

新型电力系统平衡机理及演进过程研究

许涛, 王国春, 董昱, 王超*, 李增辉

(国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031)

Research on Power Balance Mechanism and Evolution of New Power System

XU Tao, WANG Guochun, DONG Yu, WANG Chao*, LI Zenghui

(State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: Focusing on new power system's power balance mechanism and development, basic rules of power balance are revealed with theoretical analysis, simulations as well as real power system operating statistics. First, basic power balance equations of new power system are proposed, based on which senior power balance equations are deducted. With the analysis and conclusions of the proposed equations, 5 rules of new power system's power balance mechanism are proposed to describe relations among key balancing factors, such as the penetration rate of renewable energy, renewable energy consumption, and the regulation capability of the power system. Then, all the equations and rules proposed are verified by simulations and statistics based on real power system operating data. Finally, the key rule during the development of new power system's power balance is revealed, which is the contradiction between unlimited regulating demand growth of new energy and limited regulating abilities of power system. The new power system will go through 2 key developing points and 3 key developing stages. Prospects are made for the future development and construction direction of the new power system, and relevant suggestions are put forward.

KEY WORDS: new power system; power balance; regulation ability; equivalent load; new energy curtailment rate; new energy penetration rate

摘要: 立足大电网运行实践, 开展新型电力系统平衡机理及演进过程研究。构建新型电力系统平衡基本方程和高级方程, 提出新型电力系统平衡的5个机理, 揭示了新能源渗透率、新能源弃电率、系统调节能力等关键平衡要素间的关联关系; 结合运行实践开展仿真测算和统计分析, 验证了所提数学模型和平衡机理的准确性。在理论分析和仿真测算基础上, 指出新型电力系统平衡的主要矛盾是不断增长的调节需求和有限的系统调节能力之间的矛盾, 二者对比关系的变化构成了新型电力系统的平衡演进过程, 指出新型电力系统发展将先后跨越“质变点”、“临界点”两个关键节点, 对应3个主要发展阶段。最后, 对新型电力系统后续发展建设方向进行了展望, 提出相关建议。

关键词: 新型电力系统; 电力平衡; 调节能力; 等效负荷; 新能源弃电率; 新能源渗透率

0 引言

习近平总书记在中共中央政治局集体学习时指出: 要统筹好新能源发展与国家能源安全, 坚持规划先行、加强顶层设计、搞好统筹兼顾, 注意处理好新能源与传统能源、全局与局部、政府与市场、能源开发和节约利用等关系, 推动新能源高质量发展^[1]。从大电网运行角度看, 推动新能源高质量发展的关键是构建适合中国国情、有更强新能源消纳能力的新型电力系统, 核心内涵是推动电力系统低碳、安全和高效发展^[2-3], 本质任务是服务国家碳达峰碳中和能源发展战略。

新型电力系统构建过程中, 在安全稳定运行、电力电量平衡、电力体制改革、经济社会效益等方面面临一系列挑战。安全稳定方面, 要妥善应对高比例新能源接入带来的功角、频率、电压稳定问题, 加强网架建设和运行控制能力, 严防稳定破坏和大停电事故^[4-5]。电力电量平衡方面, 要稳妥应对新能源随机性、波动性影响, 统筹电力保供和新能源消纳, 在确保电力安全有序供应的前提下优化运行方式, 最大限度提高新能源利用水平^[6-9]。电力体制改革方面, 要适应新型电力系统运行特点, 持续深入推进中国特色电力市场建设, 充分发挥市场的资源配置作用^[10-11], 要坚持“统一调度、分级管理”的调度体制优势, 统筹全网资源实现优化互济。经济社会效益方面, 要推动新型电力系统发展目标和建设任务与国家能源发展战略紧密结合, 解决好发展过程中的安全、保供问题, 推动实现源、网、荷和新能源产业良性互动、可持续发展^[12]。要稳妥应对挑战, 科学推动新型电力系统建设与发展, 前提是要系统认识新型电力系统的本质特征和发展演变规律, 推动理论创新和技术创新。其中, 电力电量

平衡与电力供需保障能力、新能源渗透率、新能源利用率等新型电力系统关键任务指标直接相关,开展新型电力系统平衡机理及其发展演进过程的研究,对科学构建新型电力系统、服务新能源高质量发展有重要意义。

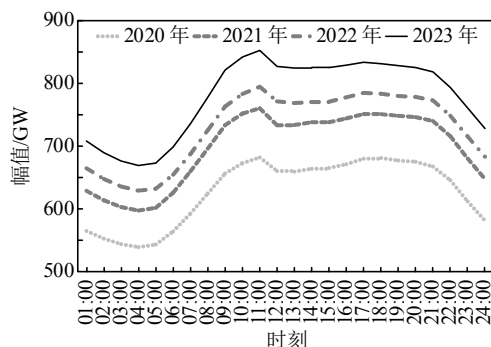
近年来,随着新能源渗透率的不断增长,系统平衡过程中一些新问题逐步凸显,集中表现为:1)受新能源随机性影响,高峰电力保供风险大幅增加;2)平衡对象的峰谷差率持续增长,高峰电力保供与低谷新能源消纳统筹日益困难;3)平衡对象的变化速率增大,系统平衡出现调节速率跟不上新能源波动、系统频率控制困难等问题。针对新形势下电力系统有关问题,学界在方式安排和运行控制^[7,12-15]、发展前景和规划方法^[16-18]等方面已开展了许多研究,主要聚焦于具体问题的解决方法,或对新型电力系统的发展演进做综述性研判,未从电力平衡的基础数学原理出发,成体系地提出一整套新型电力系统平衡分析理论,且缺少大电网平衡实践和运行大数据支撑,无法有效、系统、量化揭示新型电力系统平衡的本质机理和内在发展动力,难以在宏观发展战略和方法论层面系统指引新型电力系统建设方向。

基于此,本文立足大电网运行实践,开展新型电力系统平衡机理及其演进过程研究,旨在阐释新型电力系统发展过程中新能源渗透率、利用率和调节能力等各平衡要素间的关联关系,揭示推动新型电力系统平衡演进的主要矛盾和发展动力,明确当前所处发展阶段,研判未来发展方向。

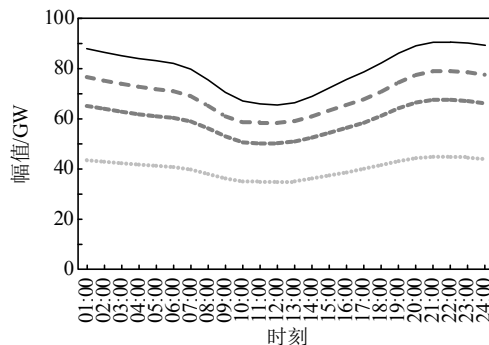
1 负荷和新能源发展规律

对某电网近几年负荷、风电、光伏出力的平均日曲线(一年365天同一时刻出力的平均值)进行统计绘图,数据均以标么化展示(下同),如图1所示。

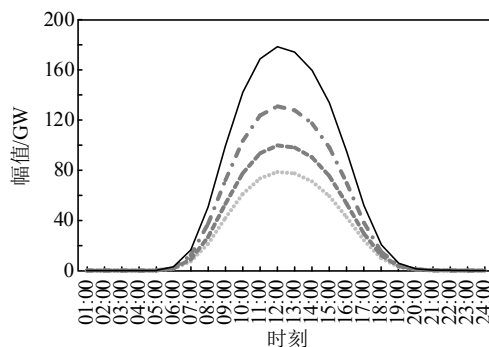
由图1可以看出,实际运行中,虽然一年内不



(a) 负荷



(b) 风电出力



(c) 光伏出力

图1 某电网近几年负荷、风电和光伏平均日负荷曲线
Fig. 1 Daily load/wind generation/solar generation curves of some grid in recent years

同日负荷、风电、光伏等不可控平衡对象的曲线存在差异,但从宏观效应(年均值)看,以上要素的发展均表现出较强的规律性。这表明,负荷、新能源日曲线形状特点主要受用电结构和用电规律、新能源资源特性等影响,在用电结构和用电规律、新能源资源特性总体稳定的情况下,宏观上曲线形状基本相似。下文分析中将利用这一统计规律开展新型电力系统平衡演进理论分析。

2 新型电力系统平衡机理

电力平衡的基本原理是调用可控的系统平衡能力(当前主要以常规电源为代表)跟踪满足不可控的平衡对象需求,实现可控要素与不可控要素的匹配,有两条基本物理约束:

1) 系统平衡能力有上、下限,平衡能力上限必须大于平衡对象峰值,才能保证可靠供电;平衡能力下限必须小于最小平衡对象谷值,才能保证新能源消纳。

2) 系统平衡跟踪调节速度存在极限,调节速度必须大于平衡对象的变化速度,才能保证频率稳定、电网安全。

传统电力系统中,不可控的平衡对象主要是

“用电负荷”(可称为“传统负荷”),电力平衡的主要目标是跟踪用电负荷、动态调节;新型电力系统环境下,新能源高渗透,由于新能源发电“随机性、波动性”特征明显,不可控的平衡对象由“用电负荷”转变为“用电负荷-新能源”(定义为“等效负荷”),平衡需求的结构发生了根本转变。

电力平衡中最关键的是日电力平衡,其与电力保供、电网调峰直接相关,决定了开机方式和运行安排;日电力平衡结果在周、月、年等不同时间尺度的累积构成了更长时间尺度的综合平衡效益。以下将针对最基础的日电力平衡机理开展分析。

2.1 新型电力系统基本平衡方程

新型电力系统环境下,电力系统基本电力平衡方程可表示为

$$\begin{cases} \Delta x(t) = P + n(t) - l(t) \\ \Delta y(t) = l(t) - n(t) - (1 - \alpha)P \\ \alpha = \frac{P - P_{\min}}{P} \\ \max\left\{\frac{d|l(t) - n(t)|}{dt}\right\} \leq P \max\left\{\frac{dp}{dt}\right\} \end{cases}, \quad t \in [00:00, 24:00] \quad (1)$$

式中: P 为最大可调发电能力(调度术语,即系统常规可控电源可以按调度指令发出的最大电力); $P_{\min}$ 为系统常规可控发电能力的最小技术出力; α 为系统最小技术出力与最大可调发电能力的相对差值,称为“系统调峰率”; $l(t)$ 、 $n(t)$ 分别为负荷和新能源电力,均为关于时间 t 的函数; $\Delta x(t)$ 、 $\Delta y(t)$ 分别为系统保供裕度、新能源消纳裕度; $d|l(t) - n(t)|/dt$ 为等效负荷变化速度; dp/dt 为系统常规可控发电能力调节速率。根据《电力系统技术导则》要求,运行中还需预留一定的负荷备用、事故备用,为简化分析,本文暂不考虑。

式(1)中前3个式子为静态平衡结果方程,主要反映系统平衡效益,其中 $\Delta x(t)$ 、 $\Delta y(t)$ 分别表征电力保供、新能源消纳效益。 $\Delta x(t) > 0$ 时,电力可靠供应,无平衡缺口; $\Delta x(t) < 0$ 时,出现供电电力缺口。 $\Delta y(t) > 0$ 时,新能源全额消纳,无新能源弃电电力; $\Delta y(t) < 0$ 时,系统调节能力无法满足新能源发电需要,将出现新能源弃电电力。

式(1)中第4式为动态平衡约束方程,主要反映系统平衡安全。实际平衡过程中,满足第4式约束时,系统调节速率跟得上等效负荷变化速率,能够确保可控要素与不可控要素的时刻匹配,系统频率

稳定、平衡可控;当不能满足第4式约束时,系统调节速率跟不上等效负荷变化速率,将不可避免产生不平衡功率,系统无法平衡,产生频率问题,影响系统安全,严重时可能引发系统崩溃。

综上,新型电力系统基本电力平衡方程可概括为在满足“一个电力平衡约束”(变化率约束)前提下的“两个电力平衡结果”(电力保供结果、新能源消纳结果)。

2.2 统筹保供和消纳的必要条件

由式(1)知,要同时实现无电力缺口(保供)和无新能源弃电电力(保消纳),须满足:

$$\begin{cases} \Delta x(t) \geq 0 \\ \Delta y(t) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)、(2)可推得:

$$\begin{cases} \min\{\Delta x\} = P - \max\{l(t) - n(t)\} \geq 0 \\ \min\{\Delta y\} = \min\{l(t) - n(t)\} - (1 - \alpha)P \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

令 $e(t) = l(t) - n(t)$, 定义为“等效负荷”。式(3)可转换为

$$\begin{cases} \min\{\Delta x\} = P - \max\{e(t)\} \geq 0 \\ \min\{\Delta y\} = (1 - \beta) \max\{e(t)\} - (1 - \alpha)P \geq 0 \\ \beta = \frac{\max\{e(t)\} - \min\{e(t)\}}{\max\{e(t)\}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 β 为等效负荷高峰与低谷的相对差值,称为“等效负荷自然峰谷差率”(简称等效负荷峰谷差率)。由式(4)推导可得:

$$\alpha \geq \beta \quad (5)$$

式(5)即为统筹保供和消纳的必要条件,即系统调峰率 α 须大于等于等效负荷峰谷差率 β 。

进一步推导式(4)可得:

$$(1 - \beta) \min\{\Delta x\} + \min\{\Delta y\} = -(\beta - \alpha)P \quad (6)$$

由 β 的定义可知, $1 - \beta$, 则式(6)左侧项中 $\min\{\Delta x\}$ 、 $\min\{\Delta y\}$ 的系数均为正数;当 $\alpha < \beta$ 时,式(6)中的右侧项为负数。则可知, $\min\{\Delta x\}$ 、 $\min\{\Delta y\}$ 两个量必有一个为负或均为负,且两者是此消彼长的关系,与 $\alpha - \beta$ 总体负相关。由于 $\min\{\Delta x\}$ 、 $\min\{\Delta y\}$ 分别表征了保供(最小平衡裕度或最大电力平衡缺口)和保消纳水平(最小消纳裕度或最大弃电电力)。

综上,得出新型电力系统平衡机理1。

机理 1(保供与转型的统筹): 系统调峰率大于等效负荷峰谷差率,是同时保证电力可靠供应和新能源

全额消纳的必要条件；系统调峰率小于等效负荷峰谷差率时，供电可靠性和新能源消纳水平负相关，且保供与保消纳的统筹难度与等效负荷峰谷差率和系统调峰率的差值 $(\beta - \alpha)$ 正相关。

2.3 新型电力系统高级平衡方程

衡量新型电力系统平衡水平的关键指标是“电力保供水平”、“新能源渗透率”和“新能源消纳水平”。其中“电力保供水平”关乎经济社会发展和民生用电，保障电力有序供应是新型电力系统电力平衡的第一目标；“新能源渗透率”关乎能源绿色低碳转型发展，提高新能源渗透率是电力行业助力实现“双碳”目标的主要举措，也是新型电力系统建设的核心要义；“新能源消纳水平”直接影响新能源企业发电投资效益，是推动新能源产业可持续发展的重要因素。电力保供水平、新能源渗透率、新能源消纳水平3个目标要素随新型电力系统建设的发展变化关系即构成了新型电力系统的平衡演进过程。

2.3.1 新型电力系统关键平衡指标的数学表达

以负荷限电率 x 、新能源弃电率 y 、新能源渗透率 z ，分别表征“电力保供水平”、“新能源消纳水平”和“新能源渗透率”。即：

$$\begin{cases} x = \frac{\Delta X}{X} \\ y = \frac{\Delta Y}{Y} \\ z = \frac{Y - \Delta Y}{X - \Delta X} \end{cases} \quad (7)$$

式中： X 、 ΔX 分别为负荷需求电量、负荷受限电量； Y 、 ΔY 分别为新能源理论发电量、新能源弃电量； z 为从电量角度表征的新能源渗透率，即新能源发电量渗透率。

由式(1)、(7)推导可得：

$$\begin{cases} x = \frac{\int [(l(t) - n(t)) - P] dt}{\int l(t) dt}, & t \in l(t) - n(t) - P \geq 0 \\ y = \frac{\int [(1 - \alpha)P - (l(t) - n(t))] dt}{\int n(t) dt}, & t \in (1 - \alpha)P - [l(t) - n(t)] \geq 0 \\ z = \frac{\int n(t) dt - y \int n(t) dt}{\int l(t) dt - x \int l(t) dt} \end{cases} \quad (8)$$

考虑到式(1)中的安全约束，以及式(4)中关于等效负荷峰谷差率的定义，式(8)可扩展为式(9)。

$$\begin{cases} x = \frac{\int [(l(t) - n(t)) - P] dt}{\int l(t) dt}, & t \in l(t) - n(t) - P \geq 0 \\ y = \frac{\int [(1 - \alpha)P - (l(t) - n(t))] dt}{\int n(t) dt}, & t \in (1 - \alpha)P - [l(t) - n(t)] \geq 0 \\ z = \frac{\int n(t) dt - y \int n(t) dt}{\int l(t) dt - x \int l(t) dt} \\ \beta = \frac{\max \{l(t) - n(t)\} - \min \{l(t) - n(t)\}}{\max \{l(t) - n(t)\}} \\ \max \left\{ \frac{d|l(t) - n(t)|}{dt} \right\} \leq P \max \left\{ \frac{dp}{dt} \right\} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中前4个等式表征了各平衡要素间的关系，最后一个不等式为平衡安全约束。若不考虑不等式约束(即假定满足安全约束)，式(9)中4个等式中有下 x 、 y 、 z 、 α 、 β 、 $l(t)$ 、 $n(t)$ 、 P 等共计8个变量。由数学原理知，8个变量中任意5个互为约束关系。

式(9)确定的方程组表征了新型电力系统各平衡要素间的一般数学关系，是开展新型电力系统平衡演化分析和仿真测算的基础。但式(9)变量多、等式少，不能直观反映新型电力系统演化的关键特征。要抓住新型电力系统演化的本质规律和主要矛盾，需要将生产运行实践中发现的客观规律及其数学关系纳入平衡方程，构建新型电力系统高级平衡方程。

2.3.2 等效负荷自然发展规律的数学表达

1节中负荷、风电、光伏的发展统计规律可以用式(10)数学方程表示：

$$\begin{cases} l(t) = K_l l_0(t) \\ n_w(t) = K_{nw} n_{w0}(t) \\ n_s(t) = K_{ns} n_{s0}(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中： $l(t)$ 、 $n_w(t)$ 、 $n_s(t)$ 分别为负荷曲线、风电出力曲线、光伏出力曲线； $l_0(t)$ 、 $n_{w0}(t)$ 、 $n_{s0}(t)$ 分别为基准负荷曲线、基准风电出力曲线、基准光伏出力曲线； K_l 、 K_{nw} 、 K_{ns} 分别为负荷、风电、光伏相对基准曲线的比例系数。

由式(10)可推得式(11)，为实际电力系统等效负荷自然发展规律的数学模型，表征了负荷、新能源在电力平衡方面的自然发展关系：

$$e(t) = l(t) - n(t) = K(l_0(t) - \lambda_w n_{w0}(t) - \lambda_s n_{s0}(t)) \quad (11)$$

式中： K 、 λ_w 、 λ_s 均为比例系数，其中 λ_w 、 λ_s 分别为风电、光伏自然功率的相对大小； K 为整体负荷水平。由式可知，等效负荷可以表征为基准负荷、

基准风电出力、基准光伏出力的不同比例组合。

令 $\theta = \lambda_w / \lambda_s$ ，则式(11)可转换为

$$\begin{cases} e(t) = l(t) - n(t) = K(l_0(t) - \lambda n_0(t)) \\ n_0(t) = \theta n_{w0}(t) + n_{s0}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中： λ 表征新能源自然功率相对负荷的规模水平，反映不同装机下的新能源发电需求，与新能源发电量渗透率 z 不同， λ 不考虑平衡约束和消纳影响，不是严格的新能源渗透率指标； θ 表征新能源中风电、光伏的结构关系，若 θ 为固定值，即风电、光伏结构关系稳定，则 $n_{w0}(t)$ 、 $n_{s0}(t)$ 确定时， $n_0(t)$ 也相应确定。

2.3.3 确保电力可靠供应前提下最大限度促消纳的数学表达

以确保电力可靠供应的前提下最大限度提高新能源消纳水平作为新型电力系统的平衡目标。

要确保电力可靠供应，需令负荷限电率 $x=0$ ，不考虑运行备用影响的情况下，由式(9)可知：

$$P \geq \max \{l(t) - n(t)\} \quad (13)$$

要最大限度提高新能源消纳水平，需令新能源弃电率 y 尽可能小，由式(9)知， y 与 P 正相关，即要求 P 取最小值，结合式(13)可知：

$$P = \max \{l(t) - n(t)\} \quad (14)$$

式(14)为确保电力可靠供应前提下最大限度提高新能源消纳水平的条件方程。

2.3.4 新型电力系统高级平衡方程

将 2.3.2 节等效负荷自然发展规律的数学关系、2.3.3 节确保电力可靠供应的数学关系代入 2.3.1 节的新型电力系统关键指标方程组，即可得到满足新能源、负荷、等效负荷自然发展规律，且实现确保电力可靠供应并最大限度促进新能源消纳的平衡目标的新型电力系统关键平衡指标的数学关联关系，本文称为新型电力系统平衡演化的“高级方程”。

1) 广义高级方程。

将式(12)、(14)代入式(9)可得：

$$\begin{cases} y = \frac{\int [(1-\alpha) \max \{e_0(t)\} - e_0(t)] dt}{\int \lambda (\theta n_{w0}(t) + n_{s0}(t)) dt}, \\ t \in (1-\alpha) \max \{e_0(t)\} - e_0(t) \geq 0 \\ z = \frac{\int \lambda (\theta n_{w0}(t) + n_{s0}(t)) dt}{\int l_0(t) dt} (1-y) \\ e_0(t) = l_0(t) - \lambda (\theta n_{w0}(t) + n_{s0}(t)) \\ \beta = \frac{\max \{e_0(t)\} - \min \{e_0(t)\}}{\max \{e_0(t)\}} \\ \max \left\{ \frac{d|e_0(t)|}{dt} \right\} \leq \max \{e_0(t)\} \max \left\{ \frac{dp}{dt} \right\} \end{cases} \quad (15)$$

式中 4 个等式中有 y 、 z 、 α 、 β 、 $l_0(t)$ 、 $n_{w0}(t)$ 、 $n_{s0}(t)$ 、 $e_0(t)$ 、 θ 、 λ 10 个变量，其中 $l_0(t)$ 、 $n_{w0}(t)$ 、 $n_{s0}(t)$ 由负荷、风电、光伏发电的自然特性决定，为客观确定量。则式中未知量为 y 、 z 、 α 、 β 、 $e_0(t)$ 、 θ 、 λ 7 个变量。

式(15)全面反映了新型电力系统平衡演化关键指标间的关联和协调关系，本文称其为新型电力系统平衡演化的“广义高级方程”。

2) 标准高级方程。

式(15)是一个方程组，包含 4 个等式、7 个变量，难以直观描述各变量间的关系和变化规律。由数学原理可知，式(15)中 7 个变量中任意 4 个互为约束关系。若选定 y 、 z 、 α 、 θ 4 个变量，可知：

$$F_1(y, z, \alpha, \theta) = 0 \quad (16)$$

其中 y 、 z 、 α 、 θ 4 个变量互相关联，受统一的函数关系约束。即新能源弃电率、新能源渗透率、系统调峰率、新能源结构四要素之间相互关联、互为约束，构成一个唯一的四维关联关系。确定其中任意 3 个量，则第 4 个量也确定。例如，式(16)可转换为

$$y = F_2(z, \alpha, \theta) \quad (17)$$

式(17)的含义是，当系统调峰率、新能源结构、新能源渗透率确定时，新能源弃电率也相应确定。由此得出新型电力系统平衡机理 2。

机理 2(高质量转型的两个主要途径)：新型电力系统平衡发展演化过程中，新能源弃电率由系统调峰率(调节能力)、新能源渗透率、新能源结构等决定。若同时将新能源弃电率和新能源渗透率作为控制目标，就必须调整优化系统调峰率或新能源结构，即提高系统调节能力或优化风电、光伏装机比例。

除式(16)、(17)外，式(15)还可派生出其他任意 4 个变量间的关联关系。本文将由广义高级方程派生出的四变量单一方程称为新型电力系统发展演化的“标准高级方程”。由本节分析可知，标准高级方程表征了新型电力系统平衡中任意一组变量间的唯一关联关系，应用标准高级方程可以排除冗余要素干扰，方便对新型电力系统的任意一组关键指标唯一关联关系进行研究分析。

3) 简化高级方程。

为进一步简化分析，找出本质规律，将 θ 设为固定值，并称 θ 为固定值的标准高级方程为“简化高级方程”。则式(16)可转换为

$$F_3(y,z,\alpha)=0 \tag{18}$$

式(18)表明,当新能源结构稳定时,新能源弃电率、新能源渗透率、系统调峰率三要素互为约束,构成唯一的三维关联关系。确定其中任意两个要素,另一个要素也相应确定。例如:

$$\alpha=F_4(y,z) \tag{19}$$

式(19)的含义是,系统调节能力 α 一定时,新能源弃电率和渗透率互为影响。由此得出新型电力系统平衡机理 3。

机理 3(量与率的统筹):在新能源结构稳定的情况下,新能源弃电率、新能源渗透率、系统调节能力三者相互影响。系统调节能力一定时,新能源弃电率主要受新能源渗透率影响,客观上存在“以量换率”的规律。

同理,可由式(15)派生出 z 、 α 、 β 的简化高级方程或 y 、 α 、 β 的简化高级方程,即:

$$\begin{cases} z=F_5(\alpha,\beta) \\ y=F_6(\alpha,\beta) \end{cases} \tag{20}$$

式(20)的含义是,新能源渗透率 z 、新能源弃电率 y 等均是系统调节能力 α 和等效负荷峰谷差率 β 的函数。即,系统调节能力和等效负荷峰谷差率一定时,新能源渗透率、新能源弃电率也对应确定。由此得出新型电力系统平衡机理 4。

机理 4(转型的两个关键指标):在新能源结构稳定的情况下,系统调节能力(调峰率)和等效负荷峰谷差率的对比关系决定了新能源渗透率和新能源弃电率;系统调节能力、等效负荷峰谷差率是表征新型电力系统平衡状态的两个对立统一的关键指标。

此外,不同地区负荷特性、新能源资源禀赋不同,意味着 $l_0(t)$ 、 $n_{w0}(t)$ 、 $n_{s0}(t)$ 等在不同地区、不同国家存在差异,从而影响标准高级方程的具体参数,即不同国家、不同地区的标准高级方程参数不同。由此得出新型电力系统平衡机理 5。

机理 5(地区发展差异):在新型电力系统平衡演化机理相同的情况下,受负荷特性、新能源资源特点等影响,不同国家、地区构建的具体新型电力系统在关键平衡指标的关联表现程度上存在不同。

2.4 小结

在电力平衡基本原理基础上构建了用以分析新型电力系统平衡演化过程的“高级方程”,通过理论分析推导得出新型电力系统 5 个平衡机理。由于“高级方程”及其平衡安全不等式约束与负荷、新能源曲线具体特征密切相关,无法进行一般性解析

求解,本文将通过仿真和实例的方法开展具体分析。

3 实例分析

基于某电网,采用生产时序模拟等方法搭建模型开展新型电力系统平衡演化过程仿真分析,并与实际生产运行场景和统计结果进行对比验证。

3.1 基本平衡方程相关机理的验证

3.1.1 仿真分析

以某电网典型日的等效负荷曲线作为基准曲线开展算例分析,如图 2 所示。分析过程中,系统调峰率 α 的变化通过调整设定的方式进行;等效负荷峰谷差 β 的变化通过调整等效负荷曲线的方式进行,等效负荷曲线的调整通过等比例调整负荷曲线或等比例调整新能源发电曲线的方式进行。 α 、 β 确定后,按最优开机的原则模拟测算负荷受限率 x 、新能源弃电率 y 。

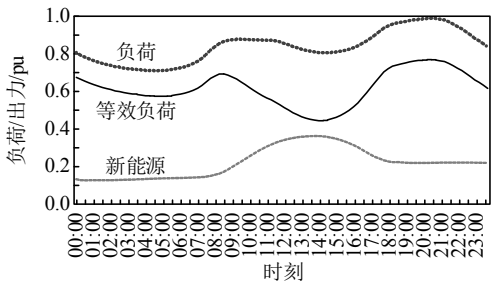


图 2 某电网典型日负荷、新能源和等效负荷曲线
Fig. 2 Typical daily load, new energy & equivalent load curves of some grid

1) 不采取负荷管理措施。

实际生产运行中,保供是电力平衡的首要任务,在负荷不超过最大供电能力的情况下,原则上不采取负荷管理措施。首先,开展不采取负荷管理措施(即 $x=0$)情况下 y 、 α 、 β 测算,结果如表 1 所示。

表 1 不同系统调峰率 α 、等效负荷峰谷差率 β 情况下的
新能源调峰弃电率 y

Table 1 New energy’s abandoned electricity rates with different system’s peak shaving abilities and different load’s peak-valley rates

β	$y/\%$					
	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$
0.3	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4	6.20	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	10.10	4.00	0.30	0.00	0.00	0.00
0.6	12.00	6.70	2.60	0.20	0.00	0.00
0.7	13.30	8.70	4.80	1.90	0.10	0.00
0.8	14.20	10.20	6.60	3.60	1.40	0.04
0.9	14.90	11.20	8.00	5.10	2.80	1.00

表 1 中,任一组 (α, β) 对应唯一的新能源调峰弃电率。表中数据呈现以下规律:①当系统调峰率大于等效负荷峰谷差率时,新能源调峰弃电为 0,当系统调峰率小于等效负荷峰谷差率时,出现新能源调峰弃电;②新能源调峰弃电率总体与系统调峰率负相关,与等效负荷峰谷差率正相关,即系统调峰率越大、等效负荷峰谷差率越小,新能源调峰弃电率越低。

进一步分析调峰弃电率 y 与 $\beta-\alpha$ 的关系,基于表 1 中数据绘制 y 关于 $\beta-\alpha$ 的散点图,如图 3 所示。由图 3 可以看出, y 与 $\beta-\alpha$ 总体正相关,即等效负荷峰谷差率较系统调峰率的差值越大,调峰弃电率越大;反之,调峰弃电率则越低。

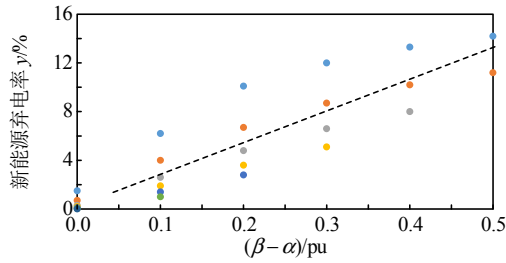


图 3 不同 $\beta-\alpha$ (等效负荷峰谷差率与系统调峰率的差值) 对应的新能源调峰弃电率

Fig. 3 New energy's abandoned electricity rates with different $\beta-\alpha$

2) 负荷管理措施与新能源弃电的关系。

在表 1 中任一组数的基础上,测算负荷管理措施(以限电率 x 表征)与新能源弃电(以新能源调峰弃电率 y 表征)的关联关系。选定 $\alpha=0.4$,结果如表 2 所示。

表 2 $\alpha=0.4$ 、 $\beta=0.8$ 情况下的负荷限电率 x 与 新能源调峰弃电率 y 的测算结果

Table 2 Power rationing rates & new energy's abandoned electricity rates with $\alpha=0.4$ & $\beta=0.8$ 单位: %			
x	y	x	y
0.00	10.20	13.2	2.24
0.32	8.06	18.3	1.10
1.12	7.07	24.0	0.00
3.90	5.30	—	—

由表 2 中数据可以看出,在系统调峰率、等效负荷峰谷差率不变的情况下,负荷限电率与新能源弃电率总体负相关,即两者表现出“此消彼涨”的数据关联特征。

以上结果验证了新型电力系统平衡机理 1。

3.1.2 实际运行数据统计结果对比验证

基于某电网运行数据开展统计分析。由于实际

生产运行中一般不采取负荷管理措施,且一段时间内的系统调峰率总体稳定,即可以近似认为 $x=0$, α 为固定值。对实际发生的 β 、 y 进行统计,结果如图 4、5 所示。

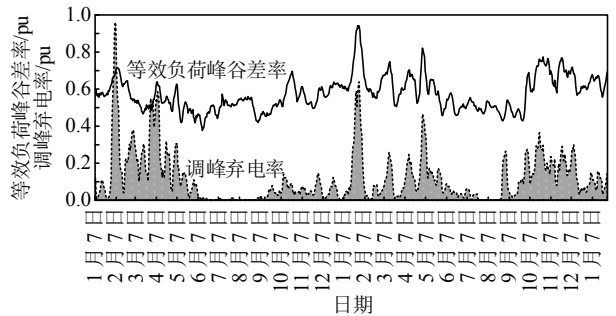


图 4 某电网近 2 年每日等效负荷峰谷差率和 新能源调峰弃电率示意图

Fig. 4 Daily peak-valley shaving rates of load and new energy's abandoned electricity rates of some grid in the past 2 years

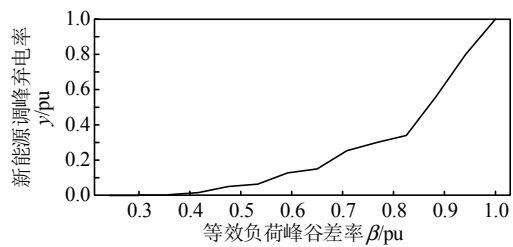


图 5 某电网等效负荷峰谷差率和新能源调峰弃电率的 统计关系示意图

Fig. 5 Statistical results of relationship between equivalent load's peak-valley rates & new energy's abandoned electricity rates of some grid

由图 4 可直观看出,新能源调峰弃电率与等效负荷峰谷差率表现出较强的正相关性,等效负荷峰谷差率越大、弃电率越大。图 5 的统计结果也证明了等效负荷峰谷差率与新能源调峰弃电率的正相关特性。

3.2 高级平衡方程相关机理的验证

基于某电网负荷、新能源发电等数据,采用生产时序模拟方法搭建模型开展仿真分析,并以春节期间运行数据开展对比验证。

3.2.1 新能源渗透率 z 、弃电率 y 、等效负荷峰谷差率 β 的关系

假定系统调峰率(调峰能力)为 40%,即 $\alpha=0.4$;仿真过程中,风电、光伏等比例模拟增长;因等效负荷峰谷差率 β 逐日变化,仿真分析时采用平均值。得到新能源渗透率、弃电率和等效负荷日均峰谷差率的关系如图 6 所示。

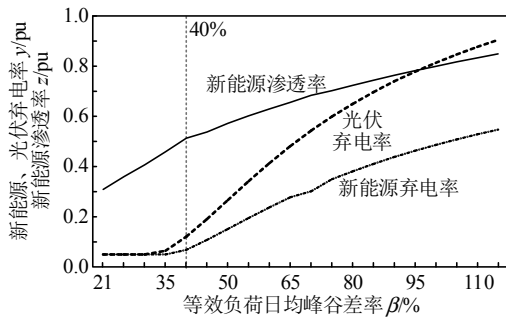


图6 系统调峰能力为40%情况下新能源渗透率、弃电率与等效负荷日均峰谷差率的关系

Fig. 6 Relationship of new energy's penetration rate, abandoned electricity rate & equivalent load's peak-valley rate with system's peak shaving ability set as 40%

从图6仿真结果可以看出:

1) 一定的等效负荷日均峰谷差率对应着一定的新能源渗透率、弃电率。由于新能源结构、系统调峰率等要素作为仿真边界已确定,即 (β, z) 、 (β, y) 、 (y, z) 分别存在唯一的对应关系。

2) 新能源渗透率、等效负荷日均峰谷差率、新能源弃电率总体呈正相关变化趋势。即,随着新能源渗透率的增加,等效负荷日均峰谷差率、新能源弃电率也相应增长。

3) 当等效负荷日均峰谷差率小于40%(设定的系统调峰率),即 $\beta < \alpha$ 时,新能源弃电率维持在较低水平不增长;当等效负荷日均峰谷差率大于40%,即 $\beta > \alpha$ 时,新能源弃电率将快速增长。

以上仿真结果与2.3节中关于高级方程中变量间关系的论述以及机理3、4总体一致。

3.2.2 新能源渗透率 z 、弃电率 y 、系统调峰率 α 的关系

调整设定的系统调峰率,得到光伏弃电率、新能源渗透率、系统调峰率的关系曲线组如图7所示。

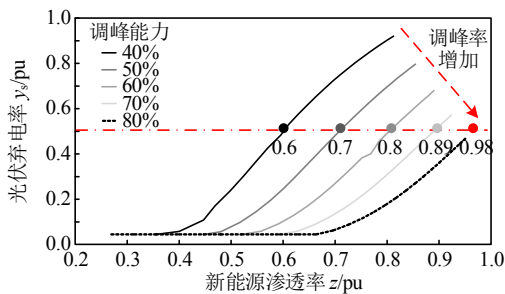


图7 不同系统调峰能力下的新能源渗透率和光伏弃电率
Fig. 7 New energy's penetration rates & solar power's abandoned electricity rates with different power system's peak shaving abilities

由于光伏弃电率明显高于新能源弃电率,光伏

发电主体及产业将最先受到弃电率增长影响,本文选用光伏弃电率作为观察指标。从图7中可以看出:

1) 光伏(新能源)弃电率、新能源渗透率、系统调峰率3个指标相互影响,任两个指标确定后,第3个指标也相应确定。从光伏弃电率看,其受新能源渗透率、系统调峰率两个因素影响,新能源渗透率、系统调峰率确定时,光伏弃电率也自然确定。

2) 系统调峰率越大,新能源渗透率-光伏弃电率关系曲线越低矮,即渗透率越大或弃电率越小。

3) 当系统调峰率恒定时,光伏弃电率主要受新能源渗透率影响,不同的新能源渗透率对应着不同的光伏弃电率。

4) 当系统调峰率恒定时,光伏弃电率与新能源渗透率正相关,即新能源渗透率越高,光伏弃电率越大。

以上结果验证了2.3节中的平衡机理2、3。

3.2.3 新能源结构 θ 的影响

基于某电网,模拟测算中新能源增量采用不同的结构(光伏和风电的比例),得到新能源渗透率-新能源弃电率关系曲线如图8所示。

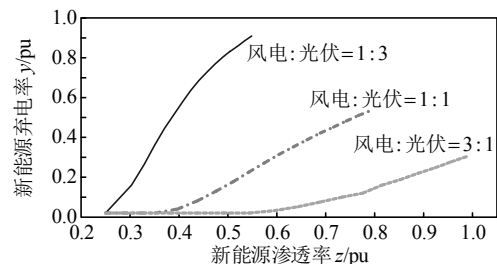


图8 不同新能源结构下某电网新能源渗透率-新能源弃电率关系仿真曲线

Fig. 8 New energy's penetration rate vs abandoned electricity rate curves simulated with different new energy structures.

由图8可以看出:

1) 新能源结构不同,新能源渗透率-新能源弃电率的关系曲线不同;

2) 风电占比越高、光伏占比越低,新能源渗透率-新能源弃电率关系曲线越低平,即相同弃电率情况下新能源渗透率越高。

由此,合理优化新能源发展结构,有利于减少弃电、提高新能源渗透率。验证了新型电力系统平衡机理2。

3.2.4 地区间的差异

选择某3个地区电网,模拟测算新能源采用相同增量结构(光伏和风电增量平均出力相等)情况

下，3 个电网的新能源渗透率-弃电率关系曲线如图 9 所示。

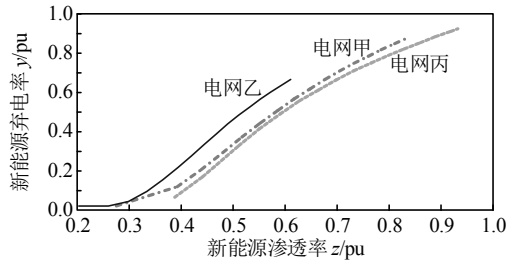


图 9 增量新能源结构相同情况下 3 个地区电网
新能源渗透率-弃电率关系仿真曲线
Fig. 9 New energy’s penetration rate vs abandoned
electricity rate curves simulated in 3 regional grids with
same new energy structure

由图 9 可以看出，在新能源增量结构相同的情况下，不同地区的新能源渗透率-弃电率关系曲线不同；在弃电率约束一致的情况下，不同地区的新能源渗透率极限不同。即，受自然负荷特性和新能源资源禀赋不同等影响，不同地区建设新型电力系统面临不同的平衡难度。验证了新型电力系统平衡机理 5。

3.2.5 关于平衡安全不等式的仿真分析

基于某电网，对等效负荷峰谷差率和等效负荷波动率的关系进行仿真测算，结果如图 10 所示。其中等效负荷小时波动率指 1 h 内的等效负荷最大变化率，日间波动率指两天之间的等效负荷最大变化率。

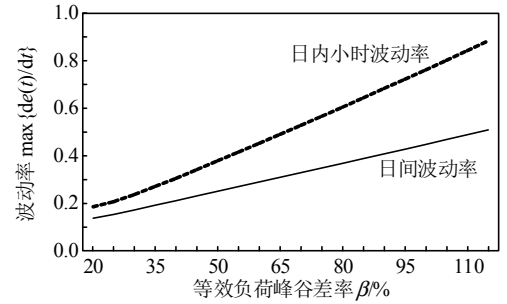


图 10 某电网等效负荷峰谷差率和等效负荷波动率关系的
仿真曲线
Fig. 10 Simulated curves of equivalent load’s peak-valley
rate & volatility rate of some grid

由图 10 可以看出，等效负荷波动率随等效负荷峰谷差率增大而增大。由前文知，等效负荷峰谷差率与新能源渗透率正相关，即随着新能源渗透率的增大，等效负荷波动率也将持续增加，逐步逼近平衡安全约束边界，平衡安全风险随之增加。

3.3 实际运行案例验证

某电网节假日期间，负荷短时间内降至节前水平的一半；同时，新能源发电量创出历史新高。“一减一增”影响下，新能源渗透率明显上升，单日新能源发电量占比达 32%，约为平常水平的 2 倍；新能源出力占负荷比例短时接近 50%。期间，等效负荷峰谷差率较传统负荷峰谷差率增加了 44 个百分点，远超系统调节能力(调峰率)，不可避免产生调峰弃电，电网安全和电力平衡承受住了巨大考验，短期内表现出了新型电力系统环境下的平衡特点。当日具体平衡情况如图 11 所示。

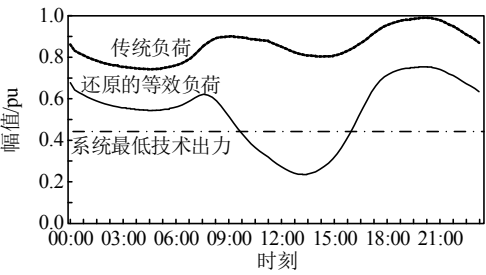


图 11 某电网节假日期间负荷、还原等效负荷、
系统最低技术出力示意图
Fig. 11 Load/restored equivalent load/system’s minimum
adjustment ability at a vacation day of some grid

采用与节假日期间相同的边界条件，基于搭建的模型开展仿真验证，对比仿真、实例的关键指标结果如表 3 所示。

表 3 仿真与实例主要指标对比		
Table 3 Contrast of simulation with illustration on some key indexes		
指标	仿真	实例
等效负荷峰谷差率	1.0	1.0
系统调峰率	1.0	1.0
新能源弃电率	1.18	1.00
新能源渗透率	0.83	1.00
等效负荷小时波动率	0.82	1.00

表 3 中，仿真模型的等效负荷峰谷差率、系统调峰率与实例相同，测算的新能源弃电率、新能源渗透率、等效负荷小时波动率(等效负荷 1 h 内的最大变化量/等效负荷最大值)均与实例接近。进一步验证了本文所提理论及仿真模型的有效性。

4 新型电力系统平衡演进过程

基于本文所提数学模型和仿真方法，结合实际数据统计规律，可以对新型电力系统平衡演进过程和场景进行分析预测。

4.1 新型电力系统平衡演进质变点

对某电网近4年平均等效负荷进行统计,得到各年的等效负荷日均曲线如图12所示;对图12中等效负荷日均曲线的峰谷差情况进行分析,结果如表4所示。

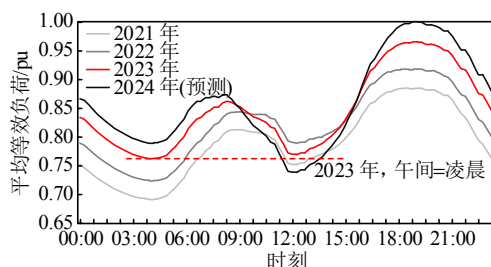


图12 某电网近4年平均日等效负荷曲线

Fig. 12 Average daily equivalent load curves of some grid in the past 4 years

表4 某电网近4年等效负荷日均峰谷差情况

Table 4 Average daily equivalent load's peak-valley rates of some grid in the past 4 years 单位: pu

年份	午间/晚峰峰谷差率 β_1	凌晨/晚峰峰谷差率 β_2	$\beta_1 - \beta_2$
2021	0.43	0.77	-0.33
2022	0.57	0.73	-0.17
2023	0.70	0.71	-0.01
2024	0.87	0.67	0.20

由图12可以看出,等效负荷日均曲线的“峡谷”曲线特征总体呈逐年加深的趋势。2023年以前,午间低谷逐年逼近传统的凌晨低谷,但仍总体高于凌晨低谷;2023年,午间低谷总体等于凌晨低谷;2024年开始,午间低谷全面低于凌晨,成为新型电力系统发展的标志性事件。

从日均曲线峰谷差率的角度分析(表4),午间/晚峰峰谷差率 β_1 (1-午间时段最低等效负荷/晚峰最高等效负荷)呈逐年快速增长的趋势,凌晨/晚峰峰谷差率 β_2 (1-凌晨时段最低等效负荷/晚峰最高等效负荷)总体稳定。2023年以前, β_1 总体低于 β_2 ,全天的峰谷差率由 β_2 决定;随着 β_1 的持续增长,2023年, $\beta_1 = \beta_2$;从2024年开始, β_1 全面大于 β_2 ,成为等效负荷日峰谷差率的决定因素,并将带动等效负荷日峰谷差率进入快速增长阶段。由前文分析可知(如图6所示),等效负荷日峰谷差率的快速增长,将逐步带动等效负荷波动速率、新能源弃电率等的增加,电力平衡难度也将开始快速增长。

总体看,等效负荷日峰谷差率的发展过程遵循了“量变到质变”的客观事物一般发展规律,2023年表现出“质变点”的特征。2023年以前,新能源

渗透率增长对等效负荷的影响持续累积,推动等效负荷结构持续调整,但最重要的宏观影响——等效负荷日均峰谷差率一直未发生明显变化;2023年,等效负荷的结构调整达到了关键质变点——午间低谷等于凌晨低谷,再往后日均峰谷差率将开始快速增长,电网保安全、保供应、促消纳难度将相应迅速增加。

综上,可认为2023年为新型电力系统平衡质变年,2024年为“新型电力系统平衡元年”。

4.2 新型电力系统平衡演进过程

由前文分析知,当等效负荷日均峰谷差率 β 开始增长后(跨过质变点),新能源渗透率、弃电率、等效负荷波动速率等关键平衡指标将随之快速增长,即对系统的调节能力需求越来越大;但在当前技术水平下系统的调节能力 α 存在极限。一方面是持续增长的系统调节需求,另一方面是有限的调节能力,这对矛盾关系的对比演化过程将对新能源渗透率、弃电率、平衡安全约束等关键平衡指标造成深刻影响,是推动新型电力系统平衡演进过程的内在本质动力。

新型电力系统平衡演进的本质是:不断增长的调节需求(等效负荷峰谷差率)与有限的系统调节能力之间的矛盾。

在对新型电力系统平衡本质发展规律分析的基础上,本文以调节需求和调节能力的对比发展关系为主线,提出新型电力系统平衡演进过程存在2个关键节点,对应3个发展阶段。

1) 质变点。

在质变点之前,电力系统处于“传统平衡阶段”,此阶段内等效负荷的结构和特性随新能源渗透率的增加持续调整,但对平衡的影响尚未全面凸显,新型电力系统平衡演变动能持续积累。

当午间等效负荷全面低于凌晨等效负荷时,将跨过“质变点”(标志:午间等效负荷=凌晨等效负荷),进入“平衡转型阶段”。

此阶段的主要特征是午间取代凌晨,成为1天中消纳最困难时刻,午间主导的等效负荷日峰谷差率、波动率开始逐步增长。晚峰保供、午间消纳“两难”问题凸显;系统跟踪调节难度日益增大,频率控制等运行风险逐步增加。此阶段的主要任务是适应高强度、高频度的极限平衡和调峰,持续提升数字化、智能化水平,防范平衡和安全稳定风险。

2) 临界点。

当等效负荷日峰谷差率增长至系统调节能力极限时,达到“临界点”(标志:等效负荷峰谷差率=系统极限调峰率),进入“新型平衡阶段”。

此阶段的主要特征是电网将常态化极限调峰运行,平衡和安全稳定运行风险快速增大,由于系统调节能力已用尽,新能源利用率将不可避免下降,但与此同时新能源渗透率稳步增长。此阶段的主要任务是科学制定消纳目标,统筹安全、保供和消纳,建立健全新型电力平衡体系,全力防范电网安全运行风险。

要深刻认识到,促进新能源高质量发展是实现“双碳”转型的必由之路。新型平衡阶段,新能源消纳压力不断增大、发电侧市场竞争更加激烈,对新能源市场主体的适应和发展能力提出更高要求。需要不断完善政策、市场机制,推动技术创新和发展新质生产力,增强新能源产业发展动能,优化调整产业结构、降低成本,多措并举引导新能源可持续发展。

4.3 新型电力系统发展建设方向

新型电力系统平衡发展演变方向由两个矢量构成,如图13所示。

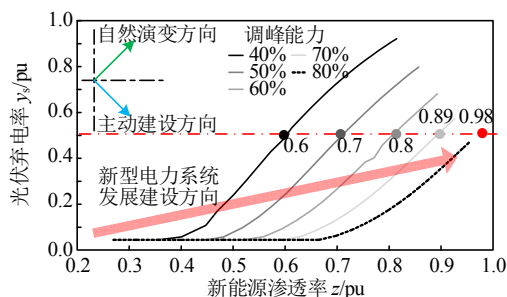


图13 新型电力系统平衡自然演变方向、主动建设方向图示

Fig. 13 Natural developing orientation & artificial constructing orientation of new power system's power balancing development

矢量1:新型电力系统平衡自然演变方向。即在系统调节能力一定时,新能源弃电率随渗透率增加而增加的自然发展规律。

矢量2:新型电力系统平衡主动建设方向。即多措并举增加系统调节能力,优化新能源弃电率随渗透率增加的关系曲线,提高新能源渗透率极限。

例如,以光伏弃电率达到0.5 pu作为衡量点,40%系统调节能力情况下,测算衡量点附近新能源渗透率为0.6 pu;如果将系统调节能力提高到60%,衡量点附近的新能源渗透率可提高到0.8 pu。即,

新型电力系统发展过程与系统调节能力密切相关。

综上,服务国家“双碳”战略,构建新型电力系统,提高新能源渗透率的关键举措是抓住等效负荷峰谷差和系统调节能力这对主要平衡矛盾,通过持续创新技术手段和管理手段,源网荷储同时发力,多措并举提升系统调节能力、降低等效负荷峰谷差率。

一是提升系统调节能力。推动新能源(包括规模日益增大的分布式新能源)参与运行调节,实现柔性可控、高效利用;推进常规机组灵活性改造,挖掘常规电源调节潜力;积极有序推进抽水蓄能电站建设,支持新型储能规模化发展。推进特高压交直流网架建设,强化配网建设,提升电网资源配置能力。不断完善市场机制和调度机制,持续提升智能化调度水平和资源配置效率。

二是降低等效负荷峰谷差。科学制定新能源发展规划,优化风电、光伏装机结构;积极推动发展“新能源+储能”,做好新能源发电配置储能,鼓励用户侧储能创新开发模式。加强工商业用户可调节负荷资源挖掘,推进建立涵盖分布式光伏、用户侧储能、电动汽车、空调负荷、大数据中心、5G基站等负荷侧资源的多时间尺度可调节负荷资源库。根据等效负荷特性,因地制宜优化调整分时电价政策,推动“削峰填谷”对象由传统负荷向等效负荷转变。

新型电力系统平衡的纽带和焦点是大电网平衡管理,应在最大限度提升调节能力和降低等效负荷峰谷差的基础上,研究构建“平衡目标多元化、平衡约束多维化、平衡对象泛在化、平衡机理随机化”的新型电力系统平衡体系。

5 结论与展望

5.1 结论

本文提出新型电力系统的平衡演进机理和数学模型,基于实际生产运行数据的仿真结果和生产实例验证了模型的准确性。并通过理论推导和仿真分析得到以下主要结论。

1) 新型电力系统电力平衡演进过程中,新能源渗透率、新能源弃电率、系统调节能力、新能源结构等要素相互关联、彼此影响。系统调节能力、新能源结构一定时,弃电率物理上将随渗透率增长而增长;要提高新能源渗透率极限,就要提高系统调节能力或优化调整新能源结构。

2) 新型电力系统平衡演进的本质规律是: 不断增长的平衡调节需求和有限的系统调节能力之间的矛盾。这对矛盾关系的对比演化过程将对新能源渗透率、弃电率、平衡安全约束等关键平衡指标产生深刻影响, 推动形成了新型电力系统电力平衡发展演进过程的2个关键节点和3个主要阶段。

3) 新型电力系统的发展方向由其自然演变方向和系统主动建设方向两方面构成。在其自然演变方向基础上, 加强调节能力建设, 努力构建新型电力平衡体系是推动新型电力系统优质发展、更好服务国家“双碳”战略的必由路径。

5.2 展望

本文所提理论模型和仿真方法为综合评估新型电力系统平衡发展水平、科学测算新型电力系统新能源渗透率极限、模拟分析平衡发展状态、量化计算调节能力建设需求等提供了有效手段, 建议后续尽快开展以下工作。

1) 根据系统调节能力、负荷特性和新能源发电资源特点, 科学制定新型电力系统建设目标和新能源发展规划, 保障新型电力系统优质、高效、可持续发展。

2) 结合不同地区的新能源发展进度, 综合考虑经济社会效益, 科学测算并合理制定后续新能源规划、网架规划、常规电源和调节性电源建设规划。

3) 继续深入开展新能源参与平衡机理研究, 并结合工程实践不断完善理论体系。围绕新型电力系统平衡主要矛盾, 研究建立包括等效负荷峰谷差率、系统调节能力等在内的新型电力系统平衡指标体系, 结合大电网实际运行做好指标监测、分析和评估预警, 指导规划和运行。

4) 综合考虑新能源发电量、新能源在终端能源消费中的占比、新能源利用水平, 研究科学评估能源电力转型发展、新能源消纳工作成效的方法和指标, 统筹新能源渗透率和利用率, 支撑新能源高质量发展。

5) 本文在分析过程中以“确保电力可靠供应”为边界条件, 暂未考虑负荷控制调节的作用, 在新型电力系统建设发展过程中负荷参与控制调节也是电力电量平衡的重要方面, 后续本文作者将对此开展进一步研究。

参考文献

[1] 新华社. 习近平在中共中央政治局第十二次集体学习时

强调: 大力推动我国新能源高质量发展 为共建清洁美丽世界作出更大贡献[EB/OL]. 中国政府网, 2024-03-01. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6935251.htm.

[2] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.

ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).

[3] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103.

CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103(in Chinese).

[4] 王国春, 董昱, 许涛, 等. 巴西“8.15”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9461-9469.

WANG Guochun, DONG Yu, XU Tao, et al. Analysis and lessons of brazil blackout event on august 15, 2023[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9461-9469(in Chinese).

[5] 闫景皓, 黄越辉, 卢慧, 等. 爱尔兰岛高比例新能源电力系统运行经验与启示[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 498-508.

YAN Jinghao, HUANG Yuehui, LU Hui, et al. Operating experience and insights from high penetration renewable energy power systems in the Irish island[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 498-508(in Chinese).

[6] 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): 1-8.

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): 1-8(in Chinese).

[7] 李增辉, 于钊, 孙大雁, 等. 新能源预测纳入备用对平衡和消纳的影响研究[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1393-1402.

LI Zenghui, YU Zhao, SUN Dayan, et al. Research on influences to power balance & new energy consumption of taken-into-account proportion of new energy's predicted output in day-ahead power reserve[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1393-1402(in Chinese).

[8] 张振宇, 王文倬, 马晓伟, 等. 基于风险控制的新能源纳入电力系统备用方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3375-3381.

- ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, MA Xiaowei, et al. Research on reserve of power system considering renewable energy based on risk control[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3375-3381(in Chinese).
- [9] 张振宇, 孙晓强, 万筱钟, 等. 基于统计学特征的新能源纳入西北电网备用研究[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2047-2054.
- ZHANG Zhenyu, SUN Xiaoqiang, WAN Xiaozhong, et al. Research on reserve of northwest power grid considering renewable energy based on statistical characteristics[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2047-2054(in Chinese).
- [10] 孙大雁, 关立, 黄国栋, 等. 跨区域省间富余可再生能源电力现货交易的实践和思考[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 1-7.
- SUN Dayan, GUAN Li, HUANG Guodong, et al. Practice and reflection on trans-regional and cross-provincial electricity spot trading for surplus renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 1-7(in Chinese).
- [11] 国家电力调度控制中心. 电力现货市场实务[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [12] 孙晓强, 张小奇, 张光儒, 等. 考虑跨区直流调峰的新能源参与电力平衡可信容量提升方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 878-884.
- SUN Xiaoqiang, ZHANG Xiaoqi, ZHANG Guangru, et al. Credible capacity improvement with new energy participating in power balance considering cross-regional DC peak shaving[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 878-884(in Chinese).
- [13] 于群, 李知艺, 谷炜, 等. 面向理想调度的高比例新能源电力系统端到端调度决策方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(S1): 31-43.
- YU Qun, LI Zhiyi, GU Wei, et al. Perfect-dispatch-oriented end-to-end dispatch decision-making method for high proportion renewable energy power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 31-43(in Chinese).
- [14] 刘映尚, 马骞, 王子强, 等. 新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1694-1705.
- LIU Yingshang, MA Qian, WANG Ziqiang, et al. Cogitation on power and electricity balance dispatching in new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1694-1705(in Chinese).
- [15] 刘翔宇, 李慧斌, 顾雪平, 等. 考虑惯量充裕度与频率变化率的互联电网在线频率安全分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1780-1787.
- LIU Xiangyu, LI Huibin, GU Xueping, et al. On-line frequency security analysis of interconnected power grid considering inertia adequacy and RoCoF[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1780-1787(in Chinese).
- [16] 文云峰, 杨游航, 邢鹏翔, 等. 多维因素制约下新能源消纳能力评估方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 127-146.
- WEN Yunfeng, YANG Youhang, XING Pengxiang, et al. Review on the new energy accommodation capability evaluation methods considering multi-dimensional factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 127-146(in Chinese).
- [17] 姜海洋, 杜尔顺, 马佳豪, 等. 考虑长周期供需不平衡风险的新型电力系统规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5845-5857.
- JIANG Haiyang, DU Ershun, MA Jiahao, et al. Power system optimal planning method considering long-term imbalance risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5845-5857(in Chinese).
- [18] 易俊, 林伟芳, 任萱, 等. 新型电力系统发展水平指标体系构建及综合评价方法研究[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3758-3768.
- YI Jun, LIN Weifang, REN Xuan, et al. Research on construction of index system and comprehensive evaluation method of development level of new power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3758-3768(in Chinese).



许涛

在线出版日期: 2024-07-22.

收稿日期: 2024-04-12.

作者简介:

许涛(1976), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行控制与管理等, xu-tao@sgcc.com.cn;

王国春(1967), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行控制与管理等, wang-guochun@sgcc.com.cn;

董昱(1974), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行控制与管理等, dong-yu@sgcc.com.cn;

*通信作者: 王超(1981), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行与控制、电力市场等, wang-chao@sgcc.com.cn;

李增辉(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行与控制等, li-zenghui@sgcc.com.cn.

(责任编辑 李泽荣)