

配电网设备故障停电风险实时评估

赵会茹¹,李娜娜¹,郭森¹,李天友²,张功林³

(1. 华北电力大学 经济与管理学院,北京 102206;2. 国网福建省电力公司,福建 福州 350003;

3. 福建省电力公司电力科学研究院,福建 福州 350003)

摘要: 实现配电网设备故障停电风险的实时评估对供电可靠性的提高、停电损失的降低有积极意义。提出包含设备故障率和设备故障停电影响程度的配电网设备故障停电风险评估模型,设备故障率综合考虑了实时系统因素及环境因素,设备故障停电影响程度考虑了损失负荷、损失电量、停电用户小时数、停电用户级别加权户数4个指标。以某配电网为例实现对配电网设备故障停电风险的实时评估,结果达到了实时评估的要求,证明了所提方法的准确性。

关键词: 配电; 电力设备; 停电; 风险评估; 实时评估; 故障率; 故障停电影响程度

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.014

0 引言

电力企业的宗旨是向用户提供安全、经济、可靠、优质的电能,然而在实际运行中,一些因素会导致配电网设备出现故障,带来供电不足和中断的情况,造成国民经济和人民生活巨大损失。统计表明,配电网的故障对用户供电可靠性的影响最大,用户停电故障中近80%是由配电网故障引起的。因此,实现对配电网设备故障停电风险的实时动态评估,并积极采取措施,能够提高配电网供电可靠性,降低故障损失和设备损害^[1]。

有关电力系统运行风险评估的研究虽然处于起步阶段,但经过广大学者的努力,已取得了一定的进展。电力系统中设备运行的风险综合了故障事件的可能性和严重性2个方面^[2]。文献[3]把故障枚举法和随机概率的抽样法相结合以计算实时停电风险;文献[4-5]则主要研究了扰动概率的建模和风险评估的方法,其中对于风险的评价主要关注在期望损失负荷方面。文献[6]提出了低电压、过载、电压失稳及连锁过载严重度函数,从多方面评估在线运行的风险。

传统研究中对故障概率的分析主要针对系统内因素,未考虑实时外部环境因素对设备故障概率的影响。对故障停电影响程度的分析也未考虑停电用户等级,而不同等级的用户停电影响程度是不同的。因此,本文在前人研究的基础上,将外部环境因素考虑其中,并用损失负荷、损失电量、停电用户小时数、停电用户级别加权户数4个指标综合表征设备故障

停电影响程度。

本文采用故障遍历法找出不同设备的故障停电负荷集,计算设备故障停电影响程度的4个指标综合值。同时,综合考虑不同设备的实时运行状况以及环境状况,输入设备运行状态变量和外界环境状态变量,计算出不同时点下设备发生故障的实时概率,最终得到不同设备发生故障停电的实时风险值。最后以某配电网为例,计算某时点该配电网不同设备的故障停电风险值。应用效果表明了该方法的准确性,能够实现配电网设备故障停电的实时评估监测,有助于提高配电网的安全运行水平。

1 设备故障停电风险评估的基本概念

配电网设备故障停电的风险由两部分构成:设备故障的可能性及设备故障停电影响程度。配电网设备 X_i 的实时风险是通过某一特定时刻 t ,该设备发生故障的概率与故障停电影响程度相乘确定的^[7]。

$$R_i(X_i) = P(X_i|t)L(X_i) \quad (1)$$

其中, $P(X_i|t)$ 是 t 时刻设备 X_i 发生故障的概率; $L(X_i)$ 是设备 X_i 的故障停电影响程度; $R_i(X_i)$ 是 t 时刻 X_i 发生故障停电的风险值。

因此,设备故障停电风险的实时评估需要确定设备故障的实时概率及其故障停电影响程度。设备故障停电影响程度越高,且发生故障概率越大,其风险越大,越需要引起重视。

2 设备故障停电的风险源及概率分析

设备故障的发生是内部因素和外部因素共同作用的结果,主要内部因素包括设备自身因素、设备运行过负荷等,主要外部因素包括大风大雨、雷击等天气因素及施工破坏等因素,这些因素构成了配电网设备故障的风险源^[8-9]。

收稿日期:2013-07-30;修回日期:2014-09-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71373076);国家电网重大科技项目(031[2012]19)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(71373076) and State Grid Major Science and Technology Project(031[2012]19)

2.1 设备自身的故障率

设备自身往往存在故障率 λ ,一般认为,大部分元件的故障率 $\lambda(Y)$ 呈浴盆曲线状,如图1所示,其中 Y 为使用年限。针对馈线上各设备,其故障率的变化分为区域I(下降区域)、区域II(不变区域)和区域III(上升区域)3个区域。区域I内设备处于磨合阶段,故障率不断下降但高于稳定的故障率;而对于区域III,设备故障率不断上升,主要是由于设备使用年限较长,设备老化问题凸显而导致的^[9]。

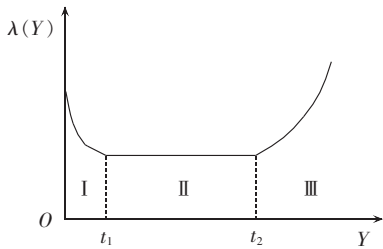


图1 元件故障率浴盆曲线

Fig.1 Tub curve of component failure rate

根据以往配电网中各类设备不同使用年限下的运行统计及设备状态评价,可确定各类设备不同使用年限对应的故障率,即故障率 $\lambda(Y)$ 与使用年限 Y 间的对应关系,理论上各类设备故障率随使用年限的变化满足浴盆曲线规律,即故障率由基本保持稳定不变,到不断上升趋势。通常用威布尔分布来表示,见式(2):

$$\lambda(Y) = \begin{cases} pY^{(\beta-1)} & Y < t_1 \\ p & t_1 \leq Y \leq t_2 \\ pY^{(1-\beta)} & Y > t_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $0 \leq \beta \leq 1$; p 是区域II的固定故障率。

2.2 设备过负荷的故障率

设备过负荷运行后不一定出现故障,但其过负荷的程度与设备故障存在一定正向关系,即过负荷程度越大,设备越容易发生故障。当设备电流小于或者等于额定电流的某一比例 a 时(可以根据系统评估目的自由设定),其引起设备故障的概率为0;随着流过设备电流的增加,设备故障的概率增大,且增加速率变快。可将设备的过负荷值 L_{OD} 定义为:

$$L_{OD} = \begin{cases} 0 & L \leq a \\ L - a & L > a \end{cases} \quad (3)$$

其中, L 是流过设备的电流占其额定电流的比例。

在对配电网设备进行故障停电风险评估时,设备过负荷引发的设备故障概率可在设备本身故障率的基础上引入设备的过负荷值,同时结合效用函数,则过负荷引发设备故障的概率可表示为^[10]:

$$P = \lambda(e^{L_{OD}} - 1) \quad (4)$$

2.3 外部因素导致的设备故障率^[11]

大风大雨、雷击和施工因素也会损坏配电网的

设备,从而带来一定故障停电概率。根据以往统计,若统计期内配电网发生大风大雨和雷击的次数分别为 N_{WR} 和 N_{TH} ,配电网中某类设备总数为 N_D ,而大风大雨和雷击现象所导致的此类设备故障停电次数分别为 N_{CWR} 和 N_{GTH} ,即可求出因大风大雨和雷击现象导致的该类设备故障停电概率分别为:

$$P_{WR} = N_{CWR} / (N_D N_{WR}) \quad (5)$$

$$P_{TH} = N_{GTH} / (N_D N_{TH}) \quad (6)$$

若统计期内发现配电网某类设备附近施工总次数为 N_S ,因附近施工而发生该类设备故障停电的次数为 N_{CS} ,则施工因素导致此类设备故障的概率为:

$$P_S = N_{CS} / N_S \quad (7)$$

通常情况下,各风险源对不同设备故障促成事件是相互独立的。基于概率论,某设备发生故障的概率等于不同风险源对该设备故障概率之和^[11],如式(8)所示。

$$P(X_i|t) = \sum_{k=1}^M P_k(X_i|t) \quad (8)$$

其中, $P(X_i|t)$ 是在 t 时刻设备 X_i 发生故障的概率; $P_k(X_i|t)$ 是在 t 时刻风险源 k 使设备 X_i 发生故障的概率; M 是主要风险源的个数。对于设备 X_i ,如果无风险源 k 存在,那么 $P_k(X_i|t) = 0$ 。

可知,配电网中的设备自身因素、其负荷情况,以及大风大雨、雷击、施工破坏等外界因素都会对设备故障有一定影响,存在相应的故障概率。因此,配电网设备故障率应综合考虑设备自身因素、过负荷情况及外界因素,以设备各类风险源故障概率之和作为其故障率。

3 设备故障停电影响程度

3.1 设备故障的停电负荷集

配电网中各设备故障停电影响程度与故障后果有关,因而需要确定设备级故障的预想事故集,即馈线上某设备发生故障停电时,与其对应的负荷集 S 内各负荷均发生持续停电。运用故障遍历法^[12]对预想事故集内按照不同的馈线对馈线上的各设备进行预想故障停电后果分析,再综合考虑联络线的转运能力后,构建不同馈线上各设备故障对应的故障停电负荷集 S 。

3.2 设备故障停电影响程度的评估指标及计算公式

设备故障带来的后果,主要是针对供电企业、负荷或电力用户而言的,且与供电可靠性密切相关。不同设备故障因停电范围不同,造成的影响大小亦存在差异。损失负荷、损失电量、停电用户数量及用户重要级别、停电时长因素是反映故障停电影响程度的主要因素。而对于负荷节点是否出现低电压问题,则认为故障后短时可能出现低电压,但由于部分负

荷将被切除供电,馈线潮流减少,甚至运行馈线长度缩短,加之配电网集中和分散安装了满足要求的自动投切电容器组用于无功补偿,则继续供电的负荷出现低电压的可能性较低,不予考虑。因此,构建以下反映设备故障停电影响程度的指标:损失负荷 L_L 、损失电量 E_L 、停电用户小时数 h_{POU} 、停电用户级别加权户数 W_{POU} 指标^[13-14]。

针对配电网任意设备发生故障后,负荷集 S 内各负荷停电的损失负荷 L_L 可用该负荷配变年度平均负荷表示,计算公式如式(9)所示。

$$L_L = \sum_{i \in S} \frac{A_i}{T_A} \quad (9)$$

其中, A_i 是 S 内负荷 i 对应的配变年度抄见电量; T_A 是配电网中配变的年度平均运行时间。

若该设备所属类别的设备的平均修复时间为 T_R , T_R 期间 S 内负荷将持续停电,则损失电量 E_L 为:

$$E_L = L_L T_R \quad (10)$$

该设备故障导致的停电用户小时数 h_{POU} 计算式如式(11)所示:

$$h_{POU} = T_R \sum_{i \in S} W_{LUi} \quad (11)$$

其中, W_{LUi} 是 S 内负荷 i 对应的用户数。

根据负荷分级,一级负荷发生停电影响很大,二级负荷次之,三级负荷最小,停电用户级别加权户数 W_{POU} 可通过式(12)计算得到, α_m 表示负荷集 S 内负荷节点 i 中第 m 个用户的级别取值,一级负荷取 K_{U1} ,二级负荷取 K_{U2} ,三级负荷取 1。

$$W_{POU} = \sum_{i \in S} \sum_{m=1}^{W_{LUi}} \alpha_m \quad (12)$$

不同指标从不同侧面反映了设备故障停电影响程度的高低,因此需要借助综合评价方法综合反映其水平。4 个评估指标对设备故障停电影响程度的贡献大小不尽相同,本文采用层次分析法(AHP)确定各评估指标权重,并采用理想点排序(TOPSIS)评估方法实现各设备故障停电影响程度的确定^[15]。

4 实证分析

以某配电网为例,对其中设备的故障停电风险进行实时评估。该配电网的结构图如图 2 所示,图中小数表示设备故障率浴盆曲线中区域 I 的平均年限(单位 a)。该配电网的预想事故集为除联络开关外其他所有主要设备,馈线 F_1 和 F_3 的联络线最

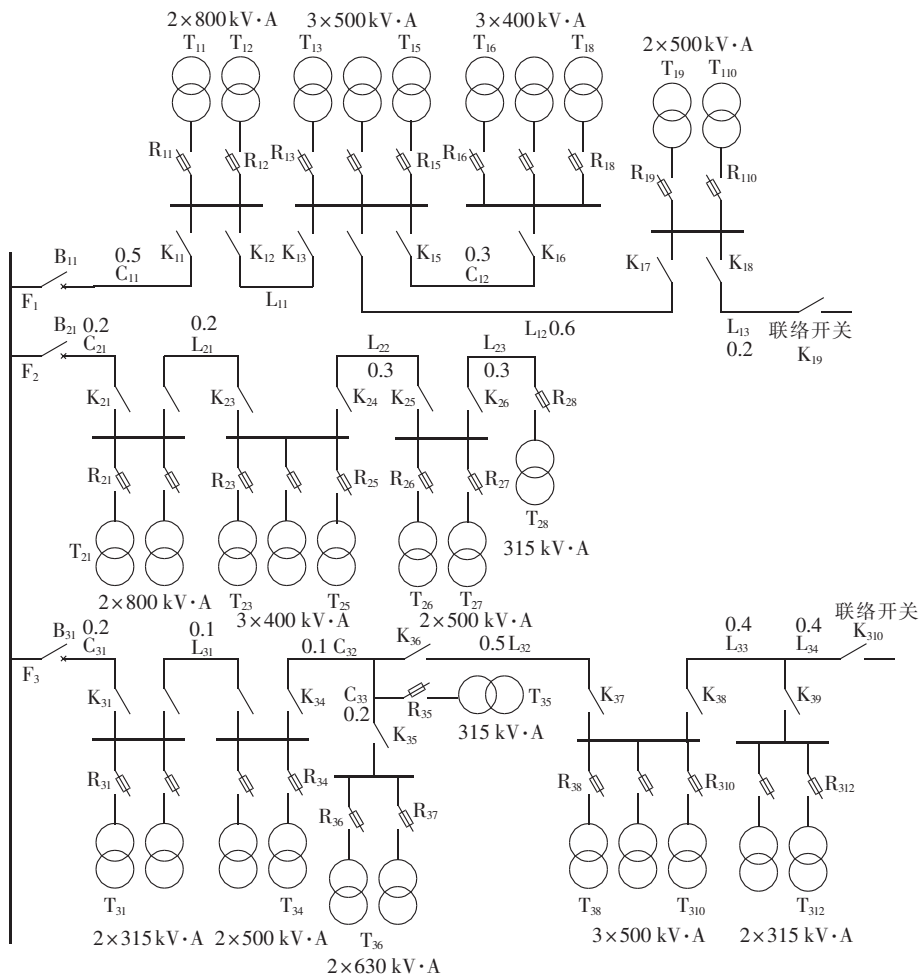


图 2 某配电网结构图

Fig.2 Distribution network structure

大转功率分别为 1500 kW 和 1200 kW。该配电网配变年平均功率因数和负荷率分别取 0.9 和 60%。各设备的浴盆曲线的 β 值通过历史故障数据拟合得到。该配电网中各类设备的故障率和平均修复时间如表 1 所示。

4.1 各风险源对各设备的故障促成概率

配电网实际运行方式多样,在不同的评估时点上,各设备的主要风险源因素也处在不断变化当中,因而在不同评估时点上需要监测各设备的各风险源实际状态及设备过负荷状态,通过监测风险源状态确定设备发生故障的概率。

该配电网某评估时点上,其实际运行方式为:馈线 F_2 上架空线路 L_{23} 计划检修, L_{23} 、 R_{28} 和 T_{28} 处于停运状态,其余设备均处于运行状态(除联络开关外),天气情况是正处于雷雨状态,出现大风大雨及雷击,配电系统监测到部分线路及配变出现过负荷运行。根据配电网中设备的使用时间及设备过负荷和外部环境的状态,可根据故障率函数 $\lambda(Y)$ 及式(3)~(8)得到该评估时点所有风险源引起的各设备故障概率,如图 3 所示,图中横轴 0 表示 B_{31} ,1~3 表示 C_{31} ~ C_{33} ,4~7 表示 L_{31} ~ L_{34} ,8~16 表示 K_{31} ~ K_{39} ,17~28 表示 R_{31} ~ R_{39} 和 R_{310} ~ R_{312} ,29~40 表示 T_{31} ~ T_{39} 和 T_{310} ~ T_{312} ,后文中相同馈线数据编号所代表的设备相同。

4.2 设备故障停电影响程度

设备故障停电影响程度的确定,首先需要运用故障遍历法界定预想事故集中各设备故障对应的停电负荷集 S ,然后通过计算 4 个指标值,综合评价设备的故障停电影响程度。

该配电网统计的配变年度平均运行时间为 7 890 h,则可求得各馈线上各配变的平均负荷水平,图 4 给出了馈线 F_2 上各配变的平均负荷水平。一级负荷用户 K_{U1} 取 20,二级负荷 K_{U2} 取 10,可计算得该配电网中表征各设备故障停电影响程度的 4 个指标。图 5 和图 6 分别绘制了馈线 F_1 上各设备的这 4 个指标数值情况,图中横轴 0 表示 B_{11} ,1、2 分别表示 C_{11} 、 C_{12} ,3~5 表示 L_{11} ~ L_{13} ,6~13 表示 K_{11} ~ K_{18} ,14~23 表示 R_{11} ~ R_{19} 和 R_{10} ,24~33 表示 T_{11} ~ T_{19} 和 T_{110} 。

表 1 各类设备故障率及平均修复时间情况

Table 1 Failure rate and mean repair time for different equipment types

设备	β	区域 I	区域 II	p	寿命期	故障平均修复
		平均年限/a	平均年限/a		结束时故障率	时间/(h·次 ⁻¹)
断路器(B)	0.88	0.3	8	0.006[次·(台·a) ⁻¹]	0.010[次·(台·a) ⁻¹]	9.0
电缆线路(C)	0.74	0.5	7	0.020[次·(km·a) ⁻¹]	0.040[次·(km·a) ⁻¹]	8.0
架空线路(L)	0.82	0.2	8	0.150[次·(km·a) ⁻¹]	0.250[次·(km·a) ⁻¹]	7.0
负荷开关(K)	0.70	0.4	7	0.005[次·(台·a) ⁻¹]	0.008[次·(台·a) ⁻¹]	6.5
熔断器(R)	0.69	0.6	5	0.080[次·(台·a) ⁻¹]	0.012[次·(台·a) ⁻¹]	4.0
配变(T)	0.71	1.0	6	0.050[次·(台·a) ⁻¹]	0.080[次·(台·a) ⁻¹]	5.5

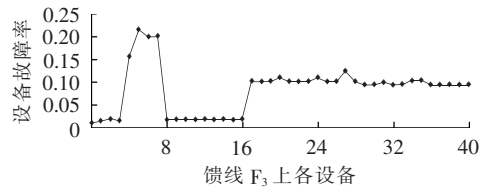


图 3 评估馈线 F_3 上各设备的故障率

Fig.3 Failure rate assessment on equipments of Feeder 3

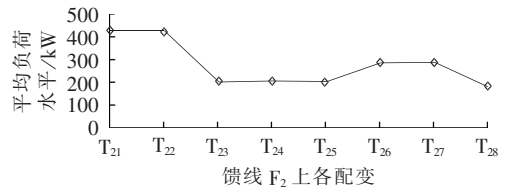


图 4 馈线 F_2 上各配变平均负荷情况

Fig.4 Average load for transformers of Feeder 2

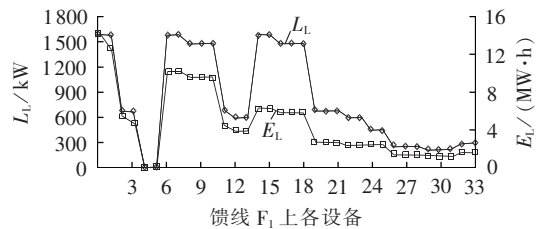


图 5 馈线 F_1 上各设备损失负荷和损失电量指标值情况

Fig.5 Load loss and electricity loss for equipments of Feeder 1

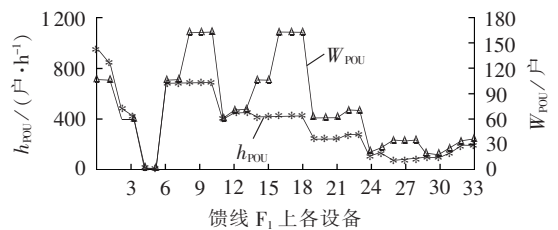


图 6 馈线 F_1 上各设备停电用户小时数和停电用户级别加权户数指标值情况

Fig.6 Power outage user-hours and weighted power outage users for equipments of Feeder 1

为了识别各设备在配电网中的故障停电影响程度,利用 AHP-TOPSIS 综合评价方法,将以上 4 个指标综合成 1 个指标,该指标综合反映各设备在配电网中的故障停电影响程度。首先根据配电网运行实际经验及专家意见,对指标的相对重要程度给出了判断矩阵,如式(13)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

调用 MATLAB 编写的相应程序,得到各指标的权重向量为[0.42359 0.22704 0.12232 0.22704],判断矩阵的一致性指标(CI)0.00345<0.1,表明得出的权重与判断矩阵具有一致性,是合理的。再调用自行编写的 TOPSIS 评估程序,计算得到该配电网中各设备的故障停电影响程度。图 7 给出了该配电网馈线 F₃上各设备的故障停电影响程度。由于网络的拓扑结构,不同设备的停电负荷集存在较大差异,使设备的故障停电影响程度不同。各馈线首端断路器发生故障对配电网的影响较大,因而影响程度很高,如馈线 F₃上断路器 B₃₁的影响程度高达 0.86575。

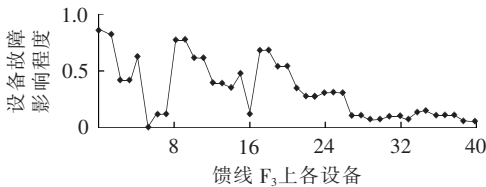


图 7 馈线 F₃上各设备的故障停电影响程度
Fig.7 Impact degree of failure outage for equipments of Feeder 3

进而,将各设备故障停电影响程度值与该评估时点上设备发生故障概率相乘,可得到此评估时点上该配电网各条馈线上各设备的故障停电风险值,图 8—10 分别绘出了各条馈线上不同设备故障停

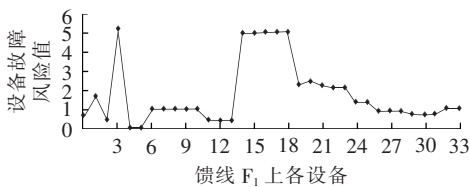


图 8 馈线 F₁上各设备故障停电风险值
Fig.8 Failure outage risk for equipments of Feeder 1

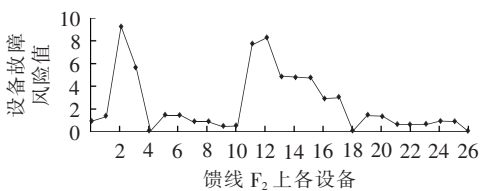


图 9 馈线 F₂上各设备故障停电风险值
Fig.9 Failure outage risk for equipments of Feeder 2

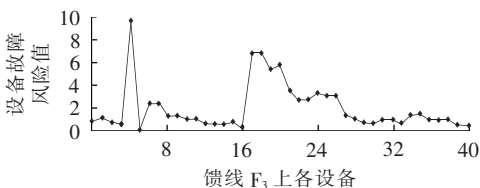


图 10 馈线 F₃上各设备故障停电风险值
Fig.10 Failure outage risk for equipments of Feeder 3

电风险值的评估结果,图 9 中横轴 0 表示 B₂₁,1 表示 C₂₁,2—4 表示 L₂₁—L₂₃,5—10 表示 K₂₁—K₂₆,11—18 表示 R₂₁—R₂₈,19—26 表示 T₂₁—T₂₈。

5 结论

实现对配电网设备故障停电风险的实时动态评估,能够提高配电网供电可靠性,降低故障损失。本文通过计算不同设备发生停电故障的实时概率值,并结合设备故障停电影响程度得出不同时刻设备停电故障的风险值。设备故障率综合考虑了不同时刻系统运行状况及外部环境因素,通过状态变量的输入得出故障概率。设备故障停电影响程度的评估则考虑了损失负荷、损失电量、停电用户小时数、停电用户级别加权户数 4 个指标。最后,以某配电网为例,对某时点配电网设备故障停电风险实时评估,得到了该时点不同设备的故障停电风险值,结果达到了运行评估的要求,证明了方法的准确性,有助于提高配电网安全运行的水平。

参考文献:

- [1] 李天友,赵会茹,欧大昌,等. 短时停电及其经济损失的估算[J]. 电力系统自动化,2012,36(20):59-63.
LI Tianyou,ZHAO Huiru,OU Dachang,et al. The short-term power outage and economic loss evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(20):59-63.
- [2] CIGRE Working Group. Planning to manage power interruption events[R]. Paris,France:CIGRE,2010.
- [3] 史慧杰,葛斐,丁明,等. 输电网络运行风险的在线评估[J]. 电网技术,2005,29(6):43-48.
SHI Huijie,GE Fei,DING Ming,et al. Research on on-line assessment of transmission network operation risk[J]. Power System Technology,2005,29(6):43-48.
- [4] 王成亮,赵渊,周家启,等. 基于日发电计划的电力系统运行风险概率评估[J]. 电力系统自动化,2008,32(4):6-10.
WANG Chengliang,ZHAO Yuan,ZHOU Jiaqi,et al. Probabilistic evaluation of power system operational risk based on daily generation scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(4):6-10.
- [5] LI Wenyan,KORCZYNSKI K. Risk evaluation of transmission system operation modes:concept,method and application [C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York,USA:[s.n.],2002:1124-1129.
- [6] NI Ming,MCCALLEY J D,VITTAL V,et al. Online risk based security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(1):258-265.
- [7] 马培玉. 配电网运行风险识别与防范研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.
MA Peiyu. Distribution network risk identification and prevention research[D]. Beijing:North China Electric Power University,2011.
- [8] 赵珊珊,周子冠,张东霞,等. 大区互联电网动态稳定风险评估指标及应用[J]. 电网技术,2009,33(2):68-72.
ZHAO Shanshan,ZHOU Ziguan,ZHANG Dongxia,et al. Dynamic stability risk assessment indicators and application in large area interconnected power syetem[J]. Power System Technology,2009,33(2):68-72.
- [9] 何永秀,戴爱英,杨卫红,等. 基于模糊理论的城市电网风险识别

- 与评价[J]. 电网技术,2010,34(9):127-131.
- HE Yongxiu,DAI Aiyang,YANG Weihong,et al. Risk identification and evaluation of urban power grid based on based fuzzy theory[J]. Power System Technology,2010,34(9):127-131.
- [10] 刘若溪,张建华,吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(15):89-96.
- LIU Ruoxi,ZHANG Jianhua,WU Di. Distribution network theory static security evaluation index research[J]. Power System Protection and Control,2011,39(15):89-96.
- [11] 郭仁桀,王建兴. 考虑气象条件影响的电网风险评估研究[J]. 云南电力技术,2009,37(2):29-43.
- GUO Renjie,WANG Jianxing. Grid risk assessment study considering the impact of weather conditions[J]. Yunnan Electric Power Technology,2009,37(2):29-43.
- [12] 赵月辉. 复杂配电系统可靠性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- ZHAO Yuehui. Complex distribution system reliability[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2011.
- [13] 赵珊珊,张东霞,印永华. 智能电网的风险评估[J]. 电网技术,2009,33(19):7-10.
- ZHAO Shanshan,ZHANG Dongxia,YIN Yonghua. Risk assessment of the smart grid[J]. Power System Technology,2009,33(19):7-10.
- [14] 魏远航,刘思革,苏剑. 基于枚举抽样法的城市电网风险评估[J]. 电网技术,2008,32(18):62-66.
- WEI Yuanhang,LIU Sige,SU Jian. Risk assessment of urban power network based on enumerative sampling method[J]. Power System Technology,2008,32(18):62-66.
- [15] 刘自发,庞铨铨,魏建伟,等. 基于IAHP和TOPSIS方法的负荷密度指标计算[J]. 电力系统自动化,2012,36(13):56-60.
- LIU Zifa,PANG Chengcheng,WEI Jianwei,et al. Load density calculation based on the IAHP and TOPSIS method[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(13):56-60.

作者简介:



赵会茹

赵会茹(1963—),女,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力经济与管理、技术经济评价理论与应用;

李娜娜(1988—),女,天津人,博士研究生,研究方向为能源管理、技术经济评价理论与应用(E-mail:nancyli1007@163.com)。

Real-time risk assessment on equipment failure outage of distribution network

ZHAO Huiyu¹,LI Nana¹,GUO Sen¹,LI Tianyou²,ZHANG Gonglin³

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350003, China;

3. Fujian Electric Power Company Electric Power Research Institute, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The real-time risk assessment on the equipment failure outage of distribution network may improve the power supply reliability and reduce the outage loss. A risk assessment model is proposed for it, which contains the equipment failure rate and the equipment failure outage impact degree. The failure rate considers the real-time system factors and the environmental factors while the impact degree considers four indexes: load loss, electricity loss, power outage user-hours and weighted power outage users. The real-time risk assessment on equipment failure outage is implemented for a distribution network, verifying the correctness and real-time performance of the proposed method.

Key words: electric power distribution; electric equipments; outages; risk assessment; real-time assessment; failure rate; failure outage impact degree

(上接第88页 continued from page 88)

Split-phase differential current protection based on instantaneous power theory for power transmission line

DENG Xiangtian¹,YUAN Rongxiang¹,XIAO Zhenfeng²,LI Timing¹,LI Kaiwen¹,WANG Yalei¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A criterion based on the instantaneous power theory is proposed for the differential current protection of power transmission line to suppress the influence of distributed capacitive currents. The three-phase instantaneous currents of two line terminals are processed by the Fourier transformation and filtered by the LPFs(Low-Pass Filters) to extract the three-phase fundamental active-power current components, which is used as the differential current protection criterion. A simulation model of 500 kV power transmission line is built with PSCAD software for verifying the proposed protection criterion and the results show that, immune to the transition resistance and distributed capacitive currents, different fault types can be rapidly and correctly distinguished.

Key words: EHV power transmission; UHV power transmission; relay protection; split-phase differential current protection; instantaneous power theory; single-phase active-power current; Fourier transforms; computer simulation