

配电网用户感知停电事故严重性分析及可靠性评估

刘立扬¹, 李鑫², 张文涛¹, 魏俊¹, 叶圣永¹

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 可靠性评估对于指导配电网规划设计具有重要意义。传统配电网可靠性评估主要从系统侧供电的角度, 建立评估指标体系并进行分析, 较少考虑停电发生时用户侧的用能需求差异, 忽视了不同用户对于同一停电事故严重性的差异化感知, 进而造成了传统可靠性指标不能完全准确反映停电事件对于不同用户在不同时段的差异化影响。为解决上述问题, 首先, 提出了用户感知可靠性的概念, 并提出了一种用户对停电事故严重性感知的量化方法, 以分析不同用户对停电事故的严重性感知程度及停电容忍程度; 然后, 分别从用户侧和系统侧提出了一系列基于用户感知的配电网可靠性评估新指标, 建立了相应指标体系, 并围绕该体系对配电网系统的可靠性评估开展了研究; 最后, 运用 IEEE-RBTS 标准算例对所提出的方法、指标进行了计算验证, 证明了其可行性及正确性; 并通过与传统可靠性指标的对比分析, 体现了用户感知可靠性指标相较于传统评估指标的客观优势。

关键词: 用户感知; 停电事故严重性; 配电网可靠性; 可靠性指标

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2021)03-0061-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210312

Outage Severity Analysis and Reliability Assessment Based on User Perception in Distribution Network

Liu Liyang¹, Li Xin², Zhang Wentao¹, Wei Jun¹, Ye Shengyong¹

(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Reliability assessment is of crucial importance for distribution network planning and design. Traditional reliability assessment methods mainly concern on analyzing electricity outages observed from the system side, regardless of whether end users are in need of consuming electricity during such outage events. Thus, it may not truly reflect the actual impacts of outages on the reliability level suffered from the consumer side. In order to overcome the deficiency, a reliability assessment method based on user perception is proposed. According to the proposed method, the reliability level sensed by users is effectively assessed with respect to outage time and load curve of customers. And a method is also proposed to assess the severity of an outage based on the interruption time while also considering customer power consumption features. New index for assessing reliability based on user perception are proposed to better reflect the impacts of outage suffered and sensed from customer side. The IEEE-RBTS distribution system is studied to illustrate the feasibility and correctness of the proposed method and index. And through the comparative analysis with traditional reliability index, the objective advantages of reliability index based on user perception are presented.

Key words: user perception; outage severity; distribution network reliability; reliability index

0 引言

经济社会的快速发展, 对配电系统供电可靠性

提出了更高的要求, 配电网可靠性评估变得愈发重要。为此, 国内外专家学者分别从系统侧及用户侧, 针对配电网可靠性评估方法、评估指标等方面, 展开了相关研究。

对于从系统侧入手进行可靠性研究方面, 文献

[1]在以可靠性供电为中心的未来电力市场环境,为实现配电网可靠性供电服务及管理提出了一种可靠性关键元件的辨识方法。文献[2]对交直流的配电系统的可靠性进行了对比。文献[3]讨论了配电系统一次侧、二次侧元件的可靠性运营成本。文献[4]在微网孤岛运行状态下,讨论了风机、光伏的可靠性分析评估方法以及维持其一定可靠性水平的运营成本。文献[5]评估了可靠性提升对于增强供电能力及降低停电损失的重要价值。文献[6]针对分布式电源输出功率的随机性问题,提出基于点估计法的含分布式电源的配电网可靠性评估模型。

从用户侧入手进行可靠性研究方面,文献[7]评估了供电可靠性对于不同敏感性负荷的差异化影响。文献[8]在电力市场的大背景下对配电网内重点用户的供电服务能力进行了评估,提出了重点用户可靠性定制化服务的概念。文献[9]研究了“有效电价刺激”这一模式,通过制定合理的储能补贴电价政策,有效刺激用户侧储能投资。文献[10]提出了一种新的考虑可靠性因素的阶梯电价制定方法。文献[11]针对接入用户侧微网的孤岛运行模式,提出了一种兼顾可靠性和经济性的能量优化配置模型。文献[12]分析了用户侧遭遇短时停电的原因、特性及其对用户造成的影响,阐述了短时停电的含义并对国内短时停电的定义提出了建议。

需要注意的是,上述研究中的评估指标均为传统的系统侧可靠性指标,指标数值有时同用户侧实际感知到的用电可靠性体验存在差异。为克服这一问题,开展了如下工作:1)在可靠性分析中充分考虑了故障时段内,受影响的用户负荷曲线、用能及可靠性需求,将故障发生时刻与该时段内用户的负荷曲线情况纳入停电事故严重性判别中;2)提出了用户感知可靠性的概念,并提出了用户对停电事故严重性感知程度的定量分析方法;3)提出了用户感知可靠性评估新指标,建立了相应指标体系,采用该体系对实际算例进行了可靠性评估研究。

1 基于用户感知的配电网停电事故严重性分析

相比输电系统,配电系统更靠近用户侧,其可靠性将直接决定用户的用电体验。有数据表明 80% 造成用户停电的故障发生在配电网系统中^[2]。因

此,配电网可靠性评估指标,除了从系统侧反映配电系统整体的可靠性水平外,还应准确反映用户侧感受到的用电可靠性体验,从而为提升供电服务质量奠定基础。基于此,首先,提出了“用户感知可靠性”的定义;然后,对不同用户的差异化可靠性需求进行了分析;最后,提出了用户对于停电事故严重性感知的定量分析方法。

1.1 用户感知可靠性评估的定义

在配电网中,综合考虑系统整体可靠性水平与用户实时用电需求、负荷曲线、可靠性需求,按照时序将每段时间内系统的运行状态、供电能力、故障状况等信息,同相应时段内用户的负荷曲线、可靠性需求进行匹配分析,以此为基础进行的可靠性评估,定义为“用户感知可靠性”评估。现用以下例子对提出“用户感知可靠性”的必要性加以阐释。

对处于同一配电系统的两个用户,设为 A、B 用户,其最大功率相同设为 P_N ,但其用电特性、日负荷曲线不同,假设 A 的用电高峰出现在中午,B 的出现在晚间。

若系统在中午发生某次故障,造成 A、B 用户均停电 2 h。对于本次事故,若按照传统可靠性评估方法,因二者 P_N 相同,停电时长相同,此次故障造成的缺电量(expected energy not supplied, EENS)数值应该相同。因此从 EENS 指标上来看,事故对 A、B 两用户负荷的影响应相同;然而事实上,由于停电发生时 A 用户处于用电高峰,B 用户并未处于用电高峰,停电对 A 用户造成的实际缺供电量应远高于 B 用户,A 用户对本次事故感知到的严重性程度也应远高于 B 用户。而传统可靠性评估指标(如 EENS)并不能对这种情况加以区分。想要揭示这种差异性,就应当考虑用户感知,将停电时段内用户的负荷曲线、可靠性需求纳入到可靠性分析评估中,而不能简单用 P_N 表示用户的用能需求。

1.2 同一配电网系统不同用户差异化可靠性需求分析

对于不同类型用户,参考文献[13]的负荷分类方法,选取商业用户、居民用户、非居民照明用户、中小学教学用户这 4 类在城市配电网中经常出现的典型用户类型进行研究。设 $P_{i,x}$ 为负荷 x 一年内第 i 个小时($i=1,2,3,\dots,8760$)的平均功率;设负荷 x 一年内第 i 个小时($i=1,2,3,\dots,8760$)发生停电的统计平均次数为 $f_{i,x}$;按照传统可靠性评估计算得到

系统内负荷年平均缺供电量期望为 E_{average} , 则负荷 x 的年差异化可靠性需求度可定义为

$$W_{x,\text{year}} = \left(\sum_{i=1}^{8760} P_{i,x} \cdot f_{i,x} \cdot 1 \text{ h} \right) / E_{\text{average}} \quad (1)$$

式中, $W_{x,\text{year}}$ 是一个无量纲的值, 它反映的是该用户实际感知到的年缺电量与系统用户年平均缺供电期望的比值, 能够反映同一系统内不同用户差异化的可靠性需求度。利用式(1), 采用文献[13]的负荷用电数据, 可计算上述4类典型城市电网负荷的 $W_{x,\text{year}}$ 值, 如表1所示。

表1 某配电网系统内典型用户可靠性需求度统计

负荷类型	$W_{x,\text{year}}$	$E_{\text{average}} / (\text{kWh} \cdot \text{a}^{-1})$
商业用户	1.23	
商业用户	1.36	
居民用户	0.95	
居民用户	0.89	
居民用户	0.98	16.28
非居民照明	1.02	
非居民照明	1.28	
中小学教学用户	1.03	

表1中, 若 $W_{x,\text{year}}$ 大于1, 说明该用户实际感知到的缺电量要高于系统平均值。 $W_{x,\text{year}}$ 越大, 表明该负荷的用电可靠性水平越低于系统平均水平, 该处负荷可能位于配电网供电的薄弱环节, 用户有较强的提高供电可靠性的需求。

表1表明, 同一配电网系统中的不同用户即使拥有相同的系统可靠性水平(系统整体 E_{average} 值一定), 各负荷点所接入的用户也会拥有不同的可靠性需求度, 客观上也会体验到差异化的用电可靠性水平。而传统的系统侧可靠性指标(如 E_{average})并不能揭示这种差异。

1.3 用户对停电事故严重性感知程度的定量分析

在定义 $W_{x,\text{year}}$ 的基础上, 给出两种用户对停电事故严重性感知的定量分析方法。

1.3.1 基于小时负荷的分析方法

此种方法以用户负荷曲线中每小时的负荷数据为基础, 假设配电网中某事故 m 始于一年中的第 $T_{m,\text{st}}$ 个小时, 结束于一年中的第 $T_{m,\text{ed}}$ 个小时, 造成了用户 x 停电, 停电持续时间为 $T_{m,\text{duration}}$, 则事故 m 对用户 x 造成的影响程度 $\lambda_{m,x}$ 可定义为:

$$T_{m,\text{duration}} = T_{m,\text{ed}} - T_{m,\text{st}} \quad (2)$$

$$P_{i,x,\text{mean}} = \left(\sum_{i=T_{m,\text{st}}}^{T_{m,\text{ed}}} P_{i,x} \cdot 1 \text{ h} \right) / T_{m,\text{duration}} \quad (3)$$

$$\lambda_{m,x} = P_{i,x,\text{mean}} / P_{N,x} \quad (4)$$

式中: $P_{i,x,\text{mean}}$ 为停电持续时间内用户 x 的平均用电

功率; $P_{i,x}$ 为用户一年中第 i 个小时内的负荷数据; $P_{N,x}$ 为用户 x 的最大用电功率。

现定义一年中任意小时内发生事故后对用户 x 造成的影响程度的平均值 $\lambda_{\text{mean},x}$ 为

$$\lambda_{\text{mean},x} = \left(\sum_{i=1}^{8760} \frac{P_{i,x}}{P_{N,x}} \right) / 8760 \quad (5)$$

则用户 x 对于本次停电事故 m 的严重性感知程度定义为

$$S_{m,x} = \lambda_{m,x} / \lambda_{\text{mean},x} \quad (6)$$

式中, $S_{m,x}$ 为一个无量纲的量。 $S_{m,x}$ 越大说明停电发生和持续时间内, 停电对用户 x 的用电可靠性体验的影响越大, 停电越有可能发生在用户用电需求较大的时段。

基于 $S_{m,x}$, 可定义配电网内全体停电用户对本次停电事故 m 感知到的严重性程度 $S_{\text{severity},m,\text{sense}}$ 为:

$$S_{m,\text{mean}} = \left(\sum_{x=1}^N S_{m,x} \right) / N \quad (7)$$

$$S_{\text{severity},m,\text{sense}} = P_{\text{loss},m} \cdot T_{m,\text{duration}} \cdot S_{m,\text{mean}} \quad (8)$$

式中: N 为事故 m 造成的停电用户总数; $S_{m,\text{mean}}$ 为停电的所有用户对于事故 m 严重性的平均感知程度; $P_{\text{loss},m}$ 为停电事故 m 所造成的总切负荷量; $S_{\text{severity},m,\text{sense}}$ 为事故 m 考虑用户感知的停电事故严重性判别指标。

如式(2)至式(8)所示, 在用户感知可靠性评估中, 停电事故严重性指标不仅考虑了停电时长和切负荷量, 还考虑了停电用户对其的严重性感知程度 $S_{m,\text{mean}}$ 。这种“感知”与负荷在停电期间的用电需求、对停电的容忍程度密切相关。因此相较于传统的停电时户数等指标, $S_{\text{severity},m,\text{sense}}$ 能够更客观地反映某次事故对配网用户用电可靠性体验的影响。

1.3.2 基于日可靠性需求度的分析方法

参考式(1), 可定义负荷 x 一年中第 n 天内的可靠性需求度(负荷 x 的日可靠性需求度) $W_{x,n,\text{day}}$ 为

$$W_{x,n,\text{day}} = \left(\sum_{i=(n-1) \cdot 24 + 1}^{(n-1) \cdot 24 + 24} P_{i,x} \cdot f_{i,x} \cdot 1 \text{ h} \right) / (E_{\text{average}} / 365) \quad (9)$$

该指标反映用户 x 第 n 天内实际感知到的日缺电量期望与系统用户平均每日缺供电量期望之间的比值。假设某次停电事故 m 发生在一年中的第 n 天, 则用户 x 对于停电事故 m 的严重性感知程度可定义为

$$S_{m,x} = W_{x,n,\text{day}} / \left(\sum_{n=1}^{365} W_{x,n,\text{day}} / 365 \right) \quad (10)$$

同理,将 $S_{m,x}$ 代入式(7)、式(8)中也可得到基于用户感知的事 故 m 严重性判别指标 $S_{\text{severity}, m, \text{sense}}$ 。

综上所述,基于小时负荷的分析方法和基于日可靠性需求度的分析方法,各有优势。基于日可靠性需求度的分析方法,适合对配电网中大量用户不同日期内对停电事故的感知程度进行快速分析,可以在配电网规划初期快速大面积地分析规划区域内各种用户对停电的容忍程度。基于小时负荷的分析方法是一种更为精益化的分析方法,能够更加准确地反映不同用户对于发生在不同时段内的停电事故严重性的感知程度,适用于对配电网某几个重点用户进行可靠性需求分析,从而为未来电力市场环境 下重点用户定制化、差异化的供电服务提供可靠性参考。

2 基于停电事故严重性分析及用户感知的配电网可靠性评估

分别从负荷侧与系统侧,提出了一系列基于用户感知的配电网可靠性评估新指标,构建了用户感知可靠性评估指标体系,旨在从用户侧、系统侧对配电网提供更客观准确的可靠性评估,并作为现有可靠性评价体系的有力补充。

2.1 负荷侧可靠性指标

传统配电网可靠性评估中,一般采用负荷点故障率 λ (次/a)、负荷点平均停电持续时间 r (h/次)、负荷点年停电时间 U (h/a) 这 3 个指标来描述负荷点的故障特征。

借鉴传统负荷点可靠性指标,针对负荷 x ,引入用户对停电事故严重性感知程度 $S_{m,x}$,可提出以下基于用户感知的负荷点可靠性指标:

1) 基于用户感知的负荷年累计停电频率 (consumer - aware annual failure rate) $f_{x, \text{aware}}$, 次/a, 为

$$f_{x, \text{aware}} = \sum_{m=1}^{N_x} S_{m,x} \quad (11)$$

式中, N_x 为用户 x 一年内所经历的总停电次数。该式代表的物理意义是:对于某次停电事故 m , 其对于年停电频率的贡献不再固定为 1 次, 还要考虑用户 x 对本次停电事故 m 的严重性感知程度; 若 $S_{m,x}$ 小于 1 (一般意味着此次故障发生在负荷用电需求较低的时段), 则对于负荷年停电频率 (总停电次数) 的贡献小于 1。

2) 基于用户感知的负荷年累计停电时长 (consumer - aware annual interruption duration index) $D_{x, \text{aware}}$, h/a, 为

$$D_{x, \text{aware}} = \sum_{m=1}^{N_x} T_{m, \text{duration}} \cdot S_{m,x} \quad (12)$$

式中,以 $T_{m, \text{duration}}$ 为基准, $S_{m,x}$ 为权值,若停电事故发生在用户负荷高峰,则 $S_{m,x}$ 权值较大,本次停电时长对总时长的贡献较大。式(12)表明不同于传统配电网可靠性评估,在用户感知可靠性评估中,并非时间长的停电事故就一定会对年累计停电时长造成较大的影响,还需要考虑其被用户感知的严重程度。比如某次时间较长的计划检修停电,若能错过该区域内负荷用电高峰,则对用户的用电体验影响并不大。

3) 基于用户感知的负荷平均停电持续时间 (consumer - aware interruption average duration) $r_{x, \text{aware}}$, h/次, 为

$$r_{x, \text{aware}} = D_{x, \text{aware}} / f_{x, \text{aware}} \quad (13)$$

该指标反映在用户感知可靠性评估下,负荷 x 每次停电的平均持续时长。该指标可反映用户感知到的系统故障恢复速度,若 $r_{x, \text{aware}}$ 值越小说明系统故障后的恢复速度越快,检修服务质量越高。

4) 借鉴用户年累计缺电量 E_x , 定义基于用户感知的用户年累计缺电量期望 $E_{\text{aware}, x}$, MWh/a, 为

$$W_{m,x, \text{loss}, \text{sense}} = P_{N,x} \cdot T_{m, \text{duration}} \cdot S_{m,x} \quad (14)$$

$$E_{\text{aware}, x} = \sum_{m=1}^{N_x} W_{m,x, \text{loss}, \text{sense}} \quad (15)$$

式(14)中, $W_{m,x, \text{loss}, \text{sense}}$ 为故障 m 对负荷 x 造成的停电量 (考虑用户感知)。 $E_{\text{aware}, x}$ 反映在用户感知可靠性评估体系下,用户 x 一年内的累计缺供电量期望值。

不同于 E_x 的计算仅考虑停电时长和切负荷量,在计算 $E_{\text{aware}, x}$ 时引入了用户 x 对每次事故 m 的严重性感知程度 $S_{m,x}$, 因此相比传统可靠性评估中的用户年缺供电量期望指标, $E_{\text{aware}, x}$ 能从用户侧更加客观地反映该用户本年内实际感知到的缺供电量。

5) 负荷小时停电容忍度指标 $T_{\text{Tot}, i, x}$ 可由式(16)一式(19)定义:

$$\lambda_{i,x} = P_{i,x} / P_{N,x} \quad (16)$$

$$S_{i,x} = \lambda_{i,x} / \lambda_{\text{mean}, x} \quad (17)$$

$$W_{i,x, \text{loss}, \text{sense}} = P_{i,x} \times 1 \text{ h} \quad (18)$$

$$T_{\text{Tot}, i, x} = 1 / \left(S_{i,x} + \frac{W_{i,x, \text{loss}, \text{sense}}}{E_{\text{aware}, x} / 8760} \right) \quad (19)$$

式中: $S_{i,x}$ 为负荷 x 在第 i 个小时内如果遭遇持续1 h 整的停电事故,对该次停电事故的严重性感知程度; $W_{i,x,loss,sense}$ 为这个小时内负荷 x 因停电造成的缺电量。负荷小时停电容忍度指标 $T_{Tol,i,x}$ (本指标是一个无量纲的量)反映负荷 x 在一年中的第 i 个小时内对这一小时内发生停电事故的容忍程度,其值越小说明该小时内负荷 x 越不容许停电。

6)在负荷小时停电容忍度指标 $T_{Tol,i,x}$ 的基础上,定义负荷年度停电事故平均容忍度 $T_{Tol,year,x}$ 为

$$T_{Tol,year,x} = \left(\sum_{i=1}^{8760} T_{Tol,i,x} \right) / 8760 \quad (20)$$

$T_{Tol,year,x}$ 可以整体反映一年内负荷 x 对于停电事故的平均容忍程度。对于 $T_{Tol,i,x}$ 、 $T_{Tol,year,x}$ 而言,其值越大代表用户 x 对于停电事故的容忍程度越高,对可靠性的要求就越低。在实际计算中,可定义基于用户感知的负荷 x 对停电事故的敏感程度为

$$S_{sensitive,x} = 1/T_{Tol,x} \quad (21)$$

将 $T_{Tol,i,x}$ 、 $T_{Tol,year,x}$ 分别代入式(21)可得到 $S_{sensitive,i,x}$ 、 $S_{sensitive,year,x}$ 。与容忍程度相反, $S_{sensitive,x}$ 的值越大,说明用户对于可靠性的要求越高,对于停电事故越敏感。

2.2 系统整体可靠性指标

设系统中含有 M 个负荷用户,在传统可靠性评估指标中,系统用户年平均停电频率指标 F_{system} ,次/(户·a),定义为

$$F_{system} = \sum_{x=1}^M f_x / M \quad (22)$$

式中, f_x 为用户 x 一年内经历的停电总次数。

借鉴 F_{system} 的定义,引入用户感知可靠性的概念,根据式(11),可定义基于用户感知的系统用户年平均停电频率指标(consumer-aware average interruption frequency index) $F_{aware,system}$,次/(户·a),为

$$F_{aware,system} = \frac{\sum_{x=1}^M (f_{x,aware} \cdot S_{sensitive,year,x})}{\sum_{x=1}^M S_{sensitive,year,x}} \quad (23)$$

式中: $f_{x,aware}$ 为基于用户感知的负荷 x 年累计停电频率; $S_{sensitive,year,x}$ 为基于用户感知的负荷 x 对停电事故敏感程度的年平均值。在 $F_{aware,system}$ 的计算中, $f_{x,aware}$ 考虑了用户对于其所经历的每次停电事故的严重性感知程度, $S_{sensitive,year,x}$ 考虑了用户对于停电事故的年平均敏感程度。相较于传统频率指标,该指标能够从用户感知的角度,反映系统中所有用户

所感知到的平均停电频率。

传统可靠性计算中,系统用户年平均累计停电时长 D_{system} ,h/(户·a),可定义为

$$D_{system} = \sum_{x=1}^M D_x / M \quad (24)$$

式中, D_x 为用户 x 的年累计停电时长。

引入用户感知可靠性概念,定义基于用户感知的系统用户年平均累计停电时长(consumer-aware average interruption duration index) $D_{aware,system}$,h/(户·a),为

$$D_{aware,system} = \frac{\sum_{x=1}^M (D_{x,aware} \cdot S_{sensitive,year,x})}{\sum_{x=1}^M S_{sensitive,year,x}} \quad (25)$$

式中, $D_{x,aware}$ 为用户 x 的基于用户感知的年累计停电时长。相比于 D_x , $D_{x,aware}$ 考虑了不同用户对于不同停电事故的严重性感知程度,以负荷 x 对停电事故敏感程度的年平均值 $S_{sensitive,year,x}$ 作为 $D_{x,aware}$ 的权值,通过加权平均的办法得到计算结果。对于重要用户,由于其 $S_{sensitive,year,x}$ 值较高,即使其 $D_{x,aware}$ 较短,也将对系统用户平均停电时长产生较大影响。

传统可靠性计算中,系统用户单次停电事故平均持续时间 $D_{system,single}$,h/(次·户·a),可定义为

$$D_{system,single} = D_{system} / F_{system} \quad (26)$$

引入用户感知可靠性的概念后,基于用户感知的系统用户单次停电事故平均持续时间 $D_{system,single,aware}$,h/(次·户·a),可定义为

$$D_{system,single,aware} = \frac{\sum_{x=1}^M (D_{x,aware} \cdot S_{sensitive,year,x})}{\sum_{x=1}^M (f_x \cdot S_{sensitive,year,x})} \quad (27)$$

式中, f_x 为用户 x 一年所经历的停电次数。通过引入 $S_{sensitive,year,x}$,考虑了用户对于每次停电事故的严重性感知程度及负荷 x 对停电事故敏感程度的年平均值,新指标相较于 $D_{system,single}$ 能更加准确地反映用户侧实际感知到的平均故障持续时间。

传统可靠性评估中,系统年累计缺电量期望 E_{system} ,MWh/a,可定义为

$$E_{system} = \sum_{x=1}^M E_x \quad (28)$$

该指标本质为系统中每个用户年累计缺电量之和。借鉴其定义,并引入用户感知可靠性评估概念

之后,基于用户感知的系统年累计缺电量期望

$E_{\text{system,aware}}$, MWh/a, 可定义为

$$E_{\text{system,aware}} = \sum_{x=1}^M E_{\text{aware},x} \quad (29)$$

式中, $E_{\text{aware},x}$ 为基于用户感知的单个年累计缺电量期望,可由式(15)计算得到。 $E_{\text{system,aware}}$ 与系统内停电发生时间段密切相关,若系统故障多发于负荷高峰期,则相比于 E_{system} ,本指标数值将增大,以此体现用户对于用电高峰时段遭受停电的“不满”。故 $E_{\text{system,aware}}$ 可有效反映配电网用户对供电服务水平的满意程度。

3 算例分析

采用 IEEE-RBTS 母线 2 馈线 4 作为算例进行分析,其拓扑结构如图 1 所示^[14]。一个包含有分布式光伏(PV)、分布式风机(WG)、储能装置(ESS)以及小型柴油发电机组(Diesel)的微网于 PCC 节点接入到配电网中。PV、WG、ESS、Diesel 的参数列在表 2 中^[15],MTTF 为设备的平均无故障工作时间,MTTR 为平均故障修复时间。表 3 列出了用户负荷 LP16-22 的基本信息^[13],其负荷曲线参考文献[13]。

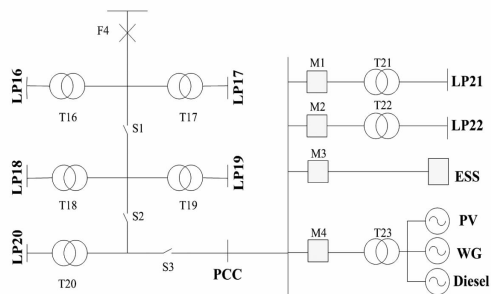


图 1 算例拓扑结构

表 2 DG 及储能设备参数

设备种类	PV	ESS	WG	Diesel
数目	4	4	2	2
额定功率/MW	0.50	1.00	0.60	0.80
MTTF/h	900	970	1000	600
MTTR/h	20	30	50	50
备注	20 × 20 阵列; CNPV-230 Wp 串并联	强迫 停运率 为 0.03	切入风速 3 m/s; 额定风速 12 m/s; 切出风速 25 m/s	启动 失败率 0.2; 启动时间 0.1 h

算例中的线缆、变压器、断路器等元件的参数参考文献[14]。风速、光照、大气透明度等气象及天气因素参考某市 2010 年的相关数据^[15]。微网的孤

表 3 用户负荷信息

负荷名称	负荷类型	最大功率 $P_{N,x}$ /MW
LP16	商业用户	4.56
LP17	商业用户	3.04
LP18	居民用户	1.35
LP19	居民用户	1.08
LP20	非居民照明	2.97
LP21	非居民照明	2.43
LP22	中小学教学用电	1.71

岛转换成功率为 0.8。快速启动的柴油发电机组可以在 0.1 h 之内达到其额定功率。在可靠性计算分析中采用序贯蒙特卡洛法。

首先,假设算例中的所有元件、设备、装置都运行在其原本的可靠性水平下,此种情况记为 S1。然后选择储能装置 ESS,将其 MTTF 提高 25% (MTTF 提高相当于增加其平均无故障工作时间,也就提高了元件可靠性),此种情况记为 S2。

对于 S1、S2 两种情况,采用所提出的用户感知可靠性评估方法,结合序贯蒙特卡洛法,首先计算每种情况下,传统评估指标体系中每个用户的可靠性指标,如表 4 所示;然后再计算每种情况下,每个用户的基于用户感知的可靠性指标,如表 5 所示。

表 4 负荷侧传统可靠性指标

负荷名称	情况	$\lambda/$ (次·a ⁻¹)	$U/$ (h·a ⁻¹)	$r/$ (h·次 ⁻¹)	$E_x/$ (MWh·a ⁻¹)
LP16	S1	2.31	4.22	1.83	13.50
	S2	2.30	3.97	1.73	12.70
LP17	S1	2.31	4.22	1.83	9.71
	S2	2.30	3.97	1.73	9.13
LP18	S1	1.18	2.11	1.79	2.53
	S2	1.09	1.87	1.72	2.24
LP19	S1	1.18	2.11	1.79	1.90
	S2	1.09	1.87	1.72	1.68
LP20	S1	2.21	4.02	1.82	8.84
	S2	2.09	3.76	1.80	8.27
LP21	S1	2.08	3.76	1.81	7.52
	S2	1.95	3.50	1.79	7.00
LP22	S1	1.56	3.34	2.14	5.01
	S2	1.46	3.01	2.06	4.52

在负荷侧可靠性指标计算结果的基础上,首先,计算 S1、S2 情况下系统侧传统可靠性指标;然后,按第 2.2 节提出的系统整体可靠性指标计算方法,计算 S1、S2 情况下系统侧基于用户感知的可靠性新指标。计算结果如表 6 所示。

表5 负荷侧基于用户感知的可靠性指标

负荷名称	情况	$f_{x,aware}/$ (次·a ⁻¹)	$D_{x,aware}/$ (h·a ⁻¹)	$r_{x,aware}/$ (h·次 ⁻¹)	$E_{aware}/$ (MWh·a ⁻¹)
LP16	S1	2.47	4.64	2.24	16.17
	S2	2.42	4.43	1.99	13.78
LP17	S1	2.20	3.89	1.91	8.02
	S2	2.12	3.50	1.78	7.43
LP18	S1	1.03	2.00	1.61	2.31
	S2	0.99	1.61	1.43	2.06
LP19	S1	0.90	1.53	1.45	1.39
	S2	0.85	1.19	1.21	1.09
LP20	S1	2.15	3.71	1.89	8.12
	S2	2.09	3.39	1.74	7.11
LP21	S1	2.01	3.52	2.02	7.09
	S2	1.90	3.11	1.87	6.24
LP22	S1	1.24	2.32	1.78	3.43
	S2	1.14	2.02	1.51	2.89

表6 系统侧传统指标及用户感知可靠性指标

指标	情况		可靠性指标 改善幅度/%
	S1	S2	
$F_{system}/$ (次·户 ⁻¹ ·a ⁻¹)	1.83	1.75	-4.12
$F_{aware,system}/$ (次·户 ⁻¹ ·a ⁻¹)	1.86	1.77	-4.84
$D_{system}/$ (h·户 ⁻¹ ·a ⁻¹)	3.40	3.14	-7.78
$D_{aware,system}/$ (h·户 ⁻¹ ·a ⁻¹)	4.19	3.82	-8.83
$D_{system,single}/$ (h·次 ⁻¹)	1.86	1.79	-3.76
$D_{system,single,aware}/$ (h·次 ⁻¹)	1.97	1.81	-8.12
$E_{system}/$ (MWh·a ⁻¹)	49.01	45.54	-7.82
$E_{system,aware}/$ (MWh·a ⁻¹)	53.21	48.26	-9.30

通过对比分析表4、表5中的数据,可以得到以下结论:

1)提升系统中储能装置ESS的可靠性,能明显改善传统可靠性指标及用户感知可靠性指标。这表明ESS对于系统的可靠性有着重要的支撑作用。

2)将两表中的 λ 与 $f_{x,aware}$ 、 U 与 $D_{x,aware}$ 、 r 与 $r_{x,aware}$ 、 E_x 与 $E_{aware,x}$ 对比分析可以发现:负荷LP16、LP17、LP20、LP21在采用基于用户感知可靠性指标进行评估后,相关指标数值有所上升,这说明系统中造成上述负荷停电的故障可能大多发生在其用电需求较大的时段,造成负荷对停电事故严重性的感知程度较高;而负荷LP18、LP19、LP22的情况正好相反。这表明所提出的“用户感知可靠性评估指标”相较于传统指标,能够有效揭示停电事故发生时刻对于不同用户用电可靠性体验的差异化影响。

3)传统可靠性指标 λ 、 U 、 r 不能区分接在同一负荷点上的不同用户的差异化可靠性用电体验。以LP16、LP17为例,二者接在同一负荷点,其 λ 、 U 、 r 是相同的。实际上LP16、LP17因为负荷曲线的不

同,同一时间段内的用电需求存在差异,在经历同一停电事故时,感知到的停电事故严重程度可能存在差异,这种差异应体现在负荷侧可靠性指标数值的不同上。表5中,LP16、LP17的 $f_{x,aware}$ 、 $D_{x,aware}$ 、 $r_{x,aware}$ 数值均不同,这说明用户感知可靠性指标,能够将停电持续时段内用户差异化可靠性需求、负荷曲线纳入评估过程中,相较于传统指标,获得更加客观、更加尊重用户用电体验的负荷侧可靠性评估结果。

对表6中数据展开分析,可得出以下结论:

1)无论采用传统可靠性指标或用户感知指标,系统中储能可靠性的提升,将有助于系统整体可靠性的提升。

2)ESS可靠性的提升,使用户感知可靠性指标的提升幅度要大于传统可靠性指标的提升幅度。这是因为储能装置能够在配电网系统发生故障的时段为部分用户提供供电支撑,甚至在发生短时故障时确保某些用户不停电。从而显著提升用户侧感受到的用电可靠性。

综合分析表4至表6中的数据,可以得到如下结论:

1)用户感知可靠性指标评估,将不同用户的实时负荷曲线、差异化可靠性需求、对停电事故严重性的不同感知程度,纳入到了可靠性评估指标的计算中。相比于传统可靠性指标,能得到更加客观、更加尊重用户用电体验的可靠性评估结果。

2)所提出的新指标,考虑了故障时刻、故障时长以及故障时段内受影响用户的负荷曲线、可靠性需求、停电事故容忍度。因此,相较于传统评估指标和方法,能够在评估结果中体现用户对于供电可靠性的差异化感受,从而指导供电公司有针对性地提高供电服务水平。

3)表6中S1、S2的数值变化可以体现储能可靠性提升对于系统整体用户感知可靠性的贡献程度。若将储能换成其他元件,如断路器、变压器等,采用同样的计算步骤也可得到其对系统侧用户感知可靠性的提升程度。按照上述步骤,可以遍历配电网中每个元件,分析每个元件的可靠性提升对于系统可靠性的改善程度,从而获得元件可靠性重要序列,为未来配电网规划建设、检修维护提供有价值的参考。

4 结 语

针对传统可靠性指标不能完全客观地反映用户

侧感知到的供电可靠性水平、系统整体可靠性指标与用户侧感知到的用电体验存在差异这两个问题,开展了如下工作:

1)提出了用户感知可靠性的定义,并提出了基于用户负荷曲线的停电事故严重性感知程度定量分析方法。

2)分别从用户侧和系统侧,提出了一系列基于用户感知的可靠性评估指标,建立了相应指标体系。

3)算例结果表明:相较于传统可靠性评估指标,所提出的方法、指标能够得到更加客观、更加尊重用户用电体验的可靠性评估结果,且不需要对可靠性评估方法(蒙特卡洛法)进行修改调整,可直接嵌入到现有可靠性评估过程中,程序代码修改量较小,具有较强的可实施性。

4)算例中包含分布式电源、储能及微网,算例结果表明所提方法指标能够较好适应含分布式电源、储能及微网的未来配电网可靠性评估需求。

5)后续研究可基于用户感知可靠性,针对不同用电可靠性要求的用户,对其停电事故损失进行经济性估算,分析基于用户感知可靠性的投资边际成本、边际效益。

综上,所做工作可对未来含分布式电源、储能及微网的配电系统可靠性评估、规划投资建设提供了重要参考。

参考文献

- [1] Ghorani R, Fotuhi - Firuzabad M, Dehghanian P, et al. Identifying Critical Components for Reliability Centred Maintenance Management of Deregulated Power Systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(9): 828 - 837.
- [2] 曾嘉思,徐习东,赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582 - 2589.
- [3] Babu S, Hilber P, Jurgensen J H. On the Status of Reliability Studies Involving Primary and Secondary Equipment Applied to Power System [C]. IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied To Power Systems, 2014.
- [4] Karki R, Billinton R. Reliability/Cost Implications of PV and Wind Energy Utilization in Small Isolated Power Systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(4): 368 - 373.
- [5] Goel L, Billinton R. Utilization of Interrupted Energy Assessment Rates to Evaluate Reliability Worth in Electric Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 929 - 936.
- [6] 芦晶晶,赵渊,赵勇帅,等. 含分布式电源配电网可靠性评估的点估计法[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2250 - 2257.
- [7] Brean M, Herman G. Solution to Power Supply Reliability and Distortion Problems When Supplying Sensitive Loads [C]. International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 1991.
- [8] Billinton R, Cui L, Pan Z. Quantitative Reliability Considerations in the Determination of Performance - based Rates and Customer Service Disruption Payments[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(6): 640 - 644.
- [9] Figueiredo F C, Flynn P C. Using Diurnal Power Price to Configure Pumped Storage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 804 - 809.
- [10] Olsina F, Weber C. Stochastic Simulation of Spot Power Prices by Spectral Representation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1710 - 1719.
- [11] 刘子秋,黄民翔. 基于可靠性与经济性的计及微电源自身特性的微电网能量优化配置[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1352 - 1357.
- [12] 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 - 62.
- [13] 周凯. 大数据技术在线损和用电特性分析中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [14] Allan R N, Billinton R, Sjarief I, et al. A Reliability Test System for Educational Purposes - basic Distribution System Data and Results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813 - 820.
- [15] Wang S, Li Z, Wu L, et al. New Metrics for Assessing the Reliability and Economics of Microgrids in Distribution System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2852 - 2861.

作者简介:

刘立扬(1990),男,博士,工程师,研究方向为配电网规划、电力系统可靠性分析;

李鑫(1990),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统潮流计算、电网稳定性分析评估;

张文涛(1982),男,硕士,高级工程师,从事电网规划设计工作;

魏俊(1978),男,硕士,高级工程师,从事配电网规划评审及配电网科技项目工作;

叶圣永(1974),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为配电网规划、含分布式能源及储能的配电网。

(收稿日期:2020-11-17)