

基于熵权 TOPSIS 和 MAS 的配电网故障动态恢复

郭运城¹, 韦钢¹, 国宗¹, 柯珂²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海浦海求实电力新技术有限公司, 上海 200090)

Dynamic Fault Restoration in Distribution Network Based on Entropy-weight TOPSIS and MAS

GUO Yuncheng¹, WEI Gang¹, GUO Zong¹, KE Ke²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Puhai Qishi Electric Power High Technology Corporation, Shanghai 200090, China)

摘要: 本文提出基于熵权 TOPSIS 的配电网故障分阶段动态恢复方法, 并融入到 MAS(多代理系统)的设计中。通过对相似日的数据挖掘, 预测故障后各时刻的 DG 出力与负荷情况以解决不确定性问题。在满足约束的情况下, 根据 TOPSIS 法对多个可行方案进行优选。执行最优方案后, 对各恢复区域进行合理的可中断负荷的投切, 以充分利用恢复电源或及时切除越限负荷。依据本文故障动态恢复的方法, 设计了含有 BA(bus agent)、SA(state agent) 和 SSA(state subset agent) 三层结构的故障动态恢复多代理系统。最后, 通过典型配电网接线模式对本文设计进行了解析, 表明该设计可行。

关键词: 配电网故障; 熵权 TOPSIS; 多代理系统; 分布式发电; 动态恢复

Abstract: A phased dynamic fault restoration approach based on the entropy-weight TOPSIS for distribution network is given, and it is applied to the design of MAS in this paper. After failure, in order to solve uncertainty problem, DG output and load at each time are forecasted according to the data mining of similar days. In the case of satisfying the constraints, the optimal solution is obtained based on TOPSIS. After applying the optimized strategy, reasonable load shedding in power restoration region can be carried out to make good use of restorable power sources or to cut excessive load in time. In this paper, a three-decker dynamic fault restoration multi-agent system which contains bus agent (BA), state agent (SA) and state subset agent (SSA) is designed. In the end, the feasibility of the design is proved through parsing the typical connection mode of distribution network.

Keywords: distribution network fault; entropy-weight TOP-

SIS; multi-agent system (MAS); DG; dynamic restoration

0 引言

配电网网络结构的复杂性和电力设备的多样性提高了故障发生的概率, 馈线自动化水平不断提高的条件下, 研究有效的故障动态恢复策略以保证用户的连续供电是十分必要的, 同时, 也是一大难点。

近年来, 针对配电网故障恢复的研究大致分为两大类, 静态恢复和动态恢复。静态恢复没有考虑配电网中不确定性参数的动态变化, 如负荷的变化、分布式电源随机出力等, 将配电网视为静态稳定的网络, 故障发生后, 以恒定的输出功率和负荷作为依据, 探讨不同算法在求解质量和求解速度上的优越性, 如遗传算法^[1]、粒子群算法^[2]、BCC 算法^[3]或搜索与寻优分离分阶段算法^[4]等。现代配电网中, 负荷的变化与分布式电源出力的随机性对故障恢复策略均有较大的影响, 动态恢复更具有优越性。动态恢复的研究中, 对分布式电源出力随机性的考虑较为深入, 特别是风力发电^[5]; 对负荷变化的考虑^[6-8]不足。配电网的故障恢复策略是带有预见性的, 是针对故障后的一个时段内满足约束条件的情况下, 使目标函数达到最优的网络重构决策, 所以需要对故障后负荷变化和分布式电源出力进行综合考虑, 以使决策更加合理有效。馈线监测自动化条件下, 负荷数据的采集、开关信息的获取、分布式电源出力的监测等一系列重要数据均能够及时获得, 这为供电恢复策略的制定打下了坚实的基础。由于集中式控制存在一定的风险, 以及智能、灵活的多代理系统(multi-agent system, MAS)^[9-12]不

基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设项目(J51303)

断开发使用,多代理技术也为故障动态恢复提供了有力的技术支持。

结合现代配电网馈线自动化水平不断提高的实际情况,针对以往配电网故障恢复研究中没有综合考虑故障后负荷变化以及分布式电源随机出力给恢复决策带来的影响,本文设计了一种依托馈线数据采集与监测,并综合考虑故障后负荷和分布式电源出力的发展趋势的配电网故障动态恢复策略,该故障恢复理念可以为馈线自动化设计提供参考。

1 故障恢复建模

配电网故障恢复是一个多约束、多目标、非线性的问题,问题的解决过程就是在满足约束条件的情况下,寻求目标函数的最优解的过程,该最优解的物理含义即为配电网故障恢复的最优方案。

1.1 约束条件

故障恢复应满足如下约束条件:

潮流约束、节点电压约束、馈线电流约束、电网辐射状约束以及开关断路器动作次数约束。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m P_{si} - \sum_{j=1}^n P_{rj} \geq 0 \\ U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \\ I \leq I_{\max} \\ g_x \in G \\ S_x \leq S_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为可视为非故障失电区恢复电源的数量; n 为非故障失电区失电负荷单元恢复供电的数目; P_{si} 为第 i 个恢复电源可向非故障失电区输入的功率; P_{rj} 为第 j 个失电负荷单元的负荷量; g_x 为恢复后电网结构; G 为辐射状结构集; S_x 为恢复供电时开关断路器动作次数; $S_{\max}$ 为开关断路器在一定时段内允许动作的次数限额。

1.2 目标函数

本文选取重要负荷全部恢复供电、失电负荷恢复供电量、清洁能源机组出力及主干断路器操作次数 4 个指标为目标函数。

$$\begin{cases} N_{\text{impl}} \in N_{\text{all}} \\ f_1(x) = \max \sum P_{\text{rec}} \\ f_2(x) = \max \sum P_{\text{out}} \\ f_3(x) = \min \sum S_{\text{act}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: N_{impl} 表示非故障失电区失电的重要负荷单

元集合; N_{all} 表示恢复供电的非故障失电区失电负荷单元集合; P_{rec} 表示失电负荷单元恢复供电量; P_{out} 表示清洁能源机组出力; S_{act} 表示主干断路器操作次数。

式(2)中重要负荷全部恢复供电表达式必须满足,失电负荷恢复量、清洁能源机组出力以及主干断路器操作次数表达式是变量,将该 3 个目标函数进行组合,得出综合目标函数:

$$f(x) = \omega_1 f_1(x) + \omega_2 f_2(x) + \omega_3 f_3(x) \quad (3)$$

公式(3)表示的是 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 逻辑加和,并非代数意义上的加和。 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为权重系数,由于本文考虑故障后的动态恢复,所以权重系数是动态值, ω_1 、 ω_2 与 ω_3 会根据每一阶段 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 取值自动进行动态调整。每一阶段中,根据 TOPSIS 法中相对贴近度来优选可行方案。

1.3 随机出力与动态负荷

配电网故障恢复需要对电源出力、网络结构以及负荷特性进行综合考虑,动态恢复就是针对不确定性出力与负荷变动的情况而制定的一系列开关多时段的动作,所以,对不确定性出力与负荷变动准确合理的处理是解决配电网故障动态恢复问题的重要环节。

以清洁能源发电的分布式电源往往具有输出功率不确定性,随着分布式发电的渗透率不断提高,现代配电网供电可靠性得到较大幅度的提升。配电网发生永久性故障后, DG 给配电网的故障恢复带来了一定的效益,但其出力的不确定性也是故障恢复需要考虑的问题,是策略制定时的一大难点。新能源 DG 应根据其输出特性来合理选择是否作为故障恢复的恢复电源,如光伏发电在夜间基本没有输出,不可作为该时段故障恢复的恢复电源。

可通过对分布式电源出力及负荷进行预测的办法解决不确定问题。通过对故障日故障前数据和历史日数据的挖掘来预测故障后各时刻 DG 出力以及负荷情况,选取原始数据的具体时间间隔需根据故障修复时间而定,考虑到负荷开关动作不宜过于频繁以及天气、负荷变化情况,可选取 0.5h 或 1h。

2 动态恢复方法

非故障失电区域存在重要负荷,应首先恢复重要负荷的供电,一般重要负荷为双电源供电,若失电重要负荷下游无 DG,应采用备用电源恢复供电,

若失电重要负荷下游存在 DG, 则运用本文方法决定重要负荷恢复供电的方式。

根据故障修复时间长短将故障时间分成若干阶段, 各阶段进行一次主干断路器的操作, 在该阶段内对恢复电源输出功率与负荷进行实时监测, 搜索满足裕度或越限的可中断负荷(IL), 进行可中断负荷的投切。

可中断负荷按对用户的补偿机制可分为低电价可中断负荷(IL_L)和高补偿可中断负荷(IL_H)。可中断负荷的具体处理原则: 投运时, 优先考虑恢复高补偿可中断负荷; 切除时, 优先考虑切除低电价可中断负荷。

当非故障失电区存在多个恢复电源时, 各阶段恢复电源的选取使得恢复方案可能存在多个可行解, 本文采用 TOPSIS 法^[13-14]对多个可行解进行寻优以确定各时段主干断路器的动作策略, 步骤如下。

以恢复方案可行解作为列, 各目标指标作为行, 形成初始评价矩阵 $A = [a_{ij}]_{m \times n}$, 其中 m 为目标数目, n 为可行方案数目。

由于各目标量纲不同, 采用向量标准化方法进行标准化处理。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n a_{ij}^2}} \quad (4)$$

初始评价矩阵 A 经过标准化后转化为评价矩阵 $B = [b_{ij}]_{m \times n}$, $b_{ij} \in [0, 1]$ 。

采用熵权法进行权重设置, 形成加权决策矩阵。

$$\begin{cases} h_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \\ f_{ij} = b_{ij} / \sum_{j=1}^n b_{ij} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

第 i 个评价指标的权重为

$$\omega_i = \frac{1 - h_i}{n - \sum_{j=1}^n h_j} \quad (6)$$

赋予标准化评价矩阵 B 相应的指标权重, 能够得到加权决策矩阵 $E = [e_{ij}]_{m \times n}$, 其中 $e_{ij} = \omega_i \times b_{ij}$ 。

E 的正、负理想解向量为 $E^+ = (e_1^+, e_2^+, \dots, e_m^+)$, $E^- = (e_1^-, e_2^-, \dots, e_m^-)$, 其中

效益型指标

$$\begin{cases} e_i^+ = \max e_{ij} \\ e_i^- = \min e_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

成本型指标

$$\begin{cases} e_i^+ = \min e_{ij} \\ e_i^- = \max e_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

用二阶范数求取各可行解到正、负理想解的距离, 如公式(9)所示。最后, 根据各可行解与正理想解的贴近度 $C_j = d_j^- / (d_j^+ + d_j^-)$ 来选取最优方案, C_j 越大, 表明方案越优。

$$\begin{cases} d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (e_{ij} - e_i^+)^2} \\ d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (e_{ij} - e_i^-)^2} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

确定某一阶段的最优方案后, 进行主干开关的动作。在恢复区域内, 根据该阶段时间的长短选取间隔为 0.5h 或 1h 进行数据的采集, 计算数据采集时刻该恢复区域的供电裕度。

$$\Delta P = P_G - P_{LD} \quad (10)$$

ΔP 为正, 表明恢复区域内可进行负荷的投运; ΔP 为负, 表明恢复区域内负荷越限, 应切除部分可中断负荷。在数据采集所形成的负荷数据库中, 进行可中断负荷的搜索, 搜索负荷量满足式(11):

$$\begin{cases} |\Delta P| \leq \sum P_{\text{cut}}, & \Delta P < 0, \\ \Delta P \geq \sum P_{\text{int}}, & \Delta P > 0, \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{cut} 表示搜索后切除的负荷; P_{int} 表示搜索后投入的负荷。

同一负荷的投入或切除在同一恢复阶段内仅进行一次, 避免同一负荷在较短时间段内频繁投切, 尽量维持短时内恢复供电的失电负荷不再停电, 即提高供电的连续性。

3 基于 MAS 的故障动态恢复

3.1 基于区域划分的 MAS

配电网是一个复杂树状网络, 正常运行时, 网络为环形结构、开环运行。在发生永久性故障后, 为能够及时获得网络数据及快速制定恢复决策, 需对复杂网络进行区域的划分。分段开关将馈线主干线路隔离成多段, 每段定为一个区域, 即两两分段开关及线路末端分段开关之后各为一个区域^[15]。

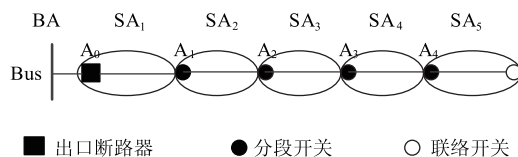


图1 区域划分及代理设置

图1中SA(state agent)代表区域代理,BA(bus agent)代表母线代理。SA覆盖区域为主干上两相邻开关之间区域与该区域上端开关。联络开关的控制同时隶属于与其相连的两个SA。

在每个SA之下包含多个区域子代理SSA(state subset agent):数据采集代理、DG控制代理、全局负荷控制代理、开关控制代理、联络信息代理等。各SSA之间不进行信息的交流,将各自负责部分的状态信息上传到SA;SA接收到上传信息后,进行信息的处理,同一馈线上相邻SA以及通过联络开关相连的两个SA之间进行信息的交流,不同馈线间不相邻的SA保持独立;非故障馈线SA将各区域的负荷数据上传给BA,BA通过分析得出馈线整体的供电能力裕度等信息反馈给通过联络开关与故障馈线相连的SA。联络馈线间MAS

的设计如图2所示。

BA中包含馈线负荷数据接收、数据处理、数据反馈模块。数据处理模块中通过馈线带负荷能力、变压器供电能力及负荷数据得出馈线供电能力裕度预测值。数据反馈模块将与故障线路有联络的馈线的供电能力裕度预测信息传递给该馈线中与故障线路相连的SA。SA中数据处理模块包括负荷预测部分、DG出力预测部分和综合考虑负荷、DG出力及联络线路供电能力裕度三者的决策部分。SSA不具备数据处理的功能,数据采集模块仅能进行实时数据的采集及上传,控制模块则执行来自SA的命令。

3.2 基于MAS的动态恢复流程

结合上节对MAS各层的设计,基于MAS的配电网故障动态恢复的流程如图3所示。

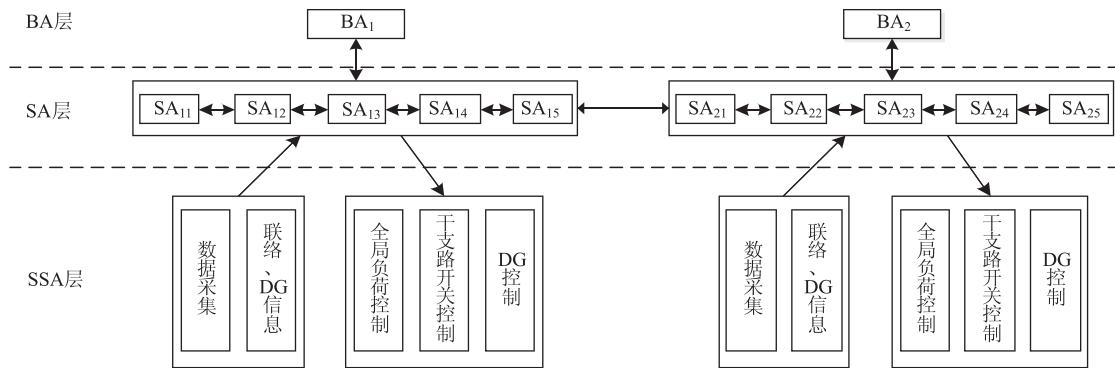


图2 MAS结构模块示意图

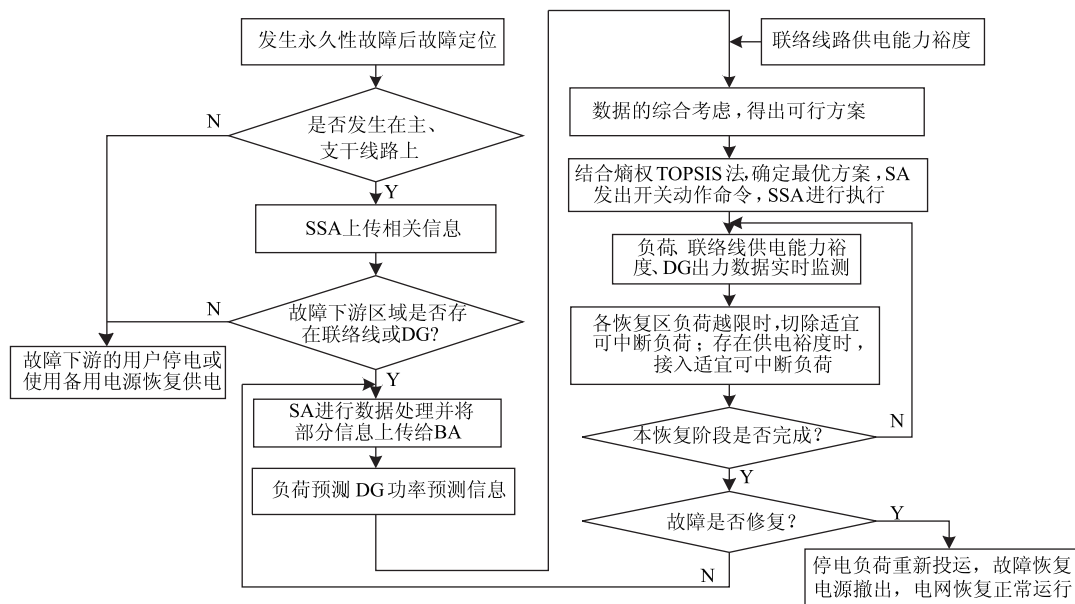


图3 基于MAS的故障动态恢复流程图

4 典型案例分析

4.1 案例系统

本文选取福建省某沿海城市的配电网典型接线模式作为算例系统，如图 4 所示，假定永久性故障发生在 9:00 前某一时刻，故障修复时间为 8h。为方便说明恢复方法的有效性，本文不再进行 DG 输出功率与短期负荷的预测，以该市 8 月 27 日 9:00 至 17:00 各整点时刻实际 3MW 风电机组出力与实际负荷作为算例依据。

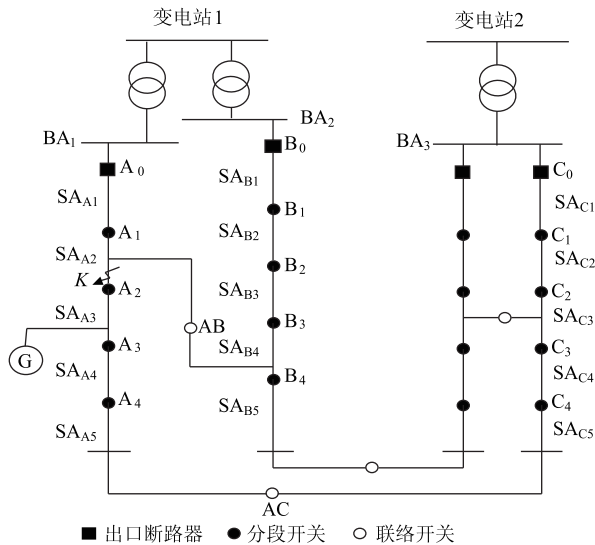


图 4 典型接线方式简化图

4.2 基于 MAS 的恢复过程解析

当 K 处发生故障后，基于 MAS 的恢复步骤如下：

① 故障后，断开 A₂，选取 SA_{A4} 为综合数据处理代理，各相关数据均传送到 SA_{A4} 中进行综合处理。

② 接收到故障信号后，SA_{A3}、SA_{A4} 及 SA_{A5} 所辖区域进行故障前及近几日负荷的整理，SA_{A3} 整理故障前 DG 的出力数据，同时，SA_{A5} 向 SA_{C5} 发出故障信息。

③ SA_{A3}、SA_{A4} 及 SA_{A5} 根据故障前与相似日负荷、DG 出力数据，进行故障后的负荷与 DG 出力预测。SA_{C5} 向 BA₃ 发出计算馈线 C 供电能力裕度的申请；BA₃ 收集变电站出口处采集的馈线 C 的负荷数据，得出馈线 C 的供电能力裕度。

④ SA_{A3} 与 SA_{A5} 将各自分段内负荷预测数据与 DG 出力预测数据传递给 SA_{A4}。馈线 C 供电能力

裕度预测数据经由 BA₃→SA_{C5}→SA_{A5}→SA_{A4}。

⑤ 在 SA_{A4} 内部计算各预测值的均值，存在 3 种恢复可行方案。分别计算 3 种可行方案的 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 值，通过公式(5)与 TOPSIS 法选取最优恢复方案。

⑥ SA_{A4} 根据最优方案，制定分段、联络开关动作及各 SA 所辖分段切除可中断负荷量的策略，如果非故障失电负荷量在最优方案的恢复供电能力范围内，则切除可中断负荷量为 0，并将策略信息传递给 SA_{A3} 与 SA_{A5}。SA_{A3}、SA_{A4} 与 SA_{A5} 根据策略信息，如果切除可中断负荷量不为 0，则在由 SSA 负荷采集所提供的负荷数据集中搜索适宜的可中断负荷，发出相应的开关动作命令，下辖 SSA 进行命令的执行。

⑦ 之后，实时监测，当恢复区负荷越限时，切除适量可中断负荷，存在恢复裕度时，接入适量可中断负荷，时间间隔取 1h。

⑧ 时间到达下一阶段时，返回步骤①，重复①~⑦，直至故障修复，电网重新恢复正常运行。

4.3 算例数据分析

根据馈线 A 各 SA 所辖区域的分段装接容量与线路总装接容量的比例关系，近似得出整点时刻各分段的负荷分配情况。根据馈线参数、负荷量以及去除 3% 的网损，得到馈线 C 在各整点时刻的供电能力裕度。各整点时刻 DG 的出力、馈线 A 非故障停电区域各分段的负荷量以及馈线 C 供电能力裕度见表 1。

表 1 非故障停电区相关数据						MW
时刻	DG 出力	馈线 A			馈线 C 裕度	
		SA _{A3}	SA _{A4}	SA _{A5}		
9:00	0.910	0.845	0.895	0.994	1.633	
10:00	0.851	0.896	0.949	1.054	1.433	
11:00	0.963	0.872	0.923	1.026	1.423	
12:00	1.031	0.896	0.949	1.054	1.583	
13:00	1.177	0.869	0.920	1.022	1.443	
14:00	1.572	0.835	0.884	0.982	1.383	
15:00	1.614	0.859	0.909	1.010	1.223	
16:00	1.631	0.869	0.920	1.022	1.243	
17:00	1.775	0.857	0.907	1.008	1.433	

考虑到恢复电源供电能力与负荷的变动，故

障恢复分为两个阶段进行，第一阶段为 9:00 至 13:00 前，第二阶段为 13:00 至 17:00。计算两阶段各项均值，如表 2 所示。

表 2 恢复阶段数据均值

MW

恢复阶段	SA _{A3}	SA _{A4}	SA _{A5}	馈线 C 裕度	DG 输出
一	0.876	0.927	1.030	1.503	0.986
二	0.858	0.908	1.009	1.345	1.554

以均值作为划定初步方案的依据，第一、二阶段含有相同形式的 3 种待检验是否满足各约束条件的方案。经结合实际参数的潮流仿真分析，各方案分段节点电压均在 -7% 下限之上，馈线电流尚有较大裕度，结合图 4 分析各方案，均满足辐射状网络约束及断路器动作次数约束。综上，该 3 种方案为故障恢复的可行方案，分别如下：

方案 S₁：DG 作为 SA_{A3} 区域的恢复电源，馈线 C 作为 SA_{A5} 区域的恢复电源，断开开关 A₂、A₃、A₄，闭合联络开关 AC。

方案 S₂：DG 作为 SA_{A3} 与 SA_{A4} 区域的恢复电源，馈线 C 作为 SA_{A5} 区域的恢复电源，断开开关 A₂、A₄，闭合联络开关 AC。

方案 S₃：DG 作为 SA_{A3} 区域的恢复电源，馈线 C 作为 SA_{A4} 与 SA_{A5} 区域的恢复电源，断开开关 A₂、A₃，闭合联络开关 AC。

采用 MATLAB 对式(6)~式(11)进行编程，得出各方案的优劣排序，见表 3。

表 3 可行方案指标值及其排序

恢复阶段	可行方案	$f_1(x)/$ MW	$f_2(x)/$ MW	$f_3(x)/$ 次	方案排序
一	S ₁	1.906	0.876	4	3
	S ₂	2.016	0.986	3	2
	S ₃	2.379	0.876	3	1
二	S ₁	1.867	0.858	4	3
	S ₂	2.563	1.554	3	1
	S ₃	2.203	0.858	3	2

由表 3 可以看出，故障恢复的第一阶段，方案 S₃ 为最优方案；恢复的第二阶段，方案 S₂ 为最优方案。第一、二恢复阶段均采用最优方案对主干

开关进行操作，各整点时刻恢复区域需停电的负荷量见表 4。

表 4 整点时刻停电负荷量

MW

整点时刻	馈线 C 恢复区域	DG 恢复区域
9:00	0.256	0
10:00	0.570	0.045
11:00	0.526	0
12:00	0.420	0
13:00	0	0.612
14:00	0	0.147
15:00	0	0.154
16:00	0	0.158
17:00	0	0

表 4 中“0”值表示在此时刻该恢复区域的负荷可全部投运，即负荷全部恢复供电。具体负荷的投运或切除，应结合电网各负荷详细数据和第 2 节提出的可中断负荷投切原则进行。

5 结束语

本文考虑分布式电源出力不确定性与负荷变动的影响，制定了合理的配电网故障多阶段动态恢复策略。熵权 TOPSIS 法可有效地对分段层次的多个可行解进行优选，确定最优恢复区域的划分方案。在各恢复区域中进行实时数据反馈，确保在满足约束条件的情况下充分利用恢复电源，使非故障失电负荷恢复量最大化。本文方法能有效解决配电网故障动态恢复问题，在此基础上，将该思想融入到 MAS(多代理系统)设计中，可为馈线自动化的建设提供参考。

参 考 文 献

- [1] 盛四清, 梁志瑞, 张文勤, 等. 基于遗传算法的地区电网停电恢复 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 53-55.
- [2] 卢志刚, 董玉香. 基于改进二进制粒子群算法的配电网故障恢复 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 39-43.
- [3] 杨丽君, 王伟利, 卢志刚. 基于 RPI 值和多目标二进制 BBC 算法的配电网多故障恢复策略 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 99-102, 108.

- [4] 臧天磊, 钟佳辰, 何正友, 等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复 [J]. 电网技术, 2012, 36(5): 251-257.
- [5] 杨丽君, 卢志刚, 文莹. 含异步风电机组的配电网故障恢复研究 [J]. 电网技术, 2010, 34(2): 133-137.
- [6] Kleinberg Michael R, MIU Karen, Chiang Hsiao-Dong, et al. Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers [J]. IEEE Tran. on Power Systems, 2011, 26(3): 1110-1117.
- [7] 卢志刚, 叶治格, 杨丽君. 基于黑板模型的配电网多故障分时段动态恢复 [J]. 电网技术, 2012, 36(9): 198-202.
- [8] 臧天磊, 何正友, 叶德意, 等. 计及负荷变化的配电网故障恢复区间数灰色关联决策 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 38-43.
- [9] Solank J M, Khushalanis, Schulz N N. A multi-agent solution to distribution system restoration [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2007, 22(3): 1026-1304.
- [10] Bellifemine F, Caire G, Greenwood D. Developing multi-agent systems with JADE [M]. Chichester: Wiley Series in Agent Technology, 2007.
- [11] 杨丽君, 刘建超, 曹良品, 等. 基于黑板模型的配电网故障恢复多代理协作机制设计 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 85-89.
- [12] 李振坤, 陈星莺, 赵波, 等. 配电网动态重构的多代理协调优化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 72-79.
- [13] 胡元潮, 阮江军, 杜志叶, 等. 基于 TOPSIS 法的变电站一次设备智能化评估 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 22-27.
- [14] 崔和瑞, 梁丽华, 王立红. 基于熵权 TOPSIS 分析的配电网可靠性评估指标体系 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 172-175.
- [15] 刘健, 负保记, 崔琪, 等. 一种快速自愈的分布智能馈线自动化系统 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 62-66.
-
- 收稿日期:** 2014-02-05
- 作者简介:**
- 郭运城(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行优化及配电网故障恢复, E-mail: gyc506316@126.com;
- 韦 钢(1958—), 男, 教授, 通信作者, 研究方向为电力系统优化、配电网规划、新能源与分布式发电技术等, E-mail: wg5815@sohu.com.
- (责任编辑: 杨秋霞)