

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230133

# 基于柔性多状态开关和动态重构的配电网灵活运行方法

石 铖, 安 锐, 高红均, 姜思远, 贺帅佳, 刘俊勇

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 未来电动汽车(electric vehicle, EV)以及光伏(photovoltaic, PV)在配电网中的接入比例逐渐增高, 这不仅带来了复杂的不确定性问题, 而且导致了配电网净负荷时空分布的不均衡, 从而产生了弃光、失负荷以及潮流分布不均匀的问题。基于此, 考虑电动汽车充电负荷以及光伏的不确定性, 提出了一种基于柔性多状态开关(flexible multi-state switch, FMS)和动态重构的含高比例电动汽车-光伏配电网灵活运行方法。首先, 基于 FMS 灵活功率调控和网络动态重构, 构建了支撑高比例电动汽车-光伏接入的配电网灵活运行框架。其次, 利用蒙特卡洛随机模拟法对各类电动汽车充电负荷以及光伏出力进行不确定性建模, 建立了基于场景集以及场景缩减法的随机规划模型。然后, 建立了以弃光、失负荷、FMS 损耗、网损成本最小和负荷均衡度最优为目标的配电网灵活运行模型。最后, 在 158 节点系统上通过算例验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 柔性多状态开关; 光伏; 电动汽车; 灵活运行; 随机规划

## Flexible operation method for a distribution network based on flexible multi-state switching and dynamic reconfiguration

SHI Cheng, AN Rui, GAO Hongjun, JIANG Siyuan, HE Shuaijia, LIU Junyong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The increasing proportion of electric vehicles (EV) and photovoltaics (PV) in the distribution network in the future not only brings complex uncertainty problems, but also leads to uneven distribution of net load in the distribution network in time and space. This will result in light abandonment, load loss, and uneven tide distribution. Thus this paper proposes a flexible operation method for an EV-PV distribution network with high ratio based on flexible multi-state switching and dynamic reconfiguration. It considers the uncertainty of electric vehicle charging load as well as PV. First, based on flexible multi-state switch (FMS) flexible power regulation and network dynamic reconfiguration, a framework for flexible operation with a high proportion of EV-PV access is constructed. Second, the Monte Carlo stochastic simulation method is used to model the uncertainty of various EV charging loads and PV output. A scenario set and reduction method are established based on scenario set as well as the stochastic planning model. Then, a distribution grid flexible operation model with the objectives of light abandonment, load loss, FMS loss, network loss cost minimization, and load balance optimization is established. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified on the 158-node system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077146).

**Key words:** flexible multi-state switching; photovoltaics; electric vehicles; flexible operation; stochastic planning

## 0 引言

传统能源的过度依赖导致碳排放过度、环境污染等重大问题, 逐步提高光伏(photovoltaic, PV)以及电动汽车(electric vehicle, EV)在配电网中的接入比例

成为构建清洁低碳、安全高效的能源体系的有效路径之一。然而在光伏和电动汽车改善生态环境的同时, 二者的不确定性以及大规模地接入带来了净负荷时空分布不均衡的问题, 导致配电网产生了严重的弃光、失负荷以及潮流分布不均匀<sup>[1-4]</sup>的问题。因此, 为了应对未来高比例不确定性电动汽车和光伏的接入, 构建灵活的配电网运行策略具有重要的研究意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077146)

目前,已有一些文献对含有光伏和电动汽车的配电网灵活运行方法作了相关研究。文献[5]提出了一种考虑电流保护的电动汽车与分布式能源相配合的配电网灵活运行策略,得到了配电网的最优运行工况;文献[6]提出一种计及EV充电负荷的风电-光伏-光热协调调度策略,充分考虑了“源-荷”的灵活协调。而配电网动态重构<sup>[7]</sup>作为配电网灵活运行的重要手段,通过控制分段开关和联络开关的开闭状态来对网络的拓扑结构进行灵活调整,从而进行潮流转移,满足负荷用电需求,促进光伏消纳,提高线路负载均衡度<sup>[8-11]</sup>。文献[12]以网损成本、弃风成本、弃光成本和开关操作成本的综合成本最小为目标,结合需求响应建立高比例清洁能源接入下的配电网重构模型,促进了新能源的消纳,提高了配电网的灵活运行能力。文献[13]综合考虑负荷需求不同时段的变化、分布式光伏出力不确定性,基于动态重构建立了以光伏消纳比最大化为优化目标之一的配电网多目标灵活运行模型。文献[14]针对分布式电源接入下单一时间断面的静态重构无法满足配电网实际运行要求这一问题,结合配电网动态重构和分布式电源(distributed generator, DG)调控进行优化求解,有效降低了弃风弃光量,提高了配网运行的灵活性。可以看出,随着配电网自动化建设的不断推进,配电网重构作为一种常见的灵活性手段可以有效地支撑高比例电动汽车和光伏的接入。然而,随着电动汽车-光伏大规模地无序接入,仅通过动态重构改变网络拓扑结构可能难以灵活高效地解决净负荷时空分布不均的问题;同时,电动汽车的高比例接入会加剧配电网末端节点的电压降落以及增大网损。因此,亟需提出灵活性更强的配电网优化运行手段。

此外,近年来国内外学者对于电动汽车的有序调控也开展了较多的研究工作。文献[15]提出了基于分层优化和TOPSIS排序的电动汽车有序充电策略来对电网运行进行优化。文献[16]提出了一种基于价格与激励需求响应下的电动汽车长时间充放电调度策略。目前的研究工作大多采用激励或价格引导电动汽车用户改变自身的充电行为,从而达到优化电网运行的目的,但这种“隐型”的有序充电调控手段很难适用于电动汽车直流快充站,实际中快充站的充电负荷较为刚性,车主即插即充,且快充负荷较高。因此,需要从网络侧探索适应电动汽车高比例接入配电网的灵活运行措施。

柔性多状态开关(flexible multi-state switch, FMS)作为全控型电力电子器件,由于其具有对线路有功进行柔性调控以及可以提供无功补偿<sup>[17]</sup>的优势,广泛应用于配电网的灵活控制。文献[18]从源-

网-荷的匹配性角度分析柔性配电网相比于传统刚性配电网,对间歇性分布式电源的消纳能力更强,对潮流分布的优化作用更大,对配电网调控的灵活性更强;文献[19]提出了基于FMS和联络开关的双层嵌套负荷均衡方法,改善了网络的负荷不均衡现象,通过无功补偿改善节点电压,提升了配电网运行的经济性和灵活性。上述文献主要分析了FMS对消纳新能源、改善潮流等方面的影响。当电动汽车这一新型负荷高比例接入配电网后,由于每条交流馈线容量有限,会出现网络局部供电通道紧张的现象。而电动汽车快充站作为直流电网中重要的组成部分,基于直流电网的多端口特点,可以将快充站通过多个FMS与交流配电网不同的馈线相连,从而由交流配电网各馈线的剩余容量共同承担该快充站负荷,通过灵活调控使得负荷行为更加“柔性”,从而平衡负载、改善潮流、提高配网运行的经济性和灵活性。基于此,面对高比例电动汽车-光伏接入下的配电网,本文利用FMS来充分挖掘电动汽车负荷的灵活运行潜力、协同多条馈线的源-荷水平,以求有效提高配电网运行的灵活性,这是配电网重构这一灵活性手段的重要升华。

针对上述研究与分析,本文综合考虑电动汽车负荷以及光伏的不确定性,针对高比例电动汽车-光伏接入下配电网净负荷时空分布不均衡的问题,提出了一种基于FMS灵活功率调控以及动态重构的配电网灵活运行方法。首先,对高比例电动汽车-光伏接入的配电网结构进行介绍,再计及FMS灵活功率调控以及网络动态重构构建了支撑高比例电动汽车-光伏接入的灵活运行框架;接着,充分对光伏出力以及电动汽车充电负荷的不确定性进行考量,基于概率密度函数对其不确定性进行了分析,并通过蒙特卡洛随机模拟法以及场景缩减法建立了随机规划模型;最后,以弃光、失负荷、FMS损耗、网损最小和负荷均衡度最优为优化目标,并运用big-M法和二阶锥松弛对非线性部分进行线性化处理,从而建立了混合整数线性的配电网灵活运行模型。最后,在158节点系统上通过算例验证了本文所提方法的有效性。

## 1 高比例电动汽车-光伏接入的配电网及其灵活运行框架

### 1.1 高比例电动汽车-光伏接入的配电网结构

分布式光伏发电凭借其清洁高效、节能减排等优势,在未来将会高比例接入配电网,如图1所示,光伏节点在各个变电站的不同馈线上均有大量分

布。在电动汽车方面,随着城市不断地推广交通的“零排放”,不管是私人出行还是公共交通,电动汽车在其中的占比都会大大增加,而电动汽车充电站为电动汽车用户提供了一个良好的充电环境,能较好地解决充电需求问题。电动汽车快充站通常作为直流电网中的电网资源,经配电变压器(DT1和DT2等)将交流10kV变压到交流380V,再整流至直流200~700V后对车辆进行快充,负荷通常较大,可以通过10kV配网多条馈线的剩余容量共同对其进行承担,接入在隶属于同一变电站或者不同变电站的馈线之间,解决配网净负荷时空分布不均的问题。如图1所示,快充站EVCS2接入在同一变电站的两条馈线(S2T12和S2T21)之间;而快充站EVCS1接入在了不同变电站的三条馈线(S1T12、S1T21和S2T11)之间;另一方面,私家电动车用户同时也会选择自己安装慢充充电桩从而更加便利地充电,由于分散广泛且单一充电桩的用电需求较小,因此,并未在图1中画出,将其考虑至节点负荷之中。

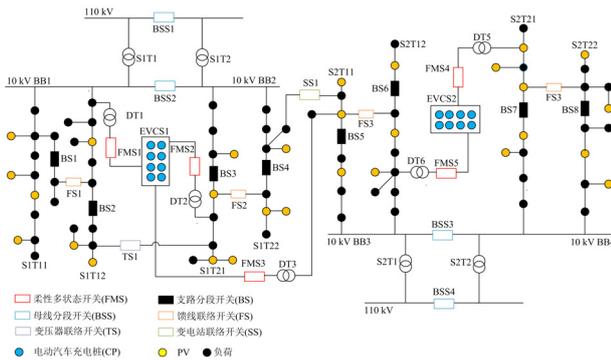


图1 高比例电动汽车-光伏接入的配电网结构

Fig. 1 Distribution grid structure with high percentage of electric vehicle-photovoltaic access

## 1.2 支撑高比例电动汽车-光伏接入的灵活运行框架

未来的配电网结构中含有高比例的电动汽车和光伏,仍采用传统的网络运行模式会产生大量弃光、失负荷等现象。因此,要采取灵活运行措施来提升配电网运行的经济性和可靠性。

配电网具有分层的网络结构,包括馈线层、变压器层和变电站层。通过网络的动态重构,即控制支路分段开关和馈线、变压器、变电站联络开关的开闭状态从而灵活调整网络拓扑结构,达到在不同层级之间进行潮流转移的目的,如图1所示,通过控制支路分段开关BS1、BS2以及馈线联络开关FS1,可以实现馈线S1T11和S1T12之间的潮流转移,调整两条馈线上的净负荷分布;同理,通过控制变电站联络开关SS1及其相邻的支路分段开关可

以实现两个变电站之间的净负荷灵活转移。

另一方面,FMS作为一种安装于配电网中可以灵活调控线路功率的电力电子半导体器件,是提升配电网优化运行效能的重要装置,其控制状态不仅具备传统开关的开断功能,还增加了功率连续可控的功能,并且可以常态化闭环受控运行,避免了传统开关频繁倒闸操作所引起的各类运行问题。FMS的实现装置有:背靠背电压源型换流器(back to back voltage sourced converter, B2B VSC)和统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)。本文基于背靠背电压源型换流器以及控制模式 $PQ-U_{DC}Q$ 为例进行分析,基于此模式,FMS不仅可以灵活调节换流器之间传输的有功功率,还可以通过2个换流器来发出无功功率,从而改善潮流、优化电网运行。FMS的调控时间尺度可分为分钟级、小时级等,本文的灵活运行方法充分利用其小时级别的功能,配合同样时间尺度的动态重构进行配电网的灵活运行控制。

因此,本文考虑在所有电动汽车充电站与各馈线相连接的支路上均配置有FMS。如图1所示,快充站EVCS1通过三条配有FMS(FMS1、FMS2和FMS3)的支路与不同馈线相连,快充站EVCS2通过两条配有FMS(FMS4和FMS5)的支路与不同馈线相连,从而实现支路有功功率的连续灵活调控和无功功率补偿。例如,当馈线S1T12的弃光现象较为严重,净负荷为负值,此时可以通过控制FMS来使得FMS1所在支路流向EV充电站的有功功率增大,而FMS2和FMS3所在支路流向EV充电站的有功功率减小,通过大量电动汽车用户充电以更好地减少馈线S1T12光伏弃电量;此外,电动汽车充电站还可以发挥类似联络开关的枢纽作用,当右侧变电站中的馈线弃光现象严重或潮流分布不均衡时,不仅可以通过FMS4和FMS5对电动汽车充电站EVCS2所连支路的有功功率进行灵活调控,同时也可以利用FMS3来通过充电站EVCS1对其多余光伏出力进行消纳,达到大范围灵活协调的目的。另一方面,FMS通过发出无功功率可以较好地解决由于电动汽车高比例接入导致的配电网节点电压降落的问题。

基于上述的FMS有功灵活调控、无功补偿以及动态重构来构建支撑高比例电动汽车-光伏接入的配电网灵活运行框架。在不同时刻选择其最合适的网络拓扑结构以及功率调控结果,从而在面对未来高比例电动汽车-光伏的接入时,在保证用户可靠用电的前提下,更好地消纳不同馈线上的光伏出力,使配电网馈线的负荷分布变得更加均衡,提高电网

运行的经济性和可靠性。

## 2 电动汽车-光伏随机不确定性建模

在配电网中,有诸多因素具有随机性和不确定性,从而影响着网络运行。在电动汽车方面,对不同类型的电动汽车分别进行不确定性建模。本文将电动汽车按照私用以及商用进行分类,不同类型的电动汽车在无任何政策引导和激励机制驱动下,其充电负荷在充电起始时刻和日行驶里程数等参数上分别具有各自独特的不确定性。光伏发电的输出功率和光照、温度等自然因素密切相关,也具有强烈的随机性和波动性,可能会出现严重的弃光和电网等效负荷波动较大的现象,并且会对配电网的优化运行带来很高的风险。因此,本节利用多类概率模型来对两者的不确定性进行刻画分析。

### 2.1 光伏出力不确定性模型

太阳光照强度可以近似看成服从 Beta 分布,如式(1)所示。

$$f(K) = \frac{\Gamma(\omega + \theta)}{\Gamma(\omega)\Gamma(\theta)} \left(\frac{K}{K_{\max}}\right)^{\omega-1} \left(1 - \frac{K}{K_{\max}}\right)^{\theta-1} \quad (1)$$

式中:  $K$  和  $K_{\max}$  分别为实际光照强度和最大光照强度( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $\omega$  和  $\theta$  为服从 Beta 分布的形状参数,均为 0.85。太阳能电池板的总输出功率  $P_K$  为

$$P_K = KA\eta_K \quad (2)$$

式中:  $A$  为电池板总面积;  $\eta_K$  为光电转换效率。联立式(1)和式(2),得到光伏出力概率分布模型如式(3)所示。

$$f(P_K) = \frac{\Gamma(\omega + \theta)}{\Gamma(\omega)\Gamma(\theta)} \left(\frac{P_K}{P_{K,\max}}\right)^{\omega-1} \left(1 - \frac{P_K}{P_{K,\max}}\right)^{\theta-1} \quad (3)$$

式中,  $P_{K,\max}$  为光伏输出功率的最大值。假定光伏发电机组通过投切电容器来保持功率因数不变,本文在潮流计算中将其视为 PQ 节点。

### 2.2 EV 群随机充电需求模型

公交车、出租车等商用 EV 通常具有相对固定的出行和充电特性,而私家车等私用 EV 在出行和充电行为上则更加具有随机性和灵活性。本文将 EV 群分两类进行不确定性模型建立。

#### 2.2.1 私用 EV

私用 EV 充电起始时刻服从分段正态分布,其概率密度函数为

$$f_S(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_S} \exp\left(\frac{-(x-\mu_S)^2}{2\sigma_S^2}\right), & (\mu_S - 12) < x \leq 24 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_S} \exp\left(\frac{-(x+24-\mu_S)^2}{2\sigma_S^2}\right), & 0 < x \leq (\mu_S - 12) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\mu_S$  和  $\sigma_S$  分别为随机变量  $S$ (EV 充电起始时刻)的均值和方差,  $\mu_S = 17.6$ ,  $\sigma_S = 3.4$ 。

私用 EV 日行驶里程数服从对数正态分布,其概率密度函数为

$$f_D(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x}\sigma_D} \exp\left(\frac{-(\ln x - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right) \quad (5)$$

式中,  $\mu_D$  和  $\sigma_D$  分别为随机变量  $D$ (EV 日行驶里程数)的均值和方差,  $\mu_D = 3.2$ ,  $\sigma_D = 0.9$ 。

EV 的充电过程一般采用恒流-恒压两阶段充电法。由于起始恒流过程较短,本文将充电过程视为恒功率过程,得到单辆私用 EV 的充电持续时间  $T_C$  如式(6)所示。

$$T_C = \frac{DP_{pc}}{100\delta_p P_C} \quad (6)$$

式中:  $P_{pc}$  为 EV 每百公里的耗电量;  $P_C$  为充电功率;  $\delta_p$  为 EV 充电能量转换效率。

本文通过蒙特卡洛模拟法来随机抽取电动汽车不确定的出行和充电行为,从而求得单辆汽车的负荷曲线,通过不断叠加生成电动汽车充电站的总无序充电负荷曲线。具体流程如图 2 所示。

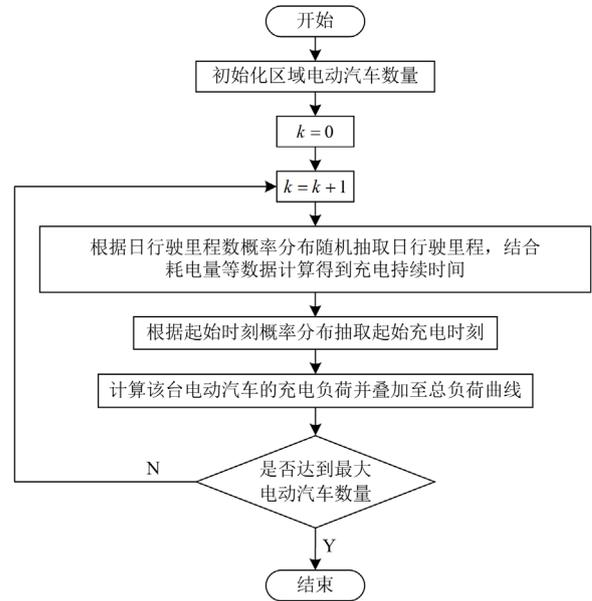


图 2 电动汽车充电负荷计算流程图

Fig. 2 Electric vehicle charging load calculation flow chart

#### 2.2.2 商用 EV

电动出租车由于其载客运营性质,日内会多次补充电能来满足其用电需求,根据文献数据统计可以得到其充电起始时刻和日行驶里程数所对应的概率分布。本文考虑电动出租车为一日两充运行模式,

充电起始时刻方面, 在 00:00—14:00 时段服从正态分布  $N(420, 100^2)$ , 在 14:00—24:00 时段服从正态分布  $N(1140, 100^2)$ 。在日行驶里程数方面, 电动出租车的服从正态分布  $N(12, 220^2)$ , 电动出租车充电负荷需求计算方式如图 2 所示。

电动公交车在每日运行中严格按照公交公司的时刻表排班运行, 在每一次运营任务结束后可去充电至下一次任务的到来, 因此电动公交车的充电起始时刻可被认为在 00:00—24:00 时段内服从均匀分布。根据数据统计, 电动公交车的日行驶里程数比较平均, 约为 150~250 km, 大致服从均匀分布 [150, 250], 充电负荷需求计算方式如图 2 所示。

本文通过蒙特卡洛随机抽样法生成大量的场景, 得到不同场景下的光伏出力及负荷需求, 然后通过场景聚类方法将场景缩减为几个典型出力场景, 从而防止计算爆炸等问题。由于该方法目前比较成熟, 文中不再赘述, 具体可参见文献[22]。本文模拟 10 000 个光伏出力和负荷需求场景, 然后采用  $k$ -means 聚类方法将其缩减为 8 个典型场景, 并得出各场景的概率, 以此模拟两者的不确定性。

### 3 配电网灵活运行优化数学模型

本节基于支撑高比例电动汽车-光伏接入的灵活运行框架以及不确定性优化方法, 以光伏出力和用户负荷需求为基础, 在满足电网安全运行和用户可靠用电的前提下, 提出了一种基于 FMS 和动态重构的含高比例电动汽车-光伏配电网灵活运行方法。

#### 3.1 目标函数

本文建立的优化模型总目标包括弃光量、失负荷量、FMS 运行损耗、网络损耗以及负荷均衡度。而在对 FMS 的成本进行考量时, 主要考虑其运行损耗而不考虑其投资成本, 这是由于单个 FMS 的成本虽然高, 但折算至每一天后为一个固定的数值, 不会再发生变化, 所以不予考虑。本文模型具有多个目标函数, 如下所述。

1) 弃光、失负荷、FMS 损耗和网损最小

$$f_1 = \min(C_{PV} + C_{LR} + C_{FMS} + f_{loss}) \quad (7)$$

$$C_{PV} = \sum_{c=1}^C \pi_c \sum_{t=1}^T \sum_{n \in \eta_{PV}} c_{PV} (P_{t,n,c}^{PV,f} - P_{t,n,c}^{PV}) \Delta t \quad (8)$$

$$C_{LR} = \sum_{c=1}^C \pi_c \sum_{t=1}^T \sum_{n \in \eta} (c_{LR} P_{t,n,c}^{LR} \Delta t) \quad (9)$$

$$C_{FMS} = \sum_{c=1}^C \pi_c \sum_{t=1}^T \sum_{mn \in \varphi_{FMS}} c_{FMS} P_{t,mn,c}^{FMS} \Delta t \quad (10)$$

$$f_{loss} = \sum_{c=1}^C \pi_c \sum_{t=1}^T \sum_{mn \in \varphi_b} (\alpha_{t,mn,c} r_{mn} \frac{P_{t,mn,c}^2 + Q_{t,mn,c}^2}{U_{t,mn,c}^2} \Delta t) \quad (11)$$

式中:  $f_1$  为弃光、失负荷、FMS 损耗和网损成本之和;  $C_{PV}$  为弃光总成本;  $\pi_c$  为场景  $c$  的概率;  $C$  为场景总数;  $T$  为重构小时数;  $\eta_{PV}$  为配电系统中所有接入 PV 的节点集合;  $c_{PV}$  为弃光费用的单价;  $P_{t,n,c}^{PV,f}$  和  $P_{t,n,c}^{PV}$  分别为在第  $c$  个场景下, 节点  $n$  在时段  $t$  的 PV 发出功率和接入电网的实际功率;  $\Delta t$  为最小时间间隔;  $C_{LR}$  为失负荷总成本;  $c_{LR}$  为负荷削减费用的单价;  $\eta$  为配电网中所有节点集合;  $P_{t,n,c}^{LR}$  为在第  $c$  个场景下, 节点  $n$  处负荷削减有功;  $C_{FMS}$  为 FMS 损耗总成本;  $\varphi_{FMS}$  为配电系统中接入 FMS 的支路集合;  $c_{FMS}$  为 FMS 运行费用的单价;  $P_{t,mn,c}^{FMS}$  为在第  $c$  个场景下, 支路  $mn$  处 FMS 在时段  $t$  的有功功率损耗;  $f_{loss}$  为网损总成本;  $\varphi_b$  为配电系统中含联络线的所有支路集合;  $\alpha_{t,mn,c}$  为第  $c$  个场景下, 不同支路上开关的状态变量,  $\alpha_{t,mn,c} = 0$  表示开关打开,  $\alpha_{t,mn,c} = 1$  表示闭合;  $r_{mn}$  为支路  $mn$  上的电阻;  $P_{t,mn,c}$  和  $Q_{t,mn,c}$  分别表示第  $c$  个场景下, 支路  $mn$  在  $t$  时段传输的有功和无功功率;  $U_{t,mn,c}$  表示第  $c$  个场景下, 支路  $mn$  在  $t$  时段末端的节点电压。

2) 负荷均衡度最优

$$f_2 = \min \frac{1}{T} \sum_{c=1}^C \pi_c \sum_{t=1}^T \sum_{mn \in \varphi_b} (\frac{S_{t,mn,c}}{S_{mn,c,max}})^2 \quad (12)$$

式中:  $f_2$  为负荷均衡度;  $S_{t,mn,c}$  为第  $c$  个场景下, 支路  $mn$  在  $t$  时段的视在功率;  $S_{mn,c,max}$  为第  $c$  个场景下支路  $mn$  的最大传输容量。

上述的两类目标函数的单位和重要程度均不相同, 为了便于求解运算, 对目标函数进行归一化处理, 并运用层次分析法来确定它们各自的权重系数, 并整合成为单目标函数如式(13)所示。

$$f = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 \alpha f_2 \quad (13)$$

式中:  $f$  为总目标函数;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为各目标的权重系数;  $\alpha$  为归一化系数。构造准则层判断矩阵, 计算得出权重系数分别为 0.6 和 0.4。

#### 3.2 约束条件

1) Distflow 二阶锥潮流约束

原始 Distflow 潮流模型经过二阶锥松弛转化为最终的线性潮流约束<sup>[23]</sup>如下。

$$\sum_{m \in f(n)} P_{t,mn,c} - r_{mn} \tilde{I}_{t,mn,c} = \sum_{k \in S(n)} P_{t,kn,c} + P_{t,n,c} \quad (14)$$

$$\sum_{m \in f(n)} Q_{t,mn,c} - x_{mn} \tilde{I}_{t,mn,c} = \sum_{k \in S(n)} Q_{t,kn,c} + Q_{t,n,c} \quad (15)$$

$$P_{t,n,c} = P_{t,n,c}^{\text{Sub}} + P_{t,n,c}^{\text{PV}} + P_{k,j,t,c}^{\text{FMS}} - P_{t,n,c}^{\text{load}} + P_{t,n,c}^{\text{LR}} \quad (16)$$

$$Q_{t,n,c} = Q_{t,n,c}^{\text{Sub}} + Q_{k,j,t,c}^{\text{FMS}} - Q_{t,n,c}^{\text{load}} + Q_{t,n,c}^{\text{LR}} \quad (17)$$

$$-M(1 - \alpha_{t,mn,c}) + U_{t,m,c}^{\sim} - 2(r_{mn}P_{t,mn,c} + x_{mn}Q_{t,mn,c}) + (r_{mn}^2 + x_{mn}^2)I_{t,mn,c}^{\sim} \leq U_{t,n,c}^{\sim} \leq M(1 - \alpha_{t,mn,c}) + U_{t,m,c}^{\sim} - 2(r_{mn}P_{t,mn,c} + x_{mn}Q_{t,mn,c}) + (r_{mn}^2 + x_{mn}^2)I_{t,mn,c}^{\sim}, \forall mn \in \varphi_{\text{sw}} \quad (18)$$

$$U_{t,n,c}^{\sim} = U_{t,m,c}^{\sim} - 2(r_{mn}P_{t,mn,c} + x_{mn}Q_{t,mn,c}) + (r_{mn}^2 + x_{mn}^2)I_{t,mn,c}^{\sim}, \forall mn \in \varphi_b / \varphi_{\text{sw}} \quad (19)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{t,mn,c} \\ 2Q_{t,mn,c} \\ I_{t,mn,c}^{\sim} - U_{t,m,c}^{\sim} \end{array} \right\|_2 \leq I_{t,mn,c}^{\sim} + U_{t,m,c}^{\sim} \quad (20)$$

式中:  $f(n)$  为配电网中以  $n$  为初始节点的支路终端节点集合;  $s(n)$  为以节点  $n$  为终端节点的支路初始节点集合;  $P_{t,kn,c}$  和  $Q_{t,kn,c}$  分别为第  $c$  个场景下, 第  $t$  个时段支路  $kn$  上传输的有功、无功功率;  $I_{t,mn,c}^{\sim}$  为第  $c$  个场景下, 第  $t$  个时段支路  $mn$  电流幅值的平方;  $x_{mn}$  为支路  $mn$  的电抗值;  $P_{t,n,c}$  和  $Q_{t,n,c}$  分别为第  $c$  个场景下, 在第  $t$  个时段节点  $n$  注入的有功、无功功率;  $P_{t,n,c}^{\text{LR}}$  和  $Q_{t,n,c}^{\text{LR}}$  分别为第  $c$  个场景下, 节点  $n$  的负荷削减有功和负荷削减无功;  $P_{t,n,c}^{\text{Sub}}$  和  $Q_{t,n,c}^{\text{Sub}}$  分别为第  $c$  个场景下, 节点  $n$  在第  $t$  个时段变电站注入的有功、无功功率;  $P_{k,j,t,c}^{\text{FMS}}$  和  $Q_{k,j,t,c}^{\text{FMS}}$  分别为第  $c$  个场景下, 第  $k$  个 FMS 中的换流器发出的有功和无功功率;  $P_{t,n,c}^{\text{load}}$  和  $Q_{t,n,c}^{\text{load}}$  分别为第  $c$  个场景下, 节点  $n$  在第  $t$  个时段注入的负荷有功、无功功率;  $M$  为惩罚因子;  $\varphi_{\text{sw}}$  表示优化区域内的开关支路集合;  $U_{t,m,c}^{\sim}$  和  $U_{t,n,c}^{\sim}$  分别为第  $c$  个场景下, 第  $t$  个时段节点  $m$  和  $n$  的电压幅值的平方。

## 2) 网络重构下的辐射状和连通性约束

本文研究的配电网中含有许多由 FMS 进行功率灵活调控的支路, 这些支路由于 FMS 的固有特性, 可对外视为断开, 不会对网络的辐射状产生影响, 因此要在约束中排除 EV 充电站节点。

$$N^{\text{always}} + \sum_{mn \in E^{\text{OA}}} \alpha_{mn,c} = N - N^{\text{EV}} - N^{\text{Sub}} \quad (21)$$

式中:  $N^{\text{always}}$  为一直处于闭合状态不可调节的支路总数;  $\alpha_{mn,c}$  为不同支路上开关的状态变量;  $N$  为节点总数;  $N^{\text{EV}}$  为电动汽车充电站总数;  $N^{\text{Sub}}$  为变电站注入数目;  $E^{\text{OA}}$  为优化区域内开关支路集合。

由于本文研究的配电网中含有较多的分布式光伏节点, 在式(21)约束下仍然无法保证经过网络动态重构后不存在孤岛以及环网的运行状态。因此, 通过引入一个较小的节点注入功率  $\rho$  并结合潮流约束来保证网络的连通性。

$$\sum_{k \in f(n)} P_{nk,c}^* - \sum_{k \in s(n)} P_{mn,c}^* = P_{n,c}^* = \rho \quad (22)$$

$$-\alpha_{mn,c} P_{mn,\max} \leq P_{mn,c}^* \leq \alpha_{mn,c} P_{mn,\max}, \forall mn \in \varphi_{\text{sw}} \quad (23)$$

$$-P_{mn,\max} \leq P_{mn,c}^* \leq P_{mn,\max}, \forall mn \in \varphi_b / \varphi_{\text{sw}} \quad (24)$$

式中:  $P_{nk,c}^*$  和  $P_{mn,c}^*$  表示支路上的辅助潮流有功功率而非实际线路上的有功功率;  $P_{n,c}^*$  为节点  $n$  流过的辅助潮流有功功率;  $P_{mn,\max}$  支路  $mn$  上传输的有功功率最大值。

## 3) 开关约束

配电网中的开关在同一时刻只能为开闭状态中的一种, 而且当操作开关次数过多时, 会减少设备的使用寿命且影响网络运行的安全性。因此要对配电网动态重构中开关的状态及其操作次数进行限制, 开关约束表示如下。

$$\begin{cases} \alpha_{t,mn,c}^{\text{Close}} + \alpha_{t,mn,c}^{\text{Open}} \leq 1, mn \in E^{\text{OA}} \\ \alpha_{t,mn,c} - \alpha_{t-1,mn,c} = \alpha_{t,mn,c}^{\text{Close}} - \alpha_{t,mn,c}^{\text{Open}} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T |\alpha_{t,mn,c} - \alpha_{t-1,mn,c}| \leq X_{l,\max}, mn \in \varphi_b \\ \sum_{mn \in \varphi_b} \sum_{t=1}^T |\alpha_{t,mn,c} - \alpha_{t-1,mn,c}| \leq X_{\max} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $\alpha_{t,mn,c}^{\text{Close}}$  和  $\alpha_{t,mn,c}^{\text{Open}}$  分别表示第  $c$  个场景下, 开关闭合或者断开的状态量,  $\alpha_{t,mn,c}^{\text{Close}} = 1$  代表开关进行了闭合的动作,  $\alpha_{t,mn,c}^{\text{Open}} = 1$  则代表开关进行了打开的动作;  $\alpha_{t-1,mn,c}$  为第  $c$  个场景下, 第  $t-1$  个时段不同支路上开关的状态变量;  $X_{l,\max}$  为单个开关的最大操作次数;  $X_{\max}$  为所有开关的最大操作次数。

## 4) FMS 约束方程

由于式(31)和式(32)均含有非线性项, 所以将其转化为旋转锥约束, 如式(33)和式(34)所示。

$$P_{k,i,t,c}^{\text{FMS}} + P_{k,j,t,c}^{\text{FMS}} = 0 \quad (27)$$

$$P_{t,mn,c}^{\text{FMS}} = 2\alpha_{\text{FMS}} P_{k,i,t,c}^{\text{FMS}} \quad (28)$$

$$Q_{k,i,\min}^{\text{FMS}} \leq Q_{k,i,t,c}^{\text{FMS}} \leq Q_{k,i,\max}^{\text{FMS}} \quad (29)$$

$$Q_{k,j,\min}^{\text{FMS}} \leq Q_{k,j,t,c}^{\text{FMS}} \leq Q_{k,j,\max}^{\text{FMS}} \quad (30)$$

$$\sqrt{(P_{k,i,t,c}^{\text{FMS}})^2 + (Q_{k,i,t,c}^{\text{FMS}})^2} \leq S_{k,i} \quad (31)$$

$$\sqrt{(P_{k,j,t,c}^{\text{FMS}})^2 + (Q_{k,j,t,c}^{\text{FMS}})^2} \leq S_{k,j} \quad (32)$$

$$(P_{k,i,t,c}^{\text{FMS}})^2 + (Q_{k,i,t,c}^{\text{FMS}})^2 \leq 2 \left( \frac{S_{k,i}}{\sqrt{2}} \right) \left( \frac{S_{k,i}}{\sqrt{2}} \right) \quad (33)$$

$$(P_{k,j,t,c}^{\text{FMS}})^2 + (Q_{k,j,t,c}^{\text{FMS}})^2 \leq 2 \left( \frac{S_{k,j}}{\sqrt{2}} \right) \left( \frac{S_{k,j}}{\sqrt{2}} \right) \quad (34)$$

式中:  $P_{k,i,t,c}^{\text{FMS}}$  和  $P_{k,j,t,c}^{\text{FMS}}$  分别为第  $c$  个场景下, 第  $k$  个 FMS 中的 2 个换流器发出的有功功率;  $\alpha_{\text{FMS}}$  为换流器损耗系数, 取 0.02;  $Q_{k,i,t,c}^{\text{FMS}}$  和  $Q_{k,j,t,c}^{\text{FMS}}$  分别为第  $c$  个场景下, 第  $k$  个 FMS 中的 2 个换流器发出的无功功率;  $Q_{k,i,\max}^{\text{FMS}}$ 、 $Q_{k,i,\min}^{\text{FMS}}$ 、 $Q_{k,j,\max}^{\text{FMS}}$  和  $Q_{k,j,\min}^{\text{FMS}}$  分别为第  $k$  个 FMS 的 2 个换流器的无功功率上下限;  $S_{k,i}$  和  $S_{k,j}$  为第  $k$  个 FMS 的 2 个换流器安装容量。

#### 5) FMS 功率控制约束

正常运行下, 各条与 EV 快充站所连支路由 FMS 进行有功功率灵活调控, 其支路功率总和应始终与 EV 充电站不同时刻的充电负荷需求相等。

$$P_{1,i,t,c}^{\text{FMS}} + \dots + P_{k,i,t,c}^{\text{FMS}} = P_{\text{PEV},z}^{\text{FMS}}, k \in \varphi_{\text{EV},z}^{\text{FMS}}, z \in \varphi_{\text{EV}} \quad (35)$$

式中:  $\varphi_{\text{EV}}$  为电动汽车充电站节点集合;  $\varphi_{\text{EV},z}^{\text{FMS}}$  为调控节点  $z$  处充电站所连支路功率的 FMS 集合;  $P_{\text{PEV},z}^{\text{FMS}}$  为节点  $z$  处充电站的总负荷需求。

#### 6) 节点电压约束

配电网优化要求各节点的电压限制在允许范围内, 节点电压约束表示为

$$U_{m,\min} \leq U_{t,m,c} \leq U_{m,\max} \quad (36)$$

式中:  $U_{t,m,c}$  为第  $c$  个场景下, 第  $t$  个时段节点  $m$  的电压幅值;  $U_{m,\max}$  和  $U_{m,\min}$  分别为节点  $m$  的电压幅值上下限。

#### 7) 支路电流约束

配电网优化要求各支路的电流限制在允许范围内, 支路电流约束表示为

$$I_{mn,\min} \leq I_{mn,t,c} \leq I_{mn,\max}, \forall mn \in \varphi_b / \varphi_{\text{sw}} \quad (37)$$

$$\alpha_{t,mn,c} I_{mn,\min} \leq I_{mn,t,c} \leq \alpha_{t,mn,c} I_{mn,\max}, \forall mn \in \varphi_{\text{sw}} \quad (38)$$

式中:  $I_{mn,t,c}$  为第  $c$  个场景下, 第  $t$  个时段支路  $mn$  的电流幅值;  $I_{mn,\max}$  和  $I_{mn,\min}$  分别为支路  $mn$  的电流幅值上下限。

#### 8) 光伏出力约束

在实际情况下, 配电网中接入的 PV 出力不能超过其允许出力的上下限, 光伏出力约束表示为

$$P_{m,t}^{\text{PV},\min} \leq P_{m,t}^{\text{PV}} \leq P_{m,t}^{\text{PV},\max} \quad (39)$$

式中:  $P_{m,t}^{\text{PV}}$  为第  $c$  个场景下, 第  $t$  个时段配电网中

接入的 PV 出力;  $P_{m,t}^{\text{PV},\max}$  和  $P_{m,t}^{\text{PV},\min}$  分别为 PV 出力的上下限。

#### 9) 失负荷约束

配电网中的某节点失负荷功率不能超出一定比例下的该节点负荷功率, 如式(40)所示。

$$0 \leq P_{t,n,c}^{\text{LR}} \leq \alpha_n^{\text{LR}} P_{t,n,c}^{\text{LR}} \quad (40)$$

式中,  $\alpha_n^{\text{LR}}$  为节点  $n$  的失负荷比例系数。

## 4 算例分析

配电网在实际运行中, 如果对全天中的每一个时段都进行不同的重构计算, 则会存在开关动作次数过多、运行计算负担过重等问题。因此, 本文采用模糊 C 均值聚类技术<sup>[24]</sup>, 根据所研究时间区间内所有时间点的净负荷数据的内在相似性进行聚类, 隶属同一类时段的网络拥有统一的重构操作方案。在合理确定时段的划分总数以后, 通过该聚类方法得到有效的聚类结果, 这样既提高了动态重构方案计算的效率, 同时也兼顾了配电系统的经济性。

本文在内置 YALMIP 工具箱和 CPLEX 算法包的 Matlab2016a 仿真平台上, 采用修改后的 158 节点系统, 对高比例电动汽车-光伏接入的配电网灵活运行方法进行验证分析。如图 3 所示, 系统由 2 个变电站、4 台变压器、8 条馈线组成。变电站节点为 1 和 76, 每个变电站下均有 2 台变压器来连接低压侧馈线, 馈线 S1T11 和 S1T12 隶属于变压器 T1, 馈线 S1T21 和 S1T22 隶属于变压器 T2, 馈线 S2T11 和 S2T12 隶属于变压器 T3, 馈线 S2T21 和 S2T22 隶属于变压器 T4。

电动汽车快充充电站、光伏节点配置见表 1, 光伏的光电转换效率为 15%, 每个 EV 快充站配置有不同数量的私用和商用 EV 充电车次, 私用 EV 和电动出租车百公里能耗为 15 kWh, 电动公交车百公里能耗为 50 kWh<sup>[25]</sup>, 快充功率为 70 kW, 慢充功率为 12 kW, 充电能量转换效率为 75%。在所有以电动汽车快充站节点为首、尾节点的支路均配置有 FMS, 例如支路 10-149 和 30-149。节点 149-156 的 EV 充电站均由两条配置有 FMS 的支路进行供电, 节点 157 和 158 的 EV 充电站由 3 条配置有 FMS 的支路进行供电。本网络中开关类型有支路分段开关、馈线联络开关、变压器联络开关和变电站联络开关一共 4 种, 其数量分别为 13、7、3、2。弃光、失负荷、网损成本均为 500 美元/MWh<sup>[27-28]</sup>。FMS 的两个换流器的容量限制为 500 kVA, 无功支撑上限为 300 kVA。

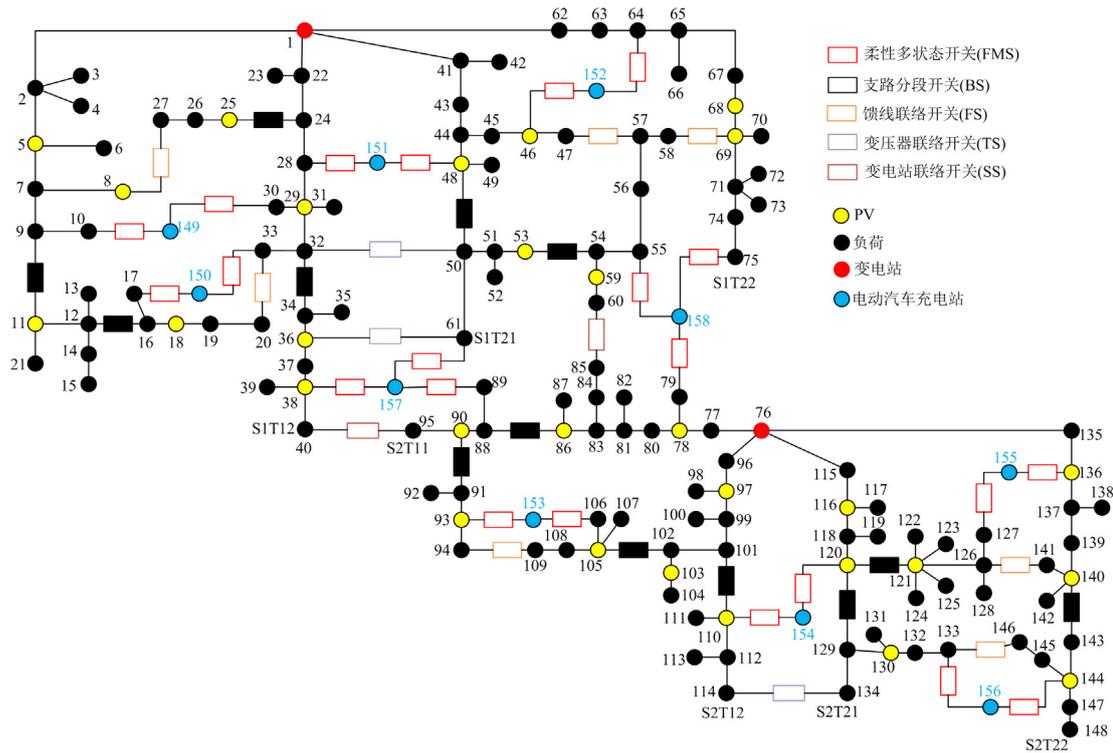


图 3 158 节点算例系统

Fig. 3 Topology of the 158-node system

表 1 EV 快充站及 PV 配置信息

Table 1 EV fast charging station and PV configuration information

节点类型	节点编号及支路
EV 快充站	149,150,151,152,153,154,
	155,156,157,158,159
PV	5,8,11,18,25,29,36,38,46,48,53,59,
	68, 69,78,86,90,93,97, 103, 105,
	110,116,120,121, 130,136,140,144

表 2 优化运行结果

Table 2 Optimal operating results

运行成本/美元					负荷均衡度
弃光	失负荷	网损	FMS 损耗	总成本	
0.009	3.407	1372.817	424.749	1800.973	1.428

4.1 优化结果分析

在光伏比例为 40%左右并且分布相对不均匀, 电动汽车负荷比例为 25%左右的情况下, 根据光伏出力、普通节点负荷、电动汽车充电站负荷以及算例各参数可得优化运行结果, 弃光成本、网损成本、失负荷成本、FMS 损耗成本和负荷均衡度如表 2 所示。由此可见, 弃光量近似为 0 MWh, 失负荷量为 0.0069 MWh, 占总负荷的比例为 0.0022%左右, 负荷均衡度为 1.428。在不考虑 FMS 灵活功率调控及动态重构的原始拓扑下, 弃光量和失负荷量分别高达 8.625 MWh 和 1.732 MWh, 负荷均衡度为 2.4864。由此可见, 在高比例电动汽车-光伏接入下, 本文的优化运行模型在满足负荷需求的前提下, 达到了消纳高比例光伏以及均衡潮流的目的。

1) 不同时段划分下的重构结果

模糊 C 均值聚类方法以配网净负荷水平作为划分依据进行时段划分, 可以缩减网络动态重构的计算成本, 本文采取的聚类时段数为 6, 多时段重构结果如表 3 所示, 全时段的开关动作次数为 18。

表 3 多时段重构优化结果

Table 3 Multi-period reconstruction optimization results

重构时段	断开开关支路	闭合开关支路	开关动作次数
00:00—05:00	32-34	36-61	2
06:00—08:00	53-54	58-69	2
09:00—10:00	48-50,86-88,	32-34,94-109,	6
	120-129	133-146	
11:00—17:00	94-109,133-146	114-134,40-95	4
18:00—20:00	36-61,40-95	48-50,86-88	4
21:00—24:00	—	—	0

2) FMS 功率控制优化结果

以节点 157 处的电动汽车充电站所连的 3 条配有 FMS 的支路的有功、无功功率为例进行分析。图

4 为此快充站所连支路的 3 个 FMS 的有功功率灵活调控结果(只在图中画出每个 FMS 其中一个换流器的有功功率结果)。从调控结果可以看出, 3 个 FMS 会根据其连接的不同馈线的负荷需求和光伏出力情况来不断灵活调整各自所控支路的有功功率大小, 从而更好地消纳光伏、可靠供电、改善网络中的潮流分布。

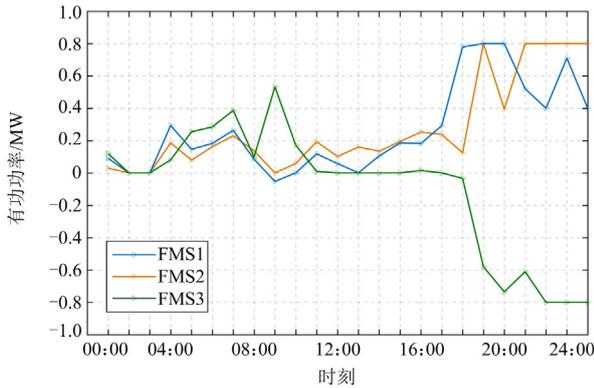


图 4 FMS 的有功功率分配结果

Fig. 4 Active power distribution results of FMS

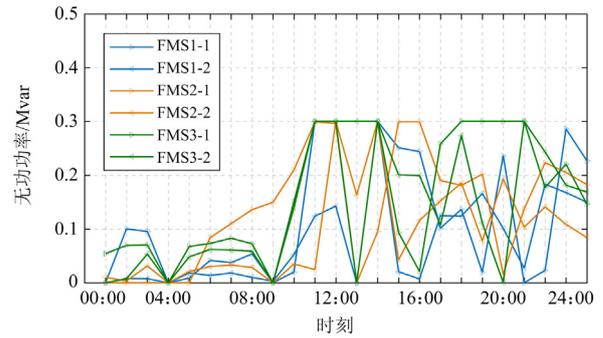
另一方面, 由于网络中会出现高峰情况, 而且其中含有大量的电动汽车快充站节点, 集中式的无序充电必然会加重网络的节点电压偏离程度, 而 FMS 通过一定的无功补偿, 使得电网电压更加稳定, 线路损耗更低, 图 5 为 6 个换流器所发出的无功功率结果以及 18:00 时刻的 50~80 节点的电压曲线, 可以看出在用电高峰时段(10:00—24:00) FMS 会发出较多的无功功率来对电网进行调节, 而在低谷时段(00:00—10:00)则发出较少的无功功率, 经过调节之后, 节点电压波动变小, 电压水平整体上升, 电压质量更优。

#### 4.2 不同配电网优化运行策略结果及对比分析

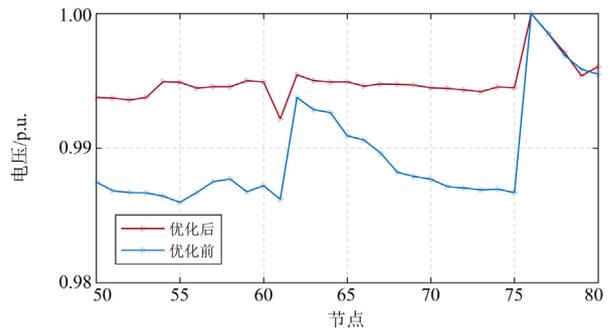
在配电网接入高比例的光伏以及电动汽车负荷后, 如果不采取有效措施往往会导致弃光、失负荷的现象出现。为了体现本文优化运行策略对于电网的效益提升效果, 通过设置 3 种不同的策略来进行对比分析。

- 1) 仅考虑动态重构, 不考虑 FMS 功率调控(所有电动汽车充电站只由一条线路进行供电);
- 2) 仅考虑 FMS 功率调控, 不考虑动态重构;
- 3) 考虑 FMS 功率调控及考虑动态重构。

配电网不同优化运行策略下的运行结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出, 不论是在运行成本还是在负荷均衡度方面, 本文的优化模型结果(策略 3)均为最低; 在开关动作次数方面, 策略 1 全时段开关闭



(a) FMS 的无功功率发出结果



(b) 节点电压曲线

图 5 FMS 无功出力及电压调节结果

Fig. 5 FMS reactive power output and voltage regulation results

作了 25 次, 相比于策略 3, 增加了 7 次, 增加了配网运行的风险; 在弃光方面, 面对高比例光伏的接入, 策略 1 和策略 2 均不能完全消纳光伏出力, 但相比于原始拓扑的弃光量 8.625 MWh, 两者的弃光水平均有大幅度的降低, 但策略 2 消纳光伏的能力更强, 当同时考虑动态重构和 FMS 功率调控时, 可以完全消纳高比例的光伏出力; 虽然策略 2 付出了一定的 FMS 运行损耗成本, 但从总运行成本、网损、失负荷以及负荷均衡度方面来看, 其均优于策略 1, 当电动汽车在配网负荷所占比例较高时, 相比于传统网络动态重构, 通过对电动汽车充电站所连支路的有功功率进行合理调控会得到更优的结果。

表 4 不同策略下的优化运行结果

Table 4 Results of optimization operation with different strategies

策略	运行成本/美元				FMS	负荷均衡度
	总费用	网损	弃光	失负荷		
1	2554.152	1860.746	627.682	65.724	—	2.107
2	2302.942	1550.313	267.132	55.895	429.602	1.672
3	1800.973	1372.817	0.009	3.407	424.749	1.428

#### 4.3 灵敏度分析

##### 4.3.1 光伏接入比例的灵敏度分析

为了验证光伏高比例接入下本文优化模型对其

的消纳能力，改变光伏在网络中的接入比例，计算其优化运行结果，如表 5 所示。分析可知，光伏比例从 20%增加至 60%时，配电网通过本文的优化方法均可以将其完全消纳，且由于其比例不断增高，导致负荷更多被就地消纳，从而降低了网络损耗。当比例达到 80%时，此时网络无法完全消纳光伏，光伏对网络的贡献不再与其接入比例成正比，过高比例的光伏出力加剧了净负荷时空分布的不均衡性，导致弃光量达到了 2.415 MWh，且在这种情形下，线路潮流流向会发生改变，增大了更多支路的网损，网络损耗成本增加了 921.044 美元，负荷均衡度上升了 0.228。

表 5 不同光伏接入比例下的优化运行结果

Table 5 Optimized operation results with different

PV access ratios						
比例/ %	运行成本/美元					负荷均 衡度
	总费用	网损	弃光	失负荷	FMS	
20	2043.232	1564.672	0.004	58.194	420.362	1.428
40	1800.973	1372.817	0.009	3.407	424.749	1.428
60	1580.118	1175.808	0.079	3.407	400.824	1.548
80	3697.105	2096.852	1207.552	3.407	389.294	1.776

#### 4.3.2 不同类型电动汽车充电站的规模灵敏度分析

本算例默认充电站规模越大则充电车次越多，将电动汽车充电站分为 3 类：① 位于同一变压器的两条馈线之间；② 位于同一变电站的两个变压器之间；③ 位于两个变电站之间。算例其余部分的 3 类电动汽车充电站的电动汽车充电车次为：① 90/60/45(私用车数量为 90、出租车数量为 60、公交车数量为 45)；② 120/80/90；③150/100/75。其余负荷和各类成本均不改变，在基本保持电动汽车负荷占比为 25%的前提下，通过改变①②③类充电站的 EV 充电车次来得到不同的优化结果，如表 6 所示。从中可以看出，不同类型充电站中 EV 充电车次的不同，即充电站的规模大小会直接影响各类运行成本以及负荷均衡度的优化水平，具体来讲，在总数量不变的前提下，当①类充电站规模较小、③类充电站规模较大时，优化结果最好；而保持①类充电站规模不变而增加②类充电站规模时，虽然光伏基本完全消纳，但总成本增加了 212.628 美元，负荷均衡度也上升了 0.164；同样地，若保持②类充电站规模不变，而增大①类充电站的规模或者保持③类充电站规模不变，而增大①类充电站的规模时，运行成本和负荷均衡度都有不同程度的上升。

因此，可以得出结论，同等规模的电动汽车充电负荷接入配网时，位于两个变电站之间的充电站

规模较大而位于同一变压器的两条馈线之间的充电站规模较小时，可以更好地满足用户用电需求，且更加利于光伏的消纳以及馈线负载的均衡，这也为不同位置电动汽车充电站的规模规划提供了一定的参考。

表 6 不同类型电动汽车充电站规模下的优化运行结果

Table 6 Optimized operation results for different types of

EV charging station numbers						
EV 配置数量			运行成本/美元			负荷均 衡度
①	②	③	总成本	弃光	失负荷	
90/60/45	120/80/90	150/100/75	1800.973	0.009	3.407	1.428
90/60/45	150/100/75	120/80/90	1944.601	0.009	36.987	1.592
120/80/60	120/80/60	90/60/45	2070.317	0.009	59.298	1.527
120/80/60	60/40/30	150/100/75	2124.158	0.009	88.944	1.430

#### 4.4 随机规划模型及确定性模型对比分析

在本文的配电网优化运行模型中，纳入了不确定性的考量，考虑了不同场景下的光伏出力和负荷需求。为了直观地体现多场景下的随机规划模型与单场景下的确定性模型的异同，选取 3 种不同的运行方案进行对比分析：(1) 利用随机规划模型进行配电网优化运行；(2) 单场景规划时，光伏以及负荷数据使用全部场景数据的平均值；(3) 运行 10 000 个确定性场景下的模型，将其所有的优化运行结果取均值。所得结果如表 7 所示。由于光伏出力和各类负荷均存在着随机性和波动性，这会大大增加净负荷水平的波动范围，对网络的可靠、经济运行造成较大影响，因此采用随机规划模型对其不确定性进行处理更加符合实际情况，从优化对比结果来看，方案 1 在运行成本和负荷均衡度方面均低于方案 2 和方案 3，在考虑不确定性的前提下有效提高了网络运行的经济性和可靠性。

表 7 随机规划模型与确定性模型的优化运行结果

Table 7 Optimized operation results of stochastic programming model and deterministic model

方案	运行成本/美元					负荷均 衡度
	总费用	网损	弃光	失负荷	FMS	
1	1800.973	1372.817	0.009	3.407	424.749	1.428
2	2283.65	1677.421	58.741	118.924	428.564	1.578
3	1951.814	1480.215	29.228	9.607	432.764	1.489

## 5 结论

本文综合考虑电动汽车负荷以及光伏的不确定性，针对高比例电动汽车-光伏接入下配电网净负荷时空分布不均衡的问题，提出了结合 FMS 灵活功率调控以及网络动态重构的配电网灵活运行方法。通

过算例分析, 得到了如下结论:

1) 在高比例电动汽车-光伏接入下, 传统的重构难以满足网络需求, 本文的灵活运行方法在满足负荷需求的前提下, 达到了消纳高比例光伏以及均衡潮流的目的; FMS 应用于配电网中, 还可以通过提供无功功率补偿从而提升节点电压质量。

2) 光伏接入比例在一定范围内的增大可以优化网络运行, 当比例超过范围后, 会加剧净负荷时空分布的不均衡性, 导致弃光以及网损成本增加。

3) 合理配置不同位置的电动汽车充电站规模大小, 可以有效提升配电网运行的经济性和可靠性。

4) 相比于确定性模型, 随机规划模型综合考虑了光伏以及电动汽车负荷运行的不确定性, 更加贴合实际, 提升了运行方案的可靠性。

### 参考文献

- [1] 马伟, 王玮, 吴学智, 等. 光储协调互补平滑功率波动策略及经济性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 730-737. MA Wei, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Coordinated control strategy of photovoltaics and energy storage for smoothing power fluctuations of photovoltaics and economic analysis[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 730-737.
- [2] 杨谦, 刘继春, 蒋万泉. 光伏不同渗透率下考虑源网荷储深度互动的电力系统调峰策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 74-84. YANG Qian, LIU Jichun, JIANG Wanxiao. Peak regulation strategy of power system considering the interaction of source-network-load-storage under different penetration rate of PV[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 74-84.
- [3] 李鹏, 王成山, 黄碧斌, 等. 分布式发电微网系统暂态时域仿真方法研究——(一)基本框架与仿真算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 33-39. LI Peng, WANG Chengshan, HUANG Bibin, et al. Methodology of transient simulation in time domain for DG and microgrid (1): basic framework and algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 33-39.
- [4] 严欢, 胡俊杰, 黄旦莉, 等. 考虑电动汽车虚拟电厂灵活性和高比例光伏接入的配电网规划[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 14-23. YAN Huan, HU Junjie, HUANG Danli, et al. Distribution network planning considering the flexibility of EV virtual power plants and high penetration of PV[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 14-23.
- [5] 梅哲, 詹红霞, 杨孝华, 等. 考虑电流保护的配电网电动汽车与分布式能源配合优化运行策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 89-102, 181. MEI Zhe, ZHAN Hongxia, YANG Xiaohua, et al. Optimal operating strategy of distribution network based on coordination of electric vehicle and distributed energy resource considering current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 89-102, 181.
- [6] 胡福年, 徐伟成, 陈军. 计及电动汽车充电负荷的风电-光伏-光热联合系统协调调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 10-20. HU Funian, XU Weicheng, CHEN Jun. Coordinated scheduling of wind power photovoltaic solar thermal combined system considering electric vehicle charging load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 10-20.
- [7] 丁阳, 汪飒, 宾峰, 等. 基于博弈论的多目标配电网重构[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 28-35. DING Yang, WANG Feng, BIN Feng, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on game theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 28-35.
- [8] 易海川, 张彼德, 王海颖, 等. 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1431-1436. YI Haichuan, ZHANG Bide, WANG Haiying, et al. Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1431-1436.
- [9] 郭腾云, 刘艳. 基于博弈方法的含分布式电源配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 28-34. GUO Tengyun, LIU Yan. Game theory based reconfiguration optimization for distribution network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 28-34.
- [10] AHMADI S A. Co-optimising distribution network adequacy and security by simultaneous utilisation of network reconfiguration and distributed energy resources[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2019, 13(20): 4747-4755.
- [11] WANG J, WANG W, YUAN Z, et al. A chaos disturbed beetle antennae search algorithm for a multiobjective distribution network reconfiguration considering the variation of load and DG[J]. IEEE Access, 2020, 8: 97392-97407.
- [12] 黄鸣宇, 张庆平, 张沈习, 等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 116-123. HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 116-123.
- [13] 刘路宁, 彭春华, 温泽之, 等. 基于配电网动态重构的分布式光伏消纳策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 56-62. LIU Luning, PENG Chunhua, WEN Zezhi, et al. Distributed photovoltaic consumption strategy based on dynamic reconfiguration of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 56-62.

- [14] 瞿合祚, 李晓明, 杨玲君, 等. 考虑负荷和分布式电源时变性的配电网多目标动态重构和 DG 调度[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 873-881.  
QU Hezuo, LI Xiaoming, YANG Lingjun, et al. Multi-objective distribution network dynamic reconfiguration and DG control considering time variation of load and DG[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 873-881.
- [15] 沈国辉, 陈光, 赵宇, 等. 基于双目标分层优化和 TOPSIS 排序的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 115-123.  
SHEN Guohui, CHEN Guang, ZHAO Yu, et al. Orderly charging optimization strategy of an electric vehicle based on double objective hierarchical optimization and TOPSIS ranking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 115-123.
- [16] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 价格与激励联合需求响应下电动汽车长时间尺度充放电调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 46-55.  
HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Long-time-scale charging and discharging scheduling of electric vehicles under joint price and incentive demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 46-55.
- [17] CAO W, WU J, JENKINS N, et al. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 165: 36-47.
- [18] 王莹, 肖峻, 曹严. 柔性配电网间歇性分布式发电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 74-83.  
WANG Ying, XIAO Jun, CAO Yan. Analysis on accommodation capability of intermittent distributed generation in flexible distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 74-83.
- [19] 王灿, 吴耀文, 孙建军, 等. 基于柔性多状态开关的主动配电网双层负荷均衡方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 77-85.  
WANG Can, WU Yaowen, SUN Jianjun, et al. Bi-layer load balancing method in active distribution network based on flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 77-85.
- [20] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [21] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.
- [22] 肖浩, 裴玮, 董佐民, 等. 基于元模型全局最优化方法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5751-5762, 5931.  
XIAO Hao, PEI Wei, DONG Zuomin, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generation using metamodel-based global optimization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5751-5762, 5931.
- [23] GAO H, WANG L, LIU J, et al. Integrated day-ahead scheduling considering active management in future smart distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6049-6061.
- [24] 李培强, 李欣然, 陈辉华, 等. 基于模糊聚类的电力负荷特性的分类与综合[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 73-78.  
LI Peiqiang, LI Xinran, CHEN Huihua, et al. The characteristics classification and synthesis of power load based on fuzzy clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 73-78.
- [25] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮, 等. 电动汽车参与运行备用的能力评估及其仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 101-107, 168.  
WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang, et al. Evaluation and simulation analysis of reserve capability for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 101-107, 168.
- [26] 姚恩建, 卢沐阳, 刘宇环, 等. 考虑充电约束的电动公交区域行车计划编制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 68-73.  
YAO Enjian, LU Muyang, LIU Yuhuan, et al. Electric bus area driving plan preparation considering charging constraints[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(9): 68-73.
- [27] 王子晗, 高红均, 高艺文, 等. 基于深度强化学习的城市配电网多级动态重构优化运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 60-70.  
WANG Zihan, GAO Hongjun, GAO Yiwen, et al. Multi-level dynamic reconfiguration and operation optimization method for an urban distribution network based on deep reinforcement learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 60-70.
- [28] 马望, 高红均, 杨艳红, 等. 融入重构级别快速识别的配电网两阶段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5154-5169.  
MA Wang, GAO Hongjun, YANG Yanhong, et al. Two stage optimal operation for distribution network based on fast identification of reconfiguration level[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5154-5169.

收稿日期: 2023-02-10; 修回日期: 2023-05-12

作者简介:

石 铖(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化、能源互联网等; E-mail: 1328964565@qq.com

安 锐(2002—), 男, 本科, 研究方向为配电网优化、能源互联网等; E-mail: 728856522@qq.com

高红均(1989—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为配电网规划运行、综合能源系统优化与市场交易等。E-mail: gaohongjun@scu.edu.cn

(编辑 魏小丽)