

基于全电压等级目标网架的多维度评价研究

孙可¹, 裴传逊², 翁秉宇²

(1. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007;

2. 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 目前, 我国电网建设已由高速增长阶段转向高质量发展的新阶段, 电力需求增速放缓, 一些城市电力负荷逐步达到饱和, 亟待开展基于饱和负荷的全电压等级目标网架评价。对此, 在国内外相关研究成果的基础上, 以 500 kV, 220 kV, 110(35) kV, 10 kV 电压等级为层级, 从电网负荷容量匹配性、网架转供能力灵活性、网架结构标准规范性、电网设备利用高效性、电网层级协调适应性等维度构建了全电压等级、多维度的目标网架评价指标体系, 以及对应评价方法和模型, 推进电网全电压等级目标网架规划评价工作的精准化开展。

关键词: 饱和负荷; 全电压等级; 目标网架; 评价体系; 评价模型

文章编号: 1007-1881(2020)08-0042-06

DOI: 10.19585/j.zjdl.202008007

中图分类号: TM715

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Multi-Dimensional Evaluation Based on Target Grid of Full Voltage Level

SUN Ke¹, PEI Chuanxun², WENG Bingyu²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;

2. State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo Zhejiang 315000, China)

Abstract: At present, China's power grid construction has shifted from the stage of high-speed growth to a new stage of high-quality development. The growth of power demand has slowed down, and the power load of some cities has gradually reached the saturation period. However, the evaluation of the full-voltage target grid based on saturation load has not yet been obtained Value. Based on the relevant research results at home and abroad, this paper takes 500, 220, 110 (35) and 10 kV voltage levels as the levels, from the grid load capacity matching, the flexibility of grid transmission capacity, the standardization of grid structure standards, the grid equipment Use the dimensions of high efficiency, grid-level coordination and adaptability to build a full voltage level and multi-dimensional target grid evaluation index system, as well as corresponding evaluation methods and models, to promote the precise development of the grid full voltage level target grid planning evaluation work.

Keywords: saturated load; full voltage level; target grid; evaluation system; evaluation model

0 引言

目前, 我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段, 电网建设也随之转换为高质量发展的新阶段, 电力需求增速进一步放缓, 一些城市电力负荷逐步达到饱和期, 然而基于饱和负荷的全电压等级目标网架评价还未受到足够重视。

当前国内外针对目标网架评价的研究主要面向输电网和配电网, 根据评价指标数量的不同, 分为单一指标评价和综合指标体系评价。文献[1]基于特高压交流输变电工程的接入需要, 开展了电网运行适应性研究。文献[2]阐述了支撑输变电设备智能化的关键技术。文献[3]在智能电网的基本框架下, 分别从经济性、可靠性、灵活性等方面, 综合衡量评价了输电网的规划方案。文献[4]在已有配电网网架规划问题研究成果的基础上, 提出了一种基于灾害地图的配电网网架规划方

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211NB1800XF)

法。文献[5-6]分别针对配电网网格、骨干目标网架,提出综合性评价模型和方法。整体而言,目前针对输配电网结构协调性的评价体系不够系统,尚需进一步提升全电压等级下的电网目标网架规划和优化水平,建立基于全电压等级目标网架的多维度评价体系。

本文根据高压输电网、高压配电网和中压配电网网架的特点,在现有国内外相关研究成果的基础上^[7-13],研究在饱和负荷时期网架的特点和要求,以500 kV, 220 kV, 110(35) kV, 10 kV电压等级为层级,从电网负荷容量匹配性、网架转供能力灵活性、网架结构标准规范性、电网设备利用高效性、电网层级协调适应性等维度出发,构建全电压等级、多维度的目标网架评价指标体系和评价方法,并以ZB城市电网为典型实例,开展饱和负荷期全电压等级目标网架评价,推进全电压等级电网规划工作的精准化开展。

1 基于逻辑回归的饱和发展阶段判断

1.1 逻辑回归S曲线模型

本文借鉴国内外发达城市经济与电网发展规律,主要基于逻辑回归(Logistic Regression)的S曲线模型^[14-15],用以判断地区经济与电网建设发展水平及预测电力需求饱和期大致时间,指导地区电网基础设施的建设。逻辑回归S曲线模型的方程如下:

$$y = \frac{c}{1 + e^{-(a-bt)}} \quad (1)$$

式中: y 为S曲线 Logistic 函数,表示变量与时间的关系; c 为函数饱和值; a 是与函数初始值相关的参数; b 是增长参数; t 为时间序列。

1.2 电网发展阶段划分理论

为了得到S曲线函数的一些特征点,对其进行多阶求导处理^[16-17]。分别得到一、二、三次求导结果 y_1, y_2, y_3 , 如式(2)所示:

$$\begin{cases} y_1 = \frac{c}{3 + \sqrt{3}} \approx 0.21c \\ y_2 = 0.5c \\ y_3 = \frac{c}{3 - \sqrt{3}} \approx 0.79c \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可以得出结论:对于S曲线模型来说,其值达到饱和量的21%, 50%, 79%左右时,

事物发展分别进入加速增长期、减速增长期、缓慢增长饱和期。

参考现有国内外发达地区经济发展与电网建设发展轨迹,可将地区电网发展划分为4个阶段,如图1所示。

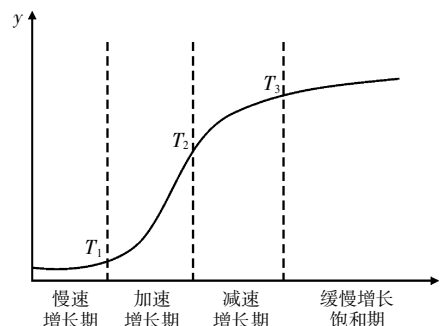


图1 电网发展阶段划分

2 基于目标网架的多维度评价指标体系

2.1 指标的选取方法

电力负荷受众多因素影响,具有较强的波动性。随着电动汽车、电供热等多元化负荷的快速发展,间歇性负荷的不确定性增强。风力、光伏等可再生能源发电大规模接入,进一步加剧了净负荷的波动性。电源侧和负荷侧的双重波动性、不确定性,对电网网架转供能力和灵活性提出了更高的要求。

随着电网规模持续扩大,电网设备建设、运营成本持续攀升。由于电网投资具有金额大、持续时间长、资金回收慢、风险多等特点,在社会经济新常态下,电网规划建设高质量阶段,投资主体多元化竞争加剧,对供电企业投资效益、设备利用率也提出了更高的要求。

在电网建设高质量发展新阶段,目标电网规划最基本的要求是安全可靠与经济运行,高质量满足差异化用电需求。即电网容量必须满足负荷发展,满足负荷在故障下的安全转供,同时保持可靠性与经济性的平衡,不同层级间电网的平衡协调,不致造成资金的浪费和设备的低效利用。

在以上分析的基础上,本文按照全面性、客观性、典型性的原则,以“实效、实用”和规划需求为导向,借鉴国内外先进经验,研究在转型发展时期电网网架特点和要求,构建全电压等级、多维度的网架评价指标体系。体系采用层次化结

构,以500 kV, 220 kV, 110(35) kV, 10 kV 电压等级为层级,从电网负荷容量匹配性、网架转供能力灵活性、网架结构标准规范性、电网设备利用高效性、电网层级协调适应性等方面,建立涵盖输电网和配电网多层级的电网网架评价指标体系,如图2所示。

2.2 指标的计算方法

2.2.1 电网负荷容量匹配性

选用不同电压等级容载比(500 kV, 220 kV, 110 kV),该指标整体上反映供电区域变电容量对负荷增长的匹配适应程度。

$$R_{\text{容}} = \frac{\sum S_i}{\sum P_i}, \quad (3)$$

式中: $R_{\text{容}}$ 表示第 i 电压等级的容载比, i 分别指 500 kV, 220 kV, 110 kV; S_i 表示第 i 电压等级的容量; P_i 表示第 i 电压等级的负荷。

2.2.2 网架转供能力灵活性

反映变电站和线路的结构坚强度以及电网运行方式灵活性。

(1) 变电站主变“N-1”通过率(220 kV, 110 kV)。指最大负载运行方式下,变电站中任一主变停运后,其供电的全部负荷可转移到其他主变供电的变电站占比。

$$\lambda_{\text{T}} = \frac{N'_{\text{T}}}{N_{\text{T}}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: λ_{T} 表示第 i 电压等级满足主变“N-1”运行的变电站占比, i 分别指 220 kV, 110 kV; N'_{T} 表

示第 i 电压等级满足主变“N-1”的变电站数量; N_{T} 表示第 i 电压等级的变电站总数量。

(2) 线路“N-1”通过率(10 kV)。指最大负载运行方式下,任一条线路停运后,其供电的全部负荷可通过不超过 2 次操作就能转移到其他线路供电的线路占比。

$$\lambda_{\text{ML}} = \frac{N'_{\text{ML}}}{N_{\text{ML}}} \times 100\%, \quad (5)$$

式中: λ_{ML} 表示满足“N-1”运行的 10 kV 线路占比; N'_{ML} 表示 e 满足“N-1”运行的 10 kV 线路条数; N_{ML} 表示 10 kV 线路总条数。

2.2.3 网架结构标准规范性

反映电网目标网架结构接线的规范性。分不同电压层级(220 kV, 110 kV, 10 kV)评估区域内网架规划期典型接线比例。其中,典型接线指 DL/T 5729—2016《配电网规划设计技术导则》规定的接线方式。

$$\lambda_{\text{ELI}} = \frac{N'_{\text{ELI}}}{N_{\text{ELI}}} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: λ_{ELI} 表示第 i 电压等级的典型接线占比, i 分别指 220 kV, 110 kV, 10 kV; N'_{ELI} 表示第 i 电压等级的典型接线线路条数; N_{ELI} 表示第 i 电压等级的线路总条数;

2.2.4 电网设备利用高效性

反映电网目标网架规范下的设备利用效率。分不同电压层级(500 kV, 220 kV, 110 kV, 10 kV)评估区域内电网规范网架下的设备利用效率,以

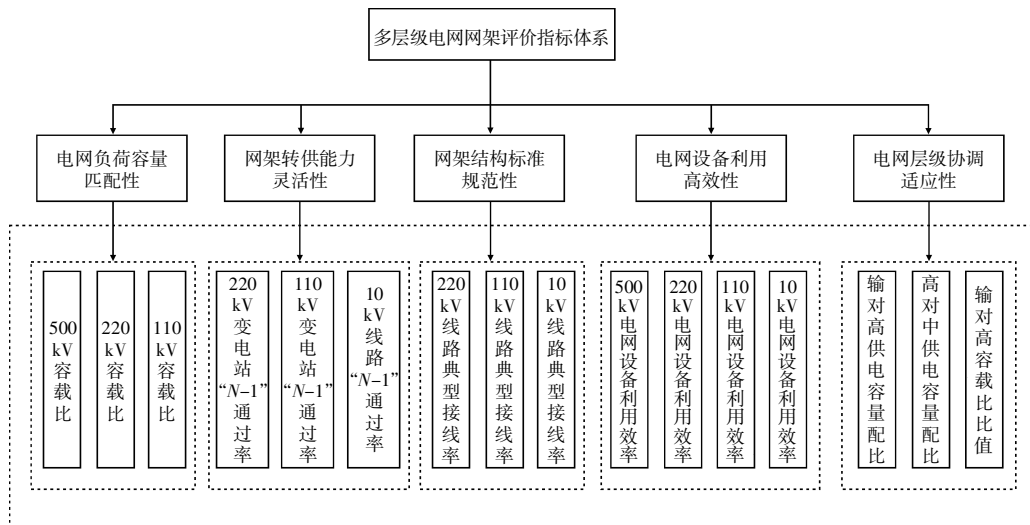


图2 多层级电网网架评价指标体系

提高区域电网投资的效率和效益。

$$\lambda_{Ei} = \frac{Q'_i}{\sum S_i \times 8760} \times 100\% \quad , \quad (7)$$

式中： λ_{Ei} 表示第*i*电压等级的设备利用率，*i*分别指500 kV，220 kV，110 kV； Q'_i 表示第*i*电压等级的下级电量值； S_i 表示第*i*电压等级额定容量累计值。

2.2.5 电网层级协调适应性

反映层级间变压器输送电能的协调性适应能力。分不同电压层级(500 kV，220 kV，110 kV，10 kV)评估区域内主变、配变之间的变电容量比，包括输配电网变电容量比和高中压配电网变电容量比。

$$\lambda_{Si} = \frac{\sum S_{up}}{\sum S_{down}} \times 100\% \quad , \quad (8)$$

式中： λ_{Si} 表示第*i*电压等级的设备利用率，*i*分别指220 kV，110 kV，10 kV； S_{up} 表示第*i*电压等级的上级变电容量值； S_{down} 表示第*i*电压等级的下级变电容量值。

3 全电压等级、多维度的网架评价模型

3.1 指标的评分

指标评分函数的归一化方法有最大值法、差值法、模糊数学法等，各种方法归一化计算结果一般不影响评价结论且满足要求。本文综合采用以上方法进行指标评分，对于效益型指标，指标越大，得分越高，计算公式如下：

$$S_i = p + \frac{x_i - m_i}{M_i - m_i} \cdot q \quad , \quad (9)$$

式中： S_i 为指标得分； x_i 为指标值； M_i ， m_i 分别为指标的理想值和不允许值； p ， q 均为常数，通常取 $p=60$ ， $q=40$ 。

对于适中型指标，即指标值以稳定在某一范围内评分较高，计算公式如下：

$$y_i = \begin{cases} \frac{100x_i}{a_i}, & x_i < a_i \\ 100, & a_i \leq x_i \leq b_i \\ 100 - \frac{100x_i}{b_i}, & x_i > b_i \end{cases} \quad , \quad (10)$$

式中： y_i 为指标得分； x_i 为指标值； a_i ， b_i 分别为指标的理想值区间范围，且 $a_i < b_i$ 。

(1) 电网负荷容量匹配性

饱和负荷期，年均负荷增长率低于7%，各电

压等级容载比范围区间如表1所示。

表1 各电压等级容载比

电压等级	容载比
500 kV 及以上	1.5~1.8
220~330 kV	1.6~1.9
110 kV	1.8~2.0

(2)网架转供能力灵活性、网架结构标准规范性

变电站主变“N-1”通过率、线路“N-1”通过率、网架典型接线比例，这3个指标评分的理想值定为100%，不允许值取极限为0。

(3) 电网设备利用高效性

本文运用典型变电站、典型接线模式中供电架构最佳负载能力，确定设备利用最佳负载能力范围如下：

最大负荷时刻，变电站最佳负载范围[50%，60%]，线路最佳负载范围[35%，50%]；全年平均状态，变电站最佳负载范围[20%，40%]，线路最佳负载范围[20%，30%]^[18]。

(4) 电网层级协调适应性

根据Q/GDW 370—2009《城市配电网技术导则》不同电压等级的容载比范围，推算出饱和负荷期不同层级容量匹配范围如下：

220 kV 变电站与110 kV 变电站容量配比[0.73, 1.16]；110 kV 变电站与10 kV 配变容量配比[0.72, 0.96]^[19]。

3.2 指标的权重

根据所建立的指标体系，采用相对重要比较值的方法，对指标层的每个指标进行成对比较，形成如下比较矩阵：

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

式中： a_{ij} 是因素*i*相对因素*j*的重要程度，取自然数1~9， $a_{ij}=1/a_{ji}$ 。

然后根据几何平均法计算指标权重 w_i ，如式(12)所示：

$$w_i = \frac{(\prod_{j=1}^n A_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n A_{ij})^{\frac{1}{n}}} \quad , \quad i, j=1, 2, \dots, n \quad . \quad (12)$$

3.3 指标综合评分

选用层次分析法,汇总各指标评价得分得到综合评分,计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i y_i, \quad (13)$$

式中: y 为综合评分值。

4 实例应用

4.1 电网及发展阶段

截至2019年底,ZB城市已有500 kV变电站8座,主变19台,变电容量1 740万kVA,容载比为1.72;220 kV变电站53座,变电容量2 568万kVA,用户变电站8座,变电容量193.3万kVA,容载比为2.03;110 kV公用变电站235座,容量2 324.4万kVA,用户变电站36座,变电容量251.15万kVA,容载比为2.24;35 kV公用变电站56座,变电容量130.58万kVA;公用配变40 150台,容量2 025.1万kVA。

2025年、2030年、2035年全市最大负荷分别为2 150万kW、2 490万kW、2 600万kW。“十三五”最大负荷年均增长率为9.54%，“十四五”最大负荷年均增长率为5.06%，“十五五”最大负荷年均增长率为2.98%。

采用S曲线模型及人均用电信息数据^[20]判断ZB电网发展阶段。数据来源为“ZB市统计局”网站,“ZB统计年鉴2019年”给出了历年(1978—2018年)全社会用电量、人口的数据,见图3。

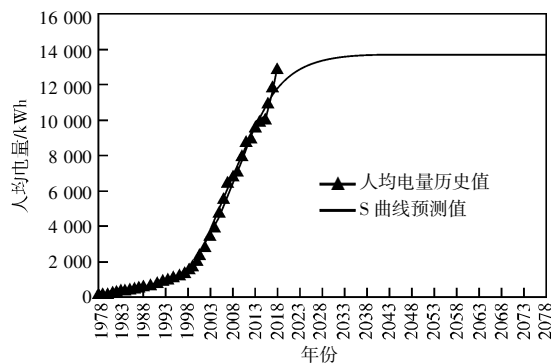


图3 ZB电网S曲线预测结果

4.2 评价指标

根据ZB城市电网目标网架规划基础数据,以及本文指标体系中指标计算方法,计算出评价体系中现状年、过渡年、目标年各评价指标值,

如表2所示。

表2 城市电网评价指标

指标层	指标名称	现状年	2025年	目标年
电网负荷容量	500 kV 容载比	1.72	1.34	1.53
	220 kV 容载比	2.03	2.01	1.97
	110 kV 容载比	2.24	2.07	1.95
网架转供能力	220 kV 变电站“N-1”通过率/%	65.60	100.00	100
	110 kV 变电站“N-1”通过率/%	93.83	100.00	100
	10 kV 线路“N-1”通过率/%	95.03	100.00	100
网架结构标准	220 kV 线路典型接线率/%	60.00	85.71	100
	110 kV 线路典型接线率/%	85.11	79.21	90.52
	10 kV 线路典型接线率/%	85.30	100.00	100
电网设备利用高效性	500 kV 电网设备利用效率/%	50.94	30.99	22.27
	220 kV 电网设备利用效率/%	34.52	24.13	19.70
	110 kV 电网设备利用效率/%	38.14	24.83	20.53
	10 kV 电网设备利用效率/%	43.77	34.57	28.81
电网层级协调适应性	500 kV 对 220 kV 供电容量配比	0.68	0.78	0.88
	220 kV 对 110 kV 供电容量配比	1.10	1.03	1.04
	110 kV 对 10 kV 供电容量配比	1.15	1.39	1.40

4.3 评价的综合得分

根据全电压等级目标网架指标体系、评价模型,测得ZB城市电网现状年、2025年、目标年网架评价得分分别为88.35,95.56,98.62,如表3所示。

表3 城市电网评价得分

指标层	指标名称	现状年	2025年	目标年
	综合得分	88.35	95.56	98.62
电网负荷容量	500 kV 容载比	100.00	83.75	100.00
	220 kV 容载比	100.00	99.00	100.00
	110 kV 容载比	96.00	100.00	100.00
网架转供能力	220 kV 变电站“N-1”通过率/%	65.60	100.00	100.00
	110 kV 变电站“N-1”通过率/%	93.83	100.00	100.00
	10 kV 线路“N-1”通过率/%	95.03	100.00	100.00
网架结构标准	220 kV 线路典型接线率/%	60.00	85.71	100.00
	110 kV 线路典型接线率/%	85.11	79.21	90.52
	10 kV 线路典型接线率/%	85.30	100.00	100.00
电网设备利用高效性	500 kV 电网设备利用效率/%	72.64	100.00	100.00
	220 kV 电网设备利用效率/%	100.00	100.00	98.50
	110 kV 电网设备利用效率/%	100.00	100.00	100.00
	10 kV 电网设备利用效率/%	90.57	100.00	100.00
电网层级协调适应性	500 kV 对 220 kV 供电容量配比	86.19	98.86	100.00
	220 kV 对 110 kV 供电容量配比	95.83	100.00	100.00
	110 kV 对 10 kV 供电容量配比	99.83	91.41	90.63

影响过渡年和目标年得分的主要因素包括:

(1)电网负荷容量匹配性中,500 kV 过渡年变电容量较为不足,容载比仅为1.34;220 kV 过渡年变电容量比较充足,明显超前城市电网发展阶段。

(2)网架转供能力灵活性中,过渡年及目标年“N-1”转供率均达到100%,网架结构坚强可靠。

(3)网架结构标准规范性中,220 kV 线路典型接线率,从过渡年有序推进,到目标年达到100%;110 kV 线路典型接线率,从过渡年到目标年仍有一定发展空间。

(4)电网设备利用高效性中,220 kV 电网设备利用效率,过渡年控制得当,处于最佳负载能力范围,至目标年设备利用效率降低,设备利用率有冗余。

(5)电网层级协调适应性中,500 kV 对 220 kV 供电容量配比,过渡年略有不足,主要为500 kV 变电容量不足;110 kV 对 10 kV 供电容量配比,过渡年及目标年10 kV 供电容量持续不足,高峰负荷运行时,可能会引起部分配变过载运行,未来10年过渡年至目标年,中压配电网是规划建设的重要内容之一。

5 结语

本文在现有国内外相关研究成果基础上,以500 kV,220 kV,110(35) kV,10 kV 电压等级为层级,从电网负荷容量匹配性、网架转供能力灵活性、网架结构标准规范性、电网设备利用高效性、电网层级协调适应性等维度,构建了多维度的全电压等级目标网架的评价体系和评价方法。

最后,以ZB城市电网为典型实例,采用本文建立的全电压等级目标网架评价体系和算法模型,对现状年、2025年、2035年目标年进行评价,评价结果可为电网规划、建设和运行提供决策和支持。

参考文献:

- [1] 于光耀,李国栋,郑卫洪,等.特高压接入天津电网运行适应性研究[C]//2016智能电网发展研讨会论文集.北京:[出版者不详],2016.
- [2] 王少华,胡文堂,梅冰笑,等.浙江电网输变电设备智能化及状态检修体系[J].高压电器,2013,49(4):8-13.

- [3] 苏浩益,李如琦.智能电网条件下的多目标输电网规划[J].中国电机工程学报,2012,32(34):30-35.
- [4] 施鹏佳,雷勇,张林垚,等.抗灾型配电网网架规划方法研究[J].浙江电力,2019,38(6):46-52.
- [5] 彭显刚,林利祥,翁奕珊,等.基于模糊综合评判和综合赋权的抗灾型配电网骨干网架规划[J].电力系统自动化,2015,39(12):172-178.
- [6] 苏悦平,刘涛,杨海森,等.基于 Hausdauff 度量的城市配电网网格目标网架综合评价[J].南方能源建设,2016,3(Z1):5-8.
- [7] 崔明建,孙元章,杨军,等.一种基于多层次灰色面积关联分析的电网安全综合评价模型[J].电网技术,2013,37(12):3453-3460.
- [8] 王芳东,林韩,温步瀛,等.基于模糊综合评价法的电力负荷饱和程度分析[J].电力与电工,2010,30(3):1-3.
- [9] 施婧,李玮玮,王晓辉,等.基于数据包络法对配电网投入产出效益的评价[J].浙江电力,2017,36(12):63-69.
- [10] 白桦.多权重因子影响的电网规划评价指标体系[J].浙江电力,2015,34(11):47-51.
- [11] 刘树森.地市电网发展诊断指标体系研究[J].电气技术,2014(5):63-67.
- [12] 周孝信,陈树勇,鲁宗相.电网和电网技术发展的回顾与展望:试论三代电网[J].中国电机工程学报,2013,33(22):1-11.
- [13] 韩丰,李晖,王智冬,等.法国电网发展分析以及对我国的启示[J].电网技术,2009,33(8):41-47.
- [14] 崔党群.Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J].数理统计与管理,2005,24(1):112-115.
- [15] 王立宇,冀传留.基于S曲线模型的电网发展阶段研究[J].电气技术,2017(3):112-116.
- [16] 洪露.电网发展的阶段性研究及启示[D].杭州:浙江大学,2013.
- [17] 胡列翔,徐谦,张全明,等.电网发展的阶段论[J].浙江电力,2011,30(12):9-11.
- [18] 刘洪,杨卫红,王成山,等.配电网设备利用率评价标准与提升措施[J].电网技术,2014,38(2):419-423.
- [19] 叶彬,葛斐,陈学全,等.配电网发展协调评估[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(5):154-160.
- [20] 张建平,刘杰锋,陈屹东,等.基于人均用电量和人均用电负荷的饱和负荷预测[J].华东电力,2014,42(4):661-664.

收稿日期:2020-06-02

作者简介:孙可(1980),男,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化、新能源接入、能源互联网等。

(本文编辑:方明霞)