

标准与管理

中压配电网电压等级全生命周期评价方法研究

张秀钊¹, 何界东², 王文飞³, 王志敏¹, 杨玉琴³, 刘宝林¹, 万航羽¹

(1 云南电网有限责任公司, 云南 昆明 650011;

2 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051;

3 中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司, 云南 昆明 650051)

摘要: 传统中压配电网电压等级评价方法往往会导致在一些负荷密度发展较快的区域选择了不当的中压电压等级。提出了一种可以适应各种负荷发展情况的中压配电网电压等级全生命周期评价方法。基于传统评价方法与经验设计了全生命周期评价的综合指标, 并根据指标与实际需求构建了中压配电网等级全周期评价模型。使用该评价模型得出全周期综合评价指标, 从而比较得出最佳中压配电网电压等级方案。使用两个不同发展特性的实际区域数据进行仿真计算, 验证了该模型与评价方法的有效性, 并得出了适应各个区域的最佳方案。

关键词: 中压配电网; 全生命周期评价; 综合评价指标体系; 电压等级

中图分类号: TM727 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-3175(2023)05-0063-07

Research on Life Cycle Evaluation Method of Voltage Level for Medium-Voltage Distribution Network

ZHANG Xiu-zhao¹, HE Jie-dong², WANG Wen-fei³, WANG Zhi-min¹, YANG Yu-qin³, LIU Bao-lin¹, WAN Hang-yu¹

(1 Yunnan Power Grid Co., Ltd, Kunming 650011, China;

2 Department of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;

3 Yunnan Power Design Institute Co., Ltd, China Energy Engineering Group, Kunming 650051, China)

Abstract: The traditional voltage level evaluation methods for medium-voltage distribution network often cause incorrect selection of medium voltage level in areas of fast-developing load density, so a life cycle evaluation method of voltage level for medium-voltage distribution network is put forward, which can adapt to various load development conditions. The paper, based on traditional evaluation methods and experience, first designs comprehensive index of a life cycle evaluation. Second, according to the comprehensive index and actual demand, a life cycle evaluation model of medium-voltage distribution network grades is built. Third, the evaluation model is used to obtain comprehensive evaluation indexes of the whole cycle to achieve the optimal voltage level scheme of medium-voltage distribution network. After making simulated calculation of two actual areas with different load development conditions, it is found that this model and evaluation method are effective and the best suitable scheme for each area is achieved.

Key words: medium-voltage distribution network; life cycle evaluation; comprehensive evaluation index system; voltage level

0 引言

随着电网规模的扩大, 各地区负荷密度的不断提高, 中压配电网侧出现了供电半径不足, 高负荷密度供电能力不足, 线损率提高等问题, 这些问题主要是由负荷密度的快速增长引起的。中压配电网是否能适应未来负荷密度的增长, 能否

适应土地资源越来越紧张的发展趋势成为了迫在眉睫的问题。

中压配电网电压等级的选择会明显影响中压侧的供电能力^[1]。中压配电网电压等级选取与负荷密度、输送容量、电压降落和线路损耗等因素联系密切, 对中压配电网电压等级的评价也基本是基于这几项指标^[2-3]。国内外实践表明, 提高中压配电网电压是提高供电能力以及满足负荷增长

作者简介: 张秀钊(1978—), 男, 高级工程师, 工学硕士, 从事电网规划、电力系统分析工作;

何界东(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源与新型电力系统;

王文飞(1991—), 男, 工程师, 硕士, 从事电力系统分析与规划工作。

需要的必要、有效和经济手段。目前,包括英国、法国在内 80% 的欧洲国家采用或局部采用了 20 ~ 25 kV 中压配电;亚洲也有包括日本、韩国在内的 9 个国家或地区采用或局部采用了 20 ~ 25 kV 中压配电。

因此,现阶段对中压配电网电压等级选取的研究主要是集中在 20 kV 电压改造方面^[4-8]。此类研究中,对中压配电网电压等级方案的评级评价只集中在某个特定的场景,以该场景代表整个评价周期内的情况^[9-11],忽略了发展过程中负荷密度等情况的动态变化对中压方案评价产生的影响。在一些关注中压配电网动态特性的研究中,又往往不关注负荷特性变化所带来的影响^[12]。不同地区具有不同发展特性,负荷密度特征与增长速度也各不相同,现有的评价方法显然无法满足未来更复杂地区情况下的电压评价需求。

综上所述,本文在结合云南省各地典型地区发展特性和全生命周期评价思想,从技术层面、经济层面和社会层面三个方面选择评价指标,并使用主观赋权法得出综合评价指标,提出能够用于不同地区发展特性的中压配电网电压等级全生命周期评价方法,并通过算例验证了方法的可靠性,同时通过新评价方法,重新审视以往的中压配电网电压等级选择方案的合理性。

1 中压配电网电压等级方案全生命周期评价方法

1.1 全生命周期评价方法

在传统的在中压配电网电压等级方案评价中,通过预设地区未来某一年的负荷密度,并围绕该负荷密度进行方案评估,而在实际的方案制定中,使用的是饱和年份的负荷密度。所以传统评价方法一般按照负荷密度的大小设置几种典型地区类型,然后将各个待评价地区按照其饱和年份的负荷密度划分到各个典型地区中,对属于同一典型地区类型的不同地区,在做中压等级方案评价时就认为它们是完全相同的情况。所以评价各个地区配电网不同中压等级方案时,实际就是评价该方案在该地区所属的典型地区类型下的表现。显然选择饱和年份的负荷密度作为考虑负荷密度的这种评价方式忽略了在达到饱和年份之前的过渡时间中,配电网电压等级

方案所造成的影响。对于一些过渡时期比较长的地区来说,过早考虑饱和年份的负荷密度和发展需求会造成中压电压等级选择不合理,从而导致不必要的浪费。

全生命周期评价方法指的是针对某件产品,从原材料采集到最终废弃处理环节的整个过程进行整体化评价^[13]。在中压配电网电压等级方案评价中,全生命周期评价指的是在整个运营期内,基于各个年份的负荷情况和社会需求,逐年评价方案指标,最终通过整合全运营期内的评价指标综合评价各方案优劣。

如图 1 所示,将评价尺度拉长到整个中压配电网的设计运营周期内,不仅可以有效考虑在发展速度较慢的地区,同时对于发展速度较快或者是已经达到饱和和负荷状态的地区,全生命周期评价也不会因为单纯加大过渡时期而影响最终评价的准确度。

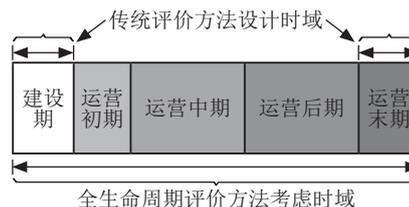


图1 全生命周期评价的时域

1.2 适应全生命周期评价的指标选择

一般而言,中压配电网电压等级选取的影响因素包含供电面积、供电人口、最大负荷等方面,影响因素繁多导致了庞大的评价体系。同时以往经验也表明,部分指标间的耦合性较强,使得整个评价体系的冗余度大大提高。大量的指标不仅增加了数据获取的难度,还增加了计算的复杂度,并且在评价权重分配不当的情况下会影响评价的准确性。因此有必要从中挑选出最能反映电网真实运行状态和造成各种影响的关键性特征指标作为代表,从而能更加高效精确地对电压配置方案做出正确评价。

考虑到短路容量和电压降在电压等级方案拟定的初期就已经作为约束性条件进行了初筛,所以无需再作为评价阶段的关键指标。此外,虽然设备 N-1 通过率、中压线路联络率与配电网的供电可靠性密切相关,但为尽量减少指标评价内容的相互交叉和重叠,评价性指标仅选择综合线损率和供电可靠率作为关键性指标。如图 2 所示,

简化后的中压配电网电压等级评价指标可由评价性技术指标、经济指标和社会指标三个大类组成,分别代表电网运行的安全可靠需求,经济实惠需求和社会责任承担需求。同时为了简化计算和增加结果的直观性,需要合并同类型量纲的评价指标。故综合技术、经济和社会三个方面得到中压配电网电压等级方案评价的四个关键性指标为:综合线损率、供电可靠率、综合费用和总占地面积。其中综合费用是年建设费用、年运行费用、年线损费用、改造费用之和;总占地面积为线路走廊面积、配变占地面积、变电站占地面积之和。

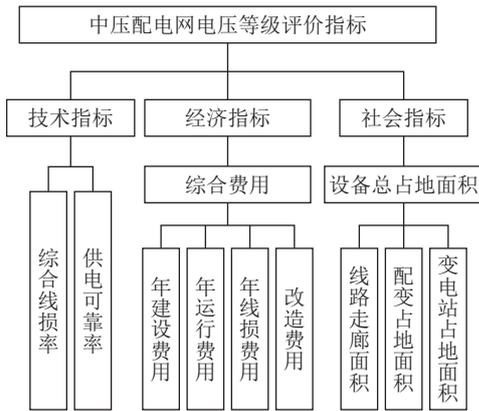


图2 中压配电网电压等级评价体系

2 适应不同负荷密度发展速度和地区规划特性的中压配电网电压等级方案评价模型

2.1 技术性评价模型建立

线损率是反映电网运营管理水平的一项综合性技术经济指标,分为统计线损率和理论线损率。理论线损率,又称技术线损率,在数学上表示为线损功率与供电区最大负荷的比值。在实际计算中,线损率主要考虑线路损耗和变压器损耗两项。线损率指标 ζ 计算表达式如下:

$$\zeta = \frac{\Delta P_{Li} + \Delta P_{Ti}}{P} = \frac{3I_i^2 R_{eqi} + \Delta P_{0i} + \left(\frac{S_i}{S_{ei}}\right) \Delta P_{di}}{P} = \frac{\left(\frac{S_i}{U_i}\right)^2 R_{eqi} + \Delta P_{0i} + \left(\frac{S_i}{S_{ei}}\right)^2 \Delta P_{di}}{P} \quad (1)$$

式中: P 为供电区年最大负荷; ΔP_{Li} 为第 i 条线路的功率损耗; ΔP_{Ti} 为第 i 条线路的变压器损耗;

I_i 为第 i 条线路的电流; R_{eqi} 为第 i 条线路的等效电阻; S_i 为第 i 条线路的视在功率; U_i 为第 i 条线路的端电压; ΔP_{0i} 为第 i 条线路的变压器空载损耗; ΔP_{di} 为第 i 条线路的变压器在额定电流时的负载损耗; S_{ei} 为第 i 台变压器的额定容量。

供电可靠率指标是电力系统供电可靠性的量度体现。供电可靠性描述了电网对用户连续供电的能力,与电网的装备水平、运行水平以及网络规划密切相关,一般由对实际电网的统计和期望水平得出。

在规划设施的阶段,供电可靠率一般是通过将电网自上而下分为多个层次来进行评价。假设 rs_i 为局部电网(子系统)的供电可靠率,根据可靠性理论,整个系统的供电可靠率 RS 具体可以表示为:

$$RS = \prod_{i=1}^3 rs_i = rs_s \times rs_{mv} \times rs_{mnb} \quad (2)$$

其中, rs_s 、 rs_{mv} 、 rs_{mnb} 的表达式为:

$$rs_s = \left(1 - \frac{Q_s}{P_1 \times H_{max}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

$$rs_{mv} = \left(1 - \frac{Q_{mv}}{P_{1-mv} \times H_{max}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

$$rs_{mnb} = \left(1 - \frac{Q_{mnb}}{P_{1-mnb} \times H_{max}}\right) \times 100\% \quad (5)$$

式中: rs_s 、 rs_{mv} 、 rs_{mnb} 分别表示变电站、中压主干线和中压分支线的供电可靠率; P_1 为变电站的最大负荷; P_{1-mv} 为单条中压线路的最大负荷; P_{1-mnb} 为单台配电变压器的最大负荷; Q_s 为变电站的年电量损失期望值; Q_{mv} 为中压主干线故障的年电量损失期望值; Q_{mnb} 为中压分支线故障的年电量损失期望值; H_{max} 为年最大负荷利用的小时数。

在技术评价模型中,由于完全不涉及长时影响因素,故在评价时只需结合当年预测负荷密度得出评价指标即可。

2.2 经济性评价模型建立

中压配电网电压等级的经济评价指标综合费用 C_{Total} 包括初期投资费用 C_{Init} 、后期改造投资费用 C_{Seris} 、运维费用 $C_{Ope\&Mai}$ 、电能损耗费用 C_{Loss} 、停电损失费用 C_{Out} 。全部求和得到综合费用指标 C_{Total} , 其计算表达式如下:

$$C_{Total} = \frac{C_{Init}}{t} + \frac{C_{Seris}}{t} + C_{Ope\&Mai} + C_{Loss} + C_{Out} \quad (6)$$

式中： t 为运营期时长。

其中，初期投资费用为：

$$C_{\text{Init}} = S \times \mu_{\text{HS}} + L_{\text{HV}} \times \mu_{\text{HL}} + T_{\text{pub}} \times \mu_{\text{MS}} + L_{\text{MV}} \times \mu_{\text{ML}} + L_{\text{BMV}} \times \mu_{\text{MLB}} \quad (7)$$

式中： S 、 L_{HV} 、 T_{pub} 、 L_{MV} 、 L_{BMV} 分别为供电区总变电容量、变电站高压进线总长度、中压变压器总台数、中压馈线总长度以及中压馈线的分支线总长度； μ_{HS} 、 μ_{HL} 、 μ_{MS} 、 μ_{ML} 、 μ_{MLB} 分别为单位变电容量价格、每公里高压线路价格、单台配变价格、每公里中压馈线价格以及中压馈线的分支线价格。

后期改造投资费用为：

$$C_{\text{Seris}} = \sum_{i=1}^n C_i \delta^{i-1} \quad (8)$$

式中： C_i 为改造投资费用； n 为后期改造次数； δ 为折现率。

运维费用为：

$$C_{\text{Op&Mai}} = \sum_{i=1}^n (C_{\text{Init}} + C_{\text{Seris}}) \gamma \delta^{i-1} \quad (9)$$

式中： γ 为运维系数。

电能损耗费用为：

$$C_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i T_i f_i \delta^{i-1} \quad (10)$$

式中： f 为电价； ΔP 为年最大负荷的功率损耗； T 为年利用小时数。

停电损失费用为：

$$C_{\text{Out}} = \sum_{i=1}^n P_i T_{\text{MAX}i} (1-RS) V_{\text{out}} \delta^{i-1} \quad (11)$$

式中： T_{MAX} 为年最大利用小时数； V_{out} 为单位电量产值。

2.3 设备总占地面积估算模型

一般而言，设备总占地面积指标有变电站占地面积、配变占地面积和线路走廊面积三部分组成。但考虑到 10 kV 和 20 kV 的线路和配电变压器通常不需额外征地，并且 35 kV 及以上高压线路走廊的宽度由于气象条件、杆塔档距、杆塔型式以及导线的最大风偏、安全距离、排列方式等因素影响不同地区可能存在较大偏差，为计算方便，设备总占地面积可简化为仅计算变电站的占地面积。

在全生命周期评价下，变电站占地面积并不是一个理想的有效评价指标。对于一些低负荷密度地区来说，在全生命周期评价尺度下这些评价指标可能会缺乏变化或者产生大幅度变化，从而影响全生命周期综合评价的准确性。为了能够适应更多情况，只用负荷总量与变电站占地面积的比值作为设备总占地面积指标，这样既考虑了占地面积的影响，也避免了在部分地区出现指标失

效的情况。设备总占地面积指标 J_{Total} 计算表达式如下：

$$J_{\text{Total}} = \frac{PT_{\text{MAX}}}{N_{\text{HV}} J_{\text{HS}}} \quad (12)$$

式中： J_{Total} 为设备总占地面积指标； N_{HV} 为全区变电站总座数； J_{HS} 为单座变电站的占地面积。

2.4 采用主观赋权法的全生命周期综合评价指标选取方法

考虑到综合线损率、设备总占地面积以及综合费用三个分项指标的数值大小与所体现的性能呈现反向变化的这一特点，为便于将所有指标放置于同一个标准基础之上进行比较与求和^[14]，建立统一的评价指标，采用经典且最常用的 0-1 标准化集合映射函数对综合评价指标进行标准化处理，具体过程如下。

针对正向指标 (RS 、 J_{Total}) 的 0-1 标准化：

$$f_{\text{F}}(x) = \begin{cases} 0 & (x_i \leq x_{\min}) \\ \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & (x_{\min} < x_i < x_{\max}) \\ 1 & (x_i \geq x_{\max}) \end{cases} \quad (13)$$

针对逆向指标 (ζ 、 C_{Total}) 的 0-1 标准化：

$$f_{\text{R}}(x) = \begin{cases} 1 & (x_i \leq x_{\min}) \\ \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} & (x_{\min} < x_i < x_{\max}) \\ 0 & (x_i \geq x_{\max}) \end{cases} \quad (14)$$

式中： $f_{\text{F}}(x)$ 、 $f_{\text{R}}(x)$ 、 x_i 、 x_{\min} 、 x_{\max} 分别表示正向归一化指标、逆向归一化指标、指标计算值及指标允许的最小值和最大值。

标准化之后，通过主观赋权法平均各参数权重，考虑到各个评价指标之间已经基本去除耦合部分，需要综合评价的情况下，可以选择等权重来减小计算量，同时保证各个影响因素均能发挥作用。由于已经对不同单位评价指标进行了同向归一化处理，所以直接对各年的评价指标进行求和即可得到运营周期内各年的综合评价指标 Q_t ，其表达式如下：

$$Q_t = \frac{1}{4} [f_{\text{R}}(RS_t) + f_{\text{R}}(\zeta_t) + f_{\text{R}}(C_{\text{Total},t}) + f_{\text{F}}(J_{\text{Total},t})] \quad (15)$$

式中： RS_t 、 ζ_t 、 $C_{\text{Total},t}$ 、 $J_{\text{Total},t}$ 分别为第 t 年的可靠率、线损率、综合费用和总占地面积。

同时将运营期内综合评价指标的平均值作为全生命周期综合评价指标 Q ，其表达式如下：

$$Q = \frac{\sum_t Q_t}{t} \quad (16)$$

通过比较各备选方案运营期内各年的综合评价指标 Q_t 和全生命周期综合评价指标 Q ，即可确定对应场景下的电压配置方案的综合性能，从而选出全生命周期评价下最优方案。

3 算例分析

3.1 算例介绍

以具有不同负荷密度发展特性的 A、B 两地区作为算例，其负荷密度发展特性具体如表 1 所示。负荷功率因数选取 0.95(补偿之后)、负荷同时率选取 0.9。220、110、35 kV 高压变电站采用双绕组变压器。220 kV 变压器容载比选取 1.6 ~ 1.9，110 kV 变压器容载比选取 1.8 ~ 2.1。220 kV 电网短路电流控制值为 50 kA，110 kV 电网短路电流控制值为 40 kA，35、20、10 kV 电网短路电流控制值为 20 kA。运营期为 20 年，折现率取 8%，运行维护费率取 1.5%。成本电价参考某城市的购电成本，取 0.55 元。具体的各年负荷密度情况如图 3 所示。

表1 负荷密度发展特性

地区	运营初期负荷密度/(MW·km ²)	运营末期负荷密度/(MW·km ²)	饱和年份负荷密度/(MW·km ²)	到达饱和年所需时间/年
A	13.5	15.6	15.5	5
B	7.2	14.3	14.8	22

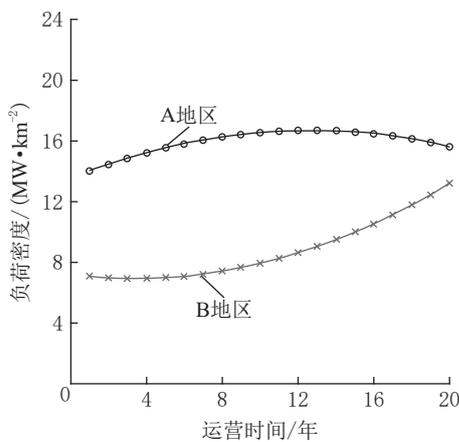


图3 A、B地区运营期各年负荷密度情况

3.2 评价结果及分析

采用三种中压配电网电压等级备选方案，分别为 35、20、10 kV。计算运营周期内各年的各项评价指标，得到结果如图 4 所示。

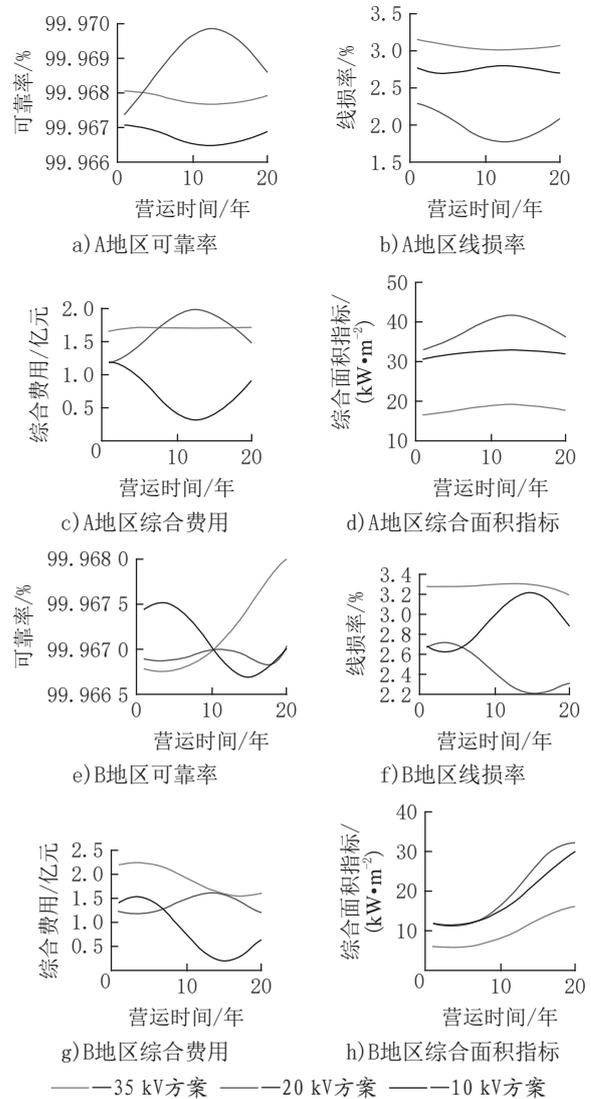


图4 各地区运营期内综合评价指标

从图 4 中可以看出，在运营期内，各个评价指标一直在变化，这是因为运营期内的负荷密度的变化会导致评价指标随之变化。其中 A 地区负荷密度较为稳定，各项指标的变化量也相对较小，B 地区的负荷密度则处于一个非匀速增长的状态，其各项指标的变化也就相对较大。这就说明，对于 B 地区这样负荷密度变化较大的地区来说，由于负荷饱和年份的负荷密度与整个运营期内的负荷密度情况差距较大，所以使用负荷饱和年份的评价指标来评价中压电压等级方案在整个运营周期内运营情况的方法是不准确的。

就方案评价而言，可以发现 10 kV 与 20 kV 方案在各项指标上均明显优于 35 kV 方案。但是 10 kV 与 20 kV 方案在不同指标上有着不同的表现。对于 A 地区来说，20 kV 方案在线损率、可靠率和

综合面积指标这三项指标上占优，而 10 kV 方案在综合费用这项指标上大幅度占优。而对于 B 地区来说，情况更为复杂，例如在综合费用这一项指标上，部分运营时段内是 10 kV 方案占优，而另一部分时段内则是 20 kV 方案占优。这说明对于在综合评价中，尤其是对负荷密度变化情况较大的地区来说，以单独的指标独立对比还无法选择出最优方案，需要使用全生命周期综合评价指标来进行整体分析，但是要得到整体最优方案，还需要进一步的方案改进。

如表 2 所示，对于 A 地区而言，全生命周期评价方法与饱和年份评价方法得出的指标相差不大，说明在负荷密度变化较小的地区，饱和年份负荷密度确实能够代表整个运营期内的状态。但对于 B 地区而言，全生命周期评价方法与饱和年份评价方法之间的差距就很大，而且全生命周期得出的评价指标整体偏小。这是因为在 B 地区的整个运营周期内，包括负荷密度在内的各种情况发生了非常大的变化，使得各个计划的评价指标也相应发生了很大的变化。在这种情况下，很难有某个中压等级能做到全运营周期内的全方位最优。A、B 两地区的差异也说明，全生命周期评价能否弥补传统方法的缺陷，从而能在更长远的尺度去评价各个电压等级方案的整体表现。

表2 综合评价指标

评价指标	A地区			B地区		
	35 kV	20 kV	10 kV	35 kV	20 kV	10 kV
全生命周期综合评价指标	0.18	0.66	0.44	0.18	0.46	0.45
饱和年份综合评价指标	0.17	0.62	0.46	0.49	0.67	0.58

一般来说，根据全生命周期综合评价指标，已经能够选出最优方案，但是对于 B 地区来说 20 kV 方案与 10 kV 方案较为接近，单从最终全生命周期综合评价指标上难以选择出最优方案。故对 B 地区的逐年综合指标进行比较，由于只涉及两个方案的比较，故将两个方案的指标进行归一化处理，结果如图 5 所示。由于进行了归一化处理，所以当方案综合评价指标大于 0.5 时，就代表此方案为当年的最优方案。可以看到，在运营前期，10 kV 方案的综合评价指标更高，而在运营后期，20 kV 方案的综合评价指标更高。而在实际生产建设中，中压配电网建设是连续进行而非一次性规划之后就完

全按照计划进行的。

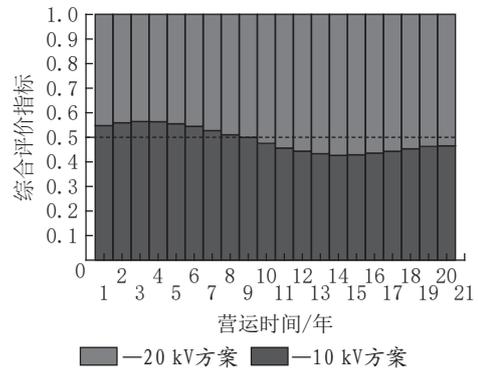


图5 A、B地区运营期各年综合评价指标

通过对逐年综合评价指标与分别评价指标的分析，可以得出结论，35 kV 方案在两个地区的整体效能较差，应减少使用。而对于 B 地区来说，总体来说 20 kV 方案较为优秀，也适应为未来的负荷发展趋势。但在运营初期也可适当使用 10 kV 方案作为过渡，避免不必要的浪费，从而达到整体最优。这也说明，全生命周期评价方法能够对于实际生产给出更详细的建议，能够更好地把握运营期的各种变化，这也是传统方法所无法达到的。

4 结语

适应不同地区发展特性的中压配电网电压等级全生命周期评价方法，是在延续传统中压配电网评价方案中，在饱和负荷场景下评价经济指标、技术指标、社会指标的前提下，补充了传统饱和负荷计算中缺少的动态部分，为电力系统中压配电网规划改造提供了参考。算例分析得出以下结论：

- (1) 对于负荷密度变化不大的地区，使用传统方案评价与全生命周期评价方法得出的结论非常接近，对于负荷密度变化较大和有特殊约束的地区，全生命周期评价方法能更好地体现各个电压方案的影响，说明本文提出的中压配电网电压等级评价方法具有有效性且能弥补传统方法的不足。
- (2) 10 kV 与 20 kV 整体比 35 kV 作为中压侧电压等级有着更好的性能。对于负荷密度在持续发展地区，通过使用全生命周期评价方法发现，采用 10 kV 电压等级作为过渡规划比直接选择 20 kV 作为中压侧电压等级有着更好的综合能效。
- (3) 全生命周期评价方法充分考虑了配电网在不同时期的负荷需求，能够更为准确和全面地评价不同中压侧电压等级方案，对

于电力系统中压侧改造有着积极意义。

参考文献

- [1] 侯义明, 李海烽, 王克球, 等. 20 kV 电压等级供电技术的应用 [J]. 电气应用, 2010, 29(21): 18-23.
- [2] 刘浩, 多杰才让, 周丽. 区域中压配电网的节能改造 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(6): 145-150.
- [3] 刘晓, 李军锋, 郝腾飞, 等. 20 kV 变电站的多层数据智能三维调度方法 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19): 54-59.
- [4] 蓝道林, 巫水萍. 工业区 20 kV 电压暂降分析及治理措施探究 [J]. 电工技术, 2021(16): 146-147.
- [5] 齐奇. 青岛地区应用 20 kV 配电网的可行性研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- [6] 李俊龙. 珠海市横琴新区 20 kV 智能电网建设简析 [J]. 机电信息, 2019(29): 12-13.
- [7] 孙浩. 大连长兴岛地区 20 kV 配电网规划设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [8] 何健宇. 广州配电网 20 kV 升压改造关键技术研究

- [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [9] 彭志明. 深圳某 220/20 kV 变电站设计方案与评估 [D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
- [10] 贾磊. 临安青山科技城配电网升压 20 kV 改造研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [11] 程杰, 向铁元, 张贺, 等. 20 kV 电压等级经济性比较论证 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 125-130.
- [12] ZHANG Yagu, KONG Bo. Research on methods of non-communication protection for 20 kV closed-loop distribution network [C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 2017: 1-5.
- [13] 据长江, 谭爱国, 胡良辉. 电机智能制造远程运维系统设计与试验平台研究 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(5): 83-87.
- [14] 田雨, 张晗. 基于故障特征隶属函数的电网主设备风险评估方案研究与应用 [J]. 高压电器, 2017, 53(5): 146-153.

修稿日期: 2023-02-27

(上接第52页)

案和基于新增报文的规约扩展方案; 两种方案各有优缺点, 基于原有相量报文的规约扩展方案工程改造便利, 但是数据报文占用带宽开销较高, 报文可扩展性差; 基于新增报文的规约扩展方案数据报文占用带宽小, 报文格式简洁且灵活, 但工程改动工作量较大。为适应未来大规模推广应用, 本文建议采用更易于理解更易于实际使用的扩展方案二。

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): 20-26.
- [2] 张道农. 电力系统同步相量测量技术及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [3] 郭琦, 郭海平, 黄立滨. 电网电压前馈对柔性直流输电在弱电网下的稳定性影响 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 139-144.
- [4] 刘灏, 李珏, 毕天姝, 等. 基于 PMU 相量的次/超同步间谐波识别方法 [J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3237-3243.
- [5] 王茂海, 高洵, 王蓓, 等. 基于广域测量系统的次同步振荡在线监测预警方法 [J]. 电力系统自动化,

- 2011, 35(6): 98-102.
- [6] 谢小荣, 王银, 刘华坤, 等. 电力系统次同步和超同步谐波相量的检测方法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 189-194.
- [7] 王茂海, 齐霞. 电力系统次同步振荡分量的快速在线检测算法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 149-154.
- [8] IEEE Standard Association. IEEE standard for synchrophasors data transfer for power system: IEEE Standard C37.118-2011.2[S]. New York: IEEE Engineering Society, 2011: 10-11.
- [9] 国家电网有限公司. 电力系统实时动态监测系统技术规范: Q/GDW 131-2006[S]. 北京: 国家电网有限公司, 2006: 20-28.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电力系统实时动态监测系统 第 2 部分: 数据传输协议: GB/T 26865.2-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 1-11.
- [11] 国家电网有限公司. 电力系统实时动态监测系统技术规范: Q/GDW 10131-2017[S]. 北京: 国家电网有限公司, 2016: 48-49.

收稿日期: 2022-12-15