

# 三相负荷平衡的光伏逆变器与充电桩协调优化控制策略

姚潇毅, 张剑, 尹柏强, 李晨晨, 何怡刚

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 平衡的三相四线制或五线制低压配电网能够显著增加对分布式电源、电动汽车的接纳能力; 大量光伏发电、电动汽车接入低压配电网可能导致网损大幅增加, 三相不平衡加剧, 配变过载, 电压越限, 威胁配电网的安全、经济运行; 针对已有的负荷平衡方法代价高、适应性低的不足, 从将重载相负荷转移至轻载相的基本原理出发, 提出了在配电网中配置多副公共直流母线, 设计了两种将位置相近、从不同相接入的光伏逆变器、充电桩直流侧连接至此共同直流母线的具有不同结构与造价的方案; 构建了光伏逆变器、充电桩协调优化控制的线性约束混合整数二次规划的模型; 模型的目标函数能够兼顾网损与平衡负荷; 采用实际 71 节点低压配电系统仿真计算, 与无序充电及经典方法进行了对比, 验证了所提方法计算速度快, 能够满足在线运行的要求, 具有完全平衡三相负荷, 降低网损, 削峰填谷, 改善供电电压质量等优越性能。

**关键词:** 光伏发电; 电动汽车; 配电网; 协调优化控制; 三相不平衡

## Coordinating and Optimizing Control Strategy of Three-phase Load Balancing Photovoltaic Inverter and Charging Pile

Yao Xiaoyi, Zhang Jian, Yin Baiqiang, Li Chenchen, He Yigang

(School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Balanced three-phase four-wire or five-wire distribution grids can host significant more photovoltaic generators (PV) and electric vehicles (EV). A large amount of EV and PV connected to low voltage distribution grids may aggravate three-phase imbalance, increase the network losses, overload the distribution transformers and deteriorate the voltages, threatening the safe and cost effective operation of distribution grids. The current load balancing methods are too expensive or can not fully balance the three-phase load. In this paper, two schemes that the DC sides of adjacent single phase PV inverters and EV chargers are connected to a common DC bus to transfer load from highly load phase to less loaded phase are proposed. Based on this two schemes, two models of co-scheduling PV inverters and EV chargers to minimize network losses with load balancing taken into account are formulated. The proposed method are compared with the uncoordinated charging scenarios and the classic method which aim at minimizing the three-phase load variance. The proposed optimization is evaluated using an actual 213-bus case as the test system. Results are promising with the proposed method having good convergence under time-efficient calculations while providing optimization of power losses and load balance, lower load variance, and improvement of voltage profiles versus the uncoordinated scenarios and classic method.

**Keywords:** PV; EV; distribution grids; coordinated and optimal control; three-phase imbalance

## 0 引言

未来一二十年, 世界经济、社会将面临供电安全性、环境紧迫性与能源成本可支付性的巨大挑战。部分国家已经开始推动能源行业的显著性结构改革, 尤其表现在可再生能源、节能与效率上<sup>[1]</sup>。目前, 各国都加快了发展分布式电源 (DG)、电动汽车的步伐。我国配电网将接入大量光伏发电与电动汽车。光伏发电、电动汽车对电网的影响及

利用<sup>[2-5]</sup>、配电网的优化运行<sup>[6]</sup>、主动配电网技术<sup>[7-11]</sup>等相关问题已成为研究热点。

在日间中午时, 光伏发电处于高峰期, 可能导致电压超出上限; 在夜间负荷高峰期时, 大量电动汽车开始充电, 电力需求急剧上升, 可能导致电压大幅跌落, 超出下限。配电网电压调节的难度将大大增加, 某些情况下, 传统方法无法将所有节点电压调整到额定范围<sup>[12-14]</sup>。另一方面, 光伏发电大量采用单相、两相并网方式, 电动汽车大量采用单相充电方式, 大大增加低压配电网的三相不平衡, 导致三相电压不平衡度越限、影响供电质量、增加配变、线路损耗, 降低对光伏发电、电动汽车的接纳能力。

针对以上问题, 国内外专家学者提出了多种方法与措施。文献 [15-16] 分析了不同渗透率的电动汽车对配电网三相不平衡的影响, 指出其充电功率应在三相之间合理分配。文献 [17] 提出手动改变某些用户的接入相别减小三相

收稿日期: 2019-04-12; 修回日期: 2019-05-08。

作者简介: 姚潇毅 (1990-), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 主要从事电力系统控制方向的研究。

何怡刚 (1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能测试与诊断、集成电路设计、电力规划与设计等方向的研究。

通讯作者: 张剑 (1983-), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力系统负荷建模, 新能源及配电技术方向的研究。

不平衡,但是这种方法大大增加了运维成本,切换次数越多,运维成本越高。文献 [18] 提出自动将用户从一相切换至另一相以提高负荷均衡度,但此种方法需要每家每户安装静态负荷转换器。文献 [19] 提出采用 DSTATCOM 应用于低压配电网平衡三相负荷,代价较高。文献 [20] 提出将低压配电网三相光伏、充电桩逆变器增加 3 个桥臂,修改控制系统,使之成为共直流侧电容器的 3 个独立的单相单元,用于平衡负荷。但是,实际低压配电网光伏逆变器、充电桩主要采用单相并网方式,因此当该方法应用于实际低压配电网时可能由于缺乏足够的三相光伏逆变器、充电桩导致负荷平衡失败。文献 [21] 提出在目标函数中增加负荷平衡的罚函数,通过协调控制电动汽车的充电功率实现负荷平衡。该方法在夜间大量电动汽车接入时能够有效平衡负荷。但是,在白天,大量电动汽车离开配电网前往工作场所,可能由于缺乏足够可调度的电动汽车导致负荷平衡失败。

针对上述的负荷平衡方法代价高或适应性低的不足,本文在文献 [20] 的基础上,从转移重载相负荷至轻载相的基本原理出发,提出了在配电网中配置多副公共直流母线,设计了两种将位置相近的、从不同相接人的光伏逆变器、充电桩直流侧连接至此共同直流母线的具有不同结构与造价的方案。构建了光伏逆变器、充电桩协调优化控制的线性约束混合整数二次规划的模型。模型的目标函数能够兼顾降损与平衡负荷。采用实际 71 节点配电系统仿真计算,验证了所提出方法的性能与效果。

相比于文献 [20],本文所提方法具有以下优势:

1) 实际的低压配电网中的家庭用户一般为单相用户。因此其屋顶光伏接入方式一般为单相接入方式。充电桩亦如此。文献 [20] 的方法只能利用配电网中的三相光伏逆变器与三相充电桩,不能利用配电网中大量已安装的单相光伏逆变器与单相充电桩,在实际中可能由于缺乏足够的三相光伏逆变器与三相充电桩而导致负荷平衡失败。而本文提出的方法不存在这个问题,因为能够利用配电网中大量已安装的单相光伏逆变器与单相充电桩平衡三相负荷。

2) 文献 [20] 的方法未将同一家庭用户中的光伏逆变器、充电桩的直流侧共母线,因此不能充分利用光伏逆变器与充电桩时间上的互补性。而本文方法将光伏逆变器与充电桩直流侧连接于共同直流母线,能够充分利用这种互补性。

3) 采用本文的方法,可以在公共直流母线上连接储能设备、直流负荷或者直流电源,而无需安装新的逆变器或者只需安装少量新的逆变器,从而节省投资,提高系统的可扩展性,而文献 [20] 难以做到。

4) 本文所提出的方法无需修改任一逆变器、充电桩内部的结构与参数。相反,文献 [20] 的方法需要将三相逆变器、三相充电桩中增加 3 个桥臂,而且需要修改内部的控制系統。

## 1 光伏逆变器与充电桩共直流侧母线的方案

### 1.1 方案 1

如图 1 所示,在充电桩出口配置单刀双掷空开。在配

电网中配置多副公共直流母线,将位置相近的、从不同相接人的光伏逆变器、充电桩、光伏板直流侧连接至其上(对于交流充电桩还需经 AC/DC 变流器连接至公共直流母线)。当电动汽车开始充电时,单刀双掷空开触点 1、2 闭合,触点 3、4 断开,电动汽车经充电桩接入配电网。当电动汽车离开配电网时,触点 1、2 断开,触点 3、4 闭合,充电桩直流侧经空开连接至公共直流母线。在白天,大量电动汽车离开配电网前往工作场所,充电桩全部容量可用于将重载相负荷转移至轻载相或将轻载相光伏发电转移至重载相。在夜晚,光伏发电为零,大量电动汽车接入配电网充电,光伏逆变器全部容量可用于将重载相负荷转移至轻载相。光伏逆变器与充电桩具备互补作用。图 1 中黑色箭头表示有功流向示意图。

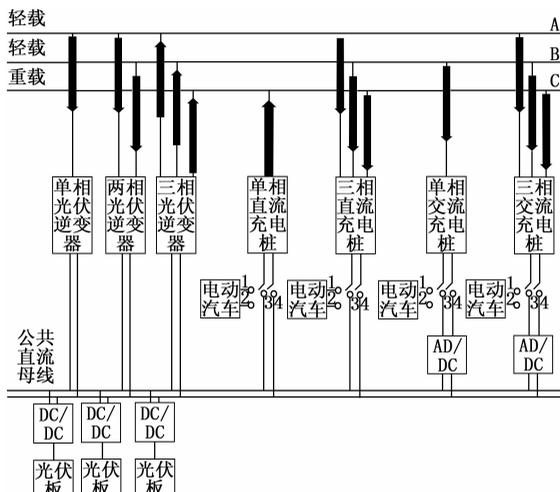


图 1 光伏逆变器与充电桩共直流侧母线的第 1 种方案

### 1.2 方案 2

如图 2 所示,与方案 1 不同,电动汽车不再经空开接入配电网,而是经 DC/DC 变换器连接至公共直流母线。集中控制中心通过控制 DC/DC 变换器的占空比控制电动汽车的充电功率。相比于方案 1,方案 2 的优势在于即使电动汽车接入时,充电桩全部容量仍可用于平衡负荷,而且增加了 DC/DC 占空比控制变量,提高了控制的灵活性。但是需要配置 DC/DC 变换器,价格比空开高,而且 DC/DC 变换器产生能量损耗。

### 1.3 安装方法与造价分析

在实际安装中,公共直流母线可与交流线路并排布置。为了降低母线容量,节省投资,可配置多副公共直流母线,将位置相近的、从不同相接人的光伏逆变器、充电桩的直流侧、光伏板连接于其上。由于直流母线主要起电能的汇集与分配作用,而且长度较短,其上的电量损耗远小于交流系统损耗,可忽略。目前,对于横截面为  $50 \text{ mm}^2$  的铝导线价格约为 800 元每千米,可用做公共直流母线。空开的价格约为几元至几十元每个。AC/DC、DC/DC 变换器的价格约为 1000 元每千瓦。每副直流母线需配置一个直流电压表,价格约为几十元每个。方案总造价一般在几万元。

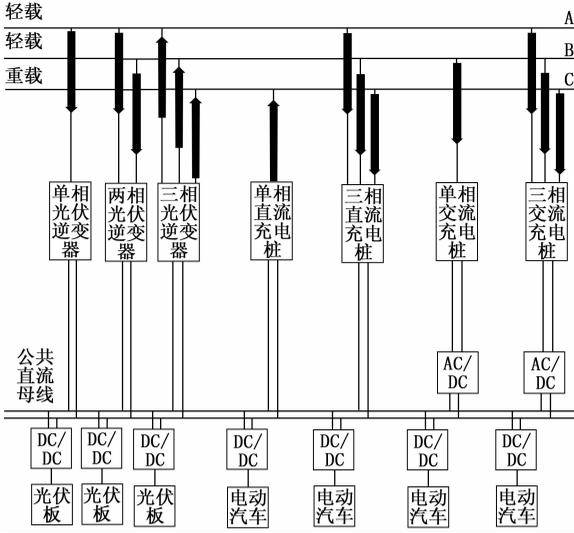


图 2 光伏逆变器与充电桩共直流侧母线的第 2 种方案

## 2 光伏逆变器与充电桩协调优化控制的模型

### 2.1 方案 1 的模型

目标函数为：

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{\alpha \in \{a,b,c\}} \left[ \sum_{n=1}^N \left( P_{n,\alpha,t}^{load} + P_{n,\alpha,t}^{inv1} + P_{n,\alpha,t}^{inv2} + P_{n,\alpha,t}^{inv3} + P_{n,\alpha,t}^{ch1} + P_{n,\alpha,t}^{ch3} + \bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv1} + \bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv2} + \bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv3} + \bar{P}_{n,\alpha,t}^{ch1} + \bar{P}_{n,\alpha,t}^{ch3} \right) \right]^2 \quad (1)$$

式中,  $P_{n,\alpha,t}^{load}$ 、 $P_{n,\alpha,t}^{inv1}$ 、 $P_{n,\alpha,t}^{inv2}$ 、 $P_{n,\alpha,t}^{inv3}$ 、 $P_{n,\alpha,t}^{ch1}$ 、 $P_{n,\alpha,t}^{ch3}$  分别为节点  $n$ 、 $\alpha$  相、 $t$  时段的常规负荷、直流侧与公共直流母线相连的单、两、三相光伏逆变器与单、三相充电桩的有功功率； $\bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv1}$ 、 $\bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv2}$ 、 $\bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv3}$ 、 $\bar{P}_{n,\alpha,t}^{ch1}$ 、 $\bar{P}_{n,\alpha,t}^{ch3}$  分别为直流侧未与公共直流母线相连的单、两、三相光伏逆变器与单、三相充电桩的有功功率。都以从交流电流出为正。 $T$  为协调优化控制总的时段数； $N$  为配电网总的节点数。

所提出的目标函数 (1) 能够兼顾平衡三相负荷与降损<sup>[20]</sup>, 原因如下。

令

$$P_{\alpha}^t = \sum_{n=1}^N \left( P_{n,\alpha,t}^{load} + P_{n,\alpha,t}^{inv1} + P_{n,\alpha,t}^{inv2} + P_{n,\alpha,t}^{inv3} + P_{n,\alpha,t}^{ch1} + P_{n,\alpha,t}^{ch3} + \bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv1} + \bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv2} + \bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv3} + \bar{P}_{n,\alpha,t}^{ch1} + \bar{P}_{n,\alpha,t}^{ch3} \right) \quad (1)$$

简化为  $\min \sum_{t=1}^T [(P_A^t)^2 + (P_B^t)^2 + (P_C^t)^2]$ 。令  $\bar{P}_t = \frac{P_A^t + P_B^t + P_C^t}{3}$ , 一般的、常见的三相负荷均衡的目标函数

数为  $\min \sum_{t=1}^T [(P_A^t - \bar{P}_t)^2 + (P_B^t - \bar{P}_t)^2 + (P_C^t - \bar{P}_t)^2]$ 。

可展开为  $\min \sum_{t=1}^T [(P_A^t)^2 + (P_B^t)^2 + (P_C^t)^2 - 2(P_A^t + P_B^t + P_C^t)\bar{P}_t + 3\bar{P}_t^2] = \min \sum_{t=1}^T [(P_A^t)^2 + (P_B^t)^2 + (P_C^t)^2 - 3\bar{P}_t^2]$ 。

由于  $\sum_{t=1}^T 3\bar{P}_t^2$  是优化时段内, 即一天内三相总的交流负荷的

$\frac{1}{3}$ , 是可以预测的, 可视为恒定值, 因此式 (1) 等价于一般的、常见的三相负荷均衡的目标函数, 因此具有平衡三相负荷的作用。显而易见, 所提出的目标函数 (1) 亦能够降低网损, 这是由于其物理意义是各时段各相总的负荷的平方和累加最小, 能够削峰填谷, 减小负荷方差, 从而降低网损。文献 [24] 证明负荷方差最小与网损最小存在等价关系。

直流侧与公共直流母线相连的单相光伏逆变器的功率约束为：

$$-P_{n,\alpha}^{inv1,max} \leq P_{n,\alpha,t}^{inv1} \leq P_{n,\alpha}^{inv1,max} \quad (2)$$

式中,  $P_{n,\alpha}^{inv1,max}$  为从节点  $n$ 、 $\alpha$  相接入的、直流侧与公共直流母线相连的单相光伏逆变器的最大功率。

直流侧与公共直流母线相连的两相光伏逆变器的功率约束为：

$$P_{n,\alpha,t}^{inv2} = P_{n,\beta,t}^{inv2}, \alpha, \beta \in \{a,b,c\} \text{ 且 } \alpha \neq \beta \quad (3)$$

$$-P_{n,\alpha,t}^{inv2,max} \leq P_{n,\alpha,t}^{inv2} + P_{n,\beta,t}^{inv2} \leq P_{n,\alpha,t}^{inv2,max} \quad (4)$$

式中,  $P_{n,\alpha,t}^{inv2,max}$  为从节点  $n$ 、 $\alpha$  与  $\beta$  相接入的、直流侧与公共直流母线相连的两相光伏逆变器的最大功率。

直流侧与公共直流母线相连的三相光伏逆变器的功率约束为：

$$P_{n,\alpha,t}^{inv3} = P_{n,\beta,t}^{inv3} = P_{n,\gamma,t}^{inv3} \quad (5)$$

$$-P_{n,\alpha,t}^{inv3,max} \leq \sum_{\alpha \in \{a,b,c\}} P_{n,\alpha,t}^{inv3} \leq P_{n,\alpha,t}^{inv3,max} \quad (6)$$

式中,  $P_{n,\alpha,t}^{inv3,max}$  为节点  $n$  接入的、直流侧与公共直流母线相连的三相光伏逆变器的最大功率。

直流侧未与公共直流母线相连的单相光伏逆变器的功率约束为：

$$\bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv1} = -P_{n,\alpha,t}^{pv1} \quad (7)$$

式中,  $P_{n,\alpha,t}^{pv1}$  为节点  $n$ 、 $\alpha$  相、 $t$  时段的、直流侧未与公共直流母线相连的单相光伏发电的有功。

直流侧未与公共直流母线相连的两相光伏逆变器的功率约束为：

$$\bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv2} = \bar{P}_{n,\beta,t}^{inv2} = -\frac{P_{n,\alpha,t}^{pv2}}{2}, \alpha, \beta \in \{a,b,c\} \text{ 且 } \alpha \neq \beta \quad (8)$$

式中,  $P_{n,\alpha,t}^{pv2}$  为从节点  $n$ 、 $\alpha$  与  $\beta$  相接入、 $t$  时段的、直流侧未与公共直流母线相连的两相光伏发电的有功。

直流侧未与公共直流母线相连的三相光伏逆变器的功率约束为：

$$\bar{P}_{n,\alpha,t}^{inv3} = \bar{P}_{n,\beta,t}^{inv3} = \bar{P}_{n,\gamma,t}^{inv3} = -\frac{P_{n,\alpha,t}^{pv3}}{3} \quad (9)$$

式中,  $P_{n,\alpha,t}^{pv3}$  为从节点  $n$  接入、 $t$  时段的、直流侧未与公共直流母线相连的三相光伏发电的有功。

假设单、三相充电桩的空开状态分别记为  $K_{n,\alpha,t}^{ch1}$ 、 $K_{n,t}^{ch3}$ , 其值为 0 表示触点 3、4 闭合, 触点 1、2 断开; 其值为 1 表示触点 1、2 闭合, 触点 3、4 断开。

直流侧与公共直流母线相连的单相充电桩的功率约束为：

$$-P_{n,\alpha}^{ch1,max} \leq P_{n,\alpha,t}^{ch1} \leq P_{n,\alpha}^{ch1,max} \text{ 当 } K_{n,\alpha,t}^{ch1} = 0 \quad (10)$$

$$0 \leq P_{n,\alpha,t}^{ch1} \leq P_{n,\alpha}^{ch1,max} \text{ 当 } K_{n,\alpha,t}^{ch1} = 1 \quad (11)$$

式中,  $P_{n,\alpha}^{ch1,max}$  为从节点  $n$ 、 $\alpha$  相接入的、直流侧与公共直流母线相连的单相充电桩的最大功率。经此充电桩充电的电动汽车能量需求约束为:

$$\eta_{n,\alpha} \sum_{t=t_{n,\alpha}^s}^{t_{n,\alpha}^e} P_{n,\alpha,t}^{ch1} K_{n,\alpha,t}^{ch1} \Delta t = E_{n,\alpha}^{cap} - E_{n,\alpha}^{mi} \quad (12)$$

式中,  $\eta_{n,\alpha}$  为充电效率;  $E_{n,\alpha}^{mi}$ 、 $E_{n,\alpha}^{cap}$  分别为电动汽车电池的起始能量与容量;  $t_{n,\alpha}^s$ 、 $t_{n,\alpha}^e$  分别为充电的开始与结束时间;  $\Delta t$  为采样与控制的时间间隔。

直流侧与公共直流母线相连的三相充电桩的功率约束为:

$$P_{n,a,t}^{ch3} = P_{n,b,t}^{ch3} = P_{n,c,t}^{ch3} \quad (13)$$

$$0 \leq \sum_{a \in \{a,b,c\}} P_{n,a,t}^{ch3} \leq P_{n,max}^{ch3} \text{ 当 } K_{n,t}^{ch3} = 1 \quad (14)$$

$$-P_{n,max}^{ch3} \leq \sum_{a \in \{a,b,c\}} P_{n,a,t}^{ch3} \leq P_{n,max}^{ch3} \text{ 当 } K_{n,t}^{ch3} = 0 \quad (15)$$

式中,  $P_{n,max}^{ch3}$  为从节点  $n$  接入的、直流侧与公共直流母线相连的三相充电桩的最大功率。经此三相充电桩充电的电动汽车能量需求约束为:

$$\eta_n \sum_{a=1}^3 \sum_{t=t_n}^{t_n} P_{n,a,t}^{ch3} K_{n,t}^{ch3} \Delta t = E_n^{cap} - E_n^{mi} \quad (16)$$

式中,  $\eta_n$  为充电效率;  $E_n^{mi}$ 、 $E_n^{cap}$  分别为电动汽车的起始能量与电池容量;  $t_{n,s}$ 、 $t_{n,e}$  分别为充电的开始与结束时间。

直流侧未与公共直流母线相连的单相充电桩的功率约束为:

$$0 \leq \bar{P}_{n,\alpha,t}^{ch1} \leq P_{n,\alpha}^{ch1,max} \quad (17)$$

经此单相充电桩充电的电动汽车的能量需求同式 (12)。

直流侧未与公共直流母线相连的三相充电桩的功率约束为:

$$\bar{P}_{n,a,t}^{ch3} = \bar{P}_{n,b,t}^{ch3} = \bar{P}_{n,c,t}^{ch3} \quad (18)$$

$$0 \leq \sum_{a \in \{a,b,c\}} \bar{P}_{n,a,t}^{ch3} \leq P_{n,max}^{ch3} \quad (19)$$

经此三相充电桩充电的电动汽车的能量需求同 (16)。

由于光伏板发出有功与电动汽车消耗有功在时间上大体是错开的, 不匹配的。在实际应用中, 储能系统可经 DC/DC 变换器接入公共直流母线, 用于削峰填谷, 提高配电网对光伏发电与电动汽车的接纳能力。储能系统存储的能量约束为:

$$E_{bat}^{t+1} = E_{bat}^t + \left( \eta_{charge} P_{charge}^t - \frac{P_{discharge}^t}{\eta_{discharge}} \right) \Delta t \quad (20)$$

$$t = 1, 2, \dots, T-1$$

式中,  $E_{bat}^t$ 、 $P_{charge}^t$ 、 $P_{discharge}^t$  分别为  $t$  时段储能系统存储的能量、充、放电功率;  $\eta_{charge}$ 、 $\eta_{discharge}$  分别为充、放电效率。

为保证在新的调度周期内具有相同的调节性能, 本周期的初始值  $E_{bat}^1$  应与下周期的初始值  $E_{bat}^T$  相等<sup>[22]</sup>, 即:

$$E_{bat}^T = E_{bat}^1 \quad (21)$$

储能系统的充电功率约束为:

$$0 \leq P_{charge}^t \leq P_{charge}^{max} D_{charge}^t \quad (22)$$

式中,  $P_{charge}^{max}$  为储能系统的最大充电功率;  $D_{charge}^t$  为表示处于充电状态的 0-1 离散变量。

储能系统的放电功率约束为:

$$0 \leq P_{discharge}^t \leq P_{discharge}^{max} D_{discharge}^t \quad (23)$$

式中,  $P_{discharge}^{max}$  为储能系统的最大放电功率;  $D_{discharge}^t$  为表示处于放电状态的 0-1 离散变量。

任意时刻, 储能系统只能处于充电、放电、非充非放 3 种状态之一, 故  $D_{charge}^t$  与  $D_{discharge}^t$  的约束条件为:

$$D_{charge}^t + D_{discharge}^t \leq 1 \quad (24)$$

为避免深充深放, 延长储能系统的寿命, 将其存储电量的范围设定为:

$$E_{bat}^{max} \times 20\% \leq E_{bat}^t \leq E_{bat}^{max} \times 90\% \quad (25)$$

式中,  $E_{bat}^{max}$  为储能系统的容量。

由于直流母线上的功率损耗很小, 可忽略。第  $m$  个区域公共直流母线上的功率平衡方程为:

$$\sum_{a \in \{a,b,c\}} \sum_{n=1}^{N_m} \left( P_{n,\alpha,t}^{pv1} + P_{n,\alpha,t}^{pv2} + P_{n,\alpha,t}^{pv3} - (K_{n,\alpha,t}^{ch1} - 1) P_{n,\alpha,t}^{ch1} - (K_{n,t}^{ch3} - 1) P_{n,t}^{ch3} \right) = \sum_{n=1}^{N_m} (-P_{n,t}^{PV}) + P_{charge}^t - P_{discharge}^t \quad (26)$$

式中,  $P_{n,t}^{PV}$  为第  $m$  副公共直流母线区域中的节点  $n$ 、 $t$  时段光伏板发出的有功。  $N_m$  为第  $m$  副公共直流母线上连接的光伏板的数量。

## 2.2 方案 2 的模型

对于方案 2 的模型, 目标函数同式 (1)。光伏逆变器的约束同式 (2) ~ (9)。直流侧未与公共直流母线相连的充电桩的约束条件同式 (12)、(16) ~ (19)。储能系统的约束条件同式 (20) ~ (25)。直流侧与公共直流母线相连的单、三相充电桩的功率约束分别为式 (27)、(28) ~ (29)。

$$-P_{n,\alpha}^{ch1,max} \leq P_{n,\alpha,t}^{ch1} \leq P_{n,\alpha}^{ch1,max} \quad (27)$$

$$P_{n,a,t}^{ch3} = P_{n,b,t}^{ch3} = P_{n,c,t}^{ch3} \quad (28)$$

$$-P_{n,max}^{ch3} \leq \sum_{a \in \{a,b,c\}} P_{n,a,t}^{ch3} \leq P_{n,max}^{ch3} \quad (29)$$

电动汽车的充电功率约束为:

$$0 \leq P_{k,t}^{EV} \leq P_k^{EV,max} \quad (30)$$

式中,  $P_{k,t}^{EV}$ 、 $P_k^{EV,max}$  分别为第  $k$  辆电动汽车  $t$  时段的充电功率及其最大值。

电动汽车充电需求约束为:

$$\eta_k \sum_{t=t_k}^{t_k} P_{k,t}^{EV} \Delta t = E_k^{cap} - E_k^{mi} \quad (31)$$

$\eta_k$ 、 $E_k^{mi}$ 、 $E_k^{cap}$  分别为第  $k$  辆电动汽车的充电效率、电池起始能量及容量。  $t_{k,s}$ 、 $t_{k,e}$  分别为开始、结束充电的时间。

第  $m$  副共直流母线上的功率平衡约束为:

$$\sum_{a \in \{a,b,c\}} \sum_{n=1}^{N_m} (P_{n,\alpha,t}^{pv1} + P_{n,\alpha,t}^{pv2} + P_{n,\alpha,t}^{pv3} + P_{n,\alpha,t}^{ch1} + P_{n,\alpha,t}^{ch3}) = \sum_{n=1}^{N_m} (-P_{n,t}^{PV}) + \sum_{k=1}^{K_m} P_{k,t}^{EV} + P_{charge}^t - P_{discharge}^t \quad (32)$$

式中,  $K_m$  为  $t$  时段连接于第  $m$  副公共直流母线上的电动汽车总数量。

由于  $K_{n,\alpha,t}^{ch1}$ 、 $K_{n,t}^{ch3}$  取决于电动汽车的接入时间, 是可预测的, 故方案 1、2 的模型是线性约束的混合整数二次规划模型。

采用  $\varphi_U$  表征优化时段内配电网的三相不平衡度的最大值。 $\varphi_U$  定义为:

$$\varphi_U = \max_{i,t} \left( \frac{U_{\max,i,t} - U_{\min,i,t}}{U_{\text{avg},i,t}} \right) \quad (33)$$

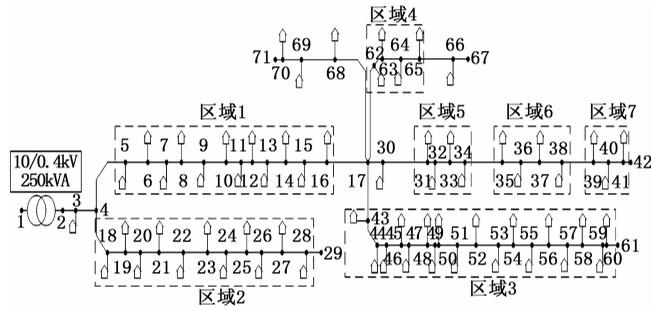
式中,  $U_{\max,i,t}, U_{\min,i,t}, U_{\text{avg},i,t}$  分别为  $t$  时段节点  $i$  三相电压的最大值、最小值与平均值。采用  $\varphi_I$  表征优化时段内根节点三相电流不平衡度的最大值, 其表达式与式 (33) 类似。

### 3 仿真算例

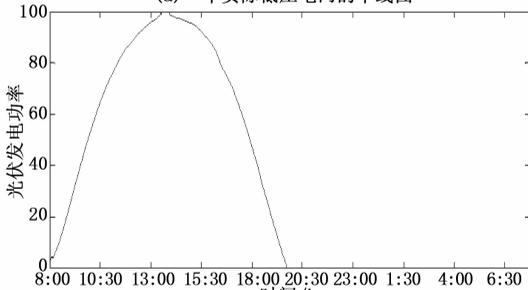
#### 3.1 仿真算例 1

##### 3.1.1 仿真条件

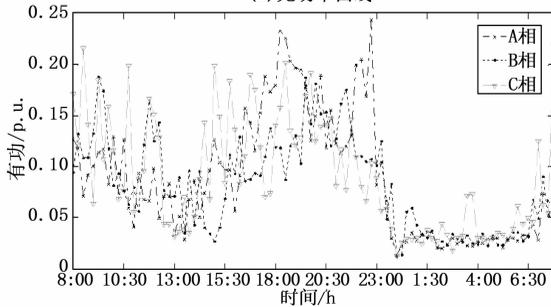
采用 71 节点实际低压配电网仿真计算, 验证所提方法的性能, 如图 3 所示。负荷节点 37、49、55、60 为单相节点且接入相别分别为 B、C、C、A, 其它仿真条件与文献 [20]、[23] 基本相同。每相功率、电压基准值分别为 250/3 kVA、 $10/\sqrt{3}$  kV、0.23 kV。母线 1 为平衡节点, 电压为 1.00 p. u.。采用前推回代算法进行潮流计算。



(a) 一个实际低压电网的单线图



(b) 光功率曲线



(c) 每相总的负荷

图 3 所提方法的性能

其它仿真条件设定如下:

1) 假设所有车主均愿意参与优化充电, 优化时段为当日 8:00 至次日 8:00。接入 A、B 相的家庭用户拥有的电

动车充电需求为 10 kWh, 接入 C 相的家庭用户拥有的电动车充电需求为 20 kWh。

2) 在每个区域 1~7 中配置一副公共直流母线, 其电阻为 0.369  $\Omega$ /km, 电压控制为 400 V。

##### 3.1.2 仿真结果

方案 1、2 的模型均为线性约束二次规划问题。目前有多种成熟的商业软件可十分方便快速的求解。本文采用 MATLAB 优化函数 quadprog 进行求解。PC 机处理器型号为 Intel (R) Core (TM) i3-4150 双核 3.5 GHz, 内存 20 G。对于方案 1 的模型程序计算时间为 1.732 s, 对于方案 2 的模型程序计算时间为 2.155 s。

图 4、5 分别为采用方案 1、2 优化得出的 A、B、C 各相总负荷标么值。采用每相总的常规负荷功率加光伏逆变器功率加充电桩功率而得到的总功率有名值除以每相的基准功率 250/3 kVA 得来。对比图 3 (c), 可以看出, 由于目标函数兼顾了平衡负荷, 通过协调控制光伏逆变器、充电桩功率, 平抑了负荷的波动, 三相总负荷曲线是重合的。在白天 13:10 左右光伏发电达到最大值, 远大于各相总常规家庭负荷, 因此各相总功率出现负的最大值。

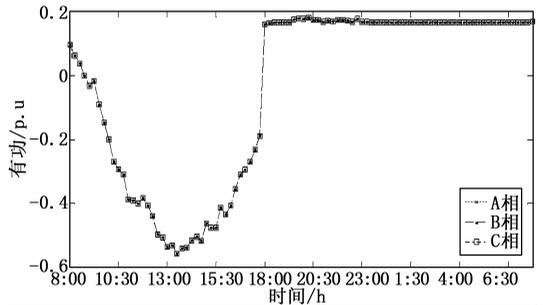


图 4 采用方案 1 得出的各相总负荷

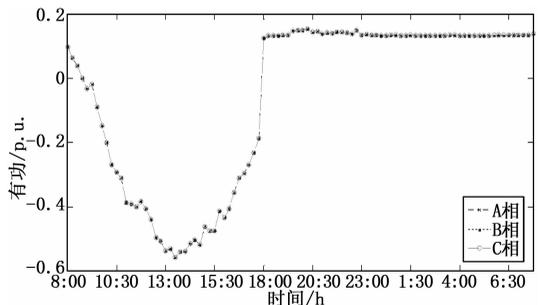
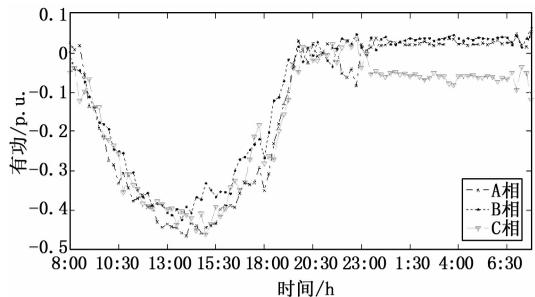


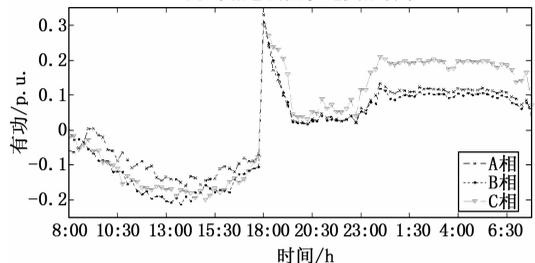
图 5 采用方案 2 得出的各相总负荷

图 6、7 分别为光功率曲线、采用方案 1、2 的 A、B、C 各相常规负荷、光伏逆变器、充电桩总的有功曲线。可以看出, 在电动汽车接入前的 8:00~18:00 时段, 两种方案总的光伏逆变器、充电桩功率曲线分别是近似相同的。此时段, 充电桩的功率为负, 即向配电网注入有功以平衡负荷。若无充电桩的接入公共直流母线, 由于 C 相光伏逆变器容量大于 A、B 两相, 且在中午时逆变器都处于满载运行状态, 此时段三相负荷将出现严重不平衡。

在电动汽车接入后的 23:00~6:30 时段, 此时常规负荷较小, 光伏发电为零。对于方案 1, 由于从 C 相接入了电

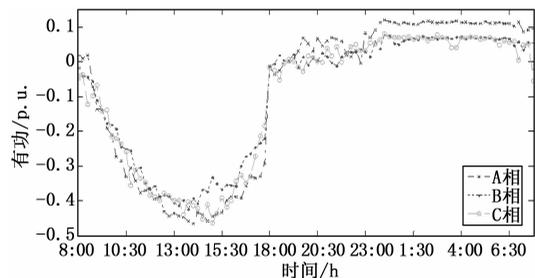


(a) 每相总的光伏逆变器功率

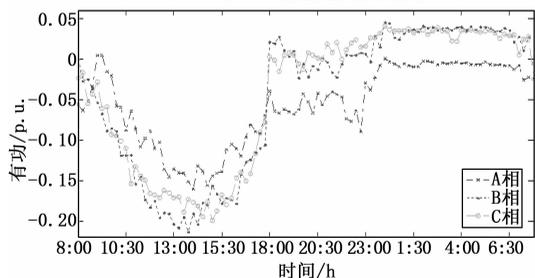


(b) 每相充电桩功率

图 6 采用方案 1 得出的各相常规负荷、光伏逆变器、充电桩总功率曲线



(a) 每相总的光伏逆变器功率



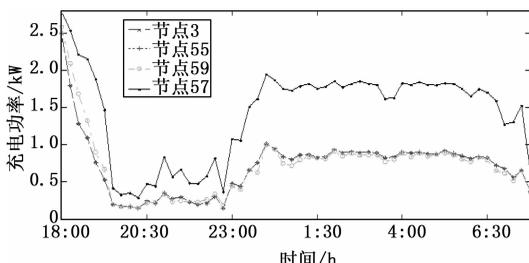
(a) 每相总的光伏逆变器功率

图 7 采用方案 2 得出的各相常规负荷、光伏逆变器、充电桩功率曲线

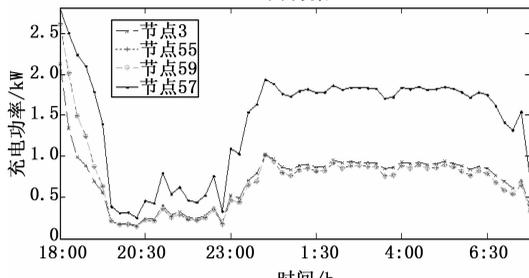
电动汽车充电需求为从其它两相接入的电动汽车充电需求之和, 充电桩功率较大, 此时 A、B 相光伏逆变器总功率为正, C 相光伏逆变器总功率为负, 以补偿电动汽车充电负荷引起的三相不平衡。对于方案 2, 由于电动汽车从公共直流母线经 DC/DC 变换器接入, 在 23:00~6:30 时段, 各相总的光伏逆变器功率均为正。

典型节点电动汽车的最优充电功率曲线如图 8 所示。可以看出, 当光伏发电为零且常规负荷处于高峰时, 充电功率较小。在光伏发电为零且常规负荷处于低谷时, 充电功率较大。在傍晚 18:00 时, 虽然常规负荷较大, 但由于

此时光伏发电功率仍较大, 因此充电功率较大。



(a) 方案 1



(a) 方案 1

图 8 电动汽车的最优充电功率

图 9 为采用第 2 种方案, 配电网交流总负荷、总常规负荷、公共直流母线总供电负荷的关系曲线。由于从公共直流母线接入的光伏板发出的功率是不可控的, 交流总负荷曲线在光伏发电高峰期出现峰值。电动汽车接入后的 18:00~8:00 时段, 公共直流母线的总供电功率与总常规负荷曲线变化趋势相反, 故此时段配电网交流总负荷曲线波动很小, 即通过调度电动汽车充电功率实现了削峰填谷。

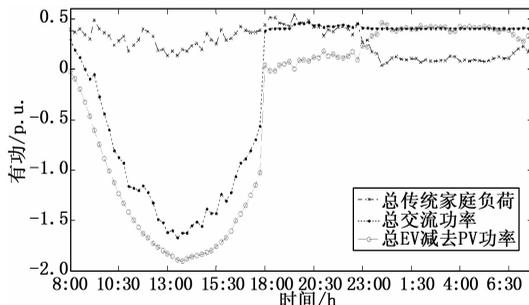


图 9 采用第 2 种方案的负荷关系曲线

当不施加控制时, 配电网各相总负荷曲线如图 10 所示。可以看出, 在 13:10 左右的光伏发电高峰期, 以及傍晚 19:00 左右的常规负荷高峰期各相总负荷达到峰值。而且三相负荷不平衡十分显著。基于方案 2, 采用文献 [22] 以三相总负荷方差最小为目标函数, 得出的配电网各相总负荷曲线如图 11 所示。可以看出, 三相负荷不平衡仍然存在。

采用方案 1、2 以及无序充电时配电网最小、大电压曲线如图 12 所示。可以看出, 应用所提方法, 任意时刻电压均处于 0.96~1.08p.u. 范围内。无序充电导致在中午光伏发电高峰期时电压超出 1.1p.u., 在夜间负荷高峰期时, 电压低于 0.9p.u.。

不同情景下的网损曲线如图 13 所示。可以看出, 由于

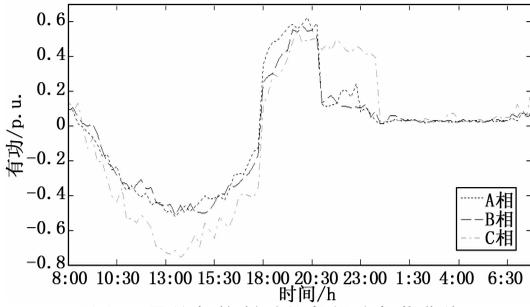


图 10 不施加控制时的各相总负荷曲线

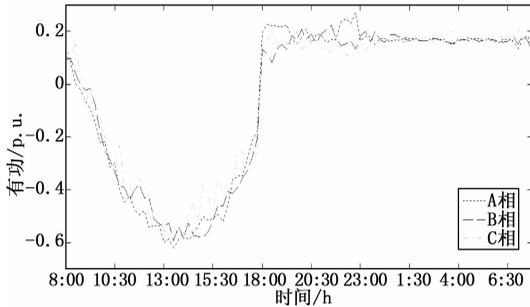
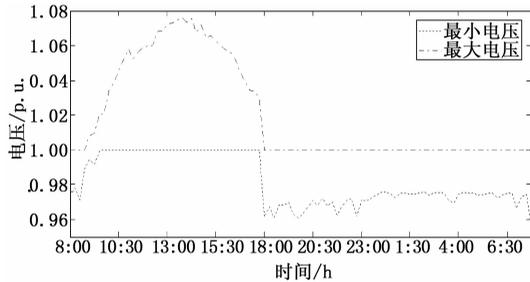
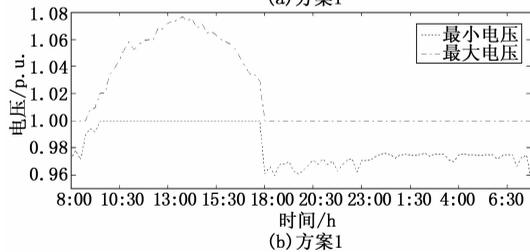


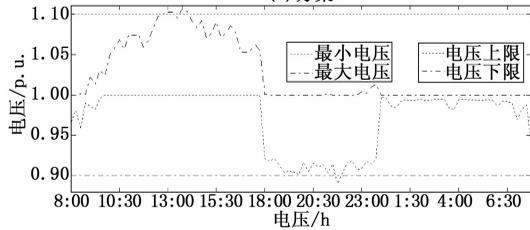
图 11 采用方案 2 应用经典目标函数得出的各相总负荷



(a) 方案 1



(b) 方案 2



(c) 无序充电

图 12 最小与最大电压

目标函数兼具降损作用，因此在光伏发电高峰期时网损低于不施加控制时。所提方法在夜间网损较均匀，能够避免傍晚大量电动汽车接入后无序充电导致网损大幅增加。

一天内总网损、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  的计算结果如表 1 所示。可以看出，采用方案 1、2 的公共直流母线上的总网损比交流系统的总网损小几个数量级，可以忽略。方案 1、2 的总网损、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  接近，低于以三相总负荷方差最小为目标函数的经

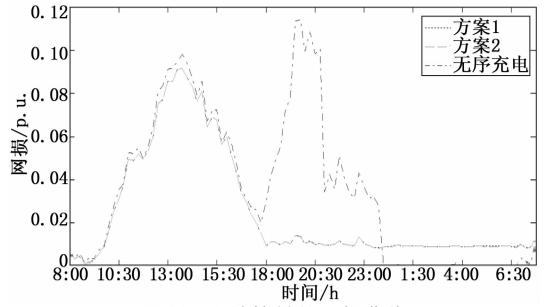


图 13 3 种情景的网损曲线

典方法，远低于无序充电的情景。可以得出结论：采用本文所提出的方法，三相负荷不平衡问题得到极大改善，同时可以降低网损，改善三相电压、电流不平衡度。

表 1 四种情景下网损、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  的对比

情景	交流网损	直电网损	$\varphi_1$	$\varphi_2$
方案 1	49.0697kWh	6.3016Wh	0.4306	0.0315
方案 2	49.0158kWh	5.2347Wh	0.4306	0.0314
无序充电	76.7884kWh	—	2.1614	0.1129
经典方法	56.3495kWh	—	1.7902	0.0617

### 3.2 仿真算例 2

#### 3.2.1 仿真条件

在区域 1~3 的公共直流母线上各经 DC/DC 变换器接入一个储能设备。其容量分别为 60, 60, 80 kWh，最大充、放电功率相同，分别为 33, 33, 44 kW。采用方案 2，其它仿真条件同算例 1。

#### 3.2.2 仿真结果

采用 CPLEX 中的优化函数 cplexmiqp 进行模型求解，程序运行时间为 3.425 秒。各相总功率曲线如图 14 所示。相比于图 4、5，各相总功率峰值、方差显著减小。因此，网损进一步降低。

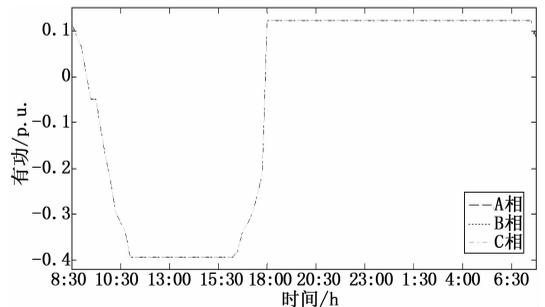


图 14 采用方案 2 各相总负荷功率

区域 3 中储能设备的充、放电功率分别如图 15、16 所示。可以看出，在光伏发电高峰期时，充电功率较大，在常规负荷高峰期时，发电功率较大。

区域 3 中的储能设备存储的能量如图 17 所示。可以看出，在充电期间，存储的能量增加较快。在放电期间，存储的能量下降较快。在深夜负荷低谷 0:00~4:00 时段，由于充、放电功率为零，存储的能量保持不变。

充、放电状态 0-1 变量曲线分别如图 18、19 所示。在

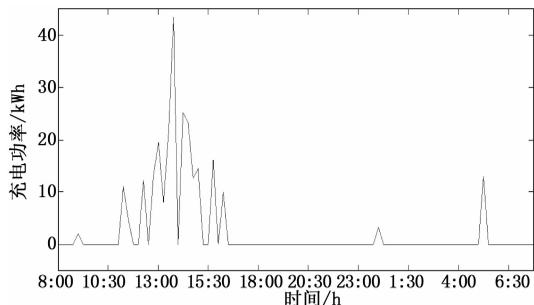


图 15 储能系统的充电功率

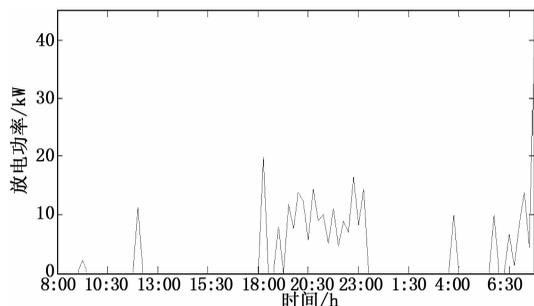


图 16 储能系统的放电功率

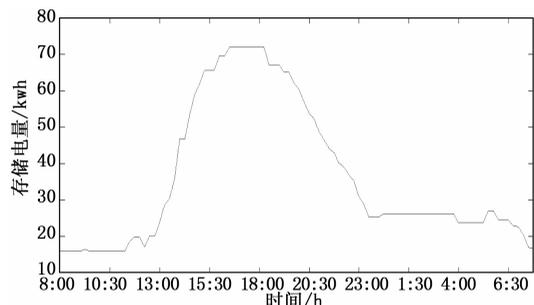


图 17 储能系统存储的能量

充(放)电功率不为零时,充(放)电状态变量为 1。然而,在 1:30~3:00 时段,放电功率为零,放电状态变量为 1。在此时段放电状态变量亦可等于零,因此所构建的混合整数二次规划模型含有多个最优解,是一个多解问题。

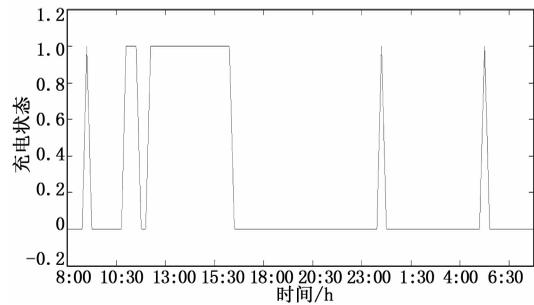


图 18 充电状态

#### 4 结论

平衡的三相四线或五线制低压配电网能够显著增加对光伏发电、电动汽车的接纳能力。本文提出在低压配电网配置多副公共直流母线,设计了两种将位置相近的、从不同相接入的光伏逆变器、充电桩、光伏板直流侧连接至共同直流母线的方案。构建了光伏逆变器、充电桩、电动汽

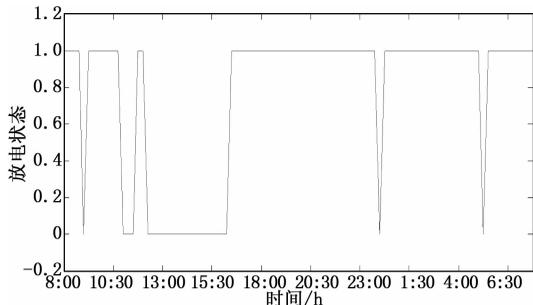


图 19 放电状态

车、储能系统协调优化控制的线性约束混合整数二次规划的模型。模型的目标函数能够兼顾降损与平衡负荷。采用实际 71 节点低压配电网仿真计算,结果表明,所提出的方法计算速度快,满足在线运行的要求,能够完全平衡三相负荷,降低网损、削峰填谷、提高供电电压质量。本文方法的另一优势是在公共直流母线上能够接入直流负荷、电源等,适应性、可扩展性好。

值得指出的是虽然本文所提方法需要进行常规负荷与光伏的出力预测。但是,由于文章构建的模型为线性约束的凸二次规划模型,计算速度非常快,为秒钟级,文章假设采样的时间间隔为 15 分钟,可进一步缩短为 5 分钟甚至 1 分钟,计算速度能够满足实时性要求,可采用滚动式优化,完全能够克服预测误差。

换种场景,文章的结论仍然是成立的,这是因为本文所提出的方案充分利用了光伏逆变器与充电桩的容量的互补作用,能够将重载相负荷转移至轻载相,具有平衡三相负荷的功能。而且作者做了大量的仿真研究,针对多种工况,均证实了所提的方法完全有效。

#### 参考文献:

- [1] 陶 顺,肖湘宁,彭 骋. 有源智能配电网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 张 剑,孙元章,彭晓涛,等. 含有固体氧化物燃料电池的广义负荷建模 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (4): 78-84.
- [3] 张 剑,孙元章. 三相单级光伏并网系统对配网侧负荷建模的影响 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (2): 73-78.
- [4] 张 剑,孙元章. 含有分布式电源的广义负荷建模研究 [J]. 电网技术, 2011, 35 (8): 41-46.
- [5] Zhang J, He Y G, Cui M J, et al. Primal dual interior point dynamic programming for coordinated charging of electric vehicles [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016.
- [6] Zhang J, Yuan X D, Yuan Y B. A novel genetic algorithm based on all spanning trees of undirected graph for distribution network reconfiguration [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2 (2): 143-149.
- [7] 王永杰,吴文传,张伯明. 考虑负荷量测和光伏不确定性的主动配电网鲁棒电压控制 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (9): 138-144.
- [8] 刘 斌,刘 锋,梅生伟,等. 基于二阶锥优化的有载调压变压

器主动配电网最优潮流. 电力系统自动化, 2015, 39 (19): 40 - 46.

[9] Zheng W Y, Wu W C, Zhang B M, et al. A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (2): 1021 - 1033.

[10] Gan L W, Topcu U, Low S H. Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging [J]. IEEE Transactions on power system, 2013, 28 (2): 940 - 951.

[11] Ma J Z, Callaway D, Hiskens I. Decentralized charging control of large populations of plug - in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2013, 21 (1): 67 - 78.

[12] Wang P F, Liang D H, Yi J L, et al. Integrating electrical energy storage into coordinated voltage control schemes for distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (2): 1018 - 1032.

[13] Cheng L, Chang Y, Huang R. Mitigating voltage problem in distribution system with distributed solar generation using electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 6 (4): 1475 - 1484.

[14] Katiraei F, Aguerro J R. Solar PV integration challenges [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2011, 9 (3): 62 - 71.

[15] Jian L, et al. Regulated charging of plug - in hybrid electric vehicles for minimizing load variance in household smart micro-grid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (8): 3218 - 3226.

[16] Putrus G A, Suwanapingkapl P, Johnston D, et al. Impact of electric vehicles on power distribution networks [A]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Michigan, USA,

2009: 827 - 831.

[17] Weckx S, DeMiguel C C, Vingerhoets P, et al. Phase switching and phase balancing to cope with a massive photovoltaic penetration [A]. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013) [C]. 2013: 1 - 4.

[18] Shahnia F, Wolfs P J, Ghosh A. Voltage unbalance reduction in low voltage feeders by dynamic switching of residential customers among three phases [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (3): 1318 - 1327.

[19] Shahnia F, Ghosh A, Ledwich G, et al. Voltage unbalance improvement in low voltage distribution networks using custom power devices [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 55 (3): 362 - 377.

[20] Weckx S, Driesen J. Load balancing with EV chargers and PV inverters in unbalanced distribution grids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6 (2): 635 - 643.

[21] 占恺峒, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑三相负荷平衡的电动汽车有序充电策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (17): 201 - 207.

[22] Gabash A, Li P. Active - Reactive optimal power flow in distribution networks with embedded generation and battery storage [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27 (4): 2026 - 2035.

[23] Tant J, Geth F, Six D, et al. Multi - objective battery storage to improve PV integration in residential distribution grids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4 (1): 182 - 191.

[24] Sortomme E, et al. Coordinated charging of plug in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2 (1): 198 - 205.

(上接第 137 页)

[7] 汪筱阳, 王 瑛, 朱参世, 等. 具有跨邻居传播能力的信息辐射模型研究 [J]. 物理学报, 2017, 66 (3): 038901.

[8] Li Q X, Ma J H. Research on price Stackelberg game model with probabilistic selling based on complex system theory [J]. Commun. Nonlinear SciNumerSimulat., 2016, 30: 387 - 400.

[9] Dessavre D G, Marquez J E R, Barker K. Multidimensional approach to complex system resilience analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 149: 34 - 43.

[10] McCartney M, Glass D H. The dynamics of coupled logistic social groups [J]. Physica A., 2015, 427: 141 - 154.

[11] Gonçalves W N, Machado B B, Bruno O M. A complex network approach for dynamic texture recognition [J]. Neurocomputing. 2015, 153: 211 - 220.

[12] Wang X Y, Wang Y, Zhu L, et al. A novel approach to characterize information radiation in complex networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2016, 452: 94 - 105.

[13] Abe S, Suzuki N. Universal clustering structure and  $C \approx 0.85$  scaling in complex earthquake networks [J]. Physica A. 2015, 421: 343 - 346.

[14] NeliBlagus, Lovrosubelj, Weiss G, et al. Sampling promotes community structure in social and information networks [J]. Physica A., 2015, 432: 206 - 215.

[15] Kim Y, Kim J, Yook S H. Information transfer network of global market indices [J]. Physica A., 2015, 430: 39 - 45.

[16] 汪筱阳, 王 瑛, 朱 琳. 应用复杂网络的航空维修安全信息扩散模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报. 2016, 48 (5): 166 - 171.

[17] Jiménez A. A complex network model for seismicity based on mutual information [J]. Physica A., 2013, 392: 2498 - 2506.

[18] 段德忠, 刘承良, 杜德斌, 等. 基于二分网络的北京公交线路布局的空间依赖性 [J]. 地理学报, 2016, 71 (12): 2185 - 2198.

[19] 赵 威. 二分网络局部社团发现算法的研究与应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.

[20] 毛一帆. 含时二分网络中重要节点的识别研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2017.

[21] 汪小帆, 李 翔, 陈关荣. 网络科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2017.