

基于 LIHM 的配电系统电能质量动态有向评价^①

柴福帅^{②*} 王伟峰^{**} 潘国兵^{③*} 方 舟^{***} 程 清^{***} 陈金鑫^{*}

(* 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 310023)

(** 国网浙江省电力有限公司 杭州 310007)

(*** 国网浙江省电力有限公司信息通信分公司 杭州 310007)

摘 要 针对电能质量评价中指标数据存在的异质性及波动性,提出一种基于极限区间同质化方法(LIHM)的配电网电能质量动态有向评价模型。通过分析电能质量数据特点与动态信息集结方式,考虑不同指标的裕度及异质性,对评价数据进行同质化处理,以保证评价信息的完整性与评价的公平性;引入动态评价方法对配电系统电能质量进行动态有向分析,判断待评价节点电能质量的变化趋势,对各节点电能质量做出预警,为进一步的电能质量治理策略提供参考,从而达到全面客观评价电能质量优劣的目的。实际算例分析了含分布式电源的配电系统在不同负荷状态电能质量情况,该评价模型能显著区分各种状态下的电能质量水平,验证了模型在工程应用上的可行性与有效性。

关键词 电能质量评价, 动态有向评价, 极限区间同质化方法(LIHM), 分布式电源(DG)

0 引 言

分布式电源(distributed generation, DG)作为重要的能源利用形式,具有灵活、便捷、就地消纳等优点。作为大电网有益补充的同时, DG 也改变了传统电网的辐射状结构,使电网由单源系统转变为多源系统^[1]。可再生分布式电源出力具有随机性和间歇性的特点,而且由于以电力电子接口接入配电网,导致其惯性小、抗负荷扰动能力差。DG 的不确定性 & 低惯性会对系统电能质量产生显著影响^[2]。对于含 DG 的配电系统,全面定量的电能质量评价结果是衡量其品质的基础,准确衡量分布式电源接入后配电系统电能质量的动态趋性对于电能质量预警具有重要意义^[3]。

在现有电能质量评价方法中,基于概率统计与矢量代数方法、模糊数学方法等评价方法^[4-9]从数

学的角度揭示电能质量的统计含义,但随着电力系统复杂度的不断提高,这些方法已无法满足电网日益多样化的评价需求。近年来,投影寻踪算法、可拓学理论^[10,11]、物元理论和证据理论^[12,13]、雷达图法^[14]等方法运用到电能质量评价中,从不同的角度丰富了电能质量评价的内涵,但在赋权及分析过程中存在不同程度的主观性问题。随着监测网络的不断完善,基于数据挖掘的电能质量评价方法^[15,16]解决了电能质量评价尺度的限制及电力系统数据爆炸带来的瓶颈,但是数据挖掘理论在电能质量评价中的应用还有待进一步研究。

对于含 DG 的配电系统电能质量评价,何吉彪和程浩忠^[17]考虑分布式电源容量及接入点短路容量等条件,结合层次分析法得到电能质量的综合性评估结果,具有主观性较强的特点。曾正等人^[18]提出了量化分布式发电系统电能质量优劣程度的突变

① 国家重点研发计划(2017YFA0700300)和浙江省重点研发计划(2018C01081)资助项目。

② 男,1994 年生,硕士生;研究方向:电力系统数据挖掘;E-mail: chaifs@zjut.edu.cn

③ 通信作者, E-mail: gbpan@zjut.edu.cn

(收稿日期:2018-10-15)

决策模型,消除了评估过程中人为因素的影响,但未考虑电能质量数据的动态趋性。Chen 等人^[19]通过改进熵值法对二者进行加权,解决了传统熵权法中熵值趋于 1 时熵权成倍数增长的问题,但其数据处理过程中未考虑指标间异质性。

综上,含 DG 的配电系统电能质量评价仍存在多个方面的问题。一方面由于电能质量指标存在的异质性及指标数据突变的问题,对指标数据的充分挖掘带来一定难度;另一方面,传统电能质量评价方法无法体现配电系统的电能质量动态趋性,在对含 DG 的配电网进行电能质量评价时还应考虑由于分布式电源出力波动性、自身的低惯性特性引起的电能质量动态变化,并将其在时间序列上的波动情况反映到评价结果中,并作为衡量配电网品质的参考之一,以全面客观地反映电能质量情况。

鉴于现有方法存在的问题,本文提出了一种基于极限区间同质化方法(limited interval homogenization method, LIHM)的含分布式电源的配电系统电能质量评价方法。针对评价数据存在的问题,首先通过线性状态变换获取指标数据的电能质量评价信息,并对其进行同质化处理;为表征配电网的动态趋性,根据动态评价方法判断评估时间序列内电能质量的趋性,建立配电网电能质量评估的架构。该方法充分挖掘了待评价数据的信息,其可行性和客观性在实际算例中得到验证。

1 基于 LIHM 的评价模型

1.1 电能质量数据特征

对于含 DG 的配电系统,由于负荷接入的多样性变化及 DG 出力的间歇性与不稳定性,电能质量数据会出现一定程度的波动。在评价序列中,根据数据变化特点可将电能质量指标数据分为稳定型、多变型、渐变型、突变型等四种不同类型,其分布如图 1 所示。

在时间序列上,稳定型指标数据之间相对变化较小,电能质量表现平稳,反映了该配电系统工况良好,系统处于稳定状态;多变型指标数据之间相对变化较大,电能质量波动剧烈,体现了配电系统的低鲁

棒性与负荷接入多样性;渐变型指标数据处于渐变状态,表现为时间序列上电能质量趋好或趋坏的趋势,反映了系统健康状态的变化;对于突变型指标,电能质量在某采样时段波动较大,具有持续时间短及变化剧烈的特点,表现为负荷或出力的突变。

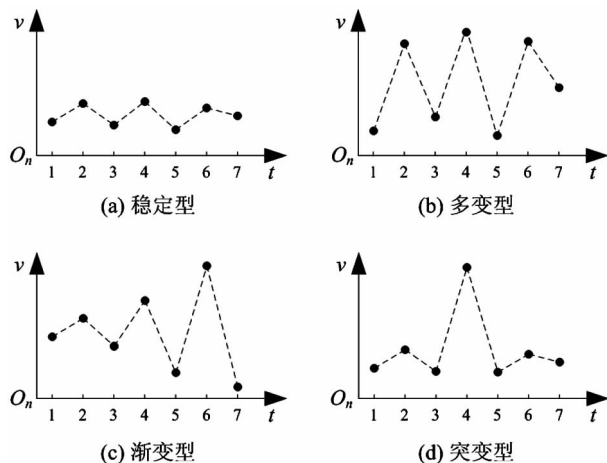


图 1 电能质量数据特征

1.2 LIHM 模型

在待评价数据中,异质性体现了各评价指标的不可合并性。对于不同电能质量指标,指标间存在不同的理想值及极限区间,因此构成了指标之间的异质性。极限区间同质化方法根据电能质量指标数据特点,考虑配电网各指标理想值及允许变动范围,对指标进行同质化处理,以达到客观公平评价节点电能质量的目的。

对于某待评价配电系统,设其有 S 个评价节点, N 个评价指标,在时间序列 $t_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 上,各评价指标的裕度为 $(v_{\lim}^-, v_{\lim}^+)$, 其中, $v_{\lim}^-$ 表示指标容忍下界, $v_{\lim}^+$ 表示指标容忍上界。假定指标在时间序列上的变化是均匀的,即在 (t_k, t_{k+1}) 时间区间内, t_k 时刻指标值 $v(k)$ 和 t_{k+1} 时刻指标值 $v(k+1)$ 之间的连线可以看成是该指标的发展轨迹^[20], 如图 2 所示。

图 2 中,粗实线表示指标发展轨迹,则在 (t_k, t_{k+1}) 时间区间内,指标的初始固有评价值为

$$s = s^- + s^+ \quad (1)$$

上式中, s^- 和 s^+ 表示指标发展轨迹与理想值交点 t_{int} 两侧的固有评价价值。其中, $s^- = \int_{t_k}^{t_{\text{int}}} v(t) dt$, $t \in$

$(t_k, t_{\text{int}}), s^+ = \int_{t_{\text{int}}}^{t_{k+1}} v(t) dt, t \in (t_{\text{int}}, t_{k+1}), v(t)$ 为指标信息集结方式, 当 $t \in (t_k, t_{k+1})$ 时, 其表达式为

$$v(t) = v(t_k) + (t - t_k) \frac{v(t_{k+1}) - v(t_k)}{t_{k+1} - t_k} \quad (2)$$

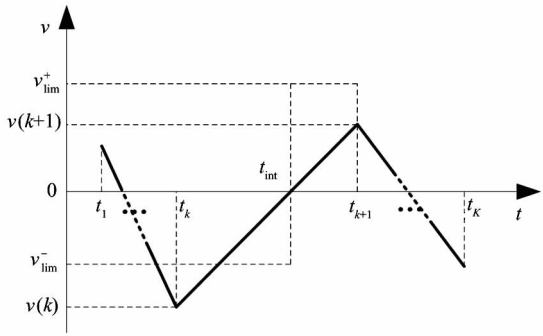


图 2 指标信息重构

指标裕度的信息集结值为

$$v_{\text{lim}} = \begin{cases} v^- & t \in (t_k, t_{\text{int}}) \\ v^+ & t \in (t_{\text{int}}, t_{k+1}) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $v^- = \int_{t_k}^{t_{\text{int}}} v_{\text{lim}}^- dt$, 为指标在 (t_k, t_{int}) 内的信息集结值, $v^+ = \int_{t_{\text{int}}}^{t_{k+1}} v_{\text{lim}}^+ dt$, 为指标在 $(t_{\text{int}}, t_{k+1})$ 内的信息集结值, 则在 (t_k, t_{k+1}) 区间内考虑指标裕度的固有评价值为

$$r = r^- + r^+ \quad (4)$$

上式中, $r^- = \frac{v^-}{s^-}, r^+ = \frac{v^+}{s^+}$ 。对于特定评价指标, v^- 与 v^+ 为定常数, s^- 与 s^+ 反映了指标值在 (t_k, t_{k+1}) 内偏离其理想值的大小, 即其值越大, 则在 (t_k, t_{k+1}) 内该指标的电能质量情况越恶劣, 值越小, 则在 (t_k, t_{k+1}) 内该指标的电能质量表现较好。r 的值反映了电能质量的越限程度, r 越大则说明电能质量表现越好。由图 2 可知, 当 $r^- \leq 2$ 或 $r^+ \leq 2$ 时, 该指标一定存在电能质量越限情况。

1.3 LIHM 模型分析

电能质量评价是一个多指标综合评估过程, 不同特征的电能质量指标数据会对模型评价结果造成很大程度的影响, LIHM 模型的分析主要对数据的预处理阶段及指标异质性进行评估。

在电能质量评价方法中, 通常采用极大(极小)型归一化方法对电能质量数据进行预处理, 对于不

同电能质量数据类型, 归一化方法可能会导致数据信息的丢失。

对于各评价指标在 (t_k, t_{k+1}) 时间区间内的固有评价值 s, 通过本文所述方法与极大型归一化方法得出的评价值 r_{LIHM} 和 r_{nor} 分别为

$$\begin{cases} r_{LIHM} = \frac{v^-}{s^-} + \frac{v^+}{s^+} \\ r_{nor} = \frac{\text{maxs} - s}{\text{maxs} - \text{mins}} \end{cases} \quad (5)$$

对某一电能质量评价指标, 其裕度信息集结值 v^- 与 v^+ 为常量, s, s^- 和 s^+ 为变量, 若指标的固有评价值 $s(t_k, t_{k+1})$ 为连续变量, 则有:

$$\begin{cases} r'_{LIHM} = - \left(\frac{v^-}{(s^-)^2} + \frac{v^+}{(s^+)^2} \right) \\ r'_{nor} = - \frac{1}{\text{maxs} - \text{mins}} \end{cases} \quad (6)$$

针对上述不同电能质量数据类型, 考虑各数据对整体结果的影响。由式(6)可知, r_{LIHM} 的大小及变化率取决于指标固有评价值本身, 其结果不会影响该评价序列的其他值, 同时起到拉开档次的目的, r_{nor} 的大小及变化率取决于该指标在时间序列上的极值, 当评价点指标出现突变值时, 将会影响评价序列数据的公平性。

为了体现极大型方法与 LIHM 方法在处理平稳型和突变型指标数据上的差异, 文中采用两组指标数据进行了对比, 结果如图 3 所示。

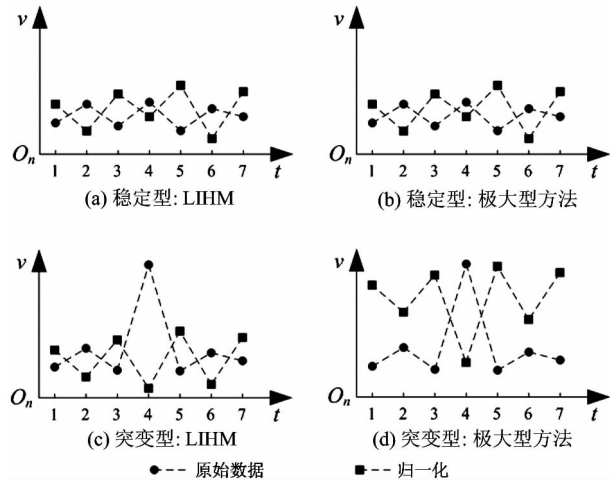


图 3 极大型数据方法与 LIHM 结果对比

在图 3 中,(a)图和(b)图所示为平稳型指标数据分别采用了两种方法处理的结果,从图中可以看出,二者结果基本相同。但由图 3(c)图和(d)图可知,当待处理数据在时刻 4 发生突变时,对于极大型归一化方法处理,时刻 1~3、5~7 的数据均发生较大变化,在 LIHM 处理中,突变数据并未对其他数据造成影响。

由此可见,极大型归一化方法中突变数据直接导致数据整体失真,影响了后续评价的客观性,而通过 LIHM 处理的数据则较完整地保留了数据的信息,整体结果不受突变数据的影响。

配电网对于不同指标具有不同的容忍裕度,指标间的容忍裕度通常会有较大差异,即指标存在异质性。若不对指标进行去异质化处理,可能会出现“数据覆盖”的情况,即因指标异质性导致数据信息丢失的现象,从而使评价结果与真实结果产生较大偏离。在电能质量评价过程中,各指标间应处于同一评价尺度。

对于待评价指标 n , 设其对应指标限值为 v_n , 该指标中间等级中值为 c_n , 考虑各指标占其无加权和比重 p_n 。

对于未同质化处理的数据:

$$p_n = \frac{c_n}{\sum_{i=1}^N c_n} \quad (7)$$

对于同质化处理的数据:

$$p_n = \frac{v_n/c_n}{\sum_{i=1}^N v_n/c_n} \quad (8)$$

上式中, $v_n = v^-$ 或 v^+ 。

电能质量评价中,在各指标均处于中间值的情况下, p_n 大小应基本相等。由式(7)和式(8)可知, p_n 的大小取决于指标限值 v_n , 根据文献[21]中电能质量各评估指标等级界限,6 个待评价指标数据同质化处理前后的 p_n 对比如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,对于电能质量优劣程度相同的评价数据,经同质化处理后的 p_n 分布更加均匀合理,而未经同质化处理的数据 p_n 分布差距较大,与事实不符。

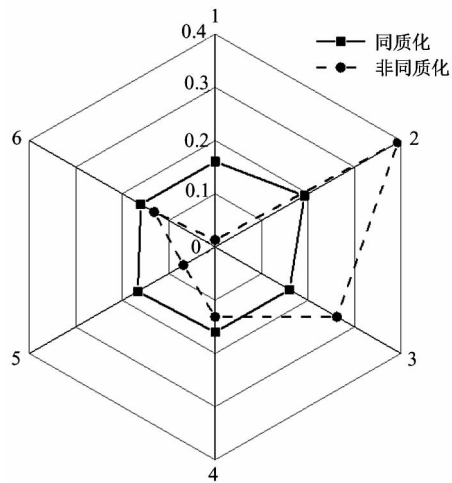


图 4 同质化处理前后数据占比对比

2 电能质量动态有向评价

2.1 评价指标的动态模糊化

在低惯性系统中,指标的动态特性直接反映了系统的坚强程度。对于处于运动变化发展中的动态离散型的评价序列,由于指标瞬时信息的不完整,导致其动态特征无法使用普通经典集合来描述。由于分布式电源具有低惯性特点,根据上述得出的指标评价值,考虑含分布式电源的配电系统电能质量数据的模糊性。通过对采样点的动态模糊化分析数据的动态有向性,可以更完善地刻画指标的动态画像。

根据动态模糊理论^[22],对于指标 n 在评价序列上某一数据 $r_{nm} \in [0,1]$, 可以将其动态模糊化为 $r_{nm} \triangleq (\overleftarrow{r_{nm}}, \overrightarrow{r_{nm}})$, 即 $r_{nm} = \overleftarrow{r_{nm}}$ 或 $\overrightarrow{r_{nm}}$, 其中,“ $\rightarrow$ ”与“ $\leftarrow$ ”分别表示数据趋好与趋坏的趋性,并且有 $\min(\overleftarrow{r_{nm}}, \overrightarrow{r_{nm}}) \triangleq \overleftarrow{r_{nm}}, \max(\overleftarrow{r_{nm}}, \overrightarrow{r_{nm}}) \triangleq \overrightarrow{r_{nm}}$ 。

指标数据的动态模糊变换(fuzzy rule transformation, FRT)规则根据数据动态变化特点确定,指标数据的模糊变换值 A_i 如式(9)所示。

$$A_i = \begin{cases} \overleftarrow{r_{nm}}, & r_{nm} < r_{n, m-1} \\ 0, & r_{nm} = r_{n, m-1} \\ \overrightarrow{r_{nm}}, & r_{nm} > r_{n, m-1} \end{cases} \quad (9)$$

数据 A_i 的大小体现了该评价时段指标电能质量水平,其有向性表征了电能质量的变化趋性,这样就可以将 A_i 的状态发展变化趋势直观地表现出来。

根据以上论述,对于单个评价对象,首先确定其

评价矩阵,建立各评价节点指标数据的动态模糊评价矩阵:

$$(\overrightarrow{R}, \overleftarrow{R}) = (\overleftarrow{r_{nm}}, \overrightarrow{r_{nm}}) \tag{10}$$

上式中, $m = 1, 2, \dots, M$, 其中 $M = K - 1$, 为指标数据在评价时间序列上的评价数。针对上述建立的动态模糊评价矩阵,根据模糊变换规则,判断各采样点趋性,即对数据进行动态化处理,使其数据呈现出动态特性:

$$(\overrightarrow{R}/\overleftarrow{R}) = (\overleftarrow{r_{nm}}/\overrightarrow{r_{nm}}) \tag{11}$$

上式中,“/”表示取值为二者之一的“或者”关系,具体取值依据模糊变换规则而定。

2.2 动态模糊数据的合成

由于指标数据的动态特性表示是一个关系矩阵,若需要将其用来对不同对象之间的关系进行进一步比较,需要对其进行模糊合成运算 (dynamic fuzzy synthesis operation, DFSO),即对其进行单值化处理,从而使得指标动态模糊关系更加清晰。

针对动态模糊化矩阵 $(\overrightarrow{R}/\overleftarrow{R})$, 对其进行模糊合成运算,结果表示如下:

$$\bigcup_{n=1, m=1} (\overleftarrow{r_{nm}}, \overrightarrow{r_{nm}}) = (\overleftarrow{R_{sum}}, \overrightarrow{R_{sum}}) \tag{12}$$

上式中, $\overleftarrow{R_{sum}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \omega_n \overleftarrow{r_{nm}}, \overrightarrow{R_{sum}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \omega_n \overrightarrow{r_{nm}}$, ω_n 为指标权值,对于不同环境下的电能质量评价情况, ω_n 可根据实际评价需求确定,本文中所有指标具有相同重要性,因此这里取 $\omega_n = 1$ 。对于最终评价值,其数值结果的求取可以根据实际需求从不同角度进行。结合电能质量数据重构与处理,在动态模糊化矩阵 $(\overrightarrow{R}/\overleftarrow{R})$ 中,采用式 (13) 表示指标数据趋性及其变动量。

$$R_{diff} = \overrightarrow{R_{sum}} - \overleftarrow{R_{sum}} \tag{13}$$

其中,其方向取 $\max(\overleftarrow{R_{sum}}, \overrightarrow{R_{sum}})$ 的方向。显然, R_{diff} 的值体现了该评价节点在评价时段内的累积变动量, R_{diff} 越大,说明变动越大, R_{diff} 越小说明变动越小,指标表现越稳定。

综上,配电网电能质量动态有向评价过程如图 5 所示。

在对评价点进行动态有向分析时,评估结果的有向性可反映系统的动态特征。若指标趋好点的个数大于趋坏点的个数,则说明该系统具有较强的调

控与稳态自愈能力,系统内的行为具有较高的自律性;若趋坏点的个数多于趋好点的个数,则说明系统的自我调控能力较差,需要进行进一步的人为干预以保证其稳定运行。

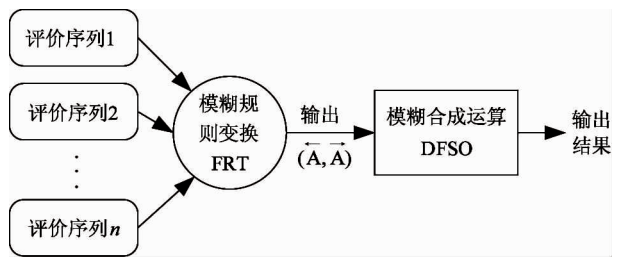


图 5 动态有向评价过程

3 算例分析与验证

3.1 实验数据获取

文中实验验证所用的电能质量指标数据来源于实验室搭建的 50 kW 微网平台,其拓扑结构如图 6 所示。

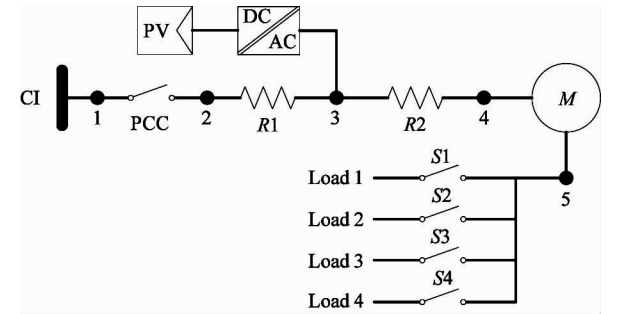


图 6 数据采集平台拓扑结构

实验条件如下:

- (1) CI 可编程交流电源输出为 220 V, 20 A, 光伏阵列实际输出为 10.8 kW, 1 ~ 5 分别为各电气节点,其中电能质量数据采样点位于节点 4 处;
- (2) R1 和 R2 分别为线路阻抗模拟器,其中 R1 规格为 0.1 Ω , 模拟 350 m 输电线路, R2 规格为 0.22 Ω , 模拟 700 m 输电线路;
- (3) 拖动系统 M 为电动机与发电机的对拖系统,其中电动机额定功率为 5.5 kW, 发电机额定功率为 5 kW;
- (4) 负荷均为绕线电阻,连接方式为三相星形连接,其中负荷 1 的阻值为 100 $\Omega \times 3$, 负荷 2 为

50 Ω×3,负荷 3 为 250 Ω×3,负荷 4 为 32 Ω×3,根据实验设计分别对断路器进行单个或组合投切,并采集对应的电能质量数据。

3.2 电能质量综合评价

根据上述内容,基于 LIHM 的配电网电能质量动态有向评价过程如图 7 所示。

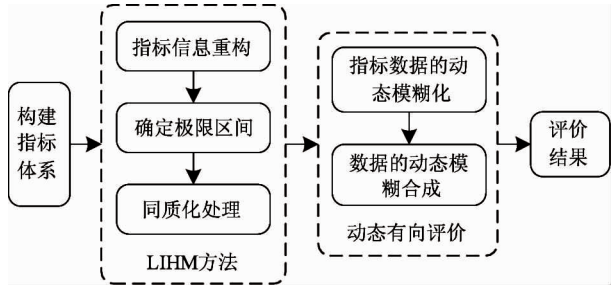


图 7 整体评价过程

合理选取评价指标对于减少计算复杂度及提高评价可信度具有重要意义。现有国家标准对频率偏差、电压偏差、电压三相不平衡、公用电网谐波、电压波动与闪变、暂时过电压和瞬态过电压等 6 项指标值进行限定。根据现有实验条件及数据采样情况,本文实验选取评价指标如下:电压偏差 V_d 、电压零序不平衡 V_z 、电流负序不平衡 A_n 、电压总谐波畸变率 THD_u 、电流总谐波畸变率 THD_i 、电压瞬时闪变 P_{inst} 。

各指标理想值与限值如表 1 所示。

表 1 电能质量指标理想值与限值

指标	理想值	限值	
		上限值	下限值
电压偏差 V_d	0%	7%	-10%
电压零序不平衡 V_z	0%	5%	
电流零序不平衡 A_z	0%	5%	
电压总谐波畸变率 THD_u	0%	5%	
电流总谐波畸变率 THD_i	0%	8%	
电压闪变 P_{inst}	0	1	

表 1 中,限值的确定可参考国家标准或根据配电系统设计背景调整。

结合 LIHM 得出指标在 (t_k, t_{k+1}) 时间段内考虑指标裕度的评价值 $r(t_k, t_{k+1})$, 则该评价节点 $l(l =$

$1, 2, \dots, S)$ 的电能质量综合评价值 y_l 为

$$y_l = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M r_{nm}(t_k, t_{k+1}) \tag{14}$$

经赋权后不同负荷状态下各评价时段评价值如图 8 所示。

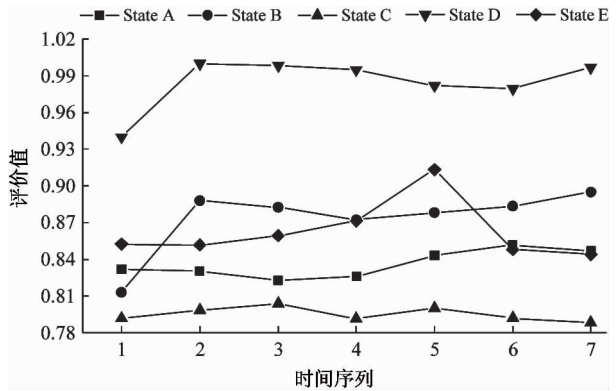


图 8 不同负荷状态电能质量综合评价结果

图 8 中,横轴表示不同负荷状态的各评价时段,纵轴表示不同负荷状态在不同评价时段的相对评价值,其中评价值越大则说明电能质量水平越好,评价值越小则说明电能质量水平越差。上图中,State A 对应负载 Load1,State B 对应负载 Load2,State C 对应负载为 Load3,State D 对应负载为 Load4,State E 为组合负载,由负荷 1 和负荷 3 并联组成。

从图中可以看出,不同负荷状态下实验室微网系统电能质量表现也不相同。在 State D 处,即当系统带负荷 4 时,拖动系统处于额定负载状态,电能质量处于相对最优状态;在 State C 处,当拖动系统带负荷最小时,电能质量水平最差。在 State B 和在 State E 处,二者负荷值接近,其电能质量水平也接近,其中 State B 处负荷值略大于 State E 处,State B 处电能质量也略优于 State E 处。这说明在该系统中,随着负荷趋于额定负荷,系统电能质量逐步趋优。

从电能质量变化趋势来看,在不同负荷状态下电能质量的变化是一个趋于平稳的过程。State B、State D 处,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,说明微网系统具有较好的动态调节性能。对于电能质量水平较低的情况,需要进行进一步的观察处理,防止其电能质量恶化对系统造成严重影响。

在不同负荷状态下,随着微网系统负荷逐步趋近于拖动系统额定负荷,电能质量逐步趋好,与实际情况相符,这也说明了本文算法的可行性。

3.3 动态有向分析

对于不同负荷状态下的不同评价指标,数据的动态有向分析可反映指标的动态变化特性,并反映出评价节点电能质量的变化趋势,为进一步的电能质量行为评价提供重要参考。根据式(12)和式(13),不同负载状态下各指标动态特性如表2所示。

表 2 不同负荷状态电能质量趋性

负荷	趋性		R_{diff}
	←	→	
State A	515.91	515.44	-0.47
State B	585.13	598.62	13.50
State C	358.48	359.55	1.07
State D	511.79	521.69	9.90
State E	527.67	526.56	1.11

表 2 中, R_{diff} 项体现了电能质量的趋性, 其中, 负值表示趋性为“ $\leftarrow$ ”, 表明电能质量趋坏, 正值表示趋性为“ $\rightarrow$ ”, 表明电能质量趋好, 数值表示趋向的程度。由上表可知, 考虑电能质量变化趋性时, 在 State A 处, 微网系统电能质量是趋坏的, 在其他负荷状态下, 微网系统电能质量都有趋好的表现, 且趋好的程度不一。

电能质量的动态有向分析揭示了指标在评价时间序列上电能质量趋性的历史累积情况。当电能质量趋好时,说明系统在该负荷状态下运行良好,对于电能质量趋坏的负荷状态,则说明系统需要进行一定程度的人为干预,如表 2 中,当负荷状态为 State B、State C、State D、State E 时,电能质量趋好,在 State A 处,电能质量趋坏,此时需要加强对电力系统的监控,防止其电能质量出现进一步的恶化状况。

图 8 从时间及空间维度分析了不同负荷状态下不同评价时段电能质量的好坏,表 2 结合电能质量数据的动态变化情况从更加微观的角度表征了不同负荷状态下电能质量的变化趋势。二者相结合体现系统电能质量的特性,揭示其电能质量变化的内涵。

3.4 算法对比分析

根据本文评价数据格式特点,选取与本文使用数据格式相似的文献[20]中惩罚激励方法与本文所述方法进行对比,其中本文所述方法评价结果如图8所示,文献[20]得出评价结果如图9所示。

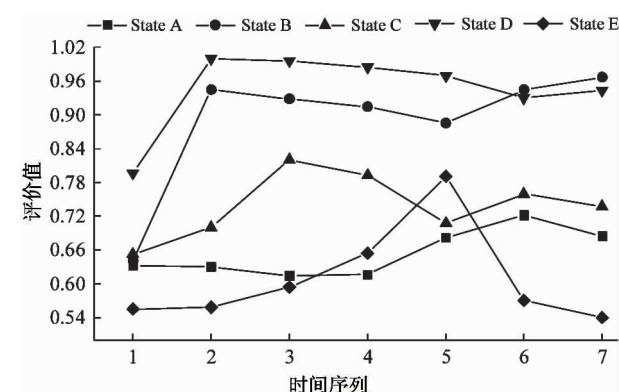


图9 惩罚激励方法综合评价结果

由图 8 与图 9 实验结果对比可知:

(1)不同负荷状态下电能质量变化趋势基本一致,说明两种方法均能得出单节点情况下电能质量水平;

(2) 本文方法得出的结果中 State D 处, 电能质量处于相对最优状态; 在 State C 处, 电能质量水平最差, 与实验条件一致, 表明本文方法的区分度优于惩罚激励方法;

(3) 在 State E 处, 由于数据存在突变现象, 导致采用惩罚激励方法进行处理时, 评价序列整体水平降低, 从而导致图 9 中评价结果处于最差水平, 而本文所述方法避免了这种情况。

由上述可知,对于含 DG 的配电系统,本文所述算法可以有效评价不同节点因负荷不同而导致的电能质量变化,并能够衡量电能质量相变化趋势,为进一步的电能质量行为评价提供参考。

4 结 论

本文基于 LIHM 方法建立了对含分布式电源的配电系统电能质量动态有向评价体系,充分挖掘了评价数据的信息,统一了各电能质量指标的评价尺度,并反映出系统电能质量的动态变化情况。

该评价方法能够在时间、空间等维度反映出配电系统的电能质量情况,并根据动态有向分析的结果判断电能质量的趋性,为下一步的电能质量评价作出指导。实验分析了不同负荷条件下含分布式电源的配电网内节点电能质量表现,对不同负荷情况下的电能质量情况进行了对比,证明了算法的可行性与有效性。但是随着评价区域的增大,数据量剧增将会影响模型的计算效率,因此在大规模的实际推广中还需要做进一步优化。

参考文献

- [1] 于建成,迟福建,徐科,等. 分布式电源接入对电网的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 138-141
- [2] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298
- [3] 张丹,王杰. 国内微电网项目建设及发展趋势研究[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 451-458
- [4] 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
- [5] 赵霞,赵成勇,贾秀芳,等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 11-16
- [6] 刘俊华,罗隆福,张志文,等. 一种考虑排序稳定分析的电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 70-76
- [7] Morsi W G, EL-Hawary M E. Power quality evaluation in smart grids considering modern distortion in electric power systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81(5): 1117-1123
- [8] 沈阳武,彭晓涛,施通勤,等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 67-73
- [9] Reddy M V, Sodhi R. A rule-based S-Transform and AdaBoost based approach for power quality assessment[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 134: 66-79
- [10] 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
- [11] 董海艳,贾清泉,王宁,等. 复杂电能质量关联扰动模式的可拓挖掘方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1269-1278
- [12] 李玲玲,刘敬杰,凌跃胜,等. 物元理论和证据理论相结合的电能质量综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 383-391
- [13] Liu J, Yan S, Cai N. Analysis and evaluation model on the power quality of wind farm[J]. *Icic Express Letters Part B Applications An International Journal of Research & Surveys*, 2015, 6(1), 53-59
- [14] 乔鹏程,吴正国,李辉. 基于改进雷达图法的电能质量综合评估方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 88-92
- [15] 潘旭,王金丽,赵晓龙,等. 智能配电网多维数据质量评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2018(5): 1375-1384
- [16] Vidhya S, Kamaraj V. Complex neural classifiers for power quality data mining[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2018, 13(4): 1714-1722
- [17] 何吉彪,程浩忠. 含微网配电网规划中的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 209-214
- [18] 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): 52-77
- [19] Chen B, Fang R, Xie S. Comprehensive evaluation of distributed power quality based on improved entropy method[C]. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Electrical, Control and Automation Engineering*, Xiamen, China, 2018. 82-86
- [20] 袁金晶,欧阳森,石怡理,等. 基于激励惩罚机制的区域电网电能质量综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 55-59
- [21] 江辉,张清联,彭建春. 基于改进云物元模型的风电场电能质量评价[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 205-210
- [22] 李凡长,梅毓,钱旭培. 动态模糊数据模型研究[J]. 小型微型计算机系统, 2002, 23(11): 1281-1283

Dynamic and directional evaluation of power quality in distribution system based on LIHM

Chai Fushuai^{*}, Wang Weifeng^{**}, Pan Guobing^{*}, Fang Zhou^{***}, Cheng Qing^{***}, Chen Jinxin^{*}

(^{*} Key Laboratory of E&M, Ministry of Education and Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

(^{**} State Grid Zhejiang Electric Power Co. , Ltd, Hangzhou 310007)

(^{***} Information and Communications Branch, State Grid Zhejiang Electric Power Co. , Ltd, Hangzhou 310007)

Abstract

To solve the problem of the heterogeneity and volatility of the data in power quality evaluation, a dynamic and directed power quality evaluation method based on the limited interval homogenization method (LIHM) is proposed. The characteristics of the data and the way of dynamic information aggregation are analyzed, the limit interval of different index and the heterogeneity between the indexes is considered, and the evaluation data are homogenized to ensure the integrity and fairness of the evaluation. The dynamic evaluation method is adopted to analyze the power quality of the distribution system. The trend of power quality of the evaluation point is judged, which is used to provide early warning of the power quality and provide reference for further power quality management strategies, and achieve the purpose of comprehensive and objective evaluation of power quality. A demonstration is given to analyze the power quality of the distribution system in different load conditions. The evaluation model proposed in this paper can distinguish the power quality level in various states, and verify the feasibility and effectiveness of the model.

Key words: power quality, dynamic and directional evaluation, limited interval homogenization method (LIHM), distributed generation (DG)