

配电网综合电压偏差评价方法及应用

周雨桐¹, 田品慧², 朱永强¹, 夏瑞华¹

(1. 华北电力大学电气工程学院, 北京 102206;

2. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063000)

摘要: 目前, 关于电压偏差的相关标准主要关注单一节点特定时刻, 对于配电网整体电压偏差水平的评价较为少见。为此, 提出了一种涵盖电压偏差时空分布特性的综合电压偏差评价方法并加以应用。首先, 阐述了电压偏差及评价指标的分级方法与分级依据。其次, 扩展了电压偏差定义的描述方法, 将单一基准值扩展为参考面, 并基于此, 总结了时间维度、空间维度及同时考虑时空双维度的多种综合电压偏差评价方法, 以及其他评价配电网电压整体安全水平的相关指标。最后, 计算了三种不同配置场景下配电网的综合电压偏差及相关指标, 并对其整体电压偏差水平进行了评价。应用所提评价方法与指标能够直观地反映配电网电压偏差的整体水平, 为分布式电源和储能配置方案的进一步优化, 以及配电网改造和治理提供参考。

关键词: 综合电压偏差; 电能质量; 综合评价

Evaluation method and application of comprehensive voltage deviation in power distribution network

ZHOU Yutong¹, TIAN Pinhui², ZHU Yongqiang¹, XIA Ruihua¹

(1.School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Hebei Tangshan Power Supply Company, Tangshan 063000, China)

Abstract: At present, the relevant standards on voltage deviation mainly focus on the specific time of a single node, and the evaluation of the overall voltage deviation level of the distribution network is relatively rare. A comprehensive voltage deviation evaluation method covering the temporal and spatial distribution characteristics of voltage deviation is proposed and applied. Firstly, the classification method and classification basis of voltage deviation and evaluation index are described. Secondly, the description method of voltage deviation definition is expanded after the single reference value is extended to the reference plane. Based on this, multiple comprehensive voltage deviation evaluation methods considering the temporal dimension, spatial dimension, both spatial and temporal dimensions and other related indicators to evaluate the overall safety level of the distribution network voltage are summarized. Finally, the comprehensive voltage deviation and related indexes of the distribution network in three different configuration scenarios are calculated, and the integrity of the voltage deviation is evaluated. The evaluation methods and indexes proposed in this paper can intuitively reflect the overall level of voltage deviation in the distribution network, which can provide reference for further optimization of distributed power supply and energy storage configuration scheme and distribution network transformation and governance.

Keywords: comprehensive voltage deviation; power quality; comprehensive evaluation

国家自然科学基金重点资助项目 (51037004); 国家自然科学基金 (51077097); 天津市科技支撑计划重点资助项目 (10ZCKFGX02800)

0 引言

随着电力市场的发展和能源消费模式的转型，供用电双方均对电能质量提出了更高的要求^[1-2]。在“双碳”背景下，新能源占比逐步提高，分布式电源（Distributed Generation，DG）凭借分布灵活等优势，成为新能源并网的主要利用方式之一^[3-7]。当基于新能源的DG接入电网后，影响电能质量的因素增多，带来的电能质量问题也愈发复杂，电压问题尤为突出。未接入DG前，电压随电源配合负荷变化而变化；接入DG后，各节点电压变化除受负荷响应影响外，还受到DG出力变化的影响，电网运行方式变得更加复杂。在时间维度上，新能源出力呈现随机性、波动性的特点^[8-11]，会导致输出功率和节点电压变化频繁，不利于配电网安全运行^[12-14]。在空间维度上，DG一般呈现数量多、位置分散且靠近用户侧等特点，会大幅增加电压出现偏差的概率，影响居民生活与工业生产^[15-17]。

储能技术能够有效平抑新能源发电的不稳定性，成为大规模新能源并网后保障电网稳定运行的手段之一^[18-20]。对于储能接入配电网后，电压偏差的整体水平是否得以改善以及改善的程度，需进行合理评价。

目前，有许多学者对接入DG后电网电能质量指标进行完善与补充。文献[20-21]针对DG接入电网后具备一定支撑能力且线路有功、无功耦合性强的特点，提出限界电压合格率指标，其限界体现在考虑了DG容量与供电范围，但通过电压偏差优化DG容量与选址时，该评价指标适用性下降。文献[22]在评价电能质量时，采用时间累积法制定了电压合格率指标，但该指标仅能反映时间尺度下的电压偏差，难以反映DG接入后对各节点电压的影响与电网电压整体偏差情况。文献[23-25]均将电压偏差作为评价指标之一，对电能质量进行综合评价，但其综合性体现在多指标之间的权重分配，且仍是针对单一节点的电压偏差，并未涉及电网电压整体偏差水平。对于电网而言，DG、储能后续接入，将使潮流分布情况变得随机多样，若只

对单一节点、单一时刻分别分析电压偏差，会带来统计烦琐、评价复杂等问题，不利于后续DG容量、选址的调整及电网拓扑的改造。

此外，对于接入储能的系统或新能源与储能联合的系统，也常将电压偏差作为优化控制的重要影响因素^[26]。文献[27-28]将电压偏差作为惩罚系数或惩罚成本，用于描述目标函数，以达到优化目的。在定义电压偏差时，选择的参考值为单一基准值，若考虑对电网整体电压水平进行评价，应将单一基准值扩展为参考面。此方法更有利于精准考虑每一节点，对于部分特殊节点，可通过调整其参考值，获得更符合实际安全需求的电压偏差整体水平评价结果。

综合上述分析，现有电压偏差定义一般针对单一节点的特定时刻，且参考电压为单一值。本文提出一种考虑时空分布特性的配电网综合电压偏差评价方法。首先，阐述了电压偏差及评价指标的分级方法与分级依据，将单节点单时刻电压偏差定义描述方法扩展至多节点多时刻，考虑将单一基准值扩展为参考面。其次，总结了多种综合电压偏差评价方法及其他相关指标。最后，通过算例说明所提方法能够为接入DG、储能后的电网电压偏差整体水平分析提供参考与评价依据。

1 电压偏差的分级描述

为了更加直观地反映电压质量与安全水平，评价电压偏差的良好程度，对节点电压进行层次分级。规定电网中任意节点电压均属于所划分级别内，级别划分依据见表1。

表 1 电压分级依据
Tab. 1 Voltage grading criteria

电压范围	所在级别
$U_{i,t} < U_{\text{low}}$	下越限
$U_{\text{low}} \leq U_{i,t} < U_{\text{is}}^-$	下预警
$U_{\text{is}}^- \leq U_{i,t} \leq U_{\text{is}}^+$	安全
$U_{\text{is}}^+ < U_{i,t} \leq U_{\text{up}}$	上预警
$U_{i,t} > U_{\text{up}}$	上越限

表1中， $U_{i,t}$ 为*i*节点*t*时刻的节点电压；

U_{ilow} 、 U_{iup} 为*i*节点电压偏差极限下限和上限； U_{is}^- 、 U_{is}^+ 为*i*节点电压偏差安全下限和上限。根据表1，落在不同级别的电压，对应称为越限电压、预警电压和安全电压。越限电压为不合格电压，预警电压与安全电压均为合格电压。关于预警区的划分，即 $U_{is}^+(U_{is}^-)$ 与 $U_{iup}(U_{ilow})$ 之间差值，需根据国家标准确定^[29-31]。特殊节点可以考虑适当调整 $U_{is}^+(U_{is}^-)$ 与 $U_{iup}(U_{ilow})$ 。本例将电压范围划分为5个层级，实际根据统计需求还可以进一步细化。

电压分级依据还可指导评价指标分级依据的划分，进而对各指标计算结果进行分级评价。以电压偏差为例，其计算结果的级别划分依据见表2。

表2 电压偏差指标分级依据

Tab. 2 The basis for classifying voltage deviation index

电压范围	所在级别
$\delta U \leq \delta U_{\text{优}}$	优
$U_{\text{优}} < \delta U \leq \delta U_{\text{良}}$	良
$\delta U_{\text{良}} < \delta U \leq \delta U_{\text{及格}}$	及格
$\delta U > \delta U_{\text{及格}}$	不及格

2 电压偏差描述方法扩展

2.1 电压偏差描述方法扩展

目前，电压偏差的计算一般针对单节点单时刻，其计算方法为

$$\delta U = \frac{U_r - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (1)$$

式中， δU 为节点电压偏差； U_r 为节点实际电压； U_N 为电网额定电压。

在不同场景下，不同节点电压虽处于同一电压等级，但当电网潮流分布发生变化时，各节点电压变化情况各异。特别是接入DG、储能后，部分节点受到电源支撑影响，所在节点电压提升明显，而周围节点受到影响的程度各有不同。因此，为精确反映全网电压偏差情况，提出扩展电压偏差定义的描述方法，设电网节点总数为*m*，监测时刻总数为*n*，则可以形成一个 $m \times n$ 的矩阵 $U_{i,t} = (u_{i,t})_{m \times n}$ ，即

$$U_{i,t} = \begin{pmatrix} u_{1,t1} & u_{1,t2} & \cdots & u_{1,tn} \\ u_{2,t1} & u_{2,t2} & \cdots & u_{2,tn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m,t1} & u_{m,t2} & \cdots & u_{m,tn} \end{pmatrix}_{m \times n} \quad (2)$$

扩展后，*i*节点*t*时刻的电压偏差描述方法为

$$\delta U_{i,t} = \frac{U_{i,t} - U_{iN}}{U_{iN}} \times 100\% \quad (3)$$

式中， $\delta U_{i,t}$ 为*i*节点*t*时刻的电压偏差； $U_{i,t}$ 为*i*节点*t*时刻的电网电压； U_{iN} 为*i*节点对应的电压参考值。

扩展后的电压偏差描述方法考虑全网所有节点和监测时刻，且可以根据电网实际情况调整各节点参考电压，将单一参考值扩展为参考面。由此计算的单节点单时刻电压偏差值更加灵活且精细度更高，为后续电网电压偏差整体水平计算奠定基础。

2.2 综合电压偏差评价方法

考虑实际需求，包括时空特性与统计特性，提出以下综合电压偏差评价方法。

(1) 综合电压偏差平均值 δU_{MD}

可以根据统计需求，只考虑时间分布特性，对*i*节点在监测时间段内的电压偏差进行评价，公式为

$$\delta U_{iMD}(i) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{U_{i,t} - U_{iN}}{U_{iN}} \quad (4)$$

也可以只考虑空间分布特性，对*t*时刻全网电压偏差进行评价，公式为

$$\delta U_{TMD}(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{U_{i,t} - U_{iN}}{U_{iN}} \quad (5)$$

还可以同时考虑时空分布特性，对某一时间段内全网电压偏差进行评价，公式为

$$\delta U_{MD} = \frac{1}{mn} \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{U_{i,t} - U_{iN}}{U_{iN}} \quad (6)$$

式中， $\delta U_{iMD}(i)$ 为*i*节点在监测时间段内的电压偏差平均值； $\delta U_{TMD}(t)$ 为*t*时刻全网电压偏差平均值； δU_{MD} 运算简单，但计算结果会因正负偏差相抵，而不能很好地反映全网综合电压偏差的真实

情况。

(2) 综合电压偏差平均绝对值 δU_{MAD}

只考虑时间分布特性,对*i*节点在监测时间段内的电压偏差进行评价,公式为

$$\delta U_{\text{MAD}}(i) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|U_{i,t} - U_{iN}|}{U_{iN}} \quad (7)$$

只考虑空间分布特性,对*t*时刻全网电压偏差进行评价,公式为

$$\delta U_{\text{TMAD}}(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|U_{i,t} - U_{iN}|}{U_{iN}} \quad (8)$$

同时考虑时空分布特性,对某一时间段内全网电压偏差进行评价,公式为

$$\delta U_{\text{MAD}} = \frac{1}{mn} \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{|U_{i,t} - U_{iN}|}{U_{iN}} \quad (9)$$

式中, $\delta U_{\text{MAD}}(i)$ 为*i*节点在监测时间段内的电压偏差平均绝对值; $\delta U_{\text{TMAD}}(t)$ 为*t*时刻全网电压偏差平均绝对值; δU_{MAD} 相较于 δU_{MD} ,计算结果不会出现正负偏差相抵的情况,因而能够更好地反映全网综合电压偏差的真实情况。

(3) 综合电压偏差平均二次方值 δU_{MSD}

只考虑时间分布特性,对*i*节点在监测时间段内的电压偏差进行评价,公式为

$$\delta U_{\text{MSD}}(i) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{U_{i,t} - U_{iN}}{U_{iN}} \right)^2 \quad (10)$$

只考虑空间分布特性,对*t*时刻全网电压偏差进行评价,公式为

$$\delta U_{\text{TMSD}}(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{U_{i,t} - U_{iN}}{U_{iN}} \right)^2 \quad (11)$$

同时考虑时空分布特性,对某一时间段内全网电压偏差进行评价,公式为

$$\delta U_{\text{MSD}} = \frac{1}{mn} \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^m \left(\frac{U_{i,t} - U_{iN}}{U_{iN}} \right)^2 \quad (12)$$

式中, $\delta U_{\text{MSD}}(i)$ 为*i*节点在监测时间段内的电压偏差平均二次方值; $\delta U_{\text{TMSD}}(t)$ 为*t*时刻全网电压偏差平均二次方值; δU_{MSD} 不但避免了计算结果出现正负偏差相抵的情况,而且加大了大偏差在

指标中的权重,能够起到提高预警的作用,但计算结果的计量单位会发生变化,导致结果不够直观。

(4) 综合电压偏差均方根值 δU_{RMSD}

只考虑时间分布特性,对*i*节点在监测时间段内的电压偏差进行评价,公式为

$$\delta U_{\text{IRMSD}}(i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{U_{i,t} - U_{iN}}{U_{iN}} \right)^2} \quad (13)$$

只考虑空间分布特性,对*t*时刻全网电压偏差进行评价,公式为

$$\delta U_{\text{TRMSD}}(t) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{U_{i,t} - U_{iN}}{U_{iN}} \right)^2} \quad (14)$$

同时考虑时空分布特性,对某一时间段内全网电压偏差进行评价,公式为

$$\delta U_{\text{RMSD}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{U_{i,t} - U_{iN}}{U_{iN}} \right)^2} \quad (15)$$

式中, $\delta U_{\text{IRMSD}}(i)$ 为*i*节点在监测时间段内的电压偏差均方根值; $\delta U_{\text{TRMSD}}(t)$ 为*t*时刻全网电压偏差均方根值; δU_{RMSD} 同样既避免了计算结果出现正负偏差相抵的情况,又加大了大偏差在指标中的权重,同时计算结果也能更加直观地反映系统电压偏差的离散程度。

(5) 含权重双向综合电压偏差 δU_{WB}

$l=1,2,\dots,mn$,设构成正向电压的 U_l^+ 矩阵的元素共有 x_1 个,构成负向电压 U_l^- 矩阵的元素共有 x_2 个, $x_1+x_2=mn$ 。正向电压 U_l^+ 与负向电压 U_l^- 分别表示为

$$\begin{aligned} U_l^+ &= \{u_{i,t} \mid u_{i,t} > u_{iN}\} = \{u_1^+, u_2^+, \dots, u_{x_1}^+\} \\ U_l^- &= \{u_{i,t} \mid u_{i,t} < u_{iN}\} = \{u_1^-, u_2^-, \dots, u_{x_2}^-\} \end{aligned} \quad (16)$$

正向电压综合偏差 δU_{WB}^+ 计算式为

$$\delta U_l^+ = \frac{U_l^+ - U_{iN}}{U_{iN}} \times 100\% \quad (17)$$

$$\delta U_{\text{WB}}^+ = \frac{1}{x_1} \sum_{l=1}^{x_1} \mu_l \nu_l \varphi_l^+ \quad (18)$$

负向电压综合偏差 δU_{WB}^- 计算式为

$$\delta U_l^- = \frac{U_l^- - U_{IN}}{U_{IN}} \times 100\% \quad (19)$$

$$\delta U_{WB}^- = \frac{1}{x_2} \sum_{i=1}^{x_2} \mu_i v_i \varphi_l^- \quad (20)$$

式中, δU_l^+ 为正向电压矩阵第 l 个元素的电压偏差; δU_l^- 为负向电压矩阵第 l 个元素的电压偏差; μ_l 为电压处于风险区的时长, 所处风险区时间越长, 风险越高; v_l 为电压接近限值的程度, 越接近限值, 风险越高。以上计算结果的正负仅表示电压偏离参考值的方向, 向越上限的方向偏离, 计算结果为正; 向越下限的方向偏离, 计算结果为负。

3 其他综合评价指标

电压分级后, 对于电网而言, 只要存在越限电压, 就判定电网电压不合格。若电网电压均合格, 还需要借助其他综合评价指标, 进一步分析电网的电压质量与安全水平。

3.1 电压整体合格率 λ

只考虑时间分布特性, 对 i 节点在监测时间段内的电压整体合格率进行评价, 公式为

$$\lambda_i(i) = \frac{T_{is} + T_{id}}{n} \times 100\% \quad (21)$$

式中, $\lambda_i(i)$ 为 i 节点在监测时间段内的电压整体合格率; T_{is} 为 i 节点电压为安全电压的累计时刻总数; T_{id} 为 i 节点电压为预警电压的累计时刻总数。

只考虑空间分布特性, 对 t 时刻全网电压整体合格率进行评价, 公式为

$$\lambda_T(t) = \frac{I_{is} + I_{id}}{m} \times 100\% \quad (22)$$

式中, $\lambda_T(t)$ 为 t 时刻全网电压整体合格率; I_{is} 为 t 时刻安全电压的累计节点数; I_{id} 为 t 时刻预警电压的累计节点数。

同时考虑时空分布特性, 对某一时间段内全网电压整体合格率进行评价, 公式为

$$\lambda = \frac{I_s + I_d}{mn} \times 100\% \quad (23)$$

式中, I_s 为监测时间段内安全电压的累计节点数; I_d 为监测时间段内预警电压的累计节点数。

电压整体不合格率 γ 可以通过 $\gamma = 1 - \lambda$ 计算, 其中 γ 的计算可以根据统计需求, 从式(21)~式(23)中任意选择一种方法。

3.2 电压整体预警率 ε

只考虑时间分布特性, 对 i 节点在监测时间段内的电压整体预警率进行评价, 公式为

$$\varepsilon_i(i) = \frac{T_{id}}{n} \times 100\% \quad (24)$$

式中, $\varepsilon_i(i)$ 为 i 节点在监测时间段内的电压整体预警率。

只考虑空间分布特性, 对 t 时刻全网电压整体预警率进行评价, 公式为

$$\varepsilon_T(t) = \frac{I_{id}}{m} \times 100\% \quad (25)$$

式中, $\varepsilon_T(t)$ 为 t 时刻全网电压整体预警率。

同时考虑时空分布特性, 对某一时间段内全网电压整体预警率进行评价, 公式为

$$\varepsilon = \frac{I_d}{mn} \times 100\% \quad (26)$$

式中, I_d 为监测时间段内预警电压的累计节点数。

在电压整体合格率 λ 相同的情况下, 电压整体预警率 ε 更能反映电网电压的安全水平。

3.3 电压偏差极值 $\delta U_{\max}$ 与电压安全裕度 ϕ

为说明电压偏离参考值的方向, 实际电压高于参考电压的节点, 其计算所得电压偏差称为正向电压偏差; 实际电压低于参考电压的节点, 其计算所得电压偏差称为负向电压偏差。电压偏差极值 $\delta U_{\max}^+$ 、 $\delta U_{\max}^-$ 计算式分别为

$$\begin{aligned} \delta U_{\max}^+ &= \frac{U_{\max} - U_{IN}}{U_{IN}} \times 100\% \\ \delta U_{\max}^- &= \frac{U_{\min} - U_{IN}}{U_{IN}} \times 100\% \end{aligned} \quad (27)$$

式中, $U_{\max}$ 与 $U_{\min}$ 分别为监测时间段内全网电压最大值与最小值, 公式为

$$\begin{aligned} U_{\max} &= \max \left\{ \max \left\{ u_{i,t1}, u_{i,t2}, \dots, u_{i,m} \right\} \right\}, i \in m \\ U_{\min} &= \min \left\{ \min \left\{ u_{i,t1}, u_{i,t2}, \dots, u_{i,m} \right\} \right\}, i \in m \end{aligned} \tag{28}$$

式(28)先求*i*节点所有时刻中电压的最大(最小)值,得到*i*个结果,再比较所求*i*个结果的最大(最小)值,得到监测时间段内电网电压最大(最小)值,以及其对应的节点与时刻。 $\delta U_{\max}$ 反映了电压扰动超标的严重程度,便于对超标最严重的节点与时刻予以关注与防范。

除此之外,还需要考虑电压距离限值的余地程度。衡量电压越上限的余地程度为正向电压安全裕度 ϕ^+ ;衡量电压越下限的余地程度为负向电压安全裕度 ϕ^- ,安全裕度公式为

$$\begin{aligned} \phi^+ &= \frac{U_{\text{up}} - U_{\max}}{U_{\text{up}} - U_{\text{IN}}} \\ \phi^- &= \frac{U_{\text{low}} - U_{\min}}{U_{\text{low}} - U_{\text{IN}}} \end{aligned} \tag{29}$$

式(29)计算结果的正负仅表示电压偏离参考值的方向。计算结果为正,说明电压向越上限的方向偏离,反之,向越下限的方向偏离。 $U_{\max}$ 必须为合格电压,否则不计算安全裕度。 $|\phi|$ 值越大,电网安全水平越高。

4 算例分析

基于MATLAB平台搭建改进型IEEE-33节点配电网系统,其网络结构及线路参数等详见文献[32]。共设置三种场景:场景1不额外接入新能源机组与储能设备;场景2在18节点接入额定功率为300 kW的风电机组,其有功功率的输出区间为0~300 kW,22节点接入额定功率为100 kW的光伏机组,其有功功率的输出区间为0~100 kW;场景3在场景2的基础上,在25节点和33节点处分别接入额定功率为200 kW的储能设备。设置一天内监测时刻总数为10,监测时间间隔相等,分别用 $t_1, \dots, t_{10}$ 表示。

4.1 三种场景下电压分布情况

按照国标规定,10 kV及以下三相供电电压

的允许偏差范围为标称电压的±7%。以此作为电压分级依据,电压分级界限与评价指标分级依据见表3、表4。

表3 电压分级界限
Tab. 3 Voltage grading boundary

分级界限	电压 (pu)
U_{low}	0.93
U_{is}^-	0.97
U_{IN}	1.00
U_{is}^+	1.03
U_{up}	1.07

表4 评价指标分级依据
Tab. 4 The basis for grading evaluation indicators

指标	优	良	及格	不及格
$\delta U_{\text{WB}}^+(\%)$	≤ 1.00	≤ 3.00	≤ 7.00	> 7.00
$ \delta U_{\text{WB}}^- (\%)$	≤ 1.00	≤ 3.00	≤ 7.00	> 7.00
$\delta U_{\text{max}}^+(\%)$	≤ 1.20	≤ 3.20	≤ 7.00	> 7.00
$ \delta U_{\text{max}}^- (\%)$	≤ 1.20	≤ 3.20	≤ 7.00	> 7.00
ϕ^+	≥ 0.86	≥ 0.57	≥ 0.00	< 0.00
ϕ^-	≥ 0.86	≥ 0.57	≥ 0.00	< 0.00

三种场景下,配电网电压整体合格率 λ 与电压整体预警率 ε 见表5。

表5 电压合格率整体 λ 与电压整体预警率 ε
Tab. 5 Voltage qualification rate λ and voltage warning rate ε

(%)			
指标	场景1	场景2	场景3
λ	100	100	100
ε	15	15	0

表5计算结果能够直观地反映电网电能质量与安全水平,有利于进一步分析各节点电压在不同配置场景下受到影响的程度或改善程度。

根据电网电压偏差扩展定义,考虑电压时空分布特性,三种场景下配电网全节点全时刻电压分布情况如图1~图3所示。

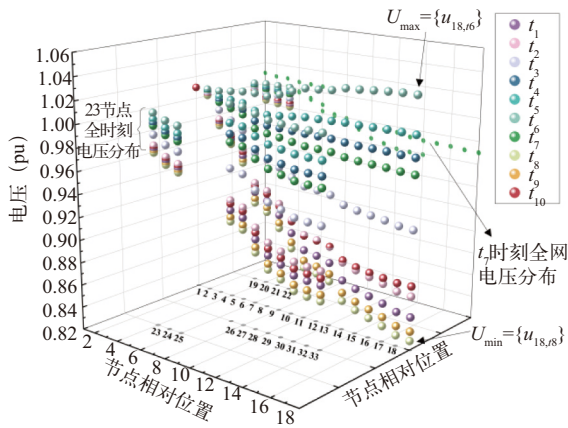


图1 场景1全节点全时刻电压分布

Fig. 1 Voltage distribution of all nodes at all times in scenario 1

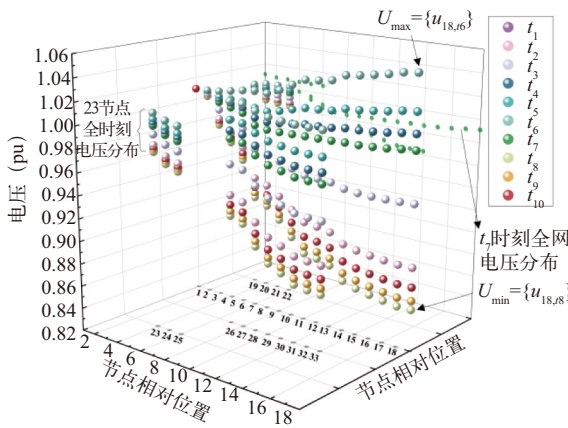


图2 场景2全节点全时刻电压分布

Fig. 2 Voltage distribution of all nodes at all times in scenario 2

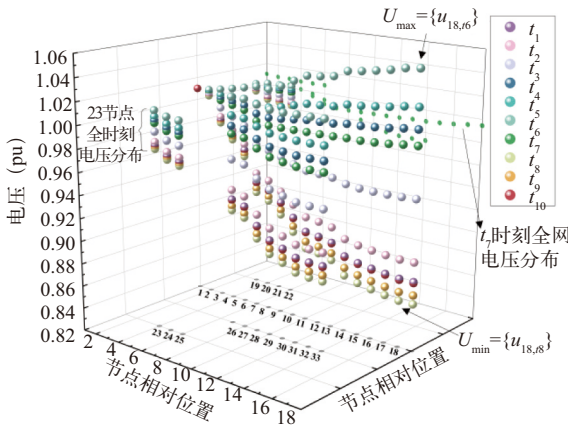


图3 场景3全节点全时刻电压分布

Fig. 3 Voltage distribution of all nodes at all times in scenario 3

其中，不同颜色代表不同监测时刻下全网电压的分布情况。纵向对比可分析同一节点不同时刻的电压变化情况，如23节点随时间分布特性。

横向对比可分析同一时刻全网电压分布情况，如图1~图3绿色投影所示，描述了 t_7 时刻全网各节点电压的空间分布特性。将电网电压偏差定义的描述方法扩展至全网，更有利于精确快速掌握全网各节点各时刻的情况，也有利于电网电压整体安全水平的评价。

4.2 三种场景下综合电压偏差与各指标应用

根据第2小节所述，选择含权重双向综合电压偏差 δU_{WB} 来计算综合电压偏差。选取 $\mu_1=1$ ， $\nu_1=1$ ，三种场景下综合电压偏差与各指标计算值见表6。

表6 综合电压偏差计算结果

Tab. 6 Calculation results of comprehensive voltage deviation

指标	场景1	场景2	场景3
$\delta U_{WB}^+(\%)$	0.956	1.191	1.293
$\delta U_{WB}^-(\%)$	-6.414	-6.020	-5.755
$\delta U_{max}^+(\%)$	3.504	5.362	5.674
$\delta U_{max}^-(\%)$	-17.183	-14.380	-13.900
ϕ^+	0.501	0.234	0.189
ϕ^-	-	-	-0.986

由此可对综合电压偏差及其他评价指标进行分级评价，结果见表7。

表7 各指标分级评价结果

Tab. 7 The graded evaluation results of each index

指标	场景1	场景2	场景3
δU_{WB}^+	优	良	良
δU_{WB}^-	及格	及格	及格
δU_{max}^+	及格	及格	及格
δU_{max}^-	不及格	不及格	不及格
ϕ^+	及格	及格	及格
ϕ^-	-	-	优

由表7可得配电网在不同配置场景下各指标的评价结果。此结果能够更加直观地反映一段时间内全网电压质量与整体安全水平。

5 结束语

以新能源作为驱动力的DG、储能接入电网，有利于推进新型电力系统的构建，但同时也使电网电压变化复杂，若对每一节点、每一时刻电压偏差都单独评价，过程烦琐。对此，本文提

出一种配电网综合电压偏差评价方法,有利于完善电网电能质量评价体系。本文主要工作和创新点为:

1) 针对电网电压变化复杂的特点,更加需要对电网整体的电压偏差情况进行评价,提出了一种配电网综合电压偏差评价方法。并通过算例说明了所提方法能够为接入DG、储能后的电网电压偏差整体水平分析提供参考与评价依据。

2) 提出了电压偏差扩展描述方法,该方法用参考面替代了单一参考值,使电压偏差计算更精细化。并基于分级界限与扩展定义,提出了电网综合电压偏差计算方法与相关指标。方法与指标能够评价不同配置场景下电压偏差的整体水平,并对危险节点进行预警。

参考文献

- [1] 欧杰宇,张逸,辛荣,等.基于多智能体深度强化学习的低压配电网电能质量分散式协同调控策略[J/OL].中国电机工程学报,1-15[2025-01-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20241227.1319.011.html>.
- [2] 王强钢,周亦尧,廖建权,等.直流配电网电能质量研究综述[J].电力系统自动化,2023,47(7):193-207.
- [3] 徐天品,杨启京,邹金良,等.面向新型配电网的一体化模型融合关键技术研究[J].供用电,2024,41(5):28-35,45.
- [4] 胡博,谢开贵,邵常政,等.双碳目标下新型电力系统风险评述:特征、指标及评估方法[J].电力系统自动化,2023,47(5):1-15.
- [5] JENKINS D J, LUKE M, THERNSTROM S. Getting to zero carbon emissions in the electric power sector[J]. Joule, 2018, 2(12): 2498-2510.
- [6] 宋美琪,李洪全,武浩,等.考虑碳排放优化的多层随机模型预测的配电网新能源电压控制方法[J].供用电,2025,42(1):72-78.
- [7] 廖家齐,于若英,刘瑜俊,等.基于自适应高斯混合模型的含高渗透率分布式光伏电力系统风险评估[J].电力系统保护与控制,2024,52(19):144-156.
- [8] 陈演斐,马程,葛磊蛟,等.分布式光伏接入下智能电网的集中式混合储能选址定容优化方法[J/OL].电网技术,1-16[2024-12-24].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1409>.
- [9] 马宽,何国锋,董燕飞,等.基于多策略改进PSO算法的微电网优化调度研究[J].智慧电力,2023,51(8):23-29,45.
- [10] 张大海,负槁韵,王小君,等.计及风光不确定性的新能源虚拟电厂多时间尺度优化调度[J].太阳能学报,2022,43(11):529-537.
- [11] ZHANG X, YANG Y, ZHAO H, et al. Two-stage optimal scheduling of an islanded microgrid considering uncertainties of renewable energy[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2024, 162: 110324.
- [12] 王方敏,项佳宇,苏宁,等.新型电力系统风险抑制下分布式光伏承载力概率评估方法[J/OL].中国电力,1-16[2024-12-24].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm.20241211.1532.002.html>.
- [13] 王颖,文福拴,赵波,等.高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J].中国电机工程学报,2016,36(5):1200-1206.
- [14] 李清然,张建成.含分布式光伏电源的配电网电压越限解决方案[J].电力系统自动化,2015,39(22):117-123.
- [15] 舒印彪,张正陵,汤涌,等.新型电力系统构建的若干基本问题[J].中国电机工程学报,2024,44(21):8327-8341.
- [16] 吴福保,孙文文,何国庆,等.基于电压灵敏度的分布式光伏电压控制方法[J].太阳能学报,2024,45(11):313-319.
- [17] 尚博文,徐铭铭,张金帅,等.高比例分布式光伏接入背景下配电网电压调控方法研究综述[J].智慧电力,2024,52(12):1-11.
- [18] 潘婷,王俐英,丁红坚,等.区域电力系统复合储能发电系统容量优化[J].太阳能学报,2024,45(10):752-763.
- [19] 龚国仙,陈博洋,杨德州,等.考虑极端场景优

- 化的高比例新能源电力系统规划方法[J/OL]. 电网技术, 1-11[2024-12-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1607>.
- [20] 王磊, 牛耘依, 孟娜, 等. 考虑调峰与储能特性的抽蓄电站服务电网综合评价[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5): 135-142.
- [21] 季玉琦, 潘超, 肖晗, 等. 分布式电源电压支撑能力层次分析评价[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 163-171.
- [22] 张昆, 赵倩宇, 王守相, 等. 综合反映配电网分布式光伏接纳能力的评估指标构建及计算方法[J]. 供用电, 2024, 41(2): 3-11.
- [23] 张明, 夏若平, 徐诗露, 等. 主客观变异系数组合赋权的电能质量综合评估方法[J]. 现代电力, 2023, 40(4): 441-447.
- [24] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159, 164.
- [25] 李龙潭. 基于粒子群优化算法和FCM聚类分析的电能质量评估方法[J]. 电力设备管理, 2024(16): 5-7.
- [26] 李彦晨, 贾燕冰, 谢栋, 等. 计及电能质量影响的配电网风储优化配置[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2391-2404.
- [27] 李鹏, 李林媛, 王加浩, 等. 考虑风电不确定性和储能灵活性的有源配电网有功无功协同鲁棒优化[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 303-311.
- [28] 陈宇星, 梁芙蓉, 尤炜, 等. 含分布式光伏的配电网模型预测控制优化方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 100-109.
- [29] 电能质量 供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [30] 电能质量 电压波动和闪变: GB/T 12326—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [31] 电能质量 三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [32] GOSWAMI S K, BASU S K. A new algorithm for the re-configuration of distribution feeders for loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484-1491.

作者简介

周雨桐（2001—），女，硕士研究生，研究方向为新能源发电与并网技术。

朱永强（1975—），男，博士，副教授，研究方向为交直流微电网、新能源发电与并网技术、综合能源系统。

（收稿日期：2025-04-12）