

DOI: 10.61369/NPS.2025020001

考虑城市电网弹性裕度的柔性直流控制策略

章锐¹, 宋秉俊¹, 孙正龙¹, 王喜兴², 李振新²

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012;

2. 国网吉林供电公司, 吉林 吉林 132001)

Flexible DC control strategy considering the resilience margin of urban power grids

ZHANG Rui¹, SONG Bingjun¹, SUN Zhenglong¹, WANG Xixing², LI Zhenxin²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin, Jilin 132012;

2. State Grid Jilin Power Supply Company, Jilin, Jilin 132001)

摘要: 随着城市电网柔性直流技术的不断发展, 柔性负荷的逐步增多为城市电网运行提供了充足的可调资源。为充分利用柔性直流和柔性负荷的调节能力, 提出考虑城市电网弹性裕度的柔性直流控制策略。首先, 分析了城市电网弹性以及柔性直流协调优化现状, 提出基于柔性直流提升城市电网调节能力的思路; 然后, 给出了城市电网内部可控资源弹性模型, 以充分挖掘内部资源的可调能力; 最后, 提出柔性直流和可调资源协同控制策略, 其目标是充分发挥二者优势, 进一步提升城市电网整体调节能力, 为新型电力系统建设提供支撑。最后, 用仿真算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 城市电网; 弹性裕度; 柔性直流; 控制策略

ABSTRACT: With the continuous development of flexible DC technology in urban power grids and the gradual increase in flexible loads, abundant controllable resources have become available to support the operation of urban power systems. To fully utilize the regulation capabilities of both flexible DC systems and flexible loads, this project proposes a flexible DC control strategy that considers the resilience margin of urban power grids. First, the coordination and optimization method between grid resilience and flexible DC systems is analyzed, aiming to enhance the grid's regulation capacity through the controllability of flexible DC. Then, a resilience model for controllable internal resources within the urban grid is developed to fully exploit their regulation potential and further improve the grid's flexibility. Furthermore, by combining the coordination capability of flexible DC with the regulation range of controllable resources, a collaborative control strategy is proposed to maximize the advantages of both, supporting the development of a new-type power system. Finally, simulation case studies verify the effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: urban power grid; resilience margin; flexible DC; control strategy

0 引言

随着全球气候变化及新型技术在城市电网中的深化应用, 城市电网的运行与控制正面临巨大挑战^[1]。一方面, 为降低全球二氧化碳排放, 接入城市电网的新能源占比正逐步提升。然而, 新能源所具有的高波动性与强不确定性^[2-5], 增加了城市电网调控难度; 另一方面, 随着新技术的应用, 城市电网内部负荷与电网之间双向互动趋势加深。为重塑城市电网运行模式^[6], 城市电网迫切需要更多灵活可调资源, 提升调节水平。此外, 还需开发更具灵活性的运行调控方法, 以提升系统控制能力^[7]。

在灵活可调资源方面, 电动汽车^[8-11]和可控空调^[12-13]负荷在城市电网中占比逐步提高。将配电网与路网调控相结合, 能够有效挖掘电动汽车的弹性调节能力。例如, 通过引导电动汽车选择合适的充电节点与充电时段, 可改善城市电网充电负荷的时空分布特性^[8-11]。空调系统产生的热能可储存于建筑物中。通过调节空调温度设定值, 能够有效改变其在不同时段耗电量, 进而为配网提供弹性调节能力^[12-13]。电动汽车与可控空调的调控手段多由虚拟电厂和负荷聚合商主导^[14-16], 以便于释放城市电网的灵活性及资源调控潜力^[17-18]。

在灵活运行调控模式方面, 目前城市电网的功率平衡能力有待提升, 亟需补充灵活运行手段。电压源换流器(VSCs)具有提升输电效率、实现无功

补偿、支持独立灵活的功率控制以及可进行无限终端组合等优势。基于电压源换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)技术在城市中心馈电、岛屿供电、电网互联及海上风电并网等场景中有较多应用,也为解决城市电网问题提供方案^[19]。文献[20]和文献[21]采用VSC-HVDC互联网络提升城市电网的输电容量、灵活性及利用率。文献[22]将交流配电线路改造为直流线路,以提高输电容量及分布式电源的渗透率。城市电网的直流输电技术还能够提升电网应对突发事件或灾害的恢复能力^[1]。文献[23]和文献[24]采用柔性直流输电技术对城市电网不同区域进行灵活互联,协调区域间运行功率,改变城市电网分区运行状态,以提升城市电网运行的灵活性、安全性与稳定性。文献[25]提出一种分布式非线性控制器,旨在高压直流系统发生扰动后实现换流器功率的分配及直流电压的调节。

城市电网灵活性资源调控、直流调控均能提升城市电网的灵活性与弹性调节能力,且已取得一定成效。负荷侧调控与电网侧调控具有一定的互补特性,二者协同配合能够发挥更大的调控潜力。然而,上述两种调控模式目前处于独立运行状态,亟需相应协同运行技术以充分释放城市电网的弹性调节能力。

鉴于上述问题,本文提出一种考虑城市电网弹性裕度的柔性直流控制策略,用于协调城市电网负荷侧与电网侧的调控能力。1)提出城市电网灵活性资源与柔性直流的协同优化框架,对城市电网的负荷侧弹性调节资源与电网侧灵活运行模式进行协同控制,最大化提升城市电网的灵活运行水平。2)构建城市电网可控资源的弹性模型,有效评估城市电网不同区域的负荷上、下调节能力。3)提出一种基于城市电网弹性的柔性直流控制方法,依据城市电网不同区域负荷侧的弹性调控水平,为电网侧的柔性直流控制提供负荷侧调控水平参考,更合理地将新能源出力分配至城市电网的不同区域,提高新能源消纳水平。

1 城市电网弹性与柔直协调优化

随着能源互联网的发展,城市电网将拥有更多的柔性可调节资源,如电动汽车、可控空调、抽水蓄能电站等,通过上、下调节其功率,可提升城市电网的弹性。城市电网不同区域可调节资源的差别,导致其可调节弹性裕度不同。柔性直流在输电与配置上具有一定的优势,且具有一定的弹性调节

能力,所以含柔性直流的电网将是未来城市电网一种重要网络架构(图1)。

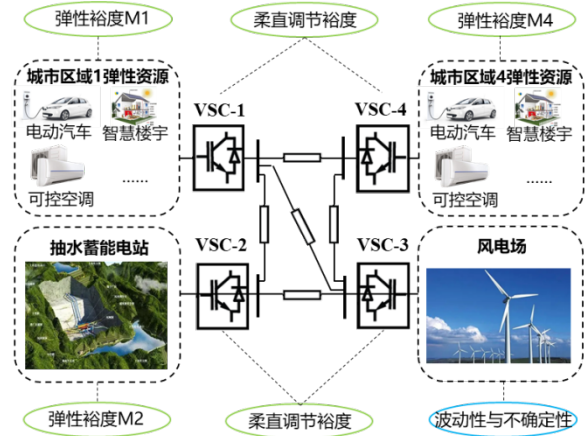


图1 城市电网弹性资源与柔直调节裕度

Fig. 1 Coordinate and optimize the architecture of power CPS planning and operation

双碳目标下,图1所示城市电网将接入大量的风电、光伏等新能源,城市电网电能的来源将以新能源为主。新能源出力的不确定性与波动性会威胁城市电网安全运行^[26]。本文的研究目标是,基于城市电网不同区域可调控资源的弹性裕度,结合柔性直流,对新能源出力的波动性进行弹性分配,促进新能源的消纳,提高新能源的消纳比例。

2 城市电网可控资源弹性模型

建立可控资源弹性模型目的在于实时评估城市电网当前时刻可控资源向上、下可调节的功率量。可控资源弹性模型如公式(1)所示。

$$\begin{cases} P_{EL}^U(t) = \sum_{i=1}^{k_1} P_{AC,i}^U(t) + \sum_{i=1}^{k_2} P_{EV,i}^U(t) + \sum_{i=1}^{k_3} P_{PS,i}^U(t) \\ P_{EL}^D(t) = \sum_{i=1}^{k_1'} P_{AC,i}^D(t) + \sum_{i=1}^{k_2'} P_{EV,i}^D(t) + \sum_{i=1}^{k_3'} P_{PS,i}^D(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{EL}^U(t)$ 表示城市电网 t 时刻可向上调节的功率; $P_{EL}^D(t)$ 表示城市电网 t 时刻可向下调节的功率; $P_{AC,i}^U(t)$ 为 t 时刻第 i 台空调可增加功率, k_1 表示增加功率的空调数; $P_{AC,i}^D(t)$ 为 t 时刻第 i 台空调减少功率, k_1' 为减少功率的空调数; $P_{EV,i}^U(t)$ 为 t 时刻第 i 台电动汽车增加的功率量, k_2 表示增加功率的电动汽车数; $P_{EV,i}^D(t)$ 为 t 时刻第 i 台电动汽车减少的功率, k_2' 表示可减少功率的电动汽车数; $P_{PS,i}^U(t)$ 为 t 时刻第 i 台抽水蓄能电站抽水功率, k_3 为 t 时刻参

与抽水的储水蓄能电站数； $P_{PS,i}^D(t)$ 表示 t 时刻第 i 台抽水蓄能电站发电量， k_3^i 为 t 时刻参与发电的抽水蓄能电站数。

2.1 空调弹性模型

本文假设：空调以制冷模式、“开-关”、额定功率 P_{AC} 运行，室内温度 T_{room} 控制在以设定值 T_{AC}^S 为基准的上下浮动 $T_{AC}^d/2$ 的舒适区中。

空调功率弹性上调量计算如公式 (2) 所示，当室内温度高于舒适区温度下限时，启动空调负荷进行降温。此时启动空调产生的负荷为可上调功率。若此时室内温度低于或等于舒适区温度下限，空调不启动，不产生上调功率。

$$P_{AC}^U(t) = \begin{cases} P_{AC}, & T_{room} > T_{AC}^S - T_{AC}^d/2 \\ 0, & T_{room} \leq T_{AC}^S - T_{AC}^d/2 \end{cases} \quad (2)$$

空调功率弹性下调量计算如公式 (3) 所示。当室内温度在舒适区间时，可关断正在运行的空调。此时关断空调减小的负荷为可下调功率。当室内温度低于舒适区时，空调处于停运状态；当室内温度高于舒适区上限时，空调要保持运行状态，使温度降到舒适区中。此时空调无法关断运行，故不产生负荷量的减小。

$$P_{AC}^D(t) = \begin{cases} P_{AC}, & T_{AC}^S - T_{AC}^d/2 < T_{room} < T_{AC}^S + T_{AC}^d/2 \\ 0, & T_{room} \leq T_{AC}^S - T_{AC}^d/2, T_{room} \geq T_{AC}^S + T_{AC}^d/2 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 电动汽车弹性模型

假设电动汽车以恒功率 P_{EV} 充电。

当电动汽车的荷电状态 $SOC(t)$ 低于充电结束时电动汽车达到的最小荷电状态 SOC_{min} ，则电动汽车始终处于充电状态，无弹性调节能力。

当 $SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max}$ 时，电动汽车参与弹性调节，具体上、下调功率计算如公式 (4) 所示。

$$\begin{cases} P_{EV}^U(t) = P_{EV}(1-N), & SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max} \\ P_{EV}^D(t) = P_{EV}N, & SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max} \\ P_{EV}^U(t) = P_{EV}^D(t) = 0, & SOC(t) < SOC_{min} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $N \in (0,1)$ ，为“0”时表示电动汽车未充电，为“1”表示电动汽车充电。

2.3 抽水蓄能电站弹性模型

抽水蓄能电站抽水运行和发电运行与其库容量有关。假设上下游库容量相等。上游库容量 V_{t+1} 由剩余库容量 V_t 、降雨流量 Q_{rain} 、抽水流量 Q_U 、以及

发电容量 Q_D 决定，如公式 (5) 所示。

$$V_{t+1} = V_t + (Q_{rain} + Q_U - Q_D)\Delta t \quad (5)$$

式中： Δt 为运行周期。

抽水蓄能电站在当前时刻可调弹性功率由上时刻抽水蓄能运行状态决定。上调弹性功率量计算如公式 (6) 所示，下调弹性功率量计算如公式 (7) 所示。

$$P_{PS}^U(t+1) = \begin{cases} (P_{U,max} - P_U(t))(1-y_t), & V_t < V_{max} \\ (P_D(t) + P_{U,max})y_t, & V_t < V_{max} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{PS}^D(t+1) = \begin{cases} (P_{D,max} - P_D(t))y_t, & V_t > V_{min} \\ (P_U(t) + P_{D,max})(1-y_t), & V_t > V_{min} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $P_U(t)$ 表示 t 时刻抽水蓄能电站抽水功率； $P_{U,max}$ 表示抽水蓄能电站抽水功率上限； $P_D(t)$ 为 t 时刻抽水蓄能电站发电功率， $P_{D,max}$ 表示抽水蓄能电站发电功率上限； V_{min} 为库容量下限， V_{max} 为库容量上限； $y_t \in (0,1)$ ，为“0”表示 t 时刻抽水蓄能电站处于抽水状态，为“1”表示 t 时刻抽水蓄能电站处于发电状态。

3 考虑弹性裕度的多端直流输电系统控制

为最大程度消纳新能源，针对考虑城市电网弹性裕度 (ES) 的 VSC-HVDC 系统，本文提出一种基于最优直流潮流策略的新型控制方法。

3.1 多端直流输电系统基础模型分析

VSC-MTDC 系统存在多种拓扑结构，例如点对点连接、辐射状网络和网状网络^[27,29]。本文以最具挑战性且最具应用前景的拓扑结构——网状网络为例进行研究，构建网状结构 VSC-HVDC 系统的稳态分析模型。

直流电压与换流器功率的广义关系^[29]可表述为：

$$P_i - P_i^* + R_i(V_i - V_i^*) = 0 \quad (8)$$

式中： P_i 和 P_i^* 分别表示公共连接点 (PCC) 处的换流器功率及其参考值； V_i 和 V_i^* 分别表示直流电压及其参考值； R_i 为第 i 个电压源换流器 (VSC) 的实值下垂系数。

当 R_i 为正值时，换流器运行于电压下垂控制模

式；当 R_i 等于0时，电压源换流器运行于恒功率控制模式；而对于恒压控制的电压源换流器，其 R_i 为无穷大。

特定换流器交流侧与直流侧注入功率的关系可表示为：

$$P_i = P_{DC,i} + P_{loss,i} \quad (9)$$

式中： $P_{DC,i}$ 为直流侧的功率注入量； $P_{loss,i}$ 为 VSC 的损耗。

第 i 个 VSC 的直流功率与直流电压之间的关系描述如下：

$$P_{DC,i} = V_i \left(\sum_{j=1}^n g_{ij} V_j \right) \quad (10)$$

式中： n 表示 MTDC 系统中的节点数； g_{ij} 为导纳矩阵中的元素。

3.2 基于最优直流潮流的协同控制方法

3.2.1 分层控制框架

本文所提方法基于直流电网最优潮流，其控制层级如图2所示。

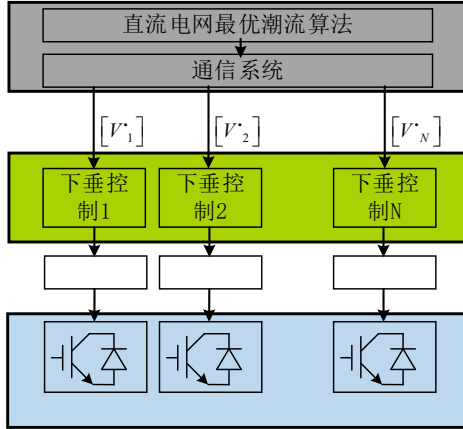


图2 多端直流系统的分层控制框架

Fig. 2 Hierarchical control framework for an MTDC system

由图2可知，由二次控制层计算得到的直流电网最优潮流，通过通信系统传输至一次控制层。一次控制层采用分布式直流电压控制策略（即直流电压下垂控制），以提高 MTDC 系统的稳定性与灵活性。直流网络的物理层采用模块化多电平换流器（MMCs），实现交、直流电网间有功功率交换。

3.2.2 直流电网最优潮流算法

在所提方法中，直流电压参考值 V^* 被设定为可变量，其大小由直流电网最优潮流算法的计算结果确定。

可用裕度^[30-32]定义为：

$$H_i = P_i^{\max} - P_i \quad (11)$$

式中： P_i^{\max} 为第 i 个 MMC 的最大功率。

第 i 个 MMC 的功率分配指数 S_i 定义为：

$$S_i = \min\{H_i, EM_i\} \quad (12)$$

直流电网潮流可实现基于下垂控制的 MMC 之间的功率按比例分配，分配比例与功率分配指数 S_i 成正比。

$$\begin{cases} \frac{\Delta P_1}{S_1} = \frac{\Delta P_2}{S_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta P_{n-1}}{S_{n-1}} = \frac{\Delta P_n}{S_n} \end{cases} \quad (13)$$

式中： ΔP_i 为系统运行状态变化时第 i 个 MMC 的有功功率变化量。

由式(13)可知，为实现按 S_i 成比例分配功率，存在 $n-1$ 个等式约束。因此，存在一个额外的自由度来实现优化目标，即最小化直流电压偏差，其表达式为：

$$\min V_{\text{variation}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta V_i)^2} \quad (14)$$

式中： ΔV_i 为系统运行状态变化时第 i 个 MMC 的直流电压变化量。

因此，优化函数可表述为：

$$\begin{cases} \min V_{\text{variation}} \\ \text{s.t. } f_1(P, V) = 0 \\ f_2(\Delta P) = 0 \\ g(P, V) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中： $\min V_{\text{variation}}$ 为优化目标； $f_1(P, V)$ 为广义直流潮流方程； $f_2(\Delta P)$ 代表式(7)所示的功率按比例分配方程组； $g(P, V)$ 表示不等式约束，即直流输电线路与电缆电流限制、直流节点电压限制、MMC 有功功率限制。

4 算例分析

空调额定功率为3 kW，温度舒适区为19~24℃。设A区域有1000户可控空调，可上调功率1.500 MW，可下调功率1.500 MW。B区域有

1500户可控空调，可上调功率1.800 MW，可下调功率为2.700 MW。

电动汽车额定功率为3.3 kW，容量为33 kWh。设A区域有2000个电动汽车充电，可上调功率为2.000 MW，可下调功率为3.000 MW。设B区域有1000个电动汽车充电，可上调功率为1.000 MW，可下调功率为1.500 MW。

抽水蓄能电站最大发电功率为10 MW，最大抽水功率为10 MW，最大储能量为20 MWh。

为验证所提方法，在MATLAB/Simulink的Simscape专用技术模块库中搭建四端 HVDC 系统，结构如图3所示。

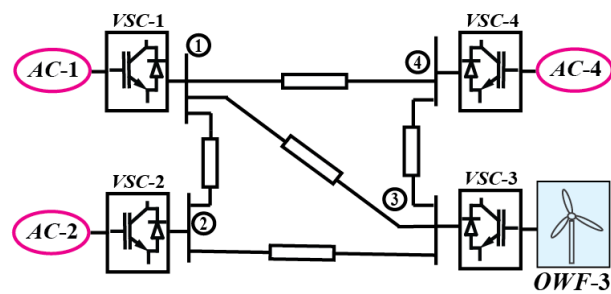


图3 四端 HVDC 系统
Fig. 3 Four-terminal HVDC system

图3所示系统包含1个海上风电场和3个由阻抗后接理想电压源表示的交流电网。其中，采用有功功率控制模式的VSC-3与海上风电场相连，其余3个采用下垂控制的电压源换流器则与交流电网相连。直流额定电压为640 kV。

表1、表2和表3分别给出了直流输电线路的长度、参数以及VSC的参数。表4给出了初始直流潮流计算结果。换流器1、2、4的弹性裕量分别为120 MW、140 MW和100 MW。

表1 直流输电线路长度					
Tab. 1 DC transmission line length					
线路	1-2	1-3	1-4	2-3	3-4
长度/km	80	200	125	160	160

表2 直流线路数据			
Tab. 2 DC line data			
参数	$R/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$L/(\mu\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	$C/(\text{nF} \cdot \text{m}^{-1})$
数值	0.010 0	0.146 3	0.266 2

表3 VSC 参数				
Tab.3 VSC parameters				
VSC	1	2	3	4
额定功率 P_i^{\max} /MW	500	500	900	500

下垂系数 $R_i /(\text{kW} \cdot \text{V}^{-1})$	9.69	4.84	0	4.84
功率参考值 P_i^* /MW	200	170	-500	150

表4 初始直流潮流计算结果
Tab. 4 The initial DC power flow results

VSC 站编号	1	2	3	4
V_i /kV	638.9	638.9	639.8	639.0
$P_{\text{DC},i}$ /MW	189.3	164.9	-500	145.1

在 $t=1$ s时，VSC-3的有功功率从500 MW增至800 MW。所提出的控制方法在 $t=1.5$ s时启动。图4和图5分别展示了直流功率和电压的变化情况。图6给出了直流电压总变化量的有效值。表5列出了功率变化率和功率分配指数 $\Delta P_i / S_i$ 。

表5 下垂控制的换流器-1 换流器-2 和换流器-4 的
 $\Delta P_i / S_i$ 值

VSC 站编号	1	2	4
$\Delta P_i / S_i$	0.830	0.830	0.830

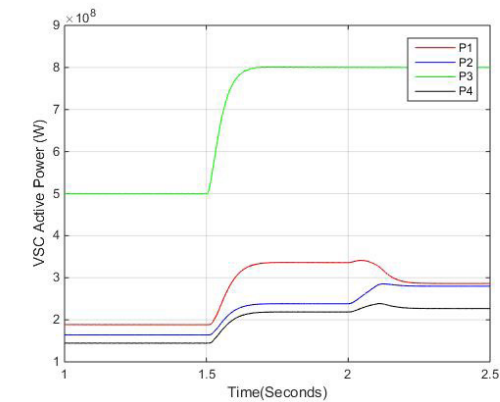


图4 VSC-3 功率变化情况下的直流功率
Fig. 4 DC powers under VSC-3 power variation

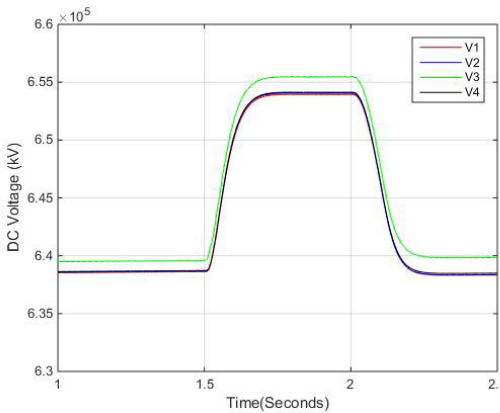


图5 VSC-3 功率变化情况下的直流电压
Fig. 5 DC voltages under VSC-3 power variation

从图4可以看出,随着VSC-3的功率增加,VSC-1的功率增量超过了其弹性裕量(120 MW),而VSC-2和VSC-4仍有较大冗余容量。这会导致交流电网1(AC-1)出现功率失衡。在 $t=2$ s启动所提方法后,VSC-1的功率负担由VSC-2和VSC-4分担,从而使所有换流器及其所连接的交流系统均处于正常运行状态。此外,图5和图6表明,采用所提控制方法后,直流电压偏差得到了显著改善。从表4可以看出,功率分配与功率分配指数 s_i 完全成比例。

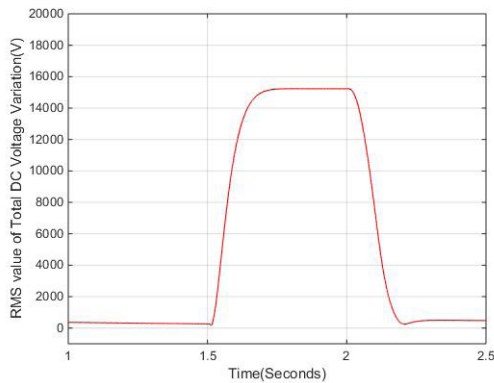


图6 直流电压变化 VSC-3 的功率变化

Fig. 6 DC voltage variation VSC-3 power variation

5 结论

为充分融合柔性资源和直流的调节能力、提升城市电网的调节水平,本文提出一种考虑城市电网弹性裕度的柔性直流控制策略,结论如下:

1) 采用所构建的城市电网调节资源与柔性直流的协同优化框架,可实现负荷侧弹性调节资源与电网侧运行方式的深度融合,有效提升城市电网的灵活运行能力。

2) 利用所建立的城市电网可控资源的弹性模型,可对不同区域的负荷上、下调节能力进行定量评估,掌握各区域负荷侧资源的可调范围与响应潜力。该弹性模型可为精准调度提供基础。

3) 利用所提出的基于电网弹性的柔性直流控制方法,通过分析各区域的弹性调控水平,可优化柔性直流的有功功率分配策略,引导新能源电力合理注入负荷响应能力强的区域,提升新能源消纳效率与电网运行韧性。

参考文献

- [1] 章锐,于继来. 新型城市电网调控体系架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(S1): 97-113. ZHANG R, YU J L. New urban power grid dispatching and control architecture and key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 97-113.
- [2] ZHANG R, YU J. External tie line power fluctuations smoothing strategy of new urban power grid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153: 109289.
- [3] ZHANG R, YU J. An orderly power utilization method for new urban power grids facing severe electricity shortages[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(6): 1710-1723.
- [4] 董宸,吴强,黄河,等. 基于免疫算法的电网拓扑结构识别[J]. 发电技术, 2023, 44(1): 125-135. DONG C, WU Q, HUANG H, et al. Power grid topology identification based on immune algorithm[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 125-135.
- [5] 刘洪波,刘坤诚,盖雪扬,等. 高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 151-161. LIU H B, LIU S C, GAI X Y, et al. Overview of active distribution network planning with high proportion of new energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 151-161.
- [6] ZHANG R, YU J L, TANG Y, et al. Capacity evaluation of central air conditioning load participating in peak shaving of renewable dominated power systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(1): 181-199.
- [7] ZHANG R, YU J. New urban power grid flexible load dispatching architecture and key technologies[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1168768.
- [8] 章锐,于继来. 电动公交车负荷参与新型城网调峰的能力评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 82-94.
- [9] ZHANG R, YU J. Capacity evaluation of electric bus load participating in peak shaving of new urban power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 82-94. 贾俊,范炜豪,吕志鹏,等. 用于电动汽车集群并网的直流变压器启动研究[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 875-882. JIA J, FAN W H, LV Z P, et al. Research on startup of DC transformer for electric vehicle cluster grid connection[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 875-882.
- [10] 徐睿婕,李智,赵凤伟,等. 考虑氢能多元利用与绿证-碳交易机制的虚拟电厂优化调度方法[J]. 碳中和与新型电力系统, 2025, 3(1): 12-22. XURJ, IIZ, ZHAO F W, et al. Optimal scheduling method

- for virtual power plant considering multiple utilization of hydrogen energy and green certificate-carbon trading mechanisms[J]. *Carbon Neutralization and New Power Systems*, 2025, 3(1): 12–22.
- [11] 郑志文, 王明晓, 曹春兰, 等. 基于改进的RBF神经网络的光储充一体化建筑优化模型的研究[J]. *碳中和与新型电力系统*, 2023, 1(1): 8–13.
- ZHENG Z W, WANG M X, CAO C L, et al. Research on optimization model of integrated photovoltaic storage and charging building based on improved RBF neural network[J]. *Carbon Neutralization and New Power Systems*, 2023, 1(1): 8–13.
- [12] MAHDAVI N, BRASLAVSKY J H. Modelling and control of ensembles of variable-speed air conditioning loads for demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 4249–4260.
- [13] SONG M, GAO C, YAN H, et al. Thermal battery modeling of inverter air conditioning for demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 9(6): 5522–5534.
- [14] BAHRAMI S, CHEN Y C, WONG V W S. Deep reinforcement learning for demand response in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 12(2): 1496–1506.
- [15] 覃振坤, 李琦芬, 苏郭. 考虑不同策略的电-气-热-冷综合能源系统多目标优化调度研究[J]. *碳中和与新型电力系统*, 2023, 1(1): 68–73.
- QIN Z K, LI Q F, GUO S. Research on multi-objective optimal scheduling of electric-gas-heat-cooling integrated energy system considering different strategies[J]. *Carbon Neutralization and New Power Systems*, 2023, 1(1): 68–73.
- [16] VAHEDIPOUR-DAHRAIE M, RASHIDIZADEH-KERMANI H, SHAFIE-KHAH M, et al. Risk-averse optimal energy and reserve scheduling for virtual power plants incorporating demand response programs[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 12(2): 1405–1415.
- [17] COFFMAN A R, GUO Z, BAROOAH P. Characterizing capacity of flexible loads for providing grid support[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 36(3): 2428–2437.
- [18] 章锐. 新型城市电网参调能力评估与不平衡调度问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- ZHANG R. Research on the participation capability assessment and unbalanced dispatching problems in new urban power grid[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024.
- [19] LIU J, HUANG X, LI Z. Multi-time scale optimal power flow strategy for medium-voltage DC power grid considering different operation modes[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 8(1): 46–54.
- [20] SUN K, XIAO H, PAN J, et al. VSC-HVDC interties for urban power grid enhancement[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 4745–4753.
- [21] PAN J Q, NUQUI R, QI L S, et al. Urban power grid enhancement and modernization with VSC-HVDC interties[C]//2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). Chicago, IL, USA : IEEE, 2020: 1–5.
- [22] ZHANG L, LIANG J, TANG W, et al. Converting AC distribution lines to DC to increase transfer capacities and dg penetration[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 10(2): 1477–1487.
- [23] XIAO J, YI L, BAI L, et al. Key technologies for flexible interconnection in urban power grid and pilot demonstration[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2018, 28(8): e2570.
- [24] JIANG X, XIAO J, SHE B, et al. Locating and sizing of partition flexible interconnection converter station in large urban power grids[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13(21): 4830–4841.
- [25] ZHANG Y, SHOTORBANI A M, WANG L, et al. Distributed voltage regulation and automatic power sharing in multi-terminal HVDC grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(5): 3739–3752.
- [26] 刘洪波, 刘坤诚, 盖雪扬, 等. 高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J]. *发电技术*, 2024, 45(1): 151–161.
- LIU H B, LIU S C, GAI X Y, et al. Overview of active distribution network planning with high proportion of new energy access[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(1): 151–161.
- [27] RAHMAN M H, XU L, YAO L. Protection of large partitioned MTDC networks using dc-dc converters and circuit breakers[J]. *Protection Control Modern Power Systems*, 2016, 1(2): 1–9.
- [28] ZHANG Y, MENG X, SHOTORBANI A M, et al. Minimization of AC-DC grid transmission loss and DC voltage deviation using adaptive droop control and improved AC-DC power flow algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 36(1): 744–756.
- [29] ZHANG Y, WANG L, LI W. Autonomous DC line power flow regulation using adaptive droop control in HVDC grid[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 36(6): 3550–3560.
- [30] CHAUDHURI N R, CHAUDHURI B. Adaptive droop control for effective power sharing in multi-terminal DC (MTDC) grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,

2012, 28(1): 21–29.

[31] WANG Y Z, WEN W J, WANG C S, et al. Adaptive voltage droop method of multiterminal VSC–HVDC systems for DC voltage deviation and power sharing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 34(1): 169–176.
ZHANG Y, SHOTORBANI A M, WANG L, et al. A combined hierarchical and autonomous DC grid control for proportional power sharing with minimized voltage variation and transmission loss[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 37(4): 3213–3224.

收稿日期： : 2025-07-20
作者简介：



章锐

章锐(1991), 男, 博士, 校聘副教授, 主要研究方向为新型城市电网调控运行与优化, zhangrui@neepu.edu.cn;



宋秉俊

宋秉俊(2002), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型城市电网调控, 2202400223@neepu.edu.cn;



孙正龙

孙正龙(1988), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制, nedusunzl@neepu.edu.cn;



王喜兴

王喜兴(1989), 男, 本科, 主要研究负荷管理和电量预测, 469077028@qq.com;



李振新

李振新(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制。