

# 分时电价政策下电气化铁路储能的经济性

邬明亮

(国网浙江省电力有限公司建设分公司,浙江 杭州 310000)

**摘要:**分时电价政策下,储能尤其适用于工商业这类电价水平较高的用户侧。电气化铁路存在大量回馈制动能量,且无法进行反向计量,将这部分能量通过储能系统回收利用,不存在边际成本,可提高储能的经济性。以锂电池储能为对象,从牵引负荷的特点出发,分析了电气化铁路储能的方案可行性;考虑锂电池储能系统的特性,建立了电气化铁路储能的经济性模型;以财务内部收益率和净年值为评价指标,分析了电气化铁路储能的可行性。算例结果表明,通过合理的配置,电气化铁路储能具有良好的投资价值,且投资电气化铁路储能需要结合资本金、贷款利率、贷款时间等多个因素综合进行决策。

**关键词:**分时电价;电气化铁路;储能;铁路功率调节器;财务内部收益率;净年值

**中图分类号:**TM 911;TM 922

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202004003

## 0 引言

为了应对环境破坏和资源匮乏的挑战,实现清洁能源的可持续发展,新一轮全球能源转型已经展开。作为永续供应、绿色低碳、经济高效、开放共享的能源系统,全球能源互联网是实现人类可持续发展的必由之路<sup>[1]</sup>。储能是能源互联网不可或缺的关键一环,可实现国家、发电企业、电网公司以及用户的互利共赢。从电力系统的角度来看,储能的应用场景分为发电侧、输电侧、配电侧和用电侧,其中用电侧的主要应用形式是安装于工商业用户端或园区的储能系统,帮助用户降低需量电费和电量电费。

随着储能技术上的突破,以锂电池、铅炭电池、超级电容为代表的储能技术已接近市场化。虽然目前储能技术的应用成本仍较高,但在大规模应用的情况下,其成本必然快速下降,最终实现市场化。除了补贴外,分时电价 TOU (Time-Of-Use price) 也是一种刺激储能发展的政策。分时电价是电力需求侧管理的一种经济手段<sup>[2]</sup>,通过在高峰、平段、低谷等不同时段制定不同的电价,刺激用户改变用电方式。在分时电价政策下,高峰电价以及低谷电价的差额较大,因此特别适合在工商业这类电价水平较高的用户侧应用储能系统。

牵引供电系统是一种大工业用户<sup>[3]</sup>,不论是直流牵引供电系统还是交流牵引供电系统,电力机车产生的回馈制动能量都造成了极大的能量浪费,将储能系统应用于牵引供电可有效提升能量利用效率。文献[4]介绍了蓄电池、超级电容、飞轮等3种储能形式在轨道交通牵引供电系统地面式储能、车载式储能中的应用前景,其中超级电容、飞轮具有功率密度大的特点,更适用于车载式储能,3种储能形式均有用于地面式储能的报道,且现有报道以应用

于城轨直流牵引供电系统居多。文献[5]分析了直流牵引供电系统中地面式储能的安装位置、容量对直流供电网络节能效率及稳压效果的影响,并对储能系统的容量配置进行了优化计算;文献[6]对直流牵引供电系统中空载电压、制动电阻启动电压与储能系统容量进行了多目标优化,优化后在相同储能系统配置成本下系统总能耗减小,储能系统得到更加有效的利用。

电气化铁路所用的交流牵引供电系统与直流牵引供电系统有所不同,在交流牵引供电系统中,电力机车的回馈制动能量可以通过牵引变压器向电力系统反送,但这部分能量并不能纳入反向计量范围,且还有可能污染电力系统的电能质量。为了解决这一问题,已有文献提出了基于背靠背结构的铁路功率调节器 RPC (Railway Power Conditioner),可实现牵引供电系统2条供电臂之间的有功功率转移<sup>[7-8]</sup>,从而令回馈制动能量能够重新用于电力牵引。但RPC仅能用于一条供电臂回馈能量、另一条供电臂有牵引负荷的情况,无法从根本上解决问题,回馈能量利用效率也有限。为此,文献[9-12]提出了将蓄电池、超级电容、飞轮等储能系统集成至RPC的方案,从而有效地回收回馈制动能量,并将其充分利用到电力牵引中,在降低电量电费的同时尽可能避免污染电力系统。文献[13]研究了飞轮储能在电气化铁路中的应用,算例分析结果表明,该方案可有效降低电气化铁路牵引供电系统的需量电费、电量电费,具备良好的经济性,但未考虑分时电价对经济性的影响。

本文以锂电池储能为对象,从牵引负荷的特点出发,分析了电气化铁路储能的方案可行性;考虑锂电池储能系统的特性,建立储能系统的经济性模型;以财务内部收益率 FIRR (Financial Internal Rate of Return) 和净年值 NAV (Net Annual Value) 为评价指标,分析了电气化铁路储能在配置约束下的经

济可行性、抗电价下降性,并以资本金、贷款利率、贷款时间为影响因素进行敏感性分析。本文结论与分析方法可用于电气化铁路储能落地实施的投资决策。

## 1 牵引供电系统特性

### 1.1 牵引负荷分析

附录中图 A1 为某牵引变电站一天 24 h 内  $\alpha$  臂、 $\beta$  臂的有功负荷曲线  $P_{\alpha l}$ 、 $P_{\beta l}$ 。对供电臂负荷的关键量进行计算如表 1 所示。

表 1 牵引负荷关键量

Table 1 Key parameters of traction load

供电臂	最大牵引功率 / MW	最大制动功率 / MW	牵引总电量 / (MW·h)	制动总电量 / (MW·h)
$\alpha$ 臂	44.3	17.7	163.2	5.6
$\beta$ 臂	35.1	20.3	109.8	15.1
两臂	54.5	21.1	273.0	20.7

分析图 A1 和表 1 可知,牵引负荷具有功率等级大、波动频繁、两臂不平衡的特性。除此之外,牵引供电系统大多数时间消耗电能,仅在机车制动时产生回馈能量,从牵引和制动状态的功率、电量(特别是电量)来看,两者有较大差距。

### 1.2 电气化铁路储能的方案可行性

牵引供电系统是一种大工业用户,其供电电压一般为 110 kV 或 220 kV<sup>[14]</sup>。目前各地的电网公司大多出台了分时电价政策,大工业用户可根据自身的用电特性申请采用分时电价进行电费计量。分时电价政策下,一天分为高峰、平段、低谷 3 个时段,电价逐一降低。附录中表 A1 为部分电价水平较高的地区 220 kV 供电大工业用户的高峰电价及对应的时段。

根据牵引供电系统和分时电价政策的特点,在电气化铁路中应用储能具有以下优势。

(1)大工业用户的高峰电价较高,而回馈制动电量本身并不能纳入反向计量范围,若吸收这部分能量,在高峰电价时段释放,则这种能量转移不存在边际成本,大幅提高了储能系统的经济效益。

(2)高峰、平段、低谷时段以小时划分,便于充放电控制策略的制定,储能系统在高峰时段放电,其余时段充电,高峰时段的分段数即为每天储能系统充放电状态的转换次数。

(3)牵引供电系统的牵引功率大于制动功率,牵引用电量远大于制动回馈电量,通过合理配置,储能系统在制动状态下吸收的能量能够由电力机车在牵引状态下完全消耗,能量利用效率高。

(4)除以上 3 点外,牵引变电站具有闲置土地资源、投资储能系统不存在租用土地的问题;储能系统吸收的能量完全用于电力牵引,与外电系统无关,不

用考虑上网电价、税费等问题。

## 2 锂电池储能系统特性

### 2.1 额定功率与容量

储能系统的额定功率与额定容量是体现其性能最重要的 2 个参数。额定功率指的是储能系统能够承受的最大充、放电功率,用  $P_{ESn}$  表示。额定容量指的是储能系统可储存或释放的能量大小,可以用储能系统在额定功率下完全充、放电的时长  $h$  来衡量。储能系统的额定容量  $Q_{ESn}$  为:

$$Q_{ESn} = P_{ESn} h \quad (1)$$

锂电池储能系统具有配置灵活的特点<sup>[15]</sup>,根据不同应用需求,对锂电池组进行合理的串并联,可以得到不同功率、不同容量的组合方案。

### 2.2 荷电状态与放电深度

储能系统的荷电状态 SOC(State Of Charge)指的是储能系统所剩余的电量与当前容量的比值。在锂电池的工作过程中,无论是过充还是过放都会损害其健康,因此在制定控制策略时,有必要设定 SOC 的上限值  $B_{SOC,max}$ 、下限值  $B_{SOC,min}$ 。SOC 上、下限值之间的差值被称为放电深度 DOD (Depth Of Discharge),以  $d_{DOD}$  表示,即储能系统能够放出的最大电量与当前容量的比值,DOD 是影响储能系统循环寿命的重要因素。

### 2.3 充放电效率

在储能系统实际运行过程中,锂电池本身以及变流器均存在一定的能量损耗,因此储能系统吸收的能量与释放的能量并不相等。定义  $\eta$  为储能系统的充放电效率,则储能系统在一个充放电周期内吸收的能量  $E_c$  与释放的能量  $E_d$  之间的关系为:

$$E_d = \eta E_c \quad (2)$$

### 2.4 容量衰减特性

锂电池在充放电过程中,其容量呈现出不断衰减的状态,当其容量衰减至标称容量的 75% 时,可认为其寿命终止<sup>[16]</sup>。锂电池的容量衰减是温度、充放电倍率、DOD、累计循环次数等多种因素耦合影响下的结果,本文利用式(3)所示的模型对锂电池的容量保持率  $\eta_Q$  进行估算<sup>[17-18]</sup>。

$$\eta_Q = 1 - 2.3e^{\frac{1.5e^2 C_{rate} - 1.8e^4}{RT_{op}}} C_{rate}^{0.15} d_{DOD}^{0.76} N^{0.55} \quad (3)$$

其中, $R$ 为理想气体常数,取值为 8.314; $T_{op}$ 为锂电池工作的开氏温度; $C_{rate}$ 为锂电池充放电倍率,即  $h$  的倒数; $N$ 为锂电池累计循环次数。

## 3 电气化铁路储能系统

### 3.1 拓扑结构

电气化铁路牵引供电系统及储能系统的拓扑结

构如图1所示。图中,牵引变压器将电源的三相电变换为两相电以向供电臂供电,牵引负荷从供电臂单相取电, $P_{\alpha 1}$ 和 $P_{\beta 1}$ 分别为牵引和制动状态下的正向、反向有功功率;储能系统基于RPC的结构,通过2台变压器连接于2条供电臂之间,通过2台单相变流器与牵引供电系统进行能量交换, $P_{\alpha c}$ 和 $P_{\beta c}$ 为2台变流器的充放电功率;2台变流器共用1个直流母线电容,构成背靠背结构,储能系统经过双向DC/DC变换器连接至直流母线,双向DC/DC变换器可实现储能系统的充放电控制。

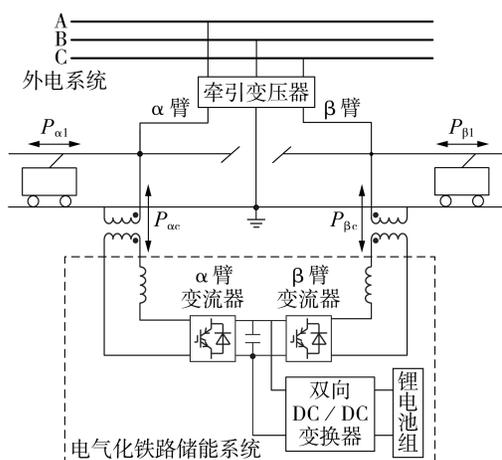


图1 牵引供电系统及储能系统

Fig.1 Traction system and energy storage system

### 3.2 储能系统的充放电控制

电气化铁路储能最根本的需求是在制动状态时吸收回馈能量,在高峰电价时段释放能量,从而减少电费开支。根据电源的正方向,定义储能系统的放电功率为负,充电功率为正,储能系统的充放电功率 $P_{ES}$ 如附录中图A2所示。

### 3.3 储能系统的充放电转换

如上文所述,储能系统在高峰电价时段放电,在其余时段充电,因此分时电价的时段划分决定了储能系统的充放电转换。以表A1所示上海的分时电价时段划分为例:储能系统在前一日21:00至当日08:00、11:00—18:00为充电模式;08:00—11:00、18:00—21:00为放电模式。储能系统一天内最多经历2个充放电循环。

## 4 储能系统经济性模型及评估方法

### 4.1 储能系统的投资成本

储能系统的投资成本包括电池本体成本、变流器成本和其他成本<sup>[19]</sup>,其中电池本体成本和其他成本与储能系统的容量成正比,变流器成本与储能系统功率成正比。储能系统的投资成本 $C_{ES}$ 为:

$$C_{ES} = k_{iq}Q_{ESn} + k_{ip}P_{ESn} = (hk_{iq} + k_{ip})P_{ESn} \quad (4)$$

其中, $k_{iq}$ 为单位容量投资成本,单位为元/(kW·h);

$k_{ip}$ 为单位功率投资成本,单位为元/kW。

对于一个项目,在投资初期业主方可投入的资金被称为项目资本金 $C_{cp}$ ,若资本金小于总的投资成本,则剩余的资金需要采用贷款来获取,此时每年需要偿还的本金和利息可以视为项目收益期内的另一项成本。假设贷款年利率为 $r_1$ ,贷款年数为 $n$ ,还款方式为等额本金,则在还贷周期内每年需要偿还的本金和利息 $C_1$ 为:

$$C_1 = \frac{r_1(1+r_1)^n(C_{ES} - C_{cp})}{(1+r_1)^n - 1} \quad (5)$$

### 4.2 储能系统的收益

储能系统的收益即电费收益,指的是储能系统在高峰时段释放的能量由牵引负荷消耗时抵消原本需要开支的部分电费而带来的收益。考虑到锂电池的衰减特性,一年内的电费收益 $B_{ES}$ 为:

$$B_{ES}(y) = E_{year}(y)B_e = \sum_{d=1}^{365} E_{day}(d)B_e \quad (6)$$

其中, $d$ 为天数; $y$ 为年数; $E_{day}(d)$ 和 $E_{year}(y)$ 分别为一天和一年内储能系统累计释放的电量,单位为kW·h; $B_e$ 为高峰电价,单位为元/(kW·h)。

### 4.3 储能系统的运维成本

在储能系统的寿命周期内,还需要支出运维成本。年运维成本 $C_{om}(y)$ 与储能系统的功率及释放的电量有关<sup>[20]</sup>,即:

$$C_{om}(y) = k_{omp}P_{ESn} + k_{ome}E_{year}(y) \quad (7)$$

其中, $k_{omp}$ 为单位功率运维成本,单位为元/kW; $k_{ome}$ 为单位电量运维成本,单位为元/(kW·h)。

### 4.4 储能系统的残值

残值指的是在设备使用寿命的末期处置设备可能获得的价值。储能系统的残值可以视为寿命周期内的最后一项收益,一般用投资成本的百分比表示。储能系统的残值 $B_{rv}$ 为:

$$B_{rv} = k_{rv}C_{ES} \quad (8)$$

其中, $k_{rv}$ 为残值率。因锂电池具有可梯次利用的特性<sup>[21]</sup>,储能系统可获得较高的残值。

### 4.5 经济性评估方法及指标

利用上文的全寿命周期经济性模型,可以对储能系统在寿命终止(累计循环次数达到临界值)前每年的净收益情况进行计算,这些净收益的值被称为年值AV(Annual Value)。考虑到资金的时间价值,年值并不能准确地反映经济性,需要将其折算到一个相同的时间点上。本文采用将各年净收益都折算到项目初期的方式,此时这些值被称为现值PV(Present Value)。假设储能系统在第 $T$ 年寿命终止,则每年净收益的现值为:

$$B_{PV}(y) = \begin{cases} \frac{B_{ES}(y) - C_{om}(y) - C_1}{(1+r_d)^y} & 1 \leq y \leq n \\ \frac{B_{ES}(y) - C_{om}(y)}{(1+r_d)^y} & n < y < T \\ \frac{B_{ES}(y) + B_{rv} - C_{om}(y)}{(1+r_d)^y} & y = T \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $r_d$  为基准折现率, 可以看作是投资人期望达到的内部收益率, 电力行业一般取 8%<sup>[22]</sup>。

由于不同配置方案下储能系统的寿命周期不同, 本文采用净年值作为经济性指标。净年值是指按给定的基准折现率, 通过等值换算将寿命周期内各个不同时间点的收益现值分摊到寿命周期内各年的等额年值:

$$B_{NAV} = \frac{\left( \sum_{y=1}^T B_{PV}(y) - C_{cp} \right) r_d}{1 - (1+r_d)^{-T}} \quad (10)$$

除净年值外, 财务内部收益率是评价项目盈利能力的另一项动态指标, 以  $f_{FIRR}$  表示。财务内部收益率不需要考虑贷款, 如式(11)所示。当财务内部收益率大于基准折现率时, 认为项目在经济上可以接受, 反之则不可接受。

$$\sum_{y=1}^T \frac{B_{ES}(y) - C_{om}(y)}{(1+f_{FIRR})^y} + \frac{B_{rv}}{(1+f_{FIRR})^T} - C_{ES} = 0 \quad (11)$$

## 5 算例分析

### 5.1 储能系统的配置

在对储能系统进行配置时, 需要考虑场地、变流器容量、充放电倍率等约束条件。假设牵引变电站最多容纳  $1 \text{ MW} \cdot \text{h}$  的储能系统, 变流器最大容量为  $2 \text{ MW}$ , 为保证锂电池的使用寿命, 最大允许充放电倍率为 2, 则储能系统的配置原则为:

$$\begin{cases} P_{ESn} h \leq 1 \\ P_{ESn} \leq 2 \\ 1/h \leq 2 \end{cases} \quad (12)$$

### 5.2 经济可行性分析

根据储能系统的经济性模型及配置原则, 对电气化铁路储能系统的经济性进行计算。在储能系统的建模中, 本文中工作温度为不可控因素, 假设其值为  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $318 \text{ K}$ ), 储能系统的参数如表 2 所示。

表 2 储能系统参数

参数	取值
$\eta / \%$	95
$T_{op} / \text{K}$	318
$d_{don} / \%$	80

参考目前典型的储能系统投资成本制定成本参数, 考虑到 RPC 目前属于非量产的特殊设备, 成本必然高于量产的储能变流器, 因此单位功率投资成本的取值较大。储能系统的成本、收益参数如表 3 所示。

表 3 成本、收益参数

Table 3 Parameters of cost and benefit

参数	取值	参数	取值
$k_{in} / [元 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	1200	$k_{ome} / [元 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.01
$k_{ip} / (元 \cdot \text{kW}^{-1})$	1000	$k_{rv} / \%$	10
$k_{omn} / (元 \cdot \text{kW}^{-1})$	50	$B_e / [元 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.9

考虑到电气化铁路运行图具有日周期性<sup>[13]</sup>, 本文假设牵引负荷曲线固定。本节暂不考虑贷款, 且高峰电价取为固定值。图 2 为电气化铁路储能的财务内部收益率随储能配置的变化趋势。

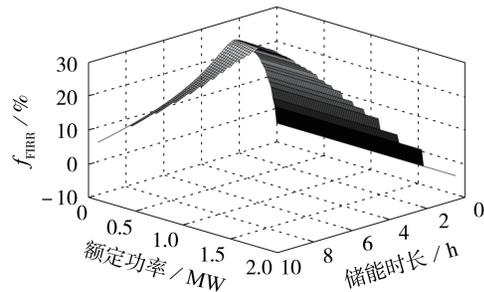


图 2 财务内部收益率与储能配置的关系

Fig.2 Relationship between FIRR and energy storage configuration

分析图 2, 可得电气化铁路储能的经济性具有以下特点。

(1) 财务内部收益率随储能时长的变化明显, 随着储能时长的增大, 财务内部收益率先增大后减小。由于当储能时长增大时, 储能系统能够转移的电量增多, 同时功率投资成本被分摊到更大的容量投资成本中, 即单位投资成本能够获得更多的收益; 而当储能时长过大时, 额定功率成为限制储能系统转移电量的约束, 储能系统的容量无法被充分利用, 导致财务内部收益率降低。

(2) 财务内部收益率随额定功率的增大而降低, 但变化趋势不明显。当储能时长一定时, 储能系统的投资成本随额定功率成倍增长, 由于本算例中储能规模较小, 储能系统能够转移的电量近似随额定功率成倍增长, 因此财务内部收益率基本保持不变。

(3) 当储能时长过低 ( $0.4 \text{ h}$  以下) 或过高 ( $9.2 \text{ h}$  以上) 时, 财务内部收益率小于  $8\%$  的限值, 此时电气化铁路储能不具备投资价值; 当储能时长为  $0.4 \sim 9.2 \text{ h}$  时, 财务内部收益率均在  $8\%$  以上, 说明通过合

理的配置,电气化储能具备投资价值;当储能时长为2.3~2.9 h时,财务内部收益率达到24%以上,经济效益非常可观。

### 5.3 考虑贷款的敏感性分析

图2所示的经济性计算结果未考虑贷款,只能从财务的角度反映项目的可行性。在实际项目的运作过程中,业主方可进行投资的金额可能与项目投资成本并不相同,因此有必要考虑资本金、贷款利率、贷款时间等因素对经济性进行进一步评价。由于不同储能配置下的投资成本相差非常大,而财务内部收益率难以量化项目能够带来的收益数额,同时不同配置下的储能系统寿命周期不同,因此本节利用净年值法进行敏感性分析。

通过式(9)、式(10)对某一资本金下电气化铁路储能系统在全寿命周期内的收益净年值进行计算,在年利率和贷款时间固定时,总能找到一种储能配置方案,令总收益的净年值最大。需要注意的是,根据我国现行的资本金制度,电力工程项目的资本金不得少于总投资额的20%。

假设贷款情况包括短期( $n=1$  a)、长期( $n=5$  a)以及低息( $r_1=5\%$ )、高息( $r_1=15\%$ ),对4种典型贷款情况下的不同资本金能够获得的最大收益净年值以及对应的最优储能配置方案和贷款比例进行计算,结果如附录中图A3—A6所示。

分析图A3—A6可得以下结论。

(1)贷款情况对电气化铁路储能经济性的影响主要体现在收益净年值上,随着资本金的变化,收益净年值表现出不同的变化趋势,而最优储能配置和对应的贷款比例变化趋势基本相同。

(2)当资本金小于32万元时,收益净年值随着资本金的增大而快速上升,此阶段资本金是限制经济效益的主要因素,最优储能方案下的贷款比例均接近最高限值的80%,说明电气化铁路储能的经济性良好,通过合理地贷款可提高经济效益。

(3)当资本金为32~160万元时,不同贷款情况下收益净年值的变化趋势不同,最优储能配置为0.4 MW/2.5 h,贷款比例逐渐降低。此阶段,当贷款时间相同时,贷款利率越低可获得更多的收益,且贷款时间越长,差距越明显;当贷款利率较低时,贷款时间越长则收益越高,且提高贷款比例可提高收益;当贷款利率较高时,贷款时间越短则收益越高,且此时为了提高收益应尽量降低贷款比例。

(4)当资本金大于160万元时,最优储能配置仍为0.4 MW/2.5 h,贷款比例下降为0,收益净年值随着资本金的增大逐渐下降。这是因为此时最优储能配置已经达到了1 MW·h的最大储能规模,进一步增加投资只能提高储能系统功率、降低储能时长,而

这样做并不能带来额外的收益,反而会使投资的经济效益下降。因此,在储能配置受到限制的情况下,提高投资并不一定能带来更大的收益。

综上,投资电气化铁路储能需要结合可投资金额、贷款利率、贷款时间等多个因素综合进行决策。

### 5.4 抗电价下降性

5.3节的分析结果是基于电价不发生变化的前提得到的,但实际上按照我国电力改革的发展趋势,电价势必呈现逐渐下降的趋势。以上文中的最佳储能配置0.4 MW/2.5 h为例进行计算,当电价固定时电气化铁路储能的财务内部收益率为24.8%,假设电价以一定的比例逐年下降,财务内部收益率随电价下降的变化趋势如表4所示。

表4 电价下降时的FIRR  
Table 4 FIRR when electricity price reduces

电价下降比例 / %	$f_{FIRR} / \%$	电价下降比例 / %	$f_{FIRR} / \%$
2	22.2	8	14.3
4	19.5	10	11.6
6	16.9	12	9.0

从表4中能够看到,当电价逐年下降时,电气化铁路储能的财务内部收益率降低,但电价的年下降幅度在12%以内时,财务内部收益率都能保持在8%以上,说明在当前的成本水平下,电气化铁路储能能够较好地抵抗电价的下降。实际上电价以12%的比例逐年下降已经属于较为极端的情况,因此可以得到如下结论:通过合理地配置储能系统,在正常情况下,即使电价逐渐下降,电气化铁路储能也能始终保持盈利。

## 6 结论

本文对分时电价政策下基于RPC结构的电气化铁路储能系统的经济性进行了研究,所得主要结论如下。

(1)电气化铁路储能的财务内部收益率主要受储能时长影响,与额定功率关联不大,通过合理地配置储能系统,财务内部收益率可达到24%以上,经济效益非常可观。

(2)对于考虑贷款的情况,当贷款时间相同时,贷款利率越低则收益越高,且贷款时间越长该差距越明显;当贷款利率较低时,贷款时间越长、贷款比例越高则收益越高;当贷款利率较高时,贷款时间越短、贷款比例越低则收益越高。另外,在储能配置受到限制的情况下,提高投资并不一定能带来更大的收益,因此,投资电气化铁路储能需要结合可投资金额、贷款利率、贷款时间等多个因素综合进行决策。

(3)电气化铁路储能可有效抵抗电价下降带来的冲击,在合理的储能配置下,当电价以12%以内的比例逐年下降时,财务内部收益率仍能保持在8%以上。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):1-7.  
ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):1-7.
- [2] 沈运帷,李扬,焦系泽,等. 新电改背景下需求响应成本效益分析及其融资渠道[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):124-130,138.  
SHEN Yunwei, LI Yang, JIAO Xize, et al. Cost-benefit analysis and financing channels for demand response under electric reform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9):124-130, 138.
- [3] 郭明亮,戴朝华. 电气化铁路发自用型光伏储能系统及其控制策略[J]. 供用电,2018,35(12):56-62.  
WU Mingliang, DAI Chaohua. Self-accommodation photovoltaic/energy-storage system and its control strategy in electrified railway[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(12):56-62.
- [4] GHAVIHA N, CAMPILLO J, BOHLIN M, et al. Review of application of energy storage devices in railway transportation[J]. Energy Procedia, 2017, 105:4561-4568.
- [5] 王彬,杨中平,林飞,等. 基于节能稳压的地面式超级电容储能系统容量配置优化研究[J]. 铁道学报,2016,38(6):45-52.  
WANG Bin, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. Study on optimization of capacity configuration of stationary super capacitor storage system for improving energy efficiency and voltage profile[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(6):45-52.
- [6] 诸斐琴,杨中平,林飞,等. 城轨交通牵引供电系统参数与储能系统容量配置综合优化[J]. 电工技术学报,2019,34(3):579-588.  
ZHU Feiqin, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. Synthetic optimization of traction power parameters and energy storage systems in urban rail transit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3):579-588.
- [7] LUO A, MA F, WU C, et al. A dual-loop control strategy of railway static power regulator under V/V electric traction system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(7):2079-2091.
- [8] 张鑫,江全元. 基于V/V接线变压器的铁路功率调节器容量配置和能量优化补偿策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):102-108.  
ZHANG Xin, JIANG Quanyuan. Capacity configuration of V/V transformer-based railway power conditioner and optimal energy compensation strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1):102-108.
- [9] 魏文婧,胡海涛,王科,等. 基于RPC的高速铁路牵引供电系统储能方案及控制策略研究[J]. 电工技术学报,2019,34(6):176-185.  
WEI Wenjing, HU Haitao, WANG Ke, et al. Energy storage scheme and control strategies of high-speed railway based on railway power conditioner[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6):176-185.
- [10] 马茜,郭昕,罗培,等. 一种基于超级电容储能系统的新型铁路功率调节器[J]. 电工技术学报,2018,33(6):1208-1218.  
MA Qian, GUO Xin, LUO Pei, et al. A novel railway power conditioner based on super capacitor energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6):1208-1218.
- [11] 马茜,郭昕,罗培,等. 基于超级电容储能的新型铁路功率调节器协调控制策略设计[J]. 电工技术学报,2019,34(4):765-776.  
MA Qian, GUO Xin, LUO Pei, et al. Coordinated control strategy design of new type railway power regulator based on super capacitor energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4):765-776.
- [12] 王大杰,陈鹰,唐英伟,等. 飞轮储能系统在电气化铁路的应用与研究[J]. 储能科学与技术,2018,7(5):853-860.  
WANG Dajie, CHEN Ying, TANG Yingwei, et al. Application and research of flywheel energy storage system in electrified railway[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(5):853-860.
- [13] 李群湛,王喜军,黄小红,等. 电气化铁路飞轮储能技术研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(7):2025-2033.  
LI Qunzhan, WANG Xijun, HUANG Xiaohong, et al. Research on flywheel energy storage technology for electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7):2025-2033.
- [14] 于坤山,周胜军,王同勋,等. 电气化铁路供电与电能质量[M]. 北京:中国电力出版社,2011:25-26.
- [15] 李相俊,王上行,惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术,2017,41(10):3315-3325.  
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10):3315-3325.
- [16] SERRA L, CHEHAB Z, GUEZENNEE Y, et al. An aging model of Ni-MH batteries for hybrid electric vehicles[C]//Vehicle Power & Propulsion, IEEE Conference. Chicago, USA: IEEE, 2005:79-85.
- [17] 李礼夫,张东羽. 基于形态与性能的动力电池循环寿命预测方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(4):1-7.  
LI Lifu, ZHANG Dongyu. Cycle life prediction method of lithium batteries based on morphology and properties[J]. Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition), 2018, 46(4):1-7.
- [18] WANG J, LIU P, HICKS-GARNER J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO<sub>4</sub> cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8):3942-3948.
- [19] 陈丽娟,姜宇轩,汪春. 改善电厂调频性能的储能策略研究和容量配置[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):52-59.  
CHEN Lijuan, JIANG Yuxuan, WANG Chun. Strategy and capacity of energy storage for improving AGC performance of power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):52-59.
- [20] 张晴,李欣然,杨明,等. 净效益最大的平抑风电功率波动的混合储能容量配置方法[J]. 电工技术学报,2016,31(14):40-48.  
ZHANG Qing, LI Xinran, YANG Ming, et al. Capacity determination of hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuations with maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14):40-48.
- [21] 刘璐,李相俊,贾学翠,等. 梯次利用储能电池管理技术与试验应用[J]. 电力建设,2016,37(1):77-83.  
LIU Lu, LI Xiangjun, JIA Xuecui, et al. Research and experiment application of echelon-use energy storage battery management technology[J]. Electric Power Construction, 2016, 37

(1):77-83.

[22] 薛金花,叶季蕾,陶琼,等. 基于多场景的商业园区源-储-荷系统运营模式及投资决策研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):78-83,92.

XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Multi-scenarios based operation mode and investment decision of source-storage-load system in business park[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 78-83, 92.

作者简介:



邬明亮(1992—),男,浙江杭州人,硕士,主要研究方向为光伏储能技术(E-mail: leckiewu@foxmail.com)。

(编辑 王欣竹)

## Economy of energy storage in electrified railway under time-of-use price policy

WU Mingliang

(Construction Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Under time-of-use price policy, energy storage is especially suitable for the user side with higher electricity price, such as industry and commercial users. The electrified railway generates a large amount of braking energy which cannot be measured in reverse. There is no marginal cost to recycle this part of energy through energy storage, which can improve the economy of energy storage. Based on lithium battery energy storage and the characteristics of traction load, the feasibility of energy storage scheme in electrified railway is analyzed. Considering the characteristics of lithium battery energy storage system, the economic model of electrified railway energy storage is established. With financial internal rate of return and net annual value as evaluation indexes, the investment value of energy storage in electrified railway is analyzed. The results show that the energy storage in electrified railway had good investment value through rational configuration. Moreover, it is necessary to make a comprehensive decision on the investment of energy storage in electrified railway by combining capital, loan interest rate, loan time and other factors.

**Key words:** time-of-use price; electrified railway; energy storage; railway power conditioner; financial internal rate of return; net annual value

(上接第176页 continued from page 176)

## Adaptive three-phase auto-reclosing strategy based on capacitor voltage for power transmission lines with shunt reactors

HUANG Fei<sup>1</sup>, LI Fengting<sup>1</sup>, XIE Chao<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>1,2</sup>, MA Hongtao<sup>2</sup>, BAI Haibin<sup>2</sup>

(1. Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Changji Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji 831100, China)

**Abstract:** Energy storage feature of shunt reactors can increase the uncertainty of secondary arc duration after three-phase tripping, especially for the faults with high transition resistance, the residual electrical quantities usually damp too rapidly to ensure reliability of the existing fault characteristic criteria, and even result in a reclosing failure. In view of the above problems, the pre-charged capacitors are used to discharge to the power transmission lines instead of the idea based on the residual electrical quantities of the line, the type of line fault is judged by the varying characteristics of capacitor discharging voltage. Simulations based on PSCAD/EMTDC verify that the proposed adaptive three-phase auto-reclosing strategy can guarantee its accuracy under various working conditions with different fault types, fault locations and transition resistances.

**Key words:** shunt reactor; distributed capacitance; fault with high transition resistance; pre-charged capacitor; three-phase auto-reclosing strategy

## 附录

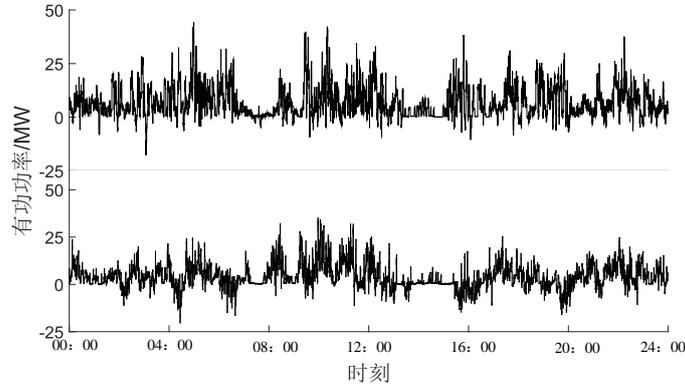


图 A1 牵引变电站两臂有功负荷

Fig.A1 Active load of two arms in traction substation

表 A1 部分地区 220 kV 分时电价

Table A1 220 kV TOU of some areas

地区	高峰电价 /[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	高峰时段
上海(夏季)	1.063 0	08:00—11:00;18:00—21:00
上海(非夏季)	1.021 0	
江苏	0.994 7	08:00—12:00;17:00—21:00
广东(广州 5 市)	0.921 4	09:00—12:00;19:00—22:00
天津	0.917 5	08:00—11:00;18:00—23:00
北京城区	0.910 4	10:00—15:00;18:00—21:00

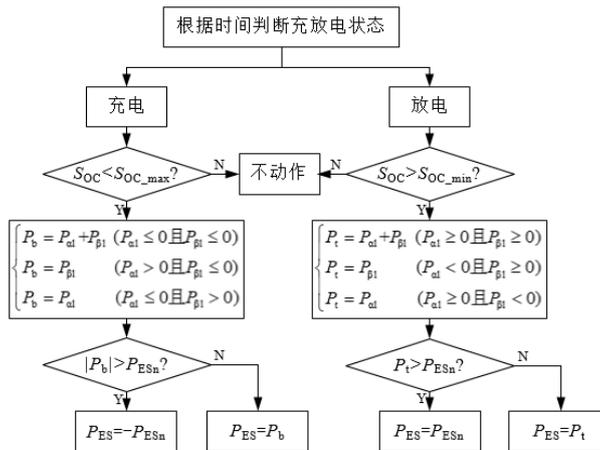


图 A2 充放电控制策略

Fig.A2 Control strategy of charge and discharge

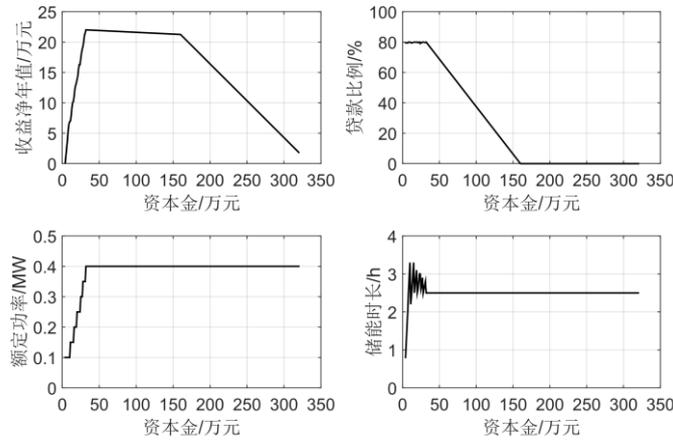


图 A3 短期低息贷款时的经济性

Fig.A3 Economy of short-term and low-interest loan

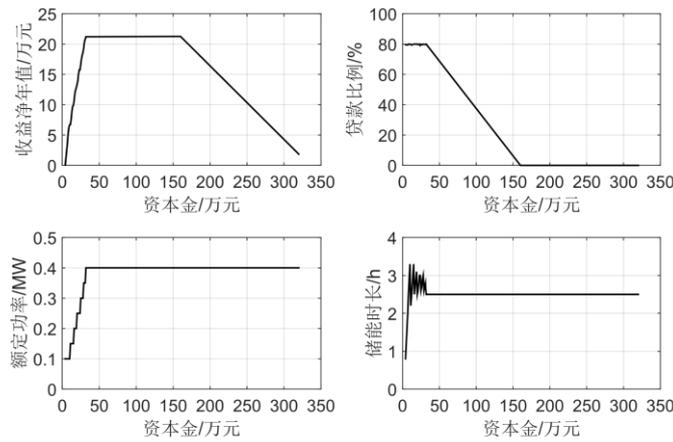


图 A4 短期高息贷款时的经济性

Fig.A4 Economy of short-term and high-interest loan

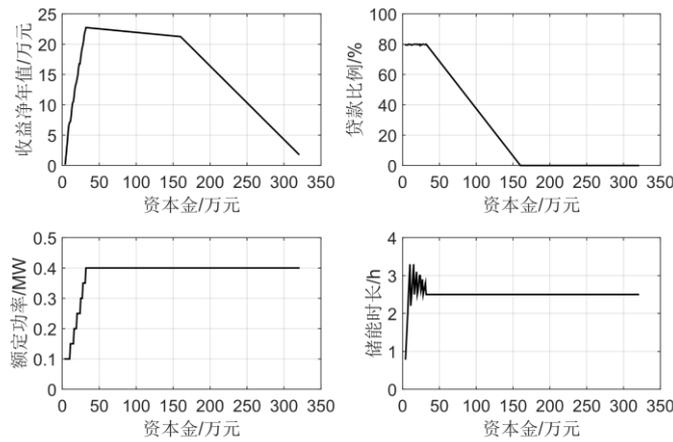


图 A5 长期低息贷款时的经济性

Fig.A5 Economy of long-term and low-interest loan

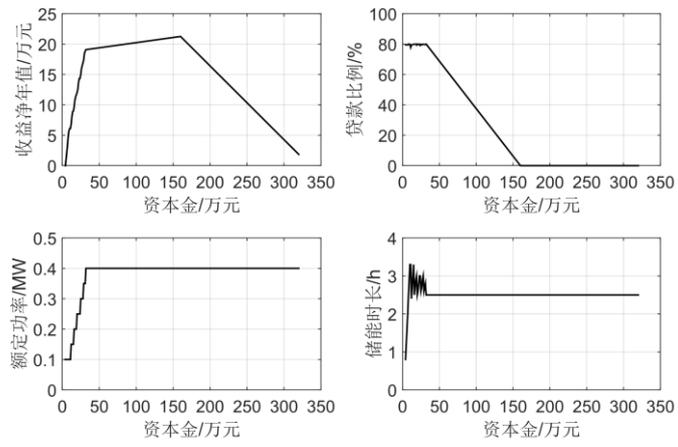


图 A6 长期高息贷款时的经济性

Fig.A6 Economy of long-term and high-interest loan