

# 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

梅哲<sup>1</sup>,詹红霞<sup>1</sup>,杨孝华<sup>2</sup>,邓强<sup>1</sup>,张豪<sup>1</sup>,朱金龙<sup>1</sup>

(1. 西华大学 电气与电子信息学院,四川 成都 610039;2. 国网重庆云阳供电公司,重庆 404500)

**摘要:**为保证配电网原有保护的正确动作和减小电动汽车无序入网与分布式能源的波动给配电网带来的影响,提出了一种考虑电流保护的电动汽车与分布式能源配合优化运行策略。为提高求解效率,电动汽车采用了集群控制策略。在不修改原有保护配置的前提下,依据配电网负荷均方差与车主费用搭建了基于融合节点的日前优化运行模型。基于电流保护显性、隐性指标与电压指标,对配电网电动汽车最优入网规模进行了评估。在最优入网规模下,基于电动汽车与分布式能源的配合得到了配电网的最优运行工况,并通过状态空间实时模型对其进行修正,以更符合实际情况。算例分析表明,所提策略在保障车主利益的前提下,能保证优化周期内所有时刻电流保护的正确动作,电压水平也维持在允许范围;同时,其能平抑负荷波动,降低负荷水平和减小网损。

**关键词:**配电网;电动汽车;分布式能源;电流保护;集群控制;最优运行工况

**中图分类号:**TM 73;U 469.72

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202001020

## 0 引言

在全球能源紧张和政府政策驱动的双重作用下,电动汽车(EV)产业得以在近几年高速发展。随着电动汽车的大规模投入使用,其也会对电网的安全稳定运行造成冲击。为减小电动汽车无序入网对配电网的影响<sup>[1]</sup>,研究电动汽车有序充放电技术显得尤为重要。

基于电动汽车有序充放电技术,电动汽车不仅能削峰填谷<sup>[2]</sup>,减小网损<sup>[3]</sup>,还能与分布式能源配合,平抑其出力波动,共同为配电网的优化运行创造条件。国内外已有诸多关于电动汽车优化运行的研究,文献[4]提出了一种考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的平抑控制策略,算例分析表明该策略利用电动汽车的储能能力,能有效缓和联络线的功率波动,减小风电接入对电网的影响。文献[5]联合配电网中风电与电动汽车构成虚拟发电厂,结果表明该策略既能提高虚拟发电厂的效益,又可激励车主积极参与到虚拟发电厂的运营中。文献[6]提出了一种基于改进贪心算法的电动汽车充电行为优化策略,其算例分析表明该策略能够减小充电负荷对

配电网电能质量的影响。文献[7]提出了风电与电动汽车联合优化调度模型,以价格机制引导电动汽车入网,协调发电侧资源并消纳风电。

电动汽车对配电网的继电保护也会造成影响,目前对这方面的研究仍处在起步阶段。文献[8]表明随着电动汽车大规模入网,若仅仅提高Ⅲ段整定值以躲开最大负荷电流,会造成较长线路末端灵敏度大幅减小,保护可能无法动作,为解决此问题,提出了一种基于功率因数突变变量的保护方案。文献[9]分析了电动汽车在充、放电2种情形下,对配电网电流保护、距离保护及重合闸的影响,但并未给出明确的优化解决方案。

当前研究虽然都力求做到对含电动汽车与分布式能源的配电网更为有效的优化,但鲜有研究在优化中考虑配电网电流保护因素。另外,也鲜有考虑电动汽车的最优调度规模,即电动汽车以何种规模大小接入配电网并与分布式能源相配合,才能取得最大的优化效果。立足于这2点,在上述研究的基础上,本文提出了考虑配电网电流保护的电动汽车与分布式能源配合优化运行策略,在不修改原有保护配置的前提下,满足保护指标与电压指标不越限,搭建了基于融合节点的优化运行模型,对电动汽车最优入网规模进行了评估,同时也得到了最优规模下的配电网最优安全运行工况,并通过状态空间模型预测控制(MPC)实时模型对其进行修正,以更符合实际情况。

## 1 电动汽车与分布式能源入网对配电网电流保护的影响

传统配电网的保护方式主要是三段式电流保

收稿日期:2019-03-11;修回日期:2019-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877181);四川省教育厅资助项目(18ZB0566);四川省电力电子节能技术与装备重点实验室资助项目(szjj2016-047)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877181),the Program of Education Department of Sichuan Province(18ZB0566) and the Program of Sichuan Province Key Laboratory of Power Electronics Energy-saving Technologies & Equipment(szjj2016-047)

护,本文主要考虑的是Ⅰ段无时限电流速断保护和Ⅲ段定时限过电流保护。随着大量电动汽车集聚充电,会导致节点负荷的急剧增加,这对于电流保护而言是一个不利因素<sup>[8]</sup>。当充电电流过大时,电压会出现严重偏移,可能造成保护的误动和故障状态下的拒动<sup>[10]</sup>。同时,分布式能源会使得配电网由单源的辐射网络变为复杂的多源网络,当配电网发生故障时,也可能对保护的正确动作产生影响。

### 1.1 显性影响

所谓显性影响,指的是配电网正常运行时,电动汽车接入对配电网电流保护的影响。当电动汽车聚集充电时,会导致充电有功功率增加,进而线路上流过的电流也会增大。电流Ⅲ段保护启动电流是按躲开最大负荷电流来整定的,随着越来越多的电动汽车接入充电,配电网正常运行时,线路上电流值就有可能超过Ⅲ段保护整定值,使得保护误动。

### 1.2 隐性影响

所谓隐性影响,指的是配电网发生故障时,电动汽车与分布式能源接入对于配电网电流保护的影响。由于大部分情况下配电网都是正常运行的,发生故障的情况比较少,考虑此种影响是防患于未然,但为了杜绝潜在危险必须对其考虑,因此称之为隐性影响。隐性影响又分为2种情况:一是电动汽车放电,与分布式能源一起接入,电动汽车放电可以将其当作逆变型分布式电源处理,因此对于配电网而言,都是电源接入;二是电动汽车充电,与分布式能源一起接入。

先分析单点接入的情况。当电动汽车放电,作为电源,与分布式能源接入时对配电网的电流保护影响分析一致。接入点上游或者相邻线路发生故障,接入点上游非故障线路保护的反向电流可能会使其Ⅰ段保护误动(如附录A中图A1所示,点 $f_1$ 短路,CB<sub>2</sub>可能误动;点 $f_4$ 短路,CB<sub>1</sub>、CB<sub>2</sub>可能误动)。接入点下游发生故障时,分布式能源接入点上游监测到的短路电流会被削弱,下游的电流会被助增<sup>[11]</sup>,因此对接入点上游保护的削弱作用可能会使其Ⅲ段保护拒动,对接入点下游保护的助增作用可能会使接入点下游非故障线路的Ⅰ段保护误动(如附录A中图A1所示,点 $f_2$ 短路,CB<sub>2</sub>的Ⅲ段可能拒动;点 $f_3$ 短路,CB<sub>3</sub>的Ⅰ段可能误动)。电动汽车充电对线路有分流作用<sup>[9]</sup>,因此,当接入点下游发生故障时,接入点下游保护可能拒动;当接入点相邻线路发生故障时,相邻线路保护也可能拒动(如附录中A图A2所示,点 $f_1$ 短路,CB<sub>2</sub>可能拒动;点 $f_2$ 短路,CB<sub>3</sub>可能拒动)。同时,由于电动汽车聚集充电,使得接入点上游保护监测到的短路电流增大,接入点下游发生故障时,上游非故障线路保护可能误动(如附录A中图A2所示,点 $f_1$ 短路,CB<sub>1</sub>可能误动)。当配电网中有多个

点接入电动汽车和分布式能源时,分析方法类似。

由上述分析可知,电动汽车充放电与分布式能源接入会对配电网的电流保护产生不利影响。为此,本文提出了相应策略,将正确动作的电流保护条件作为约束考虑到优化模型当中,以保障配电网的安全可靠运行。

## 2 基于融合节点的日前优化运行模型

基于融合节点的日前优化运行模型基于电动汽车与分布式能源配合,在满足保护正确动作与电压不越限的前提下,对电动汽车最优入网规模进行评估,得到最优规模下的配电网最优安全运行工况。车主的积极参与是该策略实现的关键,因此要保障车主的利益;配电网优化的最终目的是在满足安全运行条件下稳定地分配电能,因此负荷均方差得到控制也是目标之一。

### 2.1 集群控制策略

若对单辆电动汽车进行充放电管理来实现本文所提模型的优化,将面临巨大的维数灾问题,使得求解困难甚至无解。为此,将电动汽车分群,以实现集群控制策略<sup>[12]</sup>。以电动汽车的开始充电时刻(物理接入充电桩时间,与电网电能交互时间以具体的充放电策略为准)和充电时间(充电至车主期望电量所需要的时间)为划分依据,将开始充电时刻接近且充电时间也接近的电动汽车划分为同一子群,从而对同一子群采用相同的充放电管理策略。

### 2.2 融合节点架构

该模型的目标,即车主费用与配电网负荷均方差均是在系统宏观层面上考虑的。对于电流保护的考虑则涉及配电网具体的网络拓扑结构。一系列约束既有宏观层面的,也有涉及具体结构的。电动汽车子群的充放电管理也是基于2个层面的。

基于上述分析,为将配电网系统宏观结构与具体网络拓扑结构联系起来,设计了融合节点架构。所谓融合节点架构,指的是所有信息均融入节点,将节点作为承载模型信息的单元,以节点的形式来对所建模型进行表达。

### 2.3 目标函数

(1)以配电系统的负荷均方差最小为目标,力求配电网中电动汽车充放电计划与分布式能源出力配合,使得系统负荷波动趋于平缓。

为评估电动汽车调度规模,目标函数中引入电流保护显性指标、隐性指标与电压指标的罚函数。这3个指标值等于0时表示指标正常,不等于0时表示指标越限。

$$\min F_{\text{LSD}} = \sqrt{F_{\text{LVA}}} + \lambda_1 R_{\text{ar}}^{\text{IX}} + \lambda_2 R_{\text{ar}}^{\text{IY}} + \lambda_3 R_{\text{ar}}^{\text{U}} \quad (1)$$

$$F_{LVA} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{m=1}^{N_{no}} P_{load}(m, t) + \sum_{m=1}^{N_{NEV}} \sum_{g=1}^{N_{GP}} \sum_{i \in D_{m,g,t}} (P_{EVC}^{m,g}(i, t) \times \mu_{EVC}^{m,g}(i, t) - P_{EVD}^{m,g}(i, t) \mu_{EVD}^{m,g}(i, t)) - \sum_{m=1}^{N_{DER}} P_{DER}(m, t) - P_{ave} \right]^2 \quad (2)$$

$$P_{ave} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{m=1}^{N_{no}} P_{load}(m, t) + \sum_{m=1}^{N_{NEV}} \sum_{g=1}^{N_{GP}} \sum_{i \in D_{m,g,t}} (P_{EVC}^{m,g}(i, t) \times \mu_{EVC}^{m,g}(i, t) - P_{EVD}^{m,g}(i, t) \mu_{EVD}^{m,g}(i, t)) - \sum_{m=1}^{N_{DER}} P_{DER}(m, t) \right] \quad (3)$$

$$R_{ar}^{IX} = \left( \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_k} M_k(i, t) / N_k \right)^2 \quad (4)$$

$$R_{ar}^{IY} = \left[ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_k} L_k(i, t) (L_k(i, t) + M_k(i, t)) / (2N_k) \right]^2 \quad (5)$$

$$R_{ar}^U = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_{no}} \left( \frac{\Delta U_{m,t}}{U_{m,max} - U_{m,min}} \right)^2 \quad (6)$$

$$\Delta U_{m,t} = \begin{cases} U_{m,min} - U_{m,t} & U_{m,t} < U_{m,min} \\ 0 & U_{m,min} \leq U_{m,t} \leq U_{m,max} \\ U_{m,t} - U_{m,max} & U_{m,t} > U_{m,max} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $F_{LSD}$  为配电网负荷的均方差;  $F_{LVA}$  为配电网负荷方差;  $P_{ave}$  为配电网原有常规负荷、电动汽车充电功率和分布式能源机组出力的平均值;  $R_{ar}^{IX}$  为电流保护显性指标, 是配电网正常运行状态下的指标;  $R_{ar}^{IY}$  为电流保护隐性指标, 是配电网故障状态下的指标;  $R_{ar}^U$  为电压指标;  $\lambda_1 - \lambda_3$  分别为上述3个指标的罚函数惩罚系数;  $T$  为优化周期;  $N_{no}$  为配电网节点总数;  $N_{NEV}$  为电动汽车接入的节点总数;  $N_{GP}$  为电动汽车子群总数;  $D_{m,g,t}$  为  $t$  时刻接入节点  $m$ , 属于电动汽车子群  $g$  的电动汽车集合;  $N_{DER}$  为分布式能源接入的节点总数;  $P_{load}(m, t)$  为  $t$  时刻配电网节点  $m$  的原有有功负荷;  $P_{EVC}^{m,g}(i, t)$  为  $t$  时刻接入节点  $m$ , 属于子群  $g$  的电动汽车  $i$  的充电功率;  $\mu_{EVC}^{m,g}(i, t)$  为  $t$  时刻接入节点  $m$ , 属于子群  $g$  的电动汽车  $i$  的充电状态, 其值等于1时表示电动汽车处于充电状态, 等于0时表示未在充电状态;  $P_{EVD}^{m,g}(i, t)$  为  $t$  时刻接入节点  $m$ , 属于子群  $g$  的电动汽车  $i$  的放电功率;  $\mu_{EVD}^{m,g}(i, t)$  为  $t$  时刻接入节点  $m$ , 属于子群  $g$  的电动汽车  $i$  的放电状态, 其值等于1时表示电动汽车处于放电状态, 等于0时表示未在放电状态;  $P_{DER}(m, t)$  为  $t$  时刻节点  $m$  的分布式能源机组有功出力;  $N_k$  为配电网中电流保护装置数量;  $M_k(i, t)$  为  $t$  时刻保护设备  $i$  的状态, 其值等于1时表示动作, 等于0时表示不动作;  $L_k(i, t)$  为  $t$  时刻保护设备  $i$  动作判别量, 其值等于1时表示拒动或者误动,

等于0时表示正确动作;  $U_{m,t}$  为  $t$  时刻节点  $m$  的电压幅值;  $U_{m,max}$ 、 $U_{m,min}$  分别为节点  $m$  的电压幅值上、下限。

(2) 电动汽车车主费用最低。

电动汽车与电网的良性互动是本文所提优化策略得以实现的关键, 为了使车主积极参与互动, 则车主的利益务必要得到保障。

$$\min F_{EV} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_{NEV}} \sum_{g=1}^{N_{GP}} \sum_{i \in D_{m,g,t}} [C_{EVC}(i, t) P_{EVC}^{m,g}(i, t) \mu_{EVC}^{m,g}(i, t) + \lambda_{EV} (P_{EVC}^{m,g}(i, t) \mu_{EVC}^{m,g}(i, t) - P_{EVD}^{m,g}(i, t) \mu_{EVD}^{m,g}(i, t)) - C_{EVD}(i, t) P_{EVD}^{m,g}(i, t) \mu_{EVD}^{m,g}(i, t)] \Delta T \quad (8)$$

其中,  $F_{EV}$  为车主费用;  $C_{EVC}(i, t)$  为  $t$  时刻电动汽车  $i$  的单位充电电价;  $C_{EVD}(i, t)$  为  $t$  时刻电动汽车  $i$  的单位放电电价;  $\lambda_{EV}$  为电动汽车的电池损耗系数;  $\Delta T$  为优化步长。等式右侧第一项为车主充电费用; 第二项为电动汽车充放电对电池寿命造成的损失费用, 其中放电部分应由电网进行补偿; 第三项为车主向电网放电所得收益。

#### 2.4 约束条件

(1) 电流保护显性约束, 与上述显性指标相对应。正常运行状态下, 流过保护设备的电流应小于Ⅲ段保护整定值。

$$I_{CB}(i, t) < I_{op,CB}^{III}(i) \quad (9)$$

其中,  $I_{CB}(i, t)$  为  $t$  时刻保护  $i$  监测到的正常运行电流;  $I_{op,CB}^{III}(i)$  为保护  $i$  的Ⅲ段保护整定值。

(2) 电流保护隐性约束, 与上述隐性指标相对应。由1.2节隐性分析可知, 电动汽车与分布式能源接入会使发生故障时保护监测到的短路电流增大或者减少, 其与电动汽车是放电还是充电状态有关。因此对于隐性约束的制定, 要分电动汽车放电与充电2种情形考虑, 2种情形下的约束制定见附录B中图B1和图B2及相应的式(B1)~(B6)。由于拒动约束是针对故障线路本身的, 误动约束则是针对非故障线路的, 则整体保护约束原则如下: 本线路发生故障时, 对保护监测到的短路电流削弱作用不应使Ⅲ段保护拒动; 非本线路发生故障时, 对短路电流的助增或反向作用不应使Ⅰ段保护误动。因此, 可整合2种情形下的约束条件, 分为接入点相邻、下游与上游保护这3种情形的反向或助增约束和总的削弱约束, 分别如式(10)~(13)所示, 公式的详细说明可参阅附录B中图B3所示保护约束原理图及相应的约束公式。

$$I_{CB}^{af,RE}(j, t) < I_{op,CB}^I(j) \quad (10)$$

$$I_{CB}^{af,down}(j, t) < I_{op,CB}^I(j) \quad (11)$$

$$I_{CB}^{af,up}(j, t) < I_{op,CB}^I(j) \quad (12)$$

$$I_{CB}^{af(2)}(i, t) > I_{op,CB}^{III}(i) \quad (13)$$

其中,  $I_{CB}^{af,RE}(j, t)$  为接入点相邻或上游线路发生故障时, 保护  $j$  在  $t$  时刻监测到的反向三相短路电流;

$I_{CB}^{af,down}(j,t)$ 为接入点下游保护 $j$ 在 $t$ 时刻监测到的三相短路电流; $I_{CB}^{af,up}(j,t)$ 为接入点上游保护 $j$ 在 $t$ 时刻监测到的三相短路电流; $I_{CB}^{af(2)}(i,t)$ 为电动汽车或分布式能源接入后保护 $i$ 在 $t$ 时刻监测到的两相短路电流; $I_{op,CB}^I(j)$ 为保护 $j$ 的I段保护整定值。

(3)峰谷差约束。优化之后的负荷峰谷差小于原始负荷的峰谷差:

$$\max \left( \sum_{m=1}^{N_{no}} P_{load}^{af}(m,t) \right) - \min \left( \sum_{m=1}^{N_{no}} P_{load}^{af}(m,t) \right) < \max \left( \sum_{m=1}^{N_{no}} P_{load}(m,t) \right) - \min \left( \sum_{m=1}^{N_{no}} P_{load}(m,t) \right) \quad (14)$$

其中, $P_{load}^{af}(m,t)$ 为优化之后的 $t$ 时刻节点 $m$ 的有功负荷。

(4)多时段潮流平衡约束。

$$P_b(m,t) + P_{DER}(m,t) - \sum_{g=1}^{N_{GP}} \sum_{i \in D_{m,g,t}} (P_{EVC}^{m,g}(i,t) \mu_{EVC}^{m,g}(i,t) - P_{EVD}^{m,g}(i,t) \mu_{EVD}^{m,g}(i,t)) - P_{load}(m,t) - U_{m,t} \sum_{n=1}^{N_{no}} U_{n,t} (G_{mn} \cos \theta_{mn} + B_{mn} \sin \theta_{mn}) = 0 \quad (15)$$

$$Q_b(m,t) + P_{DER}(m,t) \tan \varphi_{DER,i} - P_{load}(m,t) \tan \varphi_m - U_{m,t} \sum_{n=1}^{N_{no}} U_{n,t} (G_{mn} \sin \theta_{mn} - B_{mn} \cos \theta_{mn}) = 0 \quad (16)$$

其中, $P_b(m,t)$ 、 $Q_b(m,t)$ 分别为由上级电网注入的有功、无功功率; $\varphi_{DER,i}$ 为分布式能源机组 $i$ 的功率因数角; $\varphi_m$ 为节点 $m$ 负荷的功率因数角; $G_{mn}$ 、 $B_{mn}$ 为支路 $mn$ 的导纳参数; $\theta_{mn}$ 为节点 $m$ 、 $n$ 之间的电压相位差。

(5)节点电压约束。

$$U_{m,\min} \leq U_{m,t} \leq U_{m,\max} \quad (17)$$

(6)电动汽车电池容量约束。

$$S_{SOC,\min}(i) \leq S_{SOC}(i,t) \leq S_{SOC,\max}(i) \quad (18)$$

其中, $S_{SOC}(i,t)$ 为电动汽车 $i$ 在 $t$ 时刻的电池荷电状态(SOC); $S_{SOC,\max}(i)$ 、 $S_{SOC,\min}(i)$ 分别为电动汽车 $i$ 的SOC上、下限。

(7)电动汽车充放电电量平衡约束。

$$E_{EV}(i) (S_{SOC}(i,t+1) - S_{SOC}(i,t)) = \sum_{i \in D_{m,g,t}} (P_{EVC}^{m,g}(i,t) \mu_{EVC}^{m,g}(i,t) \eta_{EVC}(i) - P_{EVD}^{m,g}(i,t) \mu_{EVD}^{m,g}(i,t) / \eta_{EVD}(i)) \Delta T \quad (19)$$

其中, $E_{EV}(i)$ 为车辆 $i$ 的电池容量; $\eta_{EVC}(i)$ 为电动汽车 $i$ 的充电效率; $\eta_{EVD}(i)$ 为电动汽车 $i$ 的放电效率。

(8)电动汽车子群时间约束。本文假设车主每天08:00出门上班,17:00下班,那么在上下班时,电量要满足车主的用车需求。

$$T_{d,g} + T_{dEVD,g} + T_{EVD,g} + T_{dEVC,g} + T_{AEVC,g} \leq T_{dmax,g} \quad (20)$$

$$T_{dmax,g} = \begin{cases} T_{CXS,g} - T_{KC}^{g,\max} - T_{EVC}^{g,\max} \\ T_{KC}^{g,\max} \in [00:00, 08:00) \\ T_{CXX,g} - T_{KC}^{g,\max} - T_{EVC}^{g,\max} \\ T_{KC}^{g,\max} \in [08:00, 17:00) \\ T_{CXS,g} + 24 - T_{KC}^{g,\max} - T_{EVC}^{g,\max} \\ T_{KC}^{g,\max} \in (17:00, 24:00) \end{cases} \quad (21)$$

其中, $T_{d,g}$ 为子群 $g$ 的充电时延; $T_{dEVD,g}$ 为子群 $g$ 的放电时延; $T_{EVD,g}$ 为子群 $g$ 的放电时间; $T_{dEVC,g}$ 为再次充电时延; $T_{AEVC,g}$ 为再次充电至车主期望电量时所需时间; $T_{dmax,g}$ 为子群 $g$ 的最大充放电时延; $T_{CXS,g}$ 为子群 $g$ 内用户 $i$ 上班出行时间,本文假设的是08:00; $T_{CXX,g}$ 为子群 $g$ 内用户 $i$ 下班出行时间,本文假设的是17:00; $T_{KC}^{g,\max}$ 为子群 $g$ 内电动汽车最晚开始充电时间; $T_{EVC}^{g,\max}$ 为子群 $g$ 内电动汽车最长充电至车主期望电量所需时间。

(9)为了确保车主的充电满意度,需对车主期望电量进行约束,即充放电周期结束时电量务必要达到车主的期望需求。

$$\sum_{t=T_{KC,i}}^{T_{KC,i} + T_{dEVD,g} + T_{EVC,i}} \sum_{i \in D_{m,g,t}} (P_{EVC}^{m,g}(i,t) \mu_{EVC}^{m,g}(i,t) \eta_{EVC}(i) - P_{EVD}^{m,g}(i,t) \mu_{EVD}^{m,g}(i,t) / \eta_{EVD}(i)) \Delta T \geq E_{EV}(i) (S_{SOC,expect}(i) - S_{SOC,start}(i)) \quad (22)$$

其中, $S_{SOC,expect}(i)$ 为车主 $i$ 的期望SOC; $S_{SOC,start}(i)$ 为车主 $i$ 在接入时刻的SOC; $T_{dEVD,g}$ 为子群 $g$ 的充放电时延; $T_{KC,i}$ 为电动汽车 $i$ 的开始充电时间; $T_{EVC,i}$ 为电动汽车 $i$ 充电至车主期望电量所需时间。

(10)放电电量约束,为了保护电动汽车电池,不能对其进行过放。

$$\sum_{t=T_{EVD,KC}^{g}}^{T_{EVD,KC}^{g} + T_{dEVD,g} + T_{EVD,g}} \sum_{i \in D_{m,g,t}} (P_{EVD}^{m,g}(i,t) \mu_{EVD}^{m,g}(i,t) / \eta_{EVD}(i)) \Delta T \leq \alpha_{EVD} E_{EV}(i) \quad (23)$$

其中, $T_{EVD,KC}^{g}$ 为子群 $g$ 的放电开始时刻; $\alpha_{EVD}$ 为最大放电系数。

(11)电动汽车充放电状态约束。同一辆电动汽车不能既充电又放电。

$$\mu_{EVC}^{m,g}(i,t) + \mu_{EVD}^{m,g}(i,t) \leq 1 \quad (24)$$

### 3 基于状态空间MPC的实时修正模型

由于日前负荷预测、分布式能源出力预测都有一定误差,电动汽车的充放电计划也可能因为车主的临时用车被迫改变,若直接将日前优化策略用于日内实时优化中,可能无法适应实际情况。MPC<sup>[13]</sup>是解决分布式能源出力不确定性的有效方法,因此,需要在融合节点的日前优化运行模型基础上,对电动汽车充放电计划进行修正,以配合分布式能源的出力,从而得到配电网实时最优运行工况,满足实时运行控制需求。

### 3.1 预测模型

以电动汽车充放电功率为输入控制变量,配电网整体负荷与电动汽车的 SOC 为状态量,配电网原负荷增量、风电出力增量和光伏出力增量为扰动量,同时,将配电网整体负荷与电动汽车 SOC 作为输出量,可写出状态空间模型以及相应的状态空间方程,状态空间模型见附录 C 中式 (C1)~(C7),状态空间方程见附录 C 中式 (C8) 与式 (C9),进而得到  $k+1$  至  $k+p$  时刻的预测输出,其中  $p$  为预测时域长度。

$$\mathbf{Y}_p(k) = [\mathbf{y}(k+1|k) \ \mathbf{y}(k+2|k) \ \cdots \ \mathbf{y}(k+p|k)]^T =$$

$$[P_{ZFH}(k+1|k) \ S_{SOC}(k+1|k) \ \cdots$$

$$P_{ZFH}(k+p|k) \ S_{SOC}(k+p|k)]^T \quad (25)$$

其中,  $\mathbf{Y}_p(k)$  为  $k$  时刻预测输出;  $P_{ZFH}(k+p|k)$  为  $k$  时刻向前  $p$  步的配电网整体负荷预测值;  $S_{SOC}(k+p|k)$  为  $k$  时刻向前  $p$  步的电动汽车 SOC 预测值。

### 3.2 目标函数与约束条件

以配电网整体负荷和电动汽车 SOC 预测实时输出值与日前计划值之间的偏差最小为目标,考虑前者是希望实时优化策略能够跟随日前计划,因为日前计划既满足配电网各种安全运行条件,也考虑到了经济运行因素,实时计划跟随日前计划也能满足配电网在安全性和经济性方面的要求;考虑后者,是因为电动汽车车主充电满意度也是实时优化策略的要求。

$$\min \left\{ \left\| \mathbf{Y}_p - \mathbf{Y}_{ref} \right\|_Q^2 + \left\| \Delta \mathbf{U} \right\|_R^2 \right\} =$$

$$\left( \mathbf{Y}_p(k) - \mathbf{Y}_{ref}(k) \right)^T \mathbf{Q} \left( \mathbf{Y}_p(k) - \mathbf{Y}_{ref}(k) \right) +$$

$$\Delta \mathbf{U}^T(k) \mathbf{R} \Delta \mathbf{U}(k) \quad (26)$$

$$\mathbf{Y}_{ref}(k) = [P_{ZFH}^{ref}(k+1|k) \ S_{SOC}^{ref}(k+1|k) \ \cdots$$

$$P_{ZFH}^{ref}(k+p|k) \ S_{SOC}^{ref}(k+p|k)]^T \quad (27)$$

$$\Delta \mathbf{U}(k) = [\Delta P_{EV}(k|k) \ \Delta P_{EV}(k+1|k) \ \cdots$$

$$\Delta P_{EV}(k+N_c-1|k)]^T \quad (28)$$

其中,  $\mathbf{Y}_{ref}$  为日前优化结果所构成的跟踪向量;  $\Delta \mathbf{U}$  为控制增量向量;  $\mathbf{Q}$  为跟踪误差权重系数矩阵;  $\mathbf{R}$  为控制量权重系数矩阵;  $P_{ZFH}^{ref}(k+p|k)$  为  $k+p$  时刻配电网整体负荷日前计划值;  $S_{SOC}^{ref}(k+p|k)$  为  $k+p$  时刻电动汽车 SOC 日前计划值;  $\Delta P_{EV}(k|k)$  为  $k$  时刻电动汽车充/放电功率增量;  $N_c$  为控制时域长度。

同时,也应满足输入、输出量与状态量的逐点约束。

$$P_{ZFH}^{min}(k+j) \leq P_{ZFH}(k+j|k) \leq P_{ZFH}^{max}(k+j)$$

$$j=0, 1, \cdots, p \quad (29)$$

$$S_{SOC}^{min}(k+j) \leq S_{SOC}(k+j|k) \leq S_{SOC}^{max}(k+j)$$

$$j=0, 1, \cdots, p \quad (30)$$

$$P_{EV}^{min}(k+j) \leq P_{EV}(k+j|k) \leq P_{EV}^{max}(k+j)$$

$$j=0, 1, \cdots, N_c-1 \quad (31)$$

$$\Delta P_{EV}^{min}(k+j) \leq \Delta P_{EV}(k+j|k) \leq \Delta P_{EV}^{max}(k+j)$$

$$j=0, 1, \cdots, N_c-1 \quad (32)$$

其中,  $P_{EV}(k+j|k)$  为  $k+j$  时刻电动汽车充/放电功率;  $\Delta P_{EV}(k+j|k)$  为  $k+j$  时刻电动汽车充/放电功率增量;  $P_{ZFH}^{max}(k+j)$ 、 $P_{ZFH}^{min}(k+j)$  分别为  $k+j$  时刻配电网整体负荷上、下限;  $S_{SOC}^{max}(k+j)$ 、 $S_{SOC}^{min}(k+j)$  分别为  $k+j$  时刻电动汽车 SOC 的上、下限;  $P_{EV}^{max}(k+j)$ 、 $P_{EV}^{min}(k+j)$  分别为  $k+j$  时刻电动汽车充/放电功率上、下限;  $\Delta P_{EV}^{max}(k+j)$ 、 $\Delta P_{EV}^{min}(k+j)$  分别为  $k+j$  时刻电动汽车充/放电功率增量上、下限。

为了实现反馈校正环节,将当前状态量的实际测量值作为新一轮滚动的初始值,构成闭环控制,使下一轮优化更贴近实际值。

$$\mathbf{x}_0(k+1) = \mathbf{x}_{real}(k+1) \quad (33)$$

其中,  $\mathbf{x}_0(k+1)$  为  $k+1$  时刻初值状态量;  $\mathbf{x}_{real}(k+1)$  为  $k+1$  时刻实际测量状态量。

## 4 算例分析

### 4.1 算例数据

采用修改过的 IEEE 33 节点配电系统对本文所提优化运行策略的有效性进行验证。6 个电流保护装置 CB<sub>1</sub>—CB<sub>6</sub> 分别安装在 1-2、3-4、6-7、3-23、6-26、2-29 这 6 条馈线上,且均配备 I 段保护和 III 段保护。在节点 5 和节点 28 分别接入 2 台基准出力为 400 kW 的风机;节点 10 和节点 24 接入的光伏发电单元基准出力为 300 kW;在 4、16、22、25、30 这 5 个节点上分别加入电动汽车充电点,修改后的 IEEE 33 节点系统图如附录 D 中图 D1 所示。依据式 (9)~(13),对修改后 IEEE 33 节点系统中 CB<sub>1</sub>—CB<sub>6</sub> 进行保护的约束,具体约束情况见附录 D 中表 D1,6 个保护的整定值见附录 D 中表 D2。详细电动汽车参数见附录 D 中表 D3,电动汽车的充电分时电价见附录 D 中表 D4,由于汽车入网 (V2G) 机制尚未健全,因此假设放电电价与同时段充电电价相同。基于蒙特卡洛法<sup>[14]</sup>先对电动汽车无序充电进行仿真,以此为电动汽车基础数据实现本文所提优化策略的验证。

### 4.2 基于融合节点的日前优化运行模型的仿真

本文所提优化策略可在评估电动汽车最优入网规模的同时,得到此规模下的配电网最优运行工况,设置电动汽车初始规模为 2000 辆,每次递增电动汽车数量为 100 辆。基于 MATLAB 平台采用遗传算法-粒子群优化 (GA-PSO) 混合优化算法对其进行求解,并在最优规模下,对不考虑电流保护约束的无序充电策略 (场景 1)、不考虑电流保护约束的有序充放电策略 (场景 2) 和考虑电流保护约束的电动汽车与分布式能源配合优化策略 (场景 3) 这 3 种场景进行对比,以验证本文所提策略的有效性。值得注意

的是,该模型3个指标的罚函数惩罚系数的确定对于求解十分重要。若惩罚系数取值过小,则带罚函数的目标函数极小点可能会远离最优解,使得迭代次数增加,计算效率变得很差;若惩罚系数取值过大,会使得惩罚函数性态变坏,使迭代发生困难,甚至会产生不可行解,因此采用的策略是取一个趋向无穷大的严格递增正数列<sup>[15]</sup>,结合本文所采用的GA-PSO算法,具体操作是随着迭代次数的增加,其呈倍数增大,即初始值取 $10^3$ ,随着迭代,逐步按10倍增加,最大值取到 $10^{20}$ 。由于3个指标都是配电网的安全约束,同等重要,且指标公式本身也都经过处理,无量纲,因此3个指标的惩罚系数设定方法相同。

图1所示的电动汽车最优规模评估表明,电动汽车规模在4000辆以下时,电压、电流保护显性及隐性指标越限次数都为0,从4000辆开始,增加电动汽车数量,各指标都陆续发生了越限。因此,针对该配电网,电动汽车的最优入网规模为4000辆。当电动汽车规模为4000辆时,在3种场景下考察电流保护指标,以验证本文所提保护约束的有效性。

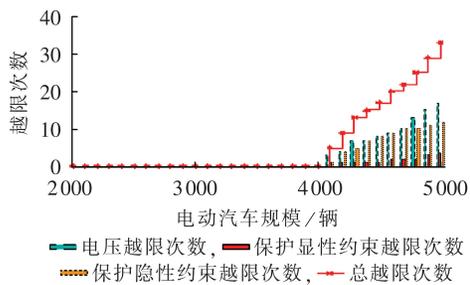
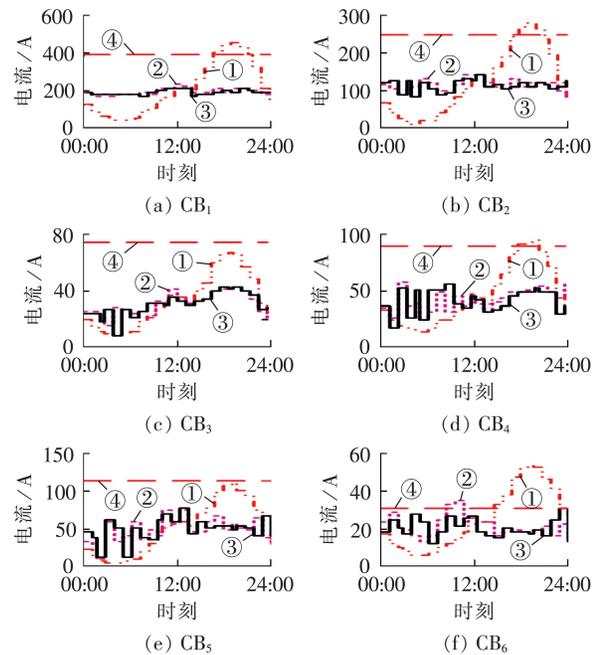


图1 电动汽车最优规模评估图

Fig.1 Diagram of assessing optimum scale of EV

图2为式(9)所示的显性约束的满足情况。由图2可以看出,配电网正常运行时,场景1下的保护 $CB_1$ 、 $CB_2$ 、 $CB_4$ 、 $CB_6$ 都发生了误动,这表明无序充电会使得正常运行电流超过Ⅲ段保护整定值,从而保护误动;场景2表明采取有序充放电策略能够有效降低越限次数,但 $CB_6$ 在09:00、10:00仍有误动;场景3表明在考虑保护约束的情况下,能有效杜绝电流Ⅲ段保护误动的发生。关于隐性约束的满足情况,见附录D中图D2—D4。结果分析表明,考虑了保护约束的场景3,对于显性、隐性保护约束都能满足,即保护都可以正确动作,而场景1与场景2则存在保护不能正确动作的情形。

图3为对3种场景下电压指标、电流保护显性与隐性指标及总越限次数的对比。可以发现无序充电的越限次数最多,对电压的影响也最大,有序充放电能够有效减少越限次数,但仍有越限情况的发生,场景3则没有出现越限,这表明考虑了电流保护约束的电动汽车与分布式能源配合优化策略能有效保证



① 场景1, ② 场景2, ③ 场景3, ④ 整定值

图2 显性约束满足情况

Fig.2 Situations of implicit constraint satisfaction

保护 $CB_1$ — $CB_6$ 在所有时刻都能正确动作,同时电压也保持在合理范围内,没有发生越限。

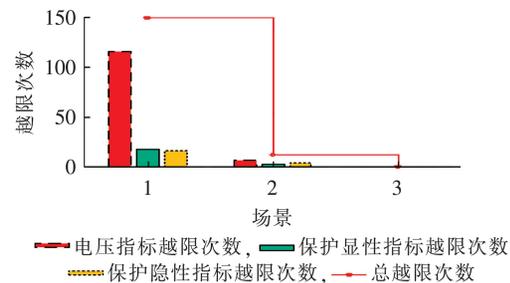
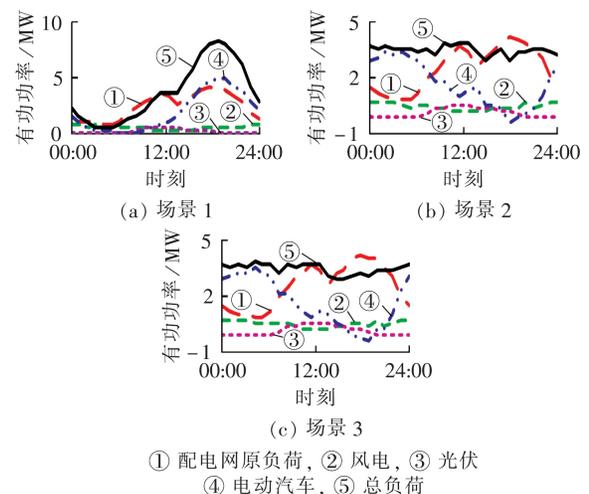


图3 3种场景下的指标越限次数

Fig.3 Over-limit times of index under three scenarios

图4为3种场景下有功功率的对比。图中场景



① 配电网原负荷, ② 风电, ③ 光伏  
④ 电动汽车, ⑤ 总负荷

图4 3种场景下的有功功率

Fig.4 Active powers under three scenarios

1 表明,电动汽车无序充电负荷大部分叠加在配电网晚间高峰负荷上,使得配电网负荷峰谷差加剧,这是由于车主下班开车到家停好车后,一般会随手将电动汽车接入充电,随着车主陆续下班,晚间充电负荷也越来越大,此种情况对配电网的安全稳定运行是极为不利的。场景 2、3 表明,对电动汽车充放电进行合理的优化,使之与分布式能源配合,能够有效缓解配电网负荷的波动。

3 种场景的结果对比见表 1。结合表 1 对 3 种场景进行分析,无序充电模式在配电网负荷均方差、车主费用、峰谷差与网损这 4 个指标上的表现都不尽如人意。对比场景 1 与场景 2,可以发现车主费用有了大幅减少,这是合理利用充放电分时电价的原因,负荷低谷时段电价低故在此时充电,而负荷高峰时段电价高则在此时放电。同时,峰谷差也得到了控制,负荷波动趋于平缓,网损也有了大幅降低。对比场景 3 和场景 2,可以看出当考虑了电流保护约束后,场景 3 除了负荷均方差比场景 2 略高之外,其余 3 个指标相较于场景 2 都有一定幅度的降低,这是因为电流保护约束在保障了车主用车需求的同时,会对电动汽车的充放电功率进行控制,以保证保护的正确动作。

表 1 3 种场景的结果对比

场景	负荷均方差 / MW	车主费用 / 元	峰谷差 / MW	网损 / MW
1	2.6643	88 299	8.0177	6.3803
2	0.2506	39 259	0.9849	4.0501
3	0.2715	34 819	0.8567	4.0204

值得注意的是,为了保证电动汽车与分布式能源能够有效配合及保护的正确动作,对电动汽车的优化管理存在着时空 2 个维度的控制。图 5 为场景 3 下电动汽车功率的时空分配,时间维度主要是对负荷波动、车主费用与峰谷差的控制,空间维度则主要是为了保证保护的正确动作以及对网损的控制。其中,在 17:00—19:00 时段功率为负,表示向配电网反向供能,以缓解负荷高峰,在其余时刻则充电。关于电动

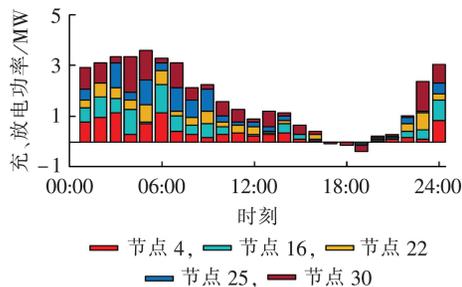


图 5 场景 3 下电动汽车功率时空分配  
Fig.5 Time-space distribution of EVs' power under Scenario 3

汽车 SOC 的变化,2 种典型的充放电形式示意图如附录 D 中图 D5 所示,其结果表明 2 种情形下的电动汽车充电完成时, SOC 水平都为 1,达到了车主的电量需求。

### 4.3 基于状态空间 MPC 的实时修正模型的仿真

配电网日前计划数据取日前优化模型计算结果中场景 3 下的最优数据。配电网负荷、光伏与风电的超短期预测数据,由日前预测数据随机抽样获得,其中负荷误差控制在 5% 以内,光伏、风电误差控制在 10% 以内,其预测数据见附录 D 中图 D6。取预测时域长度  $p=24$ ,控制时域长度  $N_c=12$ ,5 min 为滚动优化周期,即每间隔 5 min 采样一次。

图 6 为 MPC 实时修正结果与场景 3 对比,可以看出实时配电网整体负荷能很好地跟随日前计划,毛刺也较少,意味着对电压指标越限及电流保护指标的越限控制得较好。同时,也能得到实时修正后的电动汽车充放电计划,如图 7 所示。可以看出,采用 MPC 实时修正的电动汽车充放电计划基本跟随日前计划,但也随着负荷、光伏与风电的超短期预测出力的变化而变化,这都是为了达到对配电网整体负荷的跟随。

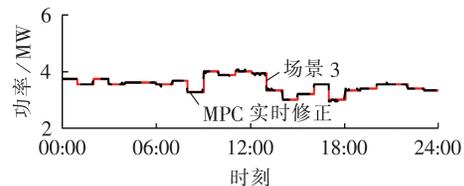


图 6 MPC 与场景 3 的配电网整体负荷对比  
Fig.6 Comparison of distribution network load between MPC and Scenario 3

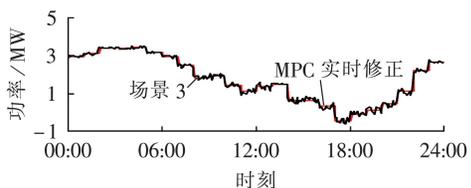


图 7 MPC 与场景 3 的电动汽车充放电计划对比  
Fig.7 Comparison of charging and discharging plan for EVs between MPC and Scenario 3

由表 2 所示的 MPC 与场景 3 结果对比可以看出, MPC 实时优化结果与场景 3 都没有发生电压或者保护越限的情况, MPC 实时优化在车主费用方面较场景 3 还有一定幅度的下降,虽然峰谷差比场景 3

表 2 MPC 与场景 3 结果对比

场景	车主费用 / 元	峰谷差 / MW	电压指标越限率 / %	电流保护指标越限率 / %
3	34 819	0.8567	0	0
MPC 实时修正	33 650	1.0192	0	0

的略大,但这是由于要满足日前计划的跟随及各种安全指标。通过2种场景的数据分析可以看出,基于状态空间MPC的配电网实时优化能够满足实际运行的要求。

## 5 结论

本文提出了一种考虑配电网电流保护的电动汽车与分布式能源配合优化运行策略,为对电动汽车最优入网规模进行评估,提出了电流保护显性、隐性指标与电压指标。在不修改配电网原有保护配置的前提下,基于电流保护与电压指标,搭建了基于融合节点的优化运行模型,对含分布式能源的配电网最优电动汽车入网规模进行了评估。基于此最优规模,得到了配电网最优运行策略,并通过状态空间MPC实时模型对其进行修正,以更符合实际情况。本文所提优化策略使得配电网峰谷差大幅减少,负荷波动趋于平缓,运行经济性也有所改善。另外,也考虑了车主费用与车主充电满意度,因此就保证了电动汽车与电网的良性互动,该优化运行策略的实现也得以保障。算例对比分析表明,考虑了电流保护约束的优化策略,能保证在优化周期内所有时刻保护的正确动作,电压水平也维持在允许范围;同时,也能平抑负荷波动,降低负荷水平及减小网损。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 郭建龙,文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):1-9.  
GUO Jianlong,WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):1-9.
- [2] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):1-10.  
HU Zechun,SONG Yonghua,XU Zhiwei,et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):1-10.
- [3] HE Y,VENKATESH B,GUAN L. Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1095-1105.
- [4] 王明深,穆云飞,贾宏杰,等. 考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的平抑控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):211-219.  
WANG Mingshen,MU Yunfei,JIA Hongjie,et al. Smoothing control strategy considering energy storage capability of electric vehicle aggregators and wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):211-219.
- [5] 陈炜. 含电动汽车储能与分布式风力发电的虚拟发电厂优化运行[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):45-50,59.  
CHEN Wei. Optimal operation of virtual power plant with electric vehicles and distributed wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):45-50,59.
- [6] 陈静鹏,朴龙健,艾芊. 基于改进贪心算法的大规模电动汽车充电行为优化[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):38-44.

- CHEN Jingpeng,PIAO Longjian,AI Qian. Charging optimization based on improved greedy algorithm for massive EVs[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):38-44.
- [7] 侯建朝,胡群丰,谭忠富. 计及需求响应的风电-电动汽车协同调度多目标优化模型[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):22-27.  
HOU Jianchao,HU Qunfeng,TAN Zhongfu. Multi-objective optimization model of collaborative WP-EV dispatch considering demand response[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):22-27.
- [8] 郭煜华,范春菊. 含大规模电动汽车的配电网保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(8):14-20.  
GUO Yuhua,FAN Chunju. Research on relaying technologies of distribution network including mass electric vehicles[J]. Power System Protection and Control,2015,43(8):14-20.
- [9] 李振兴,孟晓星,田斌,等. 电动汽车接入充放电对配电网继电保护的影响[J]. 高压电器,2018,54(4):188-194.  
LI Zhenxing,MENG Xiaoxing,TIAN bin,et al. Influence of electric vehicle charging and discharging on distribution network relay protection[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(4):188-194.
- [10] 李振兴,田斌,尹项根,等. 含分布式电源与随机负荷的主动配电网保护[J]. 高电压技术,2017,43(4):1231-1238.  
LI Zhenxing,TIAN Bin,YIN Xianggen,et al. Overview on active distribution network relaying protective containing distributed resources and stochastic load[J]. High Voltage Engineering,2017,43(4):1231-1238.
- [11] ZHAN H,WANG C,WANG Y,et al. Relay protection coordination integrated optimal placement and sizing of distributed generation sources in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(1):55-65.
- [12] 梅哲,詹红霞,苑吉河,等. V2G模式下基于电动汽车分群方法的配电网多目标优化运行策略[J]. 电力建设,2018,39(8):59-68.  
MEI Zhe,ZHAN Hongxia,YUAN Jihe,et al. Multi-objective optimal operating strategy of distribution network considering V2G on the basis of grouping method of electric vehicles[J]. Electric Power Construction,2018,39(9):59-68.
- [13] 邹涛,丁宝苍,张端. 模型预测控制工程应用导论[M]. 北京:化学工业出版社,2010:133-138.
- [14] 陈鹏,孟庆海,赵彦锦. 基于蒙特卡洛法的电动汽车充电负荷计算[J]. 电气工程学报,2016,11(11):40-46.  
CHEN Peng,MENG Qinghai,ZHAO Yanjin. The electric vehicle charging load calculation based on the monte carlo method[J]. Journal of Electrical Engineering,2016,11(11):40-46.
- [15] 黄文涛,邓长虹,汪志强,等. 基于外点罚函数法的实时低频切泵策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):104-111.  
HUANG Wentao,DENG Changhong,WANG Zhiqiang,et al. A real-time strategy for under frequency pump shedding of pumped power storage station based on external point function method[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(16):104-111.

## 作者简介:



梅哲

梅哲(1995—),男,四川眉山人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车与分布式能源入网的配电网优化运行(E-mail:876329025@qq.com);

詹红霞(1971—),女,四川成都人,副教授,主要研究方向为电力系统保护与控制以及新能源并网(E-mail:zhx105a@sina.com)。

(编辑 李玮)

(下转第181页 continued on page 181)

## Mixed logical dynamic modeling and autonomous control method for ACLs

WANG Yongquan,ZHANG Peichao,YAO Yao

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of Ministry of Education,  
Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China)

**Abstract:** Random renewable energy connected to microgrid reduces the controllability and schedule ability of the tie-line power. Aggregating flexibility of large-scale ACLs (Air Conditioning Loads) can solve this problem effectively. Firstly, single ACL is modeled by using the MLD (Mixed Logical Dynamic) method, and then solves the ON/OFF sequence autonomously to respond to a control signal based on the MLD model. Secondly, the flexibility of ACL population is used to correct day-ahead forecasting errors of renewable energies and loads in the microgrid, which improves the tracking accuracy of the microgrid for the day-ahead schedule power of tie-line. Finally, simulations are carried out on a microgrid case with 1 000 ACLs. The simulative results show that the proposed method can aggregate the flexibility of a large scale of autonomous ACLs to improve the schedule ability of the tie-line power in microgrid, while effectively ensuring users' comfort and device safety.

**Key words:** microgrid; ACL; cyber-physical system; MLD; autonomous control; day-ahead schedule of tie-line

(上接第 96 页 continued from page 96)

## Optimal operating strategy of distribution network based on coordination of electric vehicle and distributed energy resource considering current protection

MEI Zhe<sup>1</sup>,ZHAN Hongxia<sup>1</sup>,YANG Xiaohua<sup>2</sup>,DENG Qiang<sup>1</sup>,ZHANG Hao<sup>1</sup>,ZHU Jinlong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. State Grid Yunyang Power Supply Company of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 404500, China)

**Abstract:** To ensure proper action of protection and reduce the influence of disordered charging of EV (Electric Vehicle) and fluctuation of DER (Distributed Energy Resource), an optimal operating strategy is proposed. This strategy is based on the coordination of EV and DER considering current protection. To improve the efficiency of solution, the cluster control strategy is adopted in EVs. This model is built without changing the original protection schemes based on information fusion nodes. Standard deviation of load and cost of EV owners are considered as objectives. Combined explicit and implicit indexes of current protection with voltage indicators, the optimal scale of EV access to the distribution network is assessed. The optimal operating states can be obtained by the coordination of EV and DER on the optimal scale. To conform to reality better, the states are amended by model predictive control. The proposed strategy is proved to ensure benefit of owners and proper action of protection anytime during optimal cycle by case analysis in three scenarios. And the strategy is also proved to maintain voltage at normal range, stabilize load fluctuation, decrease load level and reduce network losses.

**Key words:** distribution network; electric vehicles; distributed energy resources; current protection; cluster control; optimal operating states

## 附录

### 附录 A

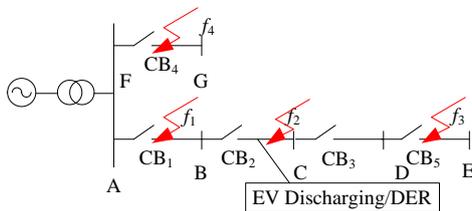


图 A1 电动汽车放电与分布式能源接入短路点示意图

Fig.A1 Diagram of short-circuit points with EV discharging or DER

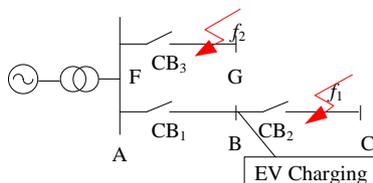


图 A2 电动汽车充电短路点示意图

Fig.A2 Diagram of short-circuit points with EV charging

### 附录 B

结合下图 B1 与式(B1)–(B3)可对正文 2.4 小节电流保护隐性约束中电动汽车放电情形约束说明。

式(B1)–(B3)分别对应图 B1 中点  $f_{11}$  与  $f_{12}$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  短路情形下的约束；式(B1)表示电动汽车及分布式能源接入后，发生相邻或上游线路故障，对保护  $j$  的反向电流不应使 I 段保护误动；式(B2)表示接入后对下游保护  $j$  的助增电流作用不能使 I 段保护误动；式(B3)表示接入后对上游保护  $i$  的削弱作用不应使 III 段保护拒动。

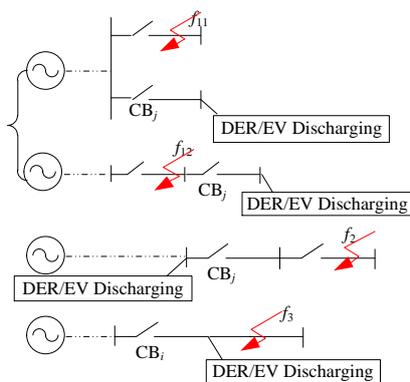


图 B1 电动汽车放电时约束原理图

Fig.B1 Diagram of constraints when EV discharging

$$I_{CB}^{af,RE}(j,t) < I_{op,CB}^I(j) \quad (B1)$$

$$I_{CB}^{af,down}(j,t) < I_{op,CB}^I(j) \quad (B2)$$

$$I_{CB}^{af,up(2)}(i,t) > I_{op,CB}^{III}(i) \quad (B3)$$

其中， $I_{op,CB}^I(j)$  为保护  $j$  的 I 段保护整定值； $I_{CB}^{af,RE}(j,t)$  为接入点相邻或上游线路发生故障时，保护  $j$  在  $t$  时刻监测到的反向三相短路电流； $I_{CB}^{af,down}(j,t)$  为接入点下游保护  $j$  在  $t$  时刻监测到的三相短路电流； $I_{CB}^{af,up(2)}(i,t)$  为接入点上游保护  $i$  在  $t$  时刻监测到的两相短路电流； $I_{op,CB}^{III}(i)$  为保护  $i$  的 III 段整定值。

结合下图 B2 与式(B4)–(B6)可对正文 2.4 小节电流保护隐性约束中电动汽车充电情形约束说明。

式(B4)–(B6)分别对应图 B2 中点  $f_{41}$  与  $f_{42}$ 、 $f_5$ 、 $f_6$  短路情形下的约束；式(B4)表示接入点相邻线路或上游

线路故障时，若对故障线路保护  $i$  的短路电流有削弱作用，不应使 III 段保护拒动，若对非故障线路保护  $j$  有反向短路电流，也不应使 I 段保护误动；同理，式(B5)与(B6)也针对接入点上游、下游短路电流的大小变化进行判断，并于故障线路与非故障线路制定相应的拒动与误动约束。

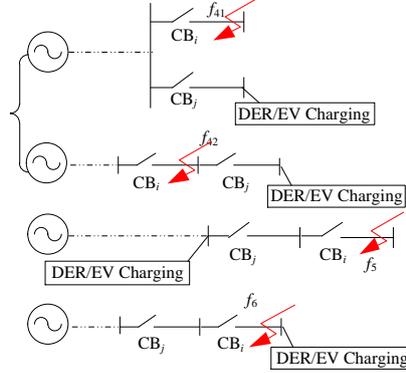


图 B2 电动汽车充电时约束原理图

Fig.B2 Diagram of constraints when EV charging

$$\begin{cases} \text{s.t. } I_{CB}^{\text{af,RE}}(i,t) - I_{CB}^{\text{be,RE}}(i,t) < 0 \\ I_{CB}^{\text{af,RE}(2)}(i,t) > I_{\text{op,CB}}^{\text{III}}(i) \\ \text{s.t. } I_{CB}^{\text{af,RE}}(j,t) - I_{CB}^{\text{be,RE}}(j,t) > 0 \\ I_{CB}^{\text{af,RE}}(j,t) < I_{\text{op,CB}}^{\text{I}}(j) \end{cases} \quad (\text{B4})$$

$$\begin{cases} \text{s.t. } I_{CB}^{\text{af,down}}(i,t) - I_{CB}^{\text{be,down}}(i,t) < 0 \\ I_{CB}^{\text{af,down}(2)}(i,t) > I_{\text{op,CB}}^{\text{III}}(i) \\ \text{s.t. } I_{CB}^{\text{af,down}}(j,t) - I_{CB}^{\text{be,down}}(j,t) > 0 \\ I_{CB}^{\text{af,down}}(j,t) < I_{\text{op,CB}}^{\text{I}}(j) \end{cases} \quad (\text{B5})$$

$$\begin{cases} \text{s.t. } I_{CB}^{\text{af,up}}(i,t) - I_{CB}^{\text{be,up}}(i,t) < 0 \\ I_{CB}^{\text{af,up}(2)}(i,t) > I_{\text{op,CB}}^{\text{III}}(i,t) \\ \text{s.t. } I_{CB}^{\text{af,up}}(j,t) - I_{CB}^{\text{be,up}}(j,t) > 0 \\ I_{CB}^{\text{af,up}}(j,t) < I_{\text{op,CB}}^{\text{I}}(j,t) \end{cases} \quad (\text{B6})$$

其中， $I_{CB}^{\text{af,RE}(2)}(i,t)$  为接入点相邻或上游线路发生故障时保护  $i$  在  $t$  时刻监测到的两相短路电流； $I_{CB}^{\text{be,RE}}(i,t)$  为电动汽车或分布式能源接入前待接入点相邻或上游线路发生故障时，保护  $i$  在  $t$  时刻监测到的三相短路电流；同理， $I_{CB}^{\text{af,down}(2)}(i,t)$  为接入点下游保护  $i$  在  $t$  时刻监测到的两相短路电流； $I_{CB}^{\text{be,down}}(i,t)$  为电动汽车或分布式能源接入前待接入点下游保护  $i$  在  $t$  时刻监测到的三相短路电流； $I_{CB}^{\text{af,up}(2)}(i,t)$  为接入点上游保护  $i$  在  $t$  时刻监测到的两相短路电流； $I_{CB}^{\text{af,up}}(i,t)$  为接入点上游保护  $i$  在  $t$  时刻监测到的三相短路电流； $I_{CB}^{\text{be,up}}(i,t)$  为接入前待接入点上游保护  $i$  在  $t$  时刻监测到的三相短路电流；其余含  $j$  变量，除表示线路不同之外，其含义是相同的，因此就不再赘述了。

结合下图 B3，可对正文中 2.4 小节中式(10)–(13)进行详细说明。

式(10)–(13)分别对应图 B3 中点  $f_{11}$  与  $f_{12}$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$  短路情形下的约束，其中式(13)是前三种情形的综合考虑，只针对故障线路本身，可以是任意位置的电动汽车与分布式能源接入点，并不局限于相邻、下游、上游这三种情况中任意单种情况；式(10)表示接入点相邻线路任一点发生三相短路或上游保护  $j$  的上一段线路  $i$  末端发生三相短路时，电动汽车与分布式能源接入对非故障线路保护  $j$  的反向短路电流不应使其误动；式(11)表示接入点下游保护  $j$  的下一段线路  $i$  首端发生三相短路时，接入对保护  $j$  的助增电流不应使其误动；同理，式(12)表示接入点上游保护  $j$  的下一段线路  $i$  首端发生三相短路时，保护  $j$  不应误动；式(13)则表示故障线路本

身，在 3 种情形下，若电动汽车与分布式能源接入对保护  $i$  监测的短路电流有削弱作用，也不应使 III 段保护拒动。

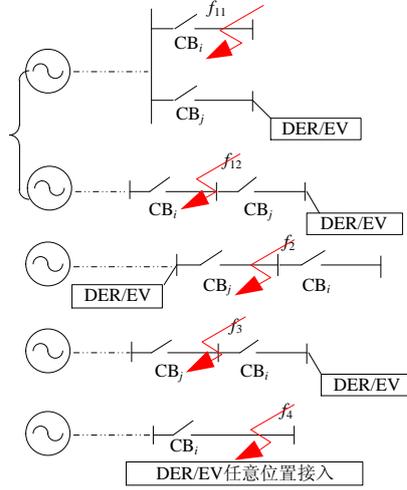


图 B3 保护约束原理图

Fig.B3 Diagram of protection constraints

### 附录 C

式(C1)—(C7)为正文 3.1 节中所述预测模型，式(C1)—(C7)为状态空间模型，式(C8)—(C9)为状态空间方程。

$$\xi(k) = [\mathbf{x}(k) \quad \mathbf{u}(k-1)]^T = \quad (C1)$$

$$[P_{ZFH}(k) \quad S_{SOC}(k) \quad P_{EV}(k-1)]^T$$

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \Delta P_{EV}(k) \quad (C2)$$

$$\mathbf{r}(k) = [\Delta P_{load}(k) \quad \Delta P_{wt}(k) \quad \Delta P_{pv}(k)]^T \quad (C3)$$

$$\mathbf{y}(k) = [P_{ZFH}(k) \quad S_{SOC}(k)]^T \quad (C4)$$

$$P_{EV}(k-1) = [P_{EV,1}(k-1) \quad \dots \quad P_{EV,i}(k-1)]^T \quad (C5)$$

$$\Delta P_{EV}(k-1) = [\Delta P_{EV,1}(k-1) \quad \dots \quad \Delta P_{EV,i}(k-1)]^T \quad (C6)$$

$$S_{SOC}(k) = [S_{SOC,1}(k) \quad \dots \quad S_{SOC,i}(k)]^T \quad (C7)$$

$$\xi(k+1) = \begin{bmatrix} P_{ZFH}(k+1) \\ S_{SOC}(k+1) \\ P_{EV}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \frac{\eta_{EV} \Delta t}{E_{EV}} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ZFH}(k) \\ S_{SOC}(k) \\ P_{EV}(k-1) \end{bmatrix} + \quad (C8)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \frac{\eta_{EV} \Delta t}{E_{EV}} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \Delta P_{EV}(k) + \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{load}(k) \\ \Delta P_{wt}(k) \\ \Delta P_{pv}(k) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y}(k) = [1 \quad \mathbf{I} \quad \mathbf{0}] \begin{bmatrix} P_{ZFH}(k) \\ S_{SOC}(k) \\ P_{EV}(k-1) \end{bmatrix} \quad (C9)$$

其中， $\mathbf{x}(k)$ 表示 $k$ 时刻状态向量； $\mathbf{u}(k-1)$ 表示 $k-1$ 时刻控制输入向量； $\boldsymbol{\xi}(k)$ 为状态与控制向量的增广形式； $\mathbf{r}(k)$ 表示 $k$ 时刻的扰动量； $\mathbf{y}(k)$ 表示 $k$ 时刻输出； $P_{ZFH}(k)$ 表示 $k$ 时刻配电网整体负荷值，为配电网原负荷叠加电动汽车充/放电功率再扣去风电与光伏出力； $S_{SOC}(k)$ 表示 $k$ 时刻优化电动汽车的SOC向量； $\mathbf{P}_{EV}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻优化电动汽车的充/放电功率向量； $\Delta P_{load}(k)$ 为 $k$ 时刻配电网原负荷增量； $\Delta P_{wt}(k)$ 为 $k$ 时刻风电出力增量； $\Delta P_{pv}(k)$ 为 $k$ 时刻光伏出力增量； $\Delta \mathbf{P}_{EV}(k)$ 为 $k$ 时刻优化电动汽车的充/放电功率增量向量； $P_{EV,i}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻优化电动汽车 $i$ 的充/放电功率值，其中充电为正值，放电为负值； $S_{SOC,i}(k)$ 为 $k$ 时刻电动汽车 $i$ 的SOC水平； $\eta_{EV}$ 为电动汽车的充/放电效率，其中放电时其值取放电效率的倒数，这是由于充放电的计算都是归算至电网侧所致； $E_{EV}$ 为电动汽车电池容量； $\Delta t$ 为充/放电时长。

附录 D

表 D1 修改过的 IEEE33 节点系统电流保护约束情况  
Table D1 Cases of current protection constraints with modified IEEE33-bus distribution system

对应公式	保护	短路位置
式(9)	CB1	配电网正常运行
	CB2	
	CB3	
	CB4	
	CB5	
	CB6	
式(10)	CB2	节点 3 三相短路
	CB3	节点 6 三相短路
	CB4	3—4 支路任一点三相短路
	CB5	6—7 支路任一点三相短路
	CB6	1—2 支路任一点三相短路
式(11)	接入点下游只有 CB3，不存在与下一线路的配合问题	
式(12)	CB1	节点 3 三相短路
	CB2	节点 6 三相短路
式(13)	CB1	节点 3 两相短路
	CB2	节点 6 两相短路
	CB3	节点 18 两相短路
	CB4	节点 25 两相短路
	CB5	节点 33 两相短路
	CB6	节点 22 两相短路

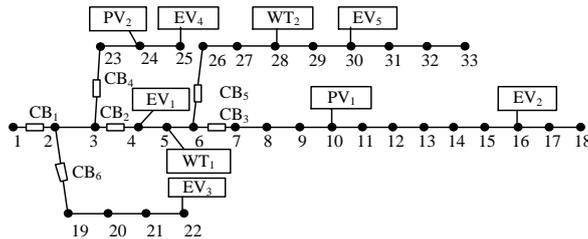


图 D1 修改过的 IEEE 33 节点系统图

Fig.D1 Diagram of modified IEEE33-bus distribution system

表 D2 电流保护整定值  
Table D2 Settings of current protection

保护	I 段保护整定值/A	III 段保护整定值/A
CB1	988.2582	387.9598
CB2	864.2468	247.1427
CB3	412.9468	73.2006
CB4	767.0185	88.4110
CB5	586.7448	115.0459
CB6	707.8241	31.3077

表 D3 电动汽车参数

Table D3 Parameters of EV

电动汽车参数	取值
型号	比亚迪 e6
最大行驶距离/km	400
最大电池容量/(kW·h)	82
充电功率/kW	7.8
充电效率	0.9
放电功率/kW	7.8
放电效率	0.9
车主期望 SOC 水平	1
电池损耗系/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.13
电动汽车出行结束时刻	$N(17.6, 3.4^2)$
电动汽车日行里程	$\ln \sim N(3.7, 0.9^2)$

表 D4 电动汽车充电分时电价

Table D4 Time of use electricity price of EV charging

时段	充电电价/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
00:00—09:00	0.4
09:00—10:00	1.2
10:00—12:00	2.0
12:00—22:00	2.0
22:00—23:00	1.2
23:00—24:00	0.4

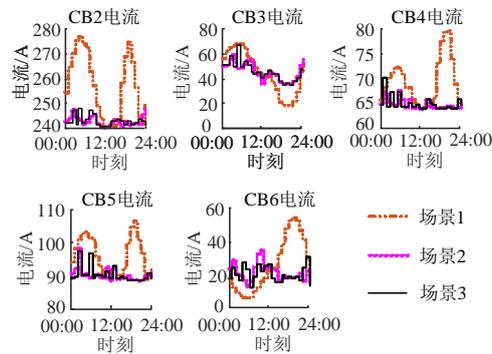


图 D2 式(10)隐性约束满足情况

Fig.D2 Cases of explicit constraint satisfaction at Inequation (10)

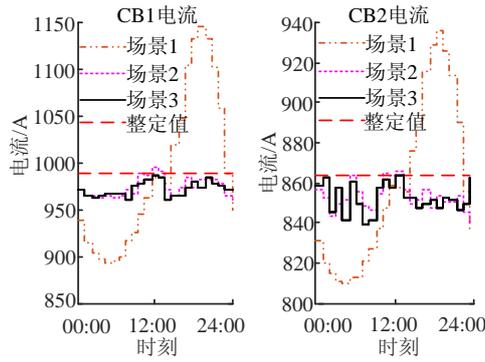


图 D3 式(12)隐性约束满足情况

Fig.D3 Cases of explicit constraint satisfaction at Inequation (12)

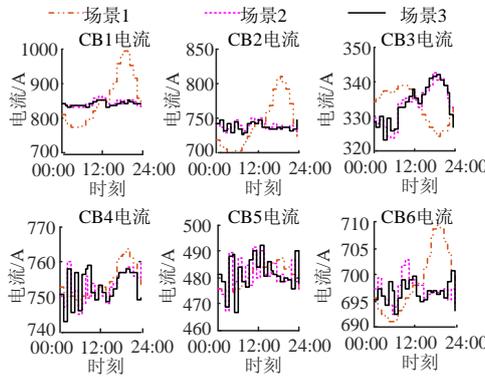


图 D4 式(13)隐性约束满足情况

Fig.D4 Cases of explicit constraint satisfaction at Inequation (13)

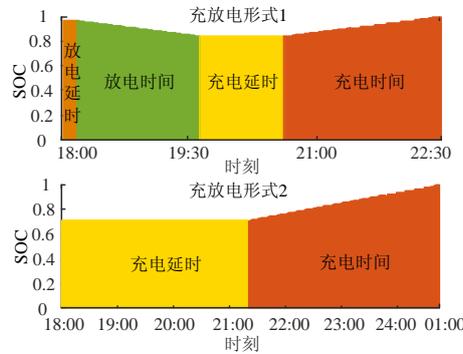


图 D5 场景 3 下 2 种充放电形式的 SOC

Fig.D5 SOC of two forms of charging and discharging under Scenario 3

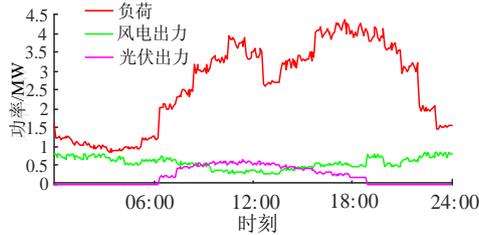


图 D6 超短期功率预测数据

Fig.D6 Forecasting data of ultra-short-term