

DOI: 10.7667/PSPC171319

基于隔离信息相似度的配电网故障仿真培训评价方法

张伟

(积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 为解决配电网调度员故障仿真培训自动评价问题, 提出了一种基于隔离信息相似度的配电网故障仿真培训评价方法。该方法通过主动隔离范围集、被动隔离范围集、失电负荷量及负荷数、误操作步骤数等构建隔离信息阵以描述调度员及教练员故障仿真培训处理的信息模型。基于人工智能推理思想, 通过相似度理论描述实时和标准隔离信息阵之间的相似度以实现调度员故障仿真培训的评价。通过主动隔离范围纵向相似度、被动隔离范围纵向相似度、重要指标纵向相似度、防误操作纵向相似度实现实时和标准隔离信息阵单点元素的相似度分析。通过单点元素的相似度及欧几里德距离实现故障馈线的整体横向相似度, 并结合多馈线故障及海明距离实现隔离信息阵综合相似度计算。实例分析表明该方法能较为全面的反映调度员故障隔离及转供操作对配电网运行的影响, 能有效的区分不同隔离操作之间的评价档次, 方法简便, 具有较好的实用价值。

关键词: 配电网; 人工智能; 隔离信息阵; 相似度; 培训评价

A distribution network fault training evaluation method based on isolation information matrix similarity

ZHANG Wei

(Jicheng Electronics Corporation, Jinan 250100, China)

Abstract: In order to solve the problem of automatic evaluation of dispatcher training, a distribution network fault training evaluation method based on isolation information matrix similarity is proposed. The isolation information matrix is constructed through active isolation range set, passive isolation range set, power loss load and load number, which is the information model of dispatcher and trainer fault simulation training. Based on the artificial intelligence reasoning theory, the similarity between the real-time and standard isolation information matrixes is described by similarity theory to realize the evaluation of dispatcher fault simulation training. Through the active isolation range longitudinal similarity, passive isolation range longitudinal similarity and important index longitudinal similarity, the similarity analysis of the single element of real-time and standard isolation information matrix is realized. Through the similarity of single element and Euclidean distance, the fault feeder horizontal similarity is realized, and the isolation information matrix overall similarity is realized by combining multi feeder fault and Hamming distance. The analysis shows that the method can better reflect the influence of dispatcher fault isolation and transfer operation on the distribution network operation, which can effectively distinguish the evaluation grade between different isolation operations and has good practical value.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61403321).

Key words: distribution network; artificial intelligence; isolation information matrix; similarity; training evaluation

0 引言

随着经济的发展, 人们对供电可靠性的需求不断提高。为确保供电质量的安全性、经济性和可靠性, 对配电网调度运行人员的专业水平提出了更高的要求^[1-7]。

调度员培训仿真是调度运行人员日常培训与事故反演的重要手段。目前调度员培训仿真系统主要包括变电站培训仿真系统和电网培训仿真系统。其评分方法主要包括传统加减分法、人工干预评分法、人工智能匹配法等^[8-14]。但是目前对配网培训仿真的研究大多集中在系统仿真上, 对配网调度员仿真培训系统的自动评价研究较少, 文献[9]提出了一种人机结合的变电站仿真智能评价方法, 该方法在容

错情况下有较大改进,但需人工介入修正结果;文献[10]提出了一种基于专家系统和权函数结合的变电站仿真培训评分方法;文献[11-12]提出了一种基于三维场景的配电网培训仿真系统,但皆未对调度员培训评价方法进行描述;文献[13]提出了一种以最大匹配原则为指导的变电站运行培训评估方法;文献[14]提出了一种利用模糊综合评价法对调度员培训情况进行综合评估的二级评估法,上述方法对调度员培训和评价的方法进行了深入研究,取得了很好的理论成果,但这些方法皆未考虑非完全正确操作的可行性评价,也较少考虑防误操作的可行性评价。

同时,相似度理论作为人工智能的一种经典算法已广泛应用于负荷预测、自动控制和数据评价等各个方面^[15],在自动评价方面具有一定的优势。

综上所述,有必要研究一种基于相似度且适合于配电网故障情况下的调度员仿真培训评价方法,能够对调度员隔离及转供非标准操作进行容错处理,并能有效反映调度员培训中的防误操作过程及业务水平,以便更好地指导调度员日常培训与事故反演工作,确保配电网安全、经济、高效、可靠运行。

本文结合配电网故障培训仿真的特点,基于主动隔离范围集和被动隔离范围集建立故障仿真培训模型,提出了一种基于隔离信息相似度的配电网故障仿真培训评价方法。

1 配电网故障仿真培训评价模型建立

配电网调度仿真培训系统包括正常仿真培训和故障仿真培训两种情况。配电网故障虽然发生的频率不高,但其影响重大,虽然馈线自动化系统可自动隔离故障区域,但是故障隔离和恢复作为调度员的基本调度能力,一直是配电网仿真培训的基础和重点。

1.1 主动隔离范围集

配电网故障发生时,变电站出线断路器监测到故障电流,速断保护动作跳闸。同时,故障上游各个馈线终端如 FTU、DTU、故障指示器等上报故障事项,而调度员则需根据电网的运行状态,集合各种运行信息综合判定故障区域,并在仿真培训系统人机界面操作设备隔离故障,同时操作联络开关恢复受故障影响的区域供电。

建立实时主动隔离范围集 RAIS(Real-time Active Isolation Range Set)描述调度员实时操作隔离设备,而形成的主动隔离范围所包含的设备集合,具体为

$$\text{RAIS} = \{ra_1, ra_2, ra_3, \dots, ra_i, \dots, ra_k\} \quad (1)$$

式中: ra_i 为实时主动隔离范围集内包含的设备,包括开关、刀闸、跌落式熔断器、配电变压器; k 为实时主动隔离范围集所含设备数。

当故障发生后,变电站出线断路器跳闸,故障线路全线失电,此时除变电站出线断路器由合闸转为分闸状态外,其他线路开关皆处于合闸状态(不考虑配置就地式馈线自动化)。任何调度员操作分闸的设备构成主动隔离范围的边界集合 BS(Boundary set),并根据隔离设备子孙节点的类型分为两类,第一类子孙节点中包含联络开关,用集合 FS 表示,第二类子孙节点中无联络开关,用集合 SS 表示。具体为

$$\text{BS} = \{bs_1, bs_2, bs_3, \dots, bs_i, \dots, bs_n\} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \text{FS} = \{\text{FA}_1, \text{FA}_2, \dots, \text{FA}_i, \dots, \text{FA}_p\} \\ \text{SS} = \{\text{SB}_1, \text{SB}_2, \dots, \text{SB}_i, \dots, \text{SB}_w\} \end{cases} \quad (3)$$

式中: bs_i 为调度员实时操作的分闸的隔离设备; FA_i 为以 bs_i 为父节点的所有子孙节点形成的集合,并且该子孙节点中含有联络开关; p 为符合第一类情况的隔离设备的数量。此外,集合 FS 中各个元素已按照由父到子的顺序排序,即集合元素 FA_1 是所有 FS 其他集合元素的父节点集合元素。 SB_i 为以 bs_i 为父节点的所有子孙节点形成的集合,并且该子孙节点中无联络开关; w 为符合第二类情况的隔离设备的数量。联络开关属于其所联络的两条馈线,可同时出现在其所联络的两条馈线的子节点中。

由上分析可知,实时主动隔离范围集 RAIS 可进一步描述为集合 FA_i 、 SB_i 和 BS 的运算:

$$\text{RAIS} = (\text{FA}_1 - \sum_{i=2}^p \text{FA}_i) \cup \sum_{i=1}^w \text{SB}_i \cup \text{BS} \quad (4)$$

如此,则实时主动隔离范围集 RAIS 即可由故障发生后调度员操作的分闸设备通过集合运算而定。

建立标准主动隔离范围集 SAIS(Standard Active Isolation Range Set)描述教练员制作的标准隔离范围集合,其是调度员隔离故障所应操作设备的最小主动隔离范围集合。具体为

$$\text{SAIS} = \{sa_1, sa_2, sa_3, \dots, sa_i, \dots, sa_q\} \quad (5)$$

式中: sa_i 为标准主动隔离范围集内包含的设备; q 为标准主动隔离范围集所含设备数。该集合可由教练员手动制定,也可仿照式(2)一式(4)自动设定。

如此,调度员故障隔离培训的目的即是使调度员主动隔离操作形成的范围集合 RAIS 尽可能的接近教练员设定的标准主动隔离范围集合 SAIS。

1.2 被动隔离范围集

当故障被隔离后，调度员需要操作变电站出线开关合闸将故障区域上游负荷恢复供电，操作联络开关恢复故障区域下游负荷供电。但如果隔离范围有误，将会导致变电站出线开关重新跳闸或导致联络开关相连的对端馈线全线失电，从而进一步扩大故障范围。这部分由于错误隔离导致馈线再次失电，相较主动隔离范围而扩大的停电范围称为被动隔离范围。

建立实时被动隔离范围集 RPIS(Real-time Passive Isolation Range Set)描述调度员在转供操作过程中导致馈线再次失电形成的被动隔离范围所含的设备集合，具体为

$$RPIS = \{rp_1, rp_2, rp_3, \dots, rp_i, \dots, rp_z\} \quad (6)$$

式中： rp_i 为实时被动隔离范围集内包含的设备，包括开关、刀闸、跌落式熔断器、配电变压器； z 为实时被动隔离范围集所含设备数。

被动隔离范围是由于实时主动隔离范围集 RAIS 与标准主动隔离范围集 SAIS 不一致导致的，故此 RAIS 与 SAIS 的关系将有 8 种情况，分别为：上游相离、上游相交、上游相含、相同、下游相含、下游相交、下游相离、分支相离。如图 1 所示，其中 A~N 为分段开关，O 为联络开关，S1、S2 为变电站出线开关，故障发生在分段开关 E、F 之间的区域。实线环 0 为标准主动隔离范围，虚线环 1~8 为 8 种实时主动隔离范围。

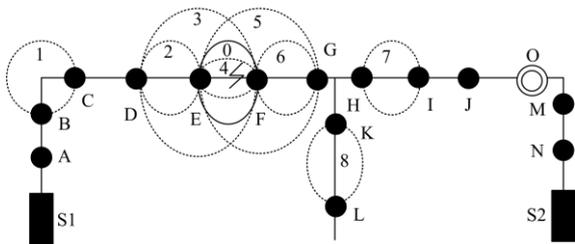


图 1 RAIS 与 SAIS 的关系图

Fig. 1 Relationship between RAIS and SAIS

所谓上游相离是指实际主动隔离范围集 RAIS 处于标准主动隔离范围集 SAIS 的主路径(电源点与联络开关之间的路径)上游，而两个范围集却无交集，如图环 1 与环 0 的关系所示。此种隔离情况将能有效恢复故障点上游部分区域供电，而故障点下游区域因未能有效隔离，恢复供电将导致对端联络馈线失电，产生被动隔离范围。下游相离与之类似，如图环 7 与环 0 关系所示，恢复供电时将会导致变电站出线开关再次跳闸，产生被动隔离范围。

所谓上游相交是指实际主动隔离范围集 RAIS 处于标准主动隔离范围集 SAIS 的主路径上游，而两个范围集有交集，如图环 2 与环 0 的关系所示。此种隔离情况导致的结果与上游相离相同。下游相交与之类似，如图环 6 与环 0 关系所示，不再赘述。

所谓上游相含是指实际主动隔离范围集 RAIS 包含标准主动隔离范围集 SAIS，如图环 3 与环 0 关系所示。此种隔离情况将能有效恢复受故障影响的上下游部分区域供电，而不产生被动隔离范围。下游相含与之类似，如图环 5 与环 0 所示，不再赘述。

所谓相同是指实际主动隔离范围集 RAIS 与标准主动隔离范围集 SAIS 完全相同，如图环 4 与环 0 关系所示。此种隔离情况将能恢复受故障影响的上下游全部区域供电，而不产生被动隔离范围。

所谓分支相离是指实际主动隔离范围集 RAIS 处于标准主动隔离范围集 SAIS 的分支路径(主路径之外的路径)上，如图环 8 与环 0 的关系所示。此种隔离情况将导致受故障影响的上下游区域皆不能恢复供电，产生被动隔离范围。

综上分析可知，下游相离和下游相交将会导致故障点上游产生被动隔离范围，具体描述为

$$RPIS = FFS - FA_1 \quad (7)$$

式中：FFS(Fault Feeder Equipment Set)是故障馈线的设备集合。若故障馈线是辐射状馈线，无联络开关，则 FA_1 为空集，RPIS 与 FFS 相同。

上游相离和上游相交将会导致故障点下游产生被动隔离范围，具体描述为

$$RPIS = FA_1 - RAIS + LFS \quad (8)$$

式中，LFS(Link Feeder Equipment Eet)是失电联络馈线设备集合。若故障馈线是辐射状馈线，无联络开关，则 FA_1 、LFS 为空集，RPIS 与 RAIS 相同。

分支相离将导致故障点上下游皆产生被动隔离范围，具体描述为

$$RPIS = FFS + LFS - RAIS \quad (9)$$

此种情况下故障线路及其联络馈线将全部失电。

根据上述分析，图 1 所示的各种情况下的被动隔离范围集如表 1 所示。

表 1 实时被动隔离范围表

Table 1 Real-time passive isolation range table								
关系	上游相离	上游相交	上游相含	下游相同	下游相含	下游相交	下游相离	分支相离
范围	环 1	环 2	环 3	环 4	环 5	环 6	环 7	环 8
RAIS	B,C	D,E	D,E,F	E,F	E,F,G	F,G	H,I	K,L
SAIS	E,F	E,F						
RPIS	D-O,S2	F-O,S2	ϕ	ϕ	ϕ	A-E,S1	A-G,K,L,S1A-J,N-O,S1,S2	

1.3 防误操作规则集

调度员在进行设备操作的过程中需严格遵守防误操作规程，错误的操作顺序和操作方法轻则导致设备重过载，减少设备使用寿命，重则导致弧光短路、线路跳闸严重危及人身安全。

建立防误闭锁操作规则表 ALRT(Anti-misoperation Locking Rules Table)记录禁止调度员操作的规则，具体为

$$ALRT = [al_1, al_2, ar_3, al_4, al_5, al_6, al_7, al_8] \quad (10)$$

式中： al_1 为带负荷拉合隔离开关； al_2 为带电合闸接地开关； al_3 为电流越过负荷限值； al_4 为电压越切负荷限值； al_5 为挂检修牌送电； al_6 为挂保电牌停电； al_7 为挂接地牌送电； al_8 为长时间合环运行。

1.4 仿真培训评价模型

评价调度员故障处理水平的关键量除主动隔离范围和被动隔离范围外，其故障处理中对普通用户、重要用户的影响，对供电公司售电量的影响，防误操作正确性等皆可作为评价调度员调度水平的依据。

建立实时隔离信息阵 RIIM(Real-time Isolation Information Matrix)综合描述调度员故障处理的相关结果信息，具体为

$$RIIM = \begin{bmatrix} RI_{11} & RI_{12} & RI_{13} & RI_{14} & RI_{15} & RI_{16} \\ RI_{21} & RI_{22} & RI_{23} & RI_{24} & RI_{25} & RI_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ RI_{n1} & RI_{n2} & RI_{n3} & RI_{n4} & RI_{n5} & RI_{n6} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中：每一行为一条馈线的故障处理信息， n 为故障馈线数，每一条馈线可同时包含多个故障；第 1 列为实际主动隔离范围集 RAIS；第 2 列为实时被动隔离范围集 RPIS；第 3 列为失电普通负荷数；第 4 列为失电重要负荷数；第 5 列为故障损失负荷量；第 6 列为违反防误操作规则的步骤数。失电负荷数包括中压用户数和低压用户数，损失负荷量指实时损失电流流量，不考虑时间持续引起的电量损失。

同理，建立 $n \times 6$ 标准隔离信息阵 SIIM(Standard Isolation Information Matrix)综合描述教练员制作的标准故障处理相关信息，其中第 1 列为标准主动隔离范围集 SAIS，其他各行列定义与 RIIM 完全相同，因被动隔离范围是由隔离错误产生的，故此 SIIM 的第 2 列全部为空集。标准操作不会产生防误误操作，故此第 6 列全部为 0。实时隔离信息阵 RIIM 和标准隔离信息阵 SIIM 即是配电网故障仿真培训评价的最终模型。

2 基于隔离信息相似度的故障仿真培训评价方法

故障仿真培训评价是一个与人的主观意识联系较为紧密的问题，如若实现故障仿真培训的自动评价，依靠人工智能模拟人的主观推理能力是解决问题的方法之一^[15]。通过上述分析，调度员故障仿真培训评价问题可转换为实时隔离信息阵 RIIM 与标准隔离信息阵 SIIM 的模糊匹配问题。

2.1 主动隔离范围纵向相似度

实时主动隔离范围集 RAIS 与标准主动隔离范围集 SAIS 作为信息阵 RIIM 与 SIIM 的首列元素，其纵向单点之间的模糊匹配程度可由主动隔离范围纵向相似度 AILS(Active Isolation Range Longitudinal Similarity)表述。

对于上游相含、相同、下游相含三种无被动隔离范围的情况，其主动隔离范围纵向相似度 AILS 描述为

$$AILS = \text{card}(\text{SAIS}) / \text{card}(\text{RAIS}) \quad (12)$$

式中： $\text{card}(X)$ 表示集合 X 的元素个数；集合 SAIS 为非空集合。

对于上游相离、上游相交两种导致故障点下游产生被动隔离范围的情况，因故障点上游成功隔离，可实现故障点上游部分区域供电，故此可由故障馈线可恢复供电范围描述其主动隔离范围纵向相似度 AILS 为

$$AILS = \text{card}(\text{FFS} - \text{FA}_1) / \text{card}(\text{FFS} - \text{SAIS}) \quad (13)$$

对于下游相离、下游相交两种导致故障点上游产生被动隔离范围的情况，因故障点下游被成功隔离，可通过联络开关实现故障点下游部分区域供电，故此可由故障馈线可恢复供电范围描述其主动隔离范围纵向相似度 AILS 为

$$AILS = \frac{\text{card}(\text{FFS} - \text{RAIS} - \text{RPIS})}{\text{card}(\text{FFS} - \text{SAIS})} \quad (14)$$

对于分支相离导致故障点上下游皆产生被动隔离范围的情况，因其不但未能实现故障馈线恢复供电，且导致对侧馈线全线失电，故此其主动隔离范围纵向相似度 AILS 规定为 0。根据上述分析，AILS 的取值范围为[0, 1]，其值越大，表示 RAIS 与 SAIS 越相似，调度员操作越正确，评价越高。

2.2 被动隔离范围纵向相似度

实时隔离信息阵 RIIM 中的第 2 列为实时被动隔离范围集 RPIS，其与标准隔离信息阵 SIIM 第 2 列的纵向单点模糊匹配程度可由被动隔离范围纵向相似度 PILS(Passive Isolation Range Longitudinal Similarity)表述。

对于上游相含、相同、下游相含三种无被动隔离范围的情况,实时隔离信息阵 RIIM 亦为空集,故此其被动隔离范围纵向相似度 PILS 为 1。

对于上游相离、上游相交、下游相离、下游相交四种导致故障点下游或故障点上游产生被动隔离范围的情况,因被动隔离范围集包括了标准主动隔离范围集和故障扩大的隔离范围集两部分,故此其被动隔离范围纵向相似度 PILS 描述为

$$\text{PILS} = e^{-\text{card}(RPIS - SAIS)} \quad (15)$$

其表示由于错误隔离导致的故障停电范围越大,其被动隔离范围纵向相似度 PILS 越小。

对于分支相离导致故障点上下游皆产生被动隔离范围的情况,规定其被动隔离范围纵向相似度 PILS 为 0。根据上述分析, PILS 的取值范围为[0,1],其值越小,表示调度员误操作导致的故障停电范围越大,评价越低。

2.3 重要指标纵向相似度

失电负荷数和失电负荷量是衡量调度员调度水平的两个重要指标,其中普通用户失电对整个配电网运行的影响相对重要用户较小,可以用最大最小相似度法和指数相似度法综合描述信息阵 RIIM 与 SIIM 的第 3 列元素的单点纵向相似度 $r(RI_{i3}, SI_{i3})$, 具体为

$$r(RI_{i3}, SI_{i3}) = \begin{cases} \frac{\min(RI_{i3}, SI_{i3})}{\max(RI_{i3}, SI_{i3})} & RI_{i3} \neq 0 \text{ and } SI_{i3} \neq 0 \\ e^{-\max(RI_{i3}, SI_{i3})} & RI_{i3} = 0 \text{ or } SI_{i3} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $i=0, 1, \dots, n$, 为故障馈线号,即 RIIM 与 SIIM 行号; SI_{i3} 为 SIIM 第 i 行 3 列元素。

重要用户包括保电用户、敏感用户、生命线用户、政府公共事业用户等,其虽然数量不多但失电的影响却巨大,故此运用指数相似度法描述信息阵 RIIM 与 SIIM 的第 4 列元素的单点纵向相似度 $r(RI_{i4}, SI_{i4})$, 具体为

$$r(RI_{i4}, SI_{i4}) = e^{-|RI_{i4} - SI_{i4}|} \quad (17)$$

损失电量不但包括主动隔离损失的电量,还包括被动隔离产生的电量损失,其与供电公司的经济利益直接相关,故此运用算数平均最小相似度法和指数相似度法综合描述信息阵 RIIM 与 SIIM 的第 5 列元素的单点纵向相似度 $r(RI_{i5}, SI_{i5})$, 具体为

$$r(RI_{i5}, SI_{i5}) = \begin{cases} \frac{\min(RI_{i5}, SI_{i5})}{1/2 \times (RI_{i5} + SI_{i5})} & RI_{i5} \neq 0 \text{ and } SI_{i5} \neq 0 \\ e^{-\max(RI_{i5}, SI_{i5})} & RI_{i5} = 0 \text{ or } SI_{i5} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中, SI_{i4} 、 SI_{i5} 为 SIIM 第 i 行 4、5 列元素。对于分支相离的情况,规定其重要指标相似度为 0。

2.4 防误操作纵向相似度

调度员在日常调度规程中必须严格按照调度防误操作规程进行设备操作,包括制定调度指令票和下发遥控命令等,错误的操作顺序轻则导致设备跳闸,重则导致设备损坏、大面积停电及危及人身安全,故此防止误操作一直是调度员培训的重点,运用指数相似度法描述信息阵 RIIM 与 SIIM 的第 6 列元素的单点纵向相似度 $r(RI_{i6}, SI_{i6})$, 具体为

$$r(RI_{i6}, SI_{i6}) = e^{-RI_{i6}} \quad (19)$$

对于分支相离的情况,规定其防误操作纵向相似度为 0。

2.5 隔离信息阵综合相似度

根据上述纵向相似度分析方法可得到隔离信息阵 RIIM 与 SIIM 的每个元素的相似度,称为实时节点相似度矩阵 RNSM(Real-time Node Similarity Matrix),其也是一个 $n \times 6$ 矩阵。

如果调度员完全操作正确,则隔离信息阵 RIIM 与 SIIM 应完全一样,则标准节点相似度矩阵 SNSM(Standard Node Similarity Matrix)应为全 1 矩阵。节点相似度矩阵 RNSM 与 SNSM 每条故障馈线的整体横向相似度 FFHS(Fault Feeder Horizontal Similarity)可用欧几里德距离表示^[15], 具体为

$$\text{FFHS}_i = 1 - \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{\sum_{j=1}^6 (1 - m_{ij})^2} \quad (20)$$

式中: $i=0, 1, \dots, n$, 为故障馈线号; m_{ij} 为矩阵 RNSM 第 i 行 j 列元素。根据上述方法可得到矩阵 RNSM 与 SNSM 中每行元素的综合相似度,其构成一个 $n \times 1$ 的列矩阵,称为故障馈线相似度矩阵 FFSM(Fault Feeder Similarity Matrix),同理可用单位列阵与矩阵 FFSSM 之间的海明距离表述隔离信息阵 RIIM 与 SIIM 的总体相似度 IIMS(Isolation Information Matrix Overall Similarity), 具体为

$$\text{IIMS} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - \text{FFHS}_i) \quad (21)$$

由以上分析可知,隔离信息阵综合相似度 IIMS 取值范围为[0,1],其值越大表示隔离信息阵 RIIM 与 SIIM 越相似,调度员故障处理越准确,调度操作水平越高。可将 FFHS 与 IIMS 的值域扩大到 [0, 100]以百分制描述配网故障仿真培训的每条故障馈线评分与综合评分。

3 实例

如图 2 所示配电网络, F1-F8 表示 8 条馈线,

S1-S8 为 8 条馈线的电源出线开关, 11-86 实心圆点为合闸分段开关, 151-562 空心圆点为分闸联络开关, $x_1/x_2/x_3$ 分别表示最小配电区域内所含的普通负荷数/重要负荷数/区域负荷总量(A)。设 Fault1、Fault2、Fault3、Fault4、Fault5 发生故障, 圆环为实时主动隔离范围。

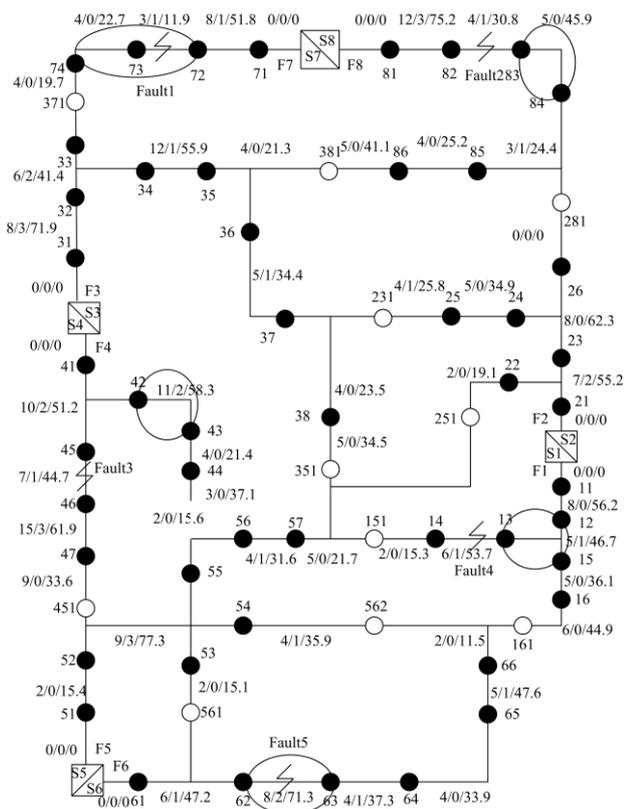


图 2 典型配电网网络图

Fig. 2 Typical distribution network diagram

则调度员故障仿真培训评价如表 2 所示。

表 2 故障仿真培训评价

Table 2 Fault simulation training evaluation

故障	AILS	PILS	$r(RI_{i3}, SI_{i3})$	$r(RI_{i4}, SI_{i4})$
Fault1	0.667	1	0.429	1
Fault2	0.571	0.049	0.191	0.049
Fault3	0	0	0	0
Fault4	0.286	0	0.154	0.049
Fault5	1	1	1	1
故障	$r(RI_{i5}, SI_{i5})$	$r(RI_{i6}, SI_{i6})$	FFHS	
Fault1	0.512	1	0.664	
Fault2	0.337	1	0.283	
Fault3	0	0	0	
Fault4	0.001	1	0.171	
Fault5	1	1	1	

由表 2 可知, 故障 Fault3 的 RAIS 与 SAIS 分支相离, 故此其评价结果 FFHS 为 0; 故障 Fault5 的 RAIS 与 SAIS 相同, 故此其评价结果 FFHS 为 1; 故障 Fault3 和 Fault4 可导致被动隔离范围, 故此其评价结果 FFHS 较低; 故障 Fault1 的 RAIS 与 SAIS 下游相含, 操作是基本可行的, 故此其评价结果 FFHS 为 0.664, 根据式(21)其隔离信息阵综合相似度 IIMS 为 0.424, 运用百分制评分, 可取为 42.4 分。

4 结论

配电网调度员故障隔离范围不但包括主动隔离范围还包括被动隔离范围, 调度员仿真培训评价可通过实时隔离信息阵 RIIM 和标准隔离信息阵 SIIM 之间的相似度实现, 通过主动隔离范围纵向相似度、被动隔离范围纵向相似度、重要指标纵向相似度及防误操作纵向相似度实现实时和标准隔离信息阵单点元素的相似度分析。可基于单点元素的相似度及欧几里德距离实现故障馈线的整体横向相似度, 并结合多馈线故障及海明距离实现隔离信息阵综合相似度计算。

基于隔离信息相似度的配电网故障仿真培训评价方法在反映调度员故障隔离和转供操作方面具有较好的适应性, 且可较为有效地区分不同仿真操作之间的评价档次, 具有较好的实用价值。

参考文献

[1] 郑国华, 黄朵, 张伟, 等. 基于最大概率的故障指示器故障判定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 105-110.

ZHENG Guohua, HUANG Duo, ZHANG Wei, et al. A method for fault diagnosis of fault indicator based on maximum probability[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 105-110.

[2] 刘亚丽, 周昀, 王少荣. 配电网继电保护一二次联合数字仿真系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 124-129.

LIU Yali, ZHOU Yun, WANG Shaorong. Research on the primary and secondary combined digital simulation system of distribution network relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 124-129.

[3] 张伟, 吕睿博, 阎有朋. 基于不平衡电容注入的配电网小电流接地故障定位方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 66-71.

ZHANG Wei, LÜ Ruibo, YAN Youpeng. Small current earth fault location method for distribution network based on unbalanced capacitance injection[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 66-71.

[4] 冷华, 童莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.
LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive evaluation method research of the operation state in distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 53-59.

[5] 张伟. 基于轨迹阵的配电网故障仿真培训评价方法[J]. 广东电力, 2018, 31(1): 113-118.
ZHANG Wei. Scoring method for power distribution network fault simulation training based on track matrix[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1): 113-118.

[6] 黄纯, 刘鹏辉, 江亚群, 等. 基于动态时间弯曲距离的主动配电网馈线差动保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 240-247.
HUANG Chun, LIU Penghui, JIANG Yaqun, et al. Feeder differential protection based on dynamic time warping distance in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 240-247.

[7] 葛少云, 季时宇, 刘洪, 等. 基于多层次协同分析的高中压配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 172-181.
GE Shaoyun, JI Shiyu, LIU Hong, et al. Reliability assessment of high-medium voltage level distribution networks based on cooperative analysis of multi-level networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 172-181.

[8] 赵星涛. 仿真机培训成绩自动评定系统的改进[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 74-75.
ZHAO Xingtao. Improvement of automatic scoring of the power plant simulator training[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 74-75.

[9] 李薛剑, 刘锋. 变电站仿真系统中的智能评价系统设计[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(1): 126-129.
LI Xuejian, LIU Feng. Design of intelligent evaluation system in substation simulation system[J]. Computer Technology and Development, 2014, 24(1): 126-129.

[10] 张帆, 金红核, 袁成, 等. 变电站仿真培训的智能评估系统[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(4): 98-102.
ZHANG Fan, JIN Honghe, YUAN Cheng, et al. Intelligent evaluation system for substation simulation training[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(4): 98-102.

[11] 乔卉, 龚庆武, 江传文. 采用体验性游戏模型的配电网运行仿真培训系统设计[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 230-236.
QIAO Hui, GONG Qingwu, JIANG Chuanwen. Design of experiential gaming model-based simulation training system for distribution network operation[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 230-236.

[12] 李刚, 田冬梅. 配电网三维仿真培训系统研究[J]. 广东电力, 2008, 21(3): 28-31.
LI Gang, TIAN Dongmei. Research on three-dimensional training simulator of distribution system[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(3): 28-31.

[13] 何桦, 顾全, 夏可青. 基于最大匹配原则的变电运行培训仿真评估新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 59-62.
HE Hua, GU Quan, XIA Keqing. A new evaluation method for substation training simulator based on maximal matching principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 59-62.

[14] 常鲜戎, 邢金峰, 张洁. 基于多级模糊综合评价法的电网调度员培训评估[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 30-34.
CHANG Xianrong, XING Jinfeng, ZHANG Jie. Dispatcher training evaluation based on multi-grade fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 30-34.

[15] 王永庆. 人工智能原理与方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2015.

收稿日期: 2017-09-04; 修回日期: 2017-11-12

作者简介:

张伟(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网调度自动化。E-mail: zhangweiieslab@163.com

(编辑 张爱琴)