

基于节点电压灵敏度的微电网电能质量综合动态评价方法^①

欧阳静^② 潘国兵^③ 陈金鑫 王振涛 柴福帅 张立彬

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室 杭州 310014)

摘 要 针对现有电能质量评价方法在评价过程中只考虑单个电气节点,且权值固定,没有对整个系统中节点间的相互关联综合考虑,评价结果不能准确反映微电网电能质量波动的问题,提出了一种基于节点电压灵敏度的微电网电能质量综合动态评价方法。该方法针对电能质量评价过程中出现的“短板效应”,建立了一种单节点电能质量实时变权重评价模型;针对微电网电能质量综合评价过程中各节点赋权的问题,提出了一种基于节点电压灵敏度的权重赋值方法。实验表明该方法可以对微电网整体的电能质量进行有效评价,评估各个节点在微电网内的重要程度,为对抗扰动能力差的节点进行电能质量治理提供了理论依据。

关键词 电能质量综合动态评价;节点电压灵敏度;实时变权重;微电网

0 引 言

随着分布式能源(distributed generation, DG)的发展,微电网将得到大规模的普及与推广。与传统配电网相比较,微电网惯性小,抗扰动能力弱,在DG源出力波动和负荷冲击的时候,微电网内的各项电能质量指标会出现较大的波动。现有的电能质量评估方法主要针对传统配电网,电能质量评价的权值多为固定,不能很好地反映微电网电能质量波动的问题。另外,现有的电能质量评价方法多数只考虑了单个节点,没有将整个网络中节点间的相互关联和影响纳入考虑,导致最后得到的电能质量评价结果不能准确反映整个系统的电能质量状况。因此,对微电网电能质量进行准确合理的评价是非常有意义的。

国内外针对电能质量评价相关指标的研究有,文献[1]提出了一种电能质量评价方法,该方法中仅有一种评价指标,这个指标虽然具有代表性,但是依然有所欠缺,使用综合性的指标才能让评价更具

现实意义。文献[2]认为电能质量评价体系应该有多个指标,但是定性评价这些指标仍然不能代表电能质量的实际情况,应该综合选择指标,让评价体系更加科学。文献[3]提出建立电能质量评价模型,需要对电能质量的各项指标进行分析,选择合适的指标来评价。文献[4]提出了若干个电能指标,选择从技术和服务上来分析电能质量,最后简述了电能质量评价的实现问题。可见,电能质量评价指标要根据国家标准,选择具有代表性的,才能反映电能质量的真实情况。

关于电能质量评价方法的研究,主要可以归类为层次分析法^[5-6]、模糊评价法^[7-9]、决策理论方法^[10]、智能评价方法^[11-12]、组合评价方法^[13-15]。文献[16]采用三角模糊区间取代常规的评价矩阵,提高了电能质量综合评估的准确性和全面性,但评价方法对样本有一定的依赖性且计算量较大。文献[17]将竞争机制引入到电能质量动态评估中,有效提高对电能质量相近的评估对象的辨别能力。文献[18]首次将物元模型应用于电能质量的评价,依

① 国家重点研发计划(2017YFA0700300)和浙江省基础公益技术 Research 计划(LGF21E070001)资助项目。
② 女,1984 年生,博士,助理研究员;研究方向:微网、新能源及分布式电力系统;E-mail: ouyangjing1001@163.com
③ 通信作者,E-mail: gbpan@zjut.edu.cn
(收稿日期:2020-01-11)

据计算指标的关联度大小对电能质量的等级进行识别。文献[19]采用数据挖掘技术来解决电网监测中电能质量数据量较大的问题。文献[20]提出了一种电网的新时域模型来分析电能质量问题,该模型用传递函数结合了指数模型和双曲线模型。

由于微电网的容量较小,因此电能质量受到分布式能源和冲击性负荷的影响相比城市配网的影响更大,各项电能质量指标的波动情况也更加剧烈。层次分析法、模糊评价法的权重值是专家给出的固定值,即使某一项电能质量指标剧烈波动,也不能相应地调整此项指标的权重值,因此不能很好地反映微电网电能质量的波动性。其他的各种智能算法在使用时均需要利用大量的样本进行训练,当样本容量不足时会影响最终的评估结果。组合评价法是对各种评价方法的组合,虽然能从一定程度上对各种方法的劣势进行平衡,但随机性也非常大,评价结果不稳定。

综上,针对现有电能质量评价方法在评价微电网电能质量时存在的权值固定,没有综合考虑整个系统中节点间的相互关联等问题,提出了基于节点电压灵敏度的微电网电能质量综合动态评价方法。建立了微电网电能质量评价体系;针对电能质量评价过程中出现的“短板效应”,建立了单节点电能质量实时变权重评价模型;针对微电网电能质量综合评价过程中出现的各节点赋权问题,建立了基于节点电压灵敏度系数的节点权重赋值模型。实验结果表明,该方法充分考虑了实时评价过程中电能质量指标重要性动态变化对节点电能质量评价权重的影响,以及微电网内各电气节点间的相互关联对电能质量综合评价的影响。

1 基于微电网实时运行信息的电能质量评价体系

1.1 微电网电能质量评价指标

微电网电能指标的选取原则为,所选用的指标尽量独立,以便降低冗余度及耦合度。根据国家质量技术监督局颁布的标准和微电网实际运行情况,适用于微电网电能质量评价的指标有电压偏差、三相电压/电流不平衡度、总谐波畸变率、电压波动与

闪变及频率偏差等。在实际应用中,可以根据电能质量监测系统的具体采集情况,使用增减指标,改变采集频率,调节指标的评价等级、评分临界值,或者根据实际情况调整不同电能质量指标的权重系数等手段,来适应微电网不同运行状态下的电能质量评价需求。

在微电网的各个电气节点(或者是关键电气节点)安装电能质量测量系统对电能质量实时运行数据进行采集,频率为每 15 min 1 次。以日、周、月和年为单位分别进行统计计算,可以获得电压/电流不平衡度、谐波电压/电流总畸变率、频率偏差和电压合格率等状态量。

1.2 微电网电能质量评价体系

根据微电网系统中各种电能质量问题的产生机理不同,综合考虑 DG 源、网络连接及分布式负荷对微电网电能质量的影响构建了微电网电能质量评价体系,如图 1 所示。

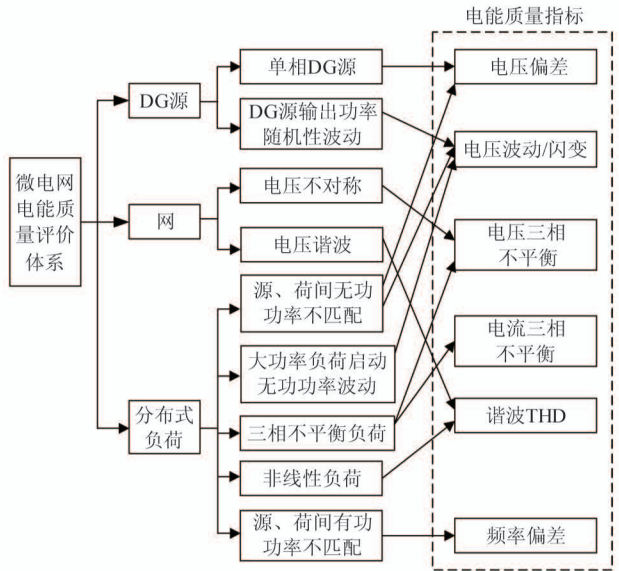


图 1 基于实时运行信息的微电网电能质量评价体系

2 单节点实时变权重电能质量评价

2.1 电能质量指标实时评分

微电网电能质量数据采集过程中不可避免地存在一些异常数据,会掩盖研究对象的变化规律,对分析结果产生影响,异常数据的检验与处理是保证电能质量评价准确性的前提。在电能质量指标实时评分前,需将原始电能质量信号进行异常点剔除,缺失的数据采用拟合法补全。

微电网电能质量指标评分是通过将表征微电网运行状态的电能质量指标值与相应的电能质量标称值进行对比分析,按照偏差程度对微电网电能质量指标进行评分的。可以定义每项电能质量指标的分值区间,分数越低表示该项电能质量指标与标称值的偏差越大,微电网系统的运行状态越是有趋向于不稳定的趋势。

对于每项电能质量评价指标,在微电网正常运行时应该处于国家电能质量标准规定的范围内,超出该范围则依据偏差量大小划分为预警、异常及警戒3个等级,不同等级对应着不同的分数。指标的等级需要根据电能质量标准和微电网实际运行状态来设定。如微电网某一电气节点的电压偏差、电压/电流不平衡度、谐波总畸变率均不超过标准值,则评分为满分;正常与预警、预警与异常、异常与警戒等级间临界点减分分值分别为 S_1 、 S_2 与 S_3 。文中采用多分段线性回归评价方法^[21]来反映电能质量评价指标和微电网电能质量间的映射关系,如图2所示。

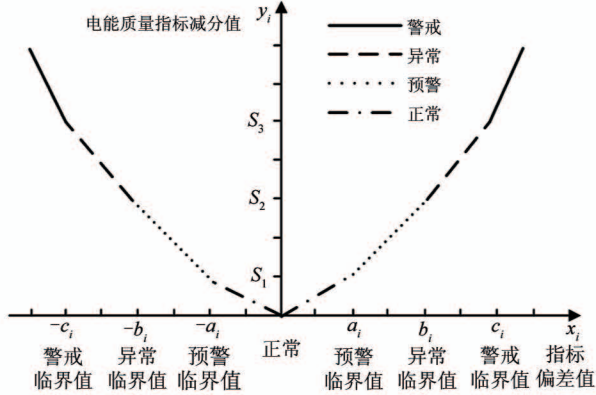


图2 电能质量指标多分段线性回归评价模型

每项电能质量指标的评分如式(1)所示。

$$f_i = y_f - y_i = \begin{cases} y_f - \frac{S_1}{a_i} |x_i| & 0 \leq x_i \leq a_i \\ y_f - \left(S_1 + \frac{S_2 - S_1}{b_i - a_i} (|x_i| - a_i) \right) & a_i \leq x_i \leq b_i \\ y_f - \left(S_2 + \frac{S_3 - S_2}{c_i - b_i} (|x_i| - b_i) \right) & b_i \leq x_i \leq c_i \\ y_f - \left(S_3 + k_i \frac{S_3 - S_2}{c_i - b_i} (|x_i| - c_i) \right) & x_i \geq c_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, i 表示第 i 项电能质量指标 (i 的取值为 $1, 2, 3, \dots, n$), 其中 n 为总的电能质量指标数量; y_f 为单项电能质量指标的满分值; y_i 为第 i 项电能质量指标的减分值; x_i 为第 i 项指标的偏差值; S_1 、 S_2 、 S_3 分别为第 i 项电能质量指标在正常与预警、预警与异常、异常与警戒等级临界点的减分值; a_i 、 b_i 、 c_i 分别为第 i 项电能质量指标在各等级临界点的指标偏差值; k_i 为第 i 项指标偏差在警戒等级下的减分斜率, 其中 k_i 的取值范围为 $k_i \geq 1$, 表示警戒等级下的单位减分值与异常等级下的单位减分值之比。

依据电能质量标准对预警、异常以及警戒等级偏差值临界点进行取值,同时可基于微电网运行状况和实际运行经验,对偏差值临界点进行调整。

2.2 基于模糊层次分析的初始权重赋权方法

微电网单节点电能质量评价是在各电能质量指标的优劣状态得分的基础上进一步综合分析得到的。各指标表征的电能质量优劣程度有一定的差异性,导致不同的电能质量指标的权重也存在差异。为了充分考虑微电网运行状态的实际情况,同时兼顾专家的工程实践经验,采用模糊层次分析法^[22]对初始权重进行赋值。

对选取的微电网电能质量评价指标,根据专家经验构建模糊互补判断矩阵。假设有电能质量指标集 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, 则表示指标 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 两两相比较重要程度的模糊互补判断矩阵 R 如式(2)所示,其中 n 为指标的个数。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中模糊互补判断矩阵中的元素满足如下关系。

$$\begin{aligned} r_{ii} &= 0.5, i = 1, 2, \dots, n \\ r_{ij} + r_{ji} &= 1, i, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

元素 r_{ij} 是根据专家经验对指标重要程度的打分。元素 r_{ij} 表示指标 I_i 比指标 I_j 重要的隶属度, r_{ij} 越大表明指标 I_i 比指标 I_j 越重要,当 $r_{ij} = 0.5$ 时表示两个指标的重要性相当。式(2)中的 R 是根据主观经验得到的,可能存在一致性矛盾的问题,需要对

其进行一致性检验,一致性 ρ 的计算公式为

$$\rho = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, j}}^n |r_{ij} - (r_{ik} + r_{kj} - 0.5)| \quad (4)$$

当 $\rho < 0.2$ 时,认为模糊判断矩阵 $\mathbf{R}$ 具有满意的一致性;当 $\rho \geq 0.2$ 时,需要对模糊判断矩阵进行调整,可根据下式计算具有满意一致性的判断矩阵

$$\mathbf{P}' = (p'_{ij})_{n \times n} : \quad \mathbf{P}' = (1-t)\mathbf{R} + t\mathbf{P} \quad (5)$$

其中, t 为一致性系数,初始值为 0.01,并依照 $t = t + \Delta t$ (Δt 为一致性系数步长,取 $\Delta t = 0.05$) 进行迭代,直至判断矩阵具有满意的一致性,同时式(6)所示 $\mathbf{P} = (p_{ij})_{n \times n}$ 为具有完全一致性的判断矩阵。

$$p_{ij} = \frac{\prod_{l=1}^n r_{il}r_{lj}}{(\prod_{l=1}^n r_{il}r_{lj})^{1/n} + (\prod_{l=1}^n r_{jl}r_{li})^{1/n}} \quad (6)$$

根据式(5)所得的具有满意一致性的判断矩阵 $\mathbf{P}'$, 计算 $\mathbf{P}'$ 每一行元素卷积的 n 次方根 $M(i)$, 然后对 M 进行归一化处理即可得到各指标的初始权重 ω_i^0 , 如下式所示。

$$\begin{cases} \omega_i^0 = \frac{M(i)}{\prod_{i=1}^n M(i)} \\ M(i) = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n p'_{ij}} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

2.3 单节点指标实时变权重评价模型

微电网电能质量指标只要有任何一项在一段时间内均处于较低的水平,即“短板效应”,则该时段的运行状态应予以重视。通过实时变权重公式能够实现根据评价指标的状态改变权重的目的,从而体现电能质量评价中的“短板效应”,即指标的电能质量评分分值越低,相应的权重将越高。综合考虑微电网运行电能质量指标实时评分及实时权重,确定微电网运行电能质量状况。基于这个思想,微电网单节点电能质量评价的变权重公式可以表示为

$$\omega_i(y_1, y_2, \dots, y_n) = \frac{\omega_i^0 y_i^{\alpha-1}}{\sum_{i=1}^n \omega_i^0 y_i^{\alpha-1}} \quad (8)$$

其中, ω_i 为第 i 个指标变权之后的变权重; α 为均衡

因子,用于调整权重; ω_i^0 为第 i 个指标的初始权重值; $y_i^{\alpha-1}$ 为含均衡因子的第 i 个电能质量指标的减分值;当各电能质量指标的“短板效应”不明显时,取 $1 \geq \alpha \geq 1/2$ ($\alpha = 1$ 即为常权重模式);当指标的“短板效应”显著时,取 $1/2 \geq \alpha > 0$ 。文中根据实际运行经验,取均衡因子 α 为 0.25 来实现变权重综合。

电能质量指标处于较低水平的持续时间也需考虑。对于实时型指标(如电压偏差、频率偏差、电压闪变等),变权重计算时可将 y_i 调整为 $\overline{y_i}$, 即取当前时刻 T_0 和前 2 个时刻 t_1 、 t_2 指标减分值的平均值,即为变权重计算时的电能质量指标减分值。统计型指标(如电压/电流不平衡度、谐波电压/电流总畸变率)则不进行平均。考虑了电能质量指标处于较低水平持续时间的变权重综合表达式为

$$\omega_i(y_1, y_2, \dots, y_n) = \frac{\omega_i^0 \overline{y_i}^{\alpha-1}}{\sum_{i=1}^n \omega_i^0 \overline{y_i}^{\alpha-1}} \quad (9)$$

其中,当指标 i 为实时型指标时取 $y_{\omega i} = \overline{y_{\omega i}}$, 当指标 i 为统计型指标时取 y_{ω} 。从式(8)和式(9)可以看出,上一时间段内偏差量最多的指标在当前时刻被列为重点考察的对象并且所赋予的权重也是最大,以此实现各指标重要性的动态变化。较短时间处于低水平的电能质量指标的权重经式(9)调整后,对整体得分的影响减小;而较长时间处于低水平的电能质量指标的权重则仍然保持较高的权重。

综上,单节点电能质量实时评价得分 $f_{Evaluation}$ 如下式所示。

$$f_{Evaluation} = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i \quad (10)$$

3 微电网电能质量综合评价模型

为了对微电网的整体电能质量进行评价,需要对系统内的每个节点电能质量情况综合考虑。微电网中某节点权重的大小取决于该节点在系统中的相对位置,节点所处位置对系统中其他节点影响越大,则该节点在综合电能质量评价中的权重越大。

单个节点的电能质量波动主要与电压的有功、无功、相位及幅值的波动有关,电压幅值相位灵敏度

越高表示该节点的功率波动对微电网系统的影响更显著。根据这一特性,提出了基于节点电压灵敏度的权重分配方法。该方法从微电网系统层面上整体考虑了微电网各节点的连接关系,各节点间的线路阻抗,以及 DG 源、负荷的配置情况,能够科学有效地计算出微电网系统中每个节点的权重分配情况。

3.1 基于节点电压灵敏度的权重分配方法

微电网系统内节点的电压灵敏度分析是建立在基于节点功率平衡的潮流方程上的。考虑电力线路电阻和电抗特性的微电网系统潮流方程如下所示^[23] (所有电能质量数据均经过标么化)。

$$P_i = \sum_{k=1}^m |U_i| |U_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (11)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^m |U_i| |U_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (12)$$

式(11)和式(12)中, m 为微电网系统中节点的总数, P_i 、 Q_i 分别表示节点 i 处的有功、无功功率, U_i 、 U_j 分别表示节点 i 、 j 处的电压幅值, δ_i 、 δ_j 为节点 i 、 j 处的电压相角, Y_{ij} 、 $\angle \theta_{ij}$ 为节点 i 和 j 之间线路的导纳。

节点电压、相角对有功、无功偏差的灵敏度可以通过牛顿-拉夫逊法计算式(11)和式(12)获得:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P / \partial \delta & \partial P / \partial U \\ \partial Q / \partial \delta & \partial Q / \partial U \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式(13)可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\delta p} & S_{\delta q} \\ S_{up} & S_{uq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(14)中, $S_{\delta p}$ 、 $S_{\delta q}$ 为节点电压相角的有功、无功灵敏度, S_{up} 、 S_{uq} 为节点电压幅值的有功、无功灵敏度,这 4 个元素即组成电压灵敏度矩阵。每次迭代计算,系统的雅可比矩阵会更新直到满足收敛条件,这时对雅可比矩阵求逆即得到电压灵敏度矩阵。节点电压幅值的有功灵敏度系数越高,表示相同功率的有功波动该节点的电压波动越大;节点电压幅值的无功灵敏度系数越高,表示相同功率的无功波动该节点的电压波动越大。节点电压相角的有功、无功灵敏度系数同理。

得到各节点的电压幅值及相角的有功、无功灵敏度系数后,利用熵权法来对各节点的电能质量评分赋权。熵是表征系统无序状态的度量,各指标向决策者提供有用信息量即为熵权。体现在微电网综合电能质量评价方面即认为灵敏度越高的节点对电能质量的影响越大,所占的权重比率也应越高。

假设微电网系统除 PCC 节点外有 m 个电气节点,即有 m 个单节点电能质量评分,在这里可以作为综合电能质量评价的指标值;而衡量的项目有 n 个,在文中 $n = 4$, 具体是指电压幅值的有功、无功灵敏度系数,电压相角有功、无功灵敏度系数,形成的原始判断矩阵 $K = (k_{ij})_{n \times m}$ 如下所示。

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nm} \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中, k_{ij} 为第 j 个综合评价指标下的第 i 个衡量项目的评价值。

计算第 j 个综合评价指标下第 i 个衡量项目的评价值的比重 $P_{ij} = k_{ij} / \sum_{i=1}^m k_{ij}$, 然后根据熵的定义,得到各个综合指标的熵值 e_j 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (16)$$

最后计算第 j 个综合评价指标的熵权 γ_j 。

$$\gamma_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (17)$$

3.2 微电网电能质量综合评价

微电网系统综合电能质量评分如下:

$$Y = \sum_{j=1}^m \gamma_j f_{Evaluation j} \quad (18)$$

式中, γ_j 为节点 j 的熵权, $f_{Evaluation j}$ 为第 j 个节点的实时评价得分。

微电网电能质量综合评价步骤如图 3 所示。

4 算法验证

为了验证微电网电能质量综合动态评价方法的可行性,利用实验室的微电网平台来进行实验验证。

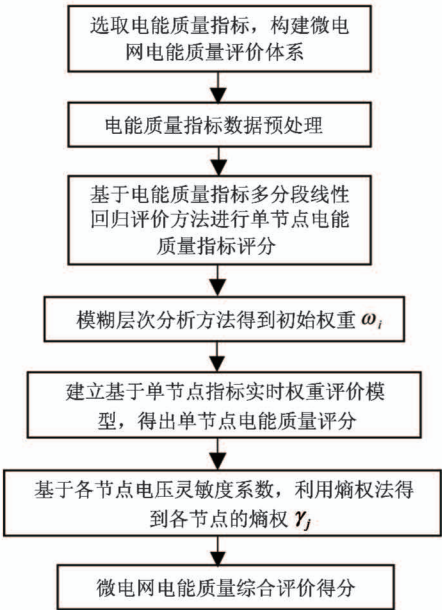


图 3 微电网电能质量综合评价方法

该微电网系统通过 CI 模拟电源 (simulation grid) 接入大电网,拓扑结构如图 4 所示,定义 PCC 点为节点 1,容量为 50 kVA;PV 电源为节点 2,额定有功功率 15 kW;电动机对拖系统为节点 3,接入对拖系统,其中感应电机为 5.5 kW,发电机功率为 5 kW;负载为节点 4;基准电压为 0.4 kV,基准功率为 1 MVA,PCC 处的电网电压为 1.05 pu。

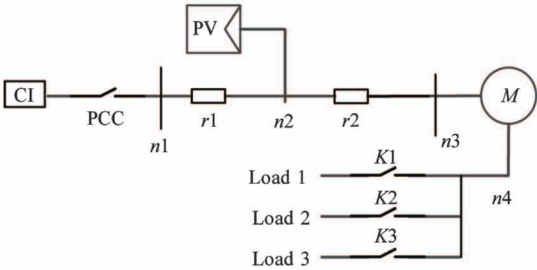


图 4 电能质量评价实验平台拓扑结构

节点 1 和节点 2、节点 2 和节点 3 之间分别接入模拟线路阻抗。节点 1 和节点 2 间模拟线路为 350 m,阻抗 r_1 为 $0.1 + j0.029 \Omega$;节点 2 和节点 3 间模拟线路 750 m,阻抗 r_2 为 $0.22 + j0.0672 \Omega$ 。节点 3 处的负荷为绕线电阻,连接方式为三相星形连接,其中 Load1 的阻值为 $50 \Omega \times 3$,Load2 为 $32 \Omega \times 3$,Load3 为 $250 \Omega \times 3$ 。系统运行稳定后,根据实验设计分别对断路器 K1、K2 和 K3 进行单个或组合投切,并采集对应的电能质量数据。在采集电能质量

数据的时刻,光伏阵列的实际出力为 9.6 kW。

根据国家电能质量标准和实验数据采样情况,选取的电能质量评价指标及各电能质量指标的限值分别为电压偏差 V_d (上限 7%、下限 -10%)、电压零序不平衡 V_z (5%)、电流负序不平衡 A_n (5%)、电压总谐波畸变率 THD_u (5%)、电流总谐波畸变率 THD_i (8%) 和电压瞬时闪变 P_{inst} (1 次)。

实验场景分别为 (1) 场景 1,全部断路器断开,拖动负荷空载;(2) 场景 2,闭合 K1,拖动负荷接的负荷为 $50 \Omega \times 3$;(3) 场景 3,同时闭合 K1、K3,对拖系统接的负荷为 $32 \Omega \times 3$ 与 $50 \Omega \times 3$ 并联;(4) 场景 4,闭合 K2,对拖系统接的负荷为 $32 \Omega \times 3$;(5) 场景 5,同时闭合 K2、K3,对拖系统接的负荷为 $32 \Omega \times 3$ 与 $250 \Omega \times 3$ 并联。

不同场景下节点 3 各时段的电能质量评价价值如图 5 所示,图中横轴表示不同实验场景的各评价时段,纵轴表示节点 3 不同实验场景在不同评价时段的电能质量评价价值。满分设为 100 分,评价价值越大则表示电能质量水平越高。

从图 5 可以看出,不同负荷状态下微电网系统的电能质量表现不同。在场景 4 中,即当拖动系统接入 $32 \Omega \times 3$ 负载时,拖动系统处于额定负载状态,整个时间序列的电能质量表现得比较平稳,电能质量处于相对最优状态;在场景 1 处,当拖动系统空载时,电能质量水平最差。在场景 3 和场景 5 中,拖动系统都运行在过载状态,刚刚启动时由于大量消耗系统的有功和无功,导致前一段时间电能质量评分

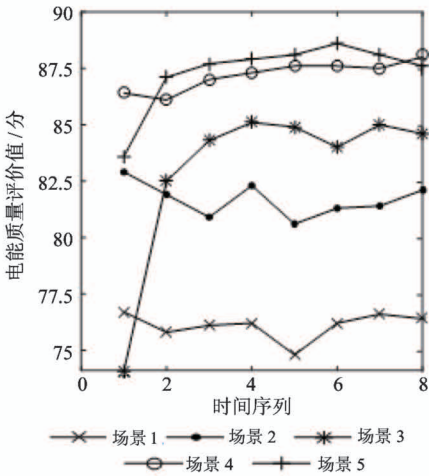


图 5 不同负载条件下节点 3 的电能质量评价结果

较低。由于场景 5 是轻微过载,而场景 3 是严重过载,故场景 5 的电能质量评分要高于场景 3。

从感应电机启动到稳定运行的过程中,电能质量的变化是一个趋于平稳的过程。场景 3 和场景 5 中,初始阶段电能质量水平较低,在评价时间序列上,指标评价值逐步提升并趋于稳定,说明该微电网系统具有较好的动态调节性能。在不同负荷状态下,随着负荷趋近于拖动系统额定负荷,电能质量评分也趋向越来越优,与实际情况相符。

接下来进行微电网电能质量综合评分,以场景 3 为例,求出各节点在时间序列 1 处的电能质量评分分别为节点 n_2 为 80.4,节点 n_3 为 74.1,节点 n_4 为 72.6。

计算图 4 所示拓扑结构的微电网节点电压灵敏度系数如下。

$$S_{\delta p} = \begin{bmatrix} 0.0263 & 0.0263 & 0.0262 \\ 0.0262 & 0.0871 & 0.0869 \\ 0.0263 & 0.0872 & 0.1323 \end{bmatrix}$$

$$S_{\delta q} = \begin{bmatrix} 0.0907 & 0.0907 & 0.0907 \\ 0.0907 & 0.2900 & 0.2900 \\ 0.0907 & 0.2899 & 0.2989 \end{bmatrix}$$

$$S_{up} = \begin{bmatrix} 0.0906 & 0.0905 & 0.0905 \\ 0.0905 & 0.2893 & 0.2894 \\ 0.0905 & 0.2893 & 0.2985 \end{bmatrix}$$

$$S_{uq} = \begin{bmatrix} 0.0263 & 0.0263 & 0.0263 \\ 0.0262 & 0.0871 & 0.0871 \\ 0.0262 & 0.0871 & 0.1323 \end{bmatrix}$$

构造原始判断矩阵如下:

$$K_0 = \begin{bmatrix} 0.0263 & 0.0871 & 0.1323 \\ 0.0907 & 0.2900 & 0.2989 \\ 0.0906 & 0.2893 & 0.2985 \\ 0.0263 & 0.0871 & 0.1323 \end{bmatrix} \quad (19)$$

计算每个评价依据下指标值的比重:

$$P_0 = \begin{bmatrix} 0.1124 & 0.1156 & 0.1535 \\ 0.3878 & 0.3849 & 0.3468 \\ 0.3873 & 0.3839 & 0.3463 \\ 0.1124 & 0.1155 & 0.1535 \end{bmatrix} \quad (20)$$

然后利用熵权法求各指标的熵值为

$$e_j^0 = [1.1161 \quad 1.1231 \quad 1.1922] \quad (21)$$

进一步得到评价指标的熵权为

$$\gamma_j^0 = [0.2691 \quad 0.2853 \quad 0.4455] \quad (22)$$

得出在场景 3 运行状态下,时间序列为 1 时微电网的电能质量综合动态评价值为 75.12 分,其中节点 n_4 的熵权最高,为最敏感的电气节点。

5 结 论

本文考虑了电能质量指标与微电网电能质量评价的紧密相关性,建立了微电网电能质量评价体系;针对电能质量评价过程中出现的“短板效应”问题,建立了单节点电能质量实时变权重评价模型;针对微电网电能质量综合评价过程中出现的各节点赋权问题,提出了一种基于各节点电压灵敏度系数的节点权重赋值方法,该方法依据各节点对微电网系统的重要性进行赋权。

实验结果表明,该方法可以有效评价微电网系统单个节点的电能质量,也可以对微电网系统整体的电能质量进行有效评价;该方法能够判断各个节点在微电网系统内的重要程度,可以为抗扰动能力差的节点进行电能质量治理提供理论依据。

参考文献

- [1] 唐会智, 彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 85-88
- [2] 江辉, 彭建春, 欧亚平. 基于概率统计和矢量代数的电能质量归一量化与评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2003, 30(1): 66-70
- [3] 刘颖英, 李国栋, 顾强. 基于径向基函数神经网络的电能质量综合评价[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 45-48
- [4] 贾清泉, 宋家骅, 兰华. 电能质量及其模糊方法评价[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 46-49
- [5] Elbasuony G S, Aleem S H E A, Ibrahim A M, et al. A unified index for power quality evaluation in distributed generation systems[J]. Energy, 2018, 149: 607-622
- [6] 熊以旺, 程浩忠, 王海群. 基于改进 AHP 和概率统计的电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 48-52
- [7] 舒服华. 粗糙集在电能质量综合评价中应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 75-79
- [8] 谭家茂, 黄少先. 基于模糊理论的电能质量综合评价

- 方法研究[J]. 继电器, 2006, 34(3):55-59
- [9] 蒋金良, 袁金晶, 欧阳森. 基于改进隶属度函数的电能质量模糊综合评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(11):107-112
- [10] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 基于突变决策的分布式发电系统电能质量综合评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21):52-57
- [11] 李如琦, 苏浩益. 基于可拓云理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1):66-70
- [12] 周林, 栗秋华, 张凤. 遗传投影寻踪插值模型在电能质量综合评估中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(7):32-35
- [13] 韦钢, 刘杨, 周冰. 基于组合评价方法的配电网评估[J]. 华东电力, 2009, 37(10):1639-1643
- [14] 李连结, 姚建刚, 龙立波. 组合赋权法在电能质量模糊综合评价中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4):56-60
- [15] 李琼林, 代双寅, 丁同. 基于主客观组合赋权法的低压配电网电能质量能耗综合评估[J]. 电测与仪表, 2020, 57(12):52-59
- [16] 朱学文, 王庭喜, 熊浩清. 基于模糊区间层次分析法的相对标度电能质量评估应用[J]. 电气应用, 2008, 27(19):56-60
- [17] 欧阳森, 杨家豪, 石怡理. 基于竞争机制的电能质量动态评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2):1-7
- [18] 黄剑, 周林, 栗秋华. 基于物元分析理论的电能质量综合评估[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(6):25-29, 55
- [19] Moallem P, Zargari A, Kiyomarsi A. An approach for data mining of power quality indices based on fast-ICA algorithm[J]. *International Journal of Power and Energy Systems*, 2014, 34(3):91-98
- [20] Bhonsle D C, Kelkar R B. New time domain electric arc furnace model for power quality study[C] // 2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics, Kurukshetra, India, 2015: 1-6
- [21] 李峰, 孙波, 王轩. 层次分析法结合熵权法评估农村屋顶光伏系统电能质量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11):159-166
- [22] 兰继斌, 徐扬, 霍良安. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(9):107-112
- [23] 韩祯祥. 电力系统分析[M]. 第三版. 杭州: 浙江大学出版社, 2005

A comprehensive dynamic evaluation method for microgrid power quality based on node voltage sensitivity

Ouyang Jing, Pan Guobing, Chen Jinxin, Wang Zhentao, Chai Fushuai, Zhang Libin
(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract

To solve the problem that the existing power quality evaluation methods only consider a single electrical node in the process of evaluation, and the weights are fixed, there is no comprehensive consideration of the mutual correlation between nodes in the whole system, and the evaluation results can not accurately reflect the power quality fluctuation of microgrid, a comprehensive dynamic evaluation method for microgrid power quality based on node voltage sensitivity is proposed. Aiming at the ‘short board effect’ in the process of power quality evaluation, a real-time weight evaluation model of single node power quality is established, and a weight assignment method based on the sensitivity of node voltage is proposed to solve the problem of each node weight in the process of power quality comprehensive evaluation of microgrid. Experiment results show that the proposed method can effectively evaluate the overall power quality of the microgrid, evaluate the importance of each node, and provide a theoretical basis for power quality management of nodes with poor anti-disturbance capabilities.

Key words: comprehensive dynamic evaluation of power quality, sensitivity of node voltage, real-time weight, microgrid