

考虑城市场景需求的中压直流配电网规划选优分析方法

曹华珍¹,王天霖¹,陈沛东¹,高崇¹,杨墨缘²,张真²,欧阳森²

(1. 广东电网有限责任公司 电网规划研究中心,广东 广州 510030;2. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要:针对城市配电网规划中多个中压直流配电网的建设优先次序尚无量化分析方法的问题,提出一种考虑城市场景需求的中压直流配电网规划选优分析方法。从供电质量提升需求、城市场景需求和配电网经济性3个层面建立了一套城市中压直流配电网规划选优综合指标体系,在供电质量提升需求方面考虑与目标水平之间的差距,在城市场景需求方面考虑中压交流配电网的建设局限性与中压直流配电网的建设驱动力,在经济性方面关注缺电损失成本严重性。通过云模型对定性指标量化,基于德尔菲-熵权法的层次加性加权计算各配电网综合评价价值,并以此排序,在年度总投资约束下,以方案总体综合评价价值最大为目标实现规划对象选优,从而安排多个中压直流配电网的建设优先级。以某地区配电网为例,验证了所提方法的实用性。

关键词:城市场景需求;中压直流配电网;规划;选优分析方法

中图分类号:TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101013

0 引言

随着高密度、窄通道的城市负荷不断对供电容量提出更高的要求,城市高新产业的迅速发展,以及能源体制改革下城市可再生能源渗透率不断飙升,直流配电网的建设已然成为配电网规划的重要考虑内容^[1-3]。在有限的投资条件下,如何制定合理的直流配电网规划投资计划是供电企业关心的问题。

目前,对此已有大量相关研究,文献[4]以考虑换流器的建设成本和考虑网损变化的综合成本最小为双层目标,实现交直流混合微电网网架的优化规划;文献[5]以分布式储能系统DESS(Distributed Energy Storage System)在规划周期内容量配置的经济性和运行周期内布点优化的高效性为目标,构建DESS有序接入的双层优化模型;文献[6]以电-气网联合规划总成本最小为目标,构建配电网-气网联合规划模型;文献[7]以最大限度提高可靠性为目标,基于分解优化技术实现投资成本和缺供电量最小化;文献[8-9]以全寿命周期成本最小为目标,确定配电网规划方案;文献[10-11]考虑用户需求,在总投资约束下确定多个配电网的规划优先级。可见现有配电网规划优化研究多以可靠性、经济性最优为目标实现规划实施方案的选优,或以总投资为约束,以某些特殊需求最优为目标,实现配电网规划对象选优。然而,现有文献尚未对直流配电网规划选优进行研究,更没有考虑城市应用场景需求对直流配电网规划选优的影响。本文对直流配电网城市应用场景需求进行如下梳理:①城市地下管网复杂、新增架空线路走

廊困难的情况下对提高配电网供电容量的需求;②城市中渗透率不断提高的可再生能源对安全、灵活、高效地接入配电网的需求;③城市敏感负荷占比不断增大对配电网更高供电质量的需求;④城市配电网扩容扩建对短路电流不超标的需求;⑤城市配电网对合环运行功率融通的需求。

为此,本文提出一种考虑城市场景需求的中压直流配电网规划选优分析方法。首先,从供电质量提升需求、城市场景需求、经济性3个方面建立一套城市中压直流配电网规划选优指标体系,在供电质量提升需求方面体现与目标值之间的差距,反映配电网规划在供电可靠性和电压质量上亟待提高的程度;在城市场景需求方面从源-网-荷3个角度体现城市配电网对中压直流的需求,这是对城市中压直流建设效益的反映;在配电网经济性方面关注停电带来的经济损失影响。然后,通过云模型对定性指标量化,基于德尔菲-熵权法计算各配电网规划综合评价价值,通过配电网规划选优,实现合理的中压直流规划投资。最后,以某地区配电网为例,验证本文所提规划选优分析方法的有效性。

1 考虑城市场景需求的配电网规划综合评价指标

为确定城市配电网进行中压直流化建设的规划优先级,综合考虑城市配电网的供电质量提升需求、城市场景需求和配电网经济性,建立了一套考虑城市场景需求的配电网规划综合评价指标体系,如表1所示。该指标体系旨在指导城市场景下中压直流配电网的规划对象选优,使规划投资最大限度地发挥中压直流配电网的优势。

1.1 供电质量提升需求评价指标

提高供电可靠性是配电网规划的主要任务,在

收稿日期:2020-02-15;修回日期:2020-11-20

基金项目:中国南方电网公司科技项目(GDKJXM20173253)

Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid(GDKJXM20173253)

表1 考虑城市场景需求的配电网规划综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of distribution network planning considering urban scenario demand

一级指标	二级指标	指标意义
供电质量提升需求	平均供电可靠率差	反映现状下中压配电网供电可靠率与其目标值之间的差距,记作 $\Delta R_{ASAI}(\%)$
	平均停电频率差	反映现状下中压配电网停电频率与其目标值之间的差距,记作 $\Delta R_{SAIFI}(\text{次}/\text{户})$
	电压合格率差	反映现状下中压配电网综合电压合格率与其目标值之间的差距,记作 $\Delta R_{VQR}(\%)$
城市场景需求	城市地下管网复杂度	反映中压配电网地下电缆线路的建设约束性,记作 μ_c
	架空线路走廊建设难易度	反映中压配电网架空线路的建设约束性,记作 μ_o
	可再生能源电源综合占比	反映对中压配电网具有支撑区域分散、功率波动性强的可再生能源电源并网的能力的需求,记作 $D_{RES}(\%)$
	敏感负荷综合占比	反映中压配电网在经历电压瞬时跌落或短时中断时的受影响程度,记作 $D_{SL}(\%)$
	短路电流裕度	反映中压配电网的电源增容扩建局限性,记作 $\varepsilon_r(\%)$
配电网经济性	线路负载不均衡度	反映中压配电网配电线路负载率分布的异质性,记作 σ_{LLR}
	单位缺电损失成本	统计期内,评估对象国内生产总值与其总用电量之比,记作 $C_{VOC}(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$
	投资成本	使规划对象可靠性达到规划目标所需投资费用,记作 $g(\text{万元})$

实际应用中,平均供电可靠率、平均停电时间和平均停电频率是其主要指标,反映了电能供应的持续性;同时,电压质量也是配电网规划不容忽视的问题,其优劣直接反映了电能供应的可用程度。因此,本文用涵盖上述两方面内容的供电质量^[12]表征配电网电能供应的持续可用度。

本文中供电质量主要由平均供电可靠率、平均停电频率和电压合格率达到来表征^[10,13-14]。在实际规划中需要考虑供电质量现状与目标水平之间的匹配程度,以指导规划对象的选择,故引入平均供电可靠率差 ΔR_{ASAI} 、平均停电频率差 ΔR_{SAIFI} 和电压合格率差 ΔR_{VQR} 这3个指标反映中压配电网的供电质量提升需求。

平均供电可靠率差 ΔR_{ASAI} 的计算公式为:

$$\Delta R_{ASAI} = R_{ASAI-I} - R_{ASAI-T} = \left(1 - \frac{\sum t_m}{MT}\right) \times 100\% - R_{ASAI-T} \quad (1)$$

其中, R_{ASAI-I} 为现状下中压配电网平均供电可靠率; R_{ASAI-T} 为中压配电网平均供电可靠率目标值; t_m 为中压配电网中第 m 个计费用户在统计时间内的总停电时间; M 为总用户数; T 为统计时间。

平均停电频率差 ΔR_{SAIFI} 的计算公式为:

$$\Delta R_{SAIFI} = R_{SAIFI-I} - R_{SAIFI-T} = R_{SAIFI-T} - \frac{\sum n_m}{M} \quad (2)$$

其中, $R_{SAIFI-I}$ 为现状下中压配电网平均停电频率; $R_{SAIFI-T}$ 为中压配电网平均停电频率目标值; n_m 为中压配电网中第 m 个计费用户在统计时间内的总停电频率。

电压合格率差 ΔR_{VQR} 的计算公式为:

$$\Delta R_{VQR} = R_{VQR-I} - R_{VQR-T} = \left(1 - \frac{\sum t_{vm}}{MT}\right) \times 100\% - R_{VQR-T} \quad (3)$$

其中, R_{VQR-I} 为现状下中压配电网电压合格率; R_{VQR-T}

为中压配电网电压合格率目标值; t_{vm} 为中压配电网中第 m 个计费用户在统计时间内的电压超限小时数。

上述3个指标中的规划目标值因供电区的不同而异,通常供电企业根据划分的5类供电区分别制定相应的规划目标^[15],具体应用中可根据实际情况进行选择。

1.2 考虑城市场景需求的评价指标

除了供电质量提升需求,在城市中压直流配电网的规划中还需要考虑与场景需求之间的匹配程度。对此,从规划区域配电线路可建设条件、源-荷特性、网侧安全性3个角度出发,设置了6个场景需求指标用于反映不同规划区域、不同主体场景类型的中压直流配电网的建设需求,包括城市地下管网复杂度、架空线路走廊建设难易度、可再生能源电源综合占比、敏感负荷综合占比、短路电流裕度、线路负载不均衡度。

城市地下管网复杂度和架空线路走廊建设难易度指标能够分别从不同规划区域对电缆传输和架空线传输的建设制约性2个层面反映不同规划对象在交流增容受限程度及高传输容量需求程度上的差异;可再生能源电源综合占比和敏感负荷综合占比指标分别从可再生能源电源灵活高效接入需求程度和供电质量波动影响范围2个层面反映源-荷特性需求;短路电流裕度和线路负载不均衡度指标则是分别从变电站增容扩建约束性和线路发展不协调性2个层面反映网侧安全性需求。上述指标从源-网-荷3个维度建立评价体系,较为全面地反映了城市场景对中压直流规划的需求。

1.2.1 基于配电线路可建设条件的场景需求

GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》指出电缆路径的选择应便于敷设、维护,并在满足安全要求的条件下,保证路径最短^[16]。采用双极接线形式的直流电缆配电与交流电缆配电相比,在相当的

线路条件下,前者具有后者1.6倍左右的供电容量,在城市中心等地下管网错综复杂的区域,可有效减少电缆线路敷设路径及后期运行维护量,降低电缆线路敷设、维护对复杂地下管网造成的影响,具有一定的建设维护优势和经济优势。另一方面,采用架空线时,直流配电线路的高传输容量同样可有效减少架空线路占地走廊,在地价昂贵、新增走廊困难的城市中心区域,直流架空线路将发挥明显的经济、建设优势。

本文采用的城市地下管网复杂度 μ_c 与架空线路走廊建设难易度 μ_o 为定性指标,下文将基于云模型对其进行量化。

1.2.2 基于源-荷特性的场景需求

可再生能源渗透率和敏感负荷的发展情况对中压配电网规划建设的要求有着显著影响。相较于中压交流,由于中压直流不存在频率、相角所带来的同步问题及电能质量问题,而且合理配置的电压源型换流器可起到有效治理电能质量的作用,这都使可再生能源发展对灵活高效接入的需求及敏感负荷发展对高电能质量的需求得到满足^[1-3]。因此,本文提出的指标体系设置了可再生能源电源综合占比和敏感负荷综合占比2个指标,从而体现源-荷特性对中压直流规划的场景需求。

本文用可再生能源电源综合占比指标反映中压直流规划的源特性需求,定义为:

$$D_{\text{RES}} = \left(\alpha_{\text{RES}} \frac{\sum P_{\text{RES},0}^{\text{Ni}}}{P_{\text{L},0}^{\text{max}}} + \beta_{\text{RES}} \frac{\sum P_{\text{RES},1}^{\text{Ni}}}{P_{\text{L},1}^{\text{max}}} + \gamma_{\text{RES}} \frac{\sum P_{\text{RES},2}^{\text{Ni}}}{P_{\text{L},2}^{\text{max}}} \right) \times 100\% \quad (4)$$

其中, α_{RES} 、 β_{RES} 、 γ_{RES} 分别为现状、近期、中期可再生能源电源占比在综合占比中的权重,可根据具体情况由专家给出,且 $\alpha_{\text{RES}} + \beta_{\text{RES}} + \gamma_{\text{RES}} = 1$; $P_{\text{RES},0}^{\text{Ni}}$ 、 $P_{\text{RES},1}^{\text{Ni}}$ 、 $P_{\text{RES},2}^{\text{Ni}}$ 分别为统计期内现状、近期、中期第*i*类接入中压配电网的可再生能源电源的额定有功功率; $P_{\text{L},0}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{L},1}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{L},2}^{\text{max}}$ 分别为统计期内现状、近期、中期负荷峰值。

敏感负荷是指电压瞬时跌落或短时中断时不能正常工作或造成严重损失的用户负荷^[17]。该类负荷对电压质量和供电可靠性均有很高要求。敏感负荷综合占比指标反映了负荷对中压直流的高供电质量需求程度,定义为:

$$D_{\text{SL}} = \left(\alpha_{\text{SL}} \frac{\sum P_{\text{SL},0}^{\text{Nj}}}{P_{\text{L},0}^{\text{max}}} + \beta_{\text{SL}} \frac{\sum P_{\text{SL},1}^{\text{Nj}}}{P_{\text{L},1}^{\text{max}}} + \gamma_{\text{SL}} \frac{\sum P_{\text{SL},2}^{\text{Nj}}}{P_{\text{L},2}^{\text{max}}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

其中, α_{SL} 、 β_{SL} 、 γ_{SL} 分别为现状、近期、中期敏感负荷占比在综合占比中的权重,可根据具体情况由专家给出,且 $\alpha_{\text{SL}} + \beta_{\text{SL}} + \gamma_{\text{SL}} = 1$; $P_{\text{SL},0}^{\text{Nj}}$ 、 $P_{\text{SL},1}^{\text{Nj}}$ 、 $P_{\text{SL},2}^{\text{Nj}}$ 分别为统计期内现状、近期、中期第*j*类敏感负荷的额定功率。

1.2.3 基于网侧安全性的场景需求

根据短路电流水平和线路负载发展异质性对中压交流配电网规划建设的安全性制约,本文提出短路电流裕度和线路负载不均衡度2个指标反映城市场景对中压直流规划的网侧安全性需求。

中压交流配电网中,通过变电站增容扩建的方式来提高供电能力以满足区域负荷增长需求,但这可能导致区域中压配电网的短路电流超标,断路器选择困难,以至于对安全性造成影响。如果部分采用中压直流方式进行配电网扩容,由于逆变器的电流控制作用,不会显著提高短路电流,利于交流系统短路电流的控制^[1]。对此,通过短路电流裕度反映城市场景的网侧安全性需求,定义为:

$$\varepsilon_{\text{F}} = \left(1 - \frac{I_{\text{F}}^{\text{max}}}{I_{\text{F}}^{\text{CL}}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

其中, $I_{\text{F}}^{\text{max}}$ 为现状下中压配电网短路电流峰值; I_{F}^{CL} 为中压配电网短路电流控制水平,一般取20 kA。

线路负载发展的异质性将显著影响负荷转供能力,降低供电可靠性,危及配电网安全。然而通过中压直流对中压交流线路互联,由于换流器的潮流控制能力,可有效均衡线路负载率,维持配电网线路的良好发展。对此,通过线路负载不均衡度指标反映中压直流规划的网侧安全性场景需求,定义为:

$$\sigma_{\text{LLR}} = 1 + \frac{1}{\ln L} \sum \frac{\eta_{\text{LLR},l}}{\sum \eta_{\text{LLR},l}} \ln \frac{\eta_{\text{LLR},l}}{\sum \eta_{\text{LLR},l}} \quad (7)$$

其中, L 为中压线路回数; $\eta_{\text{LLR},l}$ 为第*l*回中压线路的负载率; $\frac{1}{\ln L} \sum \frac{\eta_{\text{LLR},l}}{\sum \eta_{\text{LLR},l}} \ln \frac{\eta_{\text{LLR},l}}{\sum \eta_{\text{LLR},l}}$ 为线路负载率的负熵。该指标用熵的概念反映线路负载的不均衡程度,指标值越大,线路负载越不均衡。

1.3 电网经济性指标

投资成本*g*的计算公式为:

$$g = g_{\text{a}} + g_{\text{b}} \quad (8)$$

其中, g_{a} 为设备购置、安装调试费等; g_{b} 为新建工程设计费、地块改造购买费等。

为更好地反映负荷对当地经济发展的作用及其停电对社会经济的影响,体现配电网规划投资的社会效益,提出单位缺电损失成本指标 C_{VOC} 为:

$$C_{\text{VOC}} = \frac{M_{\text{GDP}}}{W} \quad (9)$$

其中, M_{GDP} 为该配电网的国内生产总值,单位为亿元; W 为该配电网总用电量,单位为亿kW·h。

2 城市中压直流配电网规划选优综合评估方法

根据第1节的指标体系,本文设计了一种评估方法,对城市中压直流配电网规划对象进行选优。基本步骤如下:基于云模型的定性指标量化;指标预处理;利用德尔菲-熵权法确定指标权重;利用层次加权法获得评估对象综合评价;以年度总投资为约束条件,以方案总评价值最大为优化目标,按排序依次选择待投资配电网,确定最终方案。

2.1 基于云模型的定性指标量化

云模型是一种基于模糊集理论和概率论提出的实现定性定量不确定性之间映射与转换的模型^[18-20]。云模型用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 这3个数字特征来整体表征,将模糊性与随机性结合起来,以解决传统模糊隶属度量化方法忽略评估过程中存在的不确定性的问题,云的数字特征示意图如图1所示。

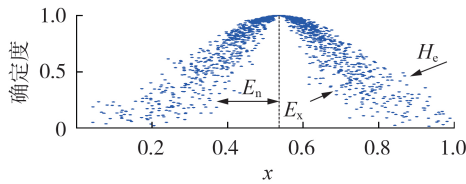


图1 云的数字特征示意图

Fig.1 Schematic diagram of cloud digital features

本文将城市地下管网复杂度和架空线路走廊建设难易度2个定性指标属性划分为5个评价等级,即:

$$V^C = \{V_1^C, V_2^C, V_3^C, V_4^C, V_5^C\} = \{\text{极其复杂, 非常复杂, 很复杂, 较复杂, 不复杂}\}$$

$$V^O = \{V_1^O, V_2^O, V_3^O, V_4^O, V_5^O\} = \{\text{极其困难, 非常困难, 很困难, 较困难, 不困难}\}$$

根据黄金分割云生成法^[21]确定各评价等级的云模型数字特征及在横轴上的范围,根据中间云模型的参数 $E_{x3} = 0.5$ 、 $H_{e3} = 0.005$,可得各评价状态的云模型参数,见附录中表A1和表A2,详细公式见附录。

若有 U 个专家对本文定性指标进行语言性评价,则 U 个语言评价可用一个综合云模型表示,即:

$$E_x = \frac{\sum_{u=1}^U E_{xu} E_{nu}}{\sum_{u=1}^U E_{nu}} \quad (10)$$

$$E_n = \sum_{u=1}^U E_{nu} \quad (11)$$

其中, E_{xu} 和 E_{nu} 分别为第 u 个专家的语言性评价对应云模型的目标值和熵。

由此得到的定性指标目标值 E_x 即可作为该指标

的量化值。

2.2 指标预处理及确定权重

2.2.1 指标预处理

利用离差标准化法对定量指标和量化后的定性指标共同组成的方案属性决策表进行预处理。假设有 p 个评价对象 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_p\}$,其具有共同的 q 个具体二级指标 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_q\}$,则对象 S_i 的指标 C_j 对应指标值为 c_{ij} 。对于极大型指标,计算公式为:

$$c_{ij}^* = \frac{c_{ij} - m_i}{M_i - m_i} \quad (12)$$

对于极小型指标,计算公式为:

$$c_{ij}^* = \frac{M_i - c_{ij}}{M_i - m_i} \quad (13)$$

其中, $M_i = \max\{c_{ij}\}$; $m_i = \min\{c_{ij}\}$ 。计算所得 $\{c_{ij}^*\}$ 为类型一致、无量纲的数据。

2.2.2 一级指标赋权

鉴于城市中压直流配电网在不同地区、不同发展时期的建设需求存在差异,本文对于一级指标采用充分考虑专家意见的德尔菲法^[22],计算公式如下:

$$w_{j_1} = \frac{\sum_{u=1}^U w_{uj_1}}{U} \quad j_1 = 1, 2, \dots, n_1 \quad (14)$$

其中, w_{j_1} 为第 j_1 个一级指标的权重平均值; w_{uj_1} 为第 u 个专家对第 j_1 个一级指标权重的打分值; n_1 为一级指标数。考虑到标么化处理结果更符合思维习惯,采用式(15)进行权重标么化处理。

$$w'_{j_1} = \frac{w_{j_1}}{\sum_{j_1=1}^{n_1} w_{j_1}} \quad (15)$$

德尔菲法代表专家集体意见,获得的权重通常情况下能正确反映各指标的重要程度,可保证评价结果的正确性。

2.2.3 二级指标赋权

熵权法是一种基于差异驱动的客观赋权法,该方法根据指标所含信息量大小确定指标权重,可有效规避主观因素影响。设第 j_1 个一级指标由 n_2 个二级指标 $\{C_1^{j_1}, C_2^{j_1}, \dots, C_{n_2}^{j_1}\}$ 对其进行描述,则二级指标赋权步骤如下。

(1)计算评价对象 S_i 的第 j_1 个一级指标下第 j_2 个二级指标 $C_{j_2}^{j_1}$ 对应指标值 $c_{ij_2}^{j_1*}$ 的指标值比重 $y_{ij_2}^{j_1}$ 为:

$$y_{ij_2}^{j_1} = \frac{c_{ij_2}^{j_1*}}{\sum_{i=1}^p c_{ij_2}^{j_1*}} \quad (16)$$

(2)计算该指标 $C_{j_2}^{j_1}$ 的信息熵 $H_{j_2}^{j_1}$ 及其冗余度 $d_{j_2}^{j_1}$ 分别为:

$$H_{j_2}^{j_1} = -\frac{1}{\ln p} \sum_{i=1}^p y_{j_2}^{j_1} \ln y_{j_2}^{j_1} \quad (17)$$

$$d_{j_2}^{j_1} = 1 - H_{j_2}^{j_1} \quad (18)$$

(3) 基于熵的指标 $C_{j_2}^{j_1}$ 权重 $v_{j_2}^{j_1}$ 为:

$$v_{j_2}^{j_1} = \frac{d_{j_2}^{j_1}}{\sum_{j_2=1}^{n_2} d_{j_2}^{j_1}} \quad (19)$$

2.3 综合评价

据上述步骤获得标准化属性决策表和各级指标权重,通过层次加性加权计算各评估对象综合评价价值 Y_i 为:

$$Y_i = \sum_{j_1=1}^{n_1} w_{j_1}' Y_i^{j_1} = \sum_{j_1=1}^{n_1} \sum_{j_2=1}^{n_2} w_{j_1}' v_{j_2}^{j_1} c_{j_2}^{j_1*} \quad (20)$$

综合评价价值 Y_i 越大,说明评估对象中压直流配电网建设需求越高,规划投资效益越明显。制定规划方案时,应按评价价值从高到低确定规划优先顺序。依次选择 K 个配电网进行投资,规划方案的总体综合评价价值 Q_o 为:

$$Q_o = \sum_{k=1}^K Y_k \quad K=1, 2, \dots, p \quad (21)$$

其中, Q_o 为第 o 个方案的总体综合评价价值; Y_k 为规划投资优先级第 k 位评估对象的综合评价价值。

2.4 方案确定

以方案总体评价价值最大为目标,以年度总投资为约束,确定最终方案,即:

$$\begin{cases} F = \max \left\{ \sum_{k=1}^K Y_k \mid K=1, 2, \dots, p \right\} \\ \text{s.t. } G \geq \sum_{k=1}^K g_k \end{cases} \quad (22)$$

其中, g_k 为优先级第 k 位直流配电网的投资成本; G 为年度总投资。

3 算例分析

基于上述中压配电网规划综合评价指标体系及选优分析方法,选取某地区 9 个 10 kV 配电网,分别记为 $X_1 \sim X_9$,验证本文所提方法的可行性。

由 10 个专家分别对 9 个配电网的城市地下管网复杂度和架空线路走廊建设难易度 2 个定性指标进行语言性评价,并通过云模型将其量化。9 个配电网的指标数据见附录中表 A3;基于德尔菲法得到的供电质量提升需求、城市场景需求及配电网经济性 3 个一级指标权重分别为 0.36、0.41 和 0.23;不同指标体系的综合评价价值见附录中表 A4。

设年度总投资为 20 000 万元,3 种规划方案及其投资优先次序、选优对象及总投资成本如表 2 所示。

下面进行规划方案对比分析。

表 2 3 种规划方案的选优结果

Table 2 Optimal selection results of three planning schemes

方案	对象选优原则	投资优先次序	选优对象	总投资成本 / 万元
1	传统供电可靠性评价价值低	$X_9 > X_6 > X_8 > X_5 > X_2 > X_1 > X_7 > X_4 > X_3$	X_9, X_6, X_8	19 830
2	供电质量提升需求评价价值高	$X_8 > X_5 > X_2 > X_1 > X_4 > X_6 > X_7 > X_3 > X_9$	X_8, X_5, X_2	19 930
3	考虑城市场景需求配电网规划综合评价价值高	$X_4 > X_8 > X_1 > X_5 > X_2 > X_7 > X_3 > X_6 > X_9$	X_4, X_8, X_1	19 180

(1) 方案 1 以传统的供电可靠性为依据进行配电网规划选优。实际应用中,平均供电可靠率、平均停电时间和平均停电频率是传统的供电可靠性的主要指标,由于平均停电时间可转换为平均供电可靠率,故本文算例中通过平均供电可靠率、平均停电频率 2 个指标综合反映传统供电可靠性。

由表 A3 可知,在中压直流配电网规划中,若以平均供电可靠率低为规划选优依据,则选优对象为 X_9, X_8, X_7 ,但随着用户对不间断供电需求的不断提高,在供电可靠率较高的水平下平均停电频率将成为影响用户用电体验的主要因素,因此计及平均停电频率后的选优对象变为 X_9, X_6, X_8 ,另外直流配电网的合环运行作为减小停电频率的有效途径,在其规划选优中对停电频率进行考虑也是很必要的。通过该方案进行中压直流配电网规划选优,具有供电可靠性提升意义,但没有考虑配电网需求的差异性。

(2) 方案 2 以供电质量提升需求为依据进行配电网规划选优。由表 2 可知,选优对象为 X_8, X_5, X_2 ,与方案 1 不同,这主要是因为方案 2 计及了配电网对供电质量需求的差异性,相较于方案 1 中的 X_9, X_6 ,虽然 X_5, X_2 具有更高的供电可靠性,由表 A3 可知 X_5, X_2 的平均供电可靠率分别为 99.978 8%、99.992 6%,而 X_9, X_6 的平均供电可靠率仅分别为 99.851 2%、99.964 5%。根据提高供电可靠性的规划目标,理应对供电可靠性低的 X_9, X_6 优先进行改造,但相对于各自与其目标水平之间的差距,如 X_5, X_2 的平均供电可靠率目标值分别为 99.990 1%、99.999 0%,而 X_9, X_6 的平均供电可靠率目标值仅分别为 99.863 0%、99.965 8%,即 X_5, X_2 的供电可靠性现状与其目标值之间的差距更大,具备更高的提升空间,因此 X_5, X_2 对供电可靠性的提升具有更高需求。另外,方案 2 还通过电压合格率差指标反映配电网的电能可用度的提升需求。总体而言,方案 2 较为充分地反映了配电网在供电质量上的差异性需求,在中压直流配电网规划选优中,具有差异化的供电质量水平提升意义,但没有考虑城市场景需求对中压直流建设的影响。

(3) 方案 3 综合考虑供电质量提升需求、城市市场

景需求和配电网经济性后对中压直流配电网进行规划选优。由表2可知,方案3选优对象由方案2的 X_8 、 X_5 、 X_2 变为 X_4 、 X_8 、 X_1 ,由投资优先次序可知 X_4 由方案2中的第5位变为方案3中的第1位, X_1 由方案2中的第4位变为方案3中的第3位。

以配电网 X_4 为例进行分析,由表A3可知,配电网 X_4 的城市场景需求6个二级指标中,城市地下管网复杂度、架空线路走廊建设难易度、敏感负荷综合占比、短路电流裕度、线路负载不均衡度这5个指标的指标值分别为0.683、0.765、18.06%、4.65%、0.0567,在对中压直流建设的需求程度上都位于9个配电网的前3位。通过观察表A4也可以发现,其城市场景需求评价值为0.8008,居9个配电网城市场景需求首位。另外,在配电网 X_4 的经济性方面,由表A3可知,其2个二级指标在经济性上也位于前3位。由表A4可知配电网 X_4 的配电网经济性评价值为0.8136,仅次于 X_1 的0.8754,位于第2位。由此,综合考虑三方面因素及相应权重后,在中压直流配电网规划中应优先考虑 X_4 。对于配电网 X_1 分析类似,不再赘述。

另外,利用德尔菲法-熵权法对方案3中的各级指标赋权,在充分利用指标数据的客观性前提下,有效考虑了专家意见。如上文所述,一级指标中,城市场景需求权重为0.41,所占比重最大,这与现阶段中压直流配电网规划建设主要是为了解决交流配电网难以解决的问题,以及该地区具有相对较高的供电质量水平相符。根据不同发展时期及不同地区的实际情况调整一级指标权重,可不同程度地对供电质量提升需求、城市场景需求和配电网经济性3个方面进行考虑,具有实际工程意义。

综上,本文所提选优分析方法较好地体现了使中压直流配电网优势得到有效发挥的城市应用场景需求,可有效发挥直流配电网的建设效益。

4 结语

针对城市配电网规划中多个中压直流配电网的建设优先次序尚无量化分析方法的问题,本文开展了以下工作:

(1)从供电质量提升需求、城市场景需求和配电网经济性3个层面建立了一套城市中压直流配电网规划选优综合指标体系,在供电质量提升需求方面考虑与目标水平之间的差距,在城市场景需求方面从源-网-荷3个角度全面计及中压交流建设局限性与中压直流建设驱动力,在配电网经济性方面关注缺电的社会经济损失;

(2)通过云模型对定性指标量化,根据主客观相结合的德尔菲-熵权法对各级指标赋权,提出一种以综合评价值为排序依据的中压直流配电网规划选优综合评估方法,能有效安排投资优先次序形成规划

方案,优先改造对直流化需求高的城市配电网;

(3)算例分析表明,本文所提方法能全面考虑配电网供电质量的差异化需求、中压直流建设的城市场景需求及配电网规划建设经济性需求,实现供电质量提升、直流化建设效益、配电网规划经济性三方面综合效益最大化。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 韩民晓,谢文强,曹文远,等. 中压直流配电网应用场景与系统设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):2-14,89.
HAN Minxiao,XIE Wenqiang,CAO Wenyuan,et al. Application scenario and system design of medium-voltage DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(23):2-14,89.
- [2] 孙国萌,齐琛,韩蓓,等. 交直流混合配电网规划运行关键技术研究[J]. 供用电,2016,33(8):7-17.
SUN Guomeng,QI Chen,HAN Bei,et al. Research of key technology of AC/DC hybrid distribution network planning and operation[J]. Distribution and Utilization,2016,33(8):7-17.
- [3] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6791-6801,7114.
ZENG Rong,ZHAO Yuming,ZHAO Biao,et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(23):6791-6801,7114.
- [4] 朱永强,张璐,王甜婧. 高比例可再生能源接入的交直流混合微电网网架规划[J/OL]. 电网技术. (2019-03-06)[2019-11-18]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2340>.
- [5] 贾雨龙,米增强,刘力卿,等. 分布式储能系统接入配电网的容量配置和有序布点综合优化方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):1-7,16.
JIA Yulong,MI Zengqiang,LIU Liqing,et al. Comprehensive optimization method of capacity configuration and ordered installation for distributed energy storage system accessing distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(4):1-7,16.
- [6] 周贤正,郭创新,陈玮,等. 基于混合整数二阶锥的配电-气网联合规划[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):1-11.
ZHOU Xianzheng,GUO Chuangxin,CHEN Wei,et al. Joint planning of electricity-gas distribution network based on mixed integer second-order cone programming[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(6):1-11.
- [7] DIAS F M,CANIZES B,KHODR H,et al. Distribution networks planning using decomposition optimisation technique[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2015,9(12):1409-1420.
- [8] 陈源,王璐,黄友珍,等. 基于多级可拓评价法的配电网规划经济效益评估模型[J]. 中国电力,2016,49(10):159-164.
CHEN Yuan,WANG Lu,HUANG Youzhen,et al. Economic benefit evaluation model of distribution network planning based on multilevel extension evaluation method[J]. Electric Power,2016,49(10):159-164.
- [9] GAN C K,PYDJANTO D,DJAPIC P,et al. Strategic assessment of alternative design options for multivoltage-level distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014,29(3):1261-1269.
- [10] 欧阳森,陈丹伶,刘丽媛. 考虑用户需求的配电网规划对象选优分析方法[J]. 电测与仪表,2018,55(23):15-21.

- OUYANG Sen, CHEN Danling, LIU Liyuan. An optimized selection method of executive object for distribution network planning considering user demand[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(23):15-21.
- [11] 陈丹伶. 基于电能数据配电网用电可靠性评估分析[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- CHEN Danling. Evaluation and analysis of distribution network power consumption reliability based on electric energy data[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [12] 中国电力企业联合会. 新型城镇化配电网发展评估规范: T/CEC 103—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [13] 国家能源局. 供电系统供电可靠性评价规程: DL/T 836.1—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [14] 欧阳森, 刘丽媛. 配电网用电可靠性指标体系及综合评估方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(1): 215-222.
- OUYANG Sen, LIU Liyuan. Reliability index system of distribution network for power consumer and its comprehensive assessment method[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(1): 215-222.
- [15] 国家能源局. 配电网规划设计技术导则: DL/T 5729—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [16] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电力工程电缆设计规范: GB 50217—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [17] 国家电网有限公司. 交直流混合配电网综合评价指导原则: Q/GDW 11723—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [18] WANG G Y, XU C L, LI D Y. Generic normal cloud model[J]. *Information Sciences*, 2014, 280(1): 1-15.
- [19] 熊卫红, 张宏志, 谢志成, 等. 基于云理论及熵权法的变压器潜在故障风险评估方法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(8): 125-130, 146.
- XIONG Weihong, ZHANG Hongzhi, XIE Zhicheng, et al. Risk assessment of power transformer potential fault based on cloud theory and entropy weight method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(8): 125-130, 146.
- [20] 蒋琳, 王双川, 刘莹, 等. 基于熵权-云模型的航空弹药保障能力评估[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(7): 180-184.
- JIANG Lin, WANG Shuangchuan, LIU Ying, et al. Evaluation for aviation ammunition support capability based on entropy weight and cloud model[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(7): 180-184.
- [21] 邸凯昌. 空间数据挖掘与知识发现[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 103-125.
- [22] OKOLI C, PAWLOWSKI S D. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications[J]. *Information & Management*, 2004, 42(1): 15-29.

作者简介:



曹华珍

曹华珍(1974—),女,湖北安陆人,高级工程师,硕士,主要研究方向为配电网规划与运行(E-mail: 729875469@qq.com);

王天霖(1991—),男,河北磁县人,高级工程师,硕士,主要研究方向为配电网规划与运行(E-mail: 398749838@qq.com);

陈沛东(1991—),男,广东湛江人,工程师,硕士,主要研究方向为配电网规划与运行(E-mail: workpd24@163.com)。

(编辑 李玮)

Optimal selection analysis method of MVDC distribution network planning considering urban scenario demand

CAO Huazhen¹, WANG Tianlin¹, CHEN Peidong¹, GAO Chong¹,
YANG Moyuan², ZHANG Zhen², OUYANG Sen²

(1. Grid Planning & Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510030, China;
2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In view of the problem that there is no quantitative analysis method for the construction priority of multiple MVDC (Medium-Voltage DC) distribution networks in the urban distribution network planning, an optimal selection analysis method for MVDC distribution network planning objects considering the urban scenario demand is proposed. A comprehensive index system of urban MVDC distribution network planning and optimal selection is established from three aspects of power supply quality improvement demand, urban scenario demand and distribution network economy. In terms of power supply quality improvement demand, the gap between the target levels is considered. In terms of urban scenario demand, the construction limitations of MVAC (Medium-Voltage AC) distribution network and the construction driving force of MVDC distribution network are considered. And in terms of economy, the severity of power loss cost is concerned. Then, the qualitative indexes are quantified by cloud model, the comprehensive evaluation values of each distribution network are calculated based on the hierarchical additive weighting of Delphi entropy weight method, and the distribution networks are sorted according to the values. Under the constraint of annual total investment, the optimization of planning objects is realized by taking the maximum comprehensive evaluation value of scheme as the objective function, so as to arrange the construction priorities of multiple MVDC distribution networks. The distribution network in a certain region is taken as an example to verify the practicability of proposed method.

Key words: urban scenario demand; medium-voltage DC distribution network; planning; optimal selection analysis method

附录

表 A1 城市地下管网复杂度指标各评价等级的云数字特征及其在轴的范围

Table A1 Cloud digital characteristics of each evaluation level of index μ_c and its axis range

评价等级	极其复杂 V_1^c	非常复杂 V_2^c	很复杂 V_3^c	较复杂 V_4^c	不复杂 V_5^c
云模型	[1,0.103,0.0131]	[0.691,0.064,0.0081]	[0.50,0.031,0.005]	[0.309,0.064,0.0081]	[0,0.103,0.0131]
x 轴范围	[1,0.691]	[0.883,0.499]	[0.593,0.407]	[0.501,0.117]	[0.309,0]

表 A2 架空线路走廊建设难易度指标各评价等级的云数字特征及其在轴的范围

Table A2 Cloud digital characteristics of each evaluation level of index μ_o and its axis range

评价等级	极其困难 V_1^o	非常困难 V_2^o	很困难 V_3^o	较困难 V_4^o	不困难 V_5^o
云模型	[1,0.103,0.0131]	[0.691,0.064,0.0081]	[0.50,0.031,0.005]	[0.309,0.064,0.0081]	[0,0.103,0.0131]
x 轴范围	[1,0.691]	[0.883,0.499]	[0.593,0.407]	[0.501,0.117]	[0.309,0]

对第二个评价等级“非常复杂”和“非常不经济”的参数如下： $E_{x_2} = E_{x_3} + (1 - 0.618)(x_{\max} + x_{\min})/2 = 0.691$ ， $E_{n_2} = (1 - 0.618)(x_{\max} - x_{\min})/2 = 0.064$ ， $H_{e_2} = H_{e_2}/0.618 = 0.0081$ 。

对第 1 个评价等级“极其复杂”和“极其不经济”的参数如下： $E_{x_1} = 1$ ， $E_{n_1} = E_{n_2}/0.618 = 0.103$ ， $H_{e_1} = H_{e_2}/0.0131$ 。

其余各状态云参数可依此类推。

表 A3 各配电网指标数据

Table A3 Index data of each distribution network

对象	R_{ASAL-1} / %	R_{ASAL-T} / %	ΔR_{ASAL} / %	$R_{SAIFI-1}$ / (次·户 ⁻¹)	$R_{SAIFI-T}$ / (次·户 ⁻¹)	ΔR_{SAIFI} / (次·户 ⁻¹)	R_{VQR-1} / %	R_{VQR-T} / %	ΔR_{VQR} / %	μ_c	μ_o	D_{RES} / %	D_{SL} / %	ε_F / %	σ_{LLR}	C_{VOC} / [元/(kW·h)]	g / 万元
X ₁	99.9975	99.9990	-0.0015	0.3754	0.1000	-0.2754	99.90	99.99	-0.09	0.827	0.882	6.63	15.40	8.30	0.0137	24.3	6570
X ₂	99.9926	99.9990	-0.0064	0.3845	0.1000	-0.2845	99.89	99.99	-0.10	0.770	0.850	5.73	12.08	5.20	0.0076	26.7	7020
X ₃	99.9836	99.9901	-0.0065	0.1832	0.2000	0.0168	99.91	99.97	-0.06	0.555	0.661	3.60	16.14	10.55	0.0223	19.3	6810
X ₄	99.9812	99.9901	-0.0089	0.2010	0.2000	-0.0010	99.83	99.97	-0.14	0.683	0.765	4.00	18.06	4.65	0.0567	19.6	6420
X ₅	99.9788	99.9901	-0.0113	0.4213	0.2000	-0.2213	99.87	99.97	-0.10	0.577	0.706	8.65	10.57	9.85	0.0107	18.3	6520
X ₆	99.9645	99.9658	-0.0013	0.4643	0.3000	-0.1643	99.82	99.95	-0.13	0.452	0.474	10.85	11.05	18.95	0.0652	11.4	6890
X ₇	99.9589	99.9658	-0.0069	0.3167	0.3000	-0.0167	99.83	99.95	-0.12	0.526	0.548	7.26	12.23	10.60	0.0223	14.8	6540
X ₈	99.9456	99.9658	-0.0202	0.4201	0.3000	-0.1201	99.78	99.95	-0.17	0.327	0.339	6.44	16.62	5.05	0.0185	10.7	6390
X ₉	99.8512	99.8630	-0.0118	0.4023	0.5000	0.0977	98.80	98.79	0.01	0.118	0.150	2.09	14.89	19.95	0.0481	8.3	6550

表 A4 不同指标体系的评价结果

Table A4 Evaluation results of different index systems

对象	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
传统供电可靠性评价价值	0.4971	0.4645	0.9749	0.9240	0.3432	0.2049	0.5809	0.2863	0.1622
供电质量提升需求评价价值	0.4427	0.5823	0.2768	0.4409	0.6476	0.3854	0.3830	0.8564	0.2582
城市场景需求评价价值	0.5726	0.4548	0.4838	0.8008	0.3824	0.5543	0.4190	0.4928	0.3115
配电网经济性评价价值	0.8754	0.5427	0.5330	0.8136	0.6986	0.1992	0.5614	0.5207	0.3254
考虑城市市场需求的配电网规划综合评价价值	0.5955	0.5209	0.4206	0.6742	0.5506	0.4119	0.4388	0.6301	0.2955