数据融合对配电网实时故障进行分析。文献[9]提出了基于边缘计算的低压配电网多源数据处理与融合技术。文献[10]研究了多源量测数据融合的配电网状态估计。文献[11]提出了一种数据融合驱动的含 IIDG 配电网短路电流计算方法。还有利用数据融合进行线路参数估计[12]、配电数据清理[13]、故障定位[14]、可视化诊

收稿日期: 2021-11-23 **修改日期**: 2022-03-21

断[15]等,可见需要进一步深入研究数据融合在配网故障抢修的应用。

为此,本文结合数据融合与智能分析算法在电网抢修管控中的具体应用,建立了多故障配网抢修模型,通过这类数据融合以及智能分析算法等维度提升故障抢修的效率、配电网的可靠性。在多故障,抢修模型方面,以负荷损失最小和抢修用时最少为目标,考虑配电网拓扑约束、潮流约束、负荷损失限制约束等。利用改进共生生物搜索算法提升求解的效率和收敛性。

1　数据融合背景下的配电网故障抢修

1.1　故障抢修分类

故障抢修与故障的类型有关,在整个配网范围内,故障随时间的变化曲线如图 1 所示。

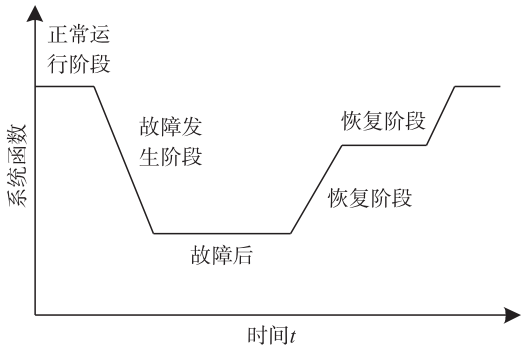

图 1　供电可靠性与时间的曲线

可以看出,在故障发生前后,系统的可靠性变化较为明显。

主要的故障包括:外部环境引起的故障、电网参数引起的故障、负荷类型引起的故障等,具体分类如表 1 所示。

表 1　故障抢修影响因素分类

影响因素分类	具体说明
外部环境	天气、地理位置、基础设施条件
网络结构	电网拓扑、运行方式
负荷结构	负荷水平、负荷阻抗系数
故障类型	故障位置矩阵、故障持续时间、故障抢修队伍数量
故障抢修资源	故障抢修人员及工器具

对于故障抢修,需要考虑故障在电网的位置以及故障的波及范围;事实上,当抢修计划制定时,首先应当对故障点的故障类型以及负荷分类进行判断。在数学建模中,故障点的位置通常需要利用实时配网网损进行计算,同时需要考虑故障抢修恢复的时间。不同的故障抢修计划与抢修资源和抢修时间密切相关。因此,针对抢修安排,需要的参数主要包括:故障点位置;抢修恢复估计时间;抢修小组数量;抢修小组抢修效率系数;高空作业以及正常作业抢修系数。

1.1　故障抢修策略中的数据融合

配电抢修与配电网系统的结构密切相关,配电网在辐射状结构下、新能源不断接入的背景下,线路潮流会发生相应的改变,增加潮流的不确定性,同时也会增加故障的概率,这就加大了抢修的难度。由于配电系统馈线较多,在配电系统发生故障时,首先需要对配网进行故障定位,在抢修过程中还需要合理分配多个抢修队伍、多种抢修资源,因此配电抢修是离散、高维度、并行的非线性优化问题。

配电系统抢修的多元数据融合主要体现在优化、资源调度、资源分配、任务分配和抢修策略等数据方面。故障抢修数据融合架构如图 2 所示。

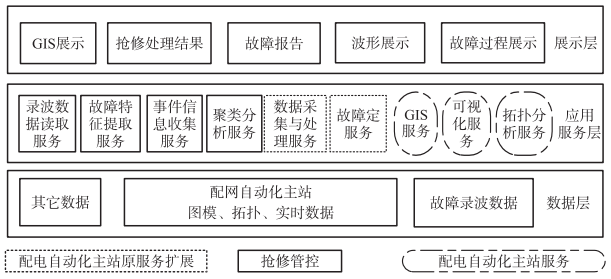

图 2　故障抢修数据融合示意

针对配电网抢修的故障优化,需要利用地理信息系统以及 SCADA 等系统对故障点进行实时定位,从而确定调度抢修的总体方案,在针对故障点抢修时,需要利用相应的系统进行优化、实时监控、故障点筛查,从而将最短路径数据发送至检修小组。现阶段,一般考虑配电网发生单一故障后的最佳抢修,针对多处故障同时出现的情况,目前解决方案尚未得到最佳结果。由于抢修情况与抢修供应的物资紧密相关,因此另一部分数据为引入物资供给时间的保障率,以及物资的调配最优路径。这类数据主要与多资源、多中心的抢修调度模型密切相关,从而在理论上增加了数据的信息量以及数据格式的复杂度。

资源分配方面的数据主要是考虑抢修。前期准备、抢修过程中、以及抢修之后资源的多样化数据。在配电网发生多种故障下,资源分配模式具有较大差别,因此需要在资源分配数据方面与电力系统故障情况进行耦合。同时,在抢修资源方面,除了抢修队伍、应急电源车、灵活物资等,其他数据也是在决策中需要考虑的相关因素。抢修人员、抢修任务、抢修小组的动态分配问题也会产生相应的数据统计结果,因此通过这类复杂的数据形成统一的融合数据为多故障抢修提供相应的策略支撑。

从抢修业务方面,具体的数据还包括时限统计数据、抢修业务量数据、抢修维度数据、抢修态势数据、抢修结果数据等。从抢修管理系统角度来说,系统数据主要包括抢修班组数据、用户负荷数据等。

2 含分布式电源配电网多故障抢修模型

配网抢修策略与故障类型密切相关,针对配电网多发的故障类型,实现最优的抢修管控是最终目标。需要满足配网运行拓扑约束、资源分配约束、电网运行约束等,同时需要考虑配网内多种类型的电源接入。在配网抢修时需要尽量满足供电可靠性要求高的负荷和故障点尽快恢复,并且需要控制总体抢修时间不超期。本文提出的多故障抢修模型需要做出如下假设:

故障发生后需人工抢修;抢修调度中心负责抢修小组的计划安排;配网线路联络开关、隔离开关均正常动作;系统抢修后,一定时间内不会再次发生故障;不考虑抢修过程中的不确定性。

紧急抢修资源可以分为紧急抢修队伍、移动发电车、大型建筑用车、可消耗资源。这些紧急抢修资源针对不同的故障类型均能发挥相应效用,但本文仅考虑紧急抢修队伍。

以总负荷损失最小和故障抢修总时间最小为目标:

$$\min\ f=\alpha f_1(X_\Sigma)+\beta f_2(X_\Sigma) \tag{1}$$

式中:X_Σ 为故障点抢修顺序和配网联络开关操作决策,假设共有 m 处故障,s 个可抢修节点;f_1 为负荷损失;f_2 为抢修时间;α 和 β 为权重。

配网的故障损失可以由期望缺电量(Expected Energy Not Served)计算得到,具体表达式如下:

$$f_1(X_\Sigma)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\in N_i}(T_{1j}+T_{2j})\cdot\sum_{k=1}^{3}\omega_k P_k^{x_j}-\sum_{r=1}^{N_{DG}}T_r\sum_{k=1}^{3}\omega_k P_k^{DG_r} \tag{2}$$

式中:n 为抢修小组数量;N_i 为抢修队伍 i 负责抢修故障点总数;T_{1j}为故障 j 的抢修时间;T_{2j}为故障点 j 的等待时间;ω_k 为负荷等级;P_k 为对应等级负荷的失电量;T_r 为分布式电源供电时间;N_{DG}为分布式电源机组数量。

$$T_{2j}=\begin{cases} T_{t[N_i(0)-N_i(1)]} & j\sim N_i=1 \\ \sum_{p=1}^{(j\sim N_i)-1}\{T_{N_i(p)}+T_{t[N_i(p-1)-N_i(p)]}\}+ & \\ T_{t[N_i((j\sim N_i)-1)-N_i(j\sim N_i)]} & j\sim N_i>1 \end{cases} \tag{3}$$

式中:$j\sim N_i$ 为故障点 j 在矩阵 N_i 中的位置;$N_i(0)$为抢修队伍初始位置;$N_i(p)$为第 p 个故障点;$T_{Ni(p)}$为故障点抢修时间;T_t 为故障点 $N_i(p-1)$到故障点 $N_i(p)$的交通时间

故障点抢修总时间由各自队伍所需抢修节点的最大抢修时间确定。

$$f_2(X_\Sigma)=\max\{T_{s1},T_{s2},\cdots,T_{sn}\} \tag{4}$$

$$T_{si}=\sum_{j\in N_i}\{T_{2j}+T_{t[N_i((j\sim N_i)-1)-N_i(j\sim N_i)]}\} \tag{5}$$

式中:T_{si}为抢修队伍 i 在完成所有抢修任务的时间。

约束条件如下:

①配网辐射状约束

$$\sum_{b_{ij}\in\Omega}y_{b_{ij},t}=N_B-N_{SS}-N_{f,t} \tag{6}$$

式中:$y_{b_{ij},t}$为支路 b_{ij}在 t 时刻的状态,断开为 0,闭合为 1;Ω 为所有支路几何;N_B 为节点数量;N_{SS}为电源点和变电站节点总数量;$N_{f,t}$为 t 时刻故障点数量。

②故障支路约束

$$y_{b_{ij},t}=0(t\in f,t\text{ 且 }b_{ij}\in\Omega_f) \tag{7}$$

③支路潮流约束

$$P_{l,t}\leqslant P_{l\max} \tag{8}$$

$$Q_{l,t}\leqslant Q_{l\max} \tag{9}$$

式中:$P_{l,t}$和 $Q_{l,t}$分别为支路 l 在 t 时刻的有功和无功;$P_{l\max}$和 $Q_{l\max}$分别为支路 l 的有功和无功上限。

④节点电压约束

$$V_{i,\min}\leqslant V_{i,t}\leqslant V_{i,\max} \tag{10}$$

式中:$V_{i,t}$为节点 i 在 t 时刻节点电压幅值;$V_{i,\min}$和 $V_{i,\max}$分别为节点电压最小值和最大值。

⑤故障恢复时间约束

$$T_{2j}^a\leqslant T_{2j\max} \tag{11}$$

式中:T_{2j}^a为实际节点 j 的抢修时间;$T_{2j\max}$为最大允许抢修时间。

⑥一级和二级负荷损失限制约束

$$\rho_k P_{k,f,t}\leqslant P_{k\max} \tag{12}$$

式中:$k\in 1,2$;ρ_k 表示节点 i 中一二级负荷的重要程度;$P_{k,f,t}$为 t 时刻发生 f 故障的损失负荷;$P_{k\max}$为一二级负荷可损失的最大值。

3 智能分析求解算法

3.1 共生生物搜索算法

如前所述,对于这类配网抢修的多目标、非线性、多维度、并行的优化问题,非支配排序遗传算法、强化帕累托进化算法、多目标粒子群算法等一系列智能算法用于最佳策略的求解。

共生生物搜索算法是一种基于生态系统物种多

样性关系的启发式算法,包括共生、共栖、寄生三个过程[16]。

①共生

共生是两种不同生物相互依存的关系,X_i 和 X_j 为两种生物,下一代为 X_{in} 和 X_{jn},表达式为:

$$X_{in}=X_i+R\cdot(X_{best}-M\cdot B_i) \tag{13}$$

$$X_{jn}=X_j+R\cdot(X_{best}-M\cdot B_j) \tag{14}$$

$$M=\frac{X_i+X_j}{2} \tag{15}$$

式中:$R=\mathrm{rand}(0,1)$;B_i 和 B_j 为生物 X_i 和 X_j 的收益水平;M 为共生向量;X_{best} 为解空间的最佳目标函数。

②共栖

在共栖阶段,X_i 和 X_j 相互影响,并且其中一个生物不从另一生物中获益,也不受到另一生物的影响。X_i 可以从 X_j 中获益从而继续生存。X_i 的下一代解为:

$$X_{in}=X_i+\mathrm{rand}(-1,1)\cdot(X_{best}-X_j) \tag{16}$$

③寄生

寄生阶段,两种生物相互影响,一种生物获益,而另一种生物受损,寄生生物 X_{jp} 与另一种生物 X_i 的关系如下式:

$$X_{jp}=2\cdot X_i \tag{17}$$

式中:X_{jp} 为寄生生物,若 X_{jp} 优于 X_j,则 X_j 被取代,反之亦然。相应的目标函数值如下:

$$X_{jn}=\begin{cases}X_j & f(X_j)<f(X_{jp})\\ X_{jp} & f(X_j)>f(X_{jp})\end{cases} \tag{18}$$

3.2　基于云模型的改进 SOS 算法

云模型基于模糊理论和概率统计学,无需先验经验便可完成量与质的转化。云模型中,期望 E_x、熵 E_n 以及超熵 H_e 为主要参数。期望表示最适合空间分布的样本;熵为确定云范围的定量量测值;超熵为熵的不确定度量。如果 H_e 取值很大,则 E_n 的改变量也较大,说明给定目标的实际值与理论值差别较大。即,云模型可表示为 $C(E_x,E_n,H_e)$。云模型中,常见的包括规则云和不规则云。规则云基于正态分布以及高斯成员函数。具体表达式如下:

$$y=\exp\left(\frac{(f_x-E_x)^2}{2(E_n')^2}\right) \tag{19}$$

式中:E_n' 为服从均值 E_n 和方差 H_e 的正态分布随机数。

为说明云模型,考虑空间函数 $f(x)=x_2$,其中 $x\in(-100,100)$。则相应的参数计算式如下:

$$E_n=\left|\frac{f_w-f_b}{2}\right| \tag{20}$$

$$H_e=\frac{E_n}{10} \tag{21}$$

式中:E_n 为目标最优值;E_n 可根据目标函数设置情况取值为 f_{min}、f_{av}、f_{max}。

对于生物共生算法中的共生阶段,新求解的 X_i 以及共生 X_j 取决于算法中的参数 R,因此,R 的取值决定了下一搜索空间的生物个体。即 R 不仅决定着算法的准确度,还决定着算法的收敛速度。因此,可以通过调整 R 提升算法的性能。

为提升算法在探索和开发阶段的性能,调整随机数 R 的方法是根据最优点的生物位置适应度函数。本文利用共生生物算法的适应度函数值确定。利用云模型确定度的高斯函数生成参数 R,具体为:

$$R=\frac{k}{1+\mathrm{e}^{-y}} \tag{22}$$

式中:y 值可由前式确定,k 值不应违背原始共生生物算法的结构,并使得 R 为 0 到 1 之间的随机数。

本文的求解算法如图 3 所示。

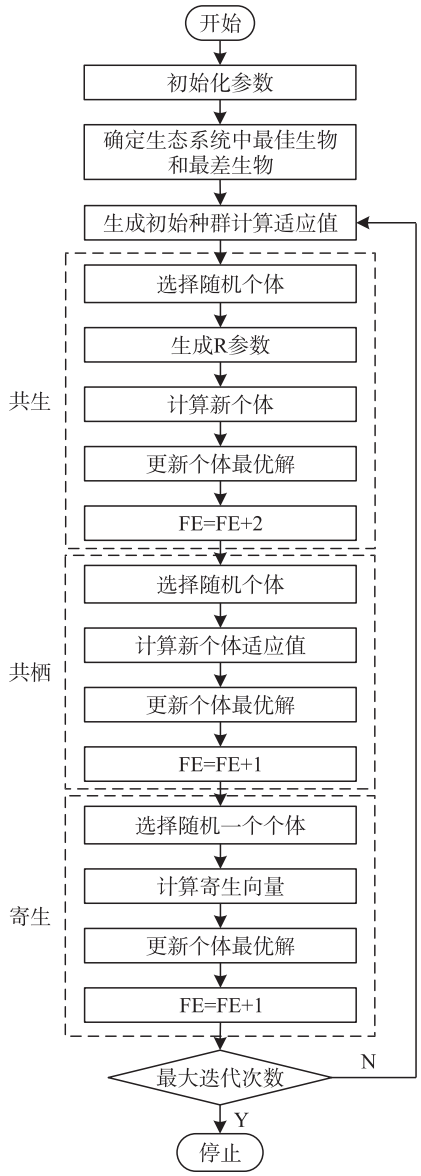

图 3　求解算法流程

利用该算法对本文模型求解的流程如下:①计算各节点故障引起的损失负荷以及抢修时间;②对抢修队伍 a、b、c、d 的抢修范围与故障点的损失负荷、抢修时间进行排序;③计算两支抢修队伍共同完成的抢修节点的损失负荷以及抢修时间;④将上述两步骤循环计算最优排列,选择总目标函数最佳的排序;⑤重复上述步骤,直到所有故障节点被遍历。

本文种群数设为 50,迭代次数为 200,标准差为 0。

4 仿真分析

4.1 系统说明

采用 IEEE33 节点系统进行仿真,系统接线图如图 4 所示,图中给出了 10 个故障点的具体位置,该位置基于 SCADA 系统融合数据计算得到。

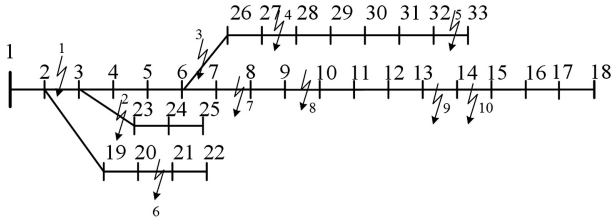

图 4 IEEE33 节点系统

假设该网络共有 4 组抢修队,分别为 A、B、C 和 D。具体抢修时间如表 2 所示。

表 2 故障点抢修时间

故障点	抢修时间	故障点	抢修时间
1	3.5	6	1.8
2	1.5	7	3.0
3	0.8	8	2.9
4	1.2	9	3.2
5	2.6	10	0.9

负荷等级和抢修队伍管辖节点范围如表 3 和表 4所示。

表 3 负荷等级

负荷等级	节点编号
一级负荷	2,4,7,21,23,24,31,32,33
二级负荷	3,5,6,10,11,12,13,14,15,17,18,22,26,27,28,29,30
三级负荷	8,9,16,20,25

表 4 故障抢修队伍节点

抢修队伍编号	故障节点编号
A	1,2,4,5,6
B	1,3,6,8,9
C	2,3,6,9,10
D	5,6,7,9,10
A,C	7
B,C	4
C,D	8

4.2 求解结果

根据本文融合数据方法,需要考虑前期准备、抢修过程中、以及抢修之后资源的多样化数据。根据故障点抢修时间、负荷等级以及故障抢修队伍节点分配,输入配网自动化主站调控数据,形成算法输入的原始融合数据,再根据算法进行求解。

最终得到抢修策略如表 5 所示。

表 5 故障抢修结果

抢修小组	抢修策略	损失负荷/kW	抢修时间/h
A	1→2→6→7	3.215×10^6	17.56
B	3→4		
C	8→9→4→7		
D	5→8		

从表中可以看出,由于 2、4、23、24、25 为一级负荷,抢修 A 队首先对 1 号故障进行抢修,2 号故障点后接有一级负荷 23 节点,因此 2 号故障接着抢修,6 号和 7 号故障点也是根据所接负荷级别进行抢修的。

另外,B 抢修小队首先对重要联络线故障 3 进行抢修,接着对该线路的 4 号故障抢修。

而 C 抢修小队优先完成二级负荷节点的故障抢修,并根据距离下网点的距离进行排序,最后与 A 队共同完成 7 号故障的抢修。

最终,D 小队首先完成 33 节点一级负荷的抢修,然后完成三级负荷节点 8 的抢修。从配网的拓扑结构和负荷等级来看,本文的方法是符合抢修流程的。针对含有多个故障点的配电网络,如果利用人工排序不仅费时,而且可能会产生错误,而利用本文所提的数据融合算法,首先将抢修时间数据、节点负荷等级数据、故障抢修队伍节点数据进行输入,结合算法则可以较便捷求出最终的抢修小组对应的策略。

而根据遗传算法得到结果如表 6 所示。

表 6 遗传算法故障抢修结果

抢修小组	抢修策略	损失负荷/kW	抢修时间/h
A	1→2→6→7	3.325×10^6	25.60
B	3→6→4		
C	8→9→4→7		
D	10→8→9		

可以看出,小组 A 和 C 的抢修策略与上表格求解相同,但是 B 和 D 的抢修策略均有所延长,造成抢修路程长、抢修时间久,因此损失负荷也有所增加。

对于本文所提算法的有效性,与遗传算法和原始 SOS 算法进行对比,算法参数设置相同。得到的迭代收敛曲线如图 5 所示。

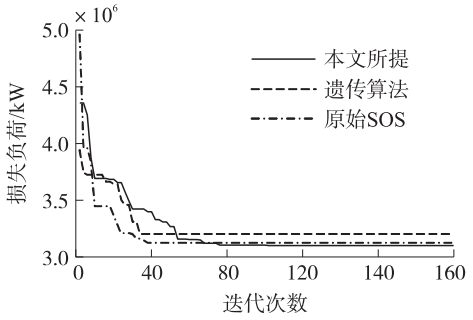

图 5　收敛曲线

从图 5 中可以看出,遗传算法的损失负荷在迭代 38 次之后收敛于 3.32×10^6,原始 SOS 迭代 41 次之后收敛于 3.26×10^6,而本文所提的改进算法迭代次数较长,为 75 次,但是收敛结果更优,为 3.21×10^6,说明本文求解算法在计算过程中能够获得更低的负荷损失,得到更优解。

5　结论

构建电力系统通信网络的态势感知可以满足智能电网以及能源互联网的建设需求,从数据和态势分析方面能够提高通信网络的智能化和可靠性水平,研究运行过程中的态势感知技术和手段,保障电力系统安全稳定运行。本文以电力系统通信网络态势感知为重点,研究了大数据背景下态势感知的主要方法,为电力系统通信网络可靠性和智能化提升提供了参考。

参考文献:

[1]　方健,王红斌,刘育权,等. 配电网灾后动态抢修滚动优化决策方法[J]. 南方电网技术,2021,15(5):122-128.

[2]　李双琳,刘长石. 考虑地理特征的配电网震后恢复优化模型与算法研究[J]. 系统科学与数学,2021,41(4):1024-1042.

[3]　孙善君,侯晓萌,刘巍,等. 全景全息配网抢修指挥系统的研究与实现[J]. 电力勘测设计,2020(S2):171-174.

[4]　卢志刚,高启明,赵号,等. 配电网多故障抢修中应急电源车的优化调度[J]. 太阳能学报,2020,41(10):82-92.

[5]　陈彬,于继来,周霞,等. 基于网格化的极端灾后配电网电力-通信协调恢复策略[J]. 电网技术,2021,45(5):2009-2017.

[6]　任志刚,刘晓,杨明. 配电网故障主动抢修指挥监控平台功能设计[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(12):54-60.

[7]　戚振彪,周远科,凌松,等. 基于信息化平台的配电网工程数字化管理研究[J]. 电工技术,2021(13):156-157,161.

[8]　彭金灿,陈盛开,张晓华,等. 基于高维随机矩阵理论的配电网实时故障分析方法[J]. 吉林电力,2021,49(2):33-38.

[9]　王成亮,官国飞,黄斌,等. 基于边缘计算的低压配电网多源数据处理与融合技术研究[J]. 电子设计工程,2021,29(4):172-176.

[10]　刘喆林,王成山,李鹏,等. 多源量测数据融合的配电网状态估计及应用[J]. 中国电机工程学报,2021,41(8):2605-2615.

[11]　郑翔,王慧芳,姜宽,等. 机理与数据融合驱动的含 IIDG 配电网短路电流计算方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):41-48.

[12]　刘安迪,李妍,谢伟,等. 基于多源数据多时间断面的配电网线路参数估计方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(2):46-54.

[13]　朱有产,梁玮轩,王英姿. 基于时间序列的配电网数据清理和融合方法研究[J]. 电网技术,2021,45(7):2839-2846.

[14]　于力,焦在滨,王晓鹏,等. 基于 PMU 的中压配电网精确故障定位方法及关键技术[J]. 电力系统自动化,2020,44(18):30-38.

[15]　马立红,王海生,宁光涛,等. 基于多源数据融合与分析的配电网可视化诊断系统的构建[J]. 电子技术与软件工程,2020(2):204-207.

[16]　马壮. 基于多目标 SOS 算法的异构无线网络业务接入控制方法研究[D]. 吉林:东北电力大学,2019.

冯　伟(1971—),男,湖北孝感人,本科,副高级工程师,通信作者。主要研究方向:电网调度控制、风险管控及系统运行管理、供电服务指挥工作。