

基于时间序列相似性度量的新能源-负荷特性指标

石亮缘¹,周任军¹,李娟²,王昱²,许福鹿³,王仰之¹

(1. 长沙理工大学 湖南省清洁能源与智能电网协同创新中心,湖南 长沙 410004;

2. 中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司,湖南 长沙 410007;

3. 国网福建省电力有限公司漳州供电公司,福建 漳州 363000)

摘要:为满足新能源高渗透率电力系统在曲线性状、特征、度量上对负荷特性指标的新需求,提出一种将新能源出力和用电负荷曲线的负荷特性指标拓展为可表达其相互关系的新能源-负荷特性指标。计及数据分布特性与形态波动特征,改进时间序列相似性度量方法,将欧氏距离与改进后的动态时间弯曲距离相结合求取负荷曲线和新能源出力曲线的相似性距离,将其定义为源荷相似性距离作为新能源-负荷特性指标。算例表明,所提指标比传统负荷特性指标能更有效描述新能源高渗透率电力系统负荷特性。

关键词:时间序列;新能源-负荷特性指标;源荷相似性距离;负荷特性指标;新能源消纳

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.011

0 引言

近年来,由于新能源电力的高渗透率、电力负荷的随机性和波动性,源网荷协调调度和运行控制的研究成为热门课题^[1],因此,电力系统的运行特点也由传统的电源调度计划发电曲线跟随电力用户负荷变化曲线或电力用户负荷曲线经削峰填谷后跟随发电设备期望曲线的实时平衡运行^[2],转变为源网荷统一协调、源荷电力曲线互相协调的调整运行,从而最大可能地减少弃风弃光,实现经济、环保、节能等优化目标^[3]。但对由此得到的电力功率曲线仍采用针对单一负荷曲线的传统负荷特性指标,如负荷率、峰谷差、最大负荷利用小时^[4]等,已远远不能满足当前新能源消纳、售电市场开放、综合能源利用、高效互联信息等对电力曲线特征描述和评价的需求。

传统电力系统中,电源出力曲线与负荷曲线因发电、用电必须实时功率平衡,在实际运行时两曲线完全相同,因此二者采用同一套特性指标,统称为负荷特性指标。但是随着新能源的大量并入,系统中存在多种出力特性不同的功率曲线,仍采用针对单一负荷曲线的传统负荷特性指标,已无法准确刻画系统的负荷状况,存在系统中总负荷曲线的峰谷差、负荷率等传统负荷特性指标均优但常规机组出力波动较大、新能源消纳水平低的情况。随着电价和售电市场改革的有序推进,需求侧管理可使用户侧电力负荷曲线产生较大改变,而传统火电、水电、核电等机组由于运行经济性和爬坡调节性能的限制,仍应保持较为平缓的曲线性状。所以,为了最大化消纳新能源,减少弃风弃光,同时保证传统机组出力的

平缓,需求侧管理的目标是通过各种经济、技术、市场、管理等手段使得负荷曲线与新能源出力曲线相似,即实现电力系统源荷协调运行。因此有必要同时考虑负荷需求和新能源发电状况,寻求一种度量两者相似性的方法,将新能源出力和用电负荷曲线的负荷特性指标拓展为可表达其相互关系的新能源-负荷特性指标,从而更加合理有效地描述新能源高渗透率电力系统负荷特性。电力功率曲线大多是按照时间顺序排列的功率值,其属于数据流中的时间序列^[5],而时间序列的相似性度量方法已有广泛的研究^[6-7],因此按照时间序列分析的方法研究新能源-负荷特性是必要且可行的。时间序列的相似性包括数值相似性和形态相似性^[8],目前大多数时间序列相似性研究没能很好地兼顾时间序列的形态特征与统计特性,度量效果不佳。尽管目前时间序列多变量的综合考虑已有一些学者进行研究^[9-10],但在电力系统领域,特别是电力曲线特性指标刻画方面缺乏应用。

因此,本文针对新能源高渗透率电力系统对负荷曲线与新能源出力曲线在性状、特征、度量相似性方面的新需求,计及数据分布特性与形态波动特征,改进时间序列相似性度量方法,将欧氏距离与改进后的动态时间弯曲 DTW (Dynamic Time Warping) 距离相结合,求取负荷曲线和新能源出力曲线的相似性距离,将其定义为源荷相似性距离,并作为新能源-负荷特性指标,用以描述新能源高渗透率电力系统的负荷特性。

1 时间序列相似性度量的改进

1.1 时间序列相似度及其度量

相似度常以距离作为其外在表现形式,可通过距离来衡量任意 2 条时间序列的相互关系,距离越小,2 条序列就越相似;反之则越不相似^[11]。目前,基于距离的时间序列相似度度量中,欧氏距离和

收稿日期:2018-07-25;修回日期:2019-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71331001,51277016)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(71331001,51277016)

DTW 距离使用较为广泛。

1.1.1 欧氏距离

给定 2 条时间序列 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 和 $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 若用 Minkowski 距离来度量, 则有:

$$D_\omega(A, B) = \sqrt[\omega]{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^\omega} \quad (1)$$

其中, ω 为 Minkowski 距离的距离系数, 根据取值的不同, 它可以表示不同的距离度量方式, 当 $\omega=1$ 时, 为曼哈顿距离, 当 $\omega=\infty$ 时, 为 L_∞ 范数且 $D_\infty(A, B) = \max |a_i - b_i|$, 当 $\omega=2$ 时, 即为欧氏距离。式(1)可以看成是一系列距离度量方法的通用形式。

1.1.2 DTW 距离

DTW 运用动态规划思想调整时间序列不同时间点对应元素之间的关系来获取一条最优弯曲路径, 使沿该路径时间序列间的距离最小, 其能很好地度量时间序列之间的关系^[12]。DTW 路径示意图如图 1 所示。

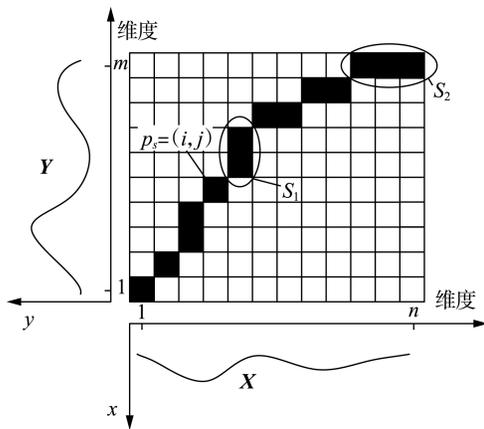


图 1 DTW 路径示意图

Fig.1 Schematic diagram of DTW path

给定 2 条时间序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, 构建 $n \times m$ 阶的距离矩阵 $D_{n \times m}$, 其元素为:

$$D(i, j) = \sqrt{(x_i - y_j)^2} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式(2)表示 2 个时间序列点 x_i 和 y_j 的欧氏距离。将矩阵 D 中每一组相邻元素组成的集合称为弯曲路径, 且需满足边界性、连续性和单调性的约束^[13], 记为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_s, \dots, p_k\}$, 其中 k 为路径中元素 (图 1 中实心方块) 的总个数, 元素 p_s 为路径上第 s 个点的坐标, 即 $p_s = (i, j)$ 。

上述的路径 P 有多条, DTW 的目的在于找到 1 条最优弯曲路径, 使得序列 X 和 Y 的弯曲总代价最小, 即:

$$DTW(X, Y) = \min_P \sum_{s=1}^k D(p_s) \quad (3)$$

为了求解式(3), 通过动态规划方法来构造一个累积代价矩阵 L , 即:

$$L(i, j) = D(i, j) + \min \{L(i-1, j-1), L(i, j-1), L(i-1, j)\} \quad (4)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; L(0, 0) = 0; L(i, 0) = L(0, j) = +\infty$ 。可知, 时间序列 X 和 Y 的 DTW 距离为 $DTW(X, Y) = L(n, m)$ 。

1.2 改进的相似性度量方法

1.2.1 局限性分析

时间序列的相似性包括数值与形态上的相似性两部分, 目前大多数时间序列相似性研究没能很好地兼顾时间序列的形态特征与统计特性, 度量效果不佳。

新能源高渗透率下, 系统进行源荷协调运行, 使得常规发电机计划出力曲线、负荷曲线、新能源发电曲线三者共同协调、相互跟随调整, 进而实现发电曲线与用电曲线相互跟随^[14]。因此在使用时间序列对不同电力曲线进行相似性度量时需同时考虑两曲线的数据分布特性与形态波动特征。尽管目前已有学者对时间序列多变量的综合考虑进行了研究, 但并不适用于新能源-负荷相似性的刻画。因此参照时间序列的相似性度量方法, 本文提出一种改进后适合度量电力曲线相似程度的方法。

1.2.2 时间序列特征表示

在利用欧氏距离反映时间序列具体数值之间差异和全局波动信息的基础上, 为了简单而准确地刻画曲线在各个时间段的上升、下降、平稳等形态特征, 运用直线的斜率表示该时段的形态特征。因此, 将长度为 n 的时间序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 转化为一组长度为 $n-1$ 的形态序列 $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_{n-1})$ 。 X' 形态序列中的元素值 x'_i 满足:

$$x'_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \quad i=1, 2, \dots, n-1 \quad (5)$$

通过式(5)得到的形态序列的数值, 可以充分反映各时间段的趋势信息。

1.2.3 形态序列度量与 DTW 的改进

在欧氏距离度量的基础上引入形态序列, 可以克服仅依靠各时间点数值而忽略重要形态特征的缺陷, 但其度量效果还依赖于距离函数的选择。因此, 对形态序列的度量还需要利用精确的度量方法。DTW 可以弯曲时间轴来匹配点与点, 根据形态精确度量时间序列, 满足度量要求, 因此本文利用 DTW 度量形态序列。

同时, 在寻找 DTW 弯曲路径 P 时, 将弯曲方向为垂直方向或水平方向称为连续弯曲, 如图 1 中, S_1 区域的连续弯曲数 $r=2$, S_2 区域的连续弯曲数 $r=3$ 。当连续弯曲积累到一定次数便会造成过度弯曲。为了避免时间弯曲路径出现过度弯曲的现象, 本文提

出在原有的边界性、连续性和单调性 3 个约束的基础上,增加对连续弯曲数 r 的约束,即:

$$r_x \leq r_{\max}, r_y \leq r_{\max} \quad (6)$$

其中, r_x 和 r_y 分别为水平方向与垂直方向的连续弯曲数; r_{\max} 为所允许的最大连续弯曲数。

由此,式(4)所示累积代价矩阵 L 的元素变成式(7)所示形式。

$$L'(i, j) = \begin{cases} D(i, j) + \min \{ L(i-1, j-1), L(i-1, j), L(i, j-1) \} & r_x \leq r_{\max}, r_y \leq r_{\max} \\ D(i, j) + \min \{ L(i-1, j-1), L(i, j-1) \} & r_x \leq r_{\max}, r_y > r_{\max} \\ D(i, j) + \min \{ L(i-1, j-1), L(i-1, j) \} & r_x > r_{\max}, r_y \leq r_{\max} \\ D(i, j) + L(i-1, j-1) & r_x > r_{\max}, r_y > r_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

则改进的 DTW 距离为:

$$DTW'(X, Y) = L'(n, m) \quad (8)$$

1.2.4 改进的时间序列相似性度量

假设有 2 条时间序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, 利用式(5)分别求解各自的形态序列 X' 和 Y' , 则能同时反映数据分布特性与形态波动特征的相似性度量方法的距离度量为:

$$D_{\text{whole}}(X, Y) = \sqrt{\alpha D_2(X, Y) + \lambda DTW'(X', Y')} \quad (9)$$

其中, α 和 λ 分别为欧氏距离权重与形态距离权重。

该指标在应用于新能源-负荷相似性分析时,既能够对新能源出力曲线与电力负荷曲线的数值进行比较,又能够很好地体现两曲线的形态特征。

2 基于相似性度量的新能源-负荷特性指标

2.1 新能源-负荷曲线功率差异的描述

将每条曲线表示成一个时间序列,如负荷曲线表示为 $P_d = (p_{d(1)}, p_{d(2)}, \dots, p_{d(n)})$, 新能源发电曲线 $P_w = (p_{w(1)}, p_{w(2)}, \dots, p_{w(n)})$ 。由此,基于时间序列相似性度量方法来刻画序列 P_d 与序列 P_w 的相似程度。

图 2 采用欧氏距离对序列 P_d 与序列 P_w 功率数值上的差异进行刻画,如图中竖直虚线所示,即:

$$D_2(P_d, P_w) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_{d(i)} - p_{w(i)})^2} \quad (10)$$

2.2 新能源-负荷曲线形态差异的描述

在对序列 P_d 与序列 P_w 电力负荷数值之间差异进行刻画的基础上,还需对两序列的形态特征进行刻画,即电力负荷变化的趋势。

首先根据式(5)对序列 P_d 与序列 P_w 的形态特征进行刻画,分别得到形态序列 $P'_d = (p'_{d(1)}, p'_{d(2)},$

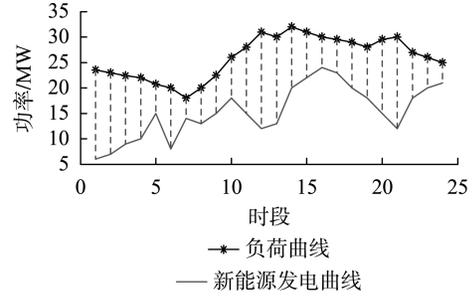


图 2 欧氏距离示意图

Fig.2 Schematic diagram of Euclidean distance

$\dots, p'_{d(n-1)})$ 和 $P'_w = (p'_{w(1)}, p'_{w(2)}, \dots, p'_{w(n-1)})$ 。

图 3 为采用 1.2.3 节中的改进 DTW 方法来度量两形态序列间的距离,如图中虚线所示,即:

$$DTW'(P'_d, P'_w) = L'(n, m) \quad (11)$$

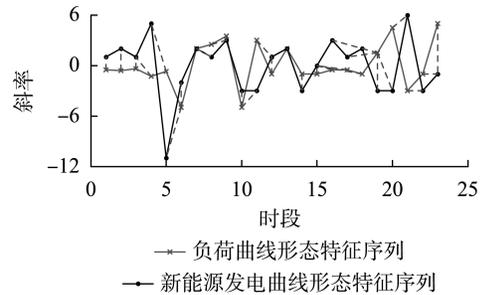


图 3 基于改进 DTW 的形态距离示意图

Fig.3 Schematic diagram of morphological distance based on improved DTW

2.3 源荷相似性距离

综合考虑两曲线的功率数值与功率变化趋势 2 个因素,选择序列 P_w 与序列 P_d 的相似性距离作为新能源-负荷特性指标,并将其定义为源荷相似性距离,即:

$$D_w(P_d, P_w) = \sqrt{\alpha D_2(P_d, P_w) + \lambda DTW'(P'_d, P'_w)} \quad (12)$$

式中等号右边第一项为两序列的欧氏距离,第二项为两序列的形态距离。

3 系统运行特性评价指标

为了说明源荷相似性距离在描述新能源高渗透率电力系统负荷特性上的优越性,采用新能源发电利用率^[15]、常规机组出力波动率、新能源发电的调峰特性指标^[16]作为系统运行特性评价指标进行比较。

3.1 新能源发电利用率

在新能源高度渗透的电力系统中,新能源发电利用率是能综合体现电力系统运行特性的关键指标之一,其定义为一个调度周期内新能源发电上网电量与新能源理论发电量的比值^[15],即:

$$\rho = \frac{\sum_{t=1}^T F_{W(t)}}{\sum_{t=1}^T W_{(t)}} \times 100\% \quad (13)$$

其中, $F_{W(t)}$ 为 t 时段新能源发电实际上网电量; $W_{(t)}$ 为 t 时段新能源发电的预测电量, 即新能源理论发电量。

3.2 常规机组出力波动率

随着新能源发电并网容量的逐渐增加, 系统往往不得不频繁地调整常规机组出力, 甚至频繁启停来适应新能源发电的全额并网, 这不仅会大幅减少常规机组寿命, 而且会增加系统的发电成本。因此, 有必要对常规机组出力波动状况进行度量。参考文献[17]中负荷波动率的概念, 定义常规机组出力波动率, 即机组出力的标准差与机组出力的几何均值之比, 以此反映机组出力波动程度的相对大小, 即:

$$\begin{cases} V_p = \sigma / \theta \\ \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \\ \theta = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n} \end{cases} \quad (14)$$

其中, μ 为机组出力序列的算术平均值。

3.3 新能源发电的调峰特性指标

将新能源发电以负的负荷形式与实际负荷叠加得到净负荷, 通过对比净负荷峰谷差与原始负荷峰谷差之间的关系, 可以刻画新能源发电波动与负荷波动之间的匹配关系^[16]。因此, 使用新能源接入前后系统峰谷差的变化值作为新能源发电的调峰特性指标, 即:

$$\begin{cases} \Delta P_m = P_m - P'_m \\ P_m = P_{\max} - P_{\min} \\ P'_m = P'_{\max} - P'_{\min} \end{cases} \quad (15)$$

其中, P_{\max} 和 P_{\min} 分别为系统原始负荷的峰、谷值; P'_{\max} 和 P'_{\min} 分别为系统净负荷的峰谷值; ΔP_m 为新能源接入前后系统峰谷差的变化值。

4 算例分析

4.1 算例及参数

以文献[3]中源荷协调运行系统为背景进行算例分析。设一个调度周期为 24 h, 每一个调度时段为 30 min。某地区典型接入电网母线端风电出力预测曲线与用户负荷曲线如图 4 所示。为比较以各指标最优为目标对电力系统运行优化的效果, 确定相同日负荷曲线及响应范围, 每一个调度时段负荷响应的出力限制见表 1。风电场装机容量为 350 MW, 传统机组装机容量为 600 MW, 传统机组的最小出力为 200 MW, 最大出力为 600 MW; 单位弃风弃光成本取为 320 元/(MW·h), 可响应负荷的单位调节成本取为 250 元/(MW·h); 常规机组的爬坡速度、运行成本、启停成本见文献[3]; 源荷相似性距离中欧氏距离权重 α 与形态距离权重 λ 分别取为 0.3 和 0.7, 具体选取过程见附录。选取 MATLAB 软件中的

YALMIP 工具箱并调用 cplex 求解器对模型进行编程求解。

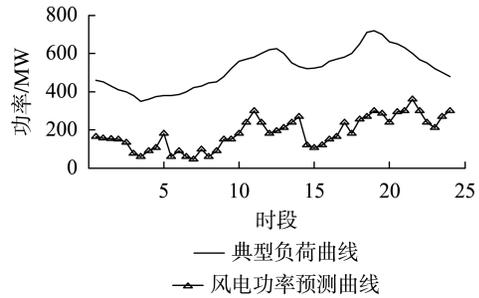


图 4 风电出力预测曲线与用户负荷曲线

Fig.4 Wind power forecasting curve and user load curve

表 1 调度时段负荷响应范围

Table 1 Load response range of dispatch periods		
对象	上限/MW	下限/MW
响应负荷	80	-80

4.2 新能源-负荷相似性仿真分析

4.2.1 2 种系统运行状态分析

典型负荷特性指标, 如文献[18]中标准差、文献[17]中负荷波动率及负荷特性指标中的峰谷差率、负荷率等, 追求的均是负荷曲线的波动程度尽量小。为分析源荷相似性距离描述系统负荷特性的优异性, 与典型指标标准差、峰谷差率、负荷率进行对比分析。选择特定的 2 种系统运行状态, 即传统运行状态与源荷协调运行状态, 具体表现形式如图 5 所示, 对比分析其标准差、峰谷差率、负荷率、源荷相似性距离、常规机组出力波动率及新能源发电的调峰特性指标。

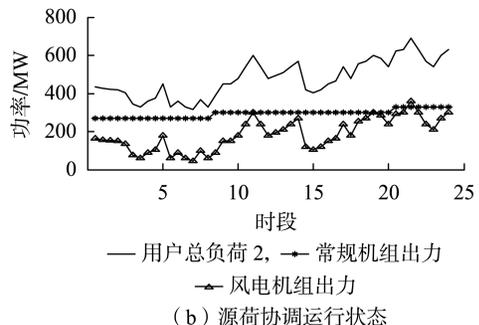
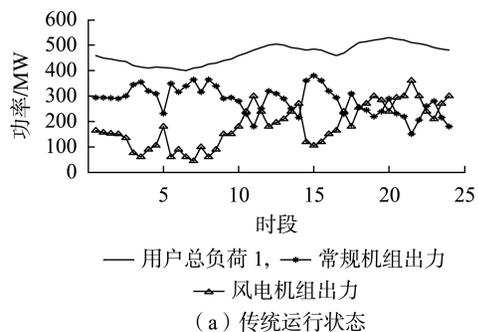


图 5 2 种系统运行状态

Fig.5 Two system operation states

通过图形比较发现,在传统仅针对用户总负荷曲线的负荷特性指标的描述下,图 5(a)中的用户总负荷 1 明显优于图 5(b)中的用户总负荷 2,进一步通过指标刻画了系统负荷状况。

4.2.2 特性指标对比分析

在以往没有新能源接入的情况下,由于用户总负荷曲线和发电机所带负荷的曲线是完全相同的,因此将标准差、峰谷差率、负荷率等负荷特性指标称为负荷特性指标。当前,由于新能源的大量接入,用户总负荷曲线、风电机组出力曲线、常规发电机组出力即所带负荷曲线均是负荷曲线,因此应用负荷特性指标分别对这 3 种负荷曲线进行刻画,结果如表 2 所示(表中标准差、 V_p 、 ΔP_m 、 D_w 为标么值,后同)。

表 2 2 种运行状态下各电力曲线特性指标
Table 2 Characteristic index of each electricity curve under two operation states

运行状态	负荷曲线	峰谷差率/%	标准差	负荷率/%	V_p	ΔP_m	D_w
传统运行状态	用户总负荷 1	26	39.86	87	0.68	-90	42.88
	常规机组出力	63	108.90	53			
	风电机组出力	56	100.00	71			
源荷协调运行状态	用户总负荷 2	54	99.89	69	0.18	315	32.47
	常规机组出力	12	12.30	95			
	风电机组出力	56	100.00	71			

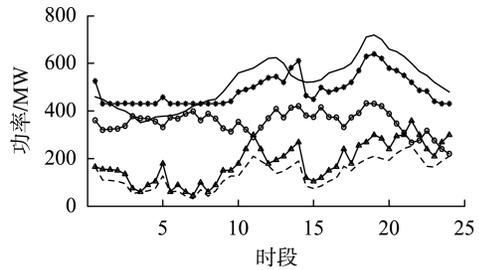
通过分析表 2 发现,传统运行状态下用户总负荷 1 的峰谷差率、标准差、负荷率指标明显优于源荷协调运行状态下的用户总负荷 2,但传统运行状态下常规机组出力的峰谷差率、标准差、负荷率、机组出力波动率指标反而均劣于源荷协调运行状态下的相应指标。同时,在传统运行状态与源荷协调运行状态下风电机组出力峰谷差率、标准差、负荷率指标相同的情况下,前者的新能源发电调峰特性指标劣于后者。可见,传统的负荷特性指标已不能刻画新能源接入系统的负荷状况。而源荷协调运行状态下用户总负荷曲线与风电机组出力曲线的相似性距离指标优于传统运行状态,在新能源接入的情况下,常规机组出力的平缓及新能源的消纳水平与用户总负荷曲线的平缓无关(即与传统负荷特性指标的优劣无关),而与源荷相似性距离的大小有关,因此,源荷相似性距离能够对新能源高渗透率电力系统的负荷状况进行有效刻画。

4.3 典型指标优化效果对比仿真及分析

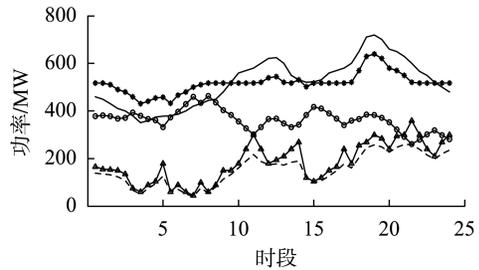
4.3.1 典型指标优化效果图形对比分析

分别以峰谷差率、标准差^[19]、源荷相似性距离为目标函数,以响应出力为上下限,对初始系统运行状态 A 进行优化,优化后的系统运行状态分别记为状态 B—D,如图 6 所示。

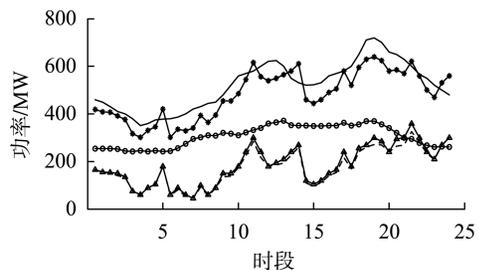
通过对图 6(a)—(c) 进行分析发现,峰谷差率指标与标准差指标在降低总负荷曲线整体的波动性方面有很好的优化效果,但负荷变动没有跟随新能



(a) 峰谷差率优化后的系统运行状态 B



(b) 标准差优化后的系统运行状态 C



(c) 源荷相似性距离优化后的系统运行状态 D

— 原始负荷曲线, - - - 调整后负荷曲线
—●— 常规机组出力曲线, - - - 风电出力预测值
—▲— 风电出力实际值

图 6 优化后的系统运行状态

Fig.6 System operation states after optimization

源出力波动,导致机组出力波动大,新能源利用率低。而源荷相似性距离指标优化后的负荷曲线虽然波动性加大,但负荷的波动较好地跟随新能源出力波动,从而机组出力波动较小,新能源利用率高。这表明在提高新能源与用户负荷曲线的相似程度后,可减少传统机组调频及风电弃风。3 种状态下的负荷响应情况对比见附录。

4.3.2 负荷曲线特性指标对比分析

分别比较不同系统优化运行状态下电力曲线的峰谷差率、标准差、源荷相似性距离、新能源发电利用率、常规机组出力波动率及新能源发电的调峰特性指标,如表 3 所示。

表 3 负荷曲线各指标对比
Table 3 Comparison of each index of load curve

运行状态	峰谷差率/%	标准差	D_w	ρ /%	V_p	ΔP_m
A	51	101.34	43.91	80	0.54	-25.45
B	33	63.53	42.45	73	0.64	-49.50
C	33	43.44	43.71	84	0.52	-9.90
D	53	102.29	32.88	95	0.29	69.68

通过分析表 3 发现,峰谷差率优化后曲线的峰

谷差变小,但源荷相似性距离、新能源发电利用率、常规机组出力波动率及新能源发电的调峰特性指标均较差;标准差指标优化后曲线的标准差最小,同时其他特性指标同样不佳;源荷相似性距离优化后的曲线虽然峰谷差与标准差最大,但源荷相似性距离最小,其他特性指标在同类指标中最优,实现风电高利用率的同时,减少了传统机组调频。

4.3.3 经济效益分析

以24 h为一个调度周期,分别比较系统初始状态及峰谷差率、标准差、源荷相似性距离指标优化后运行状态下的经济效益,如表4所示。

表4 4种运行状态下的经济效益

Table 4 Economic benefits under four operation states

运行状态	启停成本	运行成本	负荷响应成本	弃风成本	万元
					总运行成本
A	29.23	580.23	0	69.43	678.89
B	27.82	575.35	39.67	61.23	704.07
C	30.29	559.45	38.56	62.39	690.69
D	13.27	530.34	31.35	31.47	606.43

通过分析表4发现,峰谷差率与标准差优化后系统运行状态下常规机组的启停成本、运行成本、负荷响应成本、弃风成本均高于源荷相似性距离优化后的系统运行状态。这是因为峰谷差率与标准差均以负荷曲线波动最小为目标,没有考虑负荷曲线与风电出力曲线之间的动态联系,因此虽然负荷曲线趋于平缓,但是常规机组出力波动大,弃风严重,造成了大量启停成本及弃风成本。而源荷相似性距离追求的是负荷曲线的波动尽量跟随风电出力曲线,虽然负荷曲线波动大,但是常规机组无需频繁调整出力,同时有效消纳风电,从而降低了系统运行成本。

峰谷差率考虑的是最大负荷与最小负荷的差值,标准差考虑的是各时段的负荷值偏离其均值的距离大小,两者追求的都是负荷曲线整体波动程度尽量小。但随着新能源的加入,系统的不确定性加大,仅仅追求负荷曲线的波动程度小已不能满足当前电力系统负荷特性描述的要求。源荷相似性距离参考时间序列的相似性,兼顾负荷曲线与新能源出力曲线的数值特征和形态特征,将传统负荷特性指标拓展为可表达新能源出力和用电负荷曲线相互关系的新能源-负荷特性指标。因此,源荷相似性距离对新能源高渗透率电力系统负荷特性的描述更为合理有效。

5 结论

a. 源荷相似性距离能有效描述新能源高渗透率电力系统的负荷特性。通过量化负荷曲线与新能源出力曲线之间的相似性距离,将新能源出力和用电负荷曲线的负荷特性指标拓展为可表达其相互关系

的新能源-负荷特性指标,为新能源高渗透率电力系统负荷特性的刻画提供了有效参考。

b. 时间序列相似性度量方法是分析和度量新能源-负荷特性的有效途径。基于改进时间序列相似性度量方法兼顾序列的统计特性与形态特性,更为合理有效地刻画了负荷曲线与新能源出力曲线的相似程度。

c. 新能源-负荷特性指标是电力需求侧管理和新能源消纳的重要特性指标。在采用技术经济手段提高新能源与用户负荷曲线的相似程度后,可减少传统机组调频及弃风弃光,提高系统运行经济性。

d. 新能源-负荷特性指标是描述新能源高渗透率电力系统负荷特性的新途径。该指标是多种多样的,源荷相似性距离只是其中一种特性指标。而研究建立适用于负荷与电源曲线协调整合、负荷曲线平稳以及当前和未来电力运行与优化问题所需要的源-网-荷-储特性指标及体系将是下一步深入研究的内容。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 崔雪,邹晨露,王恒,等.考虑风电消纳的电热联合系统源荷协调优化调度[J].电力自动化设备,2018,38(7):74-81.
CUI Xue,ZOU Chenlu,WANG Heng, et al. Source-charge coordinated optimization scheduling of electrothermal combined system considering wind power consumption [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 74-81.
- [2] 牛林华,龚庆武.大规模风电入网下的风火电力系统联合优化调度[J].电力自动化设备,2015,35(11):52-58.
NIU Linhua,GONG Qingwu. Joint optimization of wind power and fire power system under large-scale wind power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 52-58.
- [3] 刘文颖,文晶.考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J].中国电机工程学报,2015,35(5):1079-1088.
LIU Wenyong,WEN Jing. Multi-objective optimization of power system source-load coordination considering wind power consumption [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [4] 刘思,李林芝.基于特性指标降维的日负荷曲线聚类分析[J].电网技术,2016,40(3):797-803.
LIU Si,LI Linzhi. Calculation of daily load curve based on dimensionality reduction of characteristic indexes [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 797-803.
- [5] 丁明,黄冯,邹佳芯,等.改进谱聚类与遗传算法相结合的电力时序曲线聚类方法[J].电力自动化设备,2019,39(2):93-99,114.
DING Ming,HUANG Feng,ZOU Jiaxin, et al. A power time series curve clustering method based on improved spectral clustering and genetic algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 93-99, 114.
- [6] BENITEZ I, DIEZ J. Dynamic clustering of residential electricity consumption time series data based on Hausdorff distance [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 140: 517-526.
- [7] 于之虹,黄彦浩.基于时间序列关联分析的稳定运行规则提取方法[J].中国电机工程学报,2015,35(3):519-526.

- YU Zhihong, HUANG Yanhao. A method for extracting stable operation rules based on time series correlation analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 519-526.
- [8] 吴虎胜,张凤鸣. 多元时间序列相似性研究综述[J]. 统计与决策, 2014(7): 77-81.
- WU Husheng, ZHANG Fengming. Review of multivariate time series similarity research[J]. Statistics and Decision, 2014(7): 77-81.
- [9] CAI Q, CHEN L. Piecewise statistic approximation based similarity measure for time series[J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 85: 181-195.
- [10] SUN Youqiang, LI Jiuyong, LIU Jixue, et al. An improvement of symbolic aggregate approximation distance measure for time series [J]. Neurocomputing, 2014, 138: 189-198.
- [11] ŁUCZAK M. Hierarchical clustering of time series data with parametric derivative dynamic time warping[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 62: 123-135.
- [12] CAO D, LIU J. Research on dynamic time warping multivariate time series similarity matching based on shape feature and inclination angle[J]. Journal of Cloud Computing, 2016, 5(1): 11-23.
- [13] 王业, 陆于平. 基于动态时间弯曲的差动保护算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 133-141.
- WANG Ye, LU Yuping. Differential protection algorithm based on dynamic time bending[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 133-141.
- [14] 别朝红, 胡国伟. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120, 159.
- BIE Zhaohong, HU Guowei. Optimization scheduling of wind power generation systems considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120, 159.
- [15] 张程飞, 刘纯. 基于模糊多目标优化的电网日前风电接纳能力评估模型[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 426-431.
- ZHANG Chengfei, LIU Chun. Evaluation model of wind power receptivity based on fuzzy multi-objective optimization [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 426-431.
- [16] 李剑楠, 乔颖. 多时空尺度风电统计特性评价指标体系及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 53-61.
- LI Jiannan, QIAO Ying. An index system for evaluating wind power statistical properties based on multiple spatial and temporal dimensions and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 53-61.
- [17] 龚薇, 刘俊勇. 计及负荷波动率和互补系数的负荷恢复[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2490-2496.
- GONG Wei, LIU Junyong. Load recovery considering load fluctuation and complementary coefficients [J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2490-2496.
- [18] 卫志农, 张思德. 计及电转气的电-气互联综合能源系统削峰填谷研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4601-4609, 4885.
- WEI Zhinong, ZHANG Side. Research on peak load filling in electricity and gas interconnected integrated energy system considering electric rotation gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4601-4609, 4885.
- [19] 杨玉青, 牛利勇. 考虑负荷优化控制的区域配电网储能配置[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1019-1025.
- YANG Yuqing, NIU Liyong. Analysis of energy storage configuration in regional distribution network considering load optimization control [J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1019-1025.

作者简介:



石亮缘

石亮缘(1995—),男,湖南娄底人,硕士研究生,主要从事电力系统优化运行以及电力需求侧管理方面的研究工作(E-mail: ssly0803@163.com);

周任军(1964—),女,山西太原人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化、新能源接入系统、电力需求侧管理、分布式电源规划(E-mail: zrj0731@163.com);

李娟(1981—),女,湖南长沙人,高级工程师,硕士,主要从事电力系统规划等方面的研究工作(E-mail: lijuan0731@163.com)。

New energy-load characteristic index based on time series similarity measurement

SHI Liangyuan¹, ZHOU Renjun¹, LI Juan², WANG Yu², XU Fulu³, WANG Yangzhi¹

(1. Hunan Province Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid,

Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China;

2. Hunan Electric Power Design Institute Corporation Ltd., China Energy Engineering Group, Changsha 410007, China;

3. Zhangzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Power Co., Ltd., Zhangzhou 363000, China)

Abstract: In order to meet the new demand of new energy high-permeability power system on load characteristic index in terms of curve traits, characteristics and measures, a new energy-load characteristic index is proposed, which is expanded from the load characteristic index of new energy output and power load curve to express their relation. Considering the characteristics of data distribution and morphological fluctuation, the time series similarity measure method is improved, and the similarity distance between load curve and new energy output is obtained with the combination of Euclidean distance and the improved dynamic time warping distance, which is defined as source-load similarity distance and taken as the new energy-load characteristic index. Case shows that the proposed index can describe the load characteristic of new energy high-permeability power system more effectively than the traditional load characteristic index.

Key words: time series; new energy-load characteristic index; source-load similarity distance; load characteristic index; new energy consumption

附录：

1 源荷相似性距离权重选取及其影响

首先采用网格搜索法^[1]对源荷相似性距离中的欧氏距离权重 α 与形态距离 λ 权重进行选取。其基本原理是让 α 和 λ 在一定的空间范围内按照规定的步距划分网格并遍历网格内的所有点进行取值，再将取得的参数组代入优化模型中验证其优化结果，最终取使目标值新能源发电利用率达到最高的参数组作为最佳参数。将 α 和 λ 的范围设置为 $[0, 1]$ ，步距为 0.05。得出权重寻优结果及其对优化结果的影响如图 A1 所示。

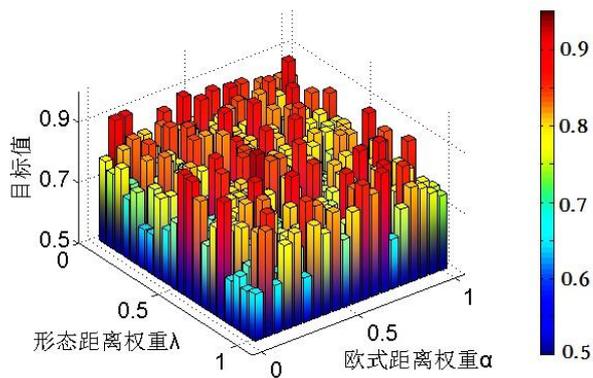


图 A1 权重选择结果图

Fig.A1 Graph of weight selection result

从图 A1 中可以发现，权重 α 和 λ 的选取对目标值新能源发电利用率具有较大影响，选取不当会造成目标值偏低。其中当欧氏距离权重 α 取 0.3，形态距离权重 λ 取 0.7 时，新能源发电利用率达到最大，为 95%，故选取 $\alpha=0.3$ ， $\lambda=0.7$ 作为源荷相似性距离中欧氏距离与形态距离的权重。

2 负荷响应情况对比分析

分别比较不同系统优化运行状态下负荷的响应情况，结果如图 A2 所示。

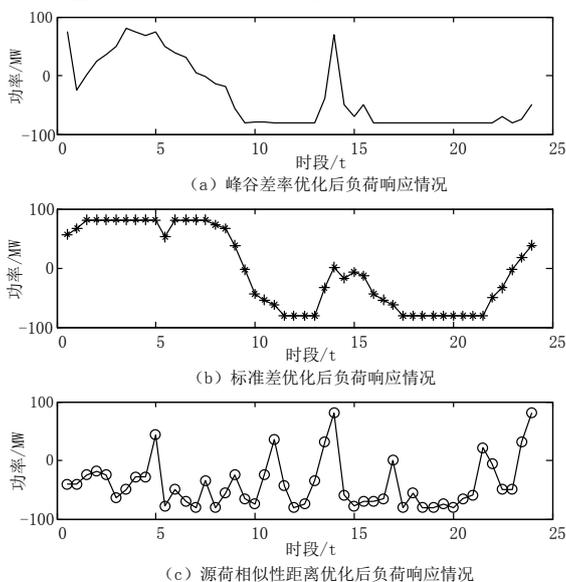


图 A2 3 种优化状况下负荷响应情况

Fig.A2 Load response under three optimization conditions

通过图 A2 分析可知，以峰谷差率与标准差为目标做优化时，负荷响应主要体现为在峰时段减少负荷

实现削峰（如图 a 中时段 9—14、15—24、图 b 中时段 10—23），在谷时段增加负荷来填谷（如图 a 中时段 3—7、图 b 中时段 1—9）。而以源荷相似性距离为目标的系统运行时，负荷响应体现为跟随新能源出力波动，从而减低了传统机组的调频压力，同时保证了新能源的高利用率。表明以源荷相似性距离作为目标进行需求响应优化系统运行，对于减少传统机组调频、减少风电弃风更加合理有效。

参考文献：

[1] RAJIV T,VIKAS W. Optimization of spherical roller bearing design using artificial bee colony algorithm and grid search method[J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics,2015,16(4):221-233.