

高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述

卫志农¹, 裴 蕾¹, 陈 胜¹, 赵景涛², 傅 强²

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要:高比例间歇式清洁能源的接入实现了能源利用率的提高和碳排放的减少,但其出力的不确定性为交直流混合配电网的安全运行带来了挑战。同时,高效调度在灵活性资源可以促进风光资源的消纳,实现交直流混合配电网的安全经济运行。鉴于此,对高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究进行了综述。首先介绍了交直流混合配电网潮流模型及运行约束,包括非线性模型、线性化模型和凸松弛模型;其次阐述了交直流混合配电网优化调度研究,包括随机优化方法、两阶段/多阶段随机优化模型和灵活性运行;接着对交直流混合配电网进行了 $N-1$ 安全分析和可靠性评估,构建了安全域模型;最后展望了未来交直流混合配电网安全分析与优化调度可研究的方向。

关键词:碳中和;交直流混合配电网;新能源;安全分析;优化调度

中图分类号:TM 734

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109039

0 引言

随着化石燃料在电力行业的大量消耗,大气环境污染愈发严重,二氧化碳的大量排放加剧了全球变暖的趋势。为此,中国在联合国大会上承诺:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”^[1]。碳中和的概念为个人、企业乃至国家在一段时间内产生的二氧化碳气体通过恢复植被、优化能源结构和节能减排等措施可以抵消,实现二氧化碳“零排放”^[2]。碳达峰的概念为经过人为干预措施,二氧化碳的排放进入平稳期并逐步进入下降阶段^[3]。值得注意的是,高比例清洁能源大量接入交直流混合配电网可以起到减少碳排放、促进能源结构转型和提高能源利用效率的作用。

风电和光伏的出力情况很大程度上取决于天气的变化,因此具有较强的随机性,此时研究随机功率注入下交直流混合配电网的优化运行尤为关键。当可再生能源出力较大时,为防止节点电压越限,可通过调节控制可再生能源机组输出电压,减少机组出力,但会出现弃风、弃光现象^[4-5];当可再生能源出力不足而支路末端负荷较重时,会出现节点电压越下限的情况,且弃光、弃风现象仍然十分严重,主要原因是配电网的灵活性不足,无法充分利用可再生能源^[6]。此时,如何高效调度各种灵活性资源以促进风光资源的最大消纳成为需要解决的问题之一。相

比于传统交流配电网,交直流混合配电网的功率传输能力更强,更适合接入大量储能装置,而制定合理的储能装置充放电策略可以促进可再生能源的消纳^[7],协调储能和风光出力,起到削峰填谷的作用^[8]。当可再生能源出力较大时,储能装置充电,抑制可再生能源并网点电压上升;当可再生能源出力较小时,储能装置放电,支撑末端节点电压^[9]。同时,协调控制静止无功补偿装置的无功输出和分组电抗器的投切可以起到调节电网电压的作用^[10-11],进一步提高可再生能源利用率,减少配电网网损,实现交直流混合配电网的优化运行。

交直流混合配电网拓扑结构分为辐射形、两端供电型和环形3种,灵活多变的网络结构使得配电网接纳高比例可再生能源的能力更强,同时也给交直流混合配电网的安全运行带来了巨大挑战^[12-13]。当可再生能源瞬时出力大于负荷时会出现潮流反转的现象,此时配电网向主网倒送功率,容易造成并网点过电压,给交直流混合配电网的安全运行带来隐患^[14]。同时,高比例可再生能源的接入使得交直流混合配电网中电力电子设备的接入比例大幅增加,对系统运行稳定性构成新的考验^[15-16]。对交直流混合配电网进行安全分析可以预防大部分故障带来的不稳定运行,增加系统的安全性。

综上所述,本文综述了交直流混合配电网安全分析与优化调度的研究现状。首先介绍了交直流混合配电网支路潮流模型、线性模型和凸松弛模型;其次介绍了交直流混合配电网随机优化方法、多阶段随机优化调度模型和灵活性运行方式;接着介绍了交直流混合配电网 $N-1$ 安全分析、可靠性评估和安全域的构建;最后对交直流混合配电网的未来研究进行了展望。

收稿日期:2021-06-23;修回日期:2021-08-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1966205)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U1966205)

1 交直流混合配电网建模

交直流混合配电网的拓扑结构如图1所示,直流配电网和交流配电网通过电压源换流器VSC(Voltage Source Converter)连接构成交直流混合配电网。直流配电网中接有各类直流负荷、光伏机组、储能装置等。交流配电网中接有交流负荷、风电机组、光伏机组等。通过高效调度各种泛在灵活性资源可实现交直流混合配电网的安全经济运行和高效决策。

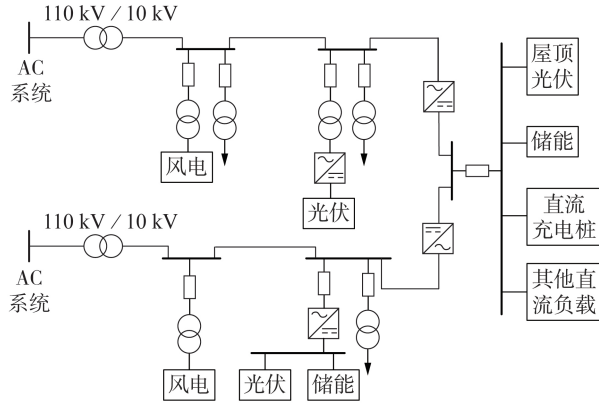


图1 交直流混合配电网拓扑结构

Fig.1 Structure of AC/DC hybrid distribution system

1.1 交流配电网潮流模型及运行约束

采用Distflow支路模型将交流配电网非线性潮流模型描述为^[17]:

$$\begin{cases} \sum_{j \in M(i)} P_{ij} - \sum_{k \in N(i)} (P_{ki} - I_{ki}^2 R_{ki}) = P_i^{\text{inj}} \\ \sum_{j \in M(i)} Q_{ij} - \sum_{k \in N(i)} (Q_{ki} - I_{ki}^2 X_{ki}) = Q_i^{\text{inj}} \end{cases} \quad i \in \Omega^{\text{AN}} \quad (1)$$

$$U_j^2 = U_i^2 - 2(P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}) + I_{ij}^2(R_{ij}^2 + X_{ij}^2) \quad i, j \in \Omega^{\text{AN}}; ij \in \Omega^{\text{AL}} \quad (2)$$

$$I_{ij}^2 U_i^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad i \in \Omega^{\text{AN}}; ij \in \Omega^{\text{AL}} \quad (3)$$

式中: P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为支路 ij 的有功功率和无功功率; P_{ki} 和 Q_{ki} 分别为支路 ki 的有功功率和无功功率; I_{ki} 和 I_{ij} 分别为支路 ki 和支路 ij 的支路电流; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压; P_i^{inj} 和 Q_i^{inj} 分别为注入节点 i 的有功功率和无功功率; $M(i)$ 为交流电网中首节点为 i 的支路的末节点集合; $N(i)$ 为交流电网中末节点为 i 的支路的首节点集合; Ω^{AN} 为交流节点的集合; Ω^{AL} 为交流支路的集合; R_{ij} 和 R_{ki} 为支路电阻; X_{ij} 和 X_{ki} 为支路电抗。

Distflow支路潮流方程最大的特点是消去了电压相角和电流相角变量,使得配电网潮流方程更加简单,便于复杂数学模型的求解,同时可以直接观察支路功率的变化;但是Distflow支路潮流方程松弛了相角,导致无法观察到节点电压相角的变化^[18]。

交流配电网安全运行约束条件如下:

$$\begin{cases} P_{i, \min}^{\text{sub}} \leq P_i^{\text{sub}} \leq P_{i, \max}^{\text{sub}} \\ Q_{i, \min}^{\text{sub}} \leq Q_i^{\text{sub}} \leq Q_{i, \max}^{\text{sub}} \end{cases} \quad i \in \Omega^{\text{sub}} \quad (4)$$

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq S_{ij, \max}^2 \quad ij \in \Omega^{\text{AL}} \quad (5)$$

$$P_i^{\text{ADG}} = P_{i, \max}^{\text{ADG}} \quad i \in \Omega^{\text{ADGN}} \quad (6)$$

$$Q_i^{\text{ADG}} = P_i^{\text{ADG}} \tan \varphi \quad i \in \Omega^{\text{ADGN}} \quad (7)$$

$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \quad i \in \Omega^{\text{AN}} \quad (8)$$

式中: $P_{i, \max}^{\text{sub}}$ 和 $P_{i, \min}^{\text{sub}}$ 分别为馈线首端有功出力 P_i^{sub} 的上限和下限; $Q_{i, \max}^{\text{sub}}$ 和 $Q_{i, \min}^{\text{sub}}$ 分别为馈线首端无功出力 Q_i^{sub} 的上限和下限; $S_{ij, \max}$ 为交流电网线路传输容量; $P_{i, \max}^{\text{ADG}}$ 为交流侧分布式电源DG(Distributed Generation)有功出力 P_i^{ADG} 的上限; Q_i^{ADG} 为交流侧DG无功出力; Ω^{sub} 和 Ω^{ADGN} 分别为馈线首端集合和交流侧DG节点集合; φ 为DG的功率因数角; $U_{i, \max}$ 和 $U_{i, \min}$ 分别为节点 i 电压的上限和下限。

式(4)为馈线首端出力约束,式(5)为馈线容量约束,式(6)和式(7)为DG出力约束,式(8)为节点电压约束。DG采用最大功率点跟踪MPPT(Maximum Power Point Tracking)控制模式,功率因数为0.9^[19]。

1.2 直流配电网潮流模型及运行约束

直流支路潮流方程如下:

$$\sum_{j \in X(i)} P_{ij} - \sum_{k \in Y(i)} (P_{ki} - I_{ki}^2 R_{ki}) = P_i^{\text{inj}} \quad i \in \Omega^{\text{DN}} \quad (9)$$

$$U_j^2 = U_i^2 - 2P_{ij}R_{ij} + I_{ij}^2 R_{ij}^2 \quad i, j \in \Omega^{\text{DN}}; ij \in \Omega^{\text{DL}} \quad (10)$$

$$I_{ij}^2 U_i^2 = P_{ij}^2 \quad i \in \Omega^{\text{DN}}; ij \in \Omega^{\text{DL}} \quad (11)$$

式中: $X(i)$ 为直流电网中首节点为 i 的支路的末节点集合; $Y(i)$ 为直流电网中末节点为 i 的支路的首节点集合; Ω^{DN} 为直流节点的集合; Ω^{DL} 为直流支路的集合。

直流配电网安全运行约束条件如下:

$$|P_{ij}| \leq P_{ij, \max} \quad ij \in \Omega^{\text{DL}} \quad (12)$$

$$P_i^{\text{DDG}} = P_{i, \max}^{\text{DDG}} \quad i \in \Omega^{\text{DDGN}} \quad (13)$$

$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \quad i \in \Omega^{\text{DN}} \quad (14)$$

式中: $P_{ij, \max}$ 为直流电网线路传输容量; $P_{i, \max}^{\text{DDG}}$ 为直流侧DG有功出力 P_i^{DDG} 的上限; Ω^{DDGN} 为直流侧DG节点集合。

式(12)为直流电网的馈线容量约束,式(13)为直流侧DG出力约束,式(14)为节点电压约束。

1.3 VSC潮流模型及运行约束

VSC潮流模型主要分为有损模型和无损模型。有损模型主要由等值阻抗和理想VSC组成,换流损耗由等值电阻消耗功率等效^[20]。

$$\begin{cases} P_{ki}^{\text{ac}} - I_{ki}^2 R_c = -P_i^{\text{vsc}} \\ Q_{ki}^{\text{ac}} - I_{ki}^2 X_c = -Q_i^{\text{vsc}} \end{cases} \quad ki \in \Omega^{\text{AVSCL}}; i \in \Omega^{\text{VSCN}} \quad (15)$$

$$P_i^{\text{vsc}} = P_{ji}^{\text{dc}} \quad i \in \Omega^{\text{VSCN}}; ji \in \Omega^{\text{DVSCN}} \quad (16)$$

$$Q_{i, \min}^{\text{vsc}} \leq Q_i^{\text{vsc}} \leq Q_{i, \max}^{\text{vsc}} \quad i \in \Omega^{\text{VSCN}} \quad (17)$$

$$(P_i^{\text{vsc}})^2 + (Q_i^{\text{vsc}})^2 \leq (S_{i,\max}^{\text{vsc}})^2 \quad i \in \Omega^{\text{VSCN}} \quad (18)$$

式中: P_{ki}^{ac} 和 Q_{ki}^{ac} 分别为 VSC 交流侧支路的有功功率和无功功率; R_c 和 X_c 分别为 VSC 等效电阻和电抗; Ω^{AVSCL} 为 VSC 交流侧支路集合; Ω^{VSCN} 为 VSC 节点集合; P_i^{vsc} 为注入 VSC 节点有功功率; P_{ji}^{dc} 为 VSC 直流侧支路有功功率; Ω^{DVSCL} 为 VSC 直流侧支路集合; $Q_{i,\max}^{\text{vsc}}$ 和 $Q_{i,\min}^{\text{vsc}}$ 分别为 VSC 无功补偿量 Q_i^{vsc} 的上限和下限; $S_{i,\max}^{\text{vsc}}$ 为 VSC 的容量。

式(15)和式(16)为 VSC 潮流方程,式(17)和式(18)分别为无功补偿约束和 VSC 容量约束。

文献[21]提出另一种 VSC 损耗公式,如式(19)所示。

$$P_{\text{loss}} = A + BI_{ki} + CI_{ki}^2 \quad (19)$$

式中: P_{loss} 为 VSC 损耗; A 、 B 和 C 为损耗系数。

VSC 有损模型计算较为精确,但等值电阻或损耗系数的选择较为重要。相比而言,VSC 无损模型忽略了 VSC 损耗,设定 VSC 交流侧注入功率与其直流侧输出功率相等,模型较为简单^[20],但是与实际潮流存在偏差。

在 VSC 的不同控制模式下交直流混合配电网的运行状态不同,通常包括主从控制模式、下垂控制模式和电压裕度控制模式^[22],这 3 种控制模式各有优点和不足。

1) 主从控制模式。

主从控制模式下设定一台 VSC 为主站,其余 VSC 为从站。主站的交流侧控制方式为定交流无功控制,直流侧控制方式为定直流电压控制;从站的交流侧控制方式为定无功功率控制或定交流电压控制,直流侧控制方式为定有功功率控制。

2) 下垂控制模式。

下垂控制模式也称对等控制模式,各换流站均采用 $P-U_{\text{dc}}$ 下垂控制,共同实现功率-电压的调节功能。VSC 端电压随功率变化呈下垂特性。当电压升高时,VSC 输出功率相应减少,从而抑制节点功率上升的趋势;当电压下降时,VSC 输出功率相应增加,从而抑制节点功率下降的趋势。

3) 电压裕度控制模式。

电压裕度控制模式为主从控制模式下增加一个预备主换流站,正常运行条件下,预备主换流站直流侧控制方式为定有功功率控制,当直流电压波动到一定值时,该换流站直流侧控制方式变为定直流电压控制,达到维持直流侧电压的目标。

上述 3 种换流站控制模式各有优劣:主从控制模式下,各换流站正常情况下可以稳定地运行在人为调度给定的最优运行点,但当发生故障未及时得到下一步调度指令时,将依靠主站提供直流侧所需的功率差额,并且主站和从站之间依靠通信设备联

络;下垂控制模式下,各换流站共同承担系统的功率平衡和电压调节,通过测量本地母线直流电压来调节有功功率分配,不依赖通信装置,但是直流电压稳定性较差^[23];电压裕度控制模式下,直流侧电压偏差可以被控制在较小范围,但是电压裕度的选择较为困难^[24]。

1.4 线性化模型

文献[20]提出了交直流混合配电网的线性化潮流模型,用线性化 Distflow 潮流方程代替原非线性方程,由于载流量约束的数学本质为一个圆,采用圆的内接十二边形来近似圆,从而将载流量约束线性化,可用式(20)表示。

$$\alpha_{\omega} P_{ij} + \beta_{\omega} Q_{ij} + \delta_{\omega} S_{ij,\max} \leq 0 \quad \omega = 1, 2, \dots, 12 \quad (20)$$

式中: α_{ω} 、 β_{ω} 和 δ_{ω} 为线性化载流量约束的常数。

文献[25]提出了交直流支路潮流方程直接线性化的方法,将电压幅值平方项设为一个独立变量,并将正弦余弦项进行一阶泰勒展开,同时将电压幅值乘积项转化为电压幅值平方项,并提出了基于运行点迭代和二进制扩展的 VSC 运行特性方程线性化方法,实现了交直流混合配电网约束条件的线性化。

此时较难求解的非线性规划模型可转化为线性规划模型,采用成熟的算法包即可求得全局最优解,大幅提高了求解效率,但线性化模型求解精度不高。

1.5 半定松弛模型

文献[26]介绍了半定规划 SDP(Semi-Definite Programming)原问题的标准形式并将 SDP 应用在解决最优潮流 OPF(Optimal Power Flow)问题中,采用原对偶-内点法求解 OPF 的 SDP 模型,如式(21)所示。

$$\begin{cases} \min \mathbf{F} = \mathbf{A}_0 \mathbf{X} \\ \text{s.t. } \mathbf{A}_k \mathbf{X} = \mathbf{b}_k \quad k = 1, 2, \dots, 30 \\ \mathbf{X} \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为目标值; $\mathbf{X}$ 为决策变量; $\mathbf{A}_0$ 为目标函数的系数矩阵; $\mathbf{A}_k$ 为各约束条件的系数矩阵; $\mathbf{b}_k$ 由约束条件右侧常数组成。

此时原混合整数非线性规划模型可以转换为混合整数 SDP 模型,保证了解的全局最优性。

混合整数 SDP 模型松弛精度高,可较好地应用到交直流混合配电网优化问题中。将原非线性模型进行半定松弛后,模型内仅有矩阵变量半正定约束为非线性约束条件,其余目标函数和约束条件都为线性,凸松弛后的模型可以得到全局最优解。文献[27]将求解 SDP 模型所得的最优解与由其映射所得的矩阵作差,如果差矩阵中每一个元素值都足够小,则说明最优解在数值上非常接近一个秩为 1 的矩阵,即半定松弛是足够精确的,从而验证了半定松弛的精确性。相较于线性化模型,半定松弛模型精度高,但计算复杂度高。

1.6 二阶锥松弛模型

文献[17]提出了基于二阶锥的交直流混合配电网的日前优化调度模型,将上述非线性模型中的 U_i^2 替换为 $\tilde{U}_i$,将 I_{ij}^2 替换为 $\tilde{I}_{ij}$,代入上述交直流配电网潮流方程和约束条件中,同时将式(3)和式(11)进行二阶锥松弛后得到:

$$\begin{cases} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{U}_i \end{cases} \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{U}_i \quad i \in \Omega^{\text{AN}}; ij \in \Omega^{\text{AL}} \quad (22)$$

$$\begin{cases} 2P_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{U}_i \end{cases} \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{U}_i \quad i \in \Omega^{\text{DN}}; ij \in \Omega^{\text{DL}} \quad (23)$$

有研究表明,在目标函数为关于支路电流的增函数条件下,配电网的二阶锥松弛是严格准确的^[28]。文献[29]采用验证最优解处是否能满足原潮流方程的等式约束条件来判断二阶锥松弛是否精确。通过二阶锥松弛的方法可将交直流非线性潮流模型转化为二阶锥松弛模型,提高了模型求解效率。

对3种模型进行对比分析可知:在精度方面,半定松弛模型最高,二阶锥松弛模型次之,线性化模型最低;在计算效率方面,线性化模型最高,二阶锥松弛模型次之,半定松弛模型最低。

2 交直流混合配电网优化调度

当分布式光伏和风电高比例渗透时,交直流混合配电网如何利用灵活性资源实现配电网的优化调度以及减少配电网运行成本成为目前亟需解决的问题之一。

2.1 交直流混合配电网随机优化方法

1)场景优化。场景优化方法基于概率理论采用场景的方法描述不确定信息或用服从一定概率分布的随机变量描述不确定因素,建立以期望成本最小的随机模型^[30-31]。基于场景优化的不确定优化模型较为简单,求解相对容易但是场景规模大小选取较为困难。文献[32]提出了配电网多阶段市场出清模型,通过构建场景树的方式描述模型中的不确定信息,验证了多阶段随机模型的优越性。文献[33]采用拉丁超立方采样的方法对光伏出力场景和风电出力场景进行抽样,采用场景削减技术生成相应概率的场景集合,建立了基于场景法的配电网有功-无功协调优化模型。

2)机会约束。机会约束模型采用随机变量的表达式描述不确定因素,最大特点为允许所作决策在一定概率上不满足配电网运行约束条件^[34-35],但是置信水平的选取较为困难。文献[36]采用样本均值近似方法将原机会约束规划模型转化为较易求解的确定性优化模型。

3)鲁棒优化。鲁棒优化方法通过构建不确定集

合来对风光出力建模,该模型可得到最恶劣场景下的优化方案,确保任意场景下的决策都不违反安全约束条件,但优化结果可能过于保守^[37]。文献[38]提出了以降低运行成本、控制无功电压为目标的交直流混合配电网二阶段鲁棒优化模型,能够得到最恶劣新能源出力场景下运行成本最少的无功电压控制方案。

4)分布鲁棒优化。分布鲁棒优化方法结合了鲁棒优化和随机优化的优点,可得到随机变量最恶劣概率分布情况下的决策^[39-40],降低了优化结果的保守度,模型求解相对复杂。文献[41]提出了基于数据驱动的数据驱动交直流混合配电网分布鲁棒优化模型,采用1-范数和 ∞ -范数共同约束随机信息概率分布置信集合,该模型相对传统鲁棒优化模型保守性较小。

2.2 交直流混合配电网两阶段随机优化模型

传统两阶段优化模型只包括日前和实时2个阶段,采用随机场景描述风光出力的不确定信息,数学模型如式(24)所示^[42-43]。

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^T \left(K_1 \mathbf{x}_{1,t} + \sum_{s=1}^N g(s) K_2 \mathbf{x}_{2,t,s} \right) \\ \text{s.t. } \mathbf{A}_t \mathbf{x}_{1,t} + \mathbf{B}_{t,s} \mathbf{x}_{2,t,s} \leq \mathbf{b}_{t,s} \quad t=1, 2, \dots, T; s=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (24)$$

式中: K_1 和 K_2 分别为日前和实时阶段的常数系数; $\mathbf{x}_{1,t}$ 为日前阶段的离散决策变量; $\mathbf{x}_{2,t,s}$ 为实时阶段的连续决策变量; $g(s)$ 为各个场景的概率; $\mathbf{A}_t$ 和 $\mathbf{B}_{t,s}$ 分别为日前和实时阶段决策变量的系数矩阵; $\mathbf{b}_{t,s}$ 为表征系统参数的常数矩阵; T 为调度周期; N 为场景总数量。

传统两阶段随机优化模型缺少日内调节阶段,第一阶段决策变量不随第二阶段不确定场景变化而调整,第二阶段决策变量可根据不确定场景实时变化而灵活调整^[44]。由于缺少日内调节阶段,通常两阶段随机优化调度模型的实时平衡成本会较大,使得交直流混合配电网运行总成本较大,经济性较低。鉴于此,本文提出了交直流混合配电网多阶段随机优化调度模型。

2.3 交直流混合配电网多阶段随机优化模型

日前、日内和实时阶段的光伏出力的观测值一般不一致,因此在各阶段运行决策中,交直流混合配电网从主网的购电量会存在偏差。其三阶段交易模式可简述为:在日内/实时阶段存在功率缺额时,可向主网高价购买额外的电量;而在日内/实时阶段功率过剩时,可低价将多余的电量售出。

多阶段随机优化模型将交直流混合配电网优化调度过程分为多个阶段,每阶段的决策变量可依据最新观测到光伏的不确定性出力信息而调整,并且同一场景下的决策保持一致性^[44]。该数学模型如下:

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^N g(s) (K'_1 \mathbf{x}'_{1,t,s} + K'_2 \mathbf{x}'_{2,t,s} + K'_3 \mathbf{x}'_{3,t,s}) \\ \text{s.t. } \mathbf{A}'_{t,s} \mathbf{x}'_{1,t,s} + \mathbf{B}'_{t,s} \mathbf{x}'_{2,t,s} + \mathbf{C}'_{t,s} \mathbf{x}'_{3,t,s} \leq \mathbf{b}'_{t,s} \\ t=1, 2, \dots, T; s=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (25)$$

式中: K'_1 、 K'_2 和 K'_3 分别为日前、日内和实时阶段的常数系数; $\mathbf{x}'_{1,t,s}$ 为日前阶段的离散决策变量; $\mathbf{x}'_{2,t,s}$ 和 $\mathbf{x}'_{3,t,s}$ 分别为日内和实时阶段的连续决策变量; $\mathbf{A}'_{t,s}$ 、 $\mathbf{B}'_{t,s}$ 和 $\mathbf{C}'_{t,s}$ 分别为日前、日内和实时阶段决策变量的系数矩阵; $\mathbf{b}'_{t,s}$ 为表征系统参数的常数矩阵。

2.4 交直流混合配电网灵活性运行

交直流混合配电网中含有大量电力电子设备和柔性元件,运行方式多样,主动性较强,合理高效地调度各种灵活性资源和调整运行方式可以促进风光资源的消纳,降低运行成本。

文献[45]介绍了VSC对电网电压的调节作用,提出了安全和风险状态下交直流混合配电网的2种运行模式:当系统安全运行时,以经济成本最小为目标进行优化调度;当系统风险运行时,通过VSC发出/吸收无功功率来调节电网电压。文献[46]提出了基于网络重构的交直流混合配电网优化调度模型,通过联络开关改变网络结构可以缓解支路堵塞,减少网损,促进可再生能源消纳。文献[47]提出了含电动汽车的交直流混合配电网充换储一体化调度模型,充分利用储能装置的调峰作用,协调电动汽车的充放电行为,实现了经济运行成本的优化。文献[48]构建了考虑多元用户报价的交直流配电网动态经济优化模型,充分调动用户的主动性,含储能的用户同时成为电网的需求者和供应者,实现电网的灵活运行。文献[49]通过制定梯级电价的方式进行需求响应建模,提高了交直流混合配电网的经济收益。文献[50]采用柔性多状态开关对交直流混合配电网电压进行自适应控制,提高了系统的电压稳定性。

综上所述,通过调节VSC输出、网络重构、协调电动汽车充放电行为、需求响应和柔性开关控制等主动管理措施充分实现了交直流混合配电网的灵活性运行。

3 交直流混合配电网安全分析

高比例间歇式清洁能源的大量接入为交直流混合配电网的安全运行带来较大风险,此时对电网的安全分析显得尤为重要。本节从 $N-1$ 安全分析、可靠性分析和安全域构建3个方面叙述交直流混合配电网安全分析研究现状。

3.1 交直流混合配电网 $N-1$ 安全分析

$N-1$ 安全运行准则为正常运行条件下任一元件发生故障退出运行时系统仍能正常运行。满足 $N-1$ 安全运行准则的系统可以应对大部分配电网故障情况,因此对交直流混合配电网进行 $N-1$ 安全分析很

有必要。

文献[51]提出了考虑 $N-1$ 安全准则的配电网和储能的联合规划模型,该模型考虑了线路和DG 2类元件的故障类型,给出了分布式储能的选址定容和故障时线路转供方案。文献[52]提出了交直流混合配电网供电能力多目标优化模型,在满足 $N-1$ 安全运行准则下,通过优化设备容量和选取最佳电网结构,实现了交流区域和直流区域供电能力的最大化。系统供电能力成为判断系统结构安全性和设备容量裕度的一项重要指标。文献[53]提出了配电网安全距离的概念,将安全距离分为几何安全距离和状态安全距离,描述了系统越限的风险大小,实现了系统 $N-1$ 准则下安全性的定量评估。文献[54]建立了考虑需求响应的馈线可开放容量评估模型,考虑 $N-1$ 故障下馈线的转供情况,分析单条馈线可开放最大容量。文献[55]以 $N-1$ 故障下恢复失电负荷最大为目标建立了非线性优化模型,通过优化结果计算系统结构安全性指标和运行状态安全性指标,实现了对配电网运行安全性的合理评估。文献[56]提出了事故后果严重程度指标,分析了系统结构的安全性和系统整体运行的安全性。

但是以上研究只考虑了系统局部的安全运行点,不能整体地刻画出系统安全运行范围,且不能直接观察到当前运行点的安全裕度。

3.2 交直流混合配电网可靠性分析

交直流混合配电网含有大量VSC、直流断路器和直流变压器等电力电子设备,设备的可靠性关系着交直流配电网的运行安全,因此有必要对交直流配电网的可靠性进行评估。

文献[57]提出了直流配电网的VSC、直流断路器和直流变压器的可靠性模型,将传统交流配电网和直流配电网的可靠性进行对比,研究发现直流配电网的可靠性将会随着元器件的不断发展而不断接近甚至超越传统交流配电网。文献[58]对影响直流配电网可靠性的因素进行了分析,发现设备级冗余提高配电网可靠性的效果优于器件级冗余,但在设备级冗余增至一定程度后配电网可靠性将不会有更多的改善。文献[59]对高比例DG渗透下的直流配电网可靠性指标进行了计算,建立了各直流电力电子设备的马尔科夫可靠性模型,采用多场景技术描述风光出力的不确定性,更加符合实际情况。文献[60]提出了基于校正模型和序贯蒙特卡洛法的直流配电网可靠性评估方法,分析了DG、系统运行方式和元件故障率对直流配电网运行可靠性的影响。

文献[61]对含高渗透率可再生能源配电网的供电可靠性进行了评估,分析了可再生能源对负荷供电可靠性指标的提高作用。文献[62]建立了用户侧用电可靠性综合评价指标,包括用户侧指标和对比

指标。文献[63]采用主成分分析法构建了配电网供电可靠性指标体系,客观地确定了各项可靠性指标的权重,为实际工程优先选取指标参数提供了参考。

综上所述,相比于传统交流配电网,交直流混合配电网含有大量电力电子设备,此时设备可靠性分析显得十分重要,随机功率注入下建立交直流混合配电网可靠性评估指标对于保证系统安全运行至关重要。

3.3 交直流混合配电网安全域构建

“域”的形成可以直接准确地判断系统运行点的安全状态,从而确定优化校正策略,大幅提高了安全分析的效率^[64]。

初期针对配电网安全域的研究主要采用直流潮流模型,基于解析法构建安全边界,具体模型如下。

配电网安全域定义为系统满足安全约束条件下所有运行点的集合^[65]。设运行点集合 $\mathbf{W}$ 有封闭的边界,边界内为安全运行点,边界外为不安全运行点。假设运行点为馈线段负荷,则 $\mathbf{W}$ 可表示为:

$$\mathbf{W}=[F_1, F_2, \dots, F_n]^T \quad (26)$$

式中: $F_1, F_2, \dots, F_n$ 分别为馈线段1、2、 $\dots$ 、 n 的负荷。

安全域表达式为:

$$\begin{cases} P_i = \sum_{m \in T_i} f_m \\ f_m = \sum F_m \\ P_i \leq R_i \\ f_m \leq f_{R,m} \end{cases} \quad (27)$$

式中: P_i 为第 i 个变电站所接负荷; f_m 为馈线 m 所接负荷; T_i 表示第 i 个变电站; F_m 为馈线段 m 所接负荷; R_i 为变电站容量; $f_{R,m}$ 为馈线 m 的容量。

基于直流潮流模型的安全域模型只考虑了变电站容量约束和馈线容量约束,忽略了电压约束,仅适用于线路不长、无功补偿较充足的配电网系统。交直流混合配电网潮流模型为非线性模型,当配电网中无功补偿不完全充足、线路较长以及网损较大时,配电网的安全运行(安全域)有必要计及电压幅值约束,若只考虑馈线容量约束和主变容量约束将会造成运行控制策略过于乐观,或者构建的安全域无法真实刻画配电网的安全运行空间^[66-67]。鉴于此,本文提出了基于凸包络的交直流混合配电网非线性安全域模型,考虑了系统电压约束和设备容量约束。

配电网非线性安全域可表示为:

$$\Omega_{\text{DSSR}} = \{\mathbf{W} | \mathbf{h}(\mathbf{W}) = 0, \mathbf{g}(\mathbf{W}) \leq 0\} \quad (28)$$

式中: Ω_{DSSR} 为配电网安全域; $\mathbf{h}(\mathbf{W}) = 0$ 为等式约束条件; $\mathbf{g}(\mathbf{W}) \leq 0$ 为不等式约束条件。

采用凸包络法拟合安全边界点即可得到可视化的安全域空间,该凸包络为包含所有安全边界点的最小凸集。图2为以二维空间为例的安全域。由图

可知,安全边界点的凸包络为多个边界点的线性组合,本质上是将非线性的安全边界分段线性化的过程。基于一系列安全域边界点,凸包络安全域可以由MATLAB的convexHull函数生成。

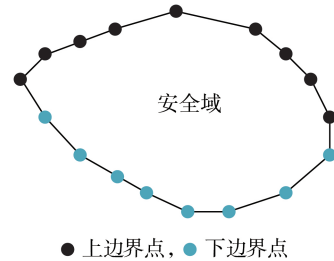


图2 基于凸包络的安全域(以二维空间为例)

Fig.2 Two-dimensional security region based on convex envelope

同时,凸包络法拟合不受运行点数量的限制,构建高维安全域时仍有较高的拟合精度^[68-69]。图3为以三维空间为例的安全域示意图。需要说明的是,凸包络安全域适用于高维空间,而不局限于二维/三维空间。

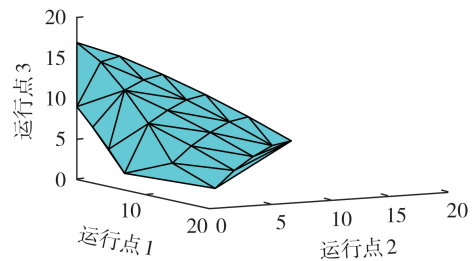


图3 交直流混合配电网三维安全域图像

Fig.3 Three-dimensional security region of AC/DC hybrid distribution network

以上关于安全域的研究针对的是正常运行条件下的交直流混合配电网,但交直流混合配电网的运行还需考虑 $N-1$ 安全准则,因此 $N-1$ 安全准则下交直流混合配电网的安全域也值得关注。

文献[70]提出了 $N-1$ 安全准则下柔性直流配电网的安全域模型,设定 $N-1$ 故障集,保证任一元件故障的情况下仍能满足运行约束,结合柔性直流配电网的运行方式分析了不同VSC控制策略下安全域的大小。文献[71]为改善 $N-1$ 安全域的保守性,提出了部分元件 $N-1$ 安全准则下的配电网安全域模型,分析了不同元件故障对于安全域大小的影响,得到了少数关键故障元件集合,若对其加强监控则可近似保证不发生故障,从而扩大了配电网的安全运行范围。文献[72]提出了一种 $N-1$ 安全准则下DG出力控制可视化方法,采用安全距离来评估系统的安全运行状态,求取主变和馈线 $N-1$ 故障时的风光最大出力范围。

需要说明的是,当交直流混合配电网接入设备

繁杂、运行结构多样时,低维的安全域模型不能完全地描述其安全运行状态,文献[70-72]所提模型可进一步从低维安全域拓展至高维安全域。

4 结论

本文综述了交直流混合配电网安全分析与优化调度的研究现状。首先介绍了交直流混合配电网潮流模型,该模型为交直流混合配电网安全分析与优化调度的基础;其次介绍了交直流混合配电网优化调度研究现状;最后阐述了交直流混合配电网的安全分析研究现状。基于当前的研究,笔者认为该领域内有如下方向值得深入探讨。

1)数据驱动下交直流混合配电网运行优化。当前可再生能源出力受天气影响较大,随机性较强,不确定参数的变化可能会影响交直流混合配电网的最优决策结果。此时,一方面海量的数据可以使得不确定性建模研究更为完善,为模型驱动类优化决策提供更为全面的输入信息;另一方面当随机变量很多、不确定性较强且随机信息概率分布不明确时,基于数据驱动的优化决策较为高效,因此有必要研究数据驱动下交直流混合配电网运行优化。

2)交直流混合配电网灵活快速控制策略。由于可再生能源波动性大,且交直流混合配电网拓扑多变,给交直流混合配电网安全运行带来挑战,此时交直流混合配电网灵活快速控制显得十分重要。柔性多状态开关的应用可以实现交直流混合配电网馈线的柔性互联,改善馈线功率失衡和电压波动问题。但目前研究侧重于单一拓扑结构与运行方式下的柔性多状态开关控制,多运行状态的交直流混合配电网柔性开关控制将是进一步的研究方向。

3)交直流混合配电网灵活性挖掘。随着负荷侧电动汽车、DG和温控负荷等灵活性资源增多,交直流混合配电网的能量管理更为灵活主动。同时储能技术日益完善,储能与负荷侧的互补使得电力用户(产消者)可以与电网进行双向能量交互,实现社会效用最大化,提高能源利用率。需求侧市场化交易的兴起使得产消者具有参与电力市场运行的能力,为交直流混合配电网的调度和运行带来机遇。因此交直流混合配电网的灵活性挖掘是当前值得研究的课题。

参考文献:

[1] 邹才能,熊波,薛华庆,等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发,2021,48(2):411-420.
ZOU Caineng, XIONG Bo, XUE Huaqing, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 411-420.

[2] WILLIAMS J H, JONES R A, HALEY B, et al. Carbon-neutral pathways for the United States[J]. AGU Advances, 2021, 2(1): e2020AV000284.

[3] 杨肖虎,罗剑波,郁琛,等. 适应大规模新能源并网的电力系统备用配置及优化综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 10-20, 63.
YANG Xiaohu, LUO Jianbo, YU Chen, et al. Review of power system reserve configuration and optimization for large-scale renewable energy integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 10-20, 63.

[4] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.

[5] 张俊涛,程春田,申建建,等. 考虑风光不确定性的可再生电网短期联合优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5921-5931.
ZHANG Juntao, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, et al. Short-term joint optimal operation method for high proportion renewable energy grid considering wind-solar uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5921-5931.

[6] 郝丽丽,王辉,王国栋,等. 含分布式电源配电网运行风险的影响因素溯源[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 27-33.
HAO Lili, WANG Hui, WANG Guodong, et al. Influence factor tracing of operation risk for distribution network with distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 27-33.

[7] 胡代豪,郭力,刘一欣,等. 计及光储快充一体站的配电网随机-鲁棒混合优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 507-519.
HU Daihao, GUO Li, LIU Yixin, et al. Stochastic / robust hybrid optimal dispatching of distribution networks considering fast charging stations with photovoltaic and energy storage[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 507-519.

[8] 董逸超,王守相,闫秉科. 配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2258-2266.
DONG Yichao, WANG Shouxiang, YAN Bingke. Review on evaluation methods and improvement techniques of DG hosting capacity in distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2258-2266.

[9] 张志昌,吴健,骆钊,等. 计及储能运行特性的独立型交直流混合微网优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 118-125.
ZHANG Zhichang, WU Jian, LUO Zhao, et al. Optimal scheduling for independent AC / DC hybrid microgrid considering operation characteristics of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 118-125.

[10] 高红均,刘俊勇,沈晓东,等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1644.
GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1644.

[11] 赵晋泉,居俐洁,罗卫华,等. 计及分区动态无功储备的无功电压控制模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 100-105.
ZHAO Jinquan, JU Lijie, LUO Weihua, et al. Reactive voltage control model and method considering partitioned dynamic reactive power reserve[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 100-105.

[12] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73.

[13] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.

- ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [14] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 1-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 1-11.
- [15] 姚良忠, 朱凌志, 周明, 等. 高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 36-43.
YAO Liangzhong, ZHU Lingzhi, ZHOU Ming, et al. Prospects of coordination and optimization for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 36-43.
- [16] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.
- [17] 马鑫, 郭瑞鹏, 王蕾, 等. 基于二阶锥规划的交直流主动配电网日前调度模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 144-150.
MA Xin, GUO Ruipeng, WANG Lei, et al. Day-ahead scheduling model for AC/DC active distribution network based on second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 144-150.
- [18] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [19] ERROUSSI R, AL-DURRA A, MUYEEN S M. A robust continuous-time MPC of a DC-DC Boost converter interfaced with a grid-connected photovoltaic system[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, 6(6): 1619-1629.
- [20] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [21] 雷婧婷, 安婷, 杜正春, 等. 含直流配电网的交直流潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 911-918, 1174.
LEI Jingting, AN Ting, DU Zhengchun, et al. A unified AC/DC Power flow algorithm with DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 911-918, 1174.
- [22] 朱永强, 贾利虎, 蔡冰倩, 等. 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2756-2767.
ZHU Yongqiang, JIA Lihu, CAI Bingqian, et al. Overview on topologies and basic control strategies for hybrid AC/DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2756-2767.
- [23] 和敬涵, 李智诚, 王小君, 等. 计及多种控制方式的直流电网潮流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 712-718.
HE Jinghan, LI Zhicheng, WANG Xiaojun, et al. Power flow algorithm for DC grid considering various control modes[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 712-718.
- [24] 杨捷, 金新民, 杨晓亮, 等. 交直流混合微网功率控制技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 30-40.
YANG Jie, JIN Xinmin, YANG Xiaoliang, et al. Overview on power control technologies in hybrid AC-DC microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 30-40.
- [25] 刘晓林, 王旭, 蒋传文, 等. 计及VSC运行约束的交直流混合配电网分布式优化调度方法[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1089-1099.
LIU Xiaolin, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Distributed optimal scheduling of hybrid AC-DC distribution grid considering VSC operation constraints[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1089-1099.
- [26] 白晓清, 韦化, Katsuki Fujisawa. 求解最优潮流问题的内点半定规划法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 56-64.
BAI Xiaoqing, WEI Hua, KATSUKI F. Solution of optimal power flow problems by semi-definite programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 56-64.
- [27] 董雷, 田爱忠, 于汀, 等. 基于混合整数半定规划的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 66-72, 125.
DONG Lei, TIAN Aizhong, YU Ting, et al. Reactive power optimization for distribution network with distributed generators based on mixed integer semi-definite programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 66-72, 125.
- [28] TAYLOR J A, HOVER F S. Convex models of distribution system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1407-1413.
- [29] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [30] 郑能, 丁晓群, 管志成, 等. 基于场景法的配电网有功-无功协调优化[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1640-1651.
ZHENG Neng, DING Xiaqun, GUAN Zhicheng, et al. Coordinated optimization of active power and reactive power in distribution network based on scenario method[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1640-1651.
- [31] BIZUAYEHU A W, DE LA NIETA A A S, CONTRERAS J, et al. Impacts of stochastic wind power and storage participation on economic dispatch in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1336-1345.
- [32] ABBASPOURTORBATI F, CONEJO A J, WANG J, et al. Three- or two-stage stochastic market-clearing algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3099-3110.
- [33] 张沈习, 程浩忠, 邢海军, 等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 1-9.
ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, XING Haijun, et al. Review of DG planning considering uncertainties for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 1-9.
- [34] LI Pan, JIN Baihong, WANG Dai, et al. Distribution system voltage control under uncertainties using tractable chance constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5208-5216.
- [35] SOLTANI N Y, NASIRI A. Chance-constrained optimization of energy storage capacity for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2760-2770.
- [36] 许寅, 李佳旭, 王颖, 等. 考虑光伏出力不确定性的园区配电网日前运行计划[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 85-91, 105.
XU Yin, LI Jiaxu, WANG Ying, et al. Day-ahead operation plan for campus distribution network considering uncertainty of photovoltaic output[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 85-91, 105.

- [37] 孙峰洲,刘海涛,陈庆,等. 考虑新能源波动区间的交直流配电网下垂斜率鲁棒优化方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(14): 62-70.
SUN Fengzhou, LIU Haitao, CHEN Qing, et al. Robust optimization method for droop slopes in AC/DC distribution network considering fluctuation interval of renewable energy source[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 62-70.
- [38] FU Yang, ZHANG Zhiqian, LI Zhenkun, et al. Energy management for hybrid AC/DC distribution system with microgrid clusters using non-cooperative game theory and robust optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1510-1525.
- [39] ZHENG W, HUANG W, HILL D J, et al. An adaptive distributionally robust model for three-phase distribution network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1224-1237.
- [40] ZHOU Y, SHAHIDEHPOUR M, WEI Z, et al. Distributionally robust co-optimization of energy and reserve for combined distribution networks of power and district heating[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2388-2398.
- [41] 孙旭,邱晓燕,张志荣,等. 基于数据驱动的交流配电网分布鲁棒优化调度[J/OL]. 电网技术. [2021-05-21]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2273>.
- [42] 魏伟,赵学良,朱洁,等. 基于鲁棒优化的交直流混合配电网供电能力评估[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 87-93.
WEI Wei, ZHAO Xueliang, ZHU Jie, et al. Power supply capability evaluation of AC/DC hybrid distribution network based on robust optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 87-93.
- [43] CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Adaptive robust day-ahead dispatch for urban energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1379-1390.
- [44] DING T, HU Y, BIE Z. Multi-stage stochastic programming with nonanticipativity constraints for expansion of combined power and natural gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 317-328.
- [45] 张璐,唐巍,梁军,等. 基于VSC的交直流混合中压配电网功率-电压协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6067-6075.
ZHANG Lu, TANG Wei, LIANG Jun, et al. Power-voltage coordinated control in hybrid AC/DC medium voltage distribution networks based on VSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6067-6075.
- [46] AHMED H M A, SALAMA M M A. Energy management of AC-DC hybrid distribution systems considering network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4583-4594.
- [47] 曾梦隆,韦钢,朱兰,等. 交直流配电网中电动汽车充换储一体站规划[J/OL]. 电力系统自动化. [2021-06-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210524.1438.006.html>. DOI: 10.7500/AEPS20210112007.
- [48] 王硕,杨镜非,王冠男,等. 考虑多元用户报价的交直流混合配电网动态经济调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 82-88.
WANG Shuo, YANG Jingfei, WANG Guannan, et al. Dynamic economic dispatch of AC/DC hybrid distribution network considering multi-user bidding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 82-88.
- [49] 王文超,庞丹,成龙,等. 考虑电价型需求响应的交直流混合配电网优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1675-1682.
WANG Wenchao, PANG Dan, CHENG Long, et al. Optimal dispatch approach for hybrid AC/DC distribution networks considering price-based demand response[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1675-1682.
- [50] 窦晓波,皇甫霄文,全相军,等. 交直流配电网柔性多状态开关电压自适应控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 68-76.
DOU Xiaobo, HUANGFU Xiaowen, QUAN Xiangjun, et al. Adaptive voltage control strategy for soft normally open point in AC/DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 68-76.
- [51] 林哲,胡泽春,宋永华. 考虑N-1准则的配电网与分布式储能联合规划[J/OL]. 中国电机工程学报. [2021-06-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20201124.1106.002.html>. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.201437.
- [52] 张释中,裴玮,杨艳红,等. 基于供电能力的交直流混合配电网结构优选和设备容量优化[J/OL]. 中国电机工程学报. [2021-06-26]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190192>.
- [53] 肖峻,林启思,左磊,等. 有源配电网的安全距离与安全分析方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 76-86.
XIAO Jun, LIN Qisi, ZUO Lei, et al. Security distance and security analysis method for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 76-86.
- [54] 孙伟卿,黄福泉,张巍. 考虑需求响应的馈线可开放容量评估[J/OL]. 电力自动化设备. [2021-06-16]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202101008>.
- [55] 陈珂宁,吴文传,郭昆亚,等. 基于负荷恢复策略的配电网N-1安全评估[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3241-3246.
CHEN Kening, WU Wenchuan, GUO Kunya, et al. Security evaluation under N-1 for distribution network based on load restoration strategies[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3241-3246.
- [56] 刘伟,郭志忠. 配电网安全性指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 85-90.
LIU Wei, GUO Zhizhong. Research on security indices of distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 85-90.
- [57] 曾嘉思,徐习东,赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [58] 史清芳,徐习东,赵宇明. 电力电子设备对直流配电网可靠性影响[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 725-732.
SHI Qingfang, XU Xidong, ZHAO Yuming. Effects of power electronic devices on DC distribution reliability[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 725-732.
- [59] 马钰,韦钢,李扬,等. 考虑孤岛源-荷不确定性的直流配电网可靠性评估[J/OL]. 电工技术学报. [2021-05-22]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201405>.
- [60] 李江,刘伟波,李国庆,等. 基于序贯蒙特卡洛法的直流配电网可靠性评估与预测[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 154-162.
LI Jiang, LIU Weibo, LI Guoqing, et al. DC distribution networks reliability evaluation and prediction based on sequential Monte Carlo method[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(1): 154-162.
- [61] 丁明,胡迪,毕锐,等. 含高渗透率可再生能源的配电网可靠性分析[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 194-202.
DING Ming, HU Di, BI Rui, et al. Reliability analysis of distribution system containing high penetration renewable energy[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(2): 194-202.
- [62] 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): 222-229.
OUYANG Sen, LIU Liyuan. Reliability index system of distribution network for power consumer and its comprehensive as-

- assessment method[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 222-229.
- [63] 肖白, 刘亚伟, 施永刚, 等. 基于主成分分析的中压配电网供电可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 7-12.
XIAO Bai, LIU Yawei, SHI Yonggang, et al. Power supply reliability assessment of mid-voltage distribution network based on principal component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 7-12.
- [64] 肖峻, 祖国强, 白冠男, 等. 配电系统安全域的数学定义与存在性证明[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4828-4836.
XIAO Jun, ZU Guoqiang, BAI Guannan, et al. Mathematical definition and existence proof of distribution system security region[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4828-4836.
- [65] 祖国强, 肖峻, 穆云飞, 等. 计及分布式电源与需求响应的智能配电系统安全域[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 100-108.
ZU Guoqiang, XIAO Jun, MU Yunfei, et al. Security region for smart distribution system considering distributed generator and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 100-108.
- [66] 肖峻, 左磊, 祖国强, 等. 基于潮流计算的配电系统安全域模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4941-4949.
XIAO Jun, ZUO Lei, ZU Guoqiang, et al. Model of distribution system security region based on power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4941-4949.
- [67] 裴蕾, 卫志农, 陈胜, 等. 基于凸包络的交直流混合配电网安全域[J/OL]. 电力系统自动化. [2021-08-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210705.0901.002.html>. DOI: 10.7500/AEPS20210220003.
- [68] CHEN S, WEI Z, SUN G, et al. Convex hull based robust security region for electricity-gas integrated energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1740-1748.
- [69] CHEN S, WEI Z, SUN G, et al. Steady-state security regions of electricity-gas integrated energy systems[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [70] 肖峻, 莫少雄. 柔性直流配电网的 $N-1$ 安全域[J/OL]. 高压技术. [2021-06-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210284>.
- [71] 肖峻, 伊丽达, 余步鑫, 等. 部分元件 $N-1$ 下的配电网供电能力与安全域[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1170-1178.
XIAO Jun, YI Lida, SHE Buxin, et al. Total supply capability and distribution system security region considering certain components $N-1$ [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1170-1178.
- [72] 刘佳, 程浩忠, 李思韬, 等. 考虑 $N-1$ 安全约束的分布式电源出力控制可视化方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 24-30.
LIU Jia, CHENG Haozhong, LI Sitao, et al. Visualization method of output power control of distributed generators considering $N-1$ security constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 24-30.

作者简介:



卫志农

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士,主要研究方向为配电网态势感知与优化运行(E-mail: wzn_nj@263.net);

裴蕾(1996—),女,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向为交直流混合配电网运行与控制(E-mail: 2474533628@qq.com);

陈胜(1990—),男,江苏溧阳人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为市场环境下的综合能源系统规划与运行(E-mail: chenshenghu@163.com)。

(编辑 李莉)

Review on optimal operation and safety analysis of AC / DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy

WEI Zhinong¹, PEI Lei¹, CHEN Sheng¹, ZHAO Jingtao², FU Qiang²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. NARI Technology Company Limited, Nanjing 211100, China)

Abstract: The access of high proportion of clean energy improves energy efficiency and reduces carbon emissions, but the output uncertainty brings challenges to the safe operation of AC / DC hybrid distribution network. Meanwhile, the efficient scheduling of flexible resources can promote the consumption of wind power and photovoltaic resources, and realize the safe and economic operation of AC / DC hybrid distribution network. In view of this, the research on the optimal operation and safety analysis of AC / DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy is reviewed. Firstly, the power flow models and operation constraints of AC / DC hybrid distribution network are introduced, including nonlinear model, linearized model and convex relaxation model. Secondly, the research on the optimal dispatching of AC / DC hybrid distribution network is described, including stochastic optimization method, two- and multi-stage stochastic optimization model and flexible operation. Then, the $N-1$ safety analysis and reliability evaluation are carried out for AC / DC hybrid distribution network, and the safety region model is constructed. Finally, the research directions of safety analysis and optimal dispatching of AC / DC hybrid distribution network in the future are prospected.

Key words: carbon neutral; AC / DC hybrid distribution network; renewable energy; safety analysis; optimal dispatching