

# 考虑电动汽车接入的主动配电网优化调度

诸晓骏, 陈曦, 李妍, 王球, 王琼, 李泽森

(国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008)

**摘要:**主动配电网(ADN)中可再生能源与电动汽车的大量接入给当前配电网的规划、建设、调度和运行带来了诸多挑战。文中研究和设计综合考虑源、网、荷侧不确定因素的ADN优化调度方法,对实际配电网运行具有重要指导意义。首先建立ADN综合评估体系,分别从主动控制性、主动管理性和主动经济性三方面衡量ADN的优化调度水平。而后,依据综合评估体系,提出考虑电动汽车智能调度系统的多阶段优化方法,该方法不仅可平抑间断性电源和电动汽车接入电网引起的波动,还可实现当前配电网结构和资源的优化调度。因此,所提方法可被广泛运用于电力系统日前调度,实现ADN的高效运行和管理。

**关键词:**主动配电网(ADN);电动汽车有序充电;配电网综合评估体系;分布式电源(DG);源网荷调度

**中图分类号:**TM711

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2021)03-0141-07

## 0 引言

当今世界的能源政策和环境状况受到普遍关注,风能、太阳能等一系列可再生能源迅速发展<sup>[1-4]</sup>。分布式能源的大量接入给电力系统的稳定性和安全性带来了较大挑战,大规模无序接入的电动汽车负荷更是加剧了配电网的峰谷差,导致负荷高峰时期电能质量降低<sup>[5-7]</sup>。主动配电网(active distribution networks, ADN)可通过智能网络控制手段对分布式电源(distributed generation, DG)和负荷进行主动控制和管理,其调度和运行方式较传统配电网更加复杂<sup>[8]</sup>,近年来也愈加受到重视。

针对上述背景,研究电动汽车接入ADN的有序充电模型并形成与之适应的考虑源网荷的ADN优化调度方法至关重要。目前关于这方面的研究仍然较少,大部分研究成果集中在从ADN的单个角度(如源、网或荷侧)进行优化。文献[9]提供了基于风能和太阳能互补特性的ADN调度模型框架,通过协调控制风能和太阳能的输出,有效降低风能和太阳能的波动性。文献[10]中,通过储能的容量配置和优化降低了风能和太阳能的波动性,此方法是针对源侧的调度优化。关于网侧调度优化的研究可参见文献[11-15],其中文献[11-13]采用人工智能算法实现网络重构,提升了配电网的综合效益,文献[14-15]研究了故障恢复技术对配电网重构的影响。对于荷侧,文献[16]提出了一种基于分时电价模型的荷侧调度方法。

此外,当前的研究很少将电动汽车充电行为和电网多维调度进行协同优化。文献[17]对由电动

汽车无序充电行为导致的电力传输损耗进行了量化分析,研究表明大量随机电动汽车充电负荷的接入对电能质量影响显著。文献[18]指出有序电动汽车充电策略对提升传输线路的负载情况大有裨益。文献[19]表明电动汽车的充放电行为可以通过能量管理策略进行有序化管理,从而减少化石燃料的消耗,提高电力传输网络的稳定性。

为进一步研究大量电动汽车接入背景下的AND优化,文中构建了一套衡量ADN性能的综合评估体系,并提出一种电动汽车智能充电策略和一套源网荷侧多阶段优化调度方法,最后通过算例仿真验证了优化模型和调度策略的有效性。文中理论和模型可被广泛运用于电力系统的日前调度,实现ADN的高效运行和管理。

## 1 AND评估体系

文中综合考虑主动控制性、主动管理性和主动经济性,建立ADN评估体系,衡量电力系统运行的安全性、经济性和环境成本等多个指标。

### 1.1 主动控制性

主动控制性反映了调度运行方法对电力系统稳定性和安全性方面的影响,该效益可以通过电压合格率 $U(t)$ 、主要线路负载率 $L(t)$ 、网络重构频率 $\pi_{\text{switch}}$ 来表示。 $U(t)$ 体现了控制手段的有效性; $L(t)$ 反映了区域电网线路传输容量的实际使用程度和区域电网的建设水平; $\pi_{\text{switch}}$ 是衡量网络重构合理性的重要参数,其可折算成调度成本进行表征。

### 1.2 主动管理性

文中将电动汽车有序充电调度以及切负荷操作纳入主动管理性的优化范畴,并基于此提出以下

3项基本指标。

### 1.2.1 电动汽车用户满意度

合适的电动汽车充电策略会引导用户调整充电时间,降低充电成本,也可以优化控制每辆电动汽车的充电电量,进而影响用户满意度。文中用区域电网内电动汽车平均充电费用  $C_{avg}$  和电动汽车平均满充率  $E_{full}$  反映用户满意度。

### 1.2.2 等效负荷曲线标准差

在有序充电模式下,电动汽车的充电优化调度管理可以更好地实现削峰填谷,文中采用等效负荷曲线标准差  $S_c$  量化有序充电策略对 ADN 中负荷曲线优化管理的有效性。

### 1.2.3 可中断负荷补偿成本

在与用户签订供电协议后,电力公司可以在系统过载时切断部分协议内的负荷,同时按照合同约定的价格为用户提供切负荷补偿  $\Pi_{ll}(t)$ 。

## 1.3 主动经济性

随着环境保护意识日渐增强,环境效益在电网规划中占有越来越重要的地位,文中提出3个动态经济指标。

### 1.3.1 网损费用

网损费用  $\pi_{loss}$  不仅反映了电网结构的合理性,也反映了电网运行的经济性。

### 1.3.2 新能源接入费用

文中考虑的新能源接入费用  $\Pi_{source}$  包含风能、太阳能、微型燃气轮机的接入电网费用,也包含了从上级电网购电的费用。

### 1.3.3 环境污染惩罚费用

文中选择了二氧化碳( $CO_2$ )和二氧化硫( $SO_2$ )作为2种典型污染物,将环境污染作为惩罚进行了经济性折算,得到环境污染惩罚费用  $\Pi_{penalty}$ 。

## 2 ADN 三阶段优化调度模型

为了抑制和补偿源侧间歇性能源和荷侧电动汽车大规模接入给电网带来的波动,文中建立了源-网-荷三阶段协同优化调度模型,该模型的优化方向和优化目标均以第1章评估体系涵盖的指标为基础,具体对应关系见图1,其中  $K$  为开关动作次数。

### 2.1 电动汽车有序充电调度

该阶段是以电动汽车负荷为主的荷侧调度,调度目标为 ADN 评估体系中的主动管理性相关指标,助力充电负荷移峰填谷。随着信息通信技术的快速发展,电动汽车智能调度系统可以为电动汽车充电搭建有力的网络化支撑平台。典型电动汽车智能调度模型如图2所示。

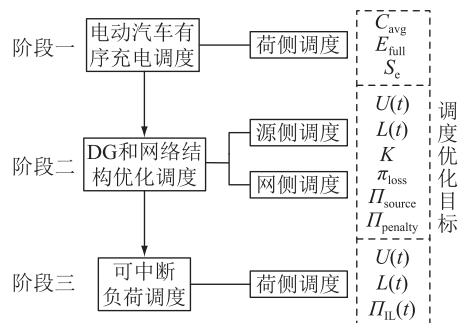


图1 ADN 三阶段优化调度模型

Fig.1 Three-stage optimization scheduling model of ADN

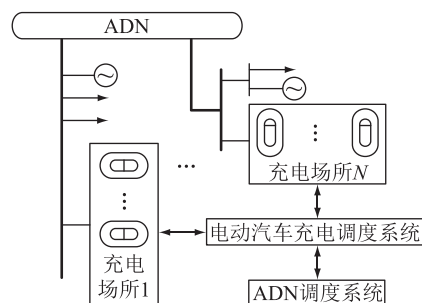


图2 典型电动汽车智能调度模型

Fig.2 Typical intelligent scheduling model of electric vehicles

当用户选择电动汽车充电调度系统时,用户会对峰谷电价进行充电行为响应。此外,在充电调度系统的策略下,电动汽车充电地点也得到优化,不仅可提高充电效率,还可提升电动汽车用户的满意度。文中综合充电时间、充电地点以及充电方式等因素,提出电动汽车充电调度模型。

### 2.1.1 充电时间优化

无序充电模式下,用户一旦到了充电站就会对电动汽车充电。而在电动汽车智能调度系统下,用户可以在充电桩处输入到达充电场所时间、预计离开充电场所时间以及预期充电量。然后,电动汽车智能调度系统依据停车期间的峰谷电价制定电动汽车优化充电策略。

假设电动汽车的到达时间和预计离开时间分别为  $t_{arr}, t_{dep}$ , 对应的电动汽车电量状态分别为  $W_1, W_2$ , 则预计的停车时间为:

$$T_p = t_{dep} - t_{arr} \quad (1)$$

预计的充电量为:

$$W_{ch} = W_2 - W_1 \quad (2)$$

完全充满电所需时间为:

$$T_r = W_{ch} / P_{ch} \quad (3)$$

式中:  $P_{ch}$  为电动汽车充电功率。

在停车期间,电动汽车充电调度系统可以尽量

确保用户在最低电价时最早充上电。这样不仅可以削峰填谷,还可以提高电动汽车用户的满意度。充电的实际开始时间  $t_{ch}$  和充电成本  $p$  分别如式(4)、式(5)所示。

$$t_{ch} = \begin{cases} t_{arr} & T_r \geq T_p \\ \min \Omega & T_r < T_p \end{cases} \quad (4)$$

$$p = \min \sum_{t=t_s}^{t_s+t_{dep}-t_{ch}} (P_{ch} \pi_t^{EV} \Delta t) \quad t_s \in \Omega \quad (5)$$

式中:  $\Omega$  为最低充电电价起始时刻的集合;  $\pi_t^{EV}$  为时段  $\Delta t$  的电动汽车充电价格;  $t_s$  为模拟充电开始时间。

### 2.1.2 充电地点优化

无序充电模式下,当现有充电站的所有充电桩均被占用时,用户不得不等待较长时间才能有充电机会。而电动汽车充电调度系统可考虑对充电地点进行优化,用户可以根据指示导航到最近的有闲置充电桩的充电站进行充电。

$$q = \begin{cases} (j | j \in B_i) & i \in A_i \\ i & i \in B_i \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $q$  为  $t$  时刻电动汽车充电调度系统提供的充电地址代码;  $A_i$ ,  $B_i$  分别为  $t$  时刻不可用、可用充电站的集合。

### 2.1.3 充电方式优化

电动汽车慢充方式对电动汽车的电池比较有利,但其通常会耗费较长时间(一般为 6~8 h)才能完全充满电。同时,充电站的慢速充电桩被长时间占用也会导致后到达的电动汽车无法充电。而快充方式充电速度快,可以满足日益增加的电动汽车用户需求,但不可避免地会影响电池寿命。

文中提出一种综合充电方式,以快充为主,慢充为辅,并作了如下假设:当电动汽车用户在白天很早就到达办公地区附近的充电站时,其倾向于选择快充方式;当电动汽车用户在夜间停放在居住地区附近的充电站时,倾向于选择慢充方式。

## 2.2 DG 和网络结构调度

该阶段综合考虑光伏、风电的荷侧调度和配电网结构的网侧调度,调度目标为 ADN 评估体系中的主动控制性和主动经济性相关指标,旨在满足电网调度的安全性和经济性,并提高新能源消纳能力。通过引入权重系数及纳入惩罚函数,将多目标函数转化成单目标函数。主目标函数为:

$$\begin{cases} \min M(t) \\ M(t) = \omega_1 \Pi_{switch}(t) + \omega_2 \Pi_{loss}(t) + \\ \omega_3 \Pi_{source}(t) + \omega_4 \Pi_{penalty}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$  分别为开关操作成本系数、系统网损成本系数、新能源接入费用系数、环境惩罚

系数。

惩罚函数为:

$$P(t) = p_1 [1 - U(t)] + p_2 l(t) \quad (8)$$

$$l(t) = \begin{cases} 0 & L(t) \leq L_0 \\ L(t) - L_0 & L(t) > L_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $p_1$  为电压不合格率惩罚系数;  $p_2$  为与主线路负载率相关的惩罚系数;  $L_0$  为主线路最大可接受负载率;  $l(t)$  为  $t$  时刻主要线路过载水平。

因此,本阶段的优化目标为:

$$\min [M(t) + P(t)] \quad (10)$$

优化过程中,需要满足电力系统中的潮流约束、节点电压限值约束、线路最大传输容量约束和电源容量约束。此外,还必须满足整个配电网中的连通约束和辐射约束等。文中在迭代优化过程中使用了遗传算法进行优化,并采用根节点融合法对网络结构进行了修复和完善,实现网络结构的迭代优化。

### 2.3 可中断负荷调度

该阶段是以切负荷为主的荷侧调度,调度目标为 ADN 评估体系中的主动管理性、主动控制性和主动经济性相关指标,旨在保证电网的安全稳定运行。当前述 2 个阶段的优化方法仍不能有效处理系统运行中某时刻的低电压、线路过载等问题时,需采用该阶段的调度优化方法。

该阶段的优化包含两部分:削减电动汽车负荷;削减可中断负荷。在电动汽车充电桩接收到电动汽车充电调度系统的指令后,将会临时关停部分充电桩,并在收到重启指令前一直保持断电状态。

在削减电动汽车负荷后,如果电网运行水平仍不能满足要求,可中断负荷则会参与调度。该阶段的优化目标为:

$$\min \{p_{shed} P_{shed}(t) + p_1 [1 - U(t)] + p_2 l(t)\} \quad (11)$$

式中:  $p_{shed}$  为切负荷的补偿成本系数;  $P_{shed}(t)$  为  $t$  时刻的切负荷量。

$$P_{shed,i}(t) \leq \eta P_i(t) \quad (12)$$

式中:  $P_{shed,i}(t)$  为  $t$  时刻节点  $i$  的负荷量;  $P_i(t)$  为  $t$  时刻节点  $i$  的负荷;  $\eta$  为电力公司和用户共同约定的切负荷系数。

该阶段优化需满足潮流、电压等多种约束,和 DG 和网络结构优化调度阶段相同,文中采用遗传算法进行求解。

## 3 案例分析

为验证所提方法的有效性,采用如图 3 所示的

IEEE 33 节点系统进行算例仿真。

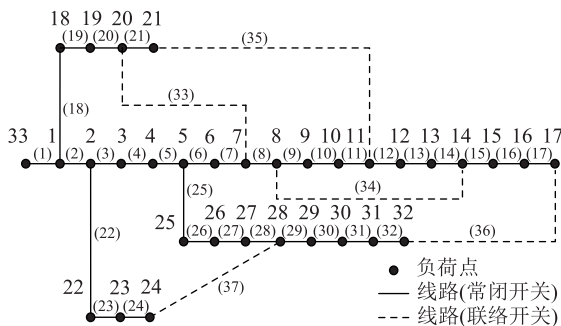


图 3 IEEE 33 节点网络拓扑  
Fig.3 Topology of IEEE 33-bus test system

假设居民负荷分别位于节点 22, 23, 24, 28, 29, 30, 31, 32, 商用负荷则分布在其余节点, (1) — (37) 为开关编号。当前区域内共配置 20 座电动汽车充电站, 每个充电站配置 35 个充电桩。电动汽车共 500 辆, 每辆电动汽车的电池容量为 32 kW·h。慢充和快充方式下的充电功率分别设为 3.2 kW, 15 kW。此外, 2 座风电场分别接在节点 17, 21, 2 座太阳能充电站则分别接在节点 3, 24。

### 3.1 电动汽车有序充电调度结果

对典型日 20 座电动汽车充电站的充电状态进行模拟。不同充电模式下的电动汽车满充率如表 1 所示。C0, C1, C2, C3 分别表示无序充电模型、时间-有序充电模型(考虑充电时间优化的有序充电模型)、时间-地点有序充电模型(考虑充电时间和充电地点优化的有序充电模型)和时间-地点-方式有序充电模型(同时考虑充电时间、充电地点优化和充电方式的有序充电模型)。

表 1 不同充电模式下的满充率  
Table 1 The fully-charged ratio in different charging modes %

充电模式	离开工作场所的满充率	离开居民区的满充率
C0	64.87	96.45
C1	63.19	82.00
C2	65.20	82.38
C3	96.38	99.10

由表 1 可知, C1 模式中的满充率比 C0 模式小, 这与用户对充电价格的响应机制有关。由于对较低充电价格的倾向性, 同一充电站的用户很可能在某个时间段内集中充电, 因此早到的用户提前占用了充电桩, 进一步降低了满充率。为解决这一问题, 在电动汽车智能调度系统中, 引入充电地点和充电方式的优化, 满充率显著提高, 见 C2, C3 模式。

在电动汽车智能调度系统中, 比较不同的充电

时间、充电位置和充电方式带来的影响, 如图 4 所示, 20 种颜色的曲线代表 20 个充电站分别对应的充电汽车数量。

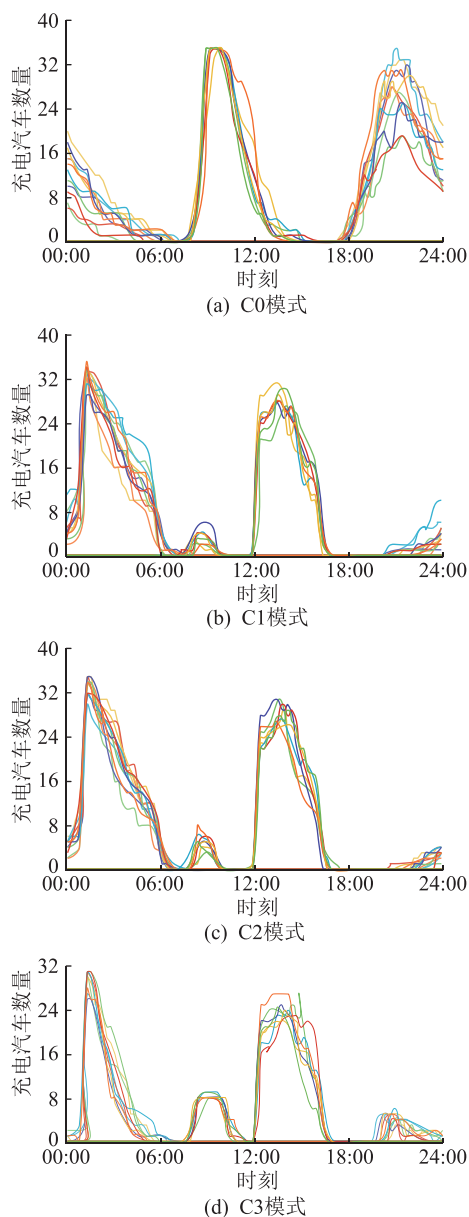


图 4 不同充电模式下的电动汽车充电站状态

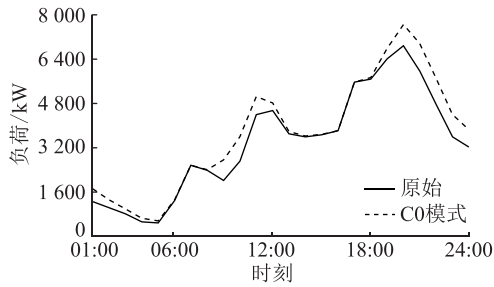
Fig.4 The status of electric vehicle charging stations in different charging scheduling modes

由图 4 可知, 当充电模式为 C1, C2, C3 时, 电动汽车充电时间段较为分散, 与 C0 模式明显不同。表明当前的调度方法可以分散用户的充电时段, 显著减缓电动汽车充电的拥挤问题, 也说明电动汽车智能调度系统可为充电站建设提供指导意见。

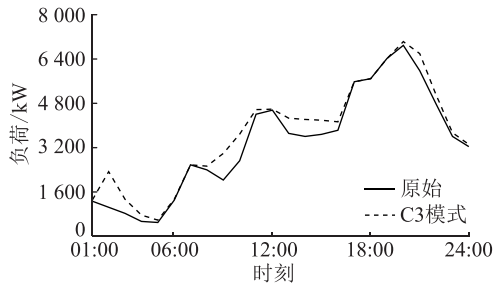
此外, 文中就电动汽车智能调度系统对日负荷曲线的影响进行分析, 如图 5 所示。由图 5 可知, 引入电动汽车智能调度系统后, 充电时段可有效分散, 起到了削峰填谷作用。

根据指标结果计算, 在引入电动汽车优化调度





(a) 原始负荷和C0模式下的总负荷



(b) 原始负荷和C3模式下的总负荷

图5 不同充电模式下的等效日负荷对比

Fig.5 The comparison of daily load under different electric vehicle charging modes

系统后,电动汽车充电成本降低,满充率提高,用户满意度明显上升。同样,曲线标准偏差减小,曲线变得更加平滑。

### 3.2 DG和网络结构调度结果

该调度阶段的总负荷为经过电动汽车有序充电调度阶段优化后的负荷。假设3个微型燃气轮机分别接在节点12,23,31,(1)~(32)为常规开关,(33)~(37)为联络开关。开关状态、微型燃气轮机输出功率以及阶段二调度前后的 $U(t)$ 分别如表2、图6和图7所示。

表2 开关和网络重构状态

Table 2 The Status of switch and network reconfiguration

时段	闭合的开关编号	是否网络重构
01:00—11:00	(33)—(37)	否
11:00—14:00	(7),(14),(28),(35),(36)	是
14:00—16:00	(7),(14),(28),(35),(36)	是
16:00—17:00	(7),(14),(28),(35),(36)	是
17:00—20:00	(7),(10),(14),(27),(36)	是
20:00—23:00	(7),(10),(13),(27),(36)	是
23:00—01:00	(7),(10),(13),(27),(36)	是

由表2可知,3次网络重构分别发生在11:00,17:00,20:00。由图6可知,微型燃气轮机在10:00,14:00—21:00启动,优化了ADN的运行。由图7可知,除了20:00,21:00的 $U(t)$ 不达标外,其余时刻的 $U(t)$ 在DG和网络结构调度阶段优化后达到了100%,ADN评估体系中几乎所有指标参数(除了

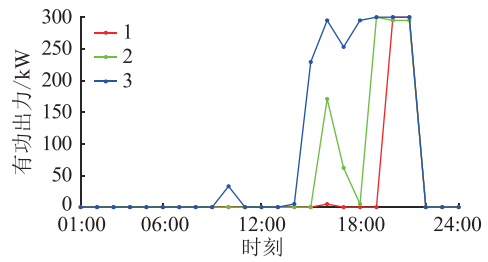
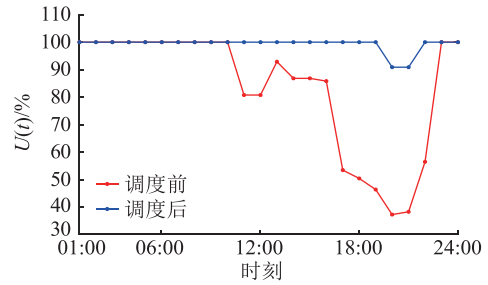


图6 微型燃气轮机输出功率

Fig.6 Outputs of microturbines

图7 DG和网络结构调度阶段前后的 $U(t)$ Fig.7  $U(t)$  before and after DG and network structure scheduling stage

开关动作成本)均得到提升。

### 3.3 可中断负荷调度结果

在前述两阶段的优化调度后,20:00,21:00的 $U(t)$ 未达到100%。因此,采用了第三阶段的可中断负荷调度。假设优先进行电动汽车切负荷操作。在20:00和21:00闭锁充电桩后,虽然总负荷有所减少,但 $U(t)$ 仍未达到100%。因此继续执行可中断负荷调度操作,20:00和21:00切除的负荷分别为269.82 kW,440.71 kW,此操作后 $U(t)$ 从90.91%提高至100%。

### 3.4 ADN调度结果评估

根据文中所提建模和分析方法,多阶段调度优化后的最终结果见表3。

表3 ADN多阶段调度优化结果

Table 3 ADN multi-stage scheduling optimization results

性能	指标	数值	
		调度前	调度后
主动控制性	$U(t)/(\% \cdot d^{-1})$	81.99	100
	$L(t)/(\% \cdot d^{-1})$	41.65	37.31
	$\pi_{\text{switch}}/(\text{次} \cdot d^{-1})$	0	12
主动管理性	$E_{\text{full}}/[\% \cdot (\text{辆} \cdot d)^{-1}]$	80.46	94.14
	$C_{\text{avg}}/[\text{元} \cdot (\text{辆} \cdot d)^{-1}]$	25.04	14.99
	$S_e$	2 005.16	1 772.46
主动经济性	$\Pi_{\text{ll}}(t)/(\text{元} \cdot d^{-1})$	0	981.47
	$\pi_{\text{loss}}/(\text{元} \cdot d^{-1})$	3 308.79	2 116.84
	$\Pi_{\text{source}}/(\text{元} \cdot d^{-1})$	44 772.57	43 796.32
	$\Pi_{\text{penalty}}/(\text{元} \cdot d^{-1})$	1 692.41	1 605.80

由表 3 可知,在主动控制性上, $U(t)$  从 81.99 %/d 提高至 100%/d; $L(t)$  在通过网络重构、可中断负荷优化后,从 41.65%/d 降低至 37.31%/d。在主动管理性方面,电动汽车用户满意度水平提升;等效日负荷曲线在电动汽车优化调度系统和切负荷的操作下,变得更加平滑。同时,经济成本显著降低,主动经济性得到提升。 $\pi_{loss}$  从 3 308.79 元/d 减少至 2 116.84 元/d; $\Pi_{source}$  从 44 772.57 元/d 降低至 43 796.32 元/d; $\Pi_{penalty}$  从 1 692.41 元/d 降低至 1 605.80 元/d。

#### 4 结论

文中提出了一种计及电动汽车智能充电策略的 ADN 多阶段优化调度模型。首先,从主动控制性、主动管理性和主动经济性角度出发,建立了 ADN 的综合评估体系。其次,综合电动汽车智能充电策略、DG 优化、网络重构以及切负荷等手段,以 ADN 性能评价体系为优化方向,构建了 ADN 的三阶段优化调度模型。最后,对该多阶段优化调度模型进行了仿真,并分析了该模型对 ADN 优化调度的有效性。文中研究表明:

(1) 电动汽车智能调度系统对于电动汽车用户满意度的提升有明显的促进作用。同时,在高比例间歇性能源接入电网的场景下,该系统能够有效削峰填谷。

(2) 构建的 ADN 性能评估指标涉及主动控制性、主动管理性和主动经济性,可用作 ADN 性能的量化评估。

(3) 在 ADN 的性能评估体系基础上搭建的多阶段优化调度模型,可用于指导当前 ADN 源、网、负荷侧的规划、调度和运行。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019054)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

[1] JOO J Y, RAGHAVAN S, SUN Z Y. Integration of sustainable manufacturing systems into smart grids with high penetration of renewable energy resources[C]//2016 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech). IEEE, 2016: 12-17.

[2] 倪凯旋. 基于分布式博弈的电动汽车充电站最优调度方法[J]. 供用电, 2020, 37(2): 79-84.

NI Kaixuan. Optimal scheduling of electric vehicle charging station based on distributed game[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(2): 79-84.

[3] SHI Q X, HU H T, XU W, et al. Low-order harmonic characteristics of photovoltaic inverters[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 26(2): 347-364.

[4] 王建明, 潘志新, 李春, 等. 配电网电动汽车接纳能力分析

[J]. 供用电, 2019, 36(5): 42-47.

WANG Jianming, PAN Zhixin, LI Chun, et al. Distribution network electric vehicle hosting capability assessment[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5): 42-47.

[5] DOROSTKAR-GHAMSARI M R, FOTUHI-FIRUZABAD M, LEHTONEN M, et al. Value of distribution network reconfiguration in presence of renewable energy resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1879-1888.

[6] 冷祥彪, 孙成龙, 袁太平, 等. 电动汽车有序充电的控制与关键问题综述[J]. 广东电力, 2020, 33(11): 34-43.

LENG Xiangbiao, SUN Chenglong, YUAN Taiping, et al. Review on control strategies and key problems of coordinated charging and discharging of electric vehicles[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 33(11): 34-43.

[7] 吴育胜, 薛斐, 石进永, 等. 满足电动汽车快慢同步充电需求的有序充电策略[J]. 广东电力, 2020, 33(10): 75-83.

WU Yusheng, XUE Fei, SHI Jinyong, et al. Strategy of orderly charging to meet the demand of synchronous charging of electric vehicles[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 33(10): 75-83.

[8] GAO P, CHEN H K, ZHENG X, et al. Framework planning of active distribution network considering active management[J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 2093-2097.

[9] WANG N B. The key technology of the control system of wind farm and photovoltaic power plant cluster[C]//2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China. IEEE, 2014: 2833-2839.

[10] LI X J, HUI D, LAI X K. Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 464-473.

[11] ATTEYA II, ASHOUR H, FAHMI N, et al. Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction using a modified particle swarm optimisation[J]. CIRED-Open Access Proceedings Journal, 2017, 2017(1): 2505-2508.

[12] SUN R J, ZHU H N, LIU Y T. A r-NSGA-II algorithm based generator start-up for network reconfiguration[C]//2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Changsha, China. IEEE, 2015: 1332-1335.

[13] 陈春, 汪汎, 刘蓓, 等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 55-60.

CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. Network reconfiguration based on basic ring matrix and improved harmony search algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 55-60.

[14] GU X, ZHONG H. Optimisation of network reconfiguration based on a two-layer unit-restarting framework for power system restoration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(7): 693-700.

[15] ZHANG C, LIN Z Z, WEN F S, et al. Two-stage power network reconfiguration strategy considering node importance and restored generation capacity[J]. IET Generation, Transmission &

- Distribution, 2014, 8(1):91-103.
- [16] MANOOCHEHRI H, FEREDUNIAN A. A multimarket approach to peak-shaving in smart grid using time-of-use prices [C]//2016 8th International Symposium on Telecommunications (IST). Tehran, Iran. IEEE, 2016:707-712.
- [17] CLEMENT-NYNS K, HAESSEN E, DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1):371-380.
- [18] TAYLOR J, MAITRA A, ALEXANDER M, et al. Evaluations of plug-in electric vehicle distribution system impacts[C]//IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN, USA. IEEE, 2010: 1-6.
- [19] MARTINEZ C M, HU X S, CAO D P, et al. Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: recent progress and a connected vehicles perspective[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6):4534-4549.

作者简介:



诸晓骏

诸晓骏(1990),女,硕士,工程师,从事配电网规划、储能电站设计、变电站设计等工作(E-mail:398083339@163.com);

陈曦(1988),男,硕士,工程师,从事配电网规划、综合能源规划设计工作;

李妍(1981),女,硕士,研究员级高级工程师,从事储能电站设计、变电站设计等工作。

## Optimal dispatching of active distribution network considering electric vehicle access

ZHU Xiaojun, CHEN Xi, LI Yan, WANG Qiu, WANG Qiong, LI Zesen

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The massive access of renewable energy and electric vehicles in the active distribution network (ADN) has brought many challenges to the planning, construction, dispatch and operation of the current distribution network. By comprehensively considering the uncertain factor like source, network and load side, the research and design of the ADN optimization dispatching method have important guiding significance for the actual operation of the distribution network. Firstly, an ADN comprehensive evaluation system is established to measure the optimal dispatch level of ADN from three aspects which are active controllability, active management and active economy. Then, based on the comprehensive evaluation system, a multi-stage optimization method considering the intelligent dispatching system of electric vehicles is proposed. This method only smoothes the fluctuations caused by intermittent power supply and electric vehicles connected to the grid, but also realizes the optimal dispatch of the current distribution network structure and resources. Therefore, the proposed method can be widely used in the day-ahead scheduling of power system to realize the efficient operation and management of ADN.

**Keywords:** active distribution network (ADN); orderly charging of electric vehicles; comprehensive evaluation system of distribution network; distributed generation (DG); source-network-demand scheduling

(编辑 吴楠)