计及源荷不确定性的混合交直流主动配电网 分层-分布式优化调度

梁海平1,王 岩1,刘英培1,王鑫明2

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003;2. 国网河北省电力有限公司,河北 石家庄 050021)

摘要:混合交直流主动配电网是未来配电网发展的主要形式,针对混合交直流主动配电网集中式优化存在优 化时间长、对区域内隐私保护性不强以及源荷出力不确定性的问题,提出计及源荷不确定性的混合交直流主 动配电网分层-分布式优化调度策略。该策略在混合交直流主动配电网区域内以预测场景和抽样场景的期 望运行成本之和最小为目标,建立两阶段随机规划模型,采用Benders分解算法分解成主、子问题交替迭代求 解;在区域间为兼顾各区域数据私密性及实现并行计算,以各自区域内主问题运行成本最优为目标,采用同 步型交替方向乘子法进行分布式计算。所提策略通过各区域主问题连接区域间和区域内形成整体优化,从 而保证模型达到全局最优。最后,通过算例分析验证了所提的分层-分布式优化调度策略的有效性。

关键词:混合交直流主动配电网;两阶段随机规划;Benders分解算法;同步型交替方向乘子法;分层-分布式 优化调度

中图分类号:TM 727;TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202107003

0 引言

随着负荷的不断增长以及电力市场的逐渐放 开,未来的电力系统将更加灵活可控,同时随着大量 分布式电源DG(Distributed Generation)以及电力电 子设备接入传统配电网,促使传统配电网逐渐向主 动配电网ADN(Active Distribution Network)过渡。 由于直流配电网具有线损小、不涉及相位的调控等 优点,因此利用柔性直流技术构建混合交直流主 动配电网是对主动配电网技术的进一步发展^[1]。柔 性互联装置如电压源型换流器VSC(Voltage Source Converter)可以对潮流进行双向控制,从而对互联系 统进行合理的功率分配。通过交直流互联的主动配 电网可以实现广域能源调度,这是未来的重要发展 方向^[2]。

混合交直流主动配电网优化调度属于互联区域 优化运行,其研究方法主要分为集中式优化和分布 式优化2种。文献[3]考虑电价型需求响应DR(Demand Response),以最大化配电网主体的总收益为 目标,建立了混合交直流主动配电网优化模型并进 行求解,得到了很好的效果。文献[4]通过VSC将直 流配电网络与现有交流网络互联,设计了含有可转 移负载的集中式混合整数线性优化模型。与以上文 献类似,文献[5-8]均是研究集中式优化,随着主动 配电网接入设备的增多以及互联区域的日渐扩大, 所有信息和数据都需传入调度中心进行优化,将给

收稿日期:2020-10-07;修回日期:2021-04-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607069) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607069) 调度中心带来通信负担,故而研究去中心化的分布 式优化调度具有很强的现实意义。文献[9]针对含多 微电网的主动配电网具有分散自治的特点,提出基于 目标级联法的优化调度模型,其计算效率和收敛性 较好。文献[10]利用协同演化博弈理论对微电网和 配电网进行分布式优化,但是没有考虑新能源和负荷 的不确定性。文献[11]针对电力电子变压器容量 小、过载能力差的特点,提出一种分层优化模型来优 化主网、交流微电网和直流微电网的功率调度曲线, 但是同样没有考虑源荷不确定性带来的影响。文献 [12]提出一种考虑多元用户报价的交直流混合电网 动态经济调度模型,采用该模型可以降低电网公司 购电成本,但是模型中没有考虑新能源出力的不确 定性且模型采用集中式优化。文献[13]考虑风电不 确定性,针对混合交直流主动配电网采用交替方向 乘子法 ADMM(Alternating Direction Method of Multipliers)进行了分布式优化,但是模型中也只考虑了 风电不确定性,并未对负荷不确定性进行建模分析。

综上,本文提出计及源荷不确定性的混合交直 流主动配电网分层-分布式优化调度策略,区域内分 层优化模型充分考虑本区域源荷不确定性,首先构建 藤 Copula模型描述源荷相关性,结合蒙特卡洛抽样 技术生成多场景数据并进行削减,然后建立两阶段 随机规划模型,将预测场景下的优化视为第一阶段, 多个抽样场景下的优化视为第二阶段,通过 Benders 分解算法将其转化为含有主、子问题的分层优化问 题进行交替迭代求解;区域间优化通过同步型交替 方向乘子法 SADMM(Synchronous Alternating Direction Method of Multipliers)实现交流配电网和直流 配电网之间的分布式优化,所建立的模型通过主问 题连接本区域子问题和相邻区域主问题进行优化, 从而保证区域内和区域间协同达到最优目标。最 后,通过算例分析对本文提出的分层-分布式优化调 度策略进行了验证。

1 分层-分布式优化调度框架

本文提出的混合交直流主动配电网优化调度策略分为交直流互联区域间分布式优化和区域内分层 优化,综合框架如图1所示。





区域内分层优化为两阶段随机规划,将其分解 成一个预测场景下的主问题和多个抽样场景下的子 问题,主问题为子问题提供两阶段耦合变量,如联络 线购售电状态、储能充放电状态等,各个子问题根据 主问题传递的优化结果进行子问题的优化,同时向 主问题返回 Benders Cut约束。区域间分布式优化 采用SADMM,以预测场景下联络线交互功率一致为 前提进行求解。

2 区域内分层优化

混合交直流主动配电网各自内部为两阶段随机 规划模型,其中第一阶段基于日前预测数据进行优 化,第二阶段基于抽样数据进行优化。

2.1 藤Copula模型的建立及场景抽取与削减

藤 Copula模型可以将多维变量相关性问题转化 成多个二维变量的相关性问题^[14],建立藤 Copula模 型分析风光荷三者之间的相关性,并且借助蒙特卡 洛抽样抽取具有相关性的大量风光荷功率场景。

本文利用C藤结构分析风光荷三者之间的相关 性,在C藤模型^[14]中,设有n维变量,则其联合概率 分布和联合概率密度可以表示为:

$$\begin{cases} F(x_{1}, \dots, x_{n}) = C(F_{1}(x_{1}), \dots, F_{n}(x_{n})) \\ f(x_{1}, \dots, x_{n}) = \prod_{k=1}^{n} f_{k}(x_{k}) \times \\ \prod_{j=1}^{n-1} \prod_{i=1}^{n-j} c_{j,j+i|1,\dots,j-1} \left(F(x_{j} | x_{1}, \dots, x_{j-1}), F(x_{j+i} | x_{1}, \dots, x_{j-1}) \right) \end{cases}$$

$$(1)$$

式中: $F(\cdot)$ 和 $f(\cdot)$ 分别为联合概率分布和联合概率 密度函数; $f_k(x_k)$ 、 $F_k(x_k)$ ($k=1, 2, \dots, n$)分别为变量 x_k 的概率密度函数和边缘分布函数; $C(\cdot)$ 和 $c(\cdot)$ 分别为 Copula概率分布函数和Copula概率密度函数。

式(1)中的条件分布解释如下:

$$F(x|v) = \frac{\partial C\left(F(x|v_{-j}), F(v_j|v_{-j})\right)}{\partial F(v_j|v_{-j})}$$
(2)

式中:v为所研究的多个变量构成的向量; v_j 为向量v的第j个分量; v_j 为向量v去掉 v_i 之后形成的向量。

参照文献[15]建立C藤Copula模型,结合蒙特 卡洛抽样技术进行源荷场景抽样及削减的步骤简述 如下:

1)首先根据风光荷(随机变量)历史数据得到相 应累积概率分布函数和概率密度函数,然后根据历 史数据的分布特征,确定风光荷两两之间Copula函 数类型以及相关参数;

2)对C藤第一层变量 x_1 的累积概率分布函数值 $U_1 = F_1(x_1) \pm [0,1]$ 之间进行蒙特卡洛抽样,得到一 定数量的 U_1 采样点,结合式(2)可得到第二层变量 x_2 的累积概率分布函数值 $U_2 = F_2(x_2)$,依此类推,直 至求得所有变量的累积分布函数值;

3)根据步骤2)所得到的累积概率分布函数值 对步骤1)中的累积概率分布函数进行逆变换抽样, 进而得到大量风光荷场景,进行Cholesky分解^[16],并 采用同步回代削减方法进行削减。

2.2 交/直流换流站建模

连接混合交直流主动配电网的换流站是一种可 控性强且可以对功率和电压连续调节的装置,换流 站的简化模型如图2所示。图中,V^{AC}_{Li},V^{DC}_{Li}分别为t 时段换流站i交流侧和直流侧的电压;S^{AC}_{Li}为t时段交 流侧注入换流站i的视在功率;P^{DC}_{Li}为t时段换流站i 输入直流侧的功率;I^{AC}_{Li},I^{DC}分别为t时段换流站i交 流侧和直流侧的电流。



图2 换流站简化示意图

Fig.2 Simplified schematic diagram of converter station

$$V_{t,i}^{AC} = K_{c}M_{i}V_{t,i}^{DC}, P_{t,i}^{AC} = P_{t,i}^{DC} + P_{t,i}^{noss}$$
 (3)

A tree able to the second to

$$P_{t,i}^{\text{loss}} = \eta_i^{\text{inv}} P_{t,i}^{\text{DC}}, \ P_{t,i}^{\text{DC}} = V_{t,i}^{\text{DC}} I_{t,i}^{\text{DC}}$$
(4)

$$\sqrt{\left(Q_{t,i}^{\mathrm{AC}}\right)^2 + \left(P_{t,i}^{\mathrm{AC}}\right)^2} \leq S_{t,i}^{\mathrm{AC,\,max}} \tag{5}$$

式中: K_e 为换流站的变换系数,通常取 $\sqrt{3}/2\sqrt{2}^{[17]}$; M_i 为换流站i的调制比; P_{ti}^{AC} 为t时段交流侧注入换 流站*i*的有功功率; $P_{t,i}^{los}$ 为*t*时段换流站*i*有功损耗; η_{i}^{lov} 为换流站*i*损耗系数; $Q_{t,i}^{AC}$ 为*t*时段换流站*i*从交流 侧吸收的无功功率; $S_{t,i}^{AC,max}$ 为*t*时段换流站*i*所能流过 的最大视在功率。式(3)为换流站两侧电压关系和 换流站功率平衡方程; 式(4)为换流站有功损耗和有 功功率的关系以及直流侧欧姆定律; 式(5)为换流站 容量约束。

2.3 区域内两阶段随机规划

如2.1节所述,基于抽样和预测数据建立两阶段 随机规划模型,包括交流主动配电网和直流主动配 电网的模型。

本文研究的交流配电网包含柴油发电机、风电、 光伏、储能、基于电价的需求响应-可平移负荷、电 容器组CB(Capacitor Bank)、静止无功补偿器SVC (Static Var Compensator)等,建立的数学模型如下。

1)目标函数。

交流配电网的目标函数为预测场景目标函数和 抽样场景目标函数期望值之和最小,即:

$$\min f_1(X_1) + E(f_2(X_2)) \tag{6}$$

式中: X_1 和 X_2 分别为第一阶段(预测场景)和第二阶段(抽样场景)的决策变量所组成的向量; f_1 和 f_2 分别为预测场景和抽样场景目标函数; $E(\cdot)$ 表示求期望。

由于*f*₁与*f*₂表达式在形式上相同,为了节省篇 幅,将两阶段目标函数合并列写,此时目标函数(式 (6))可表示为:

$$\min \sum_{s=0}^{N_{\rm S}} \omega_s \sum_{t=1}^{T} \left[\sum_{i=1}^{N_{\rm C}} C_{s,i,t}^{\rm G} + \sum_{j=1}^{J} \varphi_j D_{s,j,t}^{\rm u} \Delta t + \sum_{i=1}^{N_{\rm ESS}} \lambda^{\rm ESS} \left(P_{s,i,t}^{\rm ch} + P_{s,i,t}^{\rm d} \right) \Delta t + \left(P_{s,t}^{\rm buy} \lambda_t^{\rm buy} - P_{s,t}^{\rm sell} \lambda_t^{\rm sell} \right) \Delta t + \sum_{i=1}^{N_{\rm DC}} \left(P_{s,i,t}^{\rm buy, ex} \lambda_t^{\rm buy} - P_{s,i,t}^{\rm sell, ex} \lambda_t^{\rm sell} \right) \Delta t + \sum_{i=1}^{N_{\rm CB}} \lambda^{\rm CB} \left| C_{s,i,t}^{\rm CB} - C_{s,i,t-1}^{\rm CB} \right| \right] (7)$$

式中: N_s 为第二阶段场景数量;s为表示场景序号的 变量,为了便于区分两阶段的场景,规定变量的下标 s取0时表示第一阶段变量,s取1、2、…、 N_s 时表示第 二阶段变量; ω_s 为场景s出现的概率;T为优化时段 数量; N_c 为交流配电网中发电机数量; $C_{s,i,t}^c$ 为场景s下t时段发电机i的运行成本;J为可平移负荷节点 数量; $D_{s,i,t}^u$ 为场景s下t时段平移到节点j的功率; φ_j 为节点j可平移负荷的补偿价格; Δt 为单个优化时 段的时间间隔; N_{ESS} 为储能系统数量; λ^{ESS} 为调用储 能的单价; $P_{s,i,t}^{\text{eh}}$ 分别为场景s下t时段储能系统i的充、放电功率; $P_{s,i,t}^{\text{sell}}$ 分别为场景s下t时段陶、售电 单价; N_{DC} 为与直流区域相连的节点数; $P_{s,i,t}^{\text{buy}}$ 、 $P_{s,i,t}^{\text{ell}}$ 分别为场景s下t时段交流区域向直流区域i购、售 电功率; N_{CB} 为含有电容器组的节点数量; λ^{CB} 为电容器组投切成本; $C_{s,i,t}^{CB}$ 、 $C_{s,i,t-1}^{CB}$ 分别为场景 $s \ge t$ 时段和t-1时段节点i投入电容器组数。

2)主要约束。

交流配电网中的主要约束包括第一阶段约束和 第二阶段约束,为了节省篇幅,将两阶段约束列写在 一起,具体约束如下。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{s,t}^{\text{buy}} \leq \alpha_{s,t} P_{s,t}^{\text{balance}}, \ 0 \leq P_{s,t}^{\text{sell}} \leq \beta_{s,t} P_{s,t}^{\text{balance}} \\ \alpha_{s,t}, \beta_{s,t} \in \{0, 1\}, \ 0 \leq \alpha_{s,t} + \beta_{s,t} \leq 1 \end{cases}$$
(8)

式中: $s \in \{0, 1, \dots, N_s\}; \alpha_{s,t} \beta_{s,t} \beta_{s,t} \beta_{s,t}$ 分别为场景s = t时段 配电网向上级电网购、售电状态变量; $P_{s,t}^{\text{balance}}$ 为场景s下t时段配电网向上级电网购、售电功率的上限。式(8)为配电网与上级电网购售电功率约束。

 $\begin{cases} 0 \leq P_{s,i,t}^{\text{buy},\text{ex}} \leq \alpha_{s,i,t}^{\text{buy},\text{ex}} P_{s,i,t}^{\text{ex,max}}, \ 0 \leq P_{s,i,t}^{\text{sell},\text{ex}} \leq \beta_{s,i,t}^{\text{sell},\text{ex}} P_{s,i,t}^{\text{ex,max}} \\ \alpha_{s,i,t}^{\text{buy},\text{ex}}, \beta_{s,i,t}^{\text{sell},\text{ex}} \in \{0,1\}, \ 0 \leq \alpha_{s,i,t}^{\text{buy},\text{ex}} + \beta_{s,i,t}^{\text{sell},\text{ex}} \leq 1 \end{cases}$ (9)

式中: $s \in \{0, 1, \dots, N_s\}; \alpha_{s,i,t}^{huy,ex}, \beta_{s,i,t}^{sell,ex} 分别为场景<math>s \ge t$ 时段交流配电网向直流配电网i购、售电状态变量; $P_{s,i,t}^{ex,max}$ 为场景 $s \ge t$ 时段交流配电网向直流配电网i购、 售电功率的上限。式(9)为交流配电网与直流配电网 交换有功功率约束。

$$\begin{cases} P_i^{\text{G,min}} \leq P_{s,i,t}^{\text{G}} \leq P_i^{\text{G,max}} \\ Q_i^{\text{G,min}} \leq Q_{s,i,t}^{\text{G}} \leq Q_i^{\text{G,max}} \end{cases}$$
(10)

式中: $s \in \{0, 1, \dots, N_s\}; P_{s,i,i}^c, Q_{s,i,i}^c$ 分别为场景 $s \vdash t$ 时 段发电机i的有功、无功功率; $P_i^{G,\min}, Q_i^{G,\min}$ 分别为发 电机i的有功、无功功率的下限; $P_i^{G,\max}, Q_i^{G,\max}$ 分别为 发电机i的有功、无功功率的上限。式(10)为发电机 有功和无功运行约束。

$$-Q_i^{\text{SVC, max}} \leq Q_{s,i,t}^{\text{SVC}} \leq Q_i^{\text{SVC, max}}$$
(11)

$$0 \leq C_{s,i,t}^{\text{CB}} \leq C_{s,i,t}^{\text{CB, max}}, \ Q_{s,i,t}^{\text{CB}} = C_{s,i,t}^{\text{CB}} q_i^{\text{CB}}$$
(12)

式中: $s \in \{0, 1, \dots, N_s\}; Q_{s,i,t}^{\text{SVC}}$ 为场景 $s \top t$ 时段节点i的 SVC 无功出力; $Q_i^{\text{SVC,max}}$ 为节点i的 SVC 无功出力上 限; $C_{s,i,t}^{\text{CB,max}}$ 为场景 $s \top t$ 时段节点i可以投入的最大电 容器组数; q_i^{CB} 为节点i投入的每组电容器的容量; $Q_{s,i,t}^{\text{CB}}$ 为场景 $s \top t$ 时段节点i由电容器组注入的无功 功率,其不能连续调节。式(11)为 SVC 运行约束, SVC 可以对无功功率进行连续调节;式(12)为电容 器组无功运行约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{s,k,t}^{W} \leq P_{s,k,t}^{W,\max}, \ 0 \leq Q_{s,k,t}^{W} \leq Q_{s,k,t}^{W,\max} \\ 0 \leq P_{s,k,t}^{PV} \leq P_{s,k,t}^{PV,\max}, \ 0 \leq Q_{s,k,t}^{PV} \leq Q_{s,k,t}^{PV,\max} \end{cases}$$
(13)

式中: $s \in \{0, 1, \dots, N_s\}; P_{s,k,t}^w, Q_{s,k,t}^w 分别为场景 s下t时$ $段节点 k 处风电向电网注入的有功、无功功率; <math>P_{s,k,t}^{PV}$ $Q_{s,k,t}^{PV}$ 分别为场景 s下t时段节点 k 处光伏向电网注入 的有功、无功功率; $P_{s,k,t}^{W,max}$ 、 $Q_{s,k,t}^{W,max}$ 分别为场景 s下t时 段节点 k 处风电向电网注入的有功、无功功率的上 限; $P_{s,k,t}^{PV,max}$ 、 $Q_{s,k,t}^{PV,max}$ 、 $Q_{s,k,t}^{PV,max}$ 、 $Q_{s,k,t}^{PV,max}$ 、 $Q_{s,k,t}^{PV,max}$) $Q_{s,k,t}^{PV,max}$, $Q_{s,k,t}^{PV,max}$) $Q_{s,k,t}$ 向电网注入的有功、无功功率的上限。式(13)为风、 光运行约束。

$$\begin{cases} E_{s,i,t}^{\min} \leq E_{s,i,t} \leq E_{s,i,t}^{\max}, \quad 0 \leq U_{s,i,t}^{d} + U_{s,i,t}^{ch} \leq 1\\ 0 \leq P_{s,i,t}^{d} \leq P_{s,i,t}^{d,\max} U_{s,i,t}^{d}, \quad 0 \leq P_{s,i,t}^{ch} \leq P_{s,i,t}^{ch,\max} U_{s,i,t}^{ch} \quad (14)\\ E_{s,i,t} = E_{s,i,t-1} - P_{s,i,t}^{d} \Delta t / \eta_{d} + P_{s,i,t}^{ch} \Delta t \eta_{c} \end{cases}$$

式中: $s \in \{0, 1, \dots, N_s\}$; $E_{s,i,t}, E_{s,i,t-1}$ 分别为场景 $s \vdash t$ 时 段和t-1时段储能系统i的荷电量; $E_{s,i,t}^{\min}, E_{s,i,t}^{\max}$ 分别为 场景 $s \vdash t$ 时段储能系统i的最小、最大荷电量; $U_{s,i,t}^{ch}$ 、 $U_{s,i,t}^{d}$ 为二进制变量, 分别表示储能系统i在场景 $s \vdash t$ 时段的充、放电状态; $P_{s,i,t}^{ch,\max}$ 分别为场景 $s \vdash t$ 时 段储能系统i的充、放电功率的上限; η_c 、 η_d 分别为 充、放电效率。式(14)为储能系统运行约束。

$$\begin{cases} P_{s,ij,t} = \frac{P_{s,ij,t}^{2} + Q_{s,ij,t}^{2}}{V_{s,i,t}^{2}} r_{ij} + P_{s,j,t} + \sum_{k \in j} P_{s,jk,t} \\ Q_{s,ij,t} = \frac{P_{s,ij,t}^{2} + Q_{s,ij,t}^{2}}{V_{s,i,t}^{2}} x_{ij} + Q_{s,j,t} + \sum_{k \in j} Q_{s,jk,t} \\ V_{s,i,t}^{2} = V_{s,j,t}^{2} + 2(r_{ij}P_{s,ij,t} + x_{ij}Q_{s,ij,t}) - (r_{ij}^{2} + x_{ij}^{2}) \frac{P_{s,ij,t}^{2} + Q_{s,ij,t}^{2}}{V_{s,i,t}^{2}} \end{cases}$$
(15)

式中: $s \in \{0, 1, \dots, N_s\}$; $P_{s,ij,t} Q_{s,ij,t}$ 分别为场景 $s \ge t$ 时 段支路ij上的有功、无功功率; $P_{s,j,t} Q_{s,j,t}$ 分别为场景 $s \ge t$ 时段支路jk上的有功、无功功率; $P_{s,j,t} Q_{s,j,t}$ 分别 为场景 $s \ge t$ 时段节点j所有有功、无功功率,即负荷 功率和分布式电源出力等功率之差; $k \in j$ 表示节点k为与节点j相连的节点; $V_{s,i,t} \bigvee_{s,j,t}$ 分别为场景 $s \ge t$ 时 段节点i和节点j的电压; $r_{ij} x_{ij}$ 分别为支路ij的电阻 和电抗。式(15)为 DistFlow潮流约束,将该约束通 过二阶锥松弛^[18]转变成二阶锥约束。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{J} D_{s,j,t}^{u} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{J} D_{s,j,t}^{d} \\ P_{s,j,t}^{new} = P_{s,j,t}^{old} + D_{s,j,t}^{u} - D_{s,j,t}^{d} \\ 0 \leqslant D_{s,j,t}^{u} \leqslant \lambda_{s,j,t}, \quad 0 \leqslant D_{s,j,t}^{d} \leqslant \lambda_{s,j,t} \\ P_{s,j,t}^{old} = P_{s,j,t}^{base} + \lambda_{s,j,t} \end{cases}$$
(16)

式中: $s \in \{0, 1, \dots, N_s\}; D^d_{s,j,t}$ 为场景 $s \upharpoonright t$ 时段节点j由 于实施负荷平移而减少的负荷; $\lambda_{s,j,t}$ 为场景 $s \sqsubset t$ 时 段节点j平移负荷的上限; $P^{\text{old}}_{s,j,t}$ 、 $P^{\text{new}}_{s,j,t}$ 分别为场景 $s \sqsubset t$ 时段节点j平移前和平移后的总负荷; $P^{\text{hase}}_{s,j,t}$ 为场景s下t时段节点j的基本负荷,不可平移。式(16)为可 平移负荷约束。

3)两阶段关联约束。

两阶段关联约束如下:

$$\alpha_{0,t} = \alpha_{s,t}, \beta_{0,t} = \beta_{s,t}$$
(17)

$$U_{0,i,t} = U_{s,i,t}, \ U_{0,i,t} = U_{s,i,t}$$
(18)

$$Q_{0,i,t}^{\rm CB} = Q_{s,i,t}^{\rm CB}, \ C_{0,i,t}^{\rm CB} = C_{s,i,t}^{\rm CB}$$
(19)

$$P_{s,i,t}^{G} = P_{0,i,t}^{G} + r_{s,i,t}^{u} - r_{s,i,t}^{d}$$

$$0 \leq r_{s,i,t}^{u} \leq R_{s,i,t}^{u}, \quad 0 \leq r_{s,i,t}^{d} \leq R_{s,i,t}^{d}$$
(20)

式中: $s \in \{1, 2, \dots, N_s\}; r_{s,i,t}^d \land f_{s,i,t} \land f_$

对于本文研究的包含发电机、风电、光伏、储能、 可平移负荷等的直流配电网,建立数学模型如下。

1)目标函数。

同交流配电网类似,建立直流配电网两阶段随 机规划的目标函数为:

$$\min f_1(X_1) + E(f_2(X_2)) \tag{21}$$

由于 *f*₁ 与 *f*₂ 表达式在形式上相同,为了节省篇幅,将两阶段目标函数合并列写,此时目标函数式 (21)可表示为:

$$\min \sum_{s=0}^{N_{\rm s}} \omega_s \sum_{t=1}^{T} \left[\sum_{i=1}^{N_{\rm G}} C_{s,i,t}^{\rm G} + \sum_{i=1}^{N_{\rm ESS}} \lambda^{\rm ESS} \left(P_{s,i,t}^{\rm ch} + P_{s,i,t}^{\rm d} \right) \Delta t + \left(P_{s,t}^{\rm buy} \lambda_t^{\rm buy} - P_{s,t}^{\rm sell} \lambda_t^{\rm sell} \right) \Delta t + \sum_{j=1}^{J} \varphi_j D_{s,j,t}^{\rm u} \Delta t \right]$$
(22)

式(21)、(22)的说明同式(6)、(7),不冉赘述。

2)主要约束。

与交流配电网类似,将直流配电网两阶段约束 列写在一起,具体如下:

$$\begin{cases} P_{s,ij,t} = \frac{P_{s,ij,t}^2}{V_{s,i,t}^2} r_{ij} + P_{s,j,t} + \sum_{k \in j} P_{s,jk,t} \\ V_{s,i,t}^2 = V_{s,j,t}^2 + 2r_{ij} P_{s,ij,t} - r_{ij}^2 \frac{P_{s,ij,t}^2}{V_{s,i,t}^2} \end{cases}$$
(23)

式中:s ∈ {0,1,…,N_s}。式(23)为直流电网潮流约 束。其他约束如风光储运行约束、可平移负荷约束 等和交流配电网相同。需要说明的是,直流配电网 约束中均不含无功约束,如风光无功约束、电容器组 约束和SVC运行约束等。

3)两阶段关联约束。

直流配电网中两阶段关联约束包括两阶段购售 电状态、储能系统充放电状态一致性约束,具体表达 式见约束式(17)和式(18),机组功率两阶段关联约 束同约束式(20),不再赘述。

2.4 Benders 分解算法

由2.3节建立的混合交直流主动配电网各自区域内的两阶段随机规划模型,由于场景较多故而直接计算必然耗费大量时间,Benders算法^{19]}可以将两阶段的优化问题分解成主、子问题交替迭代形式的双层优化问题。

考虑一个含有复杂变量y的优化问题,其紧凑

形式如下:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{y}) + g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.t.} \quad G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \end{cases}$$
(24)

将f(y)视为主问题、g(x, y)视为子问题,其中 y x分别为主、子问题的决策变量,采用Benders分解 算法求解两阶段规划问题的步骤如下。

1)设置目标函数下界 $L_{\min} = -\infty$ 、目标函数上界 $L_{\max} = +\infty$ 、迭代次数k = 1。

2)求解主问题,将第k次迭代主问题的最优解 y_k^* 传递到子问题,并更新下界 L_{min} 。

3)求解子问题时有以下2种情况。

若子问题可行,则求子问题最优解 x_k^* 且获取主、 子问题的耦合约束 $G(x, y_k^*) \leq 0$ 的对偶乘子 λ_k^* ,引入 中间变量 α^{cut} 并向主问题添加Benders Cut约束,如 式(25)所示,同时更新上界 L_{max} 。

$$\alpha^{\text{cut}} \ge g(\boldsymbol{x}_{k}^{*}, \boldsymbol{y}_{k}^{*}) + \boldsymbol{\lambda}_{k}^{*} G(\boldsymbol{x}_{k}^{*}, \boldsymbol{y})$$
(25)

若子问题不可行,则对子问题进行松弛,求解子问题后向主问题添加 Benders Cut 约束,同时更新 上界 L_{max}。

4)若目标函数上、下界之差小于等于收敛间隙 ε即满足L_{max}-L_{min}≤ε,则停止迭代,否则转入步骤2) 继续进行迭代求解。

由于本文建立的两阶段随机规划模型的第二阶段场景数为*N*_s,即第二阶段有*N*_s个子问题,此时子问题向主问题返回的最优割约束为:

$$\boldsymbol{\alpha}^{\text{cut}} \geq \sum_{s=1}^{N_s} \boldsymbol{\omega}_s(g(\boldsymbol{x}_{s,k}^*, \boldsymbol{y}_{s,k}^*) + \boldsymbol{\lambda}_{s,k}^* G(\boldsymbol{x}_{s,k}^*, \boldsymbol{y})) \quad (26)$$

需要说明的是, N_s 个子问题是同时计算的, N_s 个场景根据计算结果共同构成Benders Cut约束。

3 区域间分布式优化

如第1节所述,区域间为分布式优化模型,满足 预测场景下联络线交互功率一致,因此区域间的分 布式优化只围绕各自第一阶段的目标函数最优进行 建模。

3.1 SADMM

ADMM 是解决分布式优化的最优方法之一,具 有收敛性好、鲁棒性好的特点^[20]。ADMM 迭代时是 异步的,必然消耗较多时间,因此考虑引入 SADMM, 以两区域为例,迭代格式^[20]如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{1}^{k+1} = \arg\min\left[f_{1}(\mathbf{x}_{1}) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{x}_{1} - \mathbf{x}_{ex}^{k} + \boldsymbol{\mu}_{1}^{k}\|_{2}^{2}\right] \\ \mathbf{x}_{2}^{k+1} = \arg\min\left[f_{2}(\mathbf{x}_{2}) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{x}_{2} - \mathbf{x}_{ex}^{k} + \boldsymbol{\mu}_{2}^{k}\|_{2}^{2}\right] \\ \mathbf{x}_{ex}^{k+1} = \frac{\mathbf{x}_{1}^{k+1} + \mathbf{x}_{2}^{k+1}}{2} \\ \mathbf{\mu}_{1}^{k+1} = \mathbf{\mu}_{1}^{k} + (\mathbf{x}_{1}^{k+1} - \mathbf{x}_{ex}^{k+1}), \ \mathbf{\mu}_{2}^{k+1} = \mathbf{\mu}_{2}^{k} + (\mathbf{x}_{2}^{k+1} - \mathbf{x}_{ex}^{k+1}) \end{cases}$$
(27)

式中: $f_1(\mathbf{x}_1)$ 、 $f_2(\mathbf{x}_2)$ 分别为区域1、2的目标函数; \mathbf{x}_1 、 \mathbf{x}_2 分别为区域1、2决策变量所组成的向量; ρ 为惩罚 因子,其为大于0的常数; \mathbf{x}_{ex}^{k+1} 为两区域第k+1次迭 代的参考值; $\boldsymbol{\mu}_1^k, \boldsymbol{\mu}_2^k$ 为第k次迭代涉及两区域交互 功率偏差的2个中间变量。

根据上述内容可知:采用SADMM不仅可以通 过并行计算减少求解时间,而且区域间只需交互期 望交换功率,无需向相邻区域广播本区域内部数据, 更好地保护了隐私。

3.2 SADMM计算步骤

对于本文中的混合交直流主动配电网,将其在 换流站交流侧解耦,以功率作为耦合变量,设交流配 电网期望交换功率为*x*_{AC},直流配电网期望交换功率 为*x*_{DC},进而构建区域间分布式优化模型。以交流配 电网为例,主问题迭代格式可以改写成:

$$\begin{vmatrix} \mathbf{x}_{AC}^{k+1} = \arg\min\left[f_{1}(\mathbf{x}_{AC}) + \alpha^{eut} + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{x}_{AC} - \mathbf{x}_{ex}^{k} + \boldsymbol{\mu}_{1}^{k}\|_{2}^{2} \right] \\ \mathbf{x}_{ex}^{k+1} = \frac{\mathbf{x}_{AC}^{k+1} + \mathbf{x}_{DC}^{k+1}}{2} \\ \boldsymbol{\mu}_{1}^{k+1} = \boldsymbol{\mu}_{1}^{k} + (\mathbf{x}_{AC}^{k+1} - \mathbf{x}_{ex}^{k+1}) \end{aligned}$$
(28)

从式(28)可以得出:交流配电网主问题进行优 化时,目标函数中含有变量α^{cut}和罚函数项,即不仅 要通过 Benders Cut 约束考虑主、子问题之间的协 调,还要通过 SADMM 与相邻区域协调,简言之,通 过主问题连接本区域子问题和相邻区域主问题进行 优化,最后协同达到区域内、区域间最优目标。

用SADMM进行分布式计算的步骤如下:

1)随机初始化区域间交互功率值,初始化迭代 次数 k=1,设定 $\rho_{\chi} \mu_1^k \pi \mu_2^k$ 以及 SADMM 收敛间隙 θ 的值;

2)各区域独立计算本区域优化问题,将优化结 果取均值作为下次迭代时期望交互功率;

3)如果第*k*次迭代时交直流配电网期望交互功 率差值的最大绝对值 max(|**x**^k_{AC} − **x**^k_{DC}|)≤θ,则停止迭 代,否则转至步骤2)继续进行迭代求解。

综上所述,本文提出的计及源荷不确定性的混 合交直流主动配电网分层-分布式优化调度流程图 如附录A图A1所示,本文提出的模型收敛证明过程 见附录B。

4 算例分析

本文参照文献[4]的算例对IEEE 33节点系统 进行修改,修改后的拓扑结构见附录C图C1,风电 场接入节点14、39、57,光伏电站接入节点18、43、 61,柴油发电机接入节点3、6、28、46,储能系统接入 节点16、41、59,电容器组接入节点2,SVC接入节点 8,节点22、25、35、53为可平移负荷节点。假定每个 节点可平移最大比例为本节点负荷的10%,各区域 间分布式算法中SADMM收敛间隙θ取0.1%,ρ取5, 区域内主、子问题收敛间隙ε取0.1%,交、直流系统 基准电压分别为12.66 kV和20.67 kV,风光荷数据 均来自实际系统,进行场景抽样时只考虑各自区域 内风光荷相关性。假设各直流配电网源荷数据相 同,建模平台为MATLAB 2019a,并调用Gurobi 9.0.1 求解器进行求解。

4.1 区域内优化结果分析

以每区域抽样5组源荷场景为例进行研究,其 中预测场景下交流配电网优化结果如图3所示。



① 与主网交互功率,② 柴油机1发电功率,③ 柴油机2发电功率 ④ 储能放电功率,⑤ 储能充电功率

图 3 交流配电网第一阶段优化结果

Fig.3 First-stage optimization results of AC distribution network

从图3可以得出:由于采用分时电价,所以交流 配电网利用电价差异进行盈利,柴油发电机承担主 要发电任务,实时跟踪负荷曲线并且提供一定的备 用,储能系统利用分时电价低储能高释能进行套利。

交流配电网两阶段优化柴油发电机1出力情况 见附录D图D1,联络线功率见附录D图D2。根据图 D1和图D2可以得出:由于两阶段源荷数据不同,因 此需要联络线和发电机提供备用,负荷较低时电价 较低,联络线功率优先调整充当一定的备用以保持 经济性,负荷较高时发电机接近满发调整能力有限, 联络线进行调整再次充当备用;柴油发电机充当备 用的时段基本在08:00—12:00,这是因为此时电价 和负荷处在中等水平,发电机功率在爬升,同时可以 提供一定的备用而基本不需要联络线进行调整。

混合交直流主动配电网通过实行可平移负荷优 化负荷曲线,以直流配电网1为例,优化前、后的负 荷曲线如图4所示。





根据图4可以得出:通过给予一定的用户补偿, 可以激励用户在负荷高峰期少用电,同时由于负荷 较低时电价较低,用户往往愿意在满足自身需求的 情况下将一部分不太重要的负荷平移至电价较低的 时段,这样既减少了电费支出又获得一定的补偿,对 整个配电网而言,降低了负荷峰谷差,减小了高峰期 间机组发电压力。

交流配电网中,电容器组动作情况如图5所示。





根据图5可以得出:在负荷较低时,投入的电容器组数较少,在负荷高峰期投入最多,这是因为在负荷较高时,线路流过功率较大,导致节点之间电压差变大,因此通过电容器组分组投入可以向系统注入感性无功,减少一部分线路上的感性无功,从而降低节点之间电压差。

以交流配电网为例,区域内分层优化收敛情况 如图6所示。



图6 交流配电网主、子问题收敛情况



从图6可以得出:在经过6次迭代之后,目标函数上界和下界的差值收敛到给定间隙内,在未收敛之前,目标函数上界和下界不同是因为主问题传递给子问题的变量仅仅是主问题目标函数最优的优化结果,而不一定是子问题目标函数最优的结果,因此通过子问题不断给主问题返回Benders Cut约束,主问题考虑到子问题的不断限制从而再次寻优直到优化结果使得主、子问题目标函数均最优。

4.2 区域间优化结果分析

为了突出本文提出的分层-分布式优化调度模型的优越性,设置如下3种优化方案:方案1,不使用 SADMM和Benders分解算法,采用完全集中式优化,即交直流配电网所有场景集中式优化;方案2,预测场景下主问题采用集中式优化,预测场景和抽样场景之间采用Benders分解算法求解模型;方案3,本文 提出的分层-分布式优化,即同时采用 Benders 分解 算法解决各自区域主、子问题且区域间采用 SADMM 进行分布式优化。

首先从数据隐私保护方面进行分析:方案1采 用完全集中式优化需要各区域向调度中心将本区域 所有数据全部上报,方案2采用主问题集中式优化 相比于方案1而言,各区域向调度中心上报数据有 所减少,而方案3中各区域只需要向相邻区域广播 期望交换功率,无需将区域内其他数据进行广播,因 此从隐私保护方面而言,方案3最优。

为了研究本文提出的分层-分布式优化调度模型在多区域、多场景下的优越性,将算例中的三区域 再接入2个直流配电网拓展成五区域,单区域抽样 场景数量拓展为10和15,然后对3种方案进行比较。

三区域模型随抽样场景数量增多时3种方案的 目标函数值如表1所示。

表1 三区域模型多场景下3种方案目标函数值

 Table 1
 Objective function values of three schemes for three-region model and multi-scenario

方案	目标函数值 / \$		
	5个场景	10个场景	15个场景
1	42006.6	41 808.2	41 892.4
2	42003.2	41810.5	41 895.9
3	42007.5	41815.7	41 903.3

五区域模型随抽样场景数量增多时3种方案的 目标函数值如附录E表E1所示。

从表1和表E1可以得出:目标函数值主要取决 于区域数和场景数,当区域数一定时,目标函数值随 着场景数的变化而变化,这是因为不同的抽样场景 代表不同的源荷功率,故而不同场景下,目标函数值 不同;当区域数和场景数一定时,方案3的目标函数 值比方案1、2稍差,这是因为从方案1到方案3,本 质上是将完全集中式模型的目标函数和约束进行了 分块(分解),这种分解只会减少模型的求解时间,理 论上并不会影响目标函数值的大小,但是考虑到各 区域内主、子问题收敛间隙、区域间SADMM收敛间 隙不完全为0,以及Gurobi求解器求解模型时有着 微小的误差,因此3种方案下目标函数值虽然不相 等但是差异不大也是合理的。

三区域模型随抽样场景数量增多时3种方案的 求解时间如表2所示。

表2 三区域模型多场景下3种方案的求解时间

Table 2 Solution time of three schemes for

	1 1	1	1.1
three-region	model	and	multi-scenario
thirde region	1110401	and	

方案	求解时间/s		
	5个场景	10个场景	15个场景
1	698	1 2 2 2	2 2 4 9
2	400	610	1042
3	196	285	434

五区域模型随抽样场景数量增多时3种方案的 求解时间如附录E表E2所示。

从表2和表E2可以得出:当区域数一定时,随 着场景数的增多,3种方案的求解时间均增多,这是 因为场景数越多,越不易找到全局最优解,但是方案 3相比于方案1和方案2求解时间大幅减少,这是因 为子问题是同时计算的,子问题的增多只影响达到 全局最优时的计算次数,进而影响最终求解时间;当 场景数一定时,随着区域数的增多,3种方案的求解 时间均增多,但是方案3用时最少,这是因为方案3 重复利用了分层-分布式优势,虽然达到全局最优时 迭代次数增多,但是相比于方案1和方案2在求解时 间方面仍然具有优势。

根据以上分析可知:本文提出的分层-分布式优 化调度策略是从场景(横向)和区域(纵向)2个维度 对大规模优化问题加快求解速度的一种方法,完全 适用于含有大量场景的混合交直流主动配电网优化 调度,同时可以为其他类型多区域互联电网多场景 优化提供一定的参考。

5 结论

针对混合交直流主动配电网集中式优化调度存 在计算时间长且各调度区域私密性不强的问题,考 虑到源荷日前预测数据的不确定性,本文建立分层--分布式优化调度模型并进行了验证,得到主要结论 如下:

1)通过 Benders 分解算法,很好地解决两阶段随 机规划问题,其中子问题并行计算,相比于直接计算 多场景随机规划节省了大量时间;

2)区域间通过 SADMM 进行优化,各区域同时 计算且将计算结果取均值作为下次迭代参考值,这 样既不需要协调中心也实现了并行计算,相比于大 规模集中式优化节省了时间,而且对区域内数据隐 私保护性较强;

3)提出了分层-分布式优化算法,各区域主问题 不仅和本区域子问题进行协调,而且和相邻区域的 主问题进行协调,通过这种协调机制,所有区域所有 场景协同达到最优的优化结果,这会给多区域多场 景优化提供一定的借鉴。

本文的研究工作暂未考虑电价的不确定性以及 需求响应的不确定性,下一步将研究电价以及需求 响应等不确定性对混合交直流主动配电网优化调度 的影响。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

 齐琛,汪可友,李国杰,等.交直流混合主动配电网的分层分布 式优化调度[J].中国电机工程学报,2017,37(7):1909-1917.
 QI Chen,WANG Keyou,LI Guojie, et al. Hierarchical and distributed optimal scheduling of AC / DC hybrid active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1909-1917.

- [2]黄仁乐,蒲天骄,刘克文,等.城市能源互联网功能体系及应用 方案设计[J].电力系统自动化,2015,39(9):26-33.
 HUANG Renle,PU Tianjiao,LIU Kewen,et al. Design of hierarchy and functions of regional energy internet and its demonstration applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(9):26-33.
- [3] 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.
- [4] PAUL S,SHARMA A,PADHY N P. Optimal operation of a converter governed AC / DC hybrid distribution network with DERs[C]//2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy(PESGRE2020). Cochin, India: IEEE, 2020: 1-6.
- [5] GILL S, KOCKAR I, AULT G W. Dynamic optimal power flow for active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):121-131.
- [6] FU Y, LI Z, GE X, et al. Optimal operation of hybrid AC / DC distribution network based on two-stage robust optimization model and corrective control[C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia(ISGT Asia). Chengdu, China: IEEE, 2019:2456-2461.
- [7]张福民,刘国鑫,李占凯,等.基于二阶锥规划的交直流混合配电网优化调度[J].智慧电力,2020,48(3):117-123.
 ZHANG Fumin,LIU Guoxin,LI Zhankai, et al. Optimal dispatch of AC/DC hybrid distribution network based on second-order cone programming[J]. Smart Power,2020,48(3):117-123.
- [8]符杨,张智泉,李振坤.基于二阶段鲁棒优化模型的混合交直 流配电网无功电压控制策略研究[J].中国电机工程学报, 2019,39(16):4764-4774.

FU Yang, ZHANG Zhiquan, LI Zhenkun. Research on reactive power voltage control strategy for hybrid AC / DC distribution network based on two-stage robust optimization model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16):4764-4774.

[9]谢敏,吉祥,柯少佳,等. 基于目标级联分析法的多微网主动配 电系统自治优化经济调度[J]. 中国电机工程学报,2017,37 (17):4911-4921.

XIE Min, JI Xiang, KE Shaojia, et al. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution power system with multi-microgrids based on analytical target cascading theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17):4911-4921.

- [10] 徐意婷, 艾芊, 胡剑生. 基于协同演化博弈算法的微网和配电 网动态优化[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(18):8-16.
 XU Yiting, AI Qian, HU Jiansheng. Dynamic optimization of microgrid and distribution network based on co-evolutionary game algorithm[J]. Power System Protection and Control,2016, 44(18):8-16.
- [11] 黄堃,郝思鹏,宋刚,等.含三端口电力电子变压器的交直流混 合微网分层优化[J].电力自动化设备,2020,40(3):37-43.
 HUANG Kun,HAO Sipeng,SONG Gang, et al. Layered optimization of AC/DC hybrid microgrid with three-port power electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):37-43.
- [12] 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):82-94.
 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); 82-94.

[13] 王家怡,高红均,刘友波,等.考虑风电不确定性的交直流混合 配电网分布式优化运行[J].中国电机工程学报,2020,40(2): 550-562.

WANG Jiayi, GAO Hongjun, LIU Youbo, et al. A distributed operation optimization model for AC / DC hybrid distribution network considering wind power uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2):550-562.

- [14] 吴巍,汪可友,李国杰,等. 基于 Pair Copula 的多维风电功率 相关性分析及建模[J]. 电力系统自动化,2015,39(16):37-42.
 WU Wei,WANG Keyou,LI Guojie, et al. Correlation analysis and modeling of multiple wind power based on Pair Copula [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(16):37-42.
- [15] 赵书强,金天然,李志伟,等.考虑时空相关性的多风电场出力 场景生成方法[J]. 电网技术,2019,43(11):3997-4004.
 ZHAO Shuqiang, JIN Tianran, LI Zhiwei, et al. Wind power scenario generation for multiple wind farms considering temporal and spatial correlations[J]. Power System Technology,2019, 43(11):3997-4004.
- [16] 李晖,高涵宇,张艳,等.考虑相关性的大规模风光互补电网扩展规划[J]. 电网技术,2018,42(7):2120-2126.
 LI Hui,GAO Hanyu,ZHANG Yan, et al. Expansion planning of large scale hybrid wind-photovoltaic transmission network considering correlation[J]. Power System Technology, 2018,42 (7):2120-2126.
- [17] 吴志远,殷正刚,唐西胜. 混合电网的交直流解耦潮流算法
 [J]. 中国电机工程学报,2016,36(4):937-944.
 WU Zhiyuan,YIN Zhenggang,TANG Xisheng. An AC/DC decoupled hybrid power flow algorithm for hybrid power system
 [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(4):937-944.
- [18] 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.
- [19] CHAI Y,GUO L,WANG C, et al. Hierarchical distributed voltage optimization method for HV and MV distribution networks
 [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(2):968-980.
- [20] 乐健,周谦,赵联港,等.基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J].电力自动化设备,2020,40(3):44-54. LE Jian,ZHOU Qian,ZHAO Liangang,et al. Overview of distributed economic dispatch methods for power system based on consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):44-54.

作者简介:



梁海平(1979—),男,河北保定人,讲师,博士,主要研究方向为智能技术在电力系统中的应用、电力系统优化调度(E-mail: lianghaiping@aliyun.com);

王 岩(1995—),男,河北石家庄人, 硕士研究生,主要研究方向为主动配电网优 化运行(E-mail:1773629682@qq.com);

刘英培(1982-),女,河北保定人,副

梁海平

教授,博士,主要研究方向为直流输电、新能源发电并网技术等(E-mail:liuvingpei_123@126.com)。

(编辑 李玮)

(下转第77页 continued on page 77)

Expansion planning method of distribution network with distributed generation considering transmission capacity

ZHAO Haizhou¹, CHEN Jiankai², YANG Haiyue¹, LI Tieliang¹, WANG Hongkun^{2,3}, WANG Shouxiang²

(1. Hengshui Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Hengshui 053000, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: In order to provide a good network transmission channel for flexibility resources to respond quickly and timely to flexibility requirements, in the planning stage, fully consider the influence of network structure and planning of DG(Distributed Generation) on distribution network transmission capacity, a bi-layer optimal method for distribution network expansion planning and DG siting and sizing considering the transmission capacity of the network channel is proposed. First, the line load margin index and power flow balance index are established to evaluate the distribution network transmission capacity. Secondly, the influence factors of the transmission capacity of the network channel are analyzed, and on this basis, a bi-layer optimal model for distribution network expansion planning and DG siting and sizing is constructed, which ensures the planning scheme has good economy and transmission capacity of network channel. And a nested hybrid particle swarm optimal algorithm is used to optimize the solution. Finally, the planning method and the economic planning method are verified by examples. The simulative results show that the proposed method not only does not increase the economic cost, but also obtains a more balanced power flow, higher line load margin and better transmission capacity.

Key words: framework expansion planning; DG siting and sizing; network transmission channel; bi-layer planning model; flexibility resources; particle swarm optimal algorithm

(上接第69页 continued from page 69)

Hierarchical-distributed optimal scheduling of hybrid AC / DC active distribution network considering source and load uncertainties

LIANG Haiping¹, WANG Yan¹, LIU Yingpei¹, WANG Xinming²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Hybrid AC / DC active distribution network represents the main development form of future distribution network. Aiming at the problems of huge computational burden, weak protection of local privacy and both source and load output uncertainties of centralized optimization for hybrid AC / DC active distribution network, a hierarchical-distributed optimal scheduling strategy of hybrid AC / DC active distribution network conside-ring the source and load uncertainties is proposed, which aims to minimize the sum of expected operating cost under both predicted and sample scenarios in the region of hybrid AC / DC active distribution network. A two-stage stochastic programming model is established in each region, and the Benders decomposition algorithm is employed to solve the main and sub problems iteratively. To protect the data privacy of each region and accomplish parallel computing, the model aims to optimize the operating cost of main problem in each region, and the synchronous alternating direction method of multipliers is utilized for the distributed calculation. In this strategy, the main problem of each region is interrelated by the inter- and intra-regional optimization problems to ensure globally optimal solutions. Finally, the case analysis validates the effectiveness of the proposed hierarchical-distributed optimal scheduling strategy.

Key words:hybrid AC / DC active distribution network;two-stage stochastic programming;Benders decomposition algorithm;synchronous alternating direction method of multipliers;hierarchical-distributed optimal scheduling



Fig.A1 Flowchart of hierarchical-distributed optimization

附录 B

不失一般性,以直流主动配电网主问题目标函数为例进行验证,变量下标 *s* = 0 即为主问题,因此给出在 SADMM 模型中主问题目标函数表达式:

$$F = \sum_{t=1}^{T} \left[\sum_{i=1}^{N_{G}} C_{0,i,t}^{G} + \sum_{i=1}^{N_{ESS}} \lambda^{ESS} \left(P_{0,i,t}^{ch} + P_{0,i,t}^{d} \right) \Delta t + \left(P_{0,t}^{buy} \lambda_{t}^{buy} - P_{0,t}^{sell} \lambda_{t}^{sell} \right) \Delta t + \varphi_{j} \sum_{j=1}^{J} D_{0,j,t}^{u} \Delta t \right] + \alpha^{cut} + \frac{\rho}{2} \left\| \left(\mathbf{x}_{DC}^{k} - \mathbf{x}_{ex}^{k} + \boldsymbol{\mu}_{2}^{k} \right) \right\|_{2}^{2} = \sum_{t=1}^{T} \left[\sum_{i=1}^{N_{G}} C_{0,i,t}^{G} + \sum_{i=1}^{N_{ESS}} \lambda^{ESS} \left(P_{0,i,t}^{ch} + P_{0,i,t}^{d} \right) \Delta t + \left(P_{0,t}^{buy} \lambda_{t}^{buy} - P_{0,t}^{sell} \lambda_{t}^{sell} \right) \Delta t + \varphi_{j} \sum_{j=1}^{J} D_{0,j,t}^{u} \Delta t \right] + \alpha^{cut} + \frac{\rho}{2} \sum_{t=1}^{T} \left(x_{DC,t}^{k} - x_{ex,t}^{k} + \boldsymbol{\mu}_{2,t}^{k} \right)^{2}$$
(B1)

则目标函数 F 对变量的二阶偏导为:

$$\frac{\partial^{2} F}{\partial u \partial v} = \begin{cases} 0 & u = v \notin \mathbb{R} \\ 0 & u = v \notin \mathbb{R} \\ 0 & u = v \# \mathbb{R} \\ \rho & u = v \# \\ \rho & u =$$

则海森矩阵为:

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \boldsymbol{\rho}_T \end{bmatrix}$$
(B3)

式(B3)中所有元素均为分块矩阵,需要指出的是 ρ_T 为主对角线为 ρ 的T阶对角阵。由矩阵论知识可知,海森矩阵H是半正定的,因此目标函数F是凸的且收敛到唯一解,同理可证其他目标函数均为凸的且收敛到唯一解,因此建立的"分层-分布式"模型可以收敛到唯一解。





Fig.D1 Two-stage optimization results of diesel Generator 1 in AC distribution network





附录 E

表 E1 五区域模型多场景下 3 种方案目标函数值

Table E1 Objective function of three schemes for five-region model and multi-scenario

方案	5场景/\$	10场景/\$	15 场景/\$
1	54352.4	54186.3	54327.6
2	54356.6	54189.5	54331.8
3	54363.7	54195.6	54339.1

表 E2 五区域模型多场景下 3 种方案求解时间

Table E2 Solution time of three schemes for five-region model and multi-scenario

方案	5场景用时/s	10场景用时/s	15场景用时/s
1	3286	7326	13091
2	720	1672	2438
3	302	527	726