

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.05.008

面向网络节点的新能源高占比系统消纳阻力精细化评估

苏常胜^{1,2}, 王森², 孙谊嫔¹, 李风婷²

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830006;

2. 新疆大学电气工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830047)

摘要:随着新能源装机容量的不断提升, 新能源高占比系统弃风弃光问题严峻, 开展新能源消纳问题研究, 精确定位新能源消纳阻力对提升新能源消纳措施的制定有重要意义。文中提出一种面向网络节点的电力系统新能源消纳阻力精细化评估方法。首先, 基于潮流追踪算法将网络节点潮流划分为常规机组注入、新能源注入和负荷流出三部分; 其次, 从网络节点角度建立调峰、调频及节点电压偏差约束与新能源消纳的数学关系模型, 计及三者耦合关系分析网络节点弃电情况; 然后, 构建基于网络节点的新能源消纳阻力评估模型并求解, 定位系统中新能源消纳的关键节点, 明确各节点新能源消纳制约因素并量化新能源消纳阻力; 最后, 基于改进 IEEE 39 节点系统设计算例, 验证了评估方法的有效性。所提评估方法可为电力部门采取措施以提升新能源消纳提供依据。

关键词:新能源高占比系统; 新能源消纳阻力; 精细化评估; 新能源限制电量; 潮流追踪算法; 关键节点

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)05-0067-09

0 引言

随着电力系统新能源占比增高, 电力不平衡概率增加, 系统峰谷差增大, 灵活性调节能力严重下降, 系统反调峰特性加剧, 新能源消纳面临重大挑战^[1-2]。考虑新能源特性和电网形态演化, 准确、精细评估电力系统新能源消纳阻力, 对提升新能源消纳措施的制定及未来电力系统的构建意义重大。

目前针对电力系统新能源消纳能力评估的研究主要分为基于时序^[3-12]和非时序^[13-18]的2类方法。文献[3]从节点电压和网络安全约束的角度, 研究了兼顾不同节点消纳能力耦合关系的实时风电消纳能力评估方法。文献[4-7]从调峰能力等多个角度分析电网弃风情况, 其中文献[5]对调峰能力和线路传输容量约束2种因素影响下的可再生能源消纳贡献度进行了分析; 文献[6]提出了一种兼顾稳态、动态平衡约束的新能源消纳能力评估方法。文献[8-10]则对跨区电网模式下的新能源消纳能力展开了研究。文献[11]基于鲁棒优化理论对最优的风电消纳区间进行了研究。文献[12]提出了一种基于鲁棒优化理论的综合能源系统实时风电接纳能力评估方法。基于时序的新能源消纳能力评估方法对数据需求苛刻, 因此一些学者开展了对数据需求更小的非时序评估方法的研究。文献[13-16]基于随机生产模拟方法对新能源消纳能力进行评估; 文献[17]基于概率统计理论提出了

一种非时序新能源消纳能力评估方法; 文献[18]提出了一种风力发电全过程消纳评价方法, 以确定风电消纳短板。

上述文献均从整个系统角度对不同场景下新能源消纳能力评估方法展开研究, 未能明确系统内部的新能源消纳情况, 也不能从系统节点角度分析各阻碍因素对新能源消纳的制约情况。为精准定位阻碍新能源消纳的关键节点, 量化关键节点的关键制约因素的消纳阻力, 文中提出一种新能源高占比系统新能源消纳阻力精细化评估方法。该方法从系统节点角度出发, 根据潮流追踪算法, 将系统节点功率分为常规机组注入、新能源注入和负荷流出三部分; 基于调峰、调频机制并考虑节点电压约束情况量化各节点新能源限制功率; 考虑不同影响因素间的耦合关系, 建立面向节点的新能源消纳阻力精细化评估模型。该方法能够实现对系统中各节点新能源消纳阻力的量化评估, 也能通过各节点消纳阻力的叠加计算整个系统的新能源消纳阻力。

1 制约新能源消纳关键因素及机理分析

1.1 制约新能源消纳关键因素

电力系统必须在满足功率实时平衡和频率、电压稳定的条件下运行。新能源大量并入电网, 一方面系统调节资源被替代, 系统调峰、调频容量占比减小, 系统无功支撑能力降低; 另一方面将增加系统干扰, 导致峰谷差、频率偏差及节点电压偏差增大。在系统调节能力不足以应对新能源并网所带来的系统干扰时, 必须限制新能源并网以确保系统

收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51767023)

安全稳定运行,从而造成新能源弃电^[19-21]。因此,从电网层面来讲,当新能源并入电网给系统带来扰动时,系统的调峰能力、频率及电压调节能力是制约新能源消纳的关键因素,如图1所示。

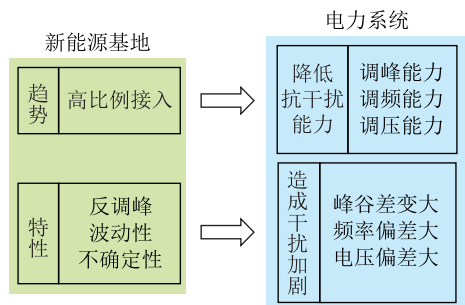


图1 新能源消纳主要限制因素

Fig.1 Main limiting factors of renewable energy consumption

1.2 制约因素机理分析

从节点角度考虑,对系统中所有节点依次编号,节点编号集合 $M = \{i | i = 1, 2, \dots, m\}$, m 为系统节点总数。将系统节点分为常规机组并网节点 g ($g \in G$)、新能源并网节点 n ($n \in N$)、联络线节点 c ($c \in C$) 和负荷节点 l ($l \in L$) 四类,集合 G, N, C, L 为集合 M 的4个子集。基于潮流追踪算法将系统中任意节点功率分成常规机组注入、新能源注入和负荷流出三部分,记为 $P_i = \{P_{G,i}(t), P_{N,i}(t), P_{L,i}(t)\}$ 。从调峰、调频需求及节点电压约束分别量化新能源制约功率。

1.2.1 调峰需求制约

从调峰角度考虑,新能源弃电原因主要包含常规机组在负荷低谷时不能减小其出力造成新能源弃电和常规机组功率下坡能力不能应对新能源功率波动2个方面,其示意图如图2。

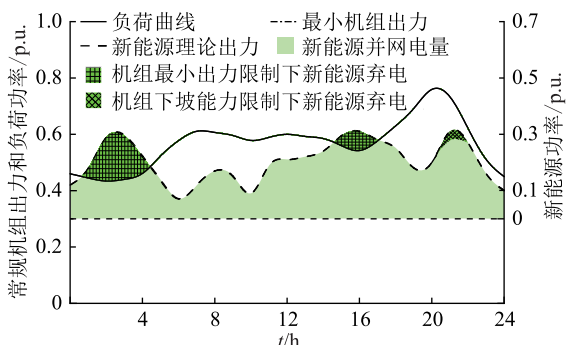


图2 调峰需求制约新能源消纳示意

Fig.2 Schematic diagram of renewable energy consumption constrained by peak demand regulation

设负荷节点 l 在 t 时刻受常规机组最小技术出力制约和常规机组下坡能力制约的消纳受阻功率分别为 $\Delta P_{NR,l}(t)$ 和 $\Delta P_{NC,l}(t)$, 计算如下:

$$\Delta P_{NR,l}(t) =$$

$$\begin{cases} P_{NT,l}(t) - P_{NS,l}(t) & P_{NT,l}(t) > P_{NS,l}(t) \\ 0 & P_{NT,l}(t) \leq P_{NS,l}(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta P_{NC,l}(t) =$$

$$\begin{cases} (V_{NT,l}(t) - V_{NC,l}(t)) \Delta t & V_{NT,l}(t) > V_{NC,l}(t) \\ 0 & V_{NT,l}(t) \leq V_{NC,l}(t) \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{NS,l}(t) = P_{L,l}(t) - P_{Gmin,l}(t) \quad (3)$$

$$V_{NC,l}(t) = V_{L,l}(t) - V_{Gmin,l}(t) \quad (4)$$

式中: $P_{NT,l}(t)$, $P_{NS,l}(t)$ 分别为节点 l 在 t 时刻的新能源理论注入功率和接纳空间; $V_{NT,l}(t)$, $V_{NC,l}(t)$ 分别为节点 l 在 t 时刻的新能源理论注入功率变化率和容许变化率; $P_{L,l}(t)$, $P_{Gmin,l}(t)$ 分别为 t 时刻节点 l 的负荷和最小技术出力下常规机组在节点 l 所分配的功率; $V_{L,l}(t)$, $V_{Gmin,l}(t)$ 分别为 t 时刻节点 l 的负荷变化率和在节点 l 所分配的常规机组最大下坡速率; Δt 为出力调整时间间隔。

1.2.2 调频需求制约

新能源功率上升或负荷下降时造成的频率变化与发电机备用容量、发电机组功率频率调节系数和负荷功率频率调节系数等有关^[22-24]。负荷和发电机有功功率与频率分别呈现正相关和负相关关系,暂不考虑节点电压受负荷变化影响及发电机自动发电控制(automatic generation control, AGC)调节策略,将新能源接入功率看作负的负荷,当因新能源功率上升(或负荷下降)引起系统频率由额定稳态频率 f_R 上升至新的稳态频率 f_1 时,系统稳态频率变化量 $\Delta f = f_1 - f_R$, 节点调频特性如图3所示。

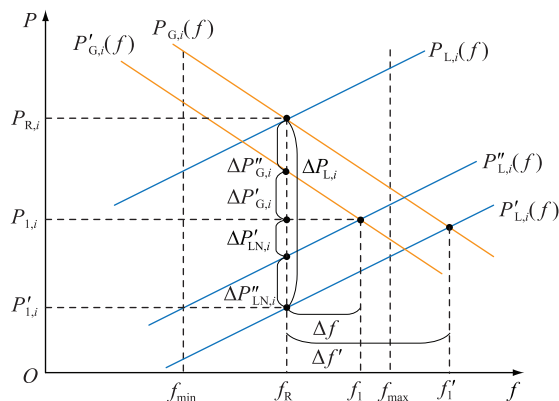


图3 节点调频特性

Fig.3 Frequency modulation characteristics of nodes

图3中, f_{max} , f_{min} 分别为频率稳定上、下限; f'_1 , f_1 分别为经一、二次调频后系统频率; $P_{R,i}$, $P'_{1,i}$, $P_{1,i}$ 分别为扰动发生前、调频过程中和调频后系统平衡功率。设节点 i 原始发电机组有功功率-频率静态特性曲线为 $P_{G,i}(f)$, 负荷功率-频率静态特性曲线为 $P_{L,i}(f)$ 。新能源功率上升后,当系统通过一

次调频达到新的稳态时,节点*i*的负荷功率-频率静态特性曲线为 $P'_{L,i}(f)$;当系统通过二次调频达到新的稳态时,节点*i*的发电机组有功功率-频率静态特性曲线为 $P'_{G,i}(f)$,负荷功率-频率静态特性曲线为 $P''_{L,i}(f)$ 。设系统调频后节点*i*常规机组注入功率变化量和负荷变化量分别为 $\Delta P_{G,i}(t)$ 和 $\Delta P_{L,i}(t)$,其中经一、二次调频阶段节点*i*发电机组有功功率变化量和负荷功率变化量分别为 $\Delta P'_{G,i}(t)$, $\Delta P''_{G,i}(t)$ 和 $\Delta P'_{L,i}(t)$, $\Delta P''_{L,i}(t)$ 。发电机二次调频容量不足时负荷功率变化量完全由新能源承担,则各节点新能源消纳受阻功率为 $\Delta P_{NF,i}(t)$,计算如下:

$$\Delta P_{NF,i}(t) = [(\beta - 1)K_{LN,i} + K_{G,i}] \Delta f(t) + \Delta P''_{G,i}(t) - \Delta P_{L,i}(t) \quad (5)$$

式中: $\Delta P_{L,i}(t)$ 为节点*i*负荷下降量; β 为节点*i*负荷功率中新能源功率占比; $K_{G,i}$, $K_{LN,i}$ 分别为节点*i*常规发电机组、负荷频率调节系数。

1.2.3 节点电压约束制约

实际电网无功备用及励磁系统调节能力有限,当功率波动较强的新能源并入电网时,可能导致新能源并网点电压越限,影响电能质量甚至威胁系统稳定,因此必要时会限制新能源并网功率以确保节点电压满足要求^[25-27]。

新能源场站通过输电线路接入并网点,其等效电路如图4所示。其中 $U_{S,g}$ 为系统侧等值节点*g*额定电压; $U_{C,j}$ 为并网点*j*电压; $R_{S,gj}$, $X_{S,gj}$ 分别为节点*g*,*j*间等值输电线路的等效电阻、电抗; $R_{N,ij}$, $X_{N,ij}$ 分别为节点*i*,*j*间新能源送出线路的等效电阻、电抗; $P_{S,g}$, $Q_{S,g}$ 分别为等值节点*g*向节点*j*输送的总有功、无功功率; $P_{CS,j}$, $Q_{CS,j}$ 分别为系统侧等值线路末端有功、无功功率; $P_{N,i}$, $Q_{N,i}$ 分别为新能源场站向并网点*j*传输的总有功、无功功率; $P_{CN,j}$, $Q_{CN,j}$ 分别为新能源场站向并网点*j*传输的实际有功、无功功率; $P_{L,j}$, $Q_{L,j}$ 分别为节点*j*负荷有功、无功功率。

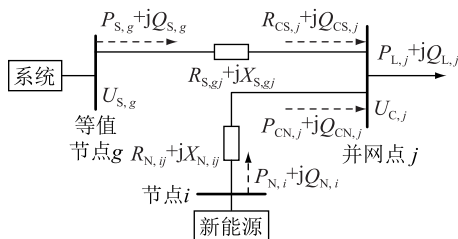


图4 新能源并网等效电路

Fig.4 Renewable energy grid-connected equivalent circuit

以 $U_{S,g}$ 为参考电压,忽略电压偏差纵分量,则*t*时刻并网点*j*电压偏差为:

$$\Delta U_{C,j}(t) = U_{C,j}(t) - U_{S,g} = \frac{P_{S,g}(t)R_{S,gj} + Q_{S,g}(t)X_{S,gj}}{U_{S,g}} \quad (6)$$

将 $P_{S,g}(t)$, $Q_{S,g}(t)$ 用含 $P_{N,i}(t)$ 的表达式替换,可得到并网点电压偏差与新能源并网容量间的关系曲线,如图5所示。

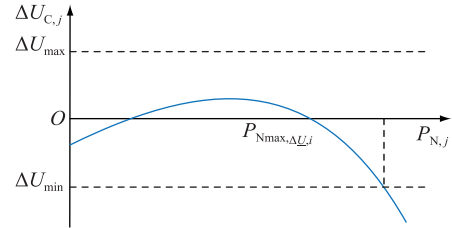


图5 并网点电压偏差随新能源接入功率增加的变化情况

Fig.5 The change of the voltage deviation at grid-connected point with the increase of renewable energy access power

图5中, ΔU_{max} , ΔU_{min} 分别为节点电压稳定偏差上、下限。可以看出,当*t*时刻新能源并网功率超过电压偏差约束的新能源最大并网功率 $P_{Nmax,\Delta U,i}(t)$ 时,新能源并网点*j*电压偏差越下限,此时须对新能源功率进行限制,以满足并网点*j*电压合格的要求。则以节点*i*为例,计算节点电压偏差约束造成的新能源限制功率 $\Delta P_{N,\Delta U,i}(t)$,具体如下:

$$\Delta P_{N,\Delta U,i}(t) = \begin{cases} P_{NT,i}(t) - P_{Nmax,\Delta U,i}(t) & P_{NT,i}(t) > P_{Nmax,\Delta U,i}(t) \\ 0 & P_{NT,i}(t) \leq P_{Nmax,\Delta U,i}(t) \end{cases} \quad (7)$$

1.3 制约因素耦合关系

以上分析表明,弃风、弃光的发生是多种因素共同作用的结果,且不是简单的线性叠加^[9]。从调峰角度分析,新能源消纳受阻主要源于新能源消纳空间或功率调节能力不足;从调频角度分析,式(5)中包含常规发电机组调频功率调节容量,该调节容量受制于常规发电机组调节能力,但其与式(2)中的常规发电机组功率调节能力在时间尺度上是不同的,因此调峰、调频层面制约因素之间不存在耦合关系。从电压偏差约束角度考虑,新能源消纳空间还受节点电压偏差的制约。

针对调峰与电压偏差约束制约因素间的耦合关系,建立数学模型如下:

$$\Delta P_{PU,i}(t) = \max(\Delta P_{NR,i}(t), \Delta P_{N,\Delta U,i}(t)) \quad (8)$$

式中: $\Delta P_{PU,i}(t)$ 为节点*i*调峰与电压偏差约束制约因素耦合下的新能源限制出力。式(8)表示对于同

一节点,新能源消纳空间既受常规机组最小出力影响,又受节点电压偏差约束影响,因此计算新能源限制出力时,须兼顾二者同时满足。

2 新能源消纳阻力精细化评估模型

2.1 目标函数

综合考虑调峰、调频、电压偏差约束及其耦合关系对新能源消纳的制约,建立新能源高占比系统消纳阻力最小的目标函数,具体如下:

$$F = \min(\mathbf{R}^T(\Delta\mathbf{P}_{NC,t} + \Delta\mathbf{P}_{NF,t} + \Delta\mathbf{P}_{PU,t})) \quad (9)$$

$$\Delta\mathbf{P}_{NC,t} = [\Delta P_{NC,1}(t) \cdots \Delta P_{NC,i}(t) \cdots \Delta P_{NC,m}(t)]^T \quad (10)$$

$$\Delta\mathbf{P}_{NF,t} = [\Delta P_{NF,1}(t) \cdots \Delta P_{NF,i}(t) \cdots \Delta P_{NF,m}(t)]^T \quad (11)$$

$$\Delta\mathbf{P}_{PU,t} = [\Delta P_{PU,1}(t) \cdots \Delta P_{PU,i}(t) \cdots \Delta P_{PU,m}(t)]^T \quad (12)$$

式中: \mathbf{R} 为列向量,其维数等于系统节点总数 m ,有负荷流出的节点对应元素取值为1,其他为0; $\Delta\mathbf{P}_{NC,t}$ 为受系统各节点常规机组下坡能力制约消纳受阻功率组成的向量; $\Delta\mathbf{P}_{NF,t}$ 为系统各节点调频需求造成消纳受阻功率组成的向量; $\Delta\mathbf{P}_{PU,t}$ 为系统各节点调峰与电压偏差约束制约因素耦合情况下消纳受阻功率组成的向量。

2.2 约束条件

通过上述分析,可将模型的约束条件分为2类,即节点层面约束条件和系统层面约束条件。

2.2.1 节点层面约束

常规机组并网节点的常规发电机组功率及功率调节速率约束:

$$\begin{cases} P_{Gmin,g} \leq P_{G,g}(t) \leq P_{Gmax,g} \\ Q_{Gmin,g} \leq Q_{G,g}(t) \leq Q_{Gmax,g} \end{cases} \quad (13)$$

$$V_{Gmin,g}(t) \leq V_{G,g}(t) \leq V_{Gmax,g}(t) \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{P_{Gmin,g} - P_{G,g}(t)}{\Delta t} \leq \frac{P_{Gmin,g} - P_{G,g}(t)}{\Delta t} \\ V_{Gmin,g} \leq V_{Gmin,g} > \frac{P_{Gmin,g} - P_{G,g}(t)}{\Delta t} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \frac{P_{Gmax,g} - P_{G,g}(t)}{\Delta t} \leq \frac{P_{Gmax,g} - P_{G,g}(t)}{\Delta t} \\ \bar{V}_{Gmax,g} \leq \bar{V}_{Gmax,g} \leq \frac{P_{Gmax,g} - P_{G,g}(t)}{\Delta t} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{G,g}(t)$, $Q_{G,g}(t)$, $V_{G,g}(t)$ 分别为 t 时刻 g 节

点常规机组有功功率、无功功率和功率调节速率; $P_{Gmax,g}$, $P_{Gmin,g}$, $Q_{Gmax,g}$, $Q_{Gmin,g}$ 分别为 g 节点常规机组有功功率上、下限和无功功率上、下限; $V_{Gmax,g}(t)$, $V_{Gmin,g}(t)$ 分别为 t 时刻 g 节点常规机组功率调节速率上、下限; $\bar{V}_{Gmax,g}$, $\bar{V}_{Gmin,g}$ 分别为 g 节点常规机组固有调节速率上、下限。

新能源并网节点的新能源场站功率约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{N,n}(t) \leq P_{Nmax,n} \\ 0 \leq Q_{N,n}(t) \leq Q_{Nmax,n} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{N,n}(t)$, $Q_{N,n}(t)$ 分别为 t 时刻 n 节点新能源场站有功功率、无功功率; $P_{Nmax,n}$, $Q_{Nmax,n}$ 分别为并网节点 n 新能源有功、无功出力上限。

所有负荷节点的常规机组注入功率总和、功率变化速率总和及新能源注入功率总和约束方程:

$$\sum_{g \in G} P_{Gmin,g} \leq \sum_{l \in L} P_{G,l}(t) \leq \sum_{g \in G} P_{Gmax,g} \quad (18)$$

$$\sum_{g \in G} V_{Gmin,g} \leq \sum_{l \in L} V_{G,l}(t) \leq \sum_{g \in G} V_{Gmax,g} \quad (19)$$

$$0 \leq \sum_{l \in L} P_{N,l}(t) \leq \sum_{g \in G} P_{Nmax,g} \quad (20)$$

式中: $P_{G,l}(t)$, $V_{G,l}(t)$, $P_{N,l}(t)$ 分别为 t 时刻 l 节点常规机组注入功率、功率变化率及新能源注入功率。

常规机组最小出力情况下,受新能源场站出力及负荷需求不同的影响,负荷节点的常规机组最小出力分配功率也存在时空特性,即不同时间、不同负荷节点的常规机组最小分配功率不同,记为 $P_{Gmin,l}(t)$ 。常规机组最小出力平衡方程:

$$\sum_{l \in L} P_{Gmin,l}(t) = \sum_{g \in G} P_{Gmin,g}(t) \quad (21)$$

同理,在常规机组调节能力不足的情况下,最大下坡速率平衡方程:

$$\sum_{l \in L} V_{Gmin,l}(t) = \sum_{g \in G} V_{Gmin,g}(t) \quad (22)$$

与此同时,系统常规发电机组一次调频总备用容量及二次调频总备用容量约束方程:

$$\sum_{g \in G} K_{G,g} \Delta f(t) = \sum_{l \in L} K_{G,l} \Delta f(t) \leq S_{FM1} \quad (23)$$

$$\sum_{g \in G} \Delta P''_{G,g}(t) = \sum_{l \in L} \Delta P''_{G,l}(t) \leq S_{FM2} \quad (24)$$

式中: S_{FM1} , S_{FM2} 分别为系统常规机组一、二次调频总备用容量; $K_{G,g}$, $K_{G,l}$ 分别为常规机组在常规机组并网节点 g 和负荷节点 l 的等效常规机组调频系数; $\Delta P''_{G,g}(t)$, $\Delta P''_{G,l}(t)$ 分别为常规机组在常规机组并网节点 g 和负荷节点 l 的二次调频功率。

节点电压偏差应满足约束:

$$\Delta U_{min,i} \leq \Delta U_i(t) \leq \Delta U_{max,i} \quad (25)$$

式中: $\Delta U_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 的电压偏差; $\Delta U_{max,i}$,

$\Delta U_{\min,i}$ 分别为 t 时刻节点 i 的电压偏差上、下限。

线路负载约束:

$$P_{\min,ij} \leq P_{ij}(t) \leq P_{\max,ij} \quad (26)$$

式中: $P_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 i, j 间线路传输有功功率, 功率由节点 i 流向节点 j 时取正值, 反之取负值; $P_{\max,ij}, P_{\min,ij}$ 分别为节点 i, j 间线路传输有功功率上、下限。

2.2.2 系统层面约束

整个系统功率平衡约束:

$$\sum_{g \in G} P_{G,g}(t) + \sum_{n \in N} P_{N,n}(t) = \sum_{l \in L} P_{L,l}(t) \quad (27)$$

系统稳态频率变化量应满足约束方程:

$$\Delta f_{\min} \leq \Delta f(t) \leq \Delta f_{\max} \quad (28)$$

式中: $\Delta f_{\max}, \Delta f_{\min}$ 分别为系统频率变化量上、下限。

2.3 评估流程

根据上文理论, 评估流程主要分为以下 4 步:

- (1) 基于系统潮流, 采用潮流追踪算法获取各节点潮流成分;
- (2) 生成多约束因素新能源弃电功率计算公式;
- (3) 构建消纳能力精细化评估模型, 并采用 Cplex 对模型进行求解, 获得各节点弃电功率;
- (4) 根据求解结果计算各因素弃电功率及总弃电功率, 并根据仿真时长 T 计算相应弃电量。

具体评估流程如图 6 所示。

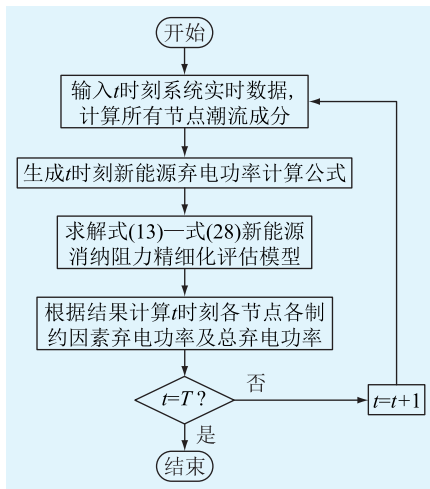


图 6 新能源消纳阻力评估流程

Fig.6 Evaluation process of renewable energy consumption resistance

3 算例分析

3.1 算例数据

文中算例模型为改进的新英格兰 10 机 39 节点系统, 改进系统结构如图 7 所示。系统总装机容量为 7 912 MW, 将原系统中 G05、G06、G07 和 G09 常

规机组用 WF1、WF2、WF3、PF 新能源场站代替。WF1、WF2 和 WF3 为风电场, PF 为光伏电站, 系统中新能源装机容量占比为 38.42%, 机组额定装机容量如表 1 所示。进行评估前, 算例模型作如下设定: 除联络电网外其余电源均参与调频, 主要参与调峰的电源为火电 G3 和水电 G2; 水电和火电的最大调节速度分别为每分钟 20% 和每分钟 1%。

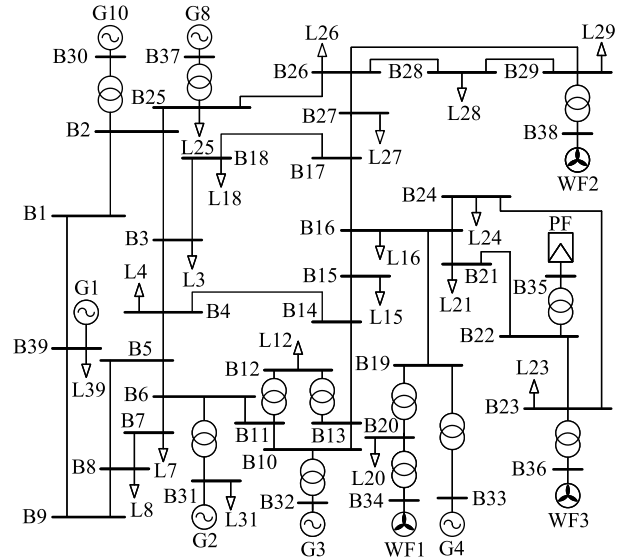


图 7 改进 IEEE 39 节点系统

Fig.7 Improved IEEE 39-bus system

表 1 IEEE 39 节点系统电源装机容量

Table 1 Installed power capacity of IEEE 39-bus system

电源	类型	装机容量/MW	电源	类型	装机容量/MW
G1	火电	550	PF	光伏	650
G2	水电	800	WF3	风电	810
G3	火电	850	G8	火电	840
G4	核电	832	WF2	风电	830
WF1	风电	750	G10	联络电网	1 000

为验证文中方法对多场景的适用性, 分别选取夏季和冬季的某日作为典型日, 分别记为典型日 1 和典型日 2。其特点为: (1) 典型日 1 新能源总出力较大, 波动较大, 负荷相对大; (2) 典型日 2 新能源总出力较小, 波动较小, 负荷也相对小。2 个典型日的新能源出力和负荷曲线见图 8—图 10。基于 2 个典型日电源、负荷功率, 采用文中方法进行评估。

3.2 新能源消纳阻力评估

首先, 基于潮流计算结果采用潮流追踪算法确定各节点有功功率成分, 在此基础上, 采用文中所提评估方法对该算例系统进行分析。

图 11、图 12 分别为典型日 1、2 系统各节点新能源制约功率。可以看出, 不同节点的新能源制约功率差异较大, 主要因为各节点在网络中的位置及

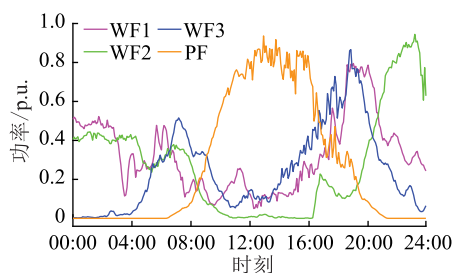


图8 典型日1各新能源出力

Fig.8 Output of renewable energy on typical day 1

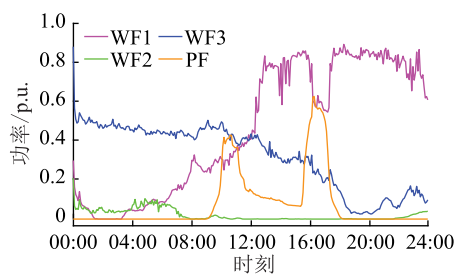


图9 典型日2各新能源出力

Fig.9 Output of renewable energy on typical day 2

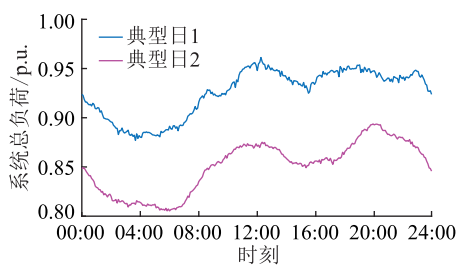


图10 典型日1和典型日2负荷曲线

Fig.10 Load on typical day 1 and 2

各节点功率成分中新能源占比不同。图13为典型日1和典型日2的新能源总制约功率,可以看出,典型日1制约功率略高于典型日2。分析原因可得,虽然典型日2负荷低于典型日1,但典型日1新能源功率波动高于典型日2,因此典型日1在某些时段新能源制约功率偏高。

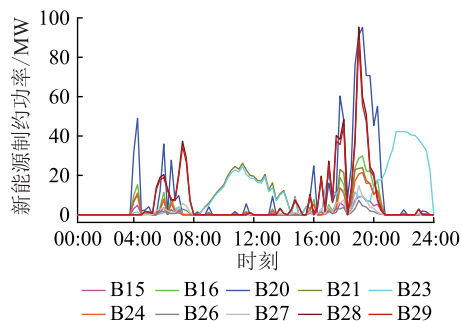


图11 典型日1各节点新能源制约功率

Fig.11 Restricted power of renewable energy at each node on typical day 1

表2为典型日1和典型日2中系统各节点的新

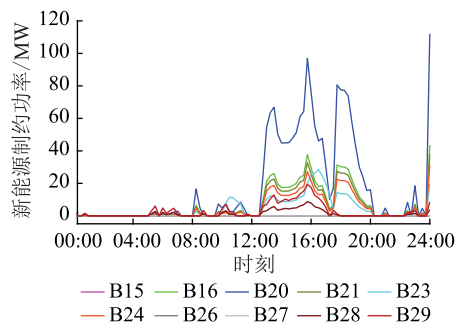


图12 典型日2各节点新能源制约功率

Fig.12 Restricted power of renewable energy at each node on typical day 2

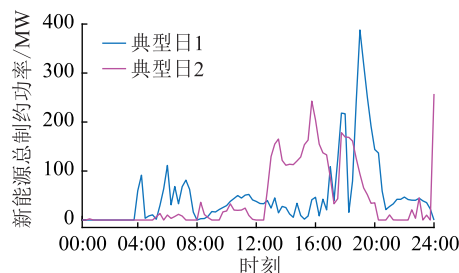


图13 两典型日系统新能源总制约功率

Fig.13 Total restricted power of renewable energy on typical day 1 and 2

能源受限电量。

表2 典型日1和典型日2各节点新能源受限电量

Table 2 Restricted amount of renewable energy at each node on typical day 1 and 2 MW·h

节点	典型日1受限电量			典型日2受限电量		
	调峰	调频	电压约束	调峰	调频	电压约束
15	15.89	7.36	0	0	0	0
16	50.70	23.50	0	130.56	36.58	13.68
20	161.23	74.88	15.23	335.23	93.92	40.12
21	121.09	33.40	0	113.82	31.89	20.50
23	181.37	69.25	25.68	80.83	31.95	12.67
24	36.47	16.90	0	93.91	26.31	8.05
26	9.94	3.70	0	0	0	0
27	20.09	7.48	0	0	0	0
28	130.01	48.44	5.15	29.45	0.32	0
29	120.86	45.03	30.13	65.52	0.72	7.89

可以看出,在调峰制约因素方面,2个典型日均以节点20的受限电量最高,分别为161.23 MW·h和335.23 MW·h。此外,3个新能源消纳制约因素中调峰制约电量最高、电压约束制约电量最低,这是由于当新能源装机容量增加时,系统调峰备用源出力以达到功率平衡的目的,而电压越限可以通过调整无功补偿及优化无功分布进行限制,所以,其受限电量最低。另外,典型日1和典型日2调峰、调频、电压约束3个制约因素导致的新能源受限电量

分别为 847.65 MW·h、329.94 MW·h、76.19 MW·h 和 849.32 MW·h、221.69 MW·h、102.91 MW·h。2 个典型日的受限电量总和分别为 1 223.78 MW·h 和 1 086.01 MW·h,可以看出,各因素总和的求和并不等于系统总和,这是由于调峰因素与电压约束因素间存在耦合情况。为检验文中方法的评估精确度,采用 DIgSILENT 软件搭建改进 IEEE 39 节点系统进行仿真分析,得到 2 个典型日弃电分别为 1 308.50 MW·h 和 1 146.80 MW·h,以此为参考计算得到文中方法的精确度为 93.5% 和 94.7%,均在 90% 以上。

图 14、图 15 为整个系统在典型日 1、典型日 2 新能源受限节点分布图及节点新能源受限电量占整个系统受限电量的比例。可以看出,新能源弃电节点多分布于新能源集中并网区域,且 2 个典型日新能源受限节点的占比大致相似。

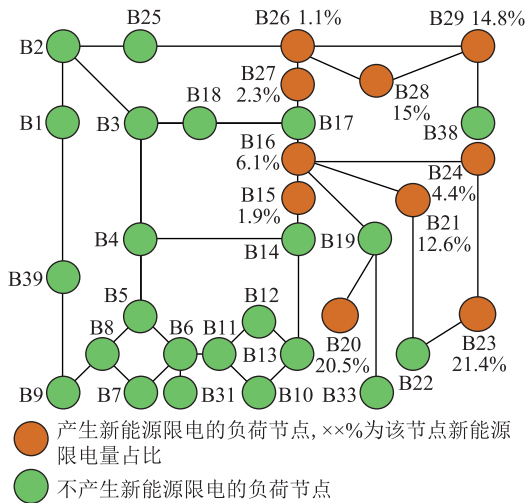


图 14 整个系统在典型日 1 的新能源限电节点分布
Fig.14 Distribution of renewable energy power abandoning nodes in the whole system on typical day 1

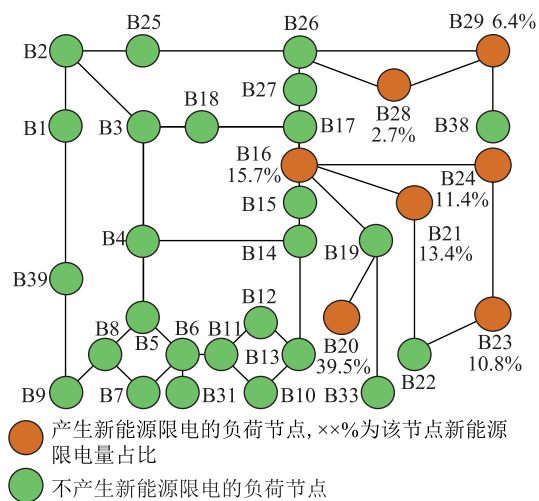


图 15 整个系统在典型日 2 的新能源限电节点分布
Fig.15 Distribution of renewable energy power abandoning nodes in the whole system on typical day 2

4 结论

为应对新能源高占比电力系统弃风弃光问题,首先应构建精确、科学的新能源消纳阻力评估方法。系统调峰需求、调频需求和电压约束是影响新能源消纳的重要因素,基于调峰、调频和电压约束 3 种场景从系统节点角度研究新能源消纳阻力具有重要意义。文中从网络节点入手,面向调峰、调频及节点电压偏差约束 3 种场景,提出一种新能源消纳阻力精细化评估方法,该方法既能够明确网络中制约新能源消纳的关键节点,又能够量化整个系统新能源制约功率,评估系统新能源消纳阻力。文中以改进 IEEE 39 节点系统为例进行算例分析,验证了该方法的有效性。

然而,文中方法仅分析了典型日情况下的系统新能源消纳阻力,未从整个规划周期的角度考虑分析各节点的消纳阻力情况。因此,后续工作须对长时间运行情况下的系统消纳阻力进行深入研究,为后期提高新能源消纳措施的制定提供更有利依据。

本文得到国网新疆电力有限公司科技项目(SGXJ0000TKJS2100269)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [2] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [3] 康重庆,贾文昭,徐乾耀,等. 考虑网络安全约束的实时风电消纳能力评估[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):23-29,22.
KANG Chongqing, JIA Wenzhao, XU Qian Yao, et al. Capability evaluation of wind power accommodation considering security constraints of power grid in real-time dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 23-29, 22.
- [4] 吕泉,王伟,韩水,等. 基于调峰能力分析的电网弃风情况评估方法[J]. 电网技术,2013,37(7):1887-1894.
LYU Quan, WANG Wei, HAN Shui, et al. A new evaluation method for wind power curtailment based on analysis of system regulation capability[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1887-1894.
- [5] 李海,张宁,康重庆,等. 可再生能源消纳影响因素的贡献度分析方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):1009-1018.
LI Hai, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Analytics of con-

- tribution degree for renewable energy accommodation factors [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1009-1018.
- [6] 盛四清, 邱昊, 张文朝, 等. 考虑稳态和动态有功平衡约束的新能源消纳综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 51-56.
SHENG Siqing, QIU Hao, ZHANG Wenchao, et al. Comprehensive assessment method of new energy consumption considering steady and dynamic active power equilibrium constraints [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 51-56.
- [7] 吴冠男, 张明理, 徐建源, 等. 适用于评估风电接纳能力的时序生产模拟算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 151-157.
WU Guannan, ZHANG Mingli, XU Jianyuan, et al. Time series production algorithm for evaluating wind power accommodation capacity [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 151-157.
- [8] 牛东晓, 李建锋, 魏林君, 等. 跨区电网中风电消纳影响因素分析及综合评估方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1087-1093.
NIU Dongxiao, LI Jianfeng, WEI Linjun, et al. Study on technical factors analysis and overall evaluation method regarding wind power integration in trans-provincial power grid [J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1087-1093.
- [9] 董存, 梁志峰, 礼晓飞, 等. 跨区特高压直流外送优化提升新能源消纳能力研究[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 41-50.
DONG Cun, LIANG Zhifeng, LI Xiaofei, et al. Study on power optimization of the trans-regional UHVDC delivery channels in promoting renewable energy accommodation capacity [J]. Electric Power, 2019, 52(4): 41-50.
- [10] 张振宇, 王文倬, 王智伟, 等. 跨区直流外送模式对新能源消纳的影响分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 174-180.
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, WANG Zhiwei, et al. Impact analysis and application of cross-region HVDC delivery mode in renewable energy accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 174-180.
- [11] WANG C, LIU F, WANG J H, et al. Risk-based admissibility assessment of wind generation integrated into a bulk power system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 325-336.
- [12] 王程, 汪松, 毕天姝. 含燃气发电综合能源系统风电消纳能力评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2192-2201, 2398.
WANG Cheng, WANG Song, BI Tianshu. Wind power accommodation capability assessment of integrated energy systems with gas-fired units [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2192-2201, 2398.
- [13] 刘纯, 屈姬贤, 石文辉. 基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3134-3144.
LIU Chun, QU Jixian, SHI Wenhui. Evaluating method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3134-3144.
- [14] 孙伟卿, 李恒, 杜习周, 等. 基于有效容量分布的互联系统风电消纳能力评估[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3321-3327.
SUN Weiqing, LI Heng, DU Xizhou, et al. Assessment of wind power accommodation ability based on available capacity distribution in interconnected system [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3321-3327.
- [15] 王晓海, 乔颖, 鲁宗相, 等. 供暖季风电电量消纳能力的评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2112-2119.
WANG Xiaohai, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. A novel method to assess wind energy usage in the heat-supplied season [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2112-2119.
- [16] 丁明, 楚明娟, 毕锐, 等. 基于序贯蒙特卡洛随机生产模拟的风电接纳能力评价方法及应用[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 67-73.
DING Ming, CHU Mingjuan, BI Rui, et al. Wind power accommodation capability evaluation based on sequential Monte Carlo probabilistic production simulation and its application [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 67-73.
- [17] 张振宇, 王文倬, 张钢, 等. 基于非时序模型的新能源消纳能力评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 24-30.
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, ZHANG Gang, et al. Assessment method of accommodation capacity of renewable energy based on non-time-series model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 24-30.
- [18] 孙荣富, 王东升, 丁华杰, 等. 风电消纳全生产过程评价方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2777-2783.
SUN Rongfu, WANG Dongsheng, DING Huajie, et al. Whole-process evaluation methods of wind power accommodation [J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2777-2783.
- [19] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [20] 李亦凡, 房鑫炎, 王波, 等. 计及节点脆弱程度的新能源消纳能力风险评估[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4479-4486.
LI Yifan, FANG Xinyan, WANG Bo, et al. Risk assessment of new energy consumption capacity considering node vulnerability [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4479-4486.
- [21] 彭旭, 李好文, 郑岗, 等. 基于时序生产模拟的可再生能源消纳评估方法研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 26-30.
PENG Xu, LI Haowen, ZHENG Gang, et al. Research on renewable energy accommodation assessment method based on time series production simulation [J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(11): 26-30.
- [22] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3498-3507.
ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy

- generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3507.
- [23] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [24] 李东东, 刘强, 徐波, 等. 考虑频率稳定约束的新能源电力系统临界惯量计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 24-33.
LI Dongdong, LIU Qiang, XU Bo, et al. New energy power system critical inertia estimation method considering frequency stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 24-33.
- [25] 刘志志, 李永刚, 王优胤, 等. 无功电压优化对新能源消纳的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S2): 646-653.
LIU Huazhi, LI Yonggang, WANG Youyin, et al. Influence about reactive power voltage optimization on the dissipation of new energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 646-653.
- [26] 易俊, 林伟芳, 余芳芳, 等. 受静态电压稳定约束的新能源临界渗透率计算方法[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2906-2912.
YI Jun, LIN Weifang, YU Fangfang, et al. Calculation method of critical penetration of renewable energy constrained by static voltage stability[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2906-2912.
- [27] 钱振宇, 王泉, 魏建民, 等. 考虑削减方法和最大化接纳能力的新能源准入容量柔性优化模型[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 35-39, 60.
QIAN Zhenyu, WANG Quan, WEI Jianmin, et al. Flexible optimization model for new energy access capacity considering the method of electricity reduction and maximum acceptance[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 35-39, 60.

作者简介:



苏常胜

苏常胜(1986),男,博士在读,高级工程师,研究方向为电力系统调度运行、发电计划及安全校核(E-mail: suchangshengi@xj.sgcc.com.cn);

王森(1993),男,博士在读,研究方向为可再生能源与储能技术应用;

孙谊嫒(1974),女,硕士,高级工程师,从事电力系统运行与控制、网源协调相关工作。

Refined evaluation of consumption resistance of system with high proportion of renewable energy for network nodes

SU Changsheng^{1,2}, WANG Sen², SUN Yiqian¹, LI Fengting²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830006, China;

2. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: With the increasing installed capacity of renewable energy, the problem of wind and solar power abandonment in systems with high proportion of renewable energy is serious. It is of great significance to carry out the research on the problem of renewable energy consumption and accurately position the resistance of renewable energy consumption to improve the formulation of renewable energy consumption measures. In this paper, a refined evaluation method of renewable energy consumption resistance for power system is proposed. Firstly, based on the power flow tracking algorithm, the power flow of network nodes is divided into three parts, namely conventional unit injection, renewable energy injection and load outflow. Secondly, from the point of view of network nodes, the mathematical relationship models of peak modulation, frequency modulation, node voltage deviation constraint and renewable energy consumption are established, and the coupling relationship among the three is considered to analyze the power abandonment of network nodes. Then, the evaluation model of renewable energy consumption resistance based on network nodes is constructed and solved, the key nodes of renewable energy consumption in the system are located. The restriction factors of renewable energy consumption of each node are defined and the renewable energy consumption resistance is quantified. Finally, an example is designed based on improved IEEE 39-bus system to verify the effectiveness of the evaluation method. The proposed evaluation method can provide a basis for the power sector to formulate measures to improve the consumption of renewable energy.

Keywords: high proportion of renewable energy system; renewable energy consumption resistance; refined evaluation; renewable energy limited power; flow tracking algorithm; critical node

(编辑 方晶)