## 高渗透率可再生能源配电网测试系统建模与有效性分析

祖文静<sup>1</sup>,李 勇<sup>1</sup>,谭 益<sup>1</sup>,孙充勃<sup>2</sup>,刘嘉彦<sup>1</sup>,乔学博<sup>1</sup>,李敬如<sup>2</sup>,宋 毅<sup>2</sup> (1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;2. 国网北京经济技术研究院,北京 102209)

摘要:提出了高渗透率可再生能源配电网测试系统的评估指标,基于中国某光伏扶贫县配电网的实际数据, 建立了含高渗透率可再生能源的配电系统。该系统含居民、商业、工业等负荷,同时接入了小水电、光伏发电 等可再生能源,能体现可再生能源渗透率较高而带来的馈线末端高/低电压等问题。根据实测的负荷与可再 生能源全年时序特性进行潮流仿真与 N-1 安全校验,并结合指标评估验证系统有效性。

关键词:配电网;测试系统;高渗透率;评估指标;时序特性 中图分类号:TM 711 
文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.007

### 0 引言

可再生能源逐渐成为电力系统的重要组成部分,分布式发电DG(Distributed Generation)和大电网相结合是未来电力工业的发展方向<sup>[1-2]</sup>。中国的可再生能源发展迅速,电力发展"十三五"规划制订了2020年非化石能源消费比重达到15%的目标<sup>[3]</sup>。中国配电网的可再生能源渗透率不断增加,引起电压越限等问题<sup>[4-6]</sup>。此外,合理调用可再生能源能帮助解决负荷不断增长等现象引起的配电网安全性问题<sup>[1,7]</sup>。分析和解决高渗透率可再生能源带来的问题及研究有效利用可再生能源的方法需要合适的配电网测试系统作为支撑。

为验证配电网的网络重构与降损方法,文献 [8]在1989年虚拟构建了IEEE 33节点系统,该系 统的电压等级为12.66 kV,含有5个联络开关,可用 于灵活执行网络重构。文献[9]研究了电容器在辐 射状配电网中的配置问题,从PG&E 网络中抽取69 节点系统,该系统的电压等级为12.66 kV,是典型的 辐射状多分支配电网。IEEE 123节点系统与 IEEE 13、IEEE 34、IEEE 37节点系统作为IEEE 不平衡辐 射状配电网测试系统于1991年被提出<sup>[10]</sup>,该配电 网测试系统以4.16 kV 电压等级运行,配置了不平 衡负荷、调压器、4个并联电容器组、11个联络开关。

除上述典型测试系统以外,文献[11]采用一个 含 11 条馈线、13 个联络开关的中国台湾某配电网 模型,研究网络重构优化方法。文献[12]通过构建 爱尔兰某配电网系统模型,验证提升 DG 渗透率的 方案。文献[13]选取瑞士某配电网的一条馈线建 模,验证电压协调控制算法。文献[14]采用意大利 某双馈线配电网系统,验证考虑网络无功潮流约束 的电压动态控制方法。

收稿日期:2018-11-26;修回日期:2019-05-27 基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900100) Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900100) 然而,现有典型测试系统虽数据详尽、应用广 泛,但大多是多年前建立,已难以适用于可再生能源 渗透率较高的配电网分析与控制研究。此外,国外 配电网电压等级与国内实际配电网多不一致,线路 参数的差别可能导致研究结论的差异<sup>[15]</sup>。部分测 试系统尽管提高了可再生能源渗透率,但结构较简 单,系统规模较小,DG 种类单一,仍具有一定局限性。

本文以中国某光伏扶贫县配电网的结构和数据 为基础,建立了含高渗透率可再生能源的配电网测 试系统。首先提出对高渗透率可再生能源配电网测 试系统的基本需求与评估指标,然后介绍本文测试 系统,最后通过一系列指标评估、典型场景下的潮流 计算结果与 N-1 安全校验证明系统的有效性。

# 高渗透率可再生能源配电网测试系统评估指标

高渗透率可再生能源配电网测试系统需体现配 电网的基本特征,其基本需求如下:应能体现实际配 电网的特征,如提供线路的线型与长度、负荷、可再 生能源配置等数据;应为辐射状网络,具有供电半径 较长、负荷多样化、可再生能源渗透率较高等特征; 能反映配电网的典型问题,如末端低电压/高电压问 题等。本节分别从网架结构、供电物理半径、负荷与 可再生能源分布、渗透率等方面提出如下高渗透率 可再生能源配电网测试系统的评估指标。

(1) 网架结构: 配电网多为辐射状, 且常采用联络开关满足负荷转供需求, 以提高供电可靠性<sup>[16-17]</sup>。

因此定义拓扑结构指标和供电可靠性指标来描述系统的网架结构特征,其中拓扑结构指标为系统中支路数与节点数的比值,即:

$$K_{\rm t} = n_{\rm br} / n_{\rm node} \tag{1}$$

其中, $n_{br}$ 为系统支路数; $n_{node}$ 为节点数。当 $K_t>1$ 时, 系统为环形网络;当 $K_t \leq 1$ 时,则为辐射状网络。

供电可靠性指标为系统中联络开关数与馈线数的比值,即:

$$K_{\rm c} = n_{\rm c} / n_{\rm f} \tag{2}$$

其中, $n_e$ 为系统联络开关数; $n_f$ 为馈线数。 $K_e$ 越大,则系统的负荷转供能力越强,可靠性越高。

(2)供电物理半径:配电网线路电阻与电抗的 比值较大,供电半径相对较长,线损较大,常出现末 端低电压问题<sup>[16,18]</sup>。定义供电物理半径指标为:

$$K_{\rm r} = \max\{Z_1, Z_2, \cdots, Z_i, \cdots, Z_n\}$$
(3)

其中, $Z_i$ 为系统中配电变压器到负荷点 i 的线路阻抗和, $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_n\}$ 为系统中配电变压器到所有负荷点线路阻抗和的集合。 $K_r$ 与馈线首末端最大电压降的大小成正比, $K_r$ 越大,则系统出现末端低电压问题的可能性越高。

(3)负荷分布:配电网负荷点多且分散,负荷种 类多样化<sup>[16]</sup>。定义负荷分布指标为系统中负荷点 的数量与节点数的比值,即:

$$K_{\rm l} = n_{\rm load} / n_{\rm node} \tag{4}$$

其中,*n*<sub>load</sub>为系统中负荷点数量。该指标反映了负荷的分布特点。

(4)可再生能源分布:配电网中 DG 常沿馈线及 其分支线分散分布<sup>[16]</sup>。定义可再生能源分布指标为 系统中可再生能源并网点数量与节点数的比值,即:

$$K_{\rm DG} = n_{\rm DG} / n_{\rm node} \tag{5}$$

其中,*n*<sub>DC</sub>为系统可再生能源并网点的数量。该指标反映了可再生能源的分布特点。

(5)渗透率:为了描述测试系统的渗透率特征,

本文采取了能量渗透率<sup>[19]</sup>、容量渗透率以及极端渗 透率3个渗透率指标,分别如式(6)—(8)所示。其 中定义极端渗透率指标为可再生能源安装容量与年 最小负荷比值。

$$K_{\rm P1} = Q_{\rm DG} / Q_{\rm load} \tag{6}$$

$$K_{\rm P2} = S_{\rm DG} / P_{\rm lmax} \tag{7}$$

$$K_{\rm P3} = S_{\rm DG} / P_{\rm lmin} \tag{8}$$

其中, $Q_{DC}$ 为系统中可再生能源全年发电量; $Q_{load}$ 为 负荷全年耗电量; $S_{DC}$ 为系统中可再生能源安装容 量; $P_{lmax}$ 为系统年最大负荷; $P_{lmin}$ 为系统年最小负荷。 比较 $K_{P2}$ 与 $K_{P3}$ ,可直观得出系统年最大负荷与年最 小负荷的差距。

#### 2 高渗透率可再生能源配电网测试系统

根据某光伏扶贫县电网数据,本文采用电力系统仿真软件 DIgSILENT 搭建了高渗透率可再生能源 配电网测试系统。选取 3 条典型 10 kV 馈线,搭建 出系统辐射状结构,并设置各馈线上负荷点与可再 生能源接入点位置。根据实际系统,设置线路、负荷、 可再生能源等初始参数,配置负荷与可再生能源时序 特性数据。该系统详细参数见附录中表 A1—A4。

配电网测试系统单线图如图 1 所示,该配电网 测试系统含 3 条馈线、5 个联络开关。其中,馈线 I 与Ⅲ均接入分布式光伏发电,馈线 I 接入小水电;馈 线 I、II、Ⅲ的负荷种类分别以居民负荷、工业负荷、 商业负荷为主。表 1 给出了 3 条馈线的对比数据。





T-11. 2 C.

Table 1 Feeder data 参数 馈线 I 馈线Ⅱ 馈线Ⅲ 节点数量 48 29 26 线路电阻/( $\Omega \cdot km^{-1}$ ) 0.46 0.46 0.33 线路电抗/( $\Omega \cdot km^{-1}$ ) 0.433 0.433 0.380 DG 装机容量/MW 0.76 3.44 3.78 DG 并网点数量 15 4 6 负荷大小/MW 2.98 2.6 2.19 负荷点数量 29 48 26 光伏装机容量/MW 0.76 3.78 0 小水电装机容量/MW 3.44 0 0

表1 馈线数据

图 2 为各馈线主要负荷的四季晴雨日特性曲线 图(负荷为标幺值),图中夏季晴天负荷相对较大, 居民负荷早晚居多,工业负荷工作时间多,商业负荷 夜晚为高峰期。图 3 为光伏四季晴雨典型出力日特 性曲线图(光伏出力为标幺值),图中光伏出力夏多 冬少,晴多雨少,午时多早晚少,具有明显的间歇性 与波动性。



图 2 各馈线主要负荷四季晴雨日特性曲线

Fig.2 Daily characteristic curves of feeder load in sunny and rainy days of four seasons





#### 3 测试系统性能评估

本文系统可运行于不同的拓扑结构,表2列出 了其中5种主要拓扑结构,每种拓扑结构下潮流均 收敛。本文重点分析了拓扑结构1下的电网情况。

表 3 为本文测试系统与其他典型测试系统的指标数据对比。表中系统 1 为文献[8]中 IEEE 33 节点系统,系统 2 为文献[9]中 PG&E 69 节点系统,系

表 2 主要拓扑结构

Table 2 Main topological structures

独构			开关状态			潮流是否
扫小り	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	$K_4$	K <sub>5</sub>	收敛
1	闭合	闭合	闭合	闭合	断开	是
2	断开	闭合	闭合	闭合	断开	是
3	闭合	断开	闭合	闭合	断开	是
4	闭合	闭合	断开	闭合	闭合	是
5	闭合	闭合	闭合	断开	闭合	是

## 表 3 测试系统指标对比

指标       系统 1       系统 2       系统 3       系统 4       系统 5       系统 6       系统 7       本文 系统         电压       12.66       12.66       4.16       11.4       35       11       20       10 $^n_{node}$ 33       69       123       83       6       14       32       108 $K_t$ 0.97       0.99       0.96       1       1       0.93       0.94       0.99 $K_c$ 5/1       5/1       11/1       13/11       1/2       0       0       5/3 $K_r$ 11.06       9.54        1.69       13.80       2.54       10.25       6.35 $K_1$ 0.97       0.70       0.69       0.80       0.83       0.50       0.88       0.99         负荷时       ×       ×       ×       ×       ×       ×       × $$ $$ KDG       0       0       0       0       1       0.14       0.25       0.23         DG 時       ×       ×       ×       ×       ×       ×       × $$ Kp1       -       -       -       - <td< th=""><th>Table 3</th><th>, com</th><th>parison</th><th>or man</th><th>es amo</th><th>ing unite</th><th>erent tes</th><th>si syste</th><th>ms</th></td<>	Table 3	, com	parison	or man	es amo	ing unite	erent tes	si syste	ms
电压 等级/kV         12.66         12.66         4.16         11.4         35         11         20         10 $n_{node}$ 33         69         123         83         6         14         32         108 $K_t$ 0.97         0.99         0.96         1         1         0.93         0.94         0.99 $K_c$ 5/1         5/1         11/1         13/11         1/2         0         0         5/3 $K_r$ 11.06         9.54         -         1.69         13.80         2.54         10.25         6.35 $K_1$ 0.97         0.70         0.69         0.80         0.83         0.50         0.88         0.99           负荷时         ×         ×         ×         ×         ×         × $$ $$ <i>K</i> <sub>DG</sub> 0         0         0         1         0.14         0.25         0.23           DG 时         ×         ×         ×         ×         ×         × $$ $K_{P1}$ -         -         -         -         -         0.49 $K_{P2}$	指标	系统 1	系统 2	系统 3	系统 4	系统 5	系统 6	系统 7	本文 系统
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	电压 等级/kV	12.66	12.66	4.16	11.4	35	11	20	10
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$n_{ m node}$	33	69	123	83	6	14	32	108
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$K_{\rm t}$	0.97	0.99	0.96	1	1	0.93	0.94	0.99
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$K_{ m c}$	5/1	5/1	11/1	13/11	1/2	0	0	5/3
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$K_{\rm r}$	11.06	9.54		1.69	13.80	2.54	10.25	6.35
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$K_1$	0.97	0.70	0.69	0.80	0.83	0.50	0.88	0.99
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	负荷时 序特性	×	×	×	×	×	×		$\checkmark$
DG 时       ×       ×       ×       ×       ×       ×       ×       × $\sqrt{\sqrt{K_{P1}}}$ $K_{P1}$ -       -       -       -       -       -       0.49 $K_{P2}$ -       -       -       2.06       6       -       1.03 $K_{P3}$ -       -       -       5.78       -       8.55	$K_{\rm DG}$	0	0	0	0	1	0.14	0.25	0.23
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	DG 时 序特性	×	×	×	×	×	×		$\checkmark$
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$K_{\rm P1}$					—		—	0.49
$K_{\rm P3}$ — — — — 5.78 — — 8.55	$K_{\rm P2}$	—	—	—	—	2.06	6	—	1.03
	$K_{\rm P3}$	_	_	_	_	5.78	_	_	8.55

注:√表示系统中考虑了时序特性;×表示系统中未考虑时序 特性。

统3为文献[10]中IEEE 123节点系统,系统4为文 献[11]中中国台湾某配电网模型,系统5为文献 [12]中爱尔兰某配电网模型,系统6为文献[13]中 瑞士某配电网模型,系统7为文献[14]中意大利某 配电网模型。由表3可知,本文系统的K。约为 1.67,转供电可靠性较高;K1为0.99,符合配电网负 荷点多的特征;KP1接近50%,KP2超过100%,KP3值 为8.55,分别反映了可再生能源对系统的年贡献、安 装规模及系统年最大负荷与年最小负荷的差距。

进一步地,通过高渗透率可再生能源-低负荷 HPLL(High Penetration of renewable resource-Low Load)、低渗透率可再生能源-高负荷 LPHL(Low Penetration of renewable resource-High Load)2种典型 场景下的潮流仿真与系统 N-1 安全校验评估本文 测试系统的有效性。

#### 3.1 HPLL 场景

该场景为高电压问题严重的夏季某天,图4为 该场景下的节点电压分布曲线(电压为标幺值,后 同)。图中电压分布大致含有2种波动趋势,原因在 于不同馈线配置有不同类型的可再生能源与负荷, 相应的时序特性不同。

图 5 为各馈线末端节点的电压曲线、各馈线负 荷特性与可再生能源出力特性(功率为标幺值,后



图 4 HPLL 场景下的节点电压分布曲线







amplitude curves of end node under HPLL scene

同)。图中馈线Ⅱ的小水电出力平缓,幅值较大;馈 线Ⅰ与Ⅲ的光伏出力于11:00左右达到峰值。3条 馈线负荷特性各有特点,馈线Ⅱ主要为居民负荷,早 晚为用电高峰期;馈线Ⅲ主要为工业负荷,上午与下 午工作时段为用电高峰期;馈线Ⅲ主要为商业负荷, 夜晚为用电高峰期。3条馈线末端节点电压幅值波 动均与可再生能源出力特性成正比,与负荷特性成 反比,馈线Ⅱ电压波动相对较小,幅值始终较高;馈 线Ⅰ与Ⅲ电压波动较大,中午时段光伏出力特性高 峰与负荷特性低谷的重叠使电压幅值达到峰值。

#### 3.2 LPHL 场景

该场景为低电压问题严重的冬季某天,图6为 该场景下的节点电压分布曲线。由图可知,电压普 遍较低,3条馈线电压最低的节点分别为节点49、 81、108,均为馈线的末端节点。



图 6 LPHL 场景下的节点电压分布曲线

Fig.6 Node voltage distribution curves under LPHL scene

图 7 为该场景下各馈线末端节点的电压曲线、 各馈线负荷特性与可再生能源出力特性。该场景下 的小水电出力约为 HPLL 场景的 20%,因为冬季为 枯水期;光伏出力峰值也比 HPLL 场景小,源于冬季 光照强度小于夏季。馈线Ⅱ电压波动相对较小,幅 值始终较低;馈线Ⅰ与Ⅲ电压波动较大,在傍晚时段 光伏出力特性较低且负荷特性较大,使电压幅值降 到低谷。





3.3 系统 N-1 安全校验

不考虑可再生能源出力与主变容量约束,对系统馈线进行 N-1 安全校验,馈线 Ⅰ、馈线 Ⅱ线路容

量为 4.76 MV·A,馈线Ⅲ线路容量为 5.83 MV·A。节 点电压下限、上限分别为 0.90、1.10 p.u.。考虑到负 荷的时序特性,在进行 N-1 安全校验时,当前负荷 功率设置为图 2 中负荷功率的均值。

N-1 安全校验的部分结果如表 4 所示,表中转 供馈线最小节点电压为标幺值。由表 4 可知,馈线 Ⅱ负荷可全部转供给馈线Ⅲ,均满足线路容量约束 与节点电压约束;而馈线Ⅲ中有 2 条线路未通过 N-1 安全校验,此时馈线Ⅲ容量还有较多裕度,但因电压 约束的限制而不能承担更多负荷,与实际中因电网 建设滞后于负荷增长导致配电网安全性降低的情况 相符。可再生能源的并入可以提升末端节点电压, 为转供更多负荷提供可能。因此,本文系统也可用 于高渗透率可再生能源配电网供电安全性的提升方 法研究。

表 4 系统部分 N-1 安全校验结果 Table 4 Part results of N-1 security criterion evaluation

断开 线路	所属 馈线	转供负 荷量/kW	转供 馈线	转供馈线 电压最小 节点	转供馈线 最小节点 电压	转供馈线 最大负载 率/%	是否通 过 N-1 检验
1-50	П	1 300.50	Ш	50	0.93	45	是
60-61	П	661.50	Ш	76	0.98	28	是
66-67	П	60.00	Ш	67	0.99	20	是
92-93	Ш	312.18	II	107	0.94	39	是
83-84	Ш	842.37	II	84	0.90	55	是
82-83	Ш	922.35	II	101	0.89	57	否
1-82	Ш	942.99	П	101	0.89	58	否

通过潮流仿真可见,2种典型场景下系统潮流 均收敛,能反映我国配电网实际存在的高/低电压问 题。N-1安全校验的结果也证明该系统能为针对高 渗透率可再生能源配电网供电安全的研究提供支 撑。且由表3的指标计算结果对比可知,本文测试 系统的规模较大,可再生能源的渗透率高,充分考虑 了负荷与DG的时序特性,而其他已有测试系统的 规模较小,未充分考虑时序特性以及可再生能源。 因此,本文测试系统更能反映现代配电网的典型特 征,更符合可再生能源高渗透率场景,可为配电网与 分布式可再生能源研究提供比较通用的测试模型。

#### 4 结论

本文基于中国实际电网的结构与数据建立了高 渗透率可再生能源接入的配电网典型测试系统。该 测试系统含有多样性的负荷与小水电、光伏发电,能 反映负荷与可再生能源出力的年变化规律,且能反 映高渗透率可再生能源配电网的实际问题,如高/低 电压问题等。通过所提出的评估指标、潮流计算与 *N*-1 安全校验证明了本文系统的有效性,该系统可 用于支撑高渗透率可再生能源发电对配电网运行、 控制与保护的研究,如配电网动态潮流、无功电压控 制等。

#### 附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1]康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题 与理论研究框架[J]. 电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
   KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2017, 41(9):2-11.
- [2]曾鸣,李红林,薛松,等.系统安全背景下未来智能电网建设关 键技术发展方向——印度大停电事故深层次原因分析及对中 国电力工业的启示[J].中国电机工程学报,2012,32(25): 175-181.
   ZENG Ming,LI Honglin,XUE Song, et al. Key technologies of future smart grid construction based on power system security: a view of
  - smart grid construction based on power system security; a view of blackout in India and experience and enlightment to power industry in China[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):175-181.
- [3] 曾鸣.《电力发展"十三五"规划》解读[J]. 中国电力企业管理,2017(1):14-16.
- [4] 许晓艳,黄越辉,刘纯,等.分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J].电网技术,2010,34(10): 140-146.

XU Xiaoyan, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits [J]. Power System Technology, 2010, 34(10):140-146.

- [5]周林,邵念彬.大型光伏电站无功电压控制策略[J].电力自动 化设备,2016,36(4):116-122,128.
   ZHOU Lin,SHAO Nianbin. Reactive-power and voltage control for large-scale grid-connected photovoltaic plants [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):116-122,128.
- [6] 孙伟卿,田坤鹏,谈一鸣,等.考虑灵活性需求时空特性的电网 调度计划与评价[J].电力自动化设备,2018,38(7):168-174.
  SUN Weiqing, TIAN Kunpeng, TAN Yiming, et al. Power grid dispatching plan and evaluation considering spatial and temporal characteristics of flexibility demands [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):168-174.
- [7]张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):1-7.
   ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 1-7.
- [8] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2):1401-1407.
- [9] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1):725-734.
- [10] WILLIAM H K. Radial distribution test feeders [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3):975-985.
- [11] WANG C, CHENG H Z. Optimization of network configuration in large distribution systems using plant growth simulation algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1):119-126.
- [12] KEANE A, OCHOA L F, VITTAL E, et al. Enhanced utilization of voltage control resources with distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1):252-260.
- [13] SALIH S N, CHEN P. On coordinated control of OLTC and reactive power compensation for voltage regulation in distribution systems with wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016,

31(5):4026-4035.

- [14] FARINA M, GUAGLIARDI A, MARIANI F, et al. Model predictive control of voltage profiles in MV networks with distributed generation [J]. Control Engineering Practice, 2015, 34:18-29.
- [15] 彭克,王成山,李琰,等. 典型中低压微电网算例系统设计[J].
   电力系统自动化,2011,35(18):31-35.
   PENG Ke, WANG Chengshan, LI Yan, et al. Design of a typical medium-low voltage microgrid network[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(18):31-35.
- [16] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M]. 2版. 北京:高等教育 出版社,2014:3-9.
- [17] 郭焱林,刘俊勇,魏震波,等. 配电网供电能力研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):33-43.
  GUO Yanlin,LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Load supply capability of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1):33-43.
- [18] 赵明欣,刘伟,陈海,等.《配电网规划设计技术导则》解读[J]. 供用电,2016(2):2-7.

ZHAO Mingxin, LIU Wei, CHEN Hai, et al. Analysis on *The guide* for planning and design of distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2016(2):2-7.

[19] 赵波,张雪松,洪博文.大量分布式光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究[J].电力自动化设备,2012,32(8):95-100.
ZHAO Bo,ZHANG Xuesong, HONG Bowen. Energy penetration of large-scale distributed photovoltaic sources integrated into smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2012, 32(8):95-100.

#### 作者简介:



祖文静(1996—),女,河南新乡人,硕 士研究生,主要研究方向为配电网规划调 度、电力系统优化运行(E-mail:zuwenjing@ hnu.edu.cn);

李 勇(1982—),男,河南信阳人,教 授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方 向为能源/电力系统优化运行与控制、电能

变换系统与装备(E-mail:yongli@hnu.edu.cn);

谭 益(1987—),男,湖南茶陵人,副教授,博士,主要研 究方向为配电网规划与调度(E-mail:yibirthday@126.com)。

## Modeling and effectiveness analysis on test system for distribution networks with high penetration of renewable resource

ZU Wenjing<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, TAN Yi<sup>1</sup>, SUN Chongbo<sup>2</sup>, LIU Jiayan<sup>1</sup>, QIAO Xuebo<sup>1</sup>, LI Jingru<sup>2</sup>, SONG Yi<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: The evaluation indexes to assess the test system for distribution networks with high penetration of renewable resource are proposed. Then, a test system is established with reference to realistic distribution network data of a Chinese village that photovoltaic is used to support poor people. The proposed test system has residential, commercial, industrial loads and small hydropower, photovoltaic power. The high /low voltage problems of distribution network caused by high penetration of renewable resource can be illustrated by the test system. Based on the measured annual timing characteristics of load and renewable resource, the effectiveness of the proposed system is validated by the index evaluation, the power flow analysis and N-1 security criterion.

Key words: distribution network; test system; high penetration; evaluation index; timing characteristic

#### 50

# 附录

表 A1 线路参数 Table A1 Line parameters

起始	终止	线路	起始	终止	线路	起始	终止	线路	起始	终止	线路
节点	节点	长度/m	节点	节点	长度/m	节点	节点	长度/m	节点	节点	长度/m
1	2	59.15	23	26	83.76	51	52	459.83	83	99	90.52
2	3	59.15	9	27	54.95	52	53	133.9	99	100	1180.92
3	4	908.8	27	28	369.29	53	54	253.83	100	101	411.94
4	5	531.77	28	29	149.72	54	71	1706.88	83	84	54.07
5	6	701.46	29	30	119.43	71	72	219.67	84	85	108.14
6	7	103.88	30	31	402.18	72	73	2019.74	85	86	162.2
7	8	251.56	29	32	202.13	54	55	850.29	86	87	108.14
8	9	1077.95	30	33	610.66	55	56	137.36	87	102	108.14
9	10	820.01	10	34	149.01	56	57	1039.77	102	103	324.41
10	11	960.6	34	35	902.69	57	59	1740.94	103	104	865.08
11	12	296.41	35	36	357.98	58	74	1052.84	87	88	216.27
12	13	1006.5	15	37	1794.63	59	60	66.52	88	89	54.07
13	14	1588.18	37	38	172.38	60	61	81.51	89	90	1019.19
14	15	1814.91	38	39	936.33	61	75	209.28	90	91	131.98
15	16	713.5	39	40	623.3	75	76	1613.75	91	92	237.16
16	17	534.27	37	41	868.58	75	77	171.22	92	93	18.16
17	18	60.42	38	42	733.06	77	78	91.16	93	105	21.12
18	19	113.23	39	43	153.68	61	62	74.77	105	106	198.55
19	20	998.39	43	44	87.4	62	79	770.59	105	107	285.31
20	21	3256.3	19	45	50.3	62	63	291.09	93	94	2.59
21	22	132.47	45	46	129.72	63	64	235.19	94	95	5.1
4	23	447.77	46	47	109.54	64	65	133.49	95	96	295.25
23	24	279.52	47	48	72.03	65	80	1896.42	96	97	446.03
24	25	163.23	48	49	1836.21	80	81	217.25	97	108	1151.08
			50	51	1039.26	82	83	15.45	97	98	1453.54

	右市市家/	王市市家/	lubic	右市市家/	王山山家/		右 市 市 索 /	无力功率/
负荷	∩切切平/	儿切切平/	负荷	币切功平/ レ₩	儿切切平/	负荷	有切切平/	儿幼幼平/
loadaa	80	32	loadaa	50	15	loada	96	57.6
load	25	10	loadaa	50	30	loadaa	48	28.8
load.	50	20	load	50	30	load	96	57.6
load.	10	20 4	load	50	30	load	48	28.8
load	100	40	load	100	50 60	load	120	20.0
load <sub>06</sub>	100	40 40	load <sub>42</sub>	25	15	loadzo	120	72
load	15	6	load	100	60	load	18	10.8
load	62.5	25	load	25	15	load	30	18
load	50	20	load <sub>46</sub>	<u>-</u> 0	30	loaden	48	28.8
load	50	15	load <sub>47</sub>	10	6	loadea	12	9.24
load	80	24	load <sub>48</sub>	40	24	load <sub>84</sub>	378	291.06
load <sub>13</sub>	40	12	load <sub>49</sub>	50	30	load <sub>85</sub>	120	92.4
load <sub>14</sub>	80	24	load <sub>50</sub>	60	46.2	load <sub>86</sub>	120	92.4
load <sub>15</sub>	40	12	load <sub>51</sub>	12	7.2	load <sub>87</sub>	18	13.86
load <sub>16</sub>	100	30	load <sub>52</sub>	240	144	load <sub>88</sub>	30	23.1
load <sub>17</sub>	100	30	load <sub>53</sub>	480	288	load <sub>89</sub>	30	23.1
load <sub>18</sub>	15	4.5	load <sub>54</sub>	18	10.8	load <sub>90</sub>	60	46.2
load <sub>19</sub>	25	7.5	load <sub>55</sub>	96	57.6	load <sub>91</sub>	189	145.53
load <sub>20</sub>	40	12	load <sub>56</sub>	30	18	load <sub>92</sub>	30	23.1
load <sub>21</sub>	10	3	load <sub>57</sub>	60	36	load <sub>93</sub>	60	46.2
load <sub>22</sub>	315	94.5	load <sub>58</sub>	12	7.2	load <sub>94</sub>	120	92.4
load <sub>23</sub>	100	30	load <sub>59</sub>	120	72	load <sub>95</sub>	30	23.1
load <sub>24</sub>	100	30	load <sub>60</sub>	120	72	load <sub>96</sub>	48	36.96
load <sub>25</sub>	15	4.5	load <sub>61</sub>	18	10.8	load <sub>97</sub>	120	92.4
$load_{26}$	25	7.5	load <sub>62</sub>	75	45	load <sub>98</sub>	120	92.4
load <sub>27</sub>	25	7.5	load <sub>63</sub>	60	36	load <sub>99</sub>	96	73.92
load <sub>28</sub>	50	15	load <sub>64</sub>	48	28.8	$load_{100}$	48	19.2
load <sub>29</sub>	157.5	47.25	load <sub>65</sub>	30	18	load <sub>101</sub>	30	12
load <sub>30</sub>	25	7.5	load <sub>66</sub>	120	72	$load_{102}$	120	48
load <sub>31</sub>	50	15	load <sub>67</sub>	120	72	load <sub>103</sub>	120	48
load <sub>32</sub>	100	30	load <sub>68</sub>	18	10.8	$load_{104}$	18	7.2
load <sub>33</sub>	25	7.5	load <sub>69</sub>	48	28.8	$load_{105}$	48	19.2
load <sub>34</sub>	40	12	load <sub>70</sub>	60	36	$load_{106}$	60	24
load <sub>35</sub>	100	30	load <sub>71</sub>	60	36	load <sub>107</sub>	60	18
load <sub>36</sub>	100	30	load <sub>72</sub>	60	36	$load_{108}$	60	18
load <sub>37</sub>	80	24	load <sub>73</sub>	60	36			

表 A2 负荷参数 Table A2 Load parameters

Table A5 Kenewable resourceparameters								
可再生能源	所属馈线	容量/(kV·A)	可再生能源	所属馈线	容量/(kV·A)			
$PV_{02}$	Ι	28	PV <sub>47</sub>	Ι	57			
$PV_{18}$	Ι	28	PV <sub>49</sub>	Ι	35			
$PV_{20}$	Ι	60	PV <sub>92</sub>	III	285			
$PV_{21}$	Ι	35	PV <sub>93</sub>	III	640			
PV <sub>22</sub>	Ι	57	PV <sub>99</sub>	III	857			
PV <sub>25</sub>	Ι	140	$PV_{101}$	III	571			
PV <sub>28</sub>	Ι	28	$PV_{102}$	III	857			
PV <sub>31</sub>	Ι	81	$PV_{108}$	III	571			
PV <sub>32</sub>	Ι	10	$W_{74}$	II	945			
PV <sub>35</sub>	Ι	10	W <sub>75</sub>	II	677			
PV <sub>36</sub>	Ι	28	W <sub>72</sub>	II	1194			
$PV_{40}$	Ι	88	W <sub>79</sub>	II	1415			
PV <sub>44</sub>	Ι	140						

表 A3 可再生能源参数 Table A3 Renewable resourceparameters

表 A4 变压器参数 Table A4 Transformer parameters

Table A4 Trais	sionmen	par ameter s	
参数	数值	参数	数值
变压器额定容量/(MV·A)	40	空载电流/%	0.08
额定电压(高压侧)/kV	110	空载损耗/kW	28.35
额定电压(低压侧)/kV	10		