

基于V2G技术的城市电网供电恢复策略

胡思洋¹, 廖凯², 杨健维², 李波², 杨威³

(1. 西南石油大学 工程训练中心, 四川 成都 610500; 2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;
3. 西南石油大学 电气信息学院, 四川 成都 610500)

摘要:随着电动汽车的大量推广,城市电网中的电动汽车总容量逐渐增加,基于电动汽车入网(V2G)技术,考虑电动汽车的放电能力,将其作为辅助电源配合应急供电车可快速恢复失电负荷,在有效降低失电损失的同时,具有灵活性好、能降低应急储能和应急供电车等传统应急能源的配置成本等优点。建立了电动汽车的放电模型,以此评估可供调配电动汽车电池的电源水平;将失电负荷的重要度、容量等因素作为有限电源分配的依据,以最小化负荷失电损失为目标,结合遗传算法和改进鲸鱼算法进行求解,提出了基于V2G技术的供电恢复优化策略。算例仿真结果验证了所提方法的可行性和优越性,可为未来电动汽车大规模接入后城市电网的供电恢复策略研究提供新的思路。

关键词:城市电网;电动汽车;V2G技术;供电恢复;优化决策

中图分类号:U469.72;TM761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202210024

0 引言

电动汽车具有低碳环保的特征,顺应未来的发展趋势,根据《成都市新能源汽车产业“十三五”发展规划》,至2030年,全市电动汽车将达到60~65万辆。电动汽车入网(vehicle to grid, V2G)技术作为热点研究,近年来得到了快速的发展,基于V2G技术将放电的电动汽车集群作为储能单元并网,可为电网提供显著的净功率,因此可将电动汽车电池集群作为辅助能源参与电网的调度与控制,能够发挥其能量的快速双向可控特性,协助系统调峰调频,实现经济运行^[1]。目前我国舟山、丹麦等海岛微网中,已将V2G技术下的电动汽车集群作为储能方案进行实践应用,2020年4月,华北电网在我国首次将V2G充电桩资源正式纳入调峰辅助服务市场并结算^[2]。可见,将放电的电动汽车集群作为辅助电源向城市电网供电具有可行性,本文考虑将此种辅助电源应用于城市电网失电负荷的供电恢复,并提出了一种基于V2G技术的城市电网供电恢复策略。

对于供电恢复策略,在当前大量新能源并网的发展趋势下,城市电网的能源结构发生改变,催生出一些异于传统方法的城市电网供电恢复新方法。文献[3]采用多代理技术,通过微电网聚合恢复失电区域的供电;文献[4]考虑分布式电源和储能的黑启动能力,建立了含分布式电源、柔性负荷和储能的多时间段故障动态恢复模型,使分布式能源直接参与供

电恢复工作;文献[5]对分布式电源和重要用户的自备应急电源进行多源协同规划,使其作为供电恢复电源;文献[6]使可控负荷参与供电恢复工作,提高电网重建效率和恢复期间负荷运行稳定性,以间歇性出力的新能源和微电网作为供电恢复电源,提出供电恢复策略。

上述策略主要以城市电网中的分布式电源作为供电恢复的电源,通过负荷转带使其向失电负荷供电,但分布式电源往往自身带有一定的负荷,且新能源分布式电源的出力波动性较大,故此类供电恢复策略会受到较强的功率约束和随机性影响。已有部分研究将电动汽车考虑到供电恢复问题中:文献[7]提出了一种面向含微电网、电动汽车的主动配电网的供电恢复策略,在供电恢复过程中切除了部分电动汽车负荷,使重要负荷得以快速恢复供电,但没有发挥电动汽车放能的优势;文献[8]将电动汽车电池以充换电站的形式接入城市电网参与供电恢复,发挥了其放能优势,但充换电站的位置固定,灵活性较弱,且建设成本高昂,普及程度和发展速度不及充电桩,因此不利于推广;文献[9]调度电动公交车参与极端灾害后的负荷恢复,但相较于电动私家车,电动公交车的数量较少,供电能力相对较弱,且公交车出站后一直处于运营状态,参与负荷恢复会对其自身工作产生一定程度的影响。

为了克服上述研究的不足,本文将自愿参与V2G项目调动的电动汽车作为供电电源,提出了一种供电恢复策略。首先,评估某一范围内可供调配的电动汽车资源,即在供电恢复时刻正接入充电桩并放电的电动汽车,基于马尔可夫链的车辆转移矩阵和蒙特卡罗法,建立电动汽车的出行行为与放电

收稿日期:2022-05-09;修回日期:2022-09-13

在线出版日期:2022-11-07

基金项目:四川省科技计划项目(2020YFSY0037)

Project supported by Sichuan Science and Technology Plan Project(2020YFSY0037)

行为模型;其次,提出负荷失电损失评估体系,使有限的电动汽车资源能够作用于重要度高、失电损失大的负荷;然后,在供电电源的具体分配中,以使负荷总体失电损失最小为目标,建立供电恢复电源分配方案的优化模型,并采用遗传算法和改进鲸鱼算法进行求解;最后,通过算例仿真验证所提策略的切实可行性,能充分利用电动汽车资源。

本文所提策略可在停电后的第一时间使部分负荷恢复供电,有效地减小了失电损失,同时能避开充换电站难以推广的问题,并具有更好的灵活性。同时,城市中电动汽车的总数在短时间内基本稳定,且私家车的出行行为具有一定的规律性,相较于基于出力波动较大的风、光等新能源发电进行供电恢复,本文策略受季节、天气类型、环境参数的影响较小,因此具备不受过多随机性影响的优势。此外电动汽车属于非常规电源,自身不带负荷,故本文策略还具备功率约束较少的优点。

根据《“十四五”现代能源体系规划》,预计2025年我国新能源汽车新车销量占比达到20%^[10]。咨询公司德勤发布的最新报告《有目标的城市未来:2030年塑造城市未来的12种趋势》中指出:到2030年,我国领先城市电动汽车的占比将达到50%^[11]。可见,未来电动汽车将占据相当大的比重,大量的充电设施将分布于城市的各个场所,这为本文所提策略提供了支撑。本文研究内容可为未来含大量电动汽车的城市电网供电恢复研究提供理论支持。

1 电动汽车集群的可用电池容量评估

首先,基于马尔可夫链的车辆转移矩阵和蒙特卡罗法建立电动汽车出行行为的数学模型,由此推测电动汽车在各个时刻的用电情况,并设计充放电规则,得到电动汽车在各时刻的荷电状态(state of charge, SOC)与充放电状态。将某时刻某一区域内放电的电动汽车集群等效为位于该区域的电源,该等效电源的容量即为该区域内电动汽车集群的可用电池容量。

1.1 电动汽车出行行为建模

由美国交通部调查(national household travel survey, NHTS)数据和文献[12]中的拟合方法可知,电动汽车每天的出发时刻和返回时刻均满足对数正态分布的特征,其概率密度函数分别如式(1)和式(2)所示。

$$f(t_1)=\begin{cases} \frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(t_1-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] & 0<t_1\leq\mu_1+12 \\ \frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(t_1-24-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] & \mu_1+12<t_1\leq24 \end{cases} \quad (1)$$

$$f(t_2)=\begin{cases} \frac{1}{\sigma_2\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(t_2+24-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] & 0<t_2\leq\mu_2-12 \\ \frac{1}{\sigma_2\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(t_2-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] & \mu_2-12<t_2\leq24 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(t_1)$ 为电动汽车 t_1 时刻出发的概率密度函数; $f(t_2)$ 为电动汽车 t_2 时刻返回的概率密度函数; μ_1 、 σ_1 分别为电动汽车每天出发时刻的均值、标准差, $\mu_1=9.24$, $\sigma_1=3.16$; μ_2 、 σ_2 分别为电动汽车每天返回时刻的均值、标准差, $\mu_2=17.6$, $\sigma_2=3.4$ 。

分别根据式(1)和式(2)对电动汽车的出发时刻、返回时刻进行模拟,然后用基于马尔可夫链的车辆转移矩阵模拟电动汽车在城市中各地点之间的移动。根据NHTS的统计数据,电动汽车的出行目的地可分为6类,即住宅区、工作区、教学区、社交区、购物区、其他区,分别用区域1—6表示。基于马尔可夫链的车辆转移概率矩阵 P_t 为:

$$P_t=\begin{bmatrix} p_{t,1,1} & p_{t,1,2} & \cdots & p_{t,1,6} \\ p_{t,2,1} & p_{t,2,2} & \cdots & p_{t,2,6} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{t,6,1} & p_{t,6,2} & \cdots & p_{t,6,6} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $p_{t,m,n}$ ($m,n=1,2,\dots,6$)为 t 时刻电动汽车由区域 m 移动到区域 n 的概率,且 $0\leq p_{t,m,n}\leq 1$ 。矩阵 P_t 的每一行元素之和为1,在电动汽车出行的每一时刻调用车辆转移矩阵,可获得电动汽车在一天中各时刻前往各区域的概率。

基于上述研究,建立电动汽车出行行为的数学模型。先根据式(1)和式(2)确定某辆电动汽车的出行时段,然后根据式(3)确定电动汽车在出行时段中每一时刻的所在地,用各时刻电动汽车的所在地描述电动汽车的出行行为。采用蒙特卡罗法模拟设定地区内 n_{EV} 辆电动汽车的出行行为,并将结果记录于 $24\times n_{EV}$ 阶矩阵 N_L 中,如式(4)所示。

$$N_L=\begin{bmatrix} P_{1,1}^1 & P_{1,2}^1 & \cdots & P_{1,n_{EV}}^1 \\ P_{2,1}^1 & P_{2,2}^1 & \cdots & P_{2,n_{EV}}^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{24,1}^1 & P_{24,2}^1 & \cdots & P_{24,n_{EV}}^1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $P_{t,i}^1$ ($t=1,2,\dots,24$; $i=1,2,\dots,n_{EV}$)为 t 时刻第 i 辆电动汽车所处的区域。

1.2 电动汽车的SOC建模

由电动汽车的出行行为可以得到电动汽车在各时刻的行驶里程,进而得到其耗电情况,设计电动汽车的充放电规则可以得到其各时刻的SOC。设定所有电动汽车在每天出行前的SOC均为100%,频繁切换充放电状态会加剧电池组内部的不一致性,从而缩短电动汽车电池的使用寿命。为此,设计电

动汽车的充放电规则如图1所示。

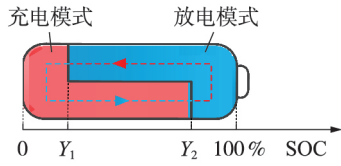


图1 电动汽车的充放电规则

Fig.1 Charging and discharging rule of electric vehicle

根据电动汽车的SOC定义2种模式:当SOC高于放电阈值 Y_1 时,电动汽车进入放电模式(充放电状态变量 $S_k=1$),此时电动汽车仅放电,且在SOC高于放电阈值 Y_1 时不参与充电;当SOC不高于放电阈值 Y_1 时,电动汽车进入充电模式($S_k=2$),此时电动汽车开始充电,且在SOC达到充电阈值 Y_2 之前不参与放电;当SOC达到充电阈值 Y_2 后,电动汽车重新进入放电模式;以此循环。电动汽车的充放电调度以不影响车主的正常出行为原则,故所有的充放电行为均在电动汽车停车时进行。同时,电动汽车的充放电调度发生在配电网负荷较大的时段。

在电动汽车的运行过程中, t 时刻的SOC由电动汽车的充放电行为、行驶耗电以及上一时刻的SOC决定,如式(5)所示。

$$S_{SOC,t} = \begin{cases} S_{SOC,t-1} - P_f \Delta t / Q & d_{dis,t-1} = 0, S_k = 1, t_{d1} \leq t \leq t_{d2} \\ S_{SOC,t-1} + P_c \Delta t / Q & d_{dis,t-1} = 0, S_k = 2, t_{d1} \leq t \leq t_{d2} \\ S_{SOC,t-1} - d_{dis,t-1} W_{100} / Q & d_{dis,t-1} \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $S_{SOC,t}$ 、 $S_{SOC,t-1}$ 分别为 t 、 $t-1$ 时刻电动汽车的SOC; P_c 、 P_f 分别为电动汽车的充、放电功率; Δt 为电动汽车在相邻两时刻间的充放电持续时长,本文中取值为1h; t_{d1} 、 t_{d2} 分别为电动汽车充放电调度时段的开始、结束时刻; Q 为电动汽车的电池容量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$; W_{100} 为电动汽车行驶100km的耗电量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$; $d_{dis,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻电动汽车的行驶里程,由 $t-1$ 、 t 时刻电动汽车所处区域决定。

1.3 电动汽车集群的可用电池容量

结合电动汽车的发展规划,每个区域都将设立电动汽车充电桩,故6类区域均可视为电动汽车的放电站点。不考虑逆变器的功率损耗,对于某区域内由放电的电动汽车等效的电源,其在某时刻的输出功率为该时刻区域内可调用的电动汽车集群的电池总放电功率,即该时刻区域内电动汽车的放电功率之和,具体求解步骤如下。

步骤1:在建立的电动汽车出行行为模型中,根据前、后2个时刻电动汽车所在区域之间的距离,得到 $24 \times n_{EV}$ 阶矩阵 $\mathbf{d}_{dis}$,其第 t 行第 i 列元素为:

$$d_{dis}(t, i) = D_{Dis}(P_{t-1,i}^1, P_{t,i}^1) \quad (6)$$

式中: $d_{dis}(t, i)$ 为 t 时刻第 i 辆电动汽车的行驶里程; $D_{Dis}(P_{t-1,i}^1, P_{t,i}^1)$ 为区域之间距离矩阵 $\mathbf{D}_{Dis}$ 的元素。

步骤2:将步骤1得到的矩阵 $\mathbf{d}_{dis}$ 代入式(5)中计算SOC,结合充放电规则和各时刻的SOC判断电动汽车的充放电状态,得到 $24 \times n_{EV}$ 阶矩阵 $\mathbf{S}_t$,其第 t 行第 i 列元素如式(7)所示。

$$S_t(t, i) = \begin{cases} 1 & S_{SOC,t,i} \geq Y_1 \\ 2 & S_{SOC,t,i} \leq Y_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $S_t(t, i)$ 为 t 时刻第 i 辆电动汽车的充放电状态,放电时值为1,充电时值为2; $S_{SOC,t,i}$ 为 t 时刻第 i 辆电动汽车的SOC。

步骤3:结合矩阵 $\mathbf{N}_t$ 和矩阵 $\mathbf{S}_t$,统计在电动汽车充放电调度时段内各时刻的放电电动汽车及其所处区域,得到 24×6 阶矩阵 $\mathbf{N}_n$,其第 t 行第 k 列元素如式(8)所示。

$$N_n(t, k) = N_n(t, k) + 1 \quad P_{t,i}^1 = k, S_t(i, t) = 1 \quad (8)$$

式中: $N_n(t, k)$ ($k=1, 2, \dots, 6$)为 t 时刻区域 k 内的放电电动汽车数量(若不在调度时段内,则放电电动汽车数量为0)。式(8)表示若 t 时刻第 i 辆电动汽车在区域 k 内放电,则 t 时刻区域 k 内的放电电动汽车数量 $N_n(t, k)$ 增加1。

步骤4:将矩阵 $\mathbf{N}_n$ 与电动汽车的放电功率相乘,得到 24×6 阶矩阵 $\mathbf{N}_p$ (如式(9)所示),其表示设定地区内各区域在一天中各时刻保有的放电电动汽车的总放电功率,即电动汽车集群的可用电池容量。

$$\mathbf{N}_p = \mathbf{N}_n \mathbf{P}_f \quad (9)$$

2 负荷失电损失评估体系

负荷失电损失是指从负荷失电到恢复供电期间,由失电导致负荷无法正常工作而造成的损失。参考文献[13]中负荷失电损失的计算方法,设定负荷失电损失由负荷重要程度、负荷容量、负荷失电持续时间共同构成,本节综合考虑这3种因素,建立负荷失电损失评估体系,并将其作为电动汽车资源分配的指标。

2.1 负荷重要度评估

负荷重要度是衡量负荷失电损失的一个重要指标,负荷的重要程度会直接影响负荷失电所造成损失的大小。在负荷失电损失中,主要观察失电造成的人员生命安全和经济损失,故设立 ε_1 、 ε_2 这2个参量,用于分别描述某负荷失电在生命安全和经济性上造成的影响程度。此外,增设参量 ε_3 表示负荷的特殊属性,用于对 ε_1 、 ε_2 进行补充描述。根据负荷在各方面的特征,每个参量的取值范围为1~5,表示负荷在各方面的重要程度,其中由于人员生命安全尤为重要,因此对参量 ε_1 乘以补充系数 C_s ($C_s > 1$)。故负荷 κ 的重要度 T_κ 可表示为:

$$T_\kappa = C_s \varepsilon_{\kappa,1} + \varepsilon_{\kappa,2} + \varepsilon_{\kappa,3} \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_{\kappa,1}$ 、 $\varepsilon_{\kappa,2}$ 、 $\varepsilon_{\kappa,3}$ 分别为负荷 κ 的生命安全、经济性、特殊属性参量。

2.2 负荷失电损失评估体系

某一固定负荷失电导致的损失直接受该负荷容量大小的影响,且呈正比关系。此外,负荷失电损失还与负荷失电的持续时间有关,文献[14]统计了各类负荷的失电损失值(单位为元/kW),见附录A表A1,描述了1kW负荷在不同失电持续时间下所造成的损失,相应的关系曲线如图2所示。

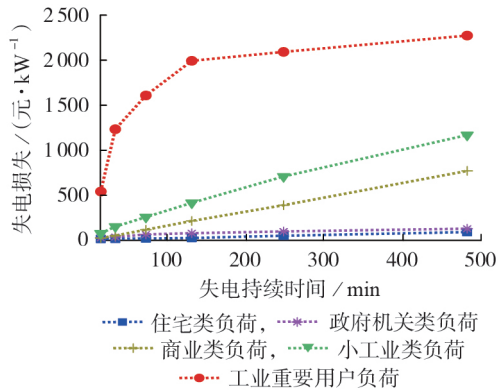


图2 各类负荷失电损失与失电持续时间的关系曲线

Fig.2 Relationship curves between load-loss cost and load-loss duration of various loads

结合文献[14]和图2可知:在停电初期,负荷失电损失的增长速度较快,在失电的第一时刻使部分负荷恢复供电可有效降低失电损失;负荷失电损失和失电持续时间成非正比的正相关关系,但每2个统计时间节点之间的关系曲线可近似地看作正比关系,即在任意2个统计时间节点之间,负荷失电损失随着失电持续时间的延长而匀速增长。

基于此,本文将任意2个统计时间节点的时间看作一个时段,定义负荷损失增率 v 为单位容量(1kW)的失电负荷在单位失电时间(1min)内产生的失电损失,用于描述在一个时段内负荷失电损失的增长速率,再结合负荷重要度和负荷容量,得到评估负荷失电损失的表达式,如式(11)所示。

$$E_{\kappa} = \sum_{o=1}^O P(C_s \varepsilon_{\kappa,1} + \varepsilon_{\kappa,2} + \varepsilon_{\kappa,3}) v_o \Delta t_o \quad (11)$$

式中: E_{κ} 为负荷 κ 的失电损失; P 为失电负荷的容量; v_o 为在第 o 个失电时段内负荷失电损失的增长速率,即负荷失电损失增率; Δt_o 为第 o 个失电时段的持续时间; O 为失电时段数量。

3 基于V2G技术的供电恢复优化策略

根据电动汽车集群的可用电池容量水平,设计V2G技术下基于放电电动汽车恢复供电的方案,且考虑到恢复供电时放电电动汽车集群的可用电池容量可能小于失电负荷容量,设计应急供电车补充供

电方案,作为电动汽车进行供电恢复的后备方案(本文设定有充足的应急供电车,可恢复全部失电负荷)。为了充分利用电动汽车资源,使整体失电损失最小,同时使电动汽车就近供电以减小开关操作成本,建立供电恢复电源分配方案的优化模型,并采用遗传算法和改进鲸鱼算法进行求解,提出了基于V2G技术的供电恢复策略。

3.1 V2G技术下基于放电电动汽车的供电恢复优化策略

当放电电动汽车参与供电恢复时,将该时刻已接入充电桩并处于放电状态的电动汽车集群等效为位于各停车场的电源(后文中称其为“等效电源”)。调度等效电源参与供电恢复的主体为V2G控制中心,在负荷失电后,由V2G控制中心操作支路联络开关以改变网络的拓扑结构,使等效电源向失电负荷供电。联络开关是线路维修、运行优化、供电恢复等工作的重要单元,在未来配电网的发展中将广泛应用于电网侧。基于放电电动汽车的供电恢复示意图如图3所示。图中: L_1 、 L_2 为受电负荷; P_1 、 P_2 为带充电桩的停车场。

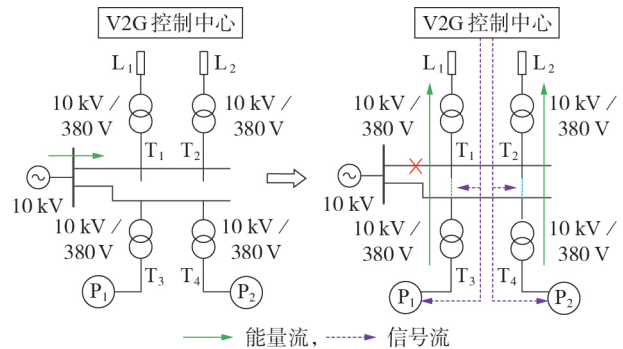


图3 基于放电电动汽车的供电恢复示意图

Fig.3 Schematic diagram of power supply restoration based on discharged electric vehicles

根据供电恢复时电动汽车等效电源的容量水平,考虑以下2种场景。

1) 场景1: 等效电源容量大于等于失电负荷容量。

在场景1下,失电负荷的供电可全部由等效电源恢复完成,失电持续时间极短(仅为开关操作时间),失电损失为V2G使用成本、操作等效电源进行应急供电的开关成本。联络开关属于耗材,当开关操作达到一定的次数时,需要更换设备,过多地操作联络开关(包括操作开关的数量和操作次数)会增加设备的损耗成本,因此操作开关会对城市电网的运维经济性产生一定的影响,所以在供电恢复过程中,需尽可能少地操作开关以保证经济性,并将对联络开关的操作计入投入成本中。由于已建成的城市电网缺少贴切的模型,且考虑到配电网的供电半径有

限,供电距离越长意味着将跨过越多的配电网,跨越越多的配电网进行供电,则需要操作的联络开关数量越多,会缩短开关设备的更换周期,进而增加设备的损耗成本,故本文设定等效电源 j 的开关成本取决于使用该台等效电源时所需操作开关的数量,操作开关的数量与供电距离成正比,因此开关成本可用等效电源与接受其供电的负荷之间的距离衡量,如式(12)所示。

$$S = \sum_{j=1}^{n_p} s_j \quad (12)$$

$$s_j = d_{\text{pis},j} \quad (13)$$

式中: S 为开关成本; n_p 为操作等效电源的数量; s_j 为操作等效电源 j 进行供电的开关成本; $d_{\text{pis},j}$ 为等效电源 j 与接受其供电的负荷之间的距离。

V2G使用成本 C_m 包括V2G常规使用成本 C_1 和供电恢复补偿成本 C_2 。V2G常规使用成本 C_1 由电能采购费、车主电池寿命损耗补偿费、支付给车主的售电利润组成^[15-16],计算式为:

$$C_1 = W(D_1 + D_2 + M) \quad (14)$$

式中: W 为使用的V2G电能,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$; D_1 为实时电价,单位为元/($\text{kW}\cdot\text{h}$); D_2 为电池单位电量寿命损耗补偿费,单位为元/($\text{kW}\cdot\text{h}$); M 为支付给车主的单位电量售电利润,单位为元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。

在供电恢复的过程中,由于使用了部分V2G资源,导致其原本的受电对象无法获得足够的电能,需要另行购电,该购电费用即为供电恢复补偿成本,计算式为:

$$C_2 = WD_1 \quad (15)$$

结合式(14)和式(15),可得V2G使用成本 C_m 的计算式为:

$$C_m = C_1 + C_2 = W(2D_1 + D_2 + M) \quad (16)$$

则场景1下的失电损失 E' 可表示为:

$$E' = C_m + S = W(2D_1 + D_2 + M) + \sum_{j=1}^{n_p} s_j \quad (17)$$

在场景1的供电恢复优化过程中,以最小化失电损失为优化目标,优化结果为各等效电源和失电负荷之间的最佳供受电关系,因此在优化过程中需决定各等效电源是否向各失电负荷供电,若是,则记为1,否则,记为0。

遗传算法是易于计算机实现且能实行并行计算的进化算法,同时能够处理大量的0-1变量,适用于处理本文的优化问题,故选用遗传算法对式(18)所示目标函数进行优化计算。

$$\min E' = \min \left\{ W(2D_1 + D_2 + M) + \sum_{j=1}^{n_p} s_j \right\} \quad (18)$$

以每个失电负荷全部恢复供电为约束条件,如式(19)所示。

$$P'_{a,\kappa} \geq P_{a,\kappa} \quad \kappa = 1, 2, \dots, h \quad (19)$$

式中: $P_{a,\kappa}$ 为第 κ 个失电负荷的容量; $P'_{a,\kappa}$ 为向第 κ 个失电负荷供电的等效电源容量; h 为失电负荷的数量。

2)场景2:等效电源容量小于失电负荷容量。

在场景2下,失电负荷由等效电源供电和传统应急供电车补充供电共同恢复。失电损失为等待应急供电车就位期间的负荷失电损失、操作等效电源供电的开关成本、V2G使用成本之和。则场景2下的失电损失 E'' 可表示为:

$$E'' = \sum_{\kappa=1}^h \sum_{o=1}^o (P_{a,\kappa} - P'_{a,\kappa}) (C_s \varepsilon_{\kappa,1} + \varepsilon_{\kappa,2} + \varepsilon_{\kappa,3}) v_o \Delta t_o + S + C_m \quad (20)$$

在场景2的供电恢复优化过程中,通过操作等效电源,使尽可能多的重要度高的失电负荷恢复供电,以此降低失电损失。以最小化失电损失为优化目标,如式(21)所示,并采用寻优速度较快的遗传算法进行求解。由于失电持续时间源于应急供电车的就位过程,与开关操作无关,因此式(21)不计及失电持续时间。另外,在场景2下,等效电源容量小于失电负荷容量,所有等效电源全部投入使用,因此V2G使用成本固定为使用当前时刻所有V2G资源的成本,所以式(21)中未计入V2G使用成本。

$$\min \left\{ b_1 \sum_{j=1}^{n_p} s_j + b_2 \sum_{\kappa=1}^h (P_{a,\kappa} - P'_{a,\kappa}) (C_s \varepsilon_{\kappa,1} + \varepsilon_{\kappa,2} + \varepsilon_{\kappa,3}) \right\} \quad (21)$$

式中: b_1 、 b_2 分别为开关成本、负荷失电损失所占比重。

以参与供电恢复的等效电源容量不超过操作的等效电源容量,以及操作的等效电源容量不超过可操作等效电源的总容量为约束条件,分别如式(22)和式(23)所示。

$$\sum_{\kappa=1}^h P'_{a,\kappa} \leq \sum_{j=1}^{n_p} P_{b,j} \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^{n_p} P_{b,j} \leq \sum_{d=1}^q P_{e,d} \quad (23)$$

式中: $P_{b,j}$ 为操作的等效电源 j 的容量; $P_{e,d}$ 为可操作的等效电源 d 的容量; q 为可操作的等效电源数量。

3.2 应急供电车补充供电的优化策略

对于可操作的等效电源容量小于失电负荷容量的情况,在等效电源已全部投入恢复供电的基础上,调动传统应急供电车对尚未恢复供电的失电负荷进行补充供电。分配应急供电车向失电负荷进行补充供电时,应尽量调用距离失电负荷较近的应急供电车进行供电,以减小负荷的失电持续时间,同时使重要度高的负荷优先恢复供电,以此降低失电损失,目标函数如式(24)所示。

$$\min \sum_{\kappa=1}^h \sum_{o=1}^O (P_{a,\kappa} - P'_{a,\kappa} - P''_{a,\kappa,o}) (C_s \varepsilon_{\kappa,1} + \varepsilon_{\kappa,2} + \varepsilon_{\kappa,3}) v_o \Delta t_o \quad (24)$$

式中: $P''_{a,\kappa,o}$ 为在第 o 个失电时段内应急供电电车为第 κ 个失电负荷供电的容量。

为了避免资源浪费,以向各失电负荷供电的等效电源容量和应急供电电车的供电容量之和不超过该负荷失电容量的 110% 为约束条件,如式(25)所示。

$$P'_{a,\kappa} + P''_{a,\kappa} \leq 110\% P_{a,\kappa} \quad \kappa=1, 2, \dots, h \quad (25)$$

式中: $P''_{a,\kappa}$ 为应急供电电车向第 κ 个失电负荷供电的总容量。

相较于等效电源的供电恢复优化,应急供电电车补充供电优化需要额外考虑失电持续时间,故相较于式(21),式(24)中包含了负荷失电损失增率和失电持续时间,失电持续时间源于应急供电电车的就位过程,与优化结果有直接的关联,因此在场景2的应急供电电车进行恢复供电的优化过程中,寻优搜索的计算量大于等效电源进行恢复供电的寻优计算量,采用遗传算法容易陷入局部最优解,故采用改进鲸鱼算法进行优化求解,具体改进方案见附录B^[17]。

综上,考虑等效电源容量和失电负荷容量的相对大小,利用电动汽车进行供电恢复并采用应急供电电车进行补充供电,结合式(18)、(21)、(24),可得本文所提基于V2G技术的供电恢复策略的整体目标函数为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left\{ W(2D_1 + D_2 + M) + \sum_{j=1}^{n_p} s_j \right\} \sum_{d=1}^q P_{e,d} \geq \sum_{\kappa=1}^h P_{a,\kappa} \\ \min \left\{ b_1 \sum_{j=1}^{n_p} s_j + b_2 \sum_{\kappa=1}^h (P_{a,\kappa} - P'_{a,\kappa}) (C_s \varepsilon_{\kappa,1} + \varepsilon_{\kappa,2} + \varepsilon_{\kappa,3}) + \right. \\ \left. \sum_{\kappa=1}^h \sum_{o=1}^O (P_{a,\kappa} - P'_{a,\kappa} - P''_{a,\kappa,o}) (C_s \varepsilon_{\kappa,1} + \varepsilon_{\kappa,2} + \varepsilon_{\kappa,3}) v_o \Delta t_o \right\} \\ \sum_{d=1}^q P_{e,d} < \sum_{\kappa=1}^h P_{a,\kappa} \end{array} \right. \quad (26)$$

3.3 系统安全约束

在使用V2G资源进行供电恢复时,需考虑V2G资源的接入对系统安全性的影响,本文从线路电流和节点注入功率2个方面进行约束,从而保证系统能够安全稳定运行。

电动汽车出行的随机性使电动汽车的放电行为具备较强的随机性特征,且等效电源容量的评估不是一个实时在线的过程,因此适合采用机会约束规则,故在系统安全约束方面参考文献[18]中V2G接入配电网的潮流约束条件,采用机会约束形式设定线路电流约束为:

$$p_r \{ I_a \leq I_{a,\max} \} \geq \beta_l \quad a=1, 2, \dots, N_z \quad (27)$$

式中: p_r 为 $\{\}$ 中事件成立的概率; I_a 为支路 a 的电流;

$I_{a,\max}$ 为支路 a 能够承载的最大电流; β_l 为线路电流约束的置信水平; N_z 为支路总数。式(27)表示:在优化过程中,各条线路承载的电流在一定的置信水平下不超过线路的最大载流量。

节点注入功率的机会约束为:

$$p_r \{ P_b \leq P_{b,\max} \} \geq \beta_p \quad b=1, 2, \dots, N_j \quad (28)$$

式中: P_b 为注入节点 b 的功率; $P_{b,\max}$ 为节点 b 能够被注入的最大功率; β_p 为节点注入功率约束的置信水平; N_j 为节点总数。式(28)表示:在优化过程中,各个节点注入的功率在一定的置信水平下不超过节点能注入的最大功率。

此外,考虑到等效电源的接入对线路载流量和节点注入功率的影响,设定等效电源接入容量的机会约束为:

$$p_r \{ P_{b,j} \leq P_{b,j,\max} \} \geq \beta_{PEV} \quad j=1, 2, \dots, n_p \quad (29)$$

式中: $P_{b,j,\max}$ 为等效电源 j 的最大限制容量; β_{PEV} 为等效电源接入容量约束的置信水平。

4 算例分析

4.1 仿真场景设定

本文主要研究和讨论V2G资源作为供电恢复资源的优势和特征,故算例暂不考虑其他供电恢复资源。算例设定地区中包含住宅区、工作区、教学区、社交区、购物区、其他区6类区域,每一类区域内拥有若干地点,根据各类区域在成都市三环内地区中的实际分布情况,将各区域标注于地图中,见附录C图C1。

电网层网架中各电气节点的位置需与地图中标注的各区域位置分布特征相似,以便位于各区域的电动汽车以充放电的形式完成能量流动和交换,实现电网层和路网层的耦合。IEEE 39节点网络中各节点的位置分布与图C1中各区域的位置分布类似,适合作为本文算例中路网-电网耦合网络中的电网层网架,因此将标注后的地图根据各区域间的相对位置,拟合至IEEE 39节点网络的拓扑结构,见附录C图C2。在该拓扑的节点8、29、30处有应急供电车站。在图C2中,用0~50描述各类区域内负荷的密集程度,并用虚线示意部分区域在电网层与路网层之间的对应关系。

根据2019年上半年的新能源汽车销量,设定电动汽车的相关参数,见附录C表C1。按照工业用电分时电价,设定峰时段(06:00—12:00, 19:00—22:00)的电价为1.5元/(kW·h),谷时段(00:00—06:00, 22:00—24:00)的电价为0.4元/(kW·h),平时段(12:00—19:00)的电价为0.9元/(kW·h)。电池单位电量的寿命损耗补偿费为0.3元/(kW·h),支付给车主的单位电量售电利润为0.2元/(kW·h)。

4.2 电动汽车放电行为的等效电源模型

设定有10万辆电动汽车参与调度,考虑到负荷曲线变化以及电动汽车的电池参数,在配电网负荷较大的时段调度电动汽车进行放电,使其为配电网提供电能,设定调度时段为10:00—22:00。充放电调度规则如下:

1)当电动汽车的剩余电量大于等于 $5\text{ kW}\cdot\text{h}$ 时,可进行放电;

2)当电动汽车的剩余电量小于 $5\text{ kW}\cdot\text{h}$ 时,进行充电,直至电量不低于 $10\text{ kW}\cdot\text{h}$,在此期间电动汽车不参与放电调度。

在上述条件下采用本文所提放电电动汽车集群的电池容量评估方法,得到各区域等效电源的输出功率,见附录C图C3。由图可知,等效电源的输出行为因区域类型的不同,呈现出显著的特征差异,例如:随着时间由上班时间转变为下班时间,工作区的等效电源输出功率逐渐减小,而住宅区的等效电源输出功率呈上升趋势;教学区等效电源输出功率的峰值所对应的时间分布特征与学校上课的时间分布特征类似。此外,同一类型区域内的等效电源输出功率的变化特征相似。可见,本文所提电动汽车放电行为的等效电源模型所得结果符合电动汽车的出行行为特征。

4.3 负荷失电损失评估

设定IEEE 39节点网络中节点23、25、11、1、3处的负荷失电,且所处区域分别为社交区、其他区(医院)、购物区、教学区、工作区,失电时刻为14:00。参考文献[19]对各类负荷制定的重要度评估指标,对本文涉及的6类区域负荷的重要度参量进行评估,结果见附录C表C2。统计各类型负荷的典型负荷容量,结果见附录C表C3。

各典型负荷容量对应图C2中密集程度最高的负荷,根据负荷间的相对密集程度,设定节点23、25、11、1、3处的失电负荷容量分别为42.00、17.75、33.60、10.12、10.50 MW。基于附录A表A1所示的各类负荷的失电损失函数,对算例中各类负荷在各失电时段的失电损失增率 v_0 进行设定,结果见附录C表C4。

基于上述数据,根据式(11)对5个失电负荷的失电损失进行评估。

4.4 基于V2G技术的供电恢复优化策略分析

由于失电时刻为14:00,此时失电负荷总容量大于可用的电动汽车等效电源容量,按照本文所提策略,先由等效电源进行供电恢复,再由应急供电车对尚未恢复的负荷进行补充供电。

用IEEE 39节点网络拓扑中的节点序号表示位于该节点处的等效电源,用 $L_1—L_5$ 分别表示位于节点23、25、11、1、3处的失电负荷,各等效电源对失电

负荷供电恢复的分配结果见附录C表C5。分配结果满足第3节中的各约束条件。

各节点处的等效电源(供电节点)与失电负荷(受电负荷)之间的供电关系见附录C图C4。可见,经过等效电源的供电恢复后,失电负荷 $L_1—L_5$ 的失电容量分别为16.06、0、18.98、5.53、2.96 MW。在等效电源完成供电恢复后,由应急供电车进行补充供电,结果如附录C表C6所示。表中:供电车1—20属于节点30处的应急供电车站;供电车21—40属于节点29处的应急供电车站;供电车41—62属于节点8处的应急供电车站。

将本文所提供供电恢复策略和仅采用应急供电车进行供电恢复的传统策略进行对比,2种供电恢复策略的失电损失结果见附录C图C5。结合式(20),图C5中三维图形的体积即为失电负荷在完全恢复供电前的失电损失。随着失电持续时间的增加,应急供电车逐步就位,失电负荷容量逐渐减小至0。应急供电车就位所需时间由应急供电车站与受电负荷之间的距离及应急供电车的行驶速度决定。应急供电车站与受电负荷之间的距离取决于图C1中的路网层部分,路网层中各地点间的距离和实际地图中各地点间的距离一致,并设定应急供电车在城市中的平均行驶速度为 45 km/h 。

由图C5可以看出,相较于传统策略,本文策略有以下2点优势。①本文策略将电动汽车等效电源作为供电恢复电源,可在停电后的第一时间使部分失电负荷恢复供电,而应急供电车前往失电负荷的所在区域需要一定的时间,无法在停电后的第一时间进行供电。由表C4可知,各类负荷在失电初期的损失增长速率极快,因此在失电初期对失电负荷进行恢复供电尤为重要。②对于特别重要的负荷,如医院负荷,在相同的失电持续时间下其失电损失大于其他类型负荷失电损失之和,故可使用等效电源优先使其完全恢复供电,进而使负荷整体的失电损失显著降低。

对V2G使用成本进行计算,在等效电源供电恢复阶段,共使用70.44 MW等效电源功率,由图C5可知供电恢复总时长不足60 min,将供电恢复总时长估算为60 min,根据式(16)可求得在供电恢复过程中的总V2G使用成本为162 012元。传统策略无法在停电后的第一时间恢复部分负荷供电,以本文算例中购物区的失电负荷为例,结合表C4可求得,仅在停电时刻开始后的0~1 min内,购物区的失电损失达到335 832元,与总V2G使用成本进行对比可知,本文策略在经济性方面具有显著的优势。

本文所提策略还具备以下在算例中尚未明显体现的优势:

1)采用电动汽车放电行为等效电源作为供电恢

复的辅助电源,可减少应急供电车的投入数量,减小交通压力,使应急供电车能够尽快就位,缩短恢复供电时间;

2)减少应急供电车的投入数量,进而降低了应急供电车的出救费用及维护成本;

3)等效电源的实质是大量被集中调度分配的电动汽车电池储能,因此可减少应急储能的购置量,从而降低备用电源的安置和维护成本。

5 结论

本文提出了一种基于V2G技术的城市电网供电恢复策略,将接入城市电网中各处充电桩的电动汽车作为供电恢复电源,可在停电后的第一时间使部分失电负荷恢复供电,减小停电初期的巨额损失。相较于传统策略,本文所提策略无需进行负荷转带,约束条件更少,同时具有易于推广、灵活性好的特点。基于算例结果可得如下结论:

1)基于马尔可夫链和蒙特卡罗法建立电动汽车集群的可用电池容量模型,结果表明各区域电动汽车集群的可用电池容量随时间的变化会发生明显的变化,且符合电动汽车的出行行为特征;

2)基于负荷失电损失函数,将各类负荷失电损失与失电持续时间相关联,构建了可适用于多种类型失电负荷的负荷失电损失评估体系;

3)通过与传统策略进行比较,结果表明本文所提供恢复策略能够针对停电初期负荷失电损失增长速度较快的问题,使用V2G资源在停电后的第一时间使部分失电负荷恢复供电,并结合负荷失电损失评估体系,向重要负荷优先供电,显著减小了供电恢复阶段因负荷失电造成的损失;

4)所提供恢复策略能够降低应急供电车和应急储能的使用量,从而减少故障预防的资金投入。

综上,本文基于城市电网与电动汽车的发展规划及趋势,提出了适用于大规模电动汽车接入的城市电网供电恢复策略,可为未来城市电网的供电恢复研究提供理论支撑。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王敏,吕林,向月. 计及V2G价格激励的电动汽车削峰协同调度策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(4):27-33,85.
WANG Min,LÜ Lin,XIANG Yue. Coordinated scheduling strategy of electric vehicles for peak shaving considering V2G price incentive[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(4):27-33,85.
- [2] 宁剑,张勇. 国内首次!华北将V2G充电桩资源正式纳入电力调峰辅助服务市场并结算[EB/OL]. (2020-04-21)[2022-05-09]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20200421/1065131.shtml>.
- [3] 董志辉,林凌雪,管霖,等. 基于多代理技术的有源配电网供电恢复策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):22-29.
DONG Zhihui,LIN Lingxue,GUAN Lin,et al. Service restoration strategy of active distribution network based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(5):22-29.
- [4] 汤一达,吴志,顾伟,等. 主动配电网故障恢复的重构与孤岛划分统一模型[J]. 电网技术,2020,44(7):2731-2740.
TANG Yida,WU Zhi,GU Wei,et al. Research on active distribution network fault recovery strategy based on unified model considering reconstruction and island partition[J]. Power System Technology,2020,44(7):2731-2740.
- [5] 许寅,王颖,和敬涵,等. 多源协同的配电网多时段负荷恢复优化决策方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):123-131.
XU Yin,WANG Ying,HE Jinghan,et al. Optimal decision-making method for multi-period load restoration in distribution network with coordination of multiple sources[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(2):123-131.
- [6] 郝丽丽,陈从霜,王川,等. 基于恢复价值动态评估的配电网恢复控制决策[J]. 电力自动化设备,2021,41(7):73-80,96.
HAO Lili,CHEN Congshuang,WANG Chuan,et al. Restoration control strategy of distribution network based on dynamic evaluation of restoration value[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(7):73-80,96.
- [7] 梁伟,靳小龙,穆云飞,等. 含微网及电动汽车的主动配电网供电恢复策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(6):1-9.
LIANG Wei,JIN Xiaolong,MU Yunfei,et al. Service restoration method to active distribution network with microgrids and electric vehicles[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2014,26(6):1-9.
- [8] 刘伟佳,孙磊,林振智,等. 含间歇电源、储能和电动汽车的配电网孤岛短时恢复供电策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(16):49-58.
LIU Weijia,SUN Lei,LIN Zhenzhi,et al. Short-period restoration strategy in isolated electrical islands with intermittent energy sources,energy storage systems and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(16):49-58.
- [9] 苏粟,韦存昊,陈奇芳,等. 考虑道路抢修和负荷恢复的电动汽车分层调度策略[J]. 电力系统自动化,2022,46(12):140-150.
SU Su,WEI Cunhao,CHEN Qifang,et al. Hierarchical scheduling strategy for electric vehicle considering road repair and load restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(12):140-150.
- [10] 王璐. “十四五”能源规划敲定重点 绿色低碳变革加力推进[N]. 宝应日报,2022-03-25(3).
- [11] 德勤:2030年中国领先城市电动车占比或达到50%[EB/OL]. (2021-12-02)[2022-05-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1718019884073707251&wfr=spider&for=pc>.
- [12] 潘胤吉,邱晓燕,吴甲武,等. 基于马尔可夫决策过程的电动汽车充电行为分析[J]. 电力建设,2018,39(7):129-137.
PAN Yinji,QIU Xiaoyan,WU Jiawu,et al. Analysis on charging behaviors of electric vehicles based on Markov decision processes[J]. Electric Power Construction,2018,39(7):129-137.
- [13] 李蕊,李跃,苏剑,等. 配电网重要电力用户停电损失及应急策略[J]. 电网技术,2011,35(10):170-176.
LI Rui,LI Yue,SU Jian,et al. Power supply interruption cost of important power consumers in distribution network and its emergency management[J]. Power System Technology,2011,35(10):170-176.
- [14] 李蕊. 配电网可靠性与重要电力用户停电损失研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2010.
LI Rui. The study on economics evaluation of distribution

- system reliability with consideration of important power users [D]. Beijing:China Electric Power Research Institute,2010.
- [15] 康慨,施念,王艳鹏,等. 基于区块链技术的去中心化电动汽车V2G新模式[J]. 电力自动化设备,2021,41(12):78-86,114.
KANG Kai,SHI Nian,WANG Yanpeng,et al. New decentralized V2G mode of electric vehicles based on blockchain technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(12):78-86,114.
- [16] 李怡然,张姝,肖先勇,等. V2G模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):129-135,143.
LI Yiran,ZHANG Shu,XIAO Xianyong,et al. Charging and discharging scheduling strategy of EVs considering demands of supply side and demand side under V2G mode[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(3):129-135,143.
- [17] 冉琳,潘大志,冯世强. 融合鲸鱼泡泡网机制的SSA算法[J]. 智能计算机与应用,2022,12(5):37-42.
RAN Lin,PAN Dazhi,FENG Shiqiang. SSA algorithm with whale bubble net mechanism[J]. Intelligent Computer and Applications,2022,12(5):37-42.
- [18] 吕耀棠,管霖,赵琦,等. 充电式电动汽车停车场的V2G模型及接入配电网方案优化研究[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):1-7,14.
LÜ Yaotang,GUAN Lin,ZHAO Qi,et al. Research on V2G model of EPVV and its optimal scheme accessing to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(11):1-7,14.
- [19] 张爱国,郝建刚,唐志芳,等. 考虑综合负荷重要性的移动应急电源容量优化分配[J]. 电网技术,2008,32(增刊2):86-89.
ZHANG Aiguo,HAO Jiangang,TANG Zhifang,et al. The allocation scheme of mobile emergency generator considering the loads importance[J]. Power System Technology,2008,32(Supplement 2):86-89.

作者简介:



胡思洋(1995—),男,助理实验师,硕士,主要研究方向为配电网故障分析与保护(E-mail:hsy2687@outlook.com)。

(编辑 陆丹)

Power supply restoration strategy of urban power grid based on V2G technology

HU Siyang¹,LIAO Kai²,YANG Jianwei²,LI Bo²,YANG Wei³

(1. Engineering Training Center,Southwest Petroleum University,Chengdu 610500;

2. School of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China;

3. School of Electrical Engineering and Information,Southwest Petroleum University,Chengdu 610500,China)

Abstract: With the extensive promotion of electric vehicles(EVs),the total capacity of EVs in urban power grid is gradually increasing. Based on the vehicle to grid(V2G) technology and considering the discharging capacity of EVs,the EVs can be used as the auxiliary power supply to cooperate with emergency power supply vehicle to quickly recover the power loss load,which can effectively reduce the load-loss cost,has good flexibility and can reduce the configuration cost of traditional emergency energy such as emergency energy storage,emergency power supply vehicle,and so on. The discharging model of EVs is established to evaluate the power supply level of EV batteries. Taking the importance and capacity of the outage load as the basis of limited power distribution,a power supply restoration optimization strategy based on V2G technology is proposed with the goal of minimizing the load-loss cost,which is solved by the combination of genetic algorithm and improved whale algorithm. The simulative results of the example verify the feasibility and superiority of the proposed method,which can provide a new idea for the research on power supply restoration strategy of urban power grid after large-scale EV access in the future.

Key words: urban power grid;electric vehicles;V2G technology;power supply restoration;optimal decision

附录 A

表 A1 各类负荷的失电损失
Table A1 Load-loss cost of various customers

失电持续 时间/min	失电损失/(元·kW ⁻¹)				
	住宅类负荷	政府机关类负荷	商业类负荷	小工业类负荷	工业重要用户负荷
0	0	0	9.701	60.266	118.206
1	0.028	12.073	9.995	63.401	537.300
20	1.470	21.774	38.119	139.836	1243.292
60	5.292	51.045	104.363	247.530	1625.586
120	11.023	65.118	203.729	409.071	2018.136
240	36.453	84.872	382.565	707.705	2119.137
480	78.002	116.259	770.715	1176.994	2304.161
1440	244.199	241.808	979.734	1473.619	3044.257

附录 B

鲸鱼算法模拟了鲸鱼群狩猎的行为，是一种基于元启发式的群智优化算法，其基本流程如图 B1 所示。

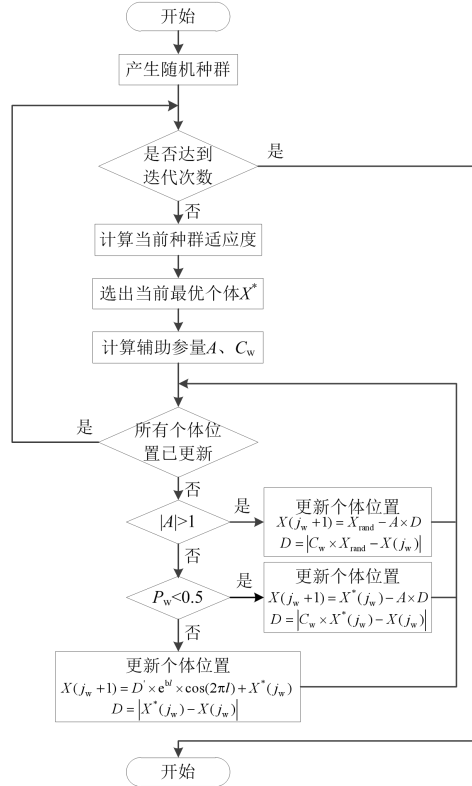


图 B1 鲸鱼算法的流程图

Fig.B1 Flowchart of whale algorithm

图 B1 中， j 为当前迭代次数， X 为当前鲸鱼个体的位置， X_{rand} 为一个随机鲸鱼个体的位置， X^* 为目前为止最优鲸鱼个体的位置， A 、 C 为辅助计算的系数，计算方式为：

$$A = 2hg_1 - h \quad (\text{B1})$$

$$C_w = 2g_2 \quad (\text{B2})$$

$$h = 2 - \frac{2j_w}{j_{w.\text{max}}} \quad (\text{B3})$$

式中： g_1 、 g_2 为(0,1)中随机数； $j_{\max}$ 为最大迭代次数。

从图 B1 可以看出，鲸鱼算法的种群更新方式类似于粒子群优化算法，均以更新种群中个体位置的方式，向最优解靠拢。鲸鱼算法具有搜索捕食(向随机个体靠拢)、包围猎物(向当前最优个体靠拢)、发泡网攻击(呈螺旋线形态向当前最优个体靠拢)三种更新个体位置的方式，搜索示意图如图 B2 所示。相较于遗传算法，鲸鱼算法的搜索路径较复杂，寻优时间较长，但螺旋线形态的搜索路径能够覆盖更广的搜索面积，因此具有较好的全局寻优能力。鲸鱼算法的此特征也被用于提升其他优化算法的全局搜索能力^[17]，因此相较于遗传算法，鲸鱼算法更适用于此阶段的优化。

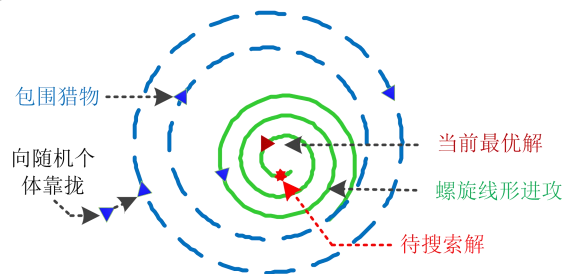


图 B2 鲸鱼算法搜索示意图

Fig.B2 Search schematic diagram of whale algorithm

在分配应急供电车向失电负荷进行补充供电时，欲求的解为各应急供电车辆分别为各失电负荷供电，其表现形式是一个其中元素互不相关的一维数组，难以用标准鲸鱼优化算法中的个体位置变化公式来描述各个解之间的靠拢行为。因此对标准鲸鱼算法做出如下改进。

1) $X - A \times D$ 表示离 X 距离为 $A \times D$ 的个体，2 个 1 维数组间的“距离”可由其中不同元素的个数来描述，当所有元素均相同时，2 个数组重合，即认为距离为 0，因此对标准算法中的 $A \times D$ 取整后取绝对值；

2) 将标准算法中的 $X - A \times D$ 替换为“对 X 中的 $A \times D$ 个元素进行变异”，以此得到与数组 X “距离” $A \times D$ 的数组；

3) 相似地， $D' \times e^{b'l} \times \cos(2\pi l) + X$ 表示离 X 距离 $D' \times e^{b'l} \times \cos(2\pi l)$ 的个体，且距离呈螺旋线特征。对 $D' \times e^{b'l} \times \cos(2\pi l)$ 取整后取绝对值，以离散点的形式保留螺旋线的特征。

用一简单算例，以最小化成本为目标，对改进的鲸鱼算法和常用的遗传算法进行对照，结果如图 B3 所示。

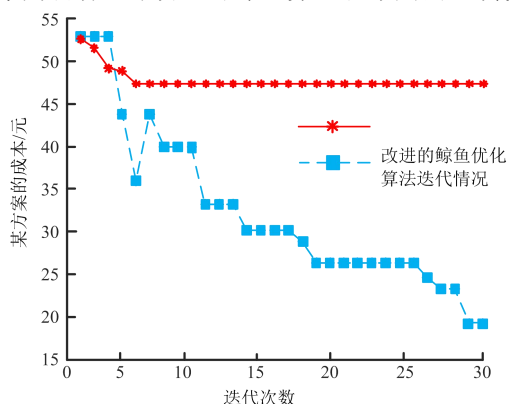


图 B3 改进的鲸鱼算法与遗传算法的对比图

Fig.B3 Comparison between improved whale algorithm and genetic algorithm

图 B3 中 Y 轴为通过某方案优化得到的成本，X 轴为优化算法的迭代次数。2 种算法在经过 30 代的迭代后，通过比较可以清楚地发现，遗传算法在第 5 代时陷入局部收敛并无法跳出，优化后的成本约为 47.6 元；改进的鲸鱼算法有跳出局部收敛的能力，在迭代至 30 代时，经过优化的成本约为 17.6 元。由此可知相较于遗传算法，使用螺旋线搜索路径的改进鲸鱼算法虽然收敛时间更长，但具有更好的全局寻优能力。

附录 C

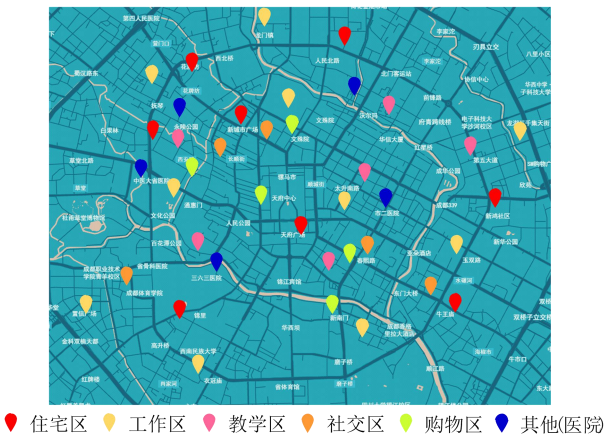


图 C1 某地区各类型区域负荷分布

Fig.C1 Regional load distribution in an area

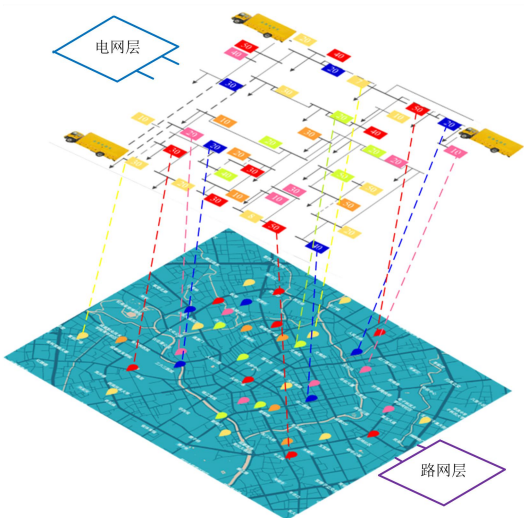


图 C2 电网拓扑结构

Fig.C2 Topology structure of power grid

表 C1 电动汽车参数

Table C1 Parameters of electric vehicles

车型	电池容量/(kW·h)	放电功率/kW	每公里耗电/(kW·h)
北汽 EU5	53.66	6	0.13
比亚迪 e5	60	6	0.15
帝辛 EV	52	5.8	0.13
比亚迪元	53.22	7.6	0.15
荣威 ei5	52.5	6.2	0.13

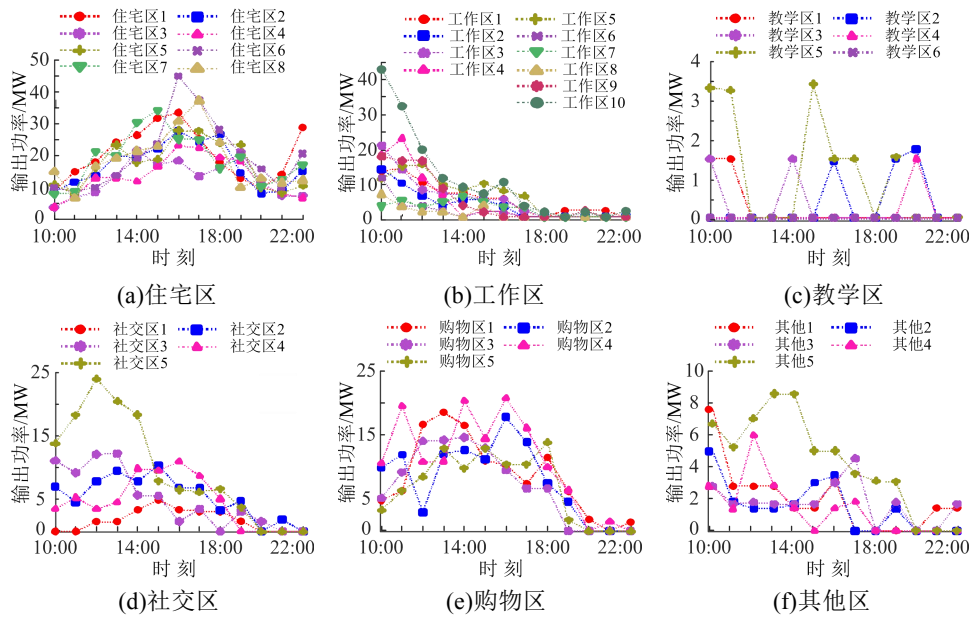


图 C3 各区域等效电源的输出功率

Fig.C3 Output power of equivalent power source in different regions

表 C2 各类区域负荷重要度参量

Table C2 Importance parameters of regional load

负荷类型	ε_1	ε_2	ε_3	负荷类型	ε_1	ε_2	ε_3	负荷类型	ε_1	ε_2	ε_3
住宅区	1	1	0	大学(教学区)	0	1	2	商厦(购物区)	2	3	2
医院(其他区)	5	2	4	写字楼(工作区)	1	4	1	酒店(社交区)	1	3	1

表 C3 各类负荷的典型负荷容量

Table C3 Typical load capacity for each type of load

典型负荷	负荷容量/MW	典型负荷	负荷容量/MW
浙江大学紫金港校区东区(教学区)	10.122	写字楼(工作区)	17.5
成都远洋太古里(购物区/社交区)	42	住宅区(住宅区)	10
四川大学华西医院(其他)	35.5		

表 C4 各类负荷的失电损失增率

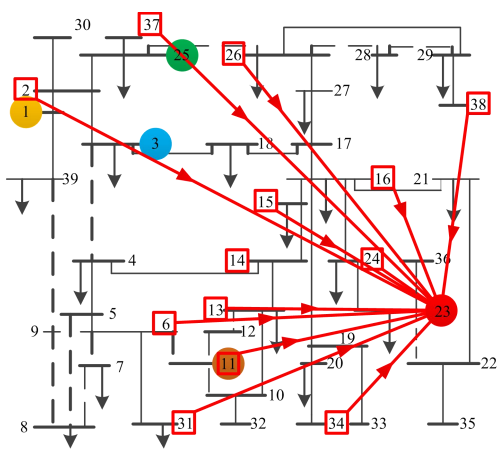
Table C4 Increase rate of load-loss cost for each type of load

负荷类型	失电损失增率/[元·(min·kW) ⁻¹]		
	0~1min	1~20min	20~60min
住宅区	0.028	0.075	0.096
医院	537.300	35.263	9.557
大学	12.073	0.511	0.732
写字楼	12.073	0.511	0.732
商厦	9.995	1.406	1.656
酒店	9.995	1.406	1.656

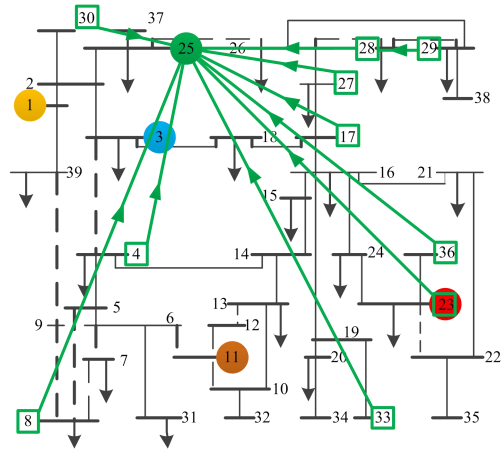
表 C5 等效电源对失电负荷供电恢复的分配结果

Table C5 Distribution results of equivalent power sources for power supply restoration to lost load

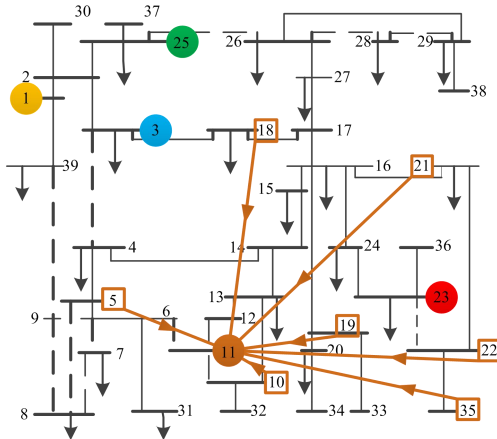
供电节点	受电负荷	供电节点	受电负荷	供电节点	受电负荷	供电节点	受电负荷	供电节点	受电负荷	供电节点	受电负荷	供电节点	受电负荷	供电节点	受电负荷
1	L ₄	6	L ₁	11	L ₁	16	L ₁	21	L ₃	26	L ₁	31	L ₁	36	L ₂
2	L ₁	7	L ₄	12	L ₄	17	L ₂	22	L ₃	27	L ₂	32	L ₅	37	L ₁
3	L ₄	8	L ₂	13	L ₁	18	L ₃	23	L ₂	28	L ₂	33	L ₂	38	L ₁
4	L ₂	9	L ₅	14	L ₁	19	L ₃	24	L ₁	29	L ₂	34	L ₁	39	L ₄
5	L ₃	10	L ₃	15	L ₁	20	L ₅	25	L ₅	30	L ₂	35	L ₃		



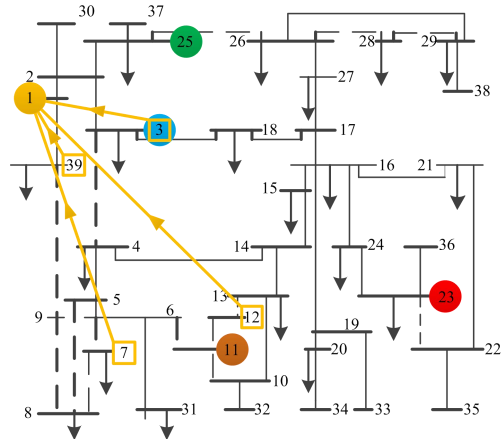
(a) 等效电源对 23 号失电负荷恢复供电分配结果



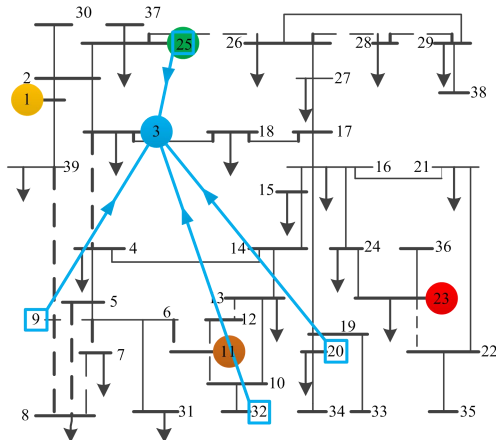
(b) 等效电源对 25 号失电负荷恢复供电分配结果



(c) 等效电源对 11 号失电负荷恢复供电分配结果



(d) 等效电源对 11 号失电负荷恢复供电分配结果



(e) 等效电源对 3 号失电负荷恢复供电分配结果

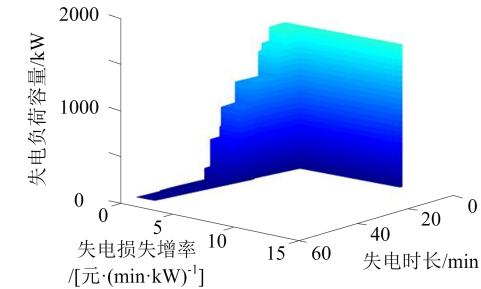
图 C4 等效电源对失电负荷恢复供电的分配结果

Fig.C4 Distribution results of equivalent power sources for power supply restoration to lost loads

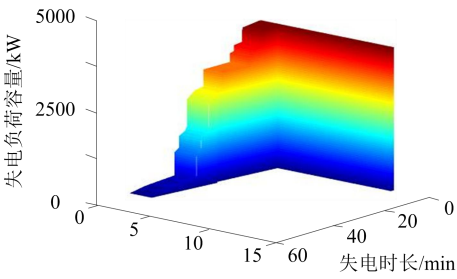
表 C6 应急供电车补充供电的分配结果

Table C6 Distribution results of supplementary power supply for emergency power supply vehicles

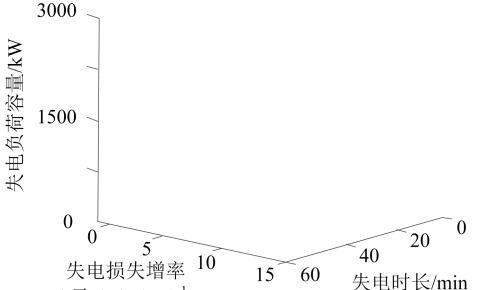
供电车 序号	受电 负荷	供电车 序号	受电 负荷	供电车 序号	受电 负荷	供电车 序号	受电 负荷	供电车 序号	受电 负荷	供电车 序号	受电 负荷	供电车 序号	受电 负荷	供电车 序号	受电 负荷
1	L ₂	9	L ₅	17	L ₄	25	L ₁	33	L ₁	41	L ₃	49	L ₄	57	L ₄
2	L ₄	10	L ₄	18	L ₄	26	L ₁	34	L ₂	42	L ₄	50	L ₅	58	L ₃
3	L ₂	11	L ₂	19	L ₅	27	L ₁	35	L ₃	43	L ₃	51	L ₄	59	L ₃
4	L ₂	12	L ₂	20	L ₁	28	L ₂	36	L ₁	44	L ₃	52	L ₄	60	L ₃
5	L ₂	13	L ₁	21	L ₁	29	L ₁	37	L ₃	45	L ₅	53	L ₃	61	L ₅
6	L ₄	14	L ₁	22	L ₂	30	L ₂	38	L ₁	46	L ₃	54	L ₄	62	L ₄
7	L ₅	15	L ₂	23	L ₁	31	L ₂	39	L ₂	47	L ₃	55	L ₅		
8	L ₄	16	L ₅	24	L ₁	32	L ₂	40	L ₂	48	L ₃	56	L ₅		



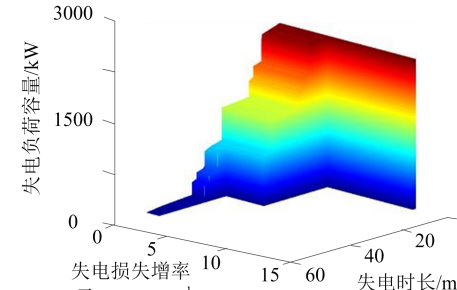
(a)本文策略下社交区失电损失



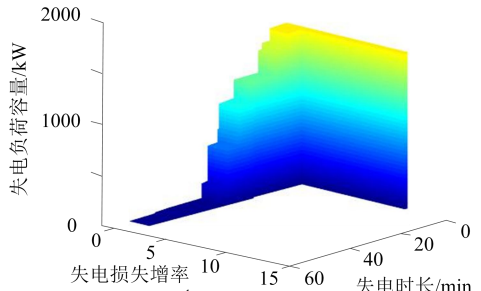
(b)传统策略下社交区失电损失



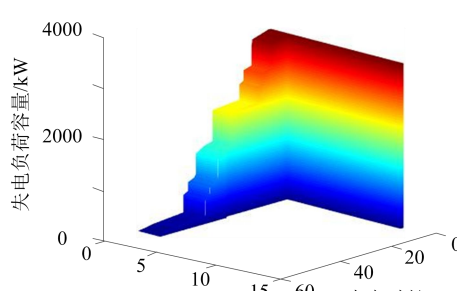
(c)本文策略下医院失电损失



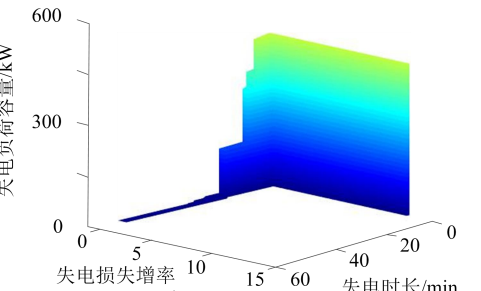
(d)传统策略下医院失电损失



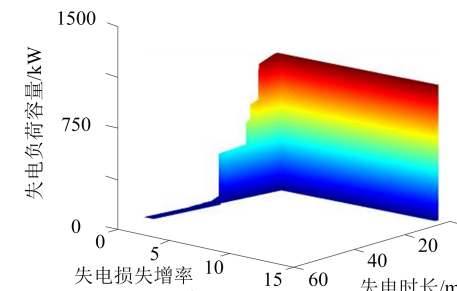
(e)本文策略下购物区失电损失



(f)传统策略下购物区失电损失



(g)本文策略下教学区失电损失



(h)传统策略下教学区失电损失

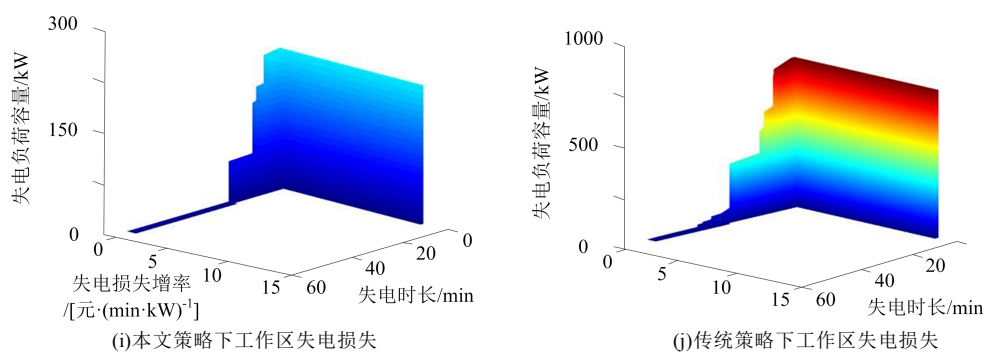


图 C5 失电损失对比

Fig.C5 Comparison of load-loss cost