

基于复杂网络理论的主动配电网多级运行风险快速评估

王钰楠, 杨镜非, 何也帅, 赵祖熠, 吴汪平

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240)

摘要: 主动配电网运行状态的时变性、网络元件的多样性和随机模糊性、自动化系统的主动自愈性对系统的安全稳定运行提出了新的挑战。将复杂网络理论应用于风险评估,建立了一套具有运行风险快速预警能力、多级运行风险分析能力、全面体现时空及动静态运行风险能力的主动配电网运行风险评估体系。该体系依托主动配电网自动化系统及可信性理论等数学工具,能够对网络结构和元件的变化进行实时响应并给出定性和定量的多级运行风险评估结果以协助主动配电网调度工作,从而降低系统风险,防止大面积停电事故的发生。最后,通过实例仿真验证了所述评估方法的可行性、快速性、灵活性和适用性,为复杂网络理论在电力系统中的应用提出了新的研究及应用方向。

关键词: 主动配电网; 运行风险; 复杂网络理论; 快速评估

0 引言

为了满足可持续发展的需要,主动配电网的提出为智能电网的建设提供了发展契机。近年来,主动配电网的规划及控制等研究已取得了一定的进展,随着主动配电网建设的推进,为了保障电力系统安全稳定运行,迫切需要建立一套能够适应主动配电网运行状态时变性、网络元件多样性和随机模糊性、自动化系统主动自愈性等特点的多级运行风险快速评估和预警体系。

文献[1]定义了电力系统运行风险并给出了基于概率论的风险计算方法。文献[2]在结构和类别上对系统风险进行了细化和补充,设计了风险评估及预警体系流程。文献[3]计及电网变化过程,从节点失压和支路过载造成的负荷损失角度建立了地区电网运行风险模型。文献[4-5]考虑不同继电保护对运行风险的影响,对传统风险分析及 $N-k$ 风险分析进行了补充。文献[6]提出了基于风险的预防控制在线决策和紧急控制在线决策的技术路线和实现方法。文献[7]建立目标函数,提出了各类紧急减负荷控制的在线风险评估和协调方案。文献[8-9]基于自动化及信息化平台,提出了一种面向调度运行的电网安全风险管控体系,实现了系统自动收集

风险数据源及定期风险评估与定级。

上述基于概率论的风险模型的历史参数难以获取,参数置信度受限,对系统时变的适应性较差。为了改善传统风险评估方法的局限,各类新型风险评估及计算方法若直接应用于主动配电网风险评估,则存在如下局限:①未周全涉及主动配电网的时变特性、分布式电源(DG)出力的随机模糊性^[10]、可控负荷及储能元件的接入影响等对运行风险的影响;②所采用的计算方法多涉及电力系统的潮流计算,大大限制了风险评估速度,难以完全满足主动配电网自动化系统对信息实时性、有效性、可靠性的要求。

本文将复杂网络理论^[11]应用于主动配电网风险评估,依托自动化系统建立了一套主动配电网多级运行风险快速评估体系,通过引入可信性理论等数学工具得到定性和定量的多级运行风险评估结果,给出了不同风险定级下的调度工作建议。复杂网络计算方法的线性有效提高了电力系统运行风险评估速度,弥补了潮流计算在多级运行风险评估实时性中的缺陷,为主动配电网实时风险评估体系的建立提出了可适用的快速评估指标;其对实时数据的快速处理和分析能力保证了评估结果的快速性和时效性,改善了自动化系统与物理系统信息延时问题;计算参数的客观性和可获取性保证了分析结果的科学性和有效性。最后,通过算例验证了所提方法的可行性、快速性、灵活性和适用性,为复杂网络理论在电力系统的应用提出了新的研究方向。

收稿日期: 2015-07-17; 修回日期: 2016-02-02。

上网日期: 2016-04-26。

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2014AA051901)。

1 复杂网络理论基础

1.1 基本理论及基本参数

将复杂网络理论应用于电力系统分析,以传输线路介数表征网络流的大小^[11]。定义发电节点(主电源、DG 和处于发电状态的储能元件)集为正电源集,负荷节点(常规负荷、可控负荷和处于充电状态的储能元件)集为负电源集,则线路的起点集 S 为正电源集和负电源集的并集,即广义发电机节点集合。终点集为负荷节点集合 E ,则线路 ij 带发电机权重的传输线路介数如式(1)所示。

$$B_{G_{ij}} = \sum_{v \in S, w \in E, v \neq w} \frac{G_{vw} \sigma_{vw}(ij)}{\sigma_{vw}} = \mathbf{K}_{ij} \mathbf{G}_{vw} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{vw}(ij)$ 为线路 vw 经过线路 ij 的最短路径数; σ_{vw} 为线路 vw 间的所有最短路径数; G_{vw} 为发电机电压权值,即线路 vw 间最短路径承担的广义发电出力; $\mathbf{K}_{ij}$ 为由 $\sigma_{vw}(ij)/\sigma_{vw}$ 组成的 $1 \times N$ 阶矩阵,对于某一确定的网络,系数矩阵 $\mathbf{K}_{ij}$ 为常数; $\mathbf{G}_{vw}$ 为由节点 v 处各发电出力组成的 $N \times 1$ 阶矩阵。

当同一节点处同时连接负荷及电源时,则先根据戴维南叠加定理对该节点进行等效,即单一节点在某一确切时刻仅体现为综合的负荷或电源特性。该特性随负荷及电源出力的不确定性而具有时变性。为体现负荷变化对网络流的影响,在复杂网络理论计算范畴内允许以负荷为起点,以另一负荷为终点。

1.2 带发电机权重的传输线路介数与电流的一致性

电力系统发电机出力及负荷变化,即正/负电源出力变化后,线路 ij 的电流改变量:

$$|\Delta \dot{I}_{ij}| = \left| \frac{\Delta \dot{U}_i - \Delta \dot{U}_j}{z_{ij}} \right| = \frac{|\Delta \dot{U}_{ij}|}{z_{ij}} \quad (2)$$

式中: $\Delta \dot{U}_i$ 和 $\Delta \dot{U}_j$ 分别为节点 i 和节点 j 处的电压值; z_{ij} 为线路 ij 的阻抗; $\Delta \dot{U}_{ij}$ 为线路 ij 的电流改变量。

由式(1)可知:

$$|\Delta B_{G_{ij}}| = \mathbf{K}_{ij} \Delta \mathbf{G}_{vw} \quad (3)$$

设 t 时刻 $G_{ij} = \dot{U}_{ij} \dot{I}_{ij}$, $t + \Delta t$ 时刻 $\dot{U}_{ij}$ 及 $\dot{I}_{ij}$ 均为已知常数且有 $G_{ij} + \Delta G_{ij} = (\dot{U}_{ij} + \Delta \dot{U}_{ij})(\dot{I}_{ij} + \Delta \dot{I}_{ij})$, 近似有 $\Delta G_{ij} = \dot{U}_{ij} \Delta \dot{U}_{ij} / z_{ij} + \Delta \dot{U}_{ij} \dot{I}_{ij} = 2 \dot{I}_{ij} \Delta \dot{U}_{ij}$ 。记由实时获取 $2 \dot{I}_{ij}$ 组成的 $1 \times N$ 阶矩阵为 $\mathbf{A}_{ij}$, 则由戴维南叠加定理可得:

$$|\Delta \dot{U}_{ij}| = |\mathbf{A}_{ij} \Delta \mathbf{G}_{vw}| \quad (4)$$

由式(2)至式(4)可知:线路带发电机权重的介数与电流值的相对变化趋势一致,并且仅需要通过

比较线路两端点电压的相对大小即可获取其正/反一致性。

2 基于复杂网络理论的主动配电网运行风险指标

2.1 网络基本假设

1)主网和主动配电网的电压控制单元对配电网整体电压具备有效控制作用。

2)主动配电网对可控电源和可控负荷具备有效主动调节能力。

3)为避免线路过电压,主动配电网分布式电源宜选取小容量电源^[12]。定义不接入任何分布式电源、可控负荷及储能元件的网络为基本网络,可近似认为:①分布式电源的接入对基本网络的继电保护无影响;②分布式电源可有效避免长距离传输,系统网损忽略不计。

2.2 主动配电网运行风险

定义主动配电网运行风险为主动配电网的失负荷风险,可根据配电网常见保护方式及其动作诱因分析引起主动配电网运行风险的因素,主要分为两方面:一方面为由系统故障、设备故障、过负荷导致的过电流引起的失负荷风险;另一方面为由过负荷导致的低电压引起的可控负荷失负荷风险。

主动配电网中的可控负荷和储能元件通过对用户和系统需求的快速响应达到主动调节和维持系统安全、稳定、可靠、经济运行的目的。为了形象地刻画主动配电网中可控负荷及储能元件的主动调节能力,可认为在主动负荷(可控负荷以及充电状态中的储能元件)处配置了虚拟低电压保护,即当系统处于低电压水平时,虚拟低电压保护动作切去部分主动负荷以达到平衡系统运行状态的效果。鉴于分布式电源出力的随机性、负荷预测的不确定性,可控负荷也可能无法满足预定运行计划造成一定的失负荷风险。

2.3 主动配电网运行风险指标

2.3.1 过电流引起的失负荷风险指标

考虑过电流保护的实际情况,定义带发电机权重的网络平均传输介数为:

$$B_G = \frac{\sum_i \sum_j C_{ij} B_{G_{ij}}'}{\sum_i \sum_j C_{ij}} \quad (5)$$

式中: C_{ij} 为线路 ij 处过电流保护安装情况,1 为安装,0 为未安装; $B_{G_{ij}}'$ 为经一致性修正的带发电机权重的线路传输介数。

定义布尔型一致性参数 β ,当 $\Delta B_{G_{ij}}$ 与 ΔI_{ij} 满足正一致性时 $\beta = 0$,否则 $\beta = 1$,即

$$B_{G_{ij}}' = B_{G_{ij}} + (-1)^\beta \Delta B_{G_{ij}} \quad (6)$$

由式(1)可得线路 ij 与线路 mn 的带发电机权重的网络传输介数比为:

$$\frac{B_{G_{ij}}}{B_{G_{mn}}} = \frac{\mathbf{K}_{ij} \mathbf{G}_{vw}}{\mathbf{K}_{mn} \mathbf{G}_{vw}} \quad (7)$$

发电出力或负荷变化后有:

$$\frac{B_{G_{ij}}'}{B_{G_{mn}}'} = \frac{\mathbf{K}_{ij} (\mathbf{G}_{vw} + \Delta \mathbf{G}_{vw})}{\mathbf{K}_{mn} (\mathbf{G}_{vw} + \Delta \mathbf{G}_{vw})} \quad (8)$$

对于某一拓扑结构确定的主动配电网,由于 $\Delta \mathbf{G}_{vw} \ll \mathbf{G}_{vw}$,各带发电机权重的线路传输介数比可近似认为是一个定值。记各线路能承受的最大 $B_{G_{ij}}'$ 为 $B_{G_{ij_max}}$,则系统临界状态下带发电机权重的网络平均传输介数为:

$$B_{G_{max}} = k_1 B_G \quad (9)$$

式中: $k_1 = \min\{B_{G_{ij_max}}/B_{G_{ij}}\}$ 。

经归一化得当前网络因过电流引起的失负荷风险为:

$$R_1 = \frac{B_G}{B_{G_{max}}} \quad (10)$$

该指标实现了由系统故障、设备故障、过负荷等造成的网络流变化引起的系统风险的统一表达,为复杂网络理论在电力系统中的应用进行了探索。下文的算例分析验证了该指标的可行性和计算速度的快速性,弥补了传统电力系统潮流计算方法在 $N-k$ 风险评估中评估速度较慢的局限,为复杂网络理论在电力系统分析中的应用提供了理论依据,为电力系统快速分析和评估提供了新的研究方向,也为智能电网实时分析平台的建设提供了新的可适用的风险评估指标。

2.3.2 低电压引起的可控负荷失负荷风险指标

虚拟低电压保护通过调整主动负荷的投切以满足系统用电高峰时期的系统的安全稳定运行。可控负荷与处于充电状态的储能元件不同,电力公司需根据签署的可控负荷相关供电协议满足一定时长的有效供电。考虑到主动配电网运行的不确定性,可控负荷的实际供电情况与计划可能存在一定的偏差。

可控负荷 x 在评估周期内累计至 t 时刻的计划供电总量 $L_p(x, t)$ 和实际供电总量 $L(x, t)$ 为:

$$L_p(x, t) = \sum_{i=0}^t l_p(x, i) \quad (11)$$

$$L(x, t) = \sum_{i=0}^t l(x, i) \quad (12)$$

式中: $l_p(x, i)$ 为可控负荷 x 在 i 时刻的计划供电; $l(x, i)$ 为可控负荷 x 在 i 时刻的实际供电。

$L(x, t) > L_p(x, t)$ 时,当前系统在已满足可控

负荷供电要求的基础上,还为系统未来可能出现的低电压风险提供了一定的备用电量;反之则系统可能承担可控负荷的失负荷风险,因此低电压引起的可控负荷失负荷风险可能对系统风险起到加剧或减少的作用,对该风险值进行归一化处理即有:

$$R_u(x) = \frac{L_p(x, t) - L(x, t)}{L_p(x, t)} \quad (13)$$

式中: $R_u(x)$ 为主动配电网可控负荷失负荷风险的评估指标。

该指标结合电力企业可控负荷供电的实际需要,能够可靠反映可控负荷的失负荷风险。

2.3.3 主动配电网运行风险指标

单次主动配电网运行风险评估中,由过电流引起的失负荷风险值只有一个,但由低电压引起的可控负荷失负荷风险值的数量与系统可控负荷连接数一致。考虑到各实际网络的不同情况,可根据实际情况基于可控负荷重要度等因素设定不同的风险权重 γ_1 及 γ_x ,即主动配电网的运行风险为:

$$R = \gamma_1 R_1 + \sum_x \gamma_x R_u(x) \quad (14)$$

式中: $\gamma_1 + \sum_x \gamma_x = 1$ 。

主动配电网运行状态的不确定性决定了其风险指标体系应由三个参数组成,分别为主动配电网运行风险期望值 R_E 和运行风险区间 $[R_{min}, R_{max}]$ 。综合考虑主动配电网各类计算参数的随机及模糊特性,基于可信性理论,根据参考文献[13-15]所提出的随机模糊数计算公式(见式(15)),结合发电机和负荷的概率特性参数及模糊特性参数可计算得到发电出力及负荷的期望值。

$$E_{\text{pro-fuz}}(\sigma_i) = \int_0^{+\infty} C_r \{\theta \in \Phi \mid E_{\text{pro}}(\sigma_i(\theta)) \geq r\} - \int_{-\infty}^0 C_r \{\theta \in \Phi \mid E_{\text{pro}}(\sigma_i(\theta)) < r\} dr \quad (15)$$

式中: $E_{\text{pro-fuz}}(\cdot)$ 和 $E_{\text{pro}}(\cdot)$ 分别为随机模糊期望值和随机期望值函数; σ_i 为第 i 个随机模糊变量; r 为设定的限值; C_r 为可信性测度; Φ 为可能性空间的非空集合。

将计算结果代入式(14)即可得到 R_E 。考虑到 DG、可控负荷及储能元件连接情况及其状态的不确定性,进一步通过蒙特卡洛模拟即可得到运行风险区间值。传统的基于潮流计算的运行风险评估方法计算相对复杂、计算量巨大,无法保证计算结果的实时性和有效性。复杂网络的风险评估方法对计算公式进行了线性化处理,大大减少了计算量和计算时间。

3 主动配电网多级运行风险定级及评估体系

3.1 评估流程

步骤 1:初始化可控负荷运行计划,设定网络最大评估等级 $k, k \in [0, N]$ 。

步骤 2:获取主动配电网拓扑参数,计算基础网络的复杂网络参数。

步骤 3:读取各节点电压值,获取各传输线路介数与电流的正/反一致性。

步骤 4:基于自动化系统终端获取当前网络运行状态;若基础网络变化返回步骤 2。

步骤 5:基于当前网络,进行网络 $N-0$ 至 $N-k$ 状态下的蒙特卡洛模拟计算得到 R_E 及 $[R_{\min}, R_{\max}]$ 。

步骤 6:给出当前网络的运行风险评估结果;返回步骤 4。

基于上述主动配电网运行风险评估体系,采用绘制实时运行风险曲线的方式可直观得到当前网络运行风险评估结果及其变化趋势。

3.2 风险定级体系

为了对当前各主动配电网的情况有一个更直观的认识,可对当前网络进行风险定级,并根据可能造成的危害程度分别用不同颜色标识以达到更直观的目的,同时起到协助配电自动化系统及调度工作人员对当前网络进行有效监督的效果。

由式(14)可知, $R=1$ 时系统处于故障临界状态, $R=0.5$ 为安全运行区间中值,因此可制定主动配电网运行风险定级标准如表 1 所示。

表 1 主动配电网运行风险定级标准
Table 1 Grading standard of active distribution network operation risk

定级标准	风险定级
$R_{\min} \geq 1$	I 级
$0.5 \leq R_{\min} < 1$ 且 $R_{\max} \geq 1$	II 级
$0 \leq R_{\min} < 0.5$ 且 $R_{\max} \geq 1$ 或 $0.5 \leq R_{\min} < 1$ 且 $0.5 \leq R_{\max} < 1$	III 级
$0 \leq R_{\min} < 0.5$ 且 $0.5 \leq R_{\max} < 1$	IV 级
其他	安全

当系统处于 I 级风险时发出风险警报,建议对当前运行情况进行干预控制和调整;处于 II 级风险时,当前系统运行状态风险较大,为了使系统能够可靠满足 $N-1$ 准则,建议对系统运行方式进行优化调整,并对系统运行状态保持关注;处于 III 级风险时,系统存在潜在运行风险,建议关注系统下阶段工作状态的调整情况;处于 IV 级风险时,当前系统相对安全稳定;其他情况下系统安全,发生失负荷的可能性较小。

主动配电网风险定级有利于多主动配电网同步运行情况下高运行风险区域的快速定位和重点分析;通过颜色标识及其变化更可直观体现系统及调度操作的效果,有利于对突发情况进行及时人工干预和有效处理。

4 算例分析

基于 IEEE 39 节点系统,假定各节点处均可连接 DG、可控负荷及储能元件。采用本文所述方法和潮流分析方法(即以电流代替带发电机权重的传输线路介数为评估依据)对主动配电网进行运行风险评估。

计算参数均取自系统当前运行状态,保障了系统参数的真实性、客观性和有效性。经 50 次随机仿真,各线路带发电机权重的传输线路介数与电流的一致性仿真结果如图 1 所示,仿真结果表明各线路 $B_{G_{ij}}$ 与 I_{ij} 均符合正/反一致性特性。

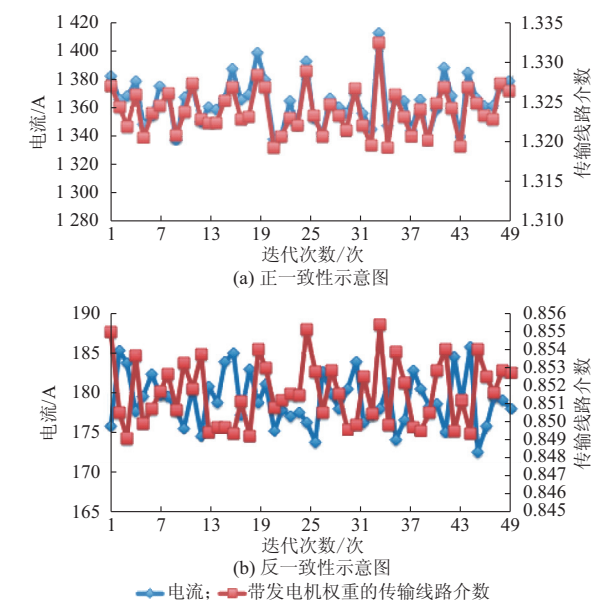


图 1 带发电机权重的传输线路介数与电流的正/反一致性示意图
Fig.1 Schematic diagram of positive/negative consistency between betweenness ratio of transmission lines with lweight of generators and current

各线路介数比与基本网络各线路介数比的一致性仿真结果如图 2 所示,结果显示该值基本保持一致。上述分析结果证明了复杂网络理论应用于电力系统运行风险分析的可行性。

基于 IEEE 39 节点系统的主动配电网运行风险评估结果如表 2 所示,仿真结果显示本文所述主动配电网运行风险评估方式与传统采用潮流分析法得到的运行风险评估结果基本一致,通过合理设置各带发电机权重的传输线路介数限值的方式可有效

进行风险评估和风险定级,证明了本文所提计算和评估方案的有效性。

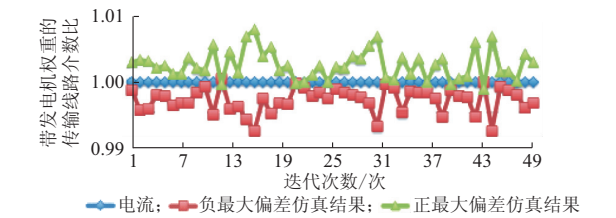


图2 带发电机权重的传输线路介数比一致性仿真结果
Fig.2 Consistency simulation result of betweenness ratio of transmission lines with weight of generators

表2 主动配电网运行风险评估结果 Table 2 Assessment result of active distribution network operation risk			
方法	风险期望	风险区间	计算时长/s
复杂网络分析法	0.937 4	[0.934 1,0.940 8]	7.522
潮流分析法	0.932 8	[0.919 7,0.951 8]	23.867

与潮流分析法的计算速度相比,采用复杂网络分析法可提速 217.3%,证明了复杂网络分析法的快速性。考虑到主动配电网运行方式的快速多变性和电力系统故障传播的快速性,传统潮流分析法难以满足短时多次环境变化下的风险实时反馈,从而难以保障系统和调度能够在极短的故障可控时间内进行有效动作。基于复杂网络理论的风险分析方法在计算速度上有显著的提高,可有效规避潮流计算方法在计算速度、评估及反馈有效性方面的缺陷,有利于向配电自动化系统及调度工作人员给出及时有效的建议。

当采用如图 3 所示的四节点辐射网及环网进行运行风险评估时,基于本文所述评估体系可得到普通配电网及主动配电网辐射网及环网运行风险分析结果如表 3 所示。

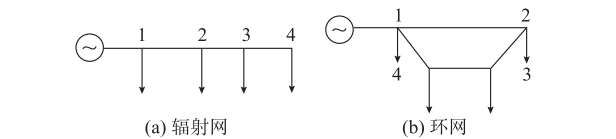


图3 简单辐射网与环网算例接线图
Fig.3 Example diagram of simple radiation network and loop network

表3 辐射网与环网运行风险分析结果 Table 3 Analysis results of operation risk of radiation network and loop network			
网络类型	风险期望	风险区间	风险等级
普通配电网·辐射网	0.990 8	[0.874 6,1.107 0]	Ⅱ级
普通配电网·环网	0.453 3	[0.332 1,0.574 4]	Ⅳ级
主动配电网·辐射网	0.304 2	[0.222 4,1.077 3]	Ⅳ级
主动配电网·环网	0.163 3	[0.087 0,0.497 2]	安全

注:普通配电网·辐射网表示普通配电网以辐射网方式运行,其他依此类推。

仿真结果表明:主动配电网运行风险一般低于普通配电网运行风险,环网运行风险低于辐射网运行风险,采用本文所述运行风险评估体系得到的仿真结果与现有研究结果一致^[16],进一步验证了该评估方法的有效性。

5 结语

主动配电网相比传统配电网,受 DG、可控负荷、储能设备及电动汽车等影响,具有更加灵活的拓扑结构、更多样的运行方式、更不可控的电网后续运行状态,因此,建立一套能够进行实时获取并快速分析主动配电网运行风险的评估体系至关重要。本文基于复杂网络理论提出了主动配电网运行风险的快速风险评估方法和风险定量评估体系。该风险评估体系的优点如下。

1)显著提高了计算速度,能有效适应主动配电网拓扑及运行参数的快速时变特性,极大减少了调度信息获取与电网实时状态间的延时,从而起到避免故障传播及连锁故障的作用,也为智能电网实时监测系统的建立提供了可适用的、可满足实时快速评估需求的评估指标,为智能电网的假设与发展提供了新思路。

2)具有较高的风险评估准确性,在简单快速的基础上不牺牲风险评估的准确度,能够为电网调度提供可靠的风险评估结果。

3)评估计算参数可实时获取、实时处理,直观并快速地体现网络当前运行状态并给出当前风险定级及 $N-k$ 的多级风险评估结果,并能够给出及时的调度建议,使系统因突发情况等处于临界状态时能够及时干预,在高风险状态时能够及时调整,进一步保障电力系统的安全稳定运行。

4)将复杂网络理论及可信性计算方法有机结合和应用于电力系统风险分析,有效提高了评估结果的置信度。

5)模型能够满足终端“即插即用”的风险评估需求,且所需参数较少、计算复杂性适中,有利于该方法在工程实践中的推广应用。

本文所提出的方法综合考虑了主动配电网运行方式的多样性、运行环境的时变性和运行参数的随机性,通过实时评估为电网调度提供可靠的主动配电网风险定级和多级风险评估结果,为主动配电网的风险预警提供了一种新的评估办法,也为其安全稳定运行提供了一套科学可行的运行风险评估及预警方案。

参考文献

[1] NI M, MCCALLEY J D, VITTLE V, et al. Online risk-based security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 258-265.

[2] 王一帆, 汤伟, 刘路登, 等. 电网运行风险评估与定级体系的构建及应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 141-148. DOI: 10.7500/AEPS20140702007.

WANG Yifeng, TANG Wei, LIU Ludeng, et al. Construction and application of power grid operation risk assessment and rating system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 141-148. DOI: 10.7500/AEPS20140702007.

[3] 汪隆君, 李博, 王钢, 等. 计及电网变化过程的地区电网运行风险评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 18-22.

WANG Longjun, LI Bo, WANG Gang, et al. Operational risk assessment of regional power grid considering developing process [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 18-22.

[4] 孙光, 陈金富, 陈志光, 等. 计及继电保护系统多模式隐藏故障的电网 $N-k$ 风险分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 37-43. DOI: 10.7500/AEPS20130607002.

SUN Guang, CHEN Jinfu, CHEN Zhiguang, et al. $N-k$ contingency risk analysis of power grid considering multi-mode hidden failure in relay protection system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 37-43. DOI: 10.7500/AEPS20130607002.

[5] 刘譞, 戴志辉, 张天宇, 等. 基于测量参数的距离保护运行风险分层评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 63-68. DOI: 10.7500/AEPS20141216009.

LIU Xuan, DAI Zhihui, ZHANG Tianyu, et al. Hierarchical risk assessment method of power system distance protection based on measuring parameters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 63-68. DOI: 10.7500/AEPS20141216009.

[6] 周晓宁, 李碧君, 刘强. 遵循安全稳定导则的电网运行安全风险在线控制决策探讨[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 45-51.

ZHOU Xiaoning, LI Bijun, LIU Qiang. Discussion on on-line control decision-making based on operation risk analysis complying with guide on security and stability for power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 45-51.

[7] 徐泰山, 李峰, 张建新, 等. 各类紧急减负荷控制的在线风险评估和协调决策方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 91-97. DOI: 10.7500/AEPS20150320004.

XU Taishan, LI Feng, ZHANG Jianxin, et al. Online risk assessment and coordinated decision scheme for emergency load shedding control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 91-97. DOI: 10.7500/AEPS20150320004.

[8] 文云峰, 崔建磊, 张金江, 等. 面向调度运行的电网安全风险管理系统: (一) 概念及架构与功能设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 66-73.

WEN Yunfeng, CUI Jianlei, ZHANG Jinjiang, et al. Design of a security risk management system for power system

dispatching and operation: Part one concepts and design of architecture and function [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 66-73.

[9] 崔建磊, 文云峰, 郭创新, 等. 面向调度运行的电网安全风险管理系统: (二) 风险指标体系、评估方法与应用策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 92-97.

CUI Jianlei, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. Design of a security risk management system for power system dispatching and operation: Part two risk index, assessment methodologies and application strategies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 92-97.

[10] 刘玉娇. 不同运营环境下可再生能源发电的短期优化及其风险管理[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

[11] 孙可. 复杂网络理论在电力网中的若干应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[12] 裴晓娟. 分布式电源对配电网电压变化影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

[13] 冯永青, 张伯明, 吴文传, 等. 基于可信性理论的电力系统运行风险评估: (一) 运行风险的提出与发展[J]. 电力系统自动化, 2006, 31(1): 17-22.

FENG Yongqing, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. Power system operation risk assessment based on credibility theory: Part one propound and development of operation risk assessment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 17-22.

[14] 冯永青, 张伯明, 吴文传, 等. 基于可信性理论的电力系统运行风险评估: (二) 理论基础[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 11-15.

FENG Yongqing, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. Power system operation risk assessment based on credibility theory: Part two theory fundament [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 11-15.

[15] 冯永青, 张伯明, 吴文传, 等. 基于可信性理论的电力系统运行风险评估: (三) 应用与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 11-16.

FENG Yongqing, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. Power system operation risk assessment based on credibility theory: Part three engineering application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 11-16.

[16] 黄伟军, 钱远驰, 吕志来. 闭环运行方式城市配电网接线模式的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 123-127.

HUANG Weijun, QIAN Yuanchi, LÜ Zhilai. Research of city distribution network layouts for closed-loop system [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 123-127.

王钰楠(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 主动配电网。E-mail: conny@sytu.edu.cn

杨镜非(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 智能电网。E-mail: carayang@sytu.edu.cn

何也帅(1993—), 女, 硕士, 主要研究方向: 数学在电力系统中的应用。

(编辑 万志超)

Rapid Assessment of Multistage Operation Risk of Active Distribution Network Based on Complex Network Theory

WANG Yunan, YANG Jingfei, HE Yeshuai, ZHAO Zuyi, WU Wangping

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The time-varying topological structure, device and state diversity and random fuzziness and the self-healing ability of the active distribution network have brought new operational risks and challenges to the safety of the power grid. As methods of traditional analysis of the power system can hardly satisfy the demand of active distribution network, a new method is badly needed for assessment of active distribution network's operational risks and providing operational advice for automation system and dispatchers. Based on the complex network theory and the features of active distribution network, a rapid and multi-level operational risk assessment system capable for real-time risk warning and multistage risk analysis is proposed, which allows for sufficient time to make appropriate operational decisions and real-time protection of the power grid. On the premise of the active distribution automation system and some advanced mathematical tools such as the credibility theory, the system proposed can rapidly respond to the change of network structure and components, including the controllable loads, electric cars, distributed generators and energy storage devices. Qualitative and quantitative multistage operation risk assessment results are given to assist dispatchers to reduce the risks of system and prevent large area blackout. Finally, an example is given to illustrate the feasibility, rapidity, flexibility, practicality and applicability of the operational risk assessment system.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2014AA051901).

Key words: active distribution network; operation risk; complex network theory; rapid assessment