

基于功率时空协同的交直流混合配电网调度计划日内修正策略

张璐¹, 许彪¹, 唐巍¹, 张博¹, 沈沉²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京市 100083; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084)

摘要: 交直流混合配电网既可通过配置在线路间的电压源换流器(VSC)实现功率在空间维度上的灵活转移, 还可通过配置在系统中的储能实现功率在时间维度上的灵活转移。对此, 提出一种基于功率时空协同的交直流混合配电网调度计划日内修正策略, 通过VSC与储能的协调优化实现资源的时空互补, 有效应对负荷与新能源的随机波动。在优化模型中, 采用灵敏度方法简化常规潮流约束, 并引入支路损耗变化量修正线性灵敏度法的近似误差, 保证了功率潮流约束的准确性, 显著提高了求解效率。最后, 通过仿真算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 交直流混合配电网; 时空协同; 电压源换流器; 储能; 潮流灵敏度; 日内修正

0 引言

城市用电需求迅速增长, 配电网线路过载问题日益突出, 城市配电网供电能力亟待提高^[1]。与此同时, 随着高比例分布式能源并网, 配电网发生功率倒送, 电压越限问题逐渐凸显, 传统交流配电网面临严峻挑战^[2]。对此, 将传统配电网从被动配电形态转变为主动配电形态将成为主要发展方向^[3]。通过新建直流联络线^[4]、交流线路直流改造^[5]等手段实现多配电线路柔性互联, 可以打破功率流动的空间壁垒。随着锂离子电池等储能技术的日趋成熟, 大规模、低成本储能实现商业化应用, 借助其在时间维度上的功率转移能力, 能够对不同时段的源、荷进行匹配^[6]。以交直流混合配电网为代表的主动配电网在功率调节上呈现出明显的时空特性。将时空协同思想应用于优化调度中, 在时空维度下充分均衡功率分布, 可以有效提升配电网对新能源和负荷的承载能力。

然而, 现有研究大多仅侧重于单一维度的功率调节。文献[7-10]采用分区分布式方法对配电网进行功率调节, 例如, 文献[9]基于“区内自治、区间协调”的思想实现了配电网空间维度上的功率转移, 但忽略了与时间维度调节手段的相互配合。文献[11-14]采用多时间尺度滚动优化方法对配电网进行功率调节。文献[13]建立了交直流混合配电网多时间尺度优化调度模型, 为了保证响应速度在短时间尺

度下仅进行区域自控, 限制了其在空间维度上的功率转移潜力。

在配电网日内调度中应用时空协同优化, 可以有效提升配电网应对负荷及新能源出力不确定性的能力。但优化中同时考虑时空维度的变量会增大问题规模, 导致优化模型可能无法满足日内短时调度对求解速度的要求。传统潮流约束使得优化模型呈非凸性, 是限制优化模型求解速度的主要因素^[15]。文献[16]提出了基于二阶锥松弛的DistFlow潮流模型, 从而将原模型转化为可高效求解的二阶锥优化模型, 但该模型要求目标函数须为节点注入功率的严格增函数^[17], 有较大局限性。文献[18-19]基于灵敏度思想实现了潮流模型的线性化, 大大降低了模型复杂度, 但较大的线性近似误差将严重影响调度结果的准确性。

针对上述研究现状, 本文提出了一种基于时空协同优化的交直流混合配电网调度计划日内修正策略。首先, 分析了主动配电网功率调节的时空特性; 其次, 提出了一种计及损耗影响的潮流灵敏度改进模型; 再次, 基于时空协同思想建立了交直流混合配电网调度计划日内修正模型; 最后, 利用仿真算例验证了所提方法的有效性。

1 主动配电网功率调节的时空特性

1) 空间转移特性

多个配电线路通过电压源换流器(voltage source converter, VSC)、柔性多状态开关、电能交换器等新型电力电子装置实现柔性互联^[20], 可形成交直流混合配电网。通过对主动配电网中互联端口的

收稿日期: 2021-06-08; 修回日期: 2021-07-26。

上网日期: 2021-10-20。

国家自然科学基金资助项目(51977211)。

功率(空间变量)进行调节,可以实现功率在不同线路与子网之间的灵活转移,使配电网具备了功率空间灵活转移特性。

2)时间转移特性

通过控制储能在不同时段的充放电功率(时间变量)可以实现处于不同时间段的配电网之间的功率转移,使配电网具备了时间转移特性。例如,基于配电网中分布式电源输出功率与负荷需求的预测信息,控制储能在负荷低谷期充电,在负荷高峰期放电,可以对不同时间下的源荷进行匹配^[21]。

3)时空协同优化

由于配电网中功率分布存在时空差异,不同时空下的配电线路面临不同的供电压力或新能源消纳压力。通过功率时空转移充分均衡配电网中负荷与新能源功率分布,将有助于提升配电网负荷承载能力和新能源消纳能力。为了实现上述目的,需要在配电网优化调度中应用时空协同优化思想,即通过对时空变量进行联合优化,实现柔性互联设备与储能设备之间的协调运行。

2 潮流灵敏度改进模型

一方面,当更大范围的配电线路进行柔性互联、更多种类设备参与调度时,优化调度模型的时间复杂度将会更高;另一方面,现有潮流模型适用范围存在局限性,如基于二阶锥松弛的DistFlow潮流模型必须满足目标函数是节点注入功率增函数的条件,才能保证二阶锥松弛准确性。对此,本文提出了一种计及损耗影响的潮流灵敏度改进模型。

2.1 线路损耗灵敏度模型

当系统节点发生注入功率变化时,忽略支路损耗影响,任意支路 l 功率变化量与节点注入功率变化量的关系可表示为^[22]:

$$\Delta P_l = \sum_{i \in \Omega_{DE,l}} \Delta P_{in,i} \quad (1)$$

$$\Delta Q_l = \sum_{i \in \Omega_{DE,l}} \Delta Q_{in,i} \quad (2)$$

式中: ΔP_l 和 ΔQ_l 分别为支路 l 的有功功率变化量和无功功率变化量; $\Omega_{DE,l}$ 为支路 l 的下游节点中发生注入功率变化的节点集合; $\Delta P_{in,i}$ 和 $\Delta Q_{in,i}$ 分别为节点 i 的注入有功功率变化量和无功功率变化量。

假设发生节点注入功率变化前,支路 l 的有功功率为 P_l ,支路 l 的无功功率为 Q_l ,利用线路损耗计算公式推导节点注入功率变化引起的支路 l 的有功功率损耗变化量 $\Delta P_{L,l}$ 和无功功率损耗变化量 $\Delta Q_{L,l}$ 分别为^[23]:

$$\Delta P_{L,l} = \frac{R_l(\Delta P_l^2 + 2P_l\Delta P_l + \Delta Q_l^2 + 2Q_l\Delta Q_l)}{U_{ac}^2} \quad (3)$$

$$\Delta Q_{L,l} = \frac{X_l(\Delta P_l^2 + 2P_l\Delta P_l + \Delta Q_l^2 + 2Q_l\Delta Q_l)}{U_{ac}^2} \quad (4)$$

式中: U_{ac} 为交流线路额定电压; R_l 和 X_l 分别为支路 l 的电阻和电抗。

式(3)和式(4)可以简化为:

$$\Delta P_{L,l} = k_{p,l}(\Delta P_l^2 + \Delta Q_l^2) + k_{pp,l}\Delta P_l + k_{pq,l}\Delta Q_l \quad (5)$$

$$\Delta Q_{L,l} = k_{q,l}(\Delta P_l^2 + \Delta Q_l^2) + k_{qp,l}\Delta P_l + k_{qq,l}\Delta Q_l \quad (6)$$

式中: $k_{p,l}$ 、 $k_{pp,l}$ 、 $k_{pq,l}$ 、 $k_{q,l}$ 、 $k_{qp,l}$ 和 $k_{qq,l}$ 为灵敏度系数,其计算公式见附录A。

2.2 电压灵敏度模型

1)常规电压灵敏度模型

根据文献[18]提出的线性化电压灵敏度模型,节点电压变化量与节点注入功率变化量之间的关系可以表示为:

$$\Delta U = S_p\Delta P_{in} + S_q\Delta Q_{in} \quad (7)$$

式中: ΔP_{in} 和 ΔQ_{in} 分别为各节点注入有功和无功变化量组成的向量; S_p 为电压-有功功率灵敏度矩阵; S_q 为电压-无功功率灵敏度矩阵; ΔU 为各节点电压变化量组成的向量。

灵敏度矩阵中各元素的表达式为:

$$S_{p,mm} = \frac{1}{U_{ac}} \sum_{i \in \Omega_{AC,sh,mm}} R_i \quad (8)$$

$$S_{q,mm} = \frac{1}{U_{ac}} \sum_{i \in \Omega_{AC,sh,mm}} X_i \quad (9)$$

式中: $S_{p,mm}$ 和 $S_{q,mm}$ 分别为节点 m 发生单位有功和无功注入功率变化时节点 n 的电压增量; R_i 和 X_i 分别为节点 i 的电阻和电抗; $\Omega_{AC,sh,mm}$ 为交流系统节点 n 上游节点集合与节点 m 上游节点集合的交集。

2)改进电压灵敏度模型

式(7)一式(9)所表达的电压灵敏度建立在忽略线路损耗影响的基础上,但当节点注入功率变化较大时,忽略损耗影响将会带来较大的计算误差。在改进模型中,为了能够计及支路损耗影响,将节点注入功率变化引起的支路损耗变化量等效为相应支路末端节点的注入功率分量。以图1所示的4节点系统为例,假设节点2和节点3分别发生注入功率变化(红色箭头),考虑支路损耗影响后,各节点等效的注入功率变化量不仅包含该节点实际的注入功率变化量,同时还包含其所在支路的损耗变化量(蓝色箭头)。

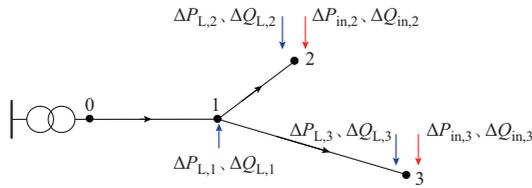


图1 改进电压灵敏度法示意图
Fig. 1 Schematic diagram of improved voltage sensitivity method

修正前,任意节点 n 的电压变化量 ΔU_n 为:

$$\Delta U_n = \sum_{m \in \Omega_{AC}} (S_{P, nm} \Delta P_{in, m} + S_{Q, nm} \Delta Q_{in, m}) \quad (10)$$

式中: Ω_{AC} 为交流系统节点集合。

修正后, ΔU_n 为:

$$\Delta U_n = \sum_{m \in \Omega_{AC}} [S_{P, nm} (\Delta P_{in, m} + \Delta P_{L, m}) + S_{Q, nm} (\Delta Q_{in, m} + \Delta Q_{L, m})] \quad (11)$$

根据式(5)和式(6)中的支路损耗变化量可以得到最终的改进模型(改进对计算精度的影响分析见附录A)为:

$$\Delta U_n = \sum_{m \in \Omega_{AC}} [k_{in, nm, p} \Delta P_{in, m} + k_{in, nm, q} \Delta Q_{in, m} + k_{nm} (\Delta P_n^2 + \Delta Q_n^2) + k_{nm, p} \Delta P_n + k_{nm, q} \Delta Q_n] \quad (12)$$

式中: $k_{in, nm, p}$ 、 $k_{in, nm, q}$ 、 k_{nm} 、 $k_{nm, p}$ 和 $k_{nm, q}$ 为灵敏度系数, 其计算公式见附录A。

2.3 支路功率灵敏度模型

在式(1)和式(2)的基础上,引入式(5)和式(6)所表达的线路损耗变化量,可以得到更加精确的支路有功功率灵敏度模型 $\Delta P'_l$ 和无功功率灵敏度模型 $\Delta Q'_l$, 表达式为:

$$\Delta P'_l = \Delta P_l + \Delta P_{L, l} = k_{p, l} (\Delta P_l^2 + \Delta Q_l^2) + (k_{pp, l} + 1) \Delta P_l + k_{pq, l} \Delta Q_l \quad (13)$$

$$\Delta Q'_l = \Delta Q_l + \Delta Q_{L, l} = k_{q, l} (\Delta P_l^2 + \Delta Q_l^2) + (k_{qp, l} + 1) \Delta P_l + k_{qq, l} \Delta Q_l \quad (14)$$

3 基于时空协同的调度计划日内修正策略

3.1 建模思路及实现流程

以交直流混合配电网为研究对象,建立了基于时空协同的调度计划日内修正模型。模型应用时空协同优化思想,通过均衡短时功率波动引起的功率时空分布差异,达到提升配电网负荷承载能力和新能源消纳能力的目的。为了平衡建模精度与求解时间的关系,建模采用了第2章提出的潮流灵敏度改进模型。决策变量定义为日前调度计划中可调资源出力的修正量,包括VSC有功和无功功率修正量、储能有功功率修正量、弃光功率修正量、切负荷功率

修正量(对应节点注入功率变化量)。优化目标定义为出力调整前后配电网运行成本增量。常规的交直流潮流约束转化为对电压、功率、损耗变化量的等式约束。基于时空协同优化的调度计划日内修正策略的实现流程具体步骤如下。

步骤1:更新调度周期内各时段风、光、负荷的预测结果,基于日前调度计划,对该周期内各时段的交直流混合配电网进行运行模拟,获得初始潮流结果。

步骤2:根据初始潮流结果,计算潮流灵敏度系数,利用潮流灵敏度模型表达系统潮流约束,以调度周期内配电网运行成本增量为优化目标,建立优化模型,对包含储能、VSC在内的可调资源出力修正量进行优化。

步骤3:根据优化结果修正日前调度计划,形成最终的日内调度指令。

3.2 优化模型的目标函数

目标函数为日内修正后的运行成本增量,包括交直流混合配电网线路损耗成本增量、弃光成本增量、切负荷成本增量以及参与调节的设备运行成本增量。当目标函数为负值时,表示日内调度降低了配电网运行成本;当目标函数为正值时,表示日内调度增加了配电网运行成本。具体表达式为:

$$\min f_{\text{cost}} = \Delta C_{\text{loss}} + \Delta C_{\text{DG}} + \Delta C_{\text{load}} + \Delta C_{\text{device}} \quad (15)$$

式中: ΔC_{loss} 为优化周期内交直流混合配电网线路损耗成本增量; ΔC_{DG} 为优化周期内弃光成本增量; ΔC_{load} 为切负荷成本增量; ΔC_{device} 为参与调节的设备运行成本增量。

各项成本具体表达式为:

$$\Delta C_{\text{loss}} = C_e \left(\sum_{l \in \Omega_{AC, \text{line}}} \Delta P_{AC, L, l, t} + \sum_{l \in \Omega_{DC, \text{line}}} \Delta P_{DC, L, l, t} \right) \Delta t \quad (16)$$

$$\Delta C_{\text{DG}} = C_d \sum_{t=1}^T \sum_{n \in \Omega_{\text{DG}, t}} \Delta P_{in, t, n} \Delta t \quad (17)$$

$$\Delta C_{\text{load}} = C_l \sum_{t=1}^T \sum_{n \in \Omega_{\text{load}, t}} \Delta P_{in, t, n} \Delta t \quad (18)$$

$$\Delta C_{\text{device}} = \sum_{t=1}^T \left(C_{\text{VSC2}} \sum_{n \in \Omega_{\text{VSC2}}} \Delta P_{in, t, n} + C_{\text{VSC1}} \sum_{n \in \Omega_{\text{VSC1}}} \Delta P_{t, n} + C_{\text{ESS}} \sum_{n \in \Omega_{\text{ESS}}} \Delta P_{in, t, n} \right) \Delta t \quad (19)$$

$$\Omega_{\text{DG}, t} \cup \Omega_{\text{load}, t} \cup \Omega_{\text{VSC1}} \cup \Omega_{\text{VSC2}} \cup \Omega_{\text{ESS}} = \Omega_{\text{inj}, \text{net}, t} \quad (20)$$

式中: $t=1, 2, \dots, T$ 为时段, 其中, T 为日内优化调度所考虑的时间段个数; Δt 为每个时段的长度; $\Delta P_{in, t, n}$

为 t 时段位于节点 n 的可调资源有功出力修正量; $\Delta P_{AC,L,t,l}$ 和 $\Delta P_{DC,L,t,l}$ 分别为交、直流系统中 t 时段线路 l 的损耗变化量; C_e 为向上级电网购电单位成本; C_d 为单位弃光惩罚成本; C_1 为单位切负荷惩罚成本; C_{VSC1} 为 VSC1 运行成本系数; C_{VSC2} 为 VSC2 运行成本系数; C_{ESS} 为储能运行成本系数; $\Omega_{AC, line}$ 和 $\Omega_{DC, line}$ 分别为交流和直流系统的支路集合; $\Omega_{DG,t}$ 为日前调度计划下 t 时段发生弃光的节点集合; $\Omega_{load,t}$ 为日前调度计划下 t 时段发生切负荷的节点集合; Ω_{VSC1} 为 VSC1 节点集合; Ω_{VSC2} 为 VSC2 节点集合; Ω_{ESS} 为储能节点集合; $\Omega_{inj, net,t}$ 为日前调度计划下 t 时段所有发生注入功率变化的节点集合。

3.3 优化模型的约束条件

约束条件包括交直流潮流约束、系统安全约束、弃风弃光和切负荷约束、设备运行约束。

1) 交直流潮流约束

利用本文第 2 章建立的潮流灵敏度模型, 将潮流约束转化为对节点电压变化量、支路有功功率变化量、支路损耗变化量的等式约束。其中, 交流潮流约束对应附录 A 式(A1)一式(A3); 直流潮流约束对应附录 A 式(A4)一式(A6); 将 VSC 的稳态模型等效为支路 v 的等值阻抗 $R_v + jX_v$ 和理想 VSC^[24], 其中 R_v 为支路 v 的电阻, X_v 为支路 v 的电抗, 则 VSC 的潮流约束可以表示为关于支路 v (支路阻抗为 $R_v + jX_v$) 的节点电压变化量、支路功率变化量、支路损耗变化量的等式约束。

2) 系统安全约束

$$U_{\min, AC, n} \leq \Delta U_{AC, t, n} + U_{AC, t, n} \leq U_{\max, AC, n} \quad (21)$$

$$-P_{\max, AC, l} \leq \Delta P_{AC, t, l} + P_{AC, t, l} \leq P_{\max, AC, l} \quad (22)$$

$$U_{\min, DC, n} \leq \Delta U_{DC, t, n} + U_{DC, t, n} \leq U_{\max, DC, n} \quad (23)$$

$$-P_{\max, DC, l} \leq \Delta P_{DC, t, l} + P_{DC, t, l} \leq P_{\max, DC, l} \quad (24)$$

式中: $U_{\max, AC, n}$ 和 $U_{\min, AC, n}$ 分别为交流节点 n 的电压上限和下限; $U_{\max, DC, n}$ 和 $U_{\min, DC, n}$ 分别为直流节点 n 的电压上限和下限; $U_{AC, t, n}$ 和 $U_{DC, t, n}$ 分别为按照日前调度计划 t 时段交、直流系统中节点 n 的电压值; $\Delta U_{AC, t, n}$ 和 $\Delta U_{DC, t, n}$ 分别为日内修正后 t 时段交、直流系统中节点 n 的电压变化量; $P_{\max, AC, l}$ 和 $P_{\max, DC, l}$ 分别为交、直流系统中支路 l 最大允许通过的有功功率; $P_{AC, t, l}$ 和 $P_{DC, t, l}$ 分别为按照日前调度计划 t 时段交、直流系统中支路 l 的有功功率; $\Delta P_{AC, t, l}$ 和 $\Delta P_{DC, t, l}$ 分别为日内修正后 t 时段交、直流系统中支路 l 的功率变化量。

3) 弃风弃光和切负荷约束

$$0 \leq P_{DG, cut, t, n} + \Delta P_{in, t, n} \leq P_{DG, t, n} \quad n \in \Omega_{DG, t} \quad (25)$$

$$0 \leq P_{load, cut, t, n} + \Delta P_{in, t, n} \leq P_{load, t, n} \quad n \in \Omega_{load, t} \quad (26)$$

式中: $P_{DG, cut, t, n}$ 和 $P_{DG, t, n}$ 分别为日前调度计划中 t 时段位于节点 n 的分布式电源的可消纳电量和 t 时段位于节点 n 的分布式电源的发电功率预测值; $P_{load, cut, t, n}$ 和 $P_{load, t, n}$ 分别为日前调度计划中 t 时段位于节点 n 的负荷切除后的剩余电量和 t 时段位于节点 n 的负荷预测电量。

4) 设备运行约束

$$(P_{in, t, n} + \Delta P_{in, t, n})^2 + (Q_{in, t, n} + \Delta Q_{in, t, n})^2 \leq S_n^2 \quad n \in \Omega_{VSC} \quad (27)$$

$$\delta_{\min} \leq \frac{E_{t, n}}{E_{\max, n}} \leq \delta_{\max} \quad (28)$$

$$E_{t, n} = \begin{cases} E_{t-1, n} + (P_{in, t, n} + \Delta P_{in, t, n})\eta_{ch}\Delta t & P_{in, t, n} \geq 0, n \in \Omega_{ESS} \\ E_{t-1, n} + \frac{(P_{in, t, n} + \Delta P_{in, t, n})\Delta t}{\eta_{dis}} & P_{in, t, n} < 0, n \in \Omega_{ESS} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} E_{0, n} = E'_{h-1, n} \\ E_{T, n} = E'_{h, n} \end{cases} \quad (30)$$

$$-P_{dis, \max, n} \leq P_{in, t, n} + \Delta P_{in, t, n} \leq P_{ch, \max, n} \quad n \in \Omega_{ESS} \quad (31)$$

式中: $P_{in, t, n}$ 和 $Q_{in, t, n}$ 分别为日前调度计划中 t 时段位于节点 n 的可调设备 (储能或 VSC) 的有功功率和无功功率; $\Delta Q_{in, t, n}$ 为 t 时段位于节点 n 的可调资源无功出力修正量; S_n 为节点 n 的 VSC 容量; δ_{\max} 和 δ_{\min} 分别为储能荷电状态的上、下限; $E_{t, n}$ 为 t 时段节点 n 储能电量; $E_{\max, n}$ 为节点 n 储能容量; η_{ch} 和 η_{dis} 分别为储能的充、放电效率; h 为日内调度所对应的优化时段; $E'_{h, n}$ 为日前调度计划中 h 时段节点 n 储能电量; $P_{ch, \max, n}$ 为节点 n 储能的充电功率上限; $P_{dis, \max, n}$ 为节点 n 储能的放电功率上限; Ω_{VSC} 为 VSC 节点集合。式(30)的目的是基于日前调度计划对每个时段首末时段储能电量进行约束, 使储能在进行日内功率调整时既具备了一定的灵活性, 又避免了过度充放电。

3.4 模型转化

上述优化模型中存在非线性约束, 将导致优化模型呈非凸性, 通过凸松弛^[25]手段可将原优化模型转化为二阶锥规划模型。

1) 双线性项

采用凸包络方法对于支路损耗变化量表达式(式 13)中含有的双线性项进行凸松弛。以支路有功功率变化量的平方项为例, 首先, 引入辅助变量 α_l , 将优化模型中双线性项 ΔP_l^2 替换为 α_l 。由于原问题中 α_l 的可行域属于非凸区域, 利用凸包络法可以获得该非凸区域的最紧凸松弛^[16]。松弛后的凸区域可通过以下约束进行描述:

$$\alpha_l \geq \Delta P_l^2 \quad (32)$$

$$\alpha_l \leq (\Delta P_{l,u} + \Delta P_{l,l}) \Delta P_l - \Delta P_{l,l} \Delta P_{l,u} \quad (33)$$

式中： $\Delta P_{l,u}$ 和 $\Delta P_{l,l}$ 分别为支路 l 有功功率变化量的上界和下界，可根据系统中可调资源出力调整量限值进行设定。

式(33)为线性约束，式(32)则可以进一步转化为二阶锥约束形式，具体如式(34)所示。

$$\begin{pmatrix} 2\alpha_l \\ 2\Delta P_l \\ 1 \end{pmatrix} \leq 2\alpha_l + 1 \quad (34)$$

2) VSC 运行约束

VSC 运行式(27)可转化为二阶锥约束，其表达式为：

$$\begin{pmatrix} P_{in,t,n} + \Delta P_{in,t,n} \\ Q_{in,t,n} + \Delta Q_{in,t,n} \end{pmatrix} \leq S_n \quad n \in \Omega_{VSC} \quad (35)$$

基于以上操作，原优化模型最终被转化为混合整数二阶锥规划模型。在 MATLAB 环境下，借助 Yalmip 调用成熟的商业化求解器 CPLEX 即可实现高效求解。

4 算例分析

4.1 仿真背景介绍

本文算例采用如图 2 所示的交直流混合配电网，32 节点交流配电线路和 33 节点直流配电线路通过 VSC 互联。2 条线路的有功负荷约为 13 MW，各节点接入的分布式光伏额定容量为 1 000 kW，线路参数详见文献[5]，设备参数见附录 B 表 B1。

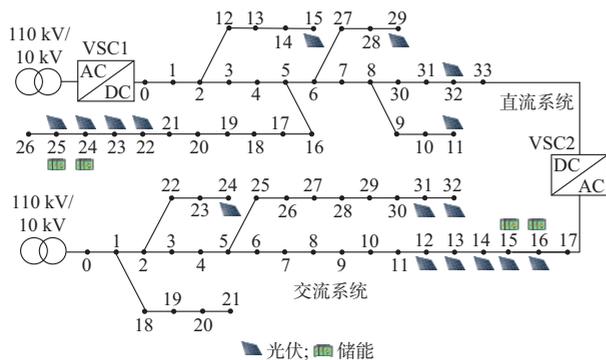


图 2 交直流混合配电网
Fig. 2 AC/DC hybrid distribution network

优化场景设置：在场景 1 中验证本文方法对于提升配电网新能源消纳能力的效果；在场景 2 中验证方法对于提升配电网负荷承载能力的效果。

1) 场景 1：对应时段 11:00—12:00，负荷及光伏在该时段内的日前及日内预测曲线如附录 B 图 B1(a) 所示。该时段配电网面临较为严重的光伏消纳压力，由于时段 11:00—12:00 处于光伏发电高峰期和

负荷用电低谷期，配电网出现较大规模功率倒送，其中，交流系统支路 2(位于交流系统节点 1 和 2 之间)和直流系统支路 2(位于直流系统节点 1 和 2 之间)均出现了较为严重的反向潮流阻塞。

2) 场景 2：对应时段 19:00—20:00，负荷及光伏在该时段内的日前及日内预测曲线如附录 B 图 B1(b) 所示。该时段配电网面临较为严重的供电压力，由于时段 19:00—20:00 处于负荷高峰期且光伏无出力，配电网供电压力较大，交流系统支路 1(位于交流系统节点 0 和 1 之间)和直流系统支路 2(位于直流系统节点 0 和 1 之间)均出现了较为严重的正向潮流阻塞。

对比方法设置：将时空解耦优化作为本文方法的对比方法。时空解耦优化将调度过程分为空间优化和时间优化 2 个阶段，考虑到储能过度频繁的充放电操作不利于储能电池寿命，空间优化先于时间优化执行。①空间优化阶段：在单一时间断面下，优化 VSC 功率。②时间优化阶段：基于 VSC 优化结果，优化储能充放电功率。

4.2 优化调度结果分析

4.2.1 场景 1 优化调度结果分析

针对时段 11:00—12:00，分别采用时空协同优化策略(以下简称本文方法)、时空解耦优化策略对日前调度计划进行修正，修正前后的配电网运行成本如附录 B 表 B2 所示。在时段 11:00—12:00 内，采用本文方法能有效降低弃光成本，相比仅采用日前调度可节省约 32.7% 的总成本，相比采用时空解耦优化策略可节省约 11% 的总成本。3 种调度策略下的支路潮流如图 3 所示。由于日前预测误差的存在，日前调度指令不能有效缓解传输阻塞问题导致大规模弃光。在日前调度结果的基础上，2 种日内调度策略对可调设备出力情况进行了修正。根据图 3 可以看出，日内调度后支路潮流阻塞情况相比日前调度有较大程度好转。

时空协同和时空解耦 2 种日内调度策略下可调设备出力情况如附录 B 图 B2 所示。相比时空解耦优化策略，本文方法在 11:30 时通过 VSC 增加了交流系统向直流系统的功率转移，并通过储能增加了直流系统由时段 11:30—12:00 的功率转移。由图 3 可以看出，在时空解耦优化中，交流侧支路 2 在 11:30 时面临较严重传输阻塞，同时，直流侧支路 2 在 12:00 时仍有较大传输裕度；但在本文方法中，配电网通过协调功率时空转移，利用直流侧支路 2 在 12:00 时的传输裕度有效缓解了交流侧支路 2 在 11:30 时面临的传输阻塞问题。因此，本文方法能提升光伏消纳水平，提高配电网运行经济性。

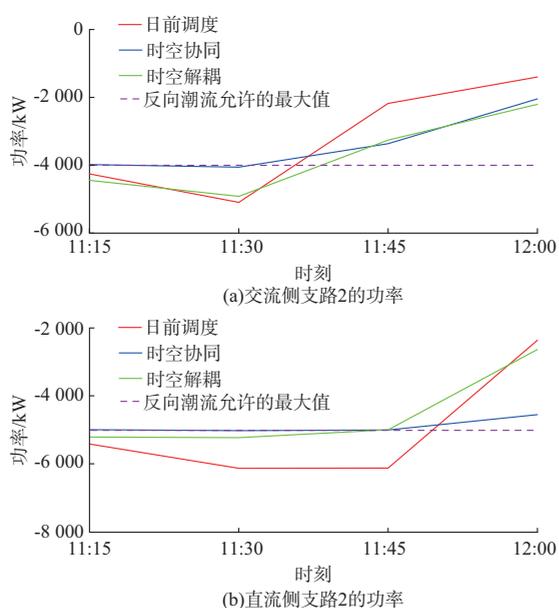


图3 场景1下支路传输阻塞情况

Fig. 3 Branch transmission congestion in scenario 1

4.2.2 场景2优化调度结果分析

针对时段19:00—20:00,分别采用本文方法、时空解耦优化策略对日前调度计划进行修正,修正前后的配电网运行成本如附录B表B3所示。在时段19:00—20:00内,采用本文方法能有效降低切负荷成本,相比仅采用日前调度可节省约56.3%的总成本,相比采用时空解耦优化可节省约19.3%的总成本。3种调度策略下的支路潮流如图4所示。由于日前预测误差的存在,日前调度指令不能有效缓解传输阻塞问题导致大量切负荷。在日前调度结果的基础上,2种日内调度策略对可调设备出力情况进行了修正。由图4可以看出,日内调度后支路潮流阻塞情况相比日前调度有较大好转。

时空协同和时空解耦2种日内调度策略下可调设备出力情况如附录B图B3所示。相比时空解耦优化,本文方法在19:30时通过VSC增加了交流系统向直流系统的功率转移,并通过储能增加了交流系统由19:45和20:00至19:30的功率转移。由图4可以看出,在时空解耦优化中,直流侧支路1在19:30时面临较严重传输阻塞,同时,交流侧支路1在19:45时仍有较大传输裕度;但在本文方法中,配电网通过协调功率时空转移,利用交流侧支路1在19:45时的传输裕度有效缓解了直流侧支路1在19:30时面临的传输阻塞问题。因此,本文方法能提升供电能力,提高配电网运行经济性。

4.2.3 24 h连续仿真结果

通过交直流混合配电网日运行模拟(交直流混合配电网的24 h连续运行曲线见附录B图B4),本

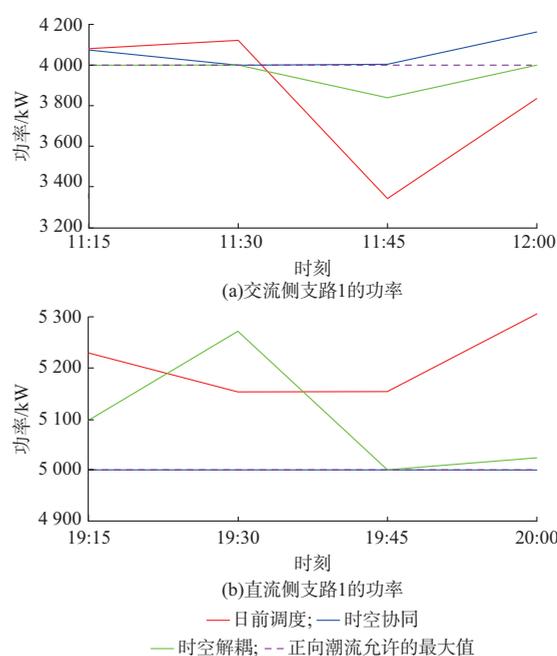


图4 场景2下支路传输阻塞情况

Fig. 4 Branch transmission congestion in scenario 2

文方法的配电网日运行成本为2 231元,时空解耦优化下的日运行成本为2 481元,相比时空解耦优化,本文方法节省约10.1%的日运行成本。因此,本文方法能够有效提升配电网运行经济性。

4.3 日运行成本的灵敏度分析

本小节将考虑可调设备关键参数对配电网日运行成本的影响。对于储能,其关键影响参数包括充放电效率和寿命损耗成本。对于VSC,本文利用等值阻抗来对非理想VSC产生的运行损耗进行等效,不涉及运行效率等参数。对此,本文分别分析了不同储能充放电效率及储能寿命损耗成本对配电网日运行成本的影响,计算结果如图5所示。

配电网日运行成本随储能充放电效率变化曲线如图5(a)所示。储能的充放电效率区间为 $[0.82, 0.98]$ 。由图5可以看出,随着储能充放电效率的提高,3种调度策略下的配电网日运行成本均呈下降趋势。本文方法的经济性始终优于时空解耦调度策略,且两者之间差距呈扩大趋势。

不同配电网日运行成本随储能寿命损耗成本变化曲线如图5(b)所示。储能寿命损耗成本区间为 $[0.05, 0.50]$ 元。由图5可以看出,随着储能寿命损耗成本的升高,3种调度策略下的配电网日运行成本均呈上升趋势。本文方法的经济性始终优于时空解耦调度策略,且两者之间差距随储能寿命损耗成本的降低而逐渐升高。

4.4 模型求解效率验证

基于前推回代法得到的潮流结果,对潮流灵敏

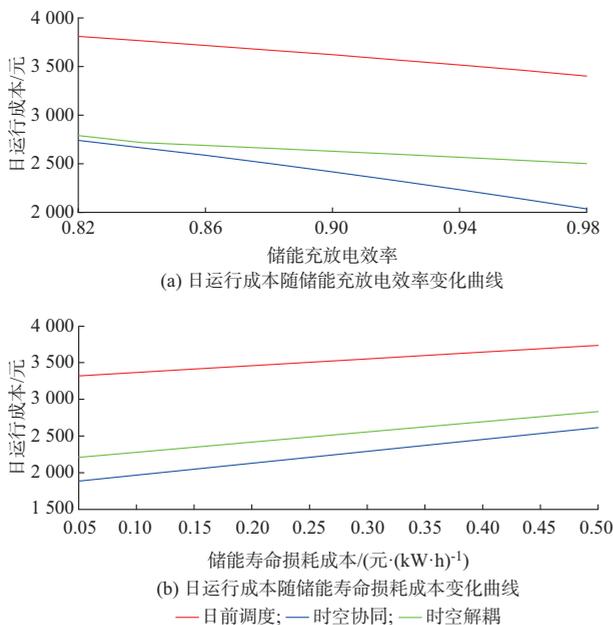


图5 日运行成本关于储能参数的灵敏度曲线
Fig. 5 Sensitivity curves of daily operation cost with respect to energy storage parameters

度改进模型的计算精度进行分析。附录B图B5展示了场景1下11:15时交流系统各节点电压、支路功率、支路损耗对比曲线,可以看出,潮流灵敏度改进模型的计算结果与前推回代法的潮流计算结果基本吻合。在图B5(c)所示节点电压对比中,常规电压灵敏度法的平均绝对误差为 1.9×10^{-2} kV,本文方法的平均绝对误差则为 6.8×10^{-4} kV,计算精度提升了2个数量级。

在优化模型中分别采用DistFlow形式潮流约束和灵敏度形式潮流约束(本文方法),两模型在场景1和场景2下的优化结果如附录B表B4和表B5所示。在弃光场景(场景1)下,弃光量的存在导致目标函数不再是节点注入功率的严格增函数,DistFlow模型的凸松弛误差增大,节点电压与支路功率的平均相对误差远高于本文方法,导致优化得到的总成本高于本文方法,且存在较大差距,本文方法的平均运行时间相比DistFlow模型缩短了40%;在切负荷场景(场景2)下,本文方法依然保持了低于0.1%的计算误差,优化得到的总成本与DistFlow模型基本一致,本文方法的平均运行时间相比DistFlow模型缩短了约51%。

综上所述,在优化模型中采用潮流灵敏度改进模型替代常规潮流模型,能够实现模型精度与求解速度之间的良好平衡,从而可以更好地满足多场景下配电网短时甚至实时调度的需求。

5 结语

基于时空协同优化思想,在优化调度中通过协调VSC和储能出力能够实现资源的时空互补。本文提出了一种基于时空协同优化的交直流混合配电网调度计划日内修正策略。基于仿真结果得到的主要结论如下。

1)基于所提日内优化调度方法修正日前调度偏差能够有效应对负荷与新能源不确定性,提升配电网运行安全性与经济性。

2)相比时空解耦优化,在日内调度中采取时空协同优化能够充分发挥资源的时空互补优势,使配电网具有更高的运行经济性。

3)相比常规潮流约束,采用潮流灵敏度改进模型表达优化模型中的潮流约束,能够在保证潮流约束准确性的同时显著提升模型求解速度。

将时空协同优化调度推广到更加一般形式的主动配电网,考虑不同时间尺度下的时空协同,深入发掘主动配电网源荷资源的时空互补优势将是下一步的工作重点。

本文在撰写过程中得到电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室开放课题(SKLD20KM14)的资助,特此感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] MEHRABANKHOMARTASH M, SAEEDIFARD M, GRIJALVA S. Model predictive control based AC line overload alleviation by using multi-terminal DC grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 177-187.
- [2] 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.
- [3] 赵波,王财胜,周金辉,等.主动配电网现状与未来发展[J].电力系统自动化,2014,38(18):125-135. ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135.
- [4] SCIANO D, RAZA A, SALCEDO R, et al. Evaluation of DC links on dense-load urban distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1317-1326.
- [5] 许彪,唐巍,张璐,等.主动配电网多场景直流改造经济性评估方法[J].电力系统自动化,2019,43(23):50-57.

- XU Biao, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Economic evaluation method for multi-scenario DC transformation of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 50-57.
- [6] 齐晓光,姚福星,朱天瞳,等.考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J].电力自动化设备,2021,41(10): 11-19.
- QI Xiaoguang, YAO Fuxing, ZHU Tiantong, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage in power system considering large-scale wind power integration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 11-19.
- [7] ZHANG L, CHEN Y, SHEN C, et al. Coordinated voltage regulation of hybrid AC/DC medium voltage distribution networks [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 463-472.
- [8] ZHENG W Y, WU W C, ZHANG B M, et al. A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1021-1033.
- [9] ZHAO B, XU Z C, XU C, et al. Network partition-based zonal voltage control for distribution networks with distributed PV systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4087-4098.
- [10] JI H R, WANG C S, LI P, et al. SOP-based islanding partition method of active distribution networks considering the characteristics of DG, energy storage system and load [J]. Energy, 2018, 155: 312-325.
- [11] XIA Y H, WEI W, YU M, et al. Decentralized multi-time scale power control for a hybrid AC/DC microgrid with multiple subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 4061-4072.
- [12] 颜湘武,徐韵,李若瑾,等.基于模型预测控制含可再生分布式电源参与调控的配电网多时间尺度无功动态优化[J].电工技术学报,2019,34(10):2022-2037.
- YAN Xiangwu, XU Yun, LI Ruojin, et al. Multi-time scale reactive power optimization of distribution grid based on model predictive control and including RDG regulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2022-2037.
- [13] 董雷,孟天骄,陈乃仕,等.采用马尔可夫链-多场景技术的交直流主动配电网优化调度[J].电力系统自动化,2018,42(5): 147-153.
- DONG Lei, MENG Tianjiao, CHEN Naishi, et al. Optimized scheduling of AC/DC hybrid active distribution network using Markov chains and multiple scenarios technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 147-153.
- [14] 任佳依,顾伟,王勇,等.基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J].中国电机工程学报,2018,38(5):1397-1407.
- REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.
- [15] 林哲,胡泽春,宋永华.最优潮流问题的凸松弛技术综述[J].中国电机工程学报,2019,39(13):3717-3728.
- LIN Zhe, HU Zechun, SONG Yonghua. Convex relaxation for optimal power flow problem: a recent review [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3717-3728.
- [16] JABR R A. Radial distribution load flow using conic programming [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1458-1459.
- [17] ABDELOUADOUD S Y, GIRARD R, NEIRAC F P, et al. Optimal power flow of a distribution system based on increasingly tight cutting planes added to a second order cone relaxation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 69: 9-17.
- [18] BRENNA M, DE BERARDINIS E, DELLI CARPINI L, et al. Automatic distributed voltage control algorithm in smart grids applications [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 877-885.
- [19] 郭清元,莫超,吴杰康,等.分布式电源接入的配电系统多类型无功源出力优化方法[J].电力工程技术,2020,39(5):211-219.
- GUO Qingyuan, MO Chao, WU Jiekang, et al. Multi-type reactive power output optimization method of distribution system with distributed generations [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 211-219.
- [20] 李婷,胥威汀,刘向龙,等.含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2019,47(12):177-187.
- LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187.
- [21] 寇凌峰,张颖,季宇,等.分布式储能的典型应用场景及运营模式分析[J].电力系统保护与控制,2020,48(4):177-187.
- KOU Lingfeng, ZHANG Ying, JI Yu, et al. Typical application scenario and operation mode analysis of distributed energy storage [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 177-187.
- [22] WANG S X, LIU Q, JI X Q. A fast sensitivity method for determining line loss and node voltages in active distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1148-1150.
- [23] 刘琪,王守相,吉兴全.主动配电网宽适应性潮流灵敏度分析模型[J].电力系统自动化,2020,44(13):81-88.
- LIU Qi, WANG Shouxiang, JI Xingquan. Power flow sensitivity analysis model with wide adaptability for active distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 81-88.
- [24] QI C, WANG K Y, FU Y, et al. A decentralized optimal operation of AC/DC hybrid distribution grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6095-6105.
- [25] 谢仕炜,胡志坚,王珏莹,等.基于不确定随机网络理论的主动配电网多目标规划模型及其求解方法[J].电工技术学报,2019,34(5):1038-1054.
- XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying, et al. A multi-objective planning model of active distribution network based on uncertain random network theory and its solution algorithm [J].

Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1038-1054.

张璐(1990—),男,博士,副教授,主要研究方向:交直流混联配电网、极端灾害下配电网恢复。E-mail: zhanglul@cau.edu.cn

许彪(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向:交直流混联配电网。E-mail:gbxubiao@163.com

唐巍(1971—),女,通信作者,博士生导师,主要研究方向:主动配电网、大规模光伏消纳技术。E-mail: weitang@cau.edu.cn

(编辑 杨松迎)

Intra-day Correction Strategy of Dispatching Plan for AC/DC Hybrid Distribution Network Based on Spatio-Temporal Power Coordination

ZHANG Lu¹, XU Biao¹, TANG Wei¹, ZHANG Bo¹, SHEN Chen²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: AC/DC hybrid distribution network can realize the flexible transfer of power through voltage source converters (VSCs) in space dimension. In the meantime, the energy storage configuration in the system can realize the power transfer in time dimension. An intra-day correction strategy of optimal dispatching plan for AC/DC hybrid distribution network considering the coordination of spatio-temporal power regulation is proposed. In the intra-day correction, the coordinated optimization of VSCs and energy storage is utilized to effectively cope with the random fluctuations of the loads and renewable energy resources. In the optimization model, the sensitivity method is used to simplify the conventional power flow constraints, and the variation of branch loss is introduced to correct the approximate error of the linear sensitivity method, to ensure the accuracy of power flow constraints and significantly improve the solving efficiency. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation cases.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51977211).

Key words: AC/DC hybrid distribution network; spatio-temporal coordination; voltage source converter (VSC); energy storage; power flow sensitivity; intra-day correction

