

基于K折验证的配电网故障转供可靠性 评估研究

郭登科¹,米文涛¹,庄飞虎¹,徐毅端²,范瑞妮²

(1.国网昌吉供电公司 变电检修中心,新疆 昌吉 831100;

2.宝鸡市韦思特电气有限公司,陕西 宝鸡 721006)

摘要:针对现阶段配网故障后快速、合理地拟定负荷转供措施的要求,介绍了一种基于K折验证的配网故障转供可靠性评估方案。根据配网多种供电方式,按照停电前后的能量平衡方程建立负荷转供效果评估指标。以损失功率最小为前提,考虑在运设备的运行状态、自身特性和外部环境等多因素,构建基于多种因素的故障转供评估模型的等式和不等式约束条件。采用基于K折验证数据处理方法,对历史数据进行充分的预前训练,完成配网转供关键约束参数的拟合,便于与后续可能出现的故障信息相比对,可最大限度地减少转供计划的准备时间。调度人员可根据比对结果拟定稳妥的转供措施,并对应选取转供路径。对实际运行方式的安排和检修计划的调整有一定的参考价值。

关键词:配网;负荷转供;K折验证;可靠性评估;设备健康指数

中图分类号:TM933 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22737

Research on Reliability Evaluation of Distribution Network Fault Transfer Based on K-fold Verification

GUO Dengke¹,MI Wentao¹,ZHUANG Feihu¹,XU Yiduan²,FAN Ruini²

(1.Substation Maintenance Department, State Grid Changji Power Supply Company, Changji 831100,

Xinjiang, China; 2.Weist Electric Co., Ltd., Baoji 721006, Shaanxi, China)

Abstract: According to the requirements of quickly and reasonably formulating load transfer measures after distribution network failure at this stage, a reliability evaluation scheme for fault transfer based on K-fold verification was introduced. Square up various power supply modes, according to the energy balance equation, the load transfer effect evaluation index was established. Taking the minimum power loss as primise, considering the multiple factors such as operating status, characteristics and the external environment, the equality and inequality constraint conditions of the distribution network fault transfer evaluation model were constructed. The K-fold verification data processing method was adopted to fully pre train the historical data and complete the fitting of key constraint parameters of distribution network transfer, which is convenient to compare with the subsequent possible fault information, and can minimize the preparation time of transfer plan. The dispatcher can draw up reliable transfer measures according to the comparison results and select the transfer path accordingly. It has certain reference value for the arrangement of the actual operation mode and the adjustment.

Key words: distribution network; load transfer; K-fold verification; reliability evaluation; equipment health index

目前,配网可友好地接纳大量分布式电源、储能、电动汽车等新型电能设备^[1-3],在满足现阶段电力需求的条件下,如何利用高度融合的信息物理技术,面对低碳能源利用和绿色电力发展的双重压力,提取运行指标的特征参数^[4-5],并采用

合理的方法进行配网的可靠性评估,完成对其运行环境的态势感知,成为了当下业界关注的重点问题之一^[6]。

文献[7]考虑用电可靠性的提升需求,通过细化对应的指标体系,并在此基础上采用了基于综

基金项目:国家自然科学基金智能电网联合基金项目(U1766211)

作者简介:郭登科(1980—),男,硕士,高级工程师,Email:guodenke202010@163.com

合改进熵权法和层次分析法的变权重估值模型,在适合有多种特性运能设备接入并伴随可能的孤岛运行时,分析智能配网可靠性的各项指标;文献[8]根据多个分布式电源的不同安装地点和网架结构特征,按照实际电网的主体结构和供电范围进行划分,同时考虑一次侧上、下游支路以及二次侧上、下子系统的实际状态,建立了分区域的配网可靠性计算方法;配网的可靠性还依赖于远动设备与调度系统之间的协调,文献[9-11]重点阐述了在保证运行数据的获取、传递与处理过程与系统运行之间有效联系的方法,便于提高实际工程中的风险管控能力。

基于配网过往的状态进行的评价,主要可反映在该系统运行方式变化不大的前提下,对保障持续供电能力的一种可靠性评估。但目前通过对测量数据的实时计算,继而得到可靠性评估指标的方法有一定的局限性^[12-13]。若考虑配网设备所处环境的复杂因素时,所出现的大概率事件更会增加实时计算的复杂性,具体原因在于调用模型的不确定性,即模型中需要调节的参数维度变化大^[14-15],可以考虑采用深度学习的思路和方法,建立一个更加泛化的评估模型,作为实现可靠性实时评估的补充。

配网发生故障后,部分元件不可避免地退出运行,就目前的实际工程结果统计来看,在较短的时间内拟定完全避免负荷损失的转供方案仍然受诸多因素的影响。本文针对这一过程,根据配电网多种供电方式,按照停电前后的能量平衡方程建立了负荷转供效果评估指标。以损失功率最小为前提,考虑在运设备的运行状态、自身特性和外部环境等多因素,构建了基于多种因素的配电网故障转供评估模型的等式和不等式约束条件,采用基于K折验证(K-fold verification)数据处理方法,对历史数据进行充分的预前训练,完成配网转供关键约束参数的拟合,便于与后续可能出现的故障信息相比对,可最大限度地减少转供计划的准备时间。调度人员可根据比对结果拟定稳妥的转供措施,并完成转供路径的选取。

1 基于多种因素的配网故障转供评估模型

1.1 配网故障转供效果评估指标构建

基于负荷类型和密度所确定的配网供电方

式主要有4种,不同的供电方式在一定程度上决定了该方式下的可靠性,具体的供电方式如表1所示。

表1 配电网不同供电方式网络接线表

供电方式	接线方式			
	电缆线路		架空线路	
	双环	单环	多分段适度联络	辐射结构
A	√	√	√	
B		√	√	
C		√	√	
D			√	√

在表1所示的4种供电方式中,能够满足N个设备切除任一个的可靠性要求的不足50%。所以当配网中某一环节发生故障,若不及时加以干预,则最严重的情况当属负荷全失。为避免极端事件的发生,调度部门应及时采取负荷转供措施,最大限度地保证更多的用户能够正常用电。

负荷转供须经历多种复杂的操作,根本目的是能量再平衡状态的快速建立。在停电事件发生之前,考虑网络损耗的一般情况,配电系统的平衡状态如下式所示:

$$\begin{cases} P_s - \sum_1^n P_{IS1} - \sum_1^m P_{IS2} = \sum_1^k P_{load} \\ P_{li} \leq P_{limax} & i \in n \\ P_{Tj} \leq P_{Tjmax} & j \in m \\ U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_s 为输电网供给的功率; $\sum_1^n P_{IS1}$ 为n条配电线路的损耗功率之和; $\sum_1^m P_{IS2}$ 为m个变电站的损耗功率之和; P_{load} 为配电网内k个负荷所需的功率; P_{li}, P_{limax} 分别为各条线路传输的有功功率和最大允许功率; P_{Tj}, P_{Tjmax} 分别为各个变压器分配的运行功率和最大允许功率; U_i 为各个节点的运行电压。

根据式(1)中后3个不等式方程,可以计算出对应设备的负载率 $D_{ol,u}$ 和各母线的电压偏移程度 ΔU_i 。

当配电网部分区域发生故障时,如式(1)所示的平衡状态被破坏,假设通过转供已将负荷损失降至最小程度,在转供过程结束时所达到的能量平衡状态如下式所示:

$$P'_s - \sum_1^{n'} P_{IS1} - \sum_1^{m'} P_{IS2} = \sum_1^{k'} P_{load} \quad (2)$$

式中: P'_s 为转供结束后输电网供给的功率; n', m' 分别为剩余在运的线路和变电站数量; k' 为配电网内保留的负荷。

负荷转供实际上是一种应对故障停运的补救措施,其处理方式是否得当、效果是否理想以及能否保障整个过程的可靠性必须在实施措施之初就加以预判,具体可通过故障停运率 λ_i 和停电时间 μ_i 这两项指标客观评估,如下式:

$$\begin{cases} 1 - \frac{\sum_1^k P_{\text{load}}}{\sum_1^k P_{\text{load}}} = \lambda_i \rightarrow 0 \\ \sum_1^{k-k'} T_{k,i} = \mu_i \rightarrow 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_{k,i}$ 为网络中任一设备停运的时间。

1.2 基于多种因素的配电网转供约束构建

为了使式(3)所对应的两项评估指标同时达到最小,则从能量和时间角度必须满足的条件为

$$\sum_1^k P_{\text{load}} - \sum_1^k P_{\text{load}} = \Delta P_{\text{load}}|_{T_{k,i}} \rightarrow 0 \quad (4)$$

式中: $\Delta P_{\text{load}}|_{T_{k,i}}$ 为在第*i*个负荷在对应的第*k*个环节故障下所损失的功率。

为了最大限度地满足式(4),必然期望更多的转供功率通过配电网中除第*k*个以外的其它环节到达第*i*个负荷点处,即对应的路径将发生变化。以配电网中主要的环形网络为例进行说明,典型单环接线方式的最小单元如图1所示。

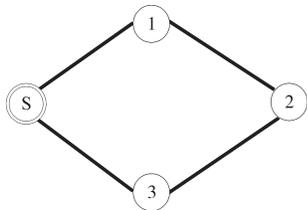


图1 单环接线方式的最小单元结构图

Fig.1 The smallest unit structure diagram of single loop wiring

假设在*t*时刻该单环网络中的任一线路($l_{s1}, l_{12}, l_{23}, l_{s3}$)或者节点(S, 1, 2, 3)均正常运行,则对应潮流的方向最多有且仅有2个,具体有以下3种组合:

- 1) S→1 以及 S→3→2→1(功率分点为1);
- 2) S→3 以及 S→1→2→3(功率分点为3);
- 3) S→1→2 以及 S→3→2(功率分点为2)。

若当图1中的 l_{s1} 在*t+1*时刻因发生故障而退出运行,若想完成负荷1'的完全转供,则故障前通过S→1'方向输送的潮流必须由*t*时刻的另一潮流路径S→3→2送至负荷1处,即

$$P_{S \rightarrow 3 \rightarrow 2, t+1} = P_{S \rightarrow 3 \rightarrow 2, t} + P_{S \rightarrow 1, t} \quad (5)$$

考虑现实中设备巡查、检修的客观需要,负荷转供后的相当一段时间内,路径S→3→2上各个环节的功率将同时增加 $P_{S \rightarrow 1, t}$,直至*t+2*时刻 l_{s1} 恢复正常并再次投运。所以,必须确保在*t+1*至

*t+2*时刻内,避免配电网其它部分再次发生故障的可能性,使得整个“自愈”过程能够顺利进行下去^[6],关键在于客观量化各个元件的运行状态、自身属性和自然条件这三类因素对转供路径可靠性(故障率)的影响程度,具体如下:

- 1) 长供电半径情况下的高负载率运行不仅增加了系统的整体损耗,还容易增大电压偏移程度,导致后续配电网运行的安全水平进一步降低;
- 2) 设备的投运年限增长,其自身的健康状态、能量供给能力也会随之降低。不同设备的故障率和修复时间随着老化程度呈现出一定的增长;
- 3) 设备在不良运行条件或者恶劣的气象及环境下更容易发生故障引发停电事故,影响系统的安全可靠运行和对用户的安全可靠供电。

上述3类因素与故障关联程度如表2所示。

表2 不同因素对潮流路径可靠性影响程度

Tab.2 The influence of different factors on the reliability of supply path

因素	评价指标	故障率关联度
运行状态	负载率 $D_{OL,u}$	正相关
	供电半径 $R_{BL,u}$	正相关
	电压偏移 ΔU_i	正相关
自身特性	服役年限 Y	正相关
	健康状态 H	正相关
外部环境	气温 T	正相关
	风速 v_w	正相关

表2中,“运行状态”栏内对应的负载率、供电半径和电压偏移这3个运行约束条件可以通过配电网结构和实际数据计算求得^[17-18];“自身特性”栏内的参数 Y 和 H 分别表示某一设备的服役年限以及健康状况;“外部环境”栏内的参数 T 和 v_w 分别表示某一设备的外部环境的温度和风速。具体计算如下:

$$\begin{cases} D_{OL,u} = \frac{P_{li}}{P_{limax}} \text{ 或 } \frac{P_{Ti}}{P_{Timax}} \leq \varepsilon_D \\ R_{BL,u} = \frac{r_i - R_{imax}}{P_{limax}} \leq \varepsilon_R \\ \Delta U_i = \frac{U_i - U_{iN}}{U_{iN}} \leq \varepsilon_U \end{cases} \quad (6)$$

式中: R_{imax} 为第*i*条线路的最大供电半径; $\varepsilon_D, \varepsilon_R, \varepsilon_U$ 分别为实际运行要求下的负载率、供电半径和电压偏移所对应的约束参数; r_i 为对应线路的供电半径。

配电网的设备众多,特性相异,但工程上广泛采用健康指数 H 表示各种设备的健康状态和

故障率 λ 之间的对应关系^[19]:

$$\lambda = Ke^{C^1C^2H} \quad (7)$$

这种方法主要采用指数函数的形式,通过比例系数 K 和两个拟合曲率系数 C^1 和 C^2 描述设备的健康状态。在实际运行情况下,各种设备的健康状态不仅与其自身内部因素(服役年限、结构材料等)相关,还与其长期所处的环境因素(天气变化等)相关,当全面考虑各种内、外因素对设备健康状态的影响时,其含义即表示外部环境因素对设备健康状态影响的程度,具体与设备元件所处的环境温度 T ,风速 v_w (架空线路)和服役年限 Y 有关。

这样便可以将表2中的第2项和第3项关联起来,便于在不同的具体情况下可将两者作为一个整体同时考虑。对应的特性和环境约束为

$$\lambda = Ke^{C^1C^2H} \leq \varepsilon_\lambda \quad (8)$$

式中: ε_λ 为考虑设备内外部因素所对应故障率的约束参数。

综上所述,式(5)为配电网负荷转供的等式约束条件,式(6)和式(8)为对应的不等式约束条件。

对于上述各约束条件,其中的关键参数会随着配电网运行方式的变化而改变,还无法采用确定的函数形式实时准确地加以描述。

但是考虑故障的发生在现有的研究中多用一个随机性事件来描述,从实际工程的需求出发,必须快速地获取相关参数以便在较短的时间内确定负荷的转供路径。后文着重考虑通过对历史数据的挖掘,以便从中提取对负荷转供措施拟定有利的信息,并加以利用,完成整个过程中约束条件的准确计算。

2 基于K折验证的配电网转供约束参数拟合

2.1 基于K折验证的配电网历史数据处理方法

采用在线潮流计算结果虽然可以在满足式(4)的前提下准确地完成如式(3)两项指标的预评估,但是不适合实际之处如下:

- 1)在线潮流计算充斥着大量的“乘除”运算,需要一定的时延得到满足精度要求的计算结果;
- 2)式(6)和式(8)所表示的约束参数受多种复杂情况的影响,取值范围会发生变化。

从实际工程的角度考虑,转供路径的选取一定要在稳妥的前提下进行,若能够在较短时间内

得到在实际条件允许情况下的合理措施,不排除选择偏于保守方案的可能。

对配电网的历史运行状态进行合理的运用,充分利用对过往数据变化规律的观察,给予系统和工作人员准确判断后续可靠性状态的依据,需要建立一个便于短期决策的泛化模型,在此模型中,考虑对各种时域数据进行动态的训练,实时验证和后续测试,在比对数据训练效果的同时完成模型的训练。

上述基于历史数据所建立的泛化模型,对于实现有效信息的提取需要考虑以下两点:

- 1)虽然各种程度故障状态的数据样本较小,但对于约束参数的选取更具有实际价值;
- 2)正常状态的数据基本已涵盖了可能出现的运行方式,对于转供路径的选取更具有参考价值。

处理上述两点的关键在于如何将数据进行合理的划分并完成处理。本文采用基于K折验证的数据训练方法,通过对历史数据的离线拟合解决上述问题,如图2所示。

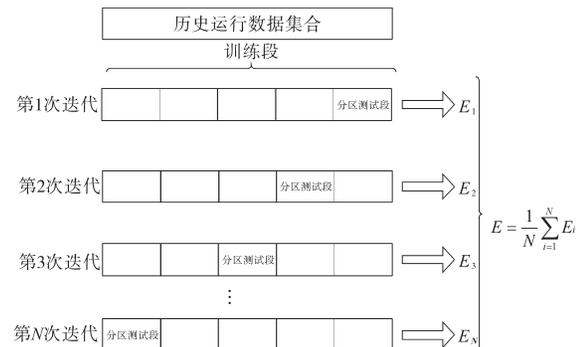


图2 K折验证数据训练过程图

Fig.2 K-fold verification algorithm data training process diagram

考虑如果划分区间过大,则运算结果往往精度偏低;反之,则计算量和计算时间超出可接受的范围,针对此问题,以历史运行数据集为样本空间,进行下述过程的处理:

- 1)将配电网状态变化不大的所有不同时间段的运行方式按顺序归为同一类待迭代运算样本,总体样本空间可历经 N 次迭代计算;
- 2)根据正常运行数据和故障数据将每一次迭代运算样本划分为训练段和测试段;
- 3)按照各段持续的时间顺序,将训练段继续进行划分;
- 4)负荷转供后,运行方式随之而变,所以表征故障情况的所有测试段须在表征不同正常运行情况的其它训练段内参与迭代计算。

2.2 基于K折验证的配电网转供约束参数拟合

按照上述处理过程,可同时测试式(5)、式(6)和式(8)所表征的约束模型(变量、参数)按照不同运行状态(正常状态、故障情况)、外部环境(极端天气)对应地进行求取特征均值集合 E_i 的训练,具体特征均值集合 E 的各类元素如下:

$$\begin{cases} E_i = \{E_p, E_T, E_e, E_\beta\} & i = 1, 2, \dots, N \\ E_p = \{ \sum_1^k P_{load}, \sum_1^{k'} P_{load} \} \\ E_T = \{T_{k,i}\} \\ E_e = \{\varepsilon_D, \varepsilon_R, \varepsilon_U, \varepsilon_\lambda\} \\ E_\beta = \{K, C^1, C^2, H\} \end{cases} \quad (9)$$

关键参数拟合流程如图3所示。在图3所表现的具体流程中:在判断“是否出现停电事件”之前的步骤,即可按照如图2所示K折验证方法完成数据的处理;根据故障信息的判断,整体流程出现分化;若该时段无故障,则“当下运行数据”按照正常运行状态处理,通过“生成新数据”回馈至“历史数据库”中;若该时段发生故障,则根据式(5)、式(6)和式(8)进行转供效果的可靠性评估,同样“生成新数据”回馈至“历史数据库”中。

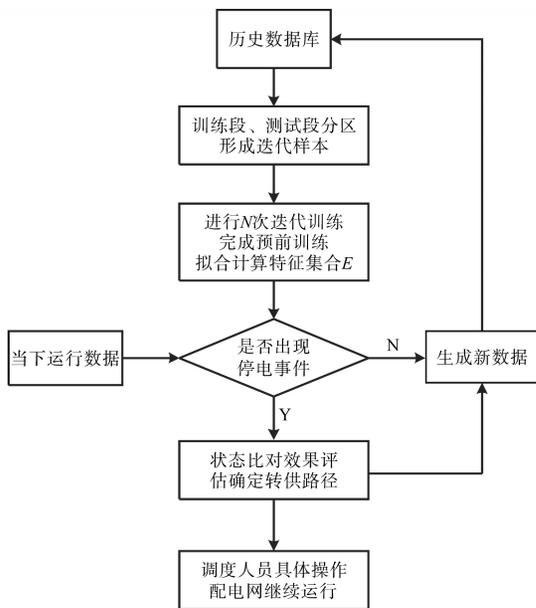


图3 关键参数拟合流程图
Fig.3 Key parameter fitting flow chart

根据训练的结果,将以上各元素进行均值处理,即可得到各种故障前后变量、参数的合理取值。取值的结果是一种对历史数据进行充分的预前训练,以备与后续可能出现的故障信息相比对,值得注意的是,这种比对实际上是一类“加减”运算,可减少转供计划的准备时间。调度人员可根据比对结果拟定稳妥的转供措施,并对应

选取转供路径。

3 实例验证

本文以某县级配电网为例,进行前述可靠性评估方案的验证,该配电网的具体网架结构如图4所示。

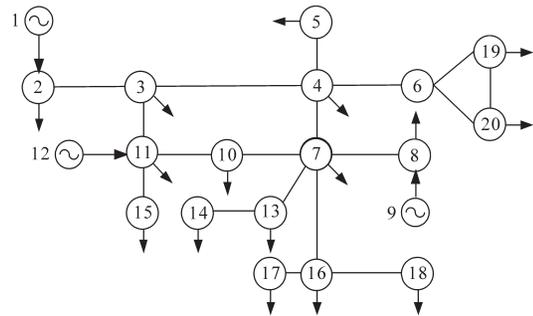


图4 某地区配电网接线图
Fig.4 Distribution network in a certain area

该配电网有35 kV和10 kV两个电压等级,在历史数据中,搜索得到该配电网的5种典型的停运状况,并调取当时的处理结果数据,具体如表3所示。

表3 故障停运历史信息表
Tab.3 Failure information sheet

故障类型	故障原因	故障设备	失负荷量/MW	可靠性降低度/%
断线	冰雹	线路3→4	1.2	0.012
	大风	线路11→10	5	0.056
	沙尘暴	线路7→4	2.6	0.021
短路	暴雪	线路6→20	6	0.023
	高温	变压器4	8.7	0.083
	短路	线路4→6 变压器19	6.7	0.061

发现该配网的薄弱环节分别为节点3,4,7,10,11所构成的环网和6,19,20所构成的环网。

由节点3,4,7,10,11所构成的环网为早期的主网架,主要设备投运时间较长,线路主要以单回路为主。

由节点6,19,20所构成的环网的供电对象为新工业园区,并未及时进行改造以适应新型特征负荷的需要。

采用该配网2017年—2018年、2018年—2019年的历史数据,根据前述的方法,拟合所得两个环网内变压器健康指数 H 、比例系数 K 和正常状态下的曲率系数均值 \bar{C}^1 和 \bar{C}^2 如表4所示。

根据本文的方法再次分析当时的故障信息,并模拟不同的故障转供措施,所得结果如表5所示。

表4 变压器状态参数表

节点编号	H	K	$\overline{C^1}$	$\overline{C^2}$
3	80	0.334	-0.060	1.3
4	80	0.761	-0.065	1.1
6	85	1.077	-0.071	1.4
7	75	3.479	-0.079	1.2
10	75	6.269	-0.080	1.6
11	80	2.589	-0.084	1.9
16	80	5.351	-0.091	1.8
19	85	16.403	-0.097	1.1
20	85	2.209	-0.082	1.3

表5 采用转供措施后故障停运信息表

故障类型	故障原因	故障设备	失负荷量/MW	可靠性降低度%
断线	冰雹	线路3→4	0.9	0.010
	大风	线路11→10	4.3	0.048
	沙尘暴	线路7→4	1.8	0.018
	暴雪	线路6→20	6	0.023
短路	高温	变压器4	7.5	0.057
	短路	线路4→6 变压器19	6.7	0.061

比对表3和表5中的措施结果,验证了本文的方法对极端天气情况下短线故障处理效果较好,不同的故障持续时间和失负荷量均有减少。

但对于短路故障,依旧需要从设备入手,进行变电站6的扩容,将线路4→6进行电缆改造。目前为止效果良好,未出现由极端天气所导致的故障停运情况。

4 结论

文中提出了一种基于K折验证的配电网故障转供可靠性评估方案,具体方法可有效地拟合不同设备在长时间内的健康信息特征参数,从而更准确地提供更合理的配电网故障负荷转供方案,具体结论如下:

1)当训练段的数据足够多,且分区测试段的信息可以更好地被利用于迭代训练以提高状态参数及其模型的准确性;

2)K折验证算法采用比对的原则更有利于配电网运行方式以及转供方案的可靠性评估的离线方式与在线方式的对接;

3)该方案可以实现配电网薄弱环节的识别,虽然相关指标计算和评估结果相对保守,但不影响实际工程的应用。

验证结果表明,根据可靠性评估的结果,可针对性地开展变压器更换、线路改造及检修计划调整等工作,更有利于配电网的长期稳定运行。

参考文献

- [1] 刘凯诚,钟鸣,曾平良,等.考虑分布式可再生能源和储能智能配电网可靠性评估综述[J].电测与仪表,2020,21(4):1-16.
Liu Kaicheng, Zhong Ming, Zeng Pingliang, et al. Review on reliability assessment of smart distribution networks considering distributed renewable energy and energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 21(4): 1-16.
- [2] 王守相,葛磊蛟,王凯.智能配电系统的内涵及其关键技术[J].电力自动化设备,2016,36(6):1-6.
Wang Shouxiang, Ge Leijiao, Wang Kai. Main contents and key technologies of smart distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 1-6.
- [3] Alberto Escalera, Edgardo Castronuovo, Milan Prodanović, et al. Reliability assessment of distribution networks with optimal coordination of distributed generation[J]. Energy Storage and Demand Management Energies, 2019, 12(6): 37-48.
- [4] 蒋卓臻,刘俊勇,向月.配电网信息物理系统可靠性评估关键技术探讨[J].电力自动化设备,2017,37(12):30-42.
Jiang Zhuozhen, Liu Junyong, Xiang Yue. Key technologies for reliability assessment of distribution network cyber physical system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 30-42.
- [5] Xiao Fan, Xia Yongjun, Zhou Youbin, et al. Comprehensive reliability assessment of smart distribution networks considering centralized distribution protection system[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15: 40-50.
- [6] 葛磊蛟,李元良,汪宇倩.智能配电网态势感知实现效果综合评估模型[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(11):1101-1111.
Ge Leijiao, Li Yuanliang, Wang Yuqian. Comprehensive evaluation model for situational awareness effects of a smart distribution network[J]. Journal of Tianjin University: (Science and Technology), 2020, 53(11): 1101-1111.
- [7] 莫一夫,张勇军.基于变权灰关联的智能配电网用电可靠性提升对象优选[J].电力系统保护与控制,2019,1(3):26-34.
Mo Yifu, Zhang Yongjun. Optimal object selection of power utilization reliability promotion for smart distribution grid based on weighted grey correlation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 1(3): 26-34.
- [8] 夏勇军,肖繁.考虑二次系统影响的智能配电网综合可靠性评估方法[J].电力系统自动化,2020,14(8):1-12.
Xia Yongjun, Xiao Fan. Comprehensive reliability evaluation method for smart distribution network considering influence of secondary system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 14(8): 1-12.
- [9] 林静怀,米为民,李泽科,等.智能电网调度控制系统的远方

操作安全防误技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 30(1): 60-64.
 Lin Jinghui, Mi Weimin, Li Zeke, *et al.* Safety anti-misoperation technology of remote operation of smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 30(1): 60-64.

[10] 李颖杰, 温启良. 含风-光-储的微网接入对配电网供电可靠性的影响[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 98-103.
 Li Yingjie, Wen Qiliang. Effect of micro-grid access with wind-light-storage on power supply reliability of distribution network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 98-103.

[11] 方学智, 李傲伟, 龙琴, 等. 适应配电网网格化规划的可靠性预测方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 72-78.
 Fang Xuezhi, Li Aowei, Long Qin, *et al.* Reliability prediction method adapted to grid planning in distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3): 72-78.

[12] 柴雁欣, 向月, 刘俊勇. 面向可靠性提升的关联规则驱动下配电网投资规划优选模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 85-92.
 Chai Yanxin, Xiang Yue, Liu Junyong. Optimization model and method of distribution network investment planning driven by correlation rules for reliability improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 85-92.

[13] Xiang Yue, Liu Junyong, Liu Yang. Optimal active distribution system management considering aggregated plug-in electric vehicles[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 131: 105-115.

[14] 丁吉. 配电网规划的综合效益评估方法研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
 Ding Ji. Research on comprehensive-benefit evaluation method of distribution network planning[D]. Chengdu: Xihua University, 2018.

[15] Wei Wenbing, Yang Dong. Fault line detection method based on the improved SVD de-noising and ideal clustering curve for distribution networks[J]. IET Science Measurement & Technology, 2018, 12(2): 262-270.

[16] 秦福欣, 王建学, 王秀丽. 考虑输电元件损坏概率的电力网架时序恢复策略优化[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 137-145.
 Qin Fuxin, Wang Jianxue, Wang Xiuli. Time sequence restoration optimization strategy of network considering power components damage probability[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 137-145.

[17] 孙明, 董树锋, 夏圣峰, 等. 基于路径描述的馈线分区N-1可装机容量计算方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 123-129.
 Sun Ming, Dong Shufeng, Xia Shengfeng, *et al.* Path description based calculation method for available capacity of feeder partition satisfied with N-1 security criterion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 123-129.

[18] 徐玉琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135-141.
 Xu Yuqin, Zhang li, Wang Zengping, *et al.* Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135-141.

[19] 顾佳浩, 淡淑恒. 考虑HI理论和在线监测误差的配电网可靠性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(4): 127-134.
 GU Jiahao, DAN Shuheng. Reliability evaluation of distribution network considering HI theory and online monitoring error[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(4): 127-134.

收稿日期: 2020-11-27

修改稿日期: 2020-12-13

~~~~~  
 (上接第 54 页)

Zeng Jiang, Huang Zhonglong, Qiu Guobin. Coordination control of three-level Boost-inverter considering neutral-point potential balance[J]. Electric Drive, 2020, 5(4): 38-44.

[20] Shao Z, Zhang X, Wang F, *et al.* Modeling and elimination of zero-sequence circulating currents in parallel three-level T-type grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 1050-1063.

[21] Chen H C, Liao J Y. Modified interleaved current sensorless control for three-level Boost PFC converter with considering voltage imbalance and zero-crossing current distortion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 6896-6904.

收稿日期: 2020-05-09

修改稿日期: 2020-05-22