

# 新能源配电网“源-网-荷”协同运行优化模型

庄仲, 吴杰康, 杨金文, 何家裕, 梁继深, 余方明

广东工业大学自动化学院, 广东 广州

Email: 875814985@qq.com, wujiekang@163.com, 1458782844@qq.com

收稿日期: 2021年4月2日; 录用日期: 2021年4月17日; 发布日期: 2021年4月29日

## 摘要

由于配网系统线路功率和节点电压的约束, 新能源注入配网时面临着运行欠佳的问题。因此, 本文提出一种考虑智能软开关(SOP)与虚拟储能(VES)有功/无功调节能力的“源-网-荷”协同优化运行策略。首先, 构建了配电网运行下“源-网-荷”层的模型以及约束条件; 然后, 考虑配电网运行约束并以综合运行成本费用目标函数。最后, 采用改进IEEE33节点配电系统进行算例仿真, 与不同策略进行对比分析, 验证本文策略的有效性。结果表明, 本文提出的“源-网-荷”协同运行策略可以有效提高配电系统消纳新能源的能力, 减少电压偏差率, 提高运行经济性。

## 关键词

新能源配电系统, “源-网-荷”协同运行, 虚拟储能, 多目标优化, 智能软开关

# Optimization Model for Cooperative Operation of “Source-Grid-Load” in Distribution Network with Renewable Energy

Zhong Zhuang, Jiekang Wu, Jinwen Yang, Jiayu He, Jishen Liang, Fangming Yu

School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

Email: 875814985@qq.com, wujiekang@163.com, 1458782844@qq.com

Received: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Apr. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Due to the constraints of line power and node voltage in distribution network system, the operation of new energy injection distribution network is faced with the problem of poor operation. Therefore, this paper proposes a “source-network-load” cooperative optimization operation strategy considering the active/reactive power regulation ability of intelligent soft switch (SOP) and virtual energy storage (VES) in this paper. Firstly, the model and constraints of “source-network-load” layer under distribution network operation are constructed, and then the operation constraints of distribution network are considered and the objective function of integrated operation cost is taken into account. Finally, the IEEE33 node distribution system is simulated and compared with different strategies to verify the effectiveness of this strategy. The results show that the “source-network-load” cooperative operation strategy proposed in this paper can effectively improve the ability of distribution system to absorb new energy, reduce voltage deviation rate and improve operation economy.

## Keywords

Distribution System with Renewable Energy, Cooperative Operation of “Source-Grid-Load”, Virtual Energy Storage (VES), Multi Objective Optimization, Soft Open Point (SOP)

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着社会对能源需求越来越大，能源短缺与人民需求增长的矛盾日益严峻，对社会的可持续发展带来极大的危害。具有清洁环保的可再生能源(renewable energy source, RES)、以及高效低碳环保特性的热电联产单元 CHP (combined heating and power)的综合能源系统 ICES (Intergrated Community Energy System)能够满足社会电、热、冷、气等多种能源需求，有效的缓解了社会能源紧缺的矛盾[1]。ICES 包括多种形式的能源单元，可以有效保持配电网的鲁棒运行[2]，提高能源消费过程中的灵活性。ICES 与 RES 同时接入配电网时，由于配电网潮流约束以及节点电压约束等原因，会导致弃风弃光率增大以及运行电压偏差增大[2]，影响配电网的安全经济运行。

ICES 中涉及多种能源系统，如日益联系耦合紧密的热电联产系统，中央空调及燃气锅炉等形式特性各异的多种能源单元[3]，既包含易于控制的热电联供单元(CHP)、常规可控发电机组、常规储能单元等。早有学者[4]对 ICES 系统进行研究，通过构建能源集线器 EH(Energy Hub)详细模型，以日运行费用最小为目标实现电、热、冷能的优化调度，得到能效较高，运行成本较小的调度结果。另有学者[5]研究电转气(power to gas, P2G)技术的电/热/气耦合模型，并采取日前经济调度的形式实现系统可再生能源利用率的提高以及购电成本的降低。也有学者[6]基于楼宇蓄热特性的虚拟储能 VES (Virtual Energy Storage)系统模型，进而对系统进行冷/热/电能源系统进行优化调度，降低系统运行成本。在此基础上，有学者[7]从电能/热能着手，构建电 - 热虚拟储能模型以弥补 VES 调控手段形式单一的不足，但未能充分利用 VES 无功优化的潜力。

关于 ICES 与 RES 的优化调度研究度多从“源 - 荷”环节出发，忽略了多能源系统对配电网交换的

协同[8]以及配电网电能质量的影响。少有考虑综合能源系统内多种能源环节的协调优化及能量管理[5]。如何充分利用和挖掘“源-源”互补的潜力,发挥不同种能源之间的替代能力,考虑负荷的需求响应的环节构成的虚拟储能的潜力,实现“源-荷”互动的响应,从而实现其内部多种能源系统的协同优化和能量管理,进而最终实现“源-网-荷”全环节、全过程的协同优化,是亟需解决的技术难点[8]。

综上所述,本文从“源-网-荷”三方面考虑,进一步挖掘能源集线器 EH 在多能优势互补的潜力,考虑“源-网-荷”协同作用,充分计及分布式能源并网以及多能源负荷需求对配电网的影响,同时充分考虑 VES 的有功-无功调节潜力,通过与智能软开关(Soft Open Point, SOP)协同作用[9],进一步降低配电网的运行成本以及电压偏差,实现配电网的有功-无功协同优化运行。

## 2. “源-网-荷”模型

“源-网-荷”协调系统可以分为源层、网层、荷层。其中,“源”层模型指包含风电机组、光伏发电系统等可再生能源出力,以及微型燃气轮机(Micro-turbine, MT)、燃气锅炉(Gas boiler, GB)等机组消费天然气,由能源集线器统一集中协调出力;“网”层指电网侧,通过智能软开关 SOP 以及无功补偿装置 SVC 等设备协同作用降低线路的网损,改善电网电能质量;“荷”指冷、热、电、气等负荷,通过考虑建筑储热/储冷特性的虚拟储能 VES 模型,采用 AC-DC-AC 变换器灵活控制可以充分发挥其有功-无功协同作用的能力[9]。

为保证配电网满足经济性,运行可靠性、安全性以及相关约束,构建“源-网-荷”模型如图 1 所示。

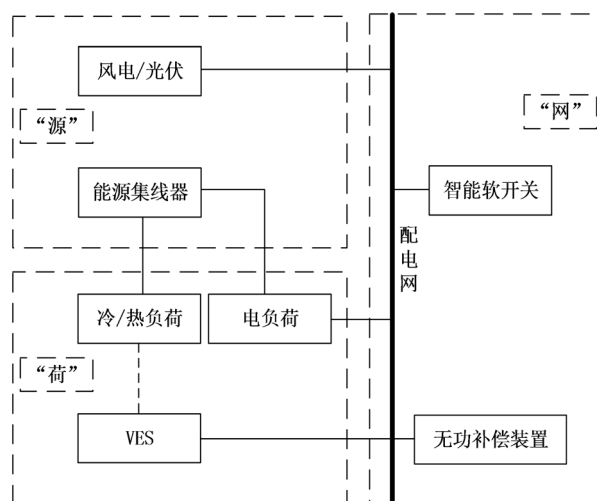


Figure 1. “Source-grid-load” structural model  
图 1. “源-网-荷”结构模型

### 2.1. “源”模型

#### 2.1.1. 能源集线器模型

能源集线器为了满足电力系统的电、热、冷、气等多能源需求,通过热电联产单元 CHP 实现其电/气/热耦合环节。由于 CHP 单元存在不同结构和组成方式,可以采用能源集线器来描述电、热、冷、气等多能源耦合关系,简单有效得到电、气、热、冷的功率平衡。下面通过建立满足电、热、冷、气等不同能源的需求的能源集线器模型,常用的能源集线器包含以下两种结构[6]:

第一类能源集线器模型如图 2(a)所示,它以电/气能源作为输入环节,由微燃气轮机(Micro-turbine, MT)组成的 CHP 热电联产机组和中央空调系统(Air-Conditioner, AC)共同组成。其中天然气能源输入到 CHP 机组中,输出满足电负荷的电能与热负荷的热/冷能两部分;电能输入到 AC 中,输出热/冷能两部分,第一类能源集线器具体数学模型如下:

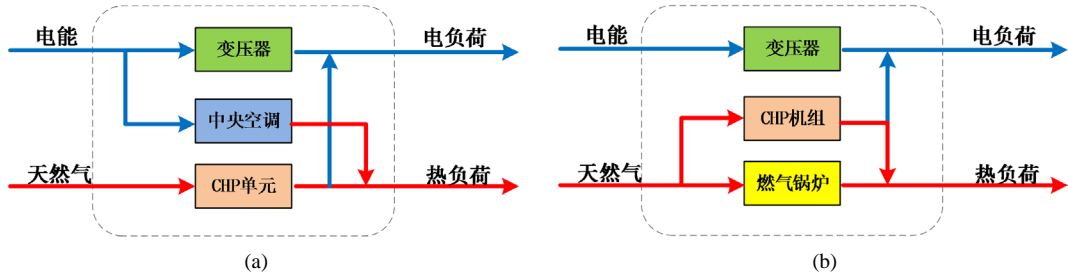


Figure 2. (a) Typical energy hub topology 1; (b) Typical energy hub topology 2

图 2. (a) 能源集线器典型结构 1; (b) 能源集线器典型结构 2

1) 第一类能源集线器天然气输入模型[5]:

$$G^{\text{EH1}}(t) = G_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t) \quad (1)$$

式中,  $G^{\text{EH1}}(t)$  为第一类能源集线器  $t$  时刻天然气进气量;  $G_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t)$  为第一类能源集线器  $t$  时刻 CHP 机组天然气进气量。

2) CHP 机组电/热出力模型[7]:

$$G_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t) = P_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t) / \eta_{\text{CHP}}^{\text{E}} \quad (2)$$

$$H_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t) = \eta_{\text{CHP}}^{\text{h}} \times G_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t) \quad (3)$$

式中,  $P_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t)$  为第一类能源集线器  $t$  时刻 CHP 机组输出电功率;  $\eta_{\text{CHP}}^{\text{E}}$  为第一类能源集线器 CHP 机组发电效率;  $H_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t)$  为第一类能源集线器  $t$  时刻 CHP 机组输出热功率;  $\eta_{\text{CHP}}^{\text{h}}$  为第一类能源集线器 CHP 机组热回收效率。

3) 中央空调机组 AC 出力模型[5]:

$$H_{\text{AC}}^{\text{EH1}}(t) = n_{\text{AC}} \times P_{\text{AC}}^{\text{EH1}}(t) \quad (4)$$

$$P_{\text{AC}}^{\text{EH1}}(t) = \text{COP}_{\text{AC}} \times p_{\text{AC}}^{\text{EH1}}(t) \quad (5)$$

式中,  $H_{\text{AC}}^{\text{EH1}}(t)$  为第一类能源集线器  $t$  时刻 AC 机组输出冷/热功率;  $n_{\text{AC}}$  为  $t$  时刻 AC 空调总台数;  $P_{\text{AC}}^{\text{EH1}}(t)$  为  $t$  时刻 AC 机组总输入电功率;  $\text{COP}_{\text{AC}}$  为 AC 空调能效比;  $p_{\text{AC}}^{\text{EH1}}(t)$  为  $t$  时刻单台 AC 机组输入电功率。

4) 第一类能源集线器电/热平衡模型[6]:

$$P_{\text{L},i}^{\text{EH1}}(t) + P_{\text{AC}}^{\text{EH1}}(t) = P_{\text{Grid}}^{\text{EH1}}(t) + P_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t) \quad (6)$$

$$H_{\text{L}}^{\text{EH1}}(t) = H_{\text{AC}}^{\text{EH1}}(t) + H_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t) \quad (7)$$

式中,  $P_{\text{L},i}^{\text{EH1}}(t)$  为第一类能源集线器  $t$  时刻所在节点  $i$  的节点有功功率;  $P_{\text{Grid}}^{\text{EH1}}(t)$  为第一类能源集线器  $t$  时刻与配电网交换有功功率。

5) 第一类能源集线器约束条件:

$$0 \leq P_{\text{CHP}}^{\text{EH1}}(t) \leq P_{\text{CHP}}^{\text{max}} \quad (8)$$

$$0 \leq H_{AC}^{EH1}(t) \leq H_{AC}^{\max} \quad (9)$$

$$0 \leq P_{Grid}^{EH1}(t) \leq P_{Grid}^{\max} \quad (10)$$

式中,  $P_{CHP}^{\max}$  为微燃机最大出力功率;  $H_{AC}^{\max}$  为中央空调机组最大出力功率。  $P_{Grid}^{\max}$  为电网交换最大出力功率。

第二类能源集线器模型如图 2(b)所示, 由热电联产机组 CHP 和燃气锅炉 GB 共同组成。它的输入量和输出量与第一类能源集线器相同, 热电联产机组 CHP 电/热出力模型也与第一类相同。不同之处在于其内部能量转化发生了变化, 第二类能源集线器具体数学模型如下[10]:

1) 第二类能源集线器天然气输入模型[6]:

$$G^{EH2}(t) = G_{CHP}^{EH2}(t) + G_{GB}^{EH2}(t) \quad (11)$$

式中,  $G^{EH2}(t)$  为第二类能源集线器  $t$  时刻天然气进气量;  $G_{CHP}^{EH2}(t)$  为第一类能源集线器  $t$  时刻 CHP 机组天然气进气量;  $G_{GB}^{EH2}(t)$  为第一类能源集线器  $t$  时刻 CHP 机组天然气进气量。

2) 燃气锅炉机组 GB 出力模型[6]:

$$H_{GB}^{EH2}(t) = G_{GB}^{EH2}(t) \times \eta_{GB}^{EH2} \quad (12)$$

式中,  $H_{GB}^{EH2}(t)$  为第二类能源集线器  $t$  时刻 GB 机组输出热功率;  $\eta_{GB}^{EH2}$  为第二类能源集线器 GB 机组热效率。

3) 第二类能源集线器电/热平衡模型[6]:

$$P_{L,i}^{EH2}(t) = P_{Grid}^{EH2}(t) + P_{CHP}^{EH2}(t) \quad (13)$$

$$H_L^{EH2}(t) = H_{GB}^{EH2}(t) + H_{CHP}^{EH2}(t) \quad (14)$$

式中,  $P_{L,i}^{EH2}(t)$  为第二类能源集线器  $t$  时刻所在节点  $i$  的节点有功功率;  $P_{Grid}^{EH2}(t)$  为第二类能源集线器  $t$  时刻与配电网交换有功功率。

4) 第二类能源集线器约束条件:

$$0 \leq P_{CHP}^{EH2}(t) \leq P_{CHP}^{\max} \quad (15)$$

$$0 \leq H_{GB}^{EH2}(t) \leq H_{GB}^{\max} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{EH2}^{Grid}(t) \leq P_{max}^{Grid} \quad (17)$$

式中,  $H_{GB}^{\max}$  为燃气锅炉最大出力功率。

### 2.1.2. 风电机组输出功率模型

一个区域的风电资源量等于气流产生的动能转化电能的大小, 风力发电机的输出功率与风速的三次方成正比关系, 其输出功率表达式可用分段函数为[8]:

$$P_{WT,i}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_i(t) \leq v_{ci} \text{ 或 } v_i(t) \geq v_{co} \\ P_r \frac{v_i(t)^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} \leq v_i(t) \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v_i(t) \leq v_{co} \end{cases} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{WT,i}^r(t) \leq P_{WT,i}(t) \quad (19)$$

式中,  $P_{WT,i}(t)$  为  $i$  节点上风电机组  $t$  时刻的预测输出功率;  $P_r$  为风电机组的额定输出功率;  $v_i(t)$  为风电机组实时风速;  $v_r$ 、 $v_{ci}$ 、 $v_{co}$  分别为风电机组的额定、切入、切出风速。  $P_{WT,i}^r(t)$  为  $i$  节点上风电机组的

实际输出功率。

### 2.1.3. 光伏发电系统输出功率模型

为了便于仿真计算,采用简化的光伏发电系统出力模型,即输出功率只受光照强度和环境温度影响,光伏发电机组出力模型如下[8]:

$$P_{PV,i}(t) = P_{PV,i}^{stc} G_{PV,i}(t) [1 + k_T (T_{ci}(t) - T_r)] / G_{stc} \quad (20)$$

$$0 \leq P_{PV,i}^r(t) \leq P_{PV,i}(t) \quad (21)$$

式中,  $P_{PV,i}(t)$  为  $i$  节点上光伏机组  $t$  时刻的预测输出功率;  $P_{PV,i}^{stc}$  为光伏发电系统的在标准测试条件下的最大电功率;  $G_{PV,i}(t)$  为光伏发电系统实时光照强度;  $k_T$  为功率温度系数;  $T_{ci}(t)$  为光伏发电系统的电池温度;  $T_r$  为参考温度;  $G_{stc}$  为标准测试条件下的光照强度;  $P_{PV,i}^r$  为光伏发电机组  $i$  节点上实际输出功率。

## 2.2. “网”模型

在配电网中采用智能软开关(Soft Open Point, SOP)和无功补偿装置 SVC 接入配电系统支路,能够起控制潮流和无功补偿的作用[10]。

### SOP 模型

研究分析表明智能软开关 SOP 在节能降网损、均衡电压水平等方面具有显著的促进作用[10]。正常运行模式下, SOP 两端的有功功率约束和容量约束如下:

1) SOP 有功功率传输模型[10]:

$$P_{SOP,i}(t) + P_{SOP,j}(t) + P_{SOP,i}^L(t) + P_{SOP,j}^L(t) = 0 \quad (22)$$

$$P_{SOP,i}^L(t) = \eta_{SOP} \sqrt{(P_{SOP,i}(t))^2 + (Q_{SOP,i}(t))^2} \quad (23)$$

$$P_{SOP,j}^L(t) = \eta_{SOP} \sqrt{(P_{SOP,j}(t))^2 + (Q_{SOP,j}(t))^2} \quad (24)$$

式中,  $P_{SOP,i}(t)$  和  $Q_{SOP,i}(t)$  为 SOP 节点  $i$  传输的有功功率和无功功率;  $P_{SOP,i}^L(t)$  和  $P_{SOP,j}^L(t)$  为接在节点  $i$  和  $j$  两端换流器  $t$  时刻的损耗;  $\eta_{SOP}$  为换流器损耗系数。

2) SOP 容量约束:

$$\sqrt{(P_{SOP,i}(t))^2 + (Q_{SOP,i}(t))^2} \leq S_{SOP,i} \quad (25)$$

$$\sqrt{(P_{SOP,j}(t))^2 + (Q_{SOP,j}(t))^2} \leq S_{SOP,j} \quad (26)$$

式中,  $S_{SOP,i}$  和  $S_{SOP,j}$  分别为接在节点  $i$  和  $j$  两端的 SOP 换流器的容量。

## 2.3. “荷”模型

目前研究虚拟储能 VES 考虑建筑储冷/储热的特性,通过构建建筑的热平衡方程得到空调功率与室内温度的关系,实现对虚拟储能 VES 充/放电动作的控制。为了进一步挖掘 VES 在多元化需求侧响应的潜力,可以通过灵活调控变频空调 AC-DC-AC 环节,针对性改变 PWM 控制信号能够使虚拟储能同时具备有功/无功的调节能力[12],进一步利用虚拟储能在改善负荷功率因数、提高电压稳定性方面的潜力。单个空调用户 AC 模型可以表示如下[13]:

$$W_{AC}(t) = k_2/k_1 \times P_{AC}(t) + (k_1 l_2 - k_2 l_1) \quad (27)$$

$$C_a \frac{dT_i(t)}{dt} = \frac{T_o(t) - T_i(t)}{R} - W_{AC}(t) \quad (28)$$

$$\begin{cases} E_{AC}(t) = C_a (T_{\max} - T_i(t)) \\ E_{AC}^{\max}(t) = C_a (T_{\max} - T_{\min}) \end{cases} \quad (29)$$

式中,  $W_{AC}(t)$  为变频空调的有功功率;  $P_{AC}(t)$  为变频空调的有功功率;  $k_1, k_2, l_1, l_2$  为 AC 参数;  $R$  和  $C_a$  为建筑等效热阻和热容;  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  为舒适室温上、下限建筑等效热阻和热容; 变频空调电功率与制热/制冷功率的关系由式(27)表示; 制热/制冷功率与室内温度  $T_i(t)$  和室外温度  $T_o(t)$  的关系; 式(29)表示 VES 实际储能能量  $E_{AC}(t)$  和最大储能能量  $E_{AC}^{\max}(t)$  的关系。

相邻时段室温保持不变时对应的空调制冷/制热功率  $P_{AC}^b(t)$  为[14]:

$$P_{AC}^b(t) = \frac{k_2}{k_1} \left[ \frac{T_o(t) - T_i(t)}{R} - \frac{k_1 l_2 - k_2 l_1}{k_1} \right] \quad (30)$$

则基于变频空调的 VES 模型出力可以处理为[14]:

$$P_{AC}(t) = P_{AC}^c(t) + P_{AC}^d(t) + P_{AC}^b(t) \quad (31)$$

$$E_{AC}(t) = E_{AC}(t-1) + \frac{k_2}{k_1} P_{AC}^c(t) + \frac{k_2}{k_1} P_{AC}^d(t) \quad (32)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{AC}^c(t) \leq [P_{AC}^{\max} - P_{AC}^c(t)] U_{AC}^c \\ -P_{AC}^d(t) U_{AC}^d \leq P_{AC}^d(t) \leq 0 \\ U_{AC}^d + U_{AC}^c \leq 1 \\ P_{AC}^2(t) + Q_{AC}^2(t) \leq S_{AC}^2 \end{cases} \quad (33)$$

式中,  $P_{AC}(t)$  为变频空调的有功功率;  $P_{AC}^c(t)$ 、 $P_{AC}^d(t)$  和分别空调的等效充、放电功率; 式(33)为空调约束条件;  $U_{AC}^c$ 、 $U_{AC}^d$  和分别为空调的等效充、放电标志位的布尔变量;  $S_{AC}$  为变频空调的调节容量。

假设配网节点  $i$  存在  $n_i$  个空调负荷, 则 VES 节点聚类模型表示为[14]:

$$P_{VES,i}(t) = \sum_{j=1}^{n_i} P_{AC,ij}(t) \quad (34)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{VES,i}^c(t) \leq [P_{VES,i}^{\max} - P_{VES,i}^c(t)] U_{VES,i}^c \\ -P_{VES,i}^d(t) U_{VES,i}^d \leq P_{VES,i}^d(t) \leq 0 \\ U_{VES,i}^d + U_{VES,i}^c \leq 1 \\ P_{VES,i}^2(t) + Q_{VES,i}^2(t) \leq S_{VES,i}^2 \end{cases} \quad (35)$$

$$P_{VES,i}(t) = P_{VES,i}^c(t) + P_{VES,i}^d(t) + P_{VES,i}^b(t) \quad (36)$$

$$E_{VES,i}(t) = E_{VES,i}(t-1) + P_{VES,i}^c(t) + P_{VES,i}^d(t) \quad (37)$$

式中,  $P_{VES,i}^c(t)$ 、 $P_{VES,i}^d(t)$  和分别为虚拟储能的等效充、放电功率;  $U_{VES,i}^c$ 、 $U_{VES,i}^d$  和分别为虚拟储能的等效充、放电标志位的布尔变量;  $P_{VES,i}(t)$  为虚拟储能的有功功率;  $Q_{VES,i}(t)$  为虚拟储能的无功功率;  $S_{VES,i}$  为虚拟储能的调节容量。

### 3. “源 - 网 - 荷” 协同运行优化模型

#### 3.1. 目标函数

为了提高配电网对新能源的消纳能力, 提高配电网运行的经济性, 本文在考虑可再生能源、智能软

开关、虚拟储能、能源集线器共同作用，提出一种“源-网-荷”保证配电网的安全经济运行的日前协同运行策略。故本模型以社会效益最大(运行成本最小，线损最小)和弃风弃光率最小为目标函数，目标函数如下：

$$f_1 = \sum_{t=1}^T P_{\text{exc}}(t) P_{\text{exc}}(t) + p_{\text{gas}}(t) G^{\text{EH}}(t) + \sum_{i=1}^n C_{\text{loss}} P_{\text{loss}}(t) + C_{\text{sop}} P_{\text{sop},i}(t) + \sum_{i=1}^{n_{\text{PV}}} (P_{\text{PV},i}(t) - P_{\text{PV},i}^r(t)) + \sum_{i=1}^{n_{\text{WT}}} (P_{\text{WT},i}(t) - P_{\text{WT},i}^r(t)) \quad (38)$$

式中， $p_{\text{exc}}(t)$  和  $p_{\text{gas}}(t)$  分别为购电价格和天然气价格； $G^{\text{EH}}(t)$  为能源集线器总购气量，是  $G^{\text{EH1}}(t)$  与  $G^{\text{EH2}}(t)$  的代数之和； $C_{\text{sop}}$ 、 $C_{\text{pv}}$ 、 $C_{\text{wt}}$  分别为智能软开关，光伏发电机组，风机机组的运行成本； $C_{\text{loss}}$  为网损费用； $v_{\text{ref}}$  为电压参考值； $n_{\text{PV}}$ 、 $n_{\text{WT}}$  分别为光伏机组和风电机组的安装节点。

### 3.2. 约束条件

配电网的约束包含配电网有功/无功潮流约束，线路电压约束，传输容量约束以及配电网与上级电网交换功率约束。

#### 1) 配电网潮流约束

配电网潮流约束包含光伏、风电，智能软开关，能源集线器以及虚拟储能注入的有功-无功平衡约束：

$$P_i(t) = P_{\text{DN},i}(t) + P_{\text{PV},i}^r(t) + P_{\text{WT},i}^r(t) + P_{\text{SOP},i}(t) + P_{\text{L},i}^{\text{EH1}}(t) + P_{\text{L},i}^{\text{EH2}}(t) - P_{\text{VES},i}(t) \quad (38)$$

$$Q_i(t) = Q_{\text{DN},i}(t) + Q_{\text{SOP},i}(t) + Q_{\text{SVC},i}(t) + Q_{\text{VES},i}(t) \quad (39)$$

式(38)~(39)为配电网节点注入功率约束，其中  $P_i(t)$  为配电网节点  $i$  实际注入有功功率； $P_{\text{DN},i}(t)$  为配电网节点  $i$  原注入有功功率；其中  $Q_i(t)$  为配电网节点  $i$  实际注入有功功率； $Q_{\text{DN},i}(t)$  为配电网节点  $i$  原注入无功功率。由文献可知，配网中相邻节点电压偏离较小，潮流近似采用 DistFlow 方程表示[11]：

$$\begin{cases} P_j(t) = P_{ij,i}(t) + r_{ij} l_{ij}(t) - \sum_{\forall k, k \neq i} P_{jk,j}(t) \\ Q_j(t) = Q_{ij,i}(t) + x_{ij} l_{ij}(t) - \sum_{\forall k, k \neq i} Q_{jk,j}(t) \end{cases} \quad (40)$$

$$v_j(t) = v_i(t) - 2(r_{ij} P_{ij,i}(t) + x_{ij} Q_{ij,i}(t)) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij}(t) \quad (41)$$

$$\begin{cases} v_j(t) = V_j(t)^2 \\ l_{ij}(t) = I_{ij}(t)^2 \end{cases} \quad (42)$$

$$l_{ij}(t) = \frac{P_{ij,i}^2(t) + Q_{ij,i}^2(t)}{v_i(t)} \quad (43)$$

$$P_{\text{loss},ij}(t) = l_{ij}(t) r_{ij} \quad (44)$$

式中， $r_{ij}$  和  $x_{ij}$  分别为支路  $ij$  的等效电阻和电抗； $P_{ij,i}(t)$  和  $Q_{ij,i}(t)$  分别为节点  $i$  侧注入的有功和无功功率； $\sum_{\forall k, k \neq i} P_{jk,j}(t)$  和  $\sum_{\forall k, k \neq i} Q_{jk,j}(t)$  分别为节点  $j$  侧注入到除去  $ij$  的所有支路有功功率和无功功率之和； $I_{ij}(t)$ 、 $l_{ij}(t)$  分别为支路  $ij$  的支路电流及其二范数； $V_j(t)$ 、 $v_j(t)$  分别为标准化的节点  $j$  的电压及其二范数； $P_{\text{loss},ij}(t)$  为支路  $ij$  的网损。



2) 节点电压与线路电流约束

节点电压和线路潮流均不得小于线路最小允许值且不允许超过线路的最大允许值。

$$\begin{cases} v_{\min} \leq v_i(t) \leq v_{\max} \\ I_{\min} \leq I_{ij}(t) \leq I_{\max} \end{cases} \quad (45)$$

式中,  $v_{\min}$ 、 $v_{\max}$  分别为节点电压的最小值、最大值;  $I_{\min}$  和  $I_{\max}$  分别为支路电流的最小值和最大值。

根据功率平衡关系, 可得配网与上级电网交换的功率  $P_{\text{exc}}(t)$  为:

$$P_{\text{exc}}(t) = \sum_{i=1}^n P_{\text{DN},i}(t) + P_{\text{sop},i}(t) + \sum_{j=1}^n P_{\text{loss},ij}(t) + P_{\text{VES},i}(t) - P_{\text{PV},i}^r(t) - P_{\text{WT},i}^r(t) - P_{\text{L},i}^{\text{EH1}}(t) - P_{\text{L},i}^{\text{EH2}}(t) \quad (46)$$

4. 算例分析

为验证本文方案的有效性, 基于图3中33节点配电网进行测试分析。取基准电压12.66 kV, 基准功率为10 MW, 调度周期为1 h, 各节点有功-无功功率及各支路长度、电阻值见文献[15]。母线1为平衡节点, 电压设置1.0(标么值)且电压上限值为1.05, 下限值为0.95, 线路最大承受电流均为300 A。在节点16和22之间接入SOP, 其容量为0.1 MVA, 损耗系数为0.02 [10], 并同时采用容量为1.2 MW大小的SVC接入节点7和14作为节点电压支撑; 同时, 在节点5接入能源集线器EH1, 在28节点为接入能源集线器EH2, 以满足冷/热/电多种能源的需求, 能源集线器具体参数如表1所示, 具体参数如下[16]:

Table 1. Operation parameters of energy hub

表1. 能源集线器运行参数

参数	第一类能源集线器	第二类能源集线器
$P_{\text{CHP}}^{\text{max}}$ (MW)	1	1
$\eta_{\text{CHP}}^{\text{E}}$ (%)	40	40
$\eta_{\text{CHP}}^{\text{h}}$ (%)	35	35
$H_{\text{AC}}^{\text{max}}$ (MW)	0.5	-
$n_{\text{AC}}$	8	-
$\eta_{\text{AC}}$ (%)	90	-
$H_{\text{GB}}^{\text{max}}$ (MW)	-	0.8
$\eta_{\text{GB}}^{\text{EH2}}$ (%)	-	85

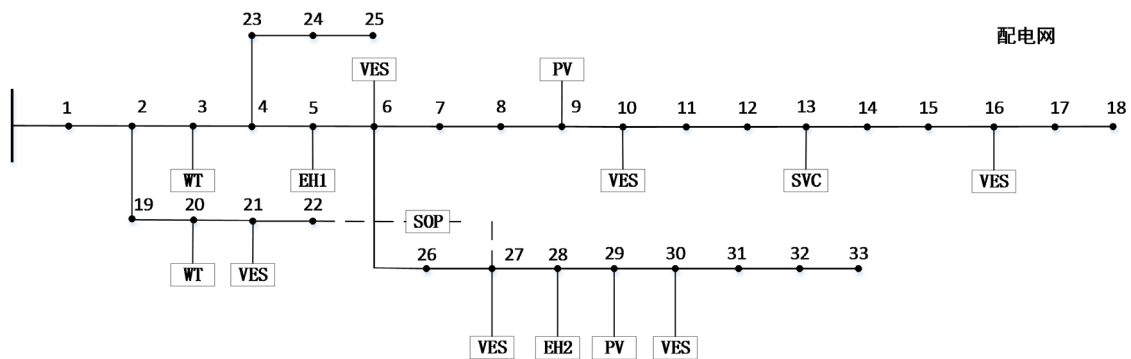


Figure 3. Modified IEEE 33-node distribution network

图3. 改进的IEEE 33节点配电网

在 9、29 节点接入光伏机组，在节点 3、209、29 接入风电机组。本文不考虑可再生能源与冷/热/电负荷的不确定性，假定可再生能源预测值为确定值，同时假定各节点可控 VES 数量一定，初始 SOC 为 0.5，室内温度维持在 $[22^{\circ}\text{C}, 26^{\circ}\text{C}]$ 的舒适室温以内。在配置为 3.2 GHz 8 GB RAM、工作环境为 Windows 10。基于 Matlab 平台进行编程，利用 CPLEX 求解器对混合整数二阶锥规划模型进行求解，所有优化过程均在 1 min 以内完成。

#### 4.1. 优化结果分析

考虑“源-网-荷”共同协同作用下，求解 IEEE33 节点配电网在一天 24 h 内的网损大小、弃风、弃光率以及购电成本和购气成本下的综合运行成本。此时电网的网损率为 0.36%，电压偏差率为 1.18%；弃风、弃光率分别为 17.0%和 0.3%。可见，考虑“源-网-荷”协同优化的控制策略能够实现配电网的优化运行，降低电网的运行成本以及提高风电光伏的消纳能力。此模型的天然气价格为 2.5 (元/ $\text{m}^3$ )，分时电价为峰-平-谷形式[17]，用电高峰时段(8:00~12:00、14:00~21:00)价格为 0.92 (元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ )，用电平荷时段(7:00~8:00、12:00~14:00，21:00~23:00)价格为 0.55 (元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ )，用电低谷时段(23:00~7:00)价格为 0.23 (元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ )。

图 4 和图 5 分别为 EH1 和 EH2 的电出力图和热出力图。能源集线器保持各时刻冷热电的能量平衡。在电价低谷时期，能源集线器电负荷均优先从配电网中购电来满足集线器内部的电负荷需求，EH1 内部以燃气锅炉出力满足热负荷，EH2 热负荷主要由 AC 满足；在电价峰时，EH1 和 EH2 的 CHP 单元提高其运行功率以降低峰时向电网的购电成本，CHP 采用热电联产的形式集线器同时满足电负荷与热负荷的平衡条件，且 EH2 的 CHP 开始增大输出功率以满足电负荷与热负荷需求，降低运行成本。

图 4 和图 5 分别为 CCHP 单元 1 和单元 2 的电出力图和热出力图，以 EH1 和 EH2 表示。CCHP 单元保持各时刻能量平衡，在电价低谷时期，CCHP 单元电负荷均优先从微电网中购电来满足内部的电平衡约束条件，此时 CCHP 单元采用以余热锅炉为主，燃气锅炉作为补充满足热负荷不足部分；冷负荷主要由吸收式制冷机提供，由电制冷机进行补冷；在电价峰时，EH1 和 EH2 的燃气轮机机组开始提高运行功率，同时满足电负荷与热负荷的平衡条件。且 EH2 在电价高峰时期向微电网馈电，以实现削峰填谷的目的，在电负荷与热负荷平衡约束的条件下，降低电网的运行成本。

图 6(a)为未经过优化的光伏机组与风电机组预测出力与实际出力曲线。由于节点电压约束以及线路平衡约束等原因，可再生能源发出的功率无法完全消纳，有明显的弃风弃光现象。

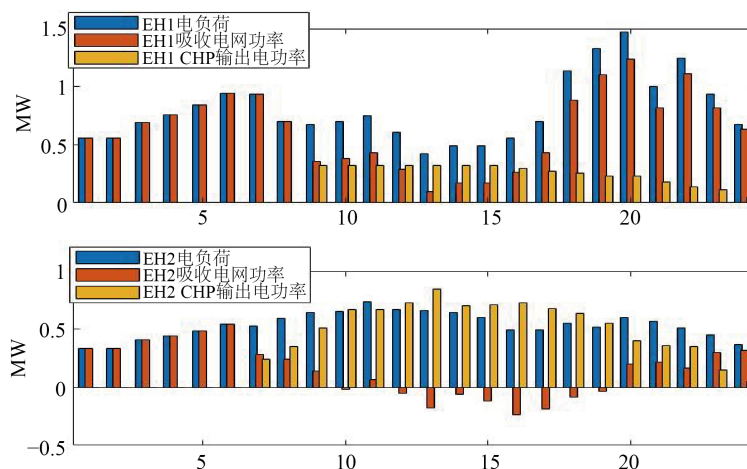


Figure 4. Electric power diagrams of energy hub  
图 4. 能源集热器电功率图

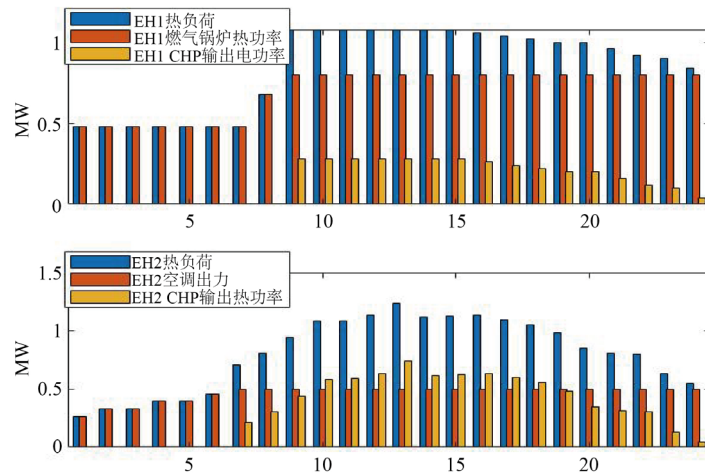


Figure 5. Thermal power diagrams of energy hub  
 图 5. 能源集热器热功率图

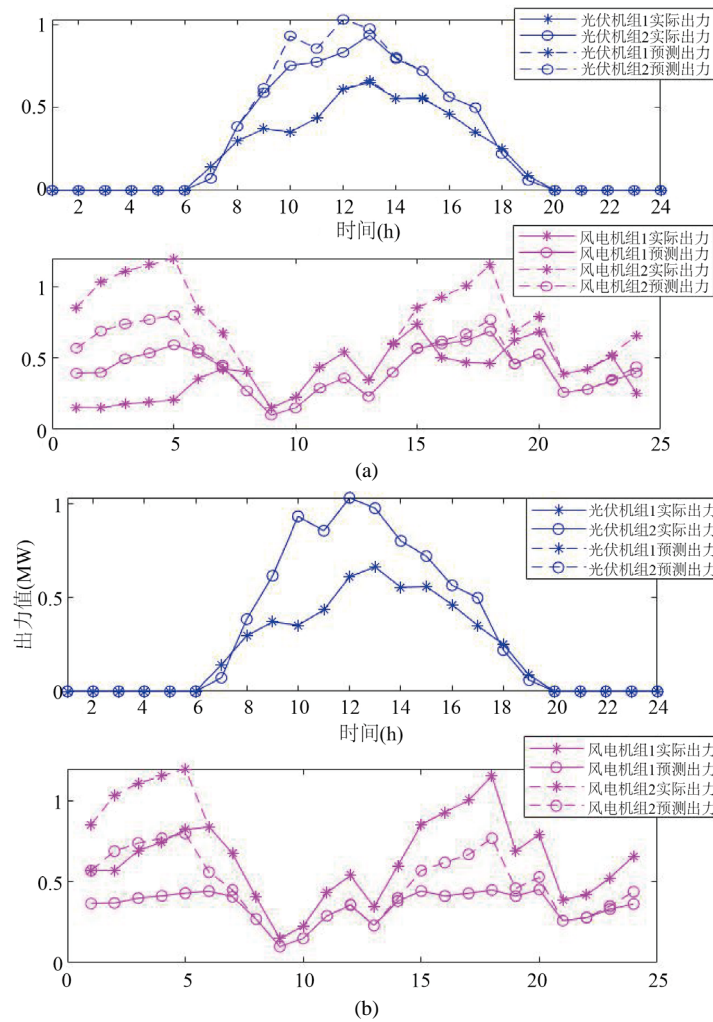


Figure 6. (a) Output power curve 1 of renewable energy; (b) Output power curve 2 of renewable energy  
 图 6. (a) 可再生能源出力曲线 1; (b) 可再生能源出力曲线 2

图 7 和图 8 为虚拟储能功率时空分布图和有功 - 无功出力分布图。VES 作为储能可将多余的可再生能源进行消纳, 并经过 AC-DC-AC 变换为微电网提供无功支撑; 考虑可再生能源与虚拟储能协同运行, 利用虚拟储能的有功 - 无功调节作用, 吸纳可再生能源的有功出力, 提供无功支撑作用, 以此提高可再生能源的消纳能力。

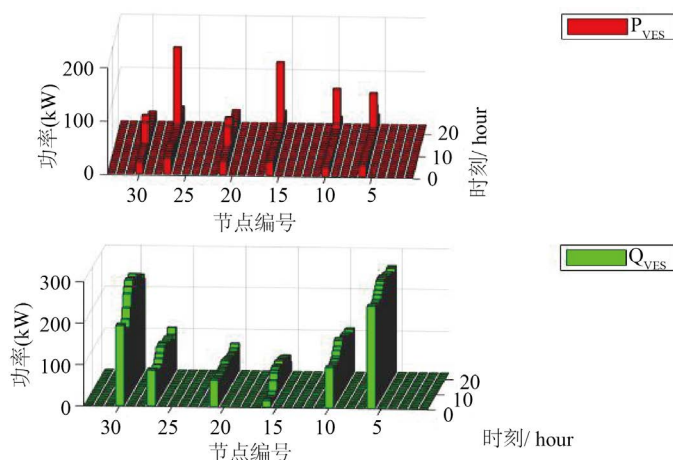


Figure 7. Active/Negative power spatial and temporal distribution of VES

图 7. VES 有功/无功功率时空分布图

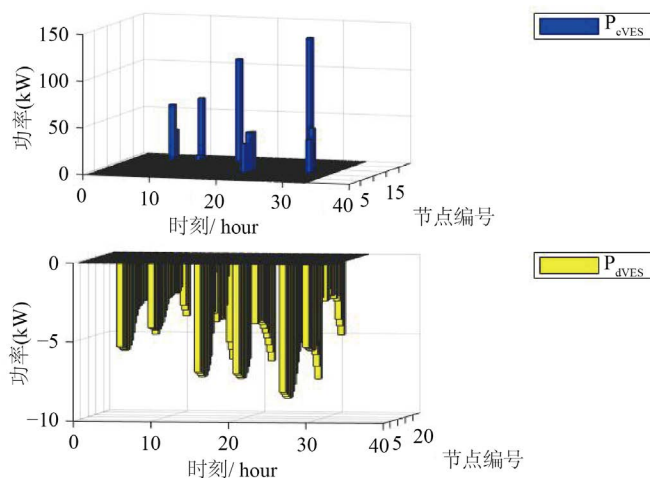


Figure 8. Charge/Discharge spatial and temporal distribution of VES

图 8. VES 充/放电时空分布图

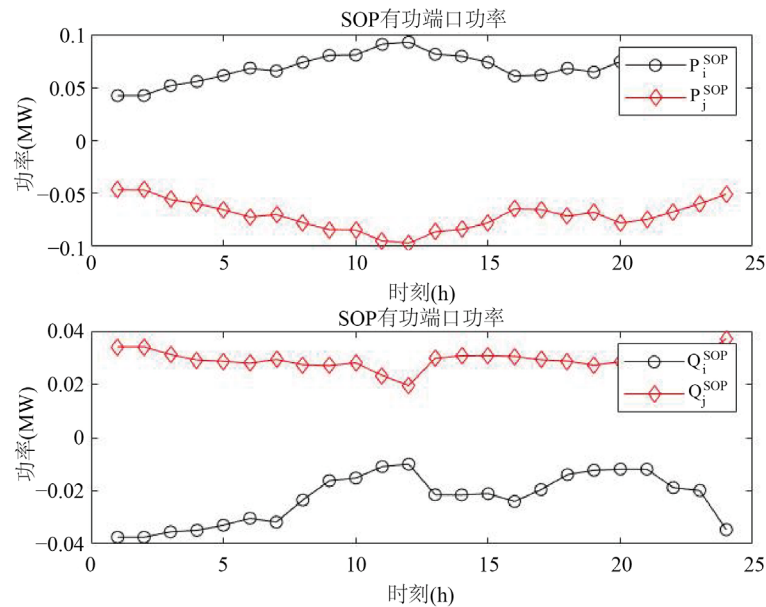
智能软开关 SOP 通过快速准确灵活的控制线路两端的有功-无功传输功率进行电压的优化控制潮流和无功补偿的作用。由图 9 可以看出: SOP 通过控制节点两端限制线路传输的有功功率, 减小微电网的网损; 通过控制 SOP 节点两端的无功传输功率, 改善微电网电压水平。

采用智能软开关网侧协同以及虚拟储能的有功-无功协调作用, 优化后的光伏机组与风电机组预测出力与实际出力曲线如图 6(b)所示。通过智能软开关控制 VES 与可再生能源之间的传输功率, 通过 VES 进行吸纳, 有效地提高了可再生能源的消纳能力。

#### 4.2. 配电网协同优化策略结果分析

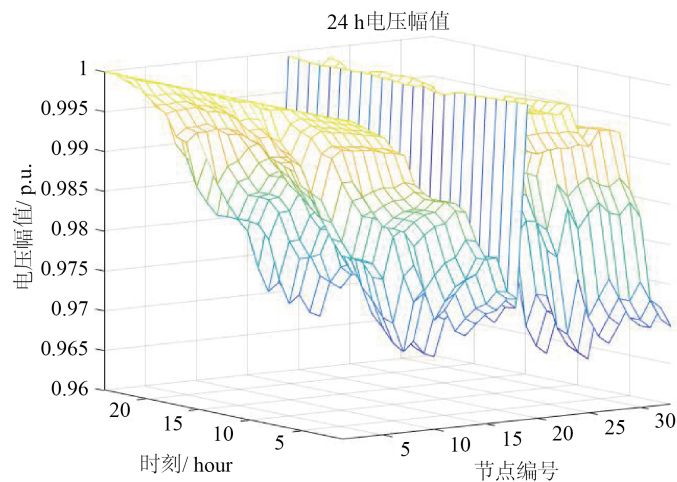
由于在配电网中接入分布式能源后, 往往会导致配电网的电压偏差增大, 线损增大, 运行总成本

增加。本文通过考虑“源-网-荷”层共同协同的作用，使配网运行成本最小和节点电压偏差最小，同时减小了线路网损并提高了配网对新能源的消纳能力。



**Figure 9.** Output power curve of SOP  
**图 9.** SOP 出力曲线

本文策略考虑在风电机组、光伏机组以及多种能源集线器接入配电网的情况下，融合智能软开关作为网侧协调，将含可再生能源支路与虚拟储能支路有机连接在一起，通过充分利用虚拟储能有功-无功调节的潜力，以及智能软开关对潮流控制及无功补偿，采用“源-网-荷”协同优化运行策略。其运行电压曲线如图 10 所示。



**Figure 10.** Curves of node voltage with strategy in this paper  
**图 10.** 本文策略下节点电压曲线

为了验证本文策略在消纳新能源、提高电能电压质量、降低配电网运行成本等方面提升效益的优越性，将上述所描述的运行策略定义为策略 1，并引入以下 3 种不同策略与本文所采用策略进行对比分析，

不同运行策略如下所示:

策略 2: 将空调视为刚性不可调负荷, 仅考虑分布式能源接入, 并配置 SOP 的“源-网”协同优化策略。

策略 3: 忽视空调无功调节能力的 VES, 仅考虑可再生能源的“源-荷”协同优化策略。

策略 4: 忽视空调无功调节能力的 VES, 考虑可再生能源并配置 SOP 的“源-网-荷”协同优化策略。

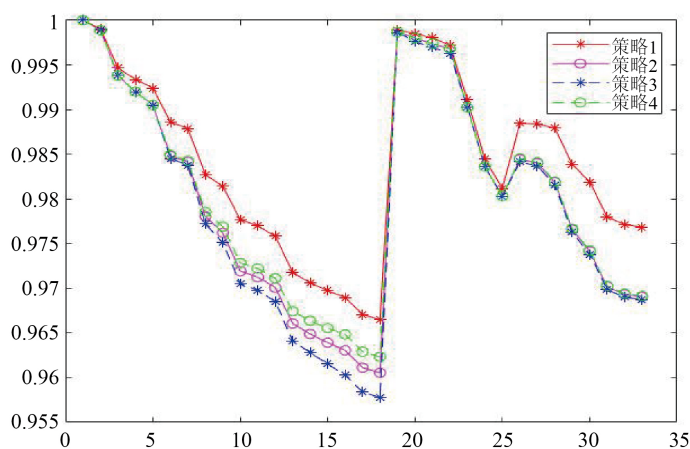
不同策略下的对比结果如表 2 所示, 从表 2 中可以看出, 本文所采用的策略(策略 1)运行成本为 47644 元, 在 4 种策略中最低, 经济性最好; 平均电压偏移量为 9.1%, 远低于其余三种运行策略, 能基本做到光伏功率全消纳, 且风电消纳程度也远高于其余三种运行策略。

**Table 2.** Solution results of the model under different cases

**表 2.** 不同策略下的模型求解结果

策略	指标	运行成本(元)	平均电压偏移量(%)	弃风率(%)	弃光率(%)	网损率(%)
策略 1		47644	1.18	14.9	0.03	0.27
策略 2		48253	1.65	27.2	7.6	0.39
策略 3		48745	1.80	32.3	6.0	0.35
策略 4		48001	1.52	26.2	6.9	0.30

图 11 为 11:00 时刻下, 采用不同策略下的 33 节点电压曲线。由图中可以看出, 采用本文策略的大部分节点电压比其余三种策略的电压更高, 电压总体偏离程度更小。由此可以看出, 考虑虚拟储能 VES 有功-无功能力与智能软开关 SOP 共同作用的“源-网-荷”协同运行策略可以有效减少配电网与上级电网交换功率, 降低分布式能源接入电网的电压偏移量, 并提高光伏、风电的消纳能力, 降低电网运行成本, 从而体现出本文策略的经济性和优越性。



**Figure 11.** Curves of node voltage at 11:00 with different strategies

**图 11.** 不同策略下 11:00 时刻节点电压曲线

## 5. 结论

本文在多能源接入配电网的情况下, 综合考虑购电/购气成本、网损费用、智能软开关运行费用、弃风/弃光费用, 并以运行总费用最小作为目标函数, 确定了多能配电系统下, 计及智能软开关 SOP 和虚拟

储能 VES 的配电网“源-网-荷”协同运行混合二阶锥模型,通过算例分析得到以下结论:

1) 本文考虑了虚拟储能无功调节能力,充分发挥 VES 多元化需求响应的功能,有效利用各个节点的分布式的 VES 为节点提供有功-无功支持,对比策略可知,考虑虚拟储能无功调节作用的平均电压偏移率由 1.52 降至 1.18,弃风率由 26.2% 下降至 14.9%,弃光率由 6.0% 至基本全消纳,网损率下降了 0.03%。因此,考虑虚拟储能无功调节能力,能够提高可再生能源消纳程度,有效改善电能质量。

2) 本文考虑了智能软开关对配电网运行的影响,通过智能软开关对潮流的控制以及无功补偿作用,对比策略 3 和 4 可知,经过智能软开关协同作用,风电机组和光伏机组的消纳能力分别提高了 6.1% 和 0.9%,平均电压偏移量下降至 1.52%,网损率降低至 0.3%,有效降低可再生能源弃用率,同时提高了系统的电能质量。

3) 通过虚拟储能与智能软开关的协同作用,将可再生能源支路与虚拟储能支路有机协同,进一步提高系统对新能源的消纳能力,策略 1 为考虑虚拟储能有功-无功调节能力和智能软开关的协同策略,由表 2 和图 11 可知,策略 1 的运行成本为 47,644 元,平均电压偏移量为 1.18%,弃风率为 14.9%,光伏基本全消纳,均低于其余三种策略,由此可见,考虑虚拟储能和智能软开关的“源-网-荷”协同优化策略具有良好的社会运行效益。

本文研究中,智能软开关与虚拟储能协同作用时网损仍然较大,可能是由于智能软开关在协同虚拟储能消纳新能源时的智能软开关传输损耗造成,后续将进一步研究此方面的内容。同时,本文未将源-荷不确定性考虑在运行过程中,后续将进一步深入研究智能软开关 SOP 与虚拟储能 VES 之间协同作用对源-荷不确定性的影响。

## 基金项目

大湾区轨道交通关键车载机电设备的安全测评与运维管理项目(2020B1515130001);广东省科技计划项目(2020A050515003);广州市科技计划项目(202002030463)。

## 参考文献

- [1] 王毅,张宁,康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [2] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
- [3] 郝苗,键强,张宁,康重庆. 能量路由器对于配电网运行优化的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2832-2839.
- [4] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 25(22): 168-175.
- [5] Mollenhauer, E., Christidis, A. and Tsatsaronis, G. (2018) Increasing the Flexibility of Combined Heat and Power Plants with Heat Pumps and Thermal Energy Storage. *Journal of Energy Resources Technology*, **140**, Article ID: 020907. <https://doi.org/10.1115/1.4038461>
- [6] 马腾飞,吴俊勇,郝亮亮. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 179-186.
- [7] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [8] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
- [9] 徐青山,李淋,蔡霖霖,等. 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 36-46.
- [10] 宋毅,孙充勃,李鹏. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 390-4398.
- [11] 李鹏,张培深,王成山,等. 基于智能软开关与市场机制的有源配电网阻塞管理方法[J]. 电力系统自动化, 2017,

- 
- 41(20): 9-16.
- [12] 王怡岚, 童亦斌, 黄梅. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 394-401.
- [13] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581-590.
- [14] 随权, 林湘宁, 童宁. 基于改进两阶段鲁棒优化的主动配电网经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2166-2179.
- [15] Moeini, A.M., Farzin, H., Fotuhi, F.M., *et al.* (2017) Generalized Analytical Approach to Assess Reliability of Renewable Based Energy Hubs. *IEEE Transactions on Power Systems*, **32**, 368-377. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2549747>
- [16] 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): 144-153.
- [17] Mao, M.Q., Jin, P., Chang, L.C., *et al.* (2014) Economic Analysis and Optimal Design on Microgrid with SS-PVs for Industries. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **5**, 1328-1336. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2327067>