

储能式快速充电站负荷功率离散化模型建立

何 阳¹, 张 宇², 王育飞¹, 方超明³, 方 陈², 薛 花¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437;
3. 国网遂宁供电公司, 四川 遂宁 629000)

摘 要:电动汽车随机进入充电站进行快速充电, 容易造成电网过负荷和不确定性峰荷。为提高电网稳定性, 减小随机充电带来的功率波动, 提出了充电负荷离散化储能配置模型。将时间上连续的充电负荷曲线离散为等间隔时段的充电序列, 电网供电功率上限和储能容量量化为可服务的充电桩个数, 在设定的时间内用排队理论描述负荷状态, 并以二维离散时间马尔科夫链建立系统负荷状态转移关系, 确立单个储能式快速充电站随机充电模型。根据离散化负荷的状态空间和概率分布, 进行不同负荷状态下的经济性分析, 最后通过算例仿真, 在电网供电功率和储能功率的不同配比下, 分析电动汽车到达量对服务质量和经济性的影响, 验证模型的有效性。

关 键 词:电动汽车; 储能配置; 快速充电; 排队理论; 马尔科夫链

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.009 中图分类号:TM910 文章编号:1673-9140(2021)05-0072-07

Discrete modeling of load power for energy storage fast charging station

HE Yang¹, ZHANG Yu², WANG Yufei¹, FANG Chaoming³, FANG Chen², XUE Hua¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China; 3. State Grid Suining Electric Power Supply Company, Suining 629000, China)

Abstract: Fast and random charging of electric vehicles (EVs) in the charging station can easily cause the overload and uncertain peak load of the grid. In order to improve the stability of the grid and reduce the power fluctuation caused by random charging, a charging load discrete model for energy storage configuration is proposed. The time-continuous charging load curve is discretized into charging sequences at equal intervals, the power supply cap of the grid and energy storage capacity are quantified to the number of available charging piles, and the load status is described by applying queuing theory within the set time. Then the system load state transition relation is established by applying two-dimensional discrete time Markov chain, thus a random charging model of a single energy storage fast charging station is established. According to the state space and probability distribution of the discretized load, the economics under different load statuses are analyzed. Finally, through the case study, the impact of the EV arrival rate on the service quality and economy is analyzed under different ratios of grid power and energy storage power, so that the feasibility of the model is verified.

Key words: electric vehicle; energy storage configuration; fast charging; queuing theory; Markov chain

收稿日期:2018-09-03; 修回日期:2019-04-15

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0101800); 国家电网公司总部科技项目(520940170017)

通信作者:何 阳(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事电动汽车充电站新能源供给与储能配置研究; E-mail: heyang_epiphyllum@163.com

近年来,在能源危机和环境恶化的背景下,能源结构不断地加速低碳转型,而交通电气化是实现低碳经济转型的重要途径。电动汽车作为一种使用清洁能源的交通工具,在全世界范围内得到了快速普及。相比于传统燃油汽车,纯电动汽车行驶里程较短,充电时间较长,为了给用户提供方便快捷的充电服务,在公共区域建立快速充电站,并对快速充电设施进行规划显得尤为重要^[1]。然而,大量的电动汽车随机接入配电网进行充电,将影响电网的安全稳定运行^[2],且随着电池快充技术的发展,快充模式对电网的冲击不断地加剧。在快速充电站配置储能,能够改善电动汽车充电对电网的功率需求,促进配电网与充电汽车之间电能的供需平衡,降低充电站扩容给电网带来的附加建设和改造的成本^[3]。

随着电动汽车的普及和快速充电技术的发展,储能用于充电站的研究逐渐增多。现有的研究有储能充电与储能换电 2 种方式^[4-5],为了实现电网与充电站之间电能的灵活互动,将储能系统纳入充电站中,构成充换储一体化电站^[6]。换电模式下储能电池的时空约束比充电模式小,具有更好的便捷性,但缺乏电池标准的统一,因此目前仍以储能充电为主。根据运行数据分析,将储能应用于电动公交车快速充电站,能够降低总成本的 22.85%^[7]。文献[8-9]运用排队理论构建电动汽车充电服务模型,研究快速充电模式下储能容量的优化配置,并以经济性验证了模型的可行性;文献[10]将电动汽车数量、光伏电能和储能荷电状态作为系统状态,建立多维离散时间马尔科夫链模型,对光伏电池板数量和储能容量进行优化,减小了充电站投资成本;文献[11]提出了储能系统在充电站中的运行方式和控制策略,用储能缓冲电动汽车快速充电功率,分析在不同脉冲充电功率下储能系统的动态特性。文献[12-14]利用分时电价引导用户进行有序充电,能够节省购电成本和减小充电功率对电网的影响,然而分时电价在时间上的局限性,使其难以响应快速充电负荷的需求。因此,需在充电站配置储能能够以储能的低储高放获取价格套利,又能够减小快速充电功率对电网影响^[15-16]。

为简化负荷特性分析并配置储能容量,首先通过对连续快速充电负荷功率曲线进行离散化处理,

得到等时间间隔的充电序列,将电网功率和储能容量量化为充电桩的个数,建立负荷功率离散化模型;然后利用排队理论分析充电站负荷状态,并以二维生灭马尔科夫链描述负荷状态转移关系;最后通过设置各个状态下的经济参数,比较不同到达量和充电桩的分配对充电站经济性的影响。

1 快速充电站排队模型

随着快速充电技术的发展,典型直流快速充电功率不断提高,不计电网约束的影响,以 120 kW 的充电功率给容量为 30 kW·h 的电池充电,至少需要 15 min 才能将电池充满,电动汽车充电服务时间与传统燃油汽车加油服务时间相比仍然较长,对于停靠容量有限的充电站,不允许长的排队队列。因此,用混合制排队系统描述车辆到站排队状态,混合制排队系统是等待制排队系统和损失制排队系统的结合。当电动汽车到达充电站时,若有闲置的充电设施,则可接受充电服务;若没有闲置的充电设施,电动汽车需排队等候,直到有闲置的充电设施后接受充电服务;或者电动汽车用户不愿排队等待而离开充电站。对于充电车辆采用先到先服务的排队规则,排队系统允许一定长度的排队容量,当排队长度超过系统允许容量时,拒绝新的车辆进入排队系统。电动汽车进站充电具有很大的随机性,假设车辆进站充电的数量随时间变化服从参数为 λ 的泊松分布,充电服务时间服从参数为 μ 的负指数分布^[17-18],储能系统充电时间也服从负指数分布,参数为 ν ,充电站有 k 个独立的充电桩且系统允许队长为有限容量 N ,则该充电站属于标准的 $M/M/k/N$ 混合制排队系统模型, M 为到达间隔时间的泊松分布和服务时间的负指数分布。系统到达量为进入充电站准备充电的电动汽车数量,系统服务量为完成充电后离开充电站的电动汽车数量。设充电站电动汽车数量为 n ,则系统到达量和服务量为

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda, & 0 \leq n < N \\ 0, & n \geq N \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu, & 1 \leq n \leq k \\ k\mu, & k < n \leq N \end{cases} \quad (2)$$

当站内电动汽车数量 $n < N$ 时,系统平均到达

量为 $\lambda_n = \lambda$, 平均服务量为 $\mu_n = \min(n\mu, k\mu)$; 当站内电动汽车数量 $n \geq N$ 时, $\lambda_n = 0$, 充电站拒绝新到达的电动汽车, 此时充电站系统处于损失状态, 系统状态转移关系如图 1 所示。

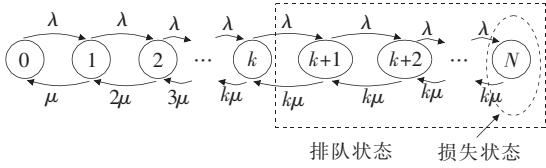


图 1 状态转移关系

Figure 1 State transition relation

建立 $M/M/k/N$ 排队系统稳态平衡方程^[19]为

$$\begin{cases} \pi_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \pi_0, & 0 \leq n \leq k \\ \pi_n = \frac{1}{k^{n-k} k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \pi_0, & k < n \leq N \end{cases} \quad (3)$$

式中 π_n 为充电站有 n 辆电动汽车接受服务时的稳态概率, 且有

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^N \pi_n &= 1 \quad (4) \\ \pi_0 &= \left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n + \sum_{n=k}^N \frac{1}{k^{n-k} k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right]^{-1} \quad (5) \end{aligned}$$

当站内电动汽车数量达到允许容量 N 时, 系统拒绝新的电动汽车到达, 顾客的损失率为

$$P_{\text{loss}} = \pi_N = \frac{1}{k^{N-k} k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^N \pi_0 \quad (6)$$

损失率是指顾客到达充电站被拒绝服务而离开充电站的数量占总到达数量的比例, 是衡量快速充电站排队系统服务质量的重要指标。给定充电桩数量 k , 确定不同到达量对应的系统损失率。通过限定系统损失率可得到该充电桩数量下充电站允许的最大到达量。

2 负荷功率离散化模型建立

储能式快速充电站由电网和储能系统给电动汽车充电, 在保证一定服务质量的条件下, 设电网向充电站系统提供限定的充电功率。负荷功率低于电网限定功率的部分由电网充电满足, 负荷功率高于电网限定功率的部分由储能充电, 电网有闲置功率时给储能充电, 充电站功率分配如图 2 所示。



图 2 充电站功率分配

Figure 2 Power allocation of charging station

2.1 功率离散化

该文研究目的是减小充电站负荷对电网的冲击, 提高电网稳定性, 使充电站负荷趋于稳定。设单个充电桩充电功率为 p , 利用蒙特卡洛模拟得到一天内电动汽车快速充电负荷需求如图 3 所示, 为了便于分析, 在等时间间隔 θ 内将连续充电负荷等效为离散充电序列, 离散序列的数值为 $n p$, 即在时间间隔 θ 内充电站新增 n 个离散化负荷, 如图 4 所示。将电网供电功率上限离散化为 S , 即能满足 S 个离散化负荷同时充电; 储能系统容量量化为 R ($S + R \leq k$), 即在持续服务时间 θ 内, 储能系统满电状态能够供给的充电桩数量; L 为允许排队的离散化负荷数量。因此, 快速充电站理论上最多能同时为 $S + R$ 个离散化负荷提供持续充电服务, 多余的离散化负荷将排队等待, 当离散化负荷数量达到系统

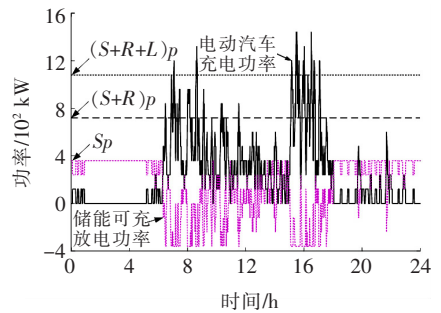


图 3 快速充电站负荷曲线

Figure 3 Load curve of fast charging station

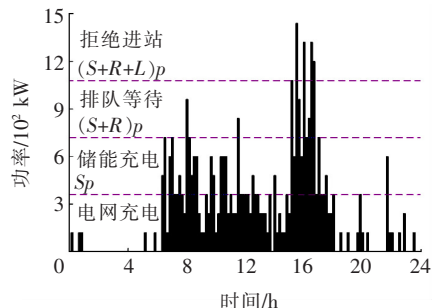


图 4 负荷功率离散化序列

Figure 4 Discrete sequences of load power

允许队列容量 L 时,系统阻塞,拒绝新增负荷。

2.2 离散化负荷状态空间

由于储能系统需要电网能量补给,该文考虑允许排队长度等于离散化的电网供电功率上限 S 。用 $M/M/k/N$ 排队系统描述储能式快速充电站服务过程。造成充电站顾客流失有以下 2 种情况。

1) 充电站所有充电桩都在使用,且排队等待的离散化负荷数量达到允许容量。

2) 充电站有闲置的充电桩,但储能没有足够能量满足充电需求,且排队容量达到了系统上限。

考虑储能式快速充电站的随机假设和运行状态,用二维离散时间马尔科夫链动态的描述充电站系统状态空间,如图 5 所示。状态空间的一维是充电站系统允许容纳离散化负荷数量(包括正在服务和排队等候的离散化负荷);状态空间的二维是储能系统容量等级。

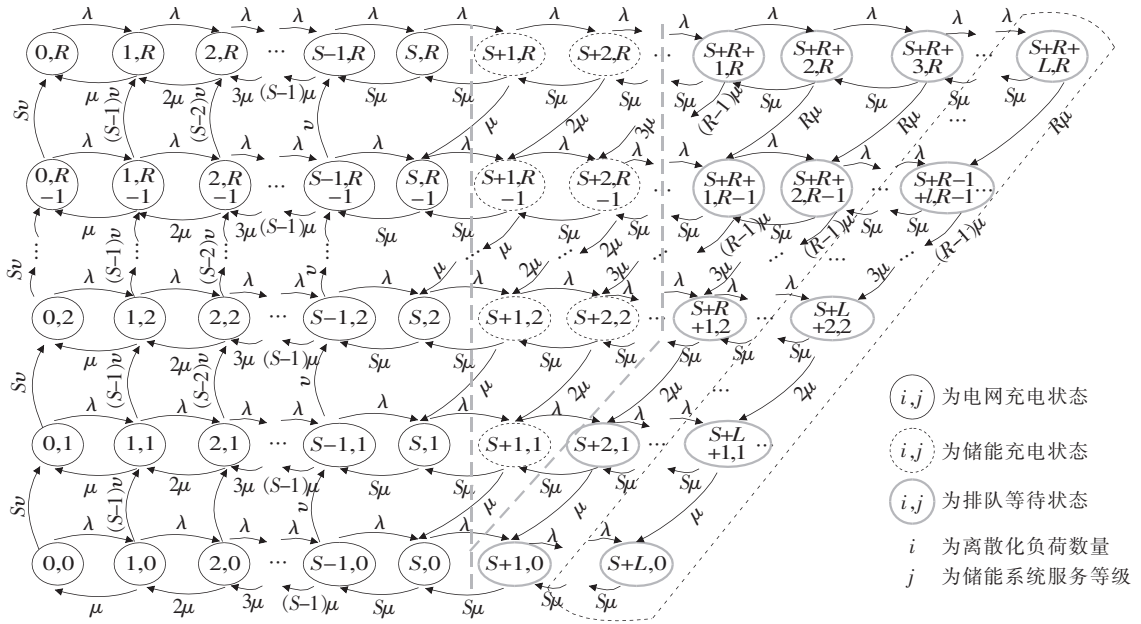


图 5 充电站系统状态空间

Figure 5 State space graph of charging station system

用 (i, j) 表示二维状态 $(0 \leq i \leq S + L + j, 0 \leq j \leq R)$, 则状态 $(0, 0)$ 表示系统中没有充电负荷且储能单元也没有存储电能; $((i, 0), 0 \leq i \leq S)$ 表示系统中有 i 个离散化负荷正在充电,但储能仍然没有存储电能; $((S + j, j), 0 \leq j \leq R)$ 表示系统无剩余充电桩或功率,新增的离散化负荷需要排队; $((S + L + j, j), 0 \leq j \leq R)$ 表示系统容量已满,拒绝新增的负荷。

离散化负荷充电过程符合马尔科夫链生灭过程,马尔科夫链总的状态数、转移速度矩阵分别为

$$\psi = (S + 1)(R + 1) + \sum_{i=1}^R i + L(R + 1) \quad (7)$$

$$Q = \begin{pmatrix} -(\lambda + \nu) & \lambda & \dots & 0 \\ \mu & -(\lambda + \nu + \mu) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -(S + R)\mu \end{pmatrix} \quad (8)$$

返和遍历的^[20]。

3 充电站经济性分析

在不同到达量下,分析电网和储能充电桩功率分配在连续 T 个等间隔时间内充电站的经济性。充电站收益由电网充电净收益、储能充电净收益、储能投资成本、排队等待和损失负荷导致服务质量降低的补偿成本计算,根据排队理论和马尔科夫链状态转移关系,将储能式快速充电站状态划分为电网充电状态、储能充电状态、排队等待状态和损失状态,其中损失状态为 ρ^l ,具体如图 5 所示。

电网充电状态为

$$\rho^g = \{(i, j) : 0 \leq i \leq S; 0 \leq j \leq R\} \quad (9)$$

储能充电状态为

$$\rho^s = \{(i, j) : S + 1 \leq i \leq S + R; i - S \leq j < R\} \quad (10)$$

由式(7)、(8)可知,马尔科夫链是不可约、正常

排队等待状态为

$$\rho^q = \{(i, j) : S + R < i \leq S + R + L\} \cup \{(i, j) : 0 \leq j < i - S\} \quad (11)$$

损失状态下损失率为

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{R+1} \pi \left[\frac{i(i+2S+1)}{2} + iL \right] \quad (12)$$

充电站通过收取服务费来获取利润,同时扣除补偿成本,收益和成本为

$$\begin{cases} B_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{\pi(t) \in \rho^g} \theta p w i(t) \pi(t) \\ B_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{\pi(t) \in \rho^s} \theta p (\omega - C_a) i(t) \pi(t) \\ C_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{\pi(t) \in \rho^q} \theta p i(t) \pi(t) C_b \\ C_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{\pi(t) \in \rho^l} \theta p i(t) \pi(t) C_c \\ C_3 = (C_{es} \theta R p + C_p R p) \cdot \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \cdot \frac{\theta T}{24 \times 365} \\ B = B_1 + B_2 - C_1 - C_2 - C_3 \end{cases} \quad (13)$$

式中 B_1 为电网充电净收益; B_2 为储能充电净收益; C_1 为排队等待状态下造成服务质量降低的补偿成本; C_2 为损失状态导致服务质量降低的补偿成本; C_3 为储能系统折算为 θT 时段内的等年值成本; B 为充电站总的净收益; T 为充电时段数; $i(t)$ 为在第 t 个服务时间内充电站总的离散化负荷数量; ω 为充电服务单位利润; C_a 为储能单次放电度电成本; C_b 为排队状态下单位补偿成本; C_c 为损失状态下单位补偿成本; C_{es} 、 C_p 分别为单位容量储能电池的价格和功率转换装置的单价; m 为储能电池使用年限; r 为贴现率; $\pi(t)$ 为在状态 $t \equiv (i, j)$ 的稳态概率,其稳态分布 π 求解为

$$\begin{cases} \pi \cdot Q = 0 \\ \pi \cdot e = 1, e = [1, 1, \dots, 1]^T \end{cases} \quad (14)$$

4 算例分析

根据 $M/M/k/N$ 混合排队理论对充电站离散化负荷状态的分析,用二维离散时间马尔科夫链描述离散化负荷状态转移关系。由于电网充电功率限制和储能系统容量约束,储能系统不能长时间连续

供电,所以充电站容纳的电动汽车数量由储能系统状态决定。假设离散化的电网充电功率上限 $S=5$,排队长度 $L=S=5$,储能单元容量 R 分别设置为 $0 \sim 5$,时间间隔 $\theta=0.2$ h,充电时段数 $T=30$,服务质量 $\mu=\nu=5$,充电功率 $p=120$ kW,离散化负荷在 θ 时间内平均到达量 λ_n 为 $0 \sim 10$ 。可以得到不同储能容量下到达量所对应的系统损失率,如图 6 所示。

由图 6 可知,系统损失率随着储能容量的增加而降低。当到达量较低时,电网有足够的电能供给负荷,充电站损失率为 0;当到达量较高时,电网给储能充电的概率非常小,新增的负荷即进入排队等待状态或损失状态,因此损失率不随储能容量的变化而变化,不能通过增加储能容量降低系统损失率;到达量越接近 S 时,储能容量的配置对系统损失率影响越大。为了保证快速充电站的服务质量,限定快速充电站系统的损失率,则能够确定储能系统不同容量大小所对应的到达量。

为计算储能式快速充电站的经济性,设充电服务单位利润 ω 为 0.6 元/(kW·h),储能单次放电度电成本 C_a 为 0.25 元/(kW·h),排队等待单位补偿成本 C_b 为 0.1 元/(kW·h),损失客户单位补偿成本 C_c 为 0.2 元/(kW·h),单位储能电池价格 C_{es} 为 1 500 元/(kW·h),功率转换装置单价 C_p 为 1 000 元/(kW·h),贴现率为 0.08,储能装置使用锂离子电池,由于一天内储能充放电次数较为频繁,设其使用年限 m 为 3 a。当系统平均到达量 λ_n 为 5 时,由随机概率分布得到 θT 时间内的负荷需求,如图 7 所示。根据所设置的参数,对储能式快速充电站收益进行仿真,取 $S=5$ 、 $R=5$ 和 $S=6$ 、 $R=4$ 这 2 种情况,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,到达量为零时,由于配置储能的成本需要,充电站收益为负值;当到达量较低时,即离散化负荷数量较少,系统损失率低,充电站收益随到

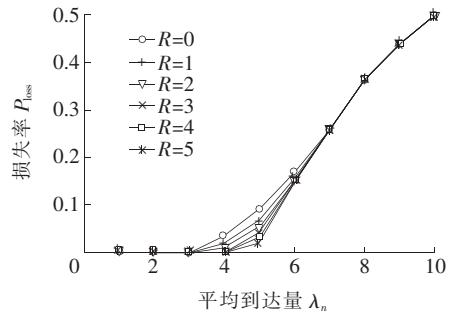


图 6 不同到达量下系统损失率

Figure 6 System loss rate under different arrival rate

达量的增加而增加;当充电站到达量较高时,排队等待和损失状态的离散化负荷较多,使充电站服务质量降低所产生的补偿成本较高,收益降低。同时电网提供的充电功率越大,支持的到达量越高,系统最佳收益越大,当 $S=6, R=4, \lambda_n=5$ 时,系统服务状态如图 9 所示。由图 9 可知,系统仅有少量负荷排队等待,无损失状态的负荷。

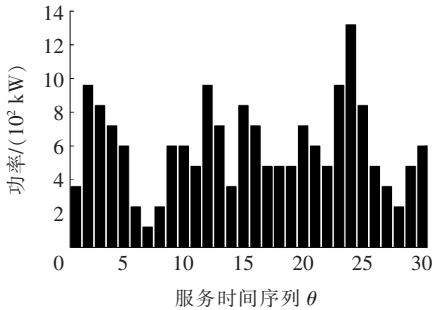


图 7 离散化负荷需求

Figure 7 Discretized load demand

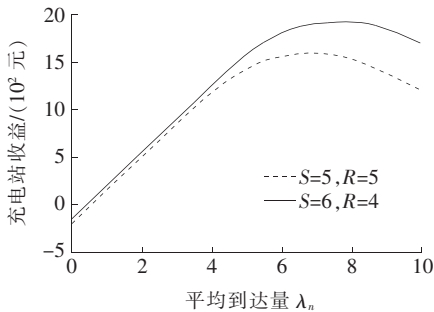
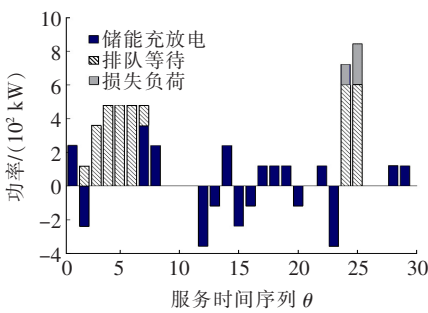
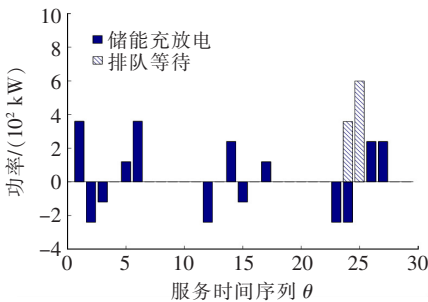


图 8 充电站收益

Figure 8 Revenue of charging station



(a) $S=5, R=5$



(b) $S=6, R=4$

图 9 $\lambda_n=5$ 时系统服务状态

Figure 9 System service status under $\lambda_n=5$

5 结语

为了满足电动汽车随机充电功率需求,提高电网稳定性,将储能应用于快速充电站。通过对连续负荷的离散化建立充电负荷排队模型,同时量化电网功率和储能容量,使得离散化负荷与电网及储能充电在等间隔时间内呈现一一对应关系,以便于分析。用二维离散时间马尔科夫链描述系统状态转移关系,根据状态空间求解各运行状态概率,并对经济性进行分析。算例结果表明,到达量接近电网功率上限离散化数量时,储能容量的增加能够有效降低充电站损失率,过高或过低的到达量下,储能的配置对充电站损失率并无明显影响。在不考虑充电站变压器容量成本的情况下,电网供电功率越大,系统所支持的到达量越大,经济性越好。因此在确定的到达量下,合理的配置电网供电功率和储能容量,能够实现充电站经济运行。

该文将负荷离散化,使得每个离散化充电负荷在充电时间和充电功率上保持一致性,便于结合排队理论和马尔科夫链分析状态模型,同时离散化负荷模型也为后续研究电动汽车的换电模式提供了参考。

参考文献:

[1] 李嘉逸,张宏刚,夏雪,等. 市内电动汽车快速充电设施的最优规划[J]. 电力建设,2017,38(1):17-22.
LI Jiayi, ZHANG Honggang, XIA Xue, et al. Optimal planning of electric vehicle fast charging facilities in urban areas [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(1): 17-22.

[2] 常小强,宋政湘,王建华. 基于蒙特卡罗算法的电动汽车充电负荷预测及系统开发[J]. 高压电器,2020,56(8):1-5.
CHANG Xiaoqiang, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua. Electric vehicle charging load prediction and system development based on monte carlo algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 1-5.

[3] 熊轲,吴思宇,郑海娜,等. 5G-V2X 辅助下基于站点区域类型的城市充电站规划方法[J]. 中国电力,2021,54(3):89-98.
XIONG Ke, WU Siyu, ZHENG Haina, et al. 5G-V2X-based vehicle charging station planning method considering different land-use types [J]. Electric Power, 2021, 54(3): 89-98.

[4] 黄敏丽,于艾清. 基于改进布谷鸟算法的电动汽车换电站有序充电策略研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(4):1075-1083+1284.

- HAUNG Minli, YU Aiqing. Study on coordinated charging strategy for battery swapping station based on improved Cuckoo search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1075-1083+1284.
- [5] 楚皓翔, 解大. 考虑电网运行状态的电动汽车充放储一体化充换电站充放电控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 96-101.
- CHU Haoxiang, XIE Da. Charging/discharging control strategy of EV charging-discharging-storage integrated station considering operational status of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 96-101.
- [6] 慕明良, 李守茂, 孟祥鹤, 等. 考虑灵活性的冷热电联供型微网优化调度[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 39-46+95.
- MU Mingliang, LI Shoumao, MENG Xianghe, et al. Optimal scheduling of CCHP microgrid considering flexibility[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 39-46+95.
- [7] DING Huajie, HU Zechun, SONG Yonghua. Value of the energy storage system in an electric bus fast charging station[J]. Energy, 2015, 157: 630-639.
- [8] 桑丙玉, 姚良忠, 李明杨, 等. 基于二阶锥规划的含大规模风电接入的直流电网储能配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 86-94.
- SANG Bingyu, YAO Liangzhong, LI Mingyang, et al. Research on energy storage system planning of DC grid with large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 86-94.
- [9] 刘勤, 魏明奎, 周全, 等. 计及电量成本和系统自供电可靠性的西南地区微电网容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 139-145.
- LIU Qin, WEI Mingkui, ZHOU Quan, et al. Research on capacity optimization configuration of the Southwestern China microgrid considering electricity cost and system self-power supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 139-145.
- [10] Ugirumurera J, Haas Z J. Optimal capacity sizing for completely green charging systems for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(3): 565-577.
- [11] 武小梅, 冯琪劲, 严干贵, 等. 基于双层优化的电动公交车有序充电策略[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(1): 119-126.
- WU Xiaomei, FENG Qijin, YAN Gangui, et al. A coordinated charging strategy of electric buses based on bi-level optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 119-126.
- [12] 周步祥, 刘治凡, 黄河, 等. 基于 GRASP-PR 混合算法的电动汽车有序充电优化[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 7-13.
- ZHOU Buxiang, LIU Zhifan, HUANG He, et al. Electric vehicle charging coordination based on GRASP-PR hybrid algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 7-13.
- [13] 杨健维, 苟方杰, 黄宇, 等. 基于不确定性测度的居民小区电动汽车充电分时电价制定策略[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 96-102.
- YANG Jianwei, GOU Fangjie, HUANG Yu, et al. Residential area electric vehicle charging pricing strategy based on uncertainty measure[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 96-102.
- [14] 黄其新, 王启明, 陆朱卫, 等. 基于 sigmoid 函数激励需求响应模型的电动汽车有序充电控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(4): 57-64.
- HUANG Qixin, WANG Qiming, LU Zhuwei, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on sigmoid function stimulating demand response model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(4): 57-64.
- [15] Sarker M. R, Pandžić H, Sun K, et al. Optimal operation of aggregated electric vehicle charging stations coupled with energy storage[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(5): 1127-1136.
- [16] Negarestani S, Fotuhi-Firuzabad M, Rastegar M, et al. Optimal sizing of storage system in a fast charging Station for plug-in hybrid electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(4): 443-453.
- [17] 李如琦, 苏浩益. 基于排队论的电动汽车充电设施优化配置[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 58-61.
- LI Ruqi, SU Haoyi. Optimal allocation of charging facilities for electric vehicles based on queuing theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 58-61.
- [18] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 考虑电量分布及行驶里程的高速公路充电站规划[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 111-116.
- GE Shaoyun, FENG Liang, LIU Hong, et al. Planning of charging stations on highway considering power distribution and driving mileage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 111-116.
- [19] Whaiduzzaman M, Naveed A, Gani A. MobiCoRE: mobile device based cloudlet resource enhancement for optimal task response[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2018, 11(1): 144-154.
- [20] Bayram I S, Michailidis G, Devetsikiotis M, et al. Electric power allocation in a network of fast charging stations[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(7): 1235-1246.