

混合交直流主动配电网接纳裕度双重不确定性优化模型

刘 淼, 孟 静, 尹 申, 肖恩颂, 蒋达飞
(国网冀北电力有限公司 唐山供电公司, 河北 唐山 063099)

摘 要: 接入的电功率超出配电网接纳裕度时,为使充电接纳裕度最大化,风光出力波动最小化,提出混合交直流主动配电网接纳裕度双重不确定性优化模型。获取双重不确定因素,以电动汽车充电接纳裕度最大化、风光出力波动最小化为目标,以节点电压、风光出力以及接纳裕度等为约束,构建配电网优化模型,并通过混沌二进制粒子群算法求解优化模型,得到迭代后的最佳优化结果,实现配电网接纳裕度双重不确定性优化。经试验验证:通过该方法优化后,配电网的平均接纳容量从 1 200 kW 达到了 2 000 kW 左右,且始终保持在接纳裕度的优质区间内;接入不确定性电能类型后,节点的电压越限概率均最高在 2.7%,各节点产生的弃能均保持在 6 MW·h 以下;各节点在峰时接入风、光机组时,风、光出力的最高波动值依然低于 3.5 kW·h;当配电网处于恶劣环境下,日常接入不确定性电能时,配电网的有功网损处于 0.25~0.40 MW 之间。

关键词: 混合交直流; 主动配电网; 接纳裕度; 双重不确定性; 电压越限概率; 有功网损

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)03-0088-07

doi: 10.12177/emca.2022.175

Dual-Uncertainty Optimization Model for Acceptance Margin of Hybrid AC/DC Active Distribution Network

LIU Miao, MENG Jing, YIN Shen, XIAO Ensong, JIANG Dafei
(Tangshan Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company Limited,
Tangshan 063099, China)

Abstract: In order to maximize the charging acceptance margin and minimize the fluctuation of wind and solar output, a dual-uncertainty optimization model of hybrid AC/DC active distribution network acceptance margin is proposed when the connected power exceeds the distribution network acceptance margin. In order to obtain the dual-uncertainty, take the maximization of electric vehicle charging acceptance margin and the minimization of wind and solar power output fluctuation as the goal, and take the node voltage, the wind and solar power output and acceptance margin as the constraints, the distribution network optimization model is built. The solution of optimization model through chaotic binary particle swarm optimization algorithm is introduced to obtain the optimal optimization results after iteration, so the dual-uncertainty optimization of distribution network acceptance margin is achieved. The experimental results show that after optimization by this method, the average acceptance capacity of the distribution network increases from 1 200 kW to about 2 000 kW, and it is always within the high-quality range of acceptance margin. After the uncertain power type is connected, the maximum voltage out of limit probability of all nodes is 2.7%, and the discarded energy generated by all nodes is kept below 6 MW·h. When all nodes are connected to wind

收稿日期: 2022-09-15; 收到修改稿日期: 2022-12-12

作者简介: 刘 淼(1988—)女,高级工程师,研究方向为电网规划及负荷预测。

孟 静(1984—)女,高级工程师,研究方向为综合能源规划。

尹 申(1990—)男,工程师,研究方向为交直流混联配电网、分布式电源规划。

and solar units at peak time, the maximum fluctuation value of wind and solar output is still lower than 3.5 kW·h. When the distribution network is in a harsh environment and the uncertain electric energy is connected daily, the active network loss of the distribution network is between 0.25 MW and 0.40 MW.

Key words: hybrid AC/DC; active distribution network; acceptance margin; dual-uncertainty; voltage exceedance probability; active electrical loss

0 引言

混合交直流主动配电网是一种交流、直流相互混合的配电网络,由于该网络可接入多种状态的电能,使得这种混合网络发展较为广泛^[1],但当前社会高速发展,风、光以及电动汽车的大规模发展^[2-3],配电网的接纳能力逐渐受到影响,同时,风、光以及电动汽车的电能接入配电网时存在较多的不确定性^[4],因此当电能接入配电网超出配电网接纳裕度时,会对配电网造成较大的伤害^[5-6]。

通过对不确定性因素接纳裕度的优化,可以使配电网接入更高质量的电能,有较多学者对此进行研究,文献[7]研究了配电网两阶段无功机会约束优化方法,该方法对配电网潮流方程进行线性化,以此优化配电网接入时的双侧不确定性,但该方法优化后配电网的弃能现象较大,会导致配电网接入电能时产生过度开销。文献[8]研究了交直流混合配电网双层优化方法,该方法在优化过程中充分利用灵活性资源,并通过负荷聚类划分峰谷时段,使每个时段的电价均能得到更好的优化,但该方法主要优化配电网运行开销,对于配电网接入电能质量的优化并不全面。

为此,本文研究混合交直流主动配电网接纳裕度双重不确定性优化模型,在优化过程中充分考虑不确定性因素,使配电网接入风、光、电动汽车充电时的运行状态更加稳定。

1 混合交直流主动配电网运行优化

1.1 混合交直流主动配电网弹性接纳裕度

1.1.1 接纳裕度区域划分

当接入不确定性电能产生扰动时,混合交直流配电网的应变能力即为配电网弹性。研究配电网对风、光电以及电动汽车接入的接纳裕度,可以强化配电网弹性的调度能力。接纳裕度主要是指在安全运行条件下,配电网对风、光电以及电动汽车可接入的最大容量^[9],按照混合交直流主动配

电网接纳的安全范围与经济性,本文将接纳裕度分为三类区域,具体如表1所示。

表1 接纳裕度区域划分

划分区域	区域定义
优质区	满足配电网经济性与安全性,存在灵活的调节裕度,配电网内的节点可继续接入风、光等电能
警戒区	接纳裕度位于警戒区间,仅能够保障配电网安全性,不可继续接入风、光等电能,其他性能无法实现优化
越界区	接纳裕度已不足,配电网无法继续接入电能,且无法在安全、经济条件下运行

1.1.2 接纳裕度评估指标

当风、光、电动汽车接入配电网后,会增强配电网的负荷波动性,导致配电网系统受到一定的影响^[10-11],因此,为充分获取配电网对风、光、电动汽车的接纳能力,本文设计如下评估指标以判断接纳裕度是否需要警戒:假设节点极限接纳裕度为 $A_i^{ex,t}$,该裕度为配电网节点允许接入的容量裕度;设节点最优接纳裕度为 $A_i^{op,t}$,其表示在优质区间内,节点的接纳裕度;设警戒频次为 Q_{net} ,其表示警戒区内出现节点的总次数;设最佳接纳平均容量为 $L_{net}^{av,t}$,其表示为优质区间内,配电网最佳接纳容量的均值。通过式(1)可对每种评估指标进行计算:

$$\left\{ \begin{aligned} A_i^{ex,t} &= \frac{L_i^{ex,t} - L_i^{op,t}}{L_i^{ex,t} - L_i^{net,t}} \times 100\% \\ A_i^{op,t} &= \frac{L_i^{op,t} - L_i^{net,t}}{L_i^{op,t}} \times 100\% \\ Q_{net} &= \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N b_i^t \\ L_{net}^{av,t} &= \frac{\sum_{i=1}^N b_i^t L_i^{op,t}}{\sum_{i=1}^N b_i^t} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: N 为混合交直流主动配电网节点数; $L_i^{ex,t}$ 为

在 t 时段内, 节点 i 的极限接纳容量; $L_i^{\text{op},t}$ 为最优接纳容量; $L_i^{\text{net},t}$ 为入网功率; T 为调节周期; b_i^t 为判断节点裕度区域状态变量, 当处于 t 时段时, b_i^t 为 1 时说明出现警戒, b_i^t 为 0 时说明未出现警戒。

1.2 配电网接纳裕度不确定性因素分析

1.2.1 风力发电不确定性模型

现阶段大多情况下, 可利用两参数威布尔分布模型评估风力发电速度概率分布的不确定性情况, 具体如下:

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (2)$$

式中: c 为尺度参数; k 为形状参数。

配电网接入风力发电时, 可利用分段函数方式, 描述风电机组有功功率输出与风速之间的联系, 具体如下:

$$P_e = \begin{cases} 0, & v_{\text{aw}} < v_{\text{ci}} \text{ 或 } v_{\text{aw}} > v_{\text{co}} \\ P_{\text{rated}} \times \frac{(v_{\text{aw}} - v_{\text{ci}})}{(v_{\text{r}} - v_{\text{ci}})}, & v_{\text{ci}} \leq v_{\text{aw}} \leq v_{\text{r}} \\ P_{\text{rated}}, & v_{\text{r}} \leq v_{\text{aw}} \leq v_{\text{co}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_e 为有功功率; P_{rated} 为机组的额定功率; $v_{\text{ci}}, v_{\text{co}}$ 为机组所需切入、切出风速; $v_{\text{r}}, v_{\text{aw}}$ 为额定与实际风速依次。

在风电机组注入系统的无功功率中, 主要包含定子侧与网侧变化器输出或注入的无功功率。当机组有功出力 P_e 为已设定值时, 可利用式(4)计算机组无功出力极限值:

$$P_s^2 + \left(Q_e + \frac{|\dot{U}_s|^2}{x_m + x_s} \right)^2 \leq \frac{|\dot{U}_s|^2 x_m^2}{(x_m + x_s)^2} I_{\text{r,max}}^2 \quad (4)$$

式中: P_s 为定子侧有功功率, $P_s = P_e / (1-s)$; $\dot{U}_s$ 为定子端电压; s 为转差率; x_s 为电抗值; x_m 为励磁电抗; $I_{\text{r,max}}$ 为转子侧最大电流限制; Q_e 为机组注入配电网无功功率。

设风电机组机端电压为 1 时, 即可计算得到该机组无功出力极限。

1.2.2 光伏发电不确定性模型

在一天中的某个时间范围内, 可通过 Beta 分布函数表示日光照射强度, 如下所示:

$$f_B(s) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times o^{(\alpha-1)} \times (1-o)^{(\beta-1)} \quad (5)$$

式中: o 为日光照射强度, 通常取值在 $[0, 1]$ 之间;

α, β 为分布函数的形状参数; 该参数与某时段内日光照射平均强度的均值 μ 和标准差 σ 存在关联, 可通过对形状参数进行计算:

$$\alpha = \frac{\mu \times \beta}{1 - \mu} \quad (6)$$

$$\beta = (1 - \mu) \times \left[\frac{\mu \times (1 - \mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (7)$$

当通过分布函数求取不同时间范围内的日光照射强度后, 可分析每个时间段内光伏电池的有功出力。在日常发电过程中, 光伏电池通过逆变器完成并网发电^[12-14], 当操控并网逆变器时, 即可操控光伏电池的输出, 因此, 光伏电池具备的无功功率容量可表示如下:

$$|Q|_{\text{max}}(t) = \sqrt{S_{\text{max}}^2 - P_{\text{act}}^2(t)} \quad (8)$$

式中: $|Q|_{\text{max}}(t)$ 为光伏的最大无功出力; $P_{\text{act}}(t)$ 为其接入配电网的有功功率; S_{max} 为逆变器容量。

1.2.3 电动汽车充电不确定性模型

电动汽车的行驶里程与充电时间能够有效影响汽车充电时的负荷情况, 若电动汽车在行驶完成后立刻进行充电, 则可获取汽车充电时刻的概率密度函数, 即当满足 $0 < t \leq (\mu_s - 12)$ 时, 可得:

$$f_s(t) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(t + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (9)$$

当满足 $(\mu_s - 12) < t \leq 24$ 时, 可得:

$$f_s(t) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(t - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (10)$$

式中: μ_s 为进行充电的期望时刻; σ_s 为标准差。假设电网系统的电动汽车共有 m 台, 则在时段 t 范围内, 期望接入配电网充电的汽车数量 $E_{n_{\text{EV}}}(t)$ 服从正态分布:

$$E_{n_{\text{EV}}}(t) = m f_s(t) \quad (11)$$

此时, 可利用泊松分布模拟得到现实中不同时间范围内接入配电网的汽车数量, 并通过式(12)表示:

$$p(n_{\text{EV}}) = \frac{(\lambda_{\text{EV}})^{n_{\text{EV}}}}{n_{\text{EV}}!} \exp(-\lambda_{\text{EV}}) \quad (12)$$

式中: n_{EV} 为允许接入配电网的汽车数量, $n_{\text{EV}} = 0, 1, \dots, \lambda_{\text{EV}}$ 。

假设每台车的充电功率为 P_{EV} , 则可计算得到电动汽车充电总功率 P_{EVs} :

$$P_{\text{EVs}} = n_{\text{EV}} \times P_{\text{EV}} \quad (13)$$

1.3 接纳裕度双重不确定性优化模型

以接入混合交直流主动配电网的风光以及电动汽车为研究目的,将风、光设为一重不确定性因素,将电动汽车设为另一重不确定性因素,对每种不确定性因素接入进行优化,构建以配电网接纳裕度最优、风光出力波动最小化为目标的双重不确定性优化模型。

1.3.1 考虑最大接纳裕度的电动汽车充电需求响应模型

(1) 目标函数。设配电网接纳电动汽车充电负荷的裕度为 F_1 , 且该裕度为最大裕度, 即:

$$F_1 = \max P_{\text{all}} = \sum_{t=1}^T \lambda_{\kappa} \sum_{i=1}^{N_{\text{EV}}} P_{i,t}^{\text{EV}} \quad (14)$$

式中: P_{all} 为可接纳电动汽车充电功率的总和; λ_{κ} 为出现场景 κ 的概率; $P_{i,t}^{\text{EV}}$ 为在 t 时间段下, 电动汽车的充电功率, 充电站节点数量为 N_{EV} ; T 为调度周期。

(2) 约束条件包含三类: 汽车充电结束、需求响应约束和接纳裕度约束。

汽车充电约束:

$$P_{\text{EV},c} \leq N_{\text{EV},t} P_{\text{EV},c}^{\text{av}} \quad (15)$$

式中: 在 t 时段内, $N_{\text{EV},t}$ 为接入配电网的汽车个数; $P_{\text{EV},c}^{\text{av}}$ 为充电功率。

需求响应约束:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T P_t - P_t^0 = 0 \\ -P_{d,t}^{\text{TOU}} \leq P_t - P_t^0 \leq P_{d,t}^{\text{TOU}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_t 、 P_t^0 为在 t 时段内响应前后负荷电量; $P_{d,t}^{\text{TOU}}$ 为限定用户响应电量。

接纳裕度约束: 限制节点接纳区域指数 $A_i^{\text{ex},t}$ 呈正实数。

1.3.2 考虑风、光出力波动最小化优化模型

(1) 目标函数。为避免风光发电出力的不确定性对配电网带来影响, 本文以系统净负荷波动最小为优化目标, 构建风光出力波动最小化模型, 具体表示如下:

$$\begin{cases} \min N = \left\{ \sum_{t=1}^T \{Q_e + |Q|_{\max}(t) - g_{\text{av}}\}^2 / T \right\}^{1/2} \\ g_{\text{av}} = \sum_{t=1}^T [Q_e + |Q|_{\max}(t)] / T \end{cases} \quad (17)$$

式中: N 为风、光输出功率波动的标准差; g_{av} 为输出功率均值; T 为调度周期。

若 N 的值越小, 说明处理波动幅度越小, 即风光接入配电网时越安全。

(2) 约束条件包含两类: 风光出力约束和节点电压约束。

风光出力约束:

受外界环境影响, 风、光出力应低于该时段的风光出力预测值:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{WT}} \leq P_{i,\max}^{\text{WT}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{PV}} \leq P_{i,\max}^{\text{PV}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{i,\max}^{\text{WT}}$ 、 $P_{i,\max}^{\text{PV}}$ 分别为风力、光伏机组输出功率上限。

节点电压约束:

在接入不同电能时, 电压会存在一定的波动^[15], 因此约束每节点电压:

$$\begin{cases} U_i + \Delta U_{i,\max} \leq U_{i,\max} \\ U_i + \Delta U_{i,\min} \geq U_{i,\min} \end{cases} \quad (19)$$

式中: U_i 为节点 i 的电压期望值; $\Delta U_{i,\max}$ 、 $\Delta U_{i,\min}$ 分别为该节点的电压波动上、下限; $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别为而电压的上、下限值。

1.4 基于混沌二进制粒子群的双重不确定性模型求解

1.4.1 二进制粒子群算法

二进制粒子群算法可有效分析不确定性空间优化问题, 当该算法在粒子进行寻优时, 可将每一维位置 k_i^t 与个体最佳位置 k_i^{best} 设定为 0 或 1, 并不限制粒子寻优速度, 因此, 该方法更适用于多重空间寻优问题。

1.4.2 混沌搜索算法

由于仅使用二进制粒子群算法进行模型优化无法强化收敛速度, 因此本文引入混沌搜索理论, 其基于确定性迭代式产生的遍历性轨道对整个解空间进行考察, 当满足一定终止条件时, 只要遍历性搜索轨道足够长, 认为搜索过程中发现的最佳状态已接近问题的最优解, 通过附加小幅度的扰动进一步进行局部区域内的细搜索, 直至算法终止准则满足。其收敛速度快, 能够高效率地得到搜索结果, 且需要的控制参数较少, 易于实现, 同时具有一定的并行性, 借助混沌变量的遍历性, 使搜索范围更加广泛。

1.4.3 基于混沌二进制粒子群算法的优化模型求解

本文通过混沌二进制粒子群算法求解接纳裕度双重不确定性优化模型,将不确定性因素进行编码,编码完成后,按照最大接纳裕度与最小出力的波动确定优先级,对优化模型进行求解,具体如下:

步骤1 将风、光以及电动汽车充电不确定性功率作为算法的输入,并同步更新粒子的位置与速度。

步骤2 分析某一粒子与最优粒子群的距离,若某一粒子 i 当前位置为 k_i ,最优粒子位置为 k_r ,两者之间的距离为

$$d_i = (k_i - k_r)^2 \quad (20)$$

本文预设 d_i 的初始值为 10^{-3} ,若 d_i 低于初始值,则对 k_i 进行混沌搜索,通过迭代获取新粒子,并利用新粒子替换旧粒子,经不断替换后获取最终粒子群。

步骤3 判断经不断迭代后获取的最终粒子是否满足模型约束,若满足则保留粒子,若不满足则取粒子极限值。

步骤4 分析最终粒子群内每个粒子的适应值,获取全局最优解 F_{best} ,并分析个体与全局最佳位置 k_i^{best} 、 K ,跳转至下一步。

步骤5 分析是否完成迭代,若已完成最大迭代,则输出寻优结果,实现模型优化,若未实现迭代,则设定迭代次数为 $n_i^t = n_i^t + 1$,跳转至步骤1继续执行。

综上,完成双重不确定性模型求解,本文优化模型整体结构如图1所示。

2 试验分析

利用IEEE36节点的10机系统对模型进行仿真,并借助MATLAB软件模拟混合交直流主动配电网的不确定性电能接入情况,对模拟结果进行以下分析。

2.1 以最大接纳裕度为标准

应用本文模型进行优化,分析经优化后配电网可接纳电动汽车充电的平均容量,分析结果如图2所示。

由图2可知,在通过本文模型优化前,配电网的接纳平均容量始终保持在1 200 kW位置,接纳

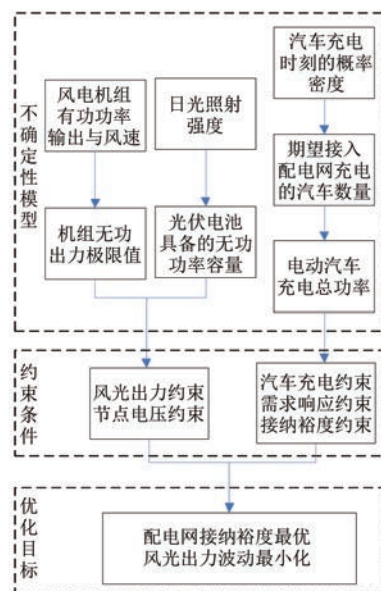


图1 混合交直流主动配电网接纳裕度双重不确定性优化模型结构

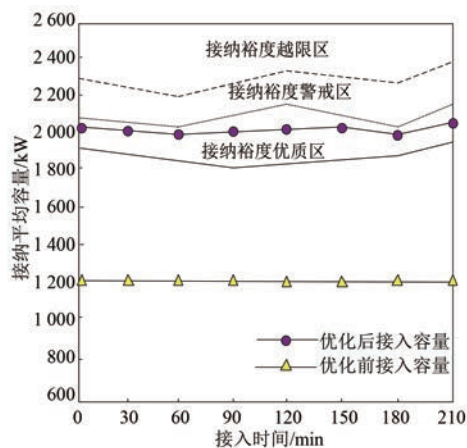


图2 最优接纳平均容量分析

裕度较小,无法接入大量电能,当应用本文模型进行优化后,配电网的接纳容量得到了明显的提升,使得平均接纳容量达到了2 000 kW左右,且始终保持在接纳裕度的优质区间内,由此可以看出,经本文模型对配电网接入不确定性电能的能力进行优化后,可有效提升配电网平均接纳容量。

分析不同不确定性电能接入配电网时,通过本文模型优化后配电网不同节点的电压越限概率与弃能情况,分析结果如表2所示。

由表2可知,每个节点所接入的不确定性电能类型有所不同,其中,节点1、3、7、10接入风力发电机组,在接入过程中,这些节点的电压越限概

表 2 电压越限概率分析

配电网节点编号	接入电能类型	电压越限概率/%	弃能/(MW·h)
节点 1	风能	1.2	3.46
节点 2	电动汽车充电	2.2	4.35
节点 3	风能	1.4	5.32
节点 4	光伏	1.3	4.43
节点 5	电动汽车充电	0.6	3.42
节点 6	光伏	0.9	4.42
节点 7	风能	1.3	5.42
节点 8	电动汽车充电	2.7	3.56
节点 9	光伏	1.4	4.42
节点 10	风能	1.1	4.21

率均保持在 1.5% 以下,且每个节点所产生的弃能均保持在 6 MW·h 以下;节点 4、6、9 均接入光伏发电机组,每个节点的电压越限概率同样保持在 1.5% 以下,且节点所产生的平均弃能要略低于风力发电机组;节点 2、8 接入电动汽车充电,其产生的电压越限概率相对较高,达到 2% 以上,而弃能情况相对较低,均保持在 3.5 MW·h 左右。由此可以看出,虽然配电网接入不确定性电能时会存在一定的电压越限与弃能情况,但均能够保持在合理范围内,与未进行优化时的状态相比,经本文模型处理后,越限与弃能均可有效改善。

2.2 以风光出力波动最小化为目标

通过本文模型对接纳裕度不确定性进行优化后,分析配电网在每个时段接入电能时的风、光出力波动情况,分析结果如图 3 所示。

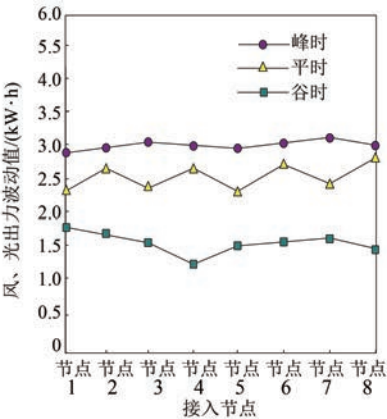


图 3 风、光出力波动情况分析

由图 3 可知,每个节点在峰时接入风、光机组

时,各机组的出力波动略高于其他时间,在谷时接入时,风、光出力波动均保持在 2.0 kW·h 以下,说明经本文模型优化后可有效降低风、光接入时的波动情况,使得不确定性电能接入更加稳定,而平时段与峰时段的风、光处理波动虽然高于谷时段,但最高波动值依然低于 3.5 kW·h,因此本文模型可有效降低风、光接入时的波动情况。

应用本文模型优化后,分析配电网在不同环境下接入电能时,当下的有功网损情况,分析结果如图 4 所示。

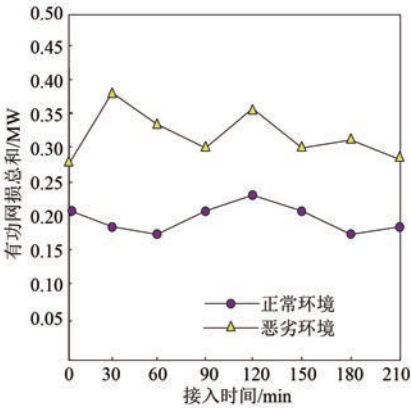


图 4 有功网损分析

由图 4 可知,当配电网处于恶劣环境下,日常接入不确定性电能时,配电网的有功网损处于 0.25~0.40 MW 之间,而配电网位于正常环境时,在接入不确定性电能导致的有功网损处于 0.15~0.25 MW 之间,由此可以看出,恶劣环境下配电网的有功网损会略高于正常环境,利用本文模型优化后,配电网在不同环境下的有功网损均低于 0.40 MW,可有效降低接入不确定性电能时的损失。

3 结 语

本文研究混合交直流主动配电网接纳裕度双重不确定性优化模型,针对混合交直流主动配电网接入各种不确定性电能时的接纳情况进行优化,试验结果显示,经该方法优化后:

(1) 配电网的平均接纳容量从 1 200 kW 达到了 2 000 kW 左右,且始终保持在接纳裕度的优质区间内。

(2) 接入不确定性电能类型后,节点的电压越限概率均最高在 2.7%,各节点产生的弃能均保

持在 $6 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 以下。

(3) 各节点在峰时接入风、光机组时,风、光出力的最高波动值依然低于 $3.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

(4) 当配电网处于恶劣环境下,日常接入不确定性电能时,配电网的有功网损处于 $0.25 \sim 0.40 \text{ MW}$ 之间。

(5) 该方法使配电网可稳定地接入更大裕度的电能,在未来研究阶段,可对当前模型继续进行优化,使配电网更加安全地运行。

【参考文献】

- [1] 张志荣,邱晓燕,孙旭,等.基于ADMM的交直流混合配电网分布式电压优化模型[J].电网技术,2021,45(11):4551.
- [2] 叶亮,吕智林,王蒙,等.基于最优潮流的含多微网的主动配电网双层优化调度[J].电力系统保护与控制,2020,48(18):27.
- [3] 李幸芝,韩蓓,李国杰,等.考虑非高斯耦合不确定性的交直流配电网两阶段概率状态估计[J].电工技术学报,2020,35(23):4949.
- [4] 王景钢,刘轶.考虑光伏逆变器电流裕度的主动配电网动态电压支撑策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):105.
- [5] 张璐,余顺江,王辰,等.计及VSC运行方式与故障恢复优化的交直流混合配电网可靠性评估[J].电网技术,2022,46(1):292.
- [6] 巨云涛,黄炎,张若思.基于二阶锥规划凸松弛的

三相交直流混合主动配电网最优潮流[J].电工技术学报,2021,36(9):1866.

- [7] 卢姬,常俊晓,张云阁,等.考虑DG不确定性的主动配电网两阶段无功机会约束优化方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(21):28.
- [8] 胡戎,邱晓燕,张志荣.计及灵活性资源的交直流混合配电网双层优化[J].电网技术,2022,46(6):2259.
- [9] 翁晓勇,谭阳红.考虑多类开关动作特性差异的配电网两阶段协同负荷恢复模型[J].电力自动化设备,2022,42(6):22.
- [10] 宫建锋,周宗川,靳盘龙,等.考虑灵活性的交直流混合配电网储能双层规划[J].电力建设,2022,43(7):48.
- [11] 周念成,谷飞强,雷超,等.考虑合环电流约束的主动配电网转供优化模型[J].电工技术学报,2020,35(15):3281.
- [12] 孟明,李宽,朱国林.基于不同时间尺度的交直流混合配电网分层优化控制策略[J].华北电力大学学报(自然科学版),2020,47(2):9.
- [13] 郑重,苗世洪,李超,等.面向微型能源互联网接入的交直流配电网协同优化调度策略[J].电工技术学报,2022,37(1):192.
- [14] 邓海晖,王毅,陈中,等.考虑多微电网的主动配电网双层优化调度[J].广东电力,2022,35(1):42.
- [15] 宋汶秦,赵玲霞,徐建委,等.光热参与电网调峰的风-光-火优化调度策略[J].计算机仿真,2020,37(11):97.

(上接第87页)

- [12] 刘平宙,张汉允,方丹.磁钢固定工艺对永磁同步电机输出转矩的影响[J].电机技术,2012(5):11.
- [13] 潘峰.粒子群优化算法与多目标优化[M].北京:北京理工大学出版社,2013.
- [14] 熊阳超.电动汽车用轴向磁通永磁电机的研究

[D].武汉:华中科技大学,2021.

- [15] SUN Q, CHENG Y X, CHEN Z H. Minimization of torque fluctuation in disc type in-wheel motor based on response surface method and FEA[C]//IEEE, 3rd International Conference on Green Energy and Applications, 2019.