

# 城轨双向变电站的运行特性优化策略

陈雯, 林飞, 杨中平

(北京交通大学电气工程学院, 北京市 100044)

## Operation Characteristic Optimization of Bidirectional Substation

CHEN Wen, LIN Fei, YANG Zhong-ping

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**ABSTRACT:** Compared with energy storage equipment based on super capacitor, flywheel or lithium battery, bidirectional substation has obvious advantages in installation space, cost, reliability and service life. Therefore, more and more bidirectional converters are installed in the substations of urban rail transit system. Bidirectional substation has controllable operation characteristics, but its influence on energy saving and railway operation cost has not been fully studied. Based on the typical bidirectional substation application scheme, this paper first introduces the working characteristics of bidirectional converter, including no-load voltage and droop slope. A simplified power system model including bidirectional substation and train is established, and the influence of operation characteristics on regenerative braking energy and its distribution is analyzed. The operation characteristics of bidirectional substation are optimized by considering the objective function of total energy consumption and brake shoe wear cost, and the cost saving performance is verified by a case based on multi train scenario.

**KEY WORDS:** energy consumption; optimization; traction power supply system; bidirectional substation; objective function

**摘要:** 与基于超级电容、飞轮或锂电池的储能设备相比,双向变电站在安装空间、成本、可靠性和使用寿命等方面具有明显优势。为此,双向变流器越来越多地安装在城市轨道交通系统的变电站中。双向变电站具有可控的运行特性,但其运行特性对节能和城轨交通运营成本的影响尚未

得到充分研究。本文以典型的双向变电站应用方案为基础,首先介绍了双向变流器的工作特性,包括空载电压和下垂斜率。建立了包含双向变电站和列车的简化电力系统模型,分析了运行特性对再生制动能量及其分布的影响。双向变电站的运行特性通过考虑总能耗和闸瓦磨损费用的目标函数进行优化,通过一个基于多列车场景的案例来验证成本节约性能。

**关键词:** 能耗; 优化; 牵引供电系统; 双向变电站; 目标函数

## 1 引言

大量温室气体排放导致气候变化使得降低能耗变得至关重要。城市轨道交通系统的能耗与其运输能力相比相对较低,因此其越来越成为满足全球交通需求的热门选择<sup>[1-2]</sup>。

所有现代列车都有再生制动能力,可以将动能转化为电能。再生制动被广泛使用有两个原因。一是再生制动是环保的。与机械制动相比,再生制动不会产生磨损、灰尘、气味、热量和声音。另一个原因,也是最重要的一个原因,是它在节能方面的巨大潜力。回收的能量首先给列车本身的辅助负载供电,然后剩余的能量将提供给同一直流网络上的其他牵引列车。理论上,如果附近总是有需要更高功率的牵引列车,再生制动能量可以完全重复使用。然而,这在实际中是不可能的。为了避免过多再生制动能量导致的直流过电压,多余的能量通常由车载电阻消耗,这会导致能量浪费和隧道温度升高<sup>[3]</sup>。

为了最大限度地利用再生制动能量并降低能

耗, 引入了基于晶闸管的逆变器, 将回收的制动能量反馈给中压配电网再利用<sup>[4]</sup>。然而, 由于这种逆变器的电能质量差、性价比低, 在城轨交通中没有得到广泛应用。在变电站或轨道旁安装储能装置(如超级电容器、锂电池或飞轮)是吸收剩余再生制动能量和调节直流电压的一个很好的替代方案<sup>[5-7]</sup>。然而, 与逆变器相比, 储能装置的一些缺点是安装空间更大、成本更高、使用寿命更短以及更多的安全问题<sup>[8]</sup>。

近年来, 随着半导体功率器件 IGBT 和变流器控制技术的发展, 高性价比的 IGBT 变流器越来越多地应用于直流牵引供电系统<sup>[9-11]</sup>。到目前为止, 我国已有 20 多条地铁线路使用了 IGBT 逆变器。中国北京地铁十号线安装的逆变器节能量达到日使用量的 11.15%<sup>[12]</sup>。采用 IGBT 构成的全控整流装置本身具备四象限工作能力, 能量可自然双向流动, 从原理上具备代替二极管整流机组的条件。国内外典型厂商已推出相应产品<sup>[13]</sup>。

(1) 日本明电舍提供额定功率 4.5MW 的 1500V 馈电双向变流器, 可满足 300% 过载一分钟, 峰值功率 13.5MW, 在日本筑波线应用<sup>[14]</sup>。

(2) 法国阿尔斯通提供额定功率 4MW 的双向变流器, 峰值功率为 12MW。目前已有 128 台应用于米兰、利雅得、伦敦、迪拜和巴拿马的地铁网络, 以及悉尼和米兰的城市有轨电车网络。

(3) 中国宁波地铁 2018 年在宁波中车试车线进行额定功率 2MW, 短时峰值功率 6MW 的双向变流器挂网实验, 结果表明双向变流器的性能及功能可以满足城轨交通直流供电系统的使用要求<sup>[15]</sup>。

(4) 中国 2021 年在呼和浩特 1 号线什兰岱站完成了 6MW 大功率双向变流器的安装调试, 并正式投入使用。

双向变电站的应用是未来轨道交通行业发展的趋势。虽然双向变流器在牵引供电系统中已经得到了应用, 但是很少有文献讨论其运行特性的优化。牵引变电站中使用双向变流器最常用的工作特性是恒压控制<sup>[16-18]</sup>。该方法易于实现, 有利于直流网压的稳定。然而, 这种控制方式下再生制动能量在变电站之间会发生严重的不平衡分配, 不利于能量在中压电网的再利用。文献[19]提到采用恒压逆变方案会增加再生回电网的电流。文献[20]使用免疫算法, 对能馈方案中逆变

器的斜率以及在线路当中的配置方案进行优化。文献[21]对能馈方案中逆变器的运行特性曲线进行优化, 经仿真验证, 优化效果良好。然而, 对于双向变电站运行特性对节能和能量分配的影响尚未得到充分研究。

本文介绍了一种考虑双向变流器不同运行特性的建模方法, 考虑空载电压、下垂斜率两个参数的影响。举例说明了一种优化双向变流器工作特性以节约成本的方法。本文内容安排如下。第一节介绍了双向变电站的应用方案和运行特点。第二节基于简化的系统模型, 分析了双向变电站运行特性对节能和再生制动能量分配的影响, 并提出了优化策略。在第三节中, 通过一个案例研究, 对考虑多列车情况下的双向变电站特性进行了优化。结论载于第四节。

## 2 双向变电站运行特性建模

### 2.1 双向变电站应用方案

双向变电站在牵引供电系统中的典型应用方案如图 1 所示。可以看出, 该方案完全采用双向变流器代替二极管整流器。 $C_{eq}$  表示中压电缆的等效电容。T1 和 T2 表示主变电站中的降压变压器。母线 1 和母线 2 代表两个中压电网, 只有当 T1 或 T2 发生故障时, 他们才会通过断路器 Q 相互连接。所有牵引变电所交替连接到母线 1 或母线 2。

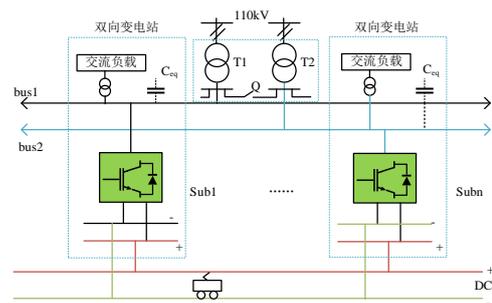


图 1 双向变电站在牵引供电系统中的典型应用方案

Fig.1 Typical application scheme of bidirectional substation in TPSS

该方案由于全部采用双向变流器, 具备以下明显的优点(与二极管整流方案相比): (1) 输出直流电压纹波系数更小, 电流谐波含量更低(<3%); (2) 直流电压特性更“硬”, 而且可控; (3) 通过变流器, 列车多余的再生制动能量可以转换回中压电网, 为交流负载供电。因此, 电网提供的电能可以明显减少; (4) 除了回收再生制

动能量外，双向变流器还可以产生一定量的无功功率来提高中压电网的功率因数，取代特殊的无功功率补偿设备如静止无功发生器。作为辅助功能，它将提高变流器的利用率，缩短投资回收期。

## 2.2 双向变流器运行特性

双向变流器的典型运行特性曲线如图 2 所示。 $U_o$  是双向变流器的空载电压， $r$  是下垂斜率。

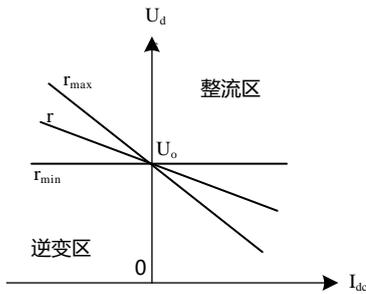


图 2 双向变流器典型工作特性曲线

Fig.2 Typical working characteristic curve of bidirectional converter

当双向变流器直流电压高于  $U_o$  时，在线性逆变区工作。当双向变流器直流电压低于  $U_o$  时，在线性整流区工作。电压电流曲线可以表示为：

$$U_{dc} = U_o - r \times I_{dc} \quad (1)$$

其中下垂斜率具有最小值  $r_{min}=0$ ，此时直流电压保持恒定。

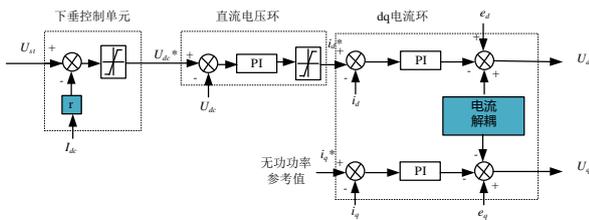


图 3 双向变流器的控制方案

Fig.3 Control scheme of PWM converter

为了获得上述运行特性，通常采用图 3 所示的控制方案，包括下垂控制单元、直流电压环和 dq 电流环三部分。 $U_{dc}^*$  是由下垂控制单元计算的直流参考电压， $i_d^*$  是由直流电压环计算的有功电流基准。

## 2.3 列车制动特性

在传统的建模方法中，列车通常被看作随时间变化的电源负载。然而，为了提高列车模型的精度，需要加入受电弓电压的考虑。参考文献[22]分析了列车和牵引网之间的相互作用。当电压过

高时，再生制动将被取消，以避免过电压保护的发生。

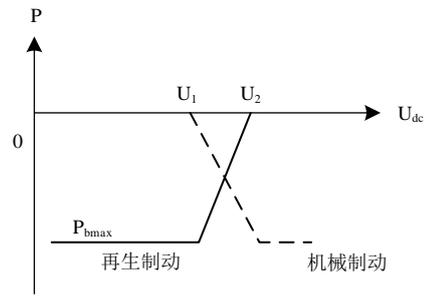


图 4 列车受电弓电压与最大再生制动功率曲线

Fig.4 Maximum regenerative braking power for pantograph voltage

图 4 为未安装车载制动电阻时，列车受电弓电压与最大允许再生制动功率的关系曲线。当受电弓电压低于  $U_1$  时，列车的再生制动能力可以完全发挥。然而，如果受电弓电压高于  $U_1$ ，再生制动能力将线性下降，直到电压达到  $U_2$  时变为 0。为了保持恒定的减速度，此时机械制动必须加入，会导致严重的制动能量损失。

最大允许再生制动功率可写为：

$$P_{lim\,br} = \frac{U_2 - U_{tr}}{U_2 - U_1} \cdot P_{b\,max}, U_1 < U_{tr} < U_2 \quad (2)$$

这里  $U_{tr}$  是列车的受电弓电压， $P_{b\,max}$  是最大再生制动功率。

## 3 双向变流器运行特性影响分析和优化策略

### 3.1 影响分析

对于一条有  $n$  个牵引变电站的线路，每个变电站都采用双向变流器。简化的系统模型如图 5 所示， $U_{Subi}$  和  $I_{Subi}$  通常分别代表第  $i$  个变电站的电压和电流。 $R_{ij}$  代表第  $i$  和第  $j$  变电站之间的等效电阻， $P_{br}$  代表列车的制动功率。图中箭头代表电流的参考方向。

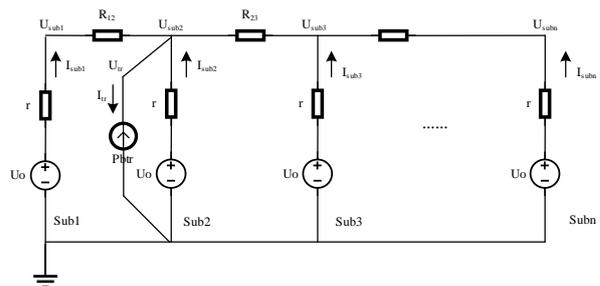


图 5 单列车制动系统模型

Fig.5 Single train braking system model

为了方便分析,假设站间距相等,即 $R_{12}=R_{23}=R_{ij}=R$ 。根据戴维南定理,线性二端电路可以由等效电压源 $U_{eq}$ 与等效电阻 $r_{eq}$ 串联组成的等效电路代替。图5中的电路可以简化为图6所示。

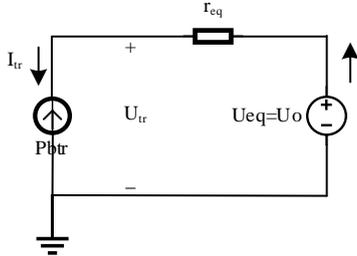


图6 基于戴维南定理的等效电路

Fig.6 Equivalent circuit based on Thevenin's theorem

考虑到接触网和轨道电阻对制动能量传输距离的限制,将四个变电站(sub1-sub4)和一列列车作为典型案例进行进一步的数学分析。

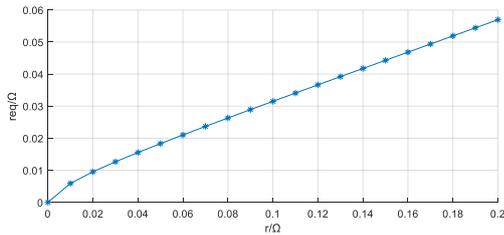
假设列车在 sub2 附近制动,系统等效电阻 $r_{eq}$ 可以表示为:

$$r_{eq} = \frac{r^4 + 4Rr^3 + 4R^2r^2 + R^3r}{4r^3 + 10Rr^2 + 6R^2r + R^3} \quad (3)$$

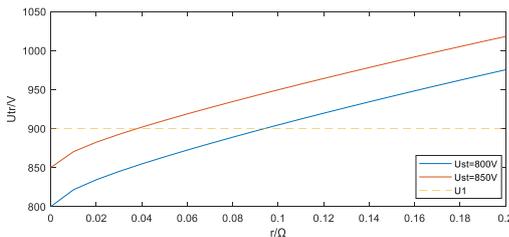
可以得到列车电压的表达式:

$$U_{tr} = \frac{U_o + \sqrt{U_o^2 + 4P_{br}r_{eq}}}{2} \quad (4)$$

根据(3)和(4)可以得到网络等效电阻和列车电压与下垂斜率的关系曲线,如图7所示,其中站间距离假设为2km,站间电阻 $R=0.02\Omega$ 。



(a)  $r_{eq}$ - $r$  曲线



(b)  $U_{tr}$ - $r$  曲线

图7 关系曲线

Fig.7 Relation curves

从图7(a)中可以看出, $r_{eq}$ 随 $r$ 有明显增加的趋势;从图7(b)中可以看出,在相同制动功率 $P_{br}=3\text{MW}$ 的情况下,列车电压随 $r$ 增加。此外,如果空载电压从800V增加到850V,列车电压曲线有一个向上的偏移。事实上,当列车电压超过某个值(图4中的 $U_1$ )时,再生制动功率将不得不减小,以避免过压保护。

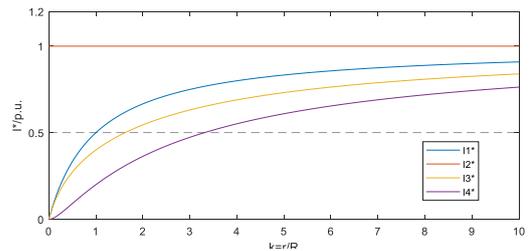
以 sub2 电流为基准,分析 sub1-sub4 之间列车再生制动电流的分布,则四个变电站的电流可表示为:

$$\begin{cases} I_1^* = \frac{I_{sub1}}{I_{sub2}} = \frac{k}{k+1} \\ I_2^* = \frac{I_{sub2}}{I_{sub2}} = 1 \\ I_3^* = \frac{I_{sub3}}{I_{sub2}} = \frac{k^2+k}{k^2+3k+1} \\ I_4^* = \frac{I_{sub4}}{I_{sub2}} = \frac{k^2}{k^2+3k+1} \end{cases} \quad (5)$$

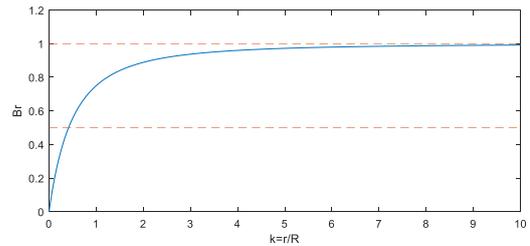
其中 $k=r/R$ , $r$ 代表变电站的下垂斜率, $R$ 代表站间电阻。

根据图1,sub1和sub3连接到中压电网的母线1,sub2和sub4连接到中压电网的母线2。因此,电流平衡系数 $B_r$ 可以定义为:

$$B_r = \frac{I_1^* + I_3^*}{I_2^* + I_4^*} = \frac{2k^3 + 5k^2 + 2k}{2k^3 + 5k^2 + 4k + 1} \quad (6)$$



(a)  $I^*$ - $k$  曲线



(b)  $B_r$ - $k$  曲线

图8 电流分布趋势

Fig.8 Current distribution trend

图 8 显示了电流相对于  $k$  的分布趋势。可以看出, 随着  $k$  的增加,  $I_1^*$ 、 $I_2^*$ 、 $I_3^*$  和  $I_4^*$  之间的差值减小, 同时  $B_r$  接近 1。这意味着  $k$  值越大, 变电站之间的电流分配平衡越好, 中压电网的两条母线之间的功率平衡也越好。当列车在其他变电站制动时, 也可以得到相应的结果。

由以上分析可知, 双向变电站的空载电压及下垂斜率会影响系统的能流分布。增大下垂斜率会使得逆变时直流侧电压增大, 限制列车的再生制动能力; 有利于多个变电站之间的功率均分。提高空载电压会使得逆变时直流电压增大, 限制列车的再生制动能力; 有利于减少线路损耗。因此, 二者的取值都不宜过大或过小。

### 3.2 优化策略

本文优化双向变电站运行特性的目的是实现更好的节能和更少的闸瓦磨损。因此需要考虑以下目标:

#### (1) 总能耗成本 $C_{ele}$

对图 1 所示的牵引供电系统, 所有变电站交替连接到两条中压母线。如果反馈给两个母线的列车制动能量相等, 则两个母线上的负载可以充分利用制动能量。运营公司可以享受制动能量回收的最大利益。图 9 显示了牵引供电系统的简化系统拓扑和能量流图, 其中 Load1 和 Load2 分别表示每个中压母线上的所有负荷。

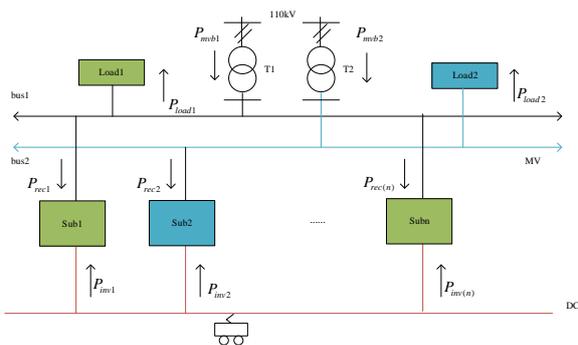


图 9 简化的系统拓扑和能量流动图

Fig.9 Simplified system topology and energy flow diagram

每个中压母线的瞬时功率可以写作

$$P_{mnb1}(t) = \sum (P_{rec1}(t) + P_{rec3}(t) + \dots + P_{rec(n-1)}(t)) - \sum (P_{inv1}(t) + P_{inv3}(t) + \dots + P_{inv(n-1)}(t)) - P_{load1}(t) \quad (7)$$

$$P_{mnb2}(t) = \sum (P_{rec2}(t) + P_{rec4}(t) + \dots + P_{rec(n)}(t)) - \sum (P_{inv2}(t) + P_{inv4}(t) + \dots + P_{inv(n)}(t)) - P_{load2}(t) \quad (8)$$

其中  $P_{recx}$  为各变电站整流功率,  $P_{invx}$  为各变电站逆变功率,  $x=1,2,\dots,n$ 。

$$\begin{cases} P_{recx}(t) = U_{subx}(t) \cdot I_{subx}(t), I_{subx}(t) > 0 \\ P_{invx}(t) = U_{subx}(t) \cdot I_{subx}(t), I_{subx}(t) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

每个中压母线的消耗及反馈的能量为

$$\begin{cases} E_{rec1} = \int P_{mnb1}(t) dt, P_{mnb1}(t) > 0 \\ E_{inv1} = \int P_{mnb1}(t) dt, P_{mnb1}(t) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} E_{rec2} = \int P_{mnb2}(t) dt, P_{mnb2}(t) > 0 \\ E_{inv2} = \int P_{mnb2}(t) dt, P_{mnb2}(t) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

从电网消耗的总能量为

$$E_{total} = E_{rec1} + E_{rec2} \quad (12)$$

反馈回电网的总能量为

$$E_{inv} = E_{inv1} + E_{inv2} \quad (13)$$

在许多国家, 电费采取单向计费。这意味着当回收的制动能量返回到电网时, 对运营公司来说电费支出并未减少。因此, 这里的总能耗计算只考虑变电站整流的能量。

假设电能为  $\rho$ , 总能耗的成本可通过下式计算。

$$C_{ele} = \rho \times E_{total} \quad (14)$$

#### (2) 闸瓦磨损成本 $C_{bks}$

列车通常配备再生制动和摩擦制动。为了节能和减少闸瓦磨损, 再生制动是首选。然而, 从图 4 可以看出。当列车电压超过  $U_1$  时, 再生制动将减少甚至取消, 导致闸瓦维护成本大幅增加, 隧道内金属粉尘污染严重。

摩擦制动能量可以写成:

$$E_{fric} = E_{dbk} - E_{reg} \quad (15)$$

其中  $E_{dbk}$  为每年的总制动能量,  $E_{reg}$  为每年的实际再生制动能量。

由于闸瓦磨损与摩擦制动能量成正比, 因此引入价格系数  $\mu$  来计算闸瓦磨损成本。

$$C_{bks} = \mu \times E_{fric} \quad (16)$$

值得注意的是,  $\mu$  可以根据大量的维修统计数据从运营方获得。

(3) 目标函数  $C_{obj}$

综合考虑双向变电站总能耗及闸瓦磨损成本, 可以得到双向变电站运行特性优化的目标函数:

$$C_{obj} = f(r, U_o) = C_{ele} + C_{bks} \quad (17)$$

变量约束如下

(1) 空载电压  $U_o$  最大值不超过列车再生制动限制电压  $U_1$ 。

(2) 下垂斜率  $r$  最小值不小于 0。

这里假设每个双向变电站具有相同的运行特性。

## 4 考虑多列车场景的运行特性优化

在多列车的实际运行场景下, 牵引供电系统变成了一个复杂的时变非线性系统, 包含多个源和大量移动负载。因此, 需要开发一个综合仿真系统来完成系统能量分析和参数优化。

### 4.1 综合仿真系统结构

考虑运行特性优化的综合仿真系统结构如图所示。它主要包括三个部分: 列车运行仿真、系统潮流仿真和目标函数计算。

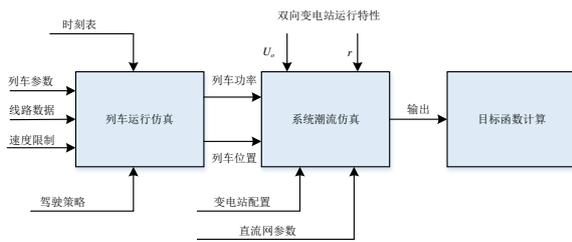


图 10 考虑双向变电站运行特性优化的综合仿真系统

Fig.10 Integrated simulation system considering operating characteristic optimization for bidirectional substations

列车运行仿真的开发考虑了列车参数、路线数据、速度限制、驾驶策略和时刻表, 计算每列列车的功率和实时位置, 并将其作为系统潮流仿真的输入数据。系统潮流仿真是根据牵引供电系统的稳态模型建立, 用来计算系统中每个节点的电压和电流。目标函数计算是专门设计来使用系统潮流仿真的输出来获得目标函数值的。

## 4.2 仿真条件

根据北京地铁八通线线路数据搭建仿真, 选择传媒大学-通州北苑站作为仿真区间, 如图 11 所示。

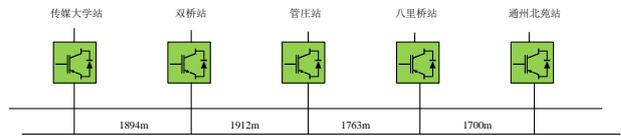


图 11 仿真线路区间示意图

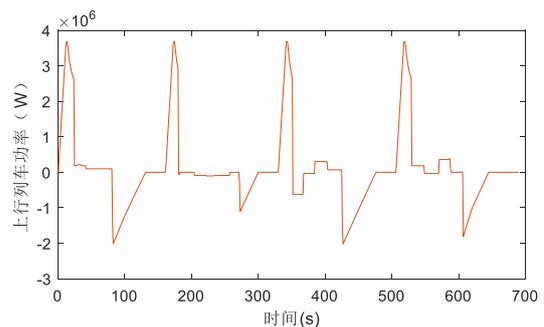
Fig.11 The diagram of simulation section

所选区间包含 5 个牵引变电站, 全长 8.734km。所有牵引变电站均为双向变电站。仿真参数如表 1 所示。

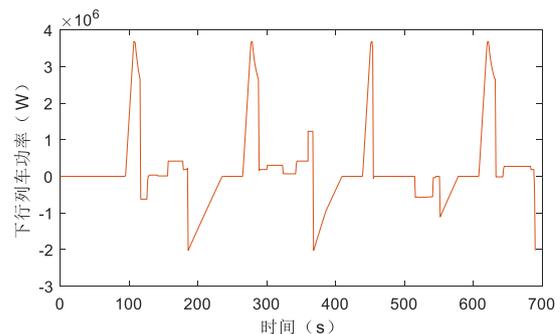
表 1 仿真参数

Tab.1 simulation parameters	
参数	数值与单位
接触轨单位长度阻抗	0.0191Ω/km
钢轨单位长度阻抗	0.017Ω/km
发车间隔	360s
再生制动限制电压 $U_1$	900V
再生制动限制电压 $U_2$	970V
再生制动限制电流	4000A
电价 $\rho$	0.8RMB/kWh
价格系数 $\mu$	0.4RMB/kWh

图 12 为通过牵引计算得到列车在该线路区间运行的功率-时间曲线。列车采用标准载重, 最高速度 65km/h, 牵引级位为 4 级, 制动级位为 3 级。



(a) 上行列车功率-时间曲线



(b)下行列车功率-时间曲线

图 12 仿真区间中列车运行曲线

**Fig.12 The operation curve of train in the simulation section**

由于时刻表按照发车间隔重复,因此在接下来的仿真中,在一个发车间隔 360 秒的时间段内计算潮流分析。

### 4.3 双向变电站的运行特性对比分析

#### (1) $r$ 的影响

当  $U_o=880V$  时,根据不同的  $r$ ,通过仿真得到 360s 周期内的各部分能量变化曲线如图 13 所示。

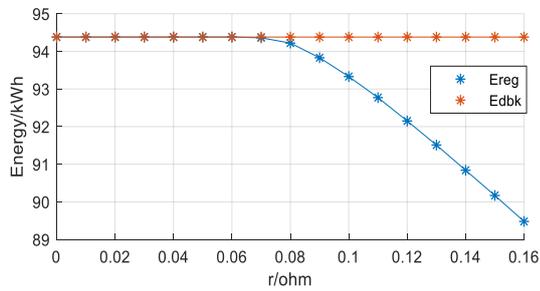
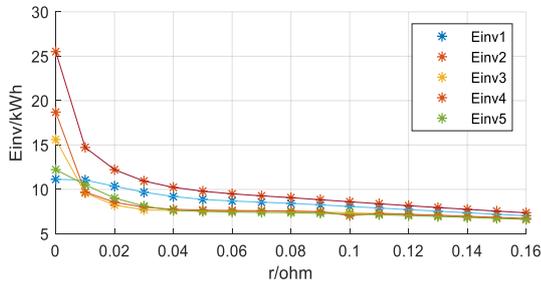
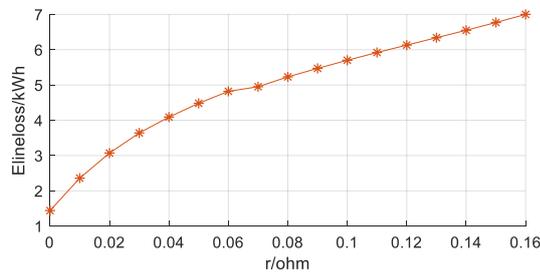
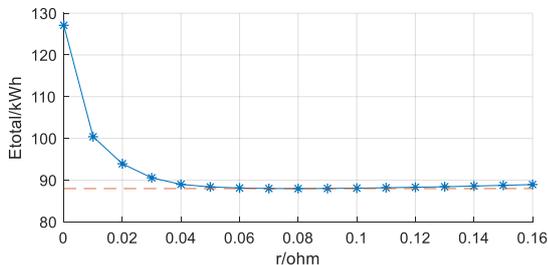
(a)制动能量/再生制动能量- $r$  曲线(b)各变电站反馈能量- $r$  曲线(c)线路损耗- $r$  曲线(d)总能耗- $r$  曲线

图 13 仿真结果

**Fig.13 Simulation result**

由变电站净输出能量与负载净消耗能量相等可得

$$E_{total} - E_{inv} = E_{tra} - E_{reg} + E_{line loss} \quad (18)$$

即

$$E_{total} = E_{tra} - E_{reg} + E_{line loss} + E_{inv} \quad (19)$$

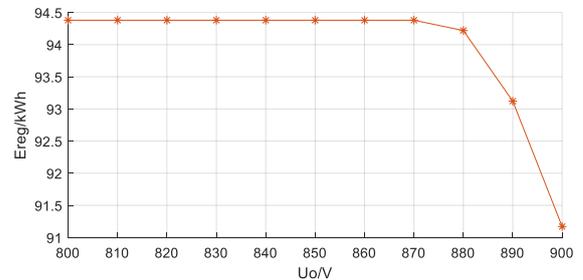
$E_{total}$  为变电站整流能量之和,  $E_{inv}$  为变电站逆变能量之和,  $E_{tra}$  为列车牵引消耗能量, 为定值,  $E_{reg}$  为列车再生制动能量,  $E_{line loss}$  为线路损耗能量, 公式中各量为绝对值。

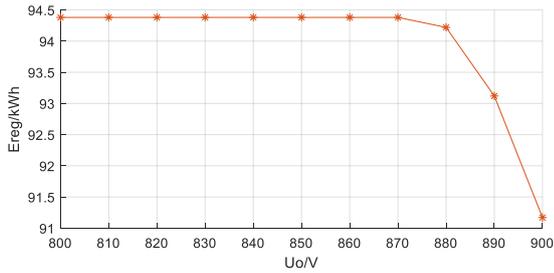
从图 13 (a) 可以发现,再生制动能量随着  $r$  的增大先保持不变而后减小。当  $r < 0.06$  时,实现了完全再生制动,这意味着浪费在闸瓦上的摩擦制动能量为 0; 从图 13 (b) 可以看出,随着  $r$  的增加,各个变电站反馈回电网的能量都明显减少且各个变电站反馈的能量越来越均衡; 从图 13 (c) 可以看出线路损耗随着  $r$  的增大而增大。从图 13 (d) 可以发现,随着  $r$  的增大,总能耗呈现先降低后升高的趋势,在 0.08 处达到最小值。

一开始总能耗减小主要是由于回馈电网的能量减少了,也即车间交互的能量增加了。而后总能耗增加是由于列车再生制动能力受到限制,一部分制动能量被机械制动消耗了。

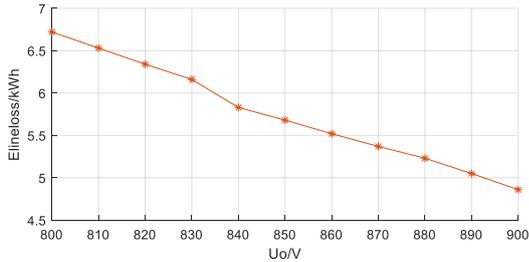
#### (2) $U_o$ 的影响

当  $r=0.08$  时,根据不同的  $U_o$ ,通过仿真得到 360s 周期内的各部分能量变化曲线如图 14 所示。

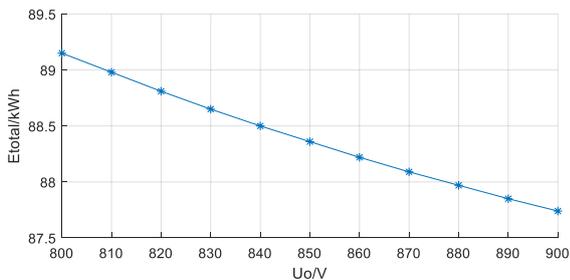
(a)再生制动能量- $U_o$  曲线



(b)总反馈能量- $U_o$  曲线



(c)线路损耗- $U_o$  曲线



(d)总能耗- $U_o$  曲线

图 14 仿真结果

Fig.14 Simulation result

从图 14 (a) 可以发现,再生制动能量随着  $U_o$  的增大先保持不变而后减小;从图 14 (b) 可以看出,随着  $U_o$  的增加,反馈回电网的先稍有增加而后减小;从图 14 (c) 可以看出线路损耗随着  $U_o$  的增大而减小;从图 14 (d) 可以发现,随着  $U_o$  的增大,总能耗呈现降低的趋势。

根据式 (19) 可以看到,反馈回电网能量和再生制动能量数值变化接近,因此随着  $U_o$  的增加,总能耗降低主要是由于线路损耗的降低。

#### 4.4 目标函数

为了寻找目标函数的最优解,本文采用了枚举法。枚举法是通过列举解决方案域中的所有可能性来解决问题,是一种简单的算法。用于解决该问题的优化算法包括以下步骤,如图 15 所示。



图 15 优化算法流程图

Fig.15 Flowchart of the optimization algorithm

(1) 第一步,确定控制变量的范围,包括  $U_o$  和  $r$ 。 $U_o$  的范围是 800~900V,步长为 10V 进行变化, $r$  的范围是 0~0.18,步长为 0.01 进行变化。

(2) 第二步,运行综合仿真系统。根据仿真输出计算目标函数。

(3) 第三步,列举解决方案域中所有可能的及解决方案。所有可能解的个数为 209 (=11×19)。

(4) 第四步,排列解决方案。

(5) 第五步,找到结果。

表 2 显示了双向变电站与传统变电站的目标函数结果。A 表示传统二极管整流变电站,空载电压为 860V,直流电压在 770V 以上时下垂斜率为 0.0161,直流电压在 770V 以下时下垂斜率为 0.0016。B 代表采用优化方法对双向变电站特性优化后的结果,在空载电压 880V,下垂斜率 0.07 时找到了最优解。表 2 中所有成本均以一年运行周期内的人民币计算。

表 2 优化结果对比

Tab.2 comparison of optimization results

参数	A	B
	传统变电站	双向变电站
变电站净输出能量 /MWh	7.428	4.169
$C_{ele}/MRMB$	5.942	6.167
$C_{bks}/MRMB$	1.370	0.0007
$C_{obj}/MRMB$	7.312	6.167

从表 2 可以看出,与传统二极管整流变电站相比,采用双向变电站且对其运行特性进行优化后,闸瓦磨损成本明显下降,基本实现完全再生制动,目标成本函数值减少了 15.7%,变电站净输出能量减少了 43.9%。由于这里总能耗成本只计算了变电站整流能量,而大多数地区采用集中供电,部分变电站逆变能量也可在中压电网循环再利用,实际中双向变电站的总能耗成本会进一步减小。

## 5 结论

本文提出了一种优化直流牵引供电系统双向变电站运行特性的方法。介绍了双向变电站的典型应用方案及其可控运行特性。建立简化的电力系统模型，仿真空载电压和下垂斜率对再生制动能量及其分布的影响。提出了一个考虑总能耗和闸瓦磨损的目标函数。在综合仿真系统的基础上，采用枚举法寻找双向变电站的最佳运行特性。结论如下：

(1) 双向变电站下垂斜率的增大有利于再生制动能量在变电站间的分配，使其更好地被地铁的交流负荷再利用，但会导致列车电压升高，并可能导致再生制动取消。

(2) 空载电压升高会导致列车电压升高，再生制动能量降低，机械制动能量增加，但有利于减小线路损耗。

(3) 借助本文提出的目标函数，将所有变量的影响与成本相关联，使多目标优化问题转化为单目标问题。

(4) 仿真结果表明，与同系统的二极管整流变电站相比，优化双向变电站的运行特性可以至少使总成本降低 15.7%。

本文研究中是假设各个双向变电站具有相同的运行特性且保持不变，在下一步的研究中可以考虑在不同时段如高峰时间和非高峰时间不同发车间隔下分别采用怎样的运行特性最优，以及对线路进行划分选取三到四个双向变电站进行分区控制，实现运行特性的动态调整。

## 参考文献

- [1] 崔学忠.城市轨道交通运营发展情况总结与展望[J].城市轨道交通,2020(10):24-26.  
Cui Xuezhong. Summary and Prospect of urban rail transit operation and development [J]. Urban rail transit, 2020 (10): 24-26
- [2] 周晓勤.中国城市轨道交通发展战略与“十四五”发展思路[J].城市轨道交通,2020(11):16-21.  
Zhou Xiaoqin. The development strategy of China's urban rail transit and the development ideas of the 14th five year plan [J]. Urban rail transit, 2020 (11): 16-21
- [3] 荀径,唐涛,宋晓美,王彬,贾兆欣.再生制动条件下的城轨列车节能驾驶综合模型[J].中国铁道科学,2015,36(01):104-110.  
Xun Jing, Tang Tao, Song Xiaomei, Wang Bin, Jia Zhaoxin. Comprehensive model of energy-saving driving of urban rail trains under regenerative braking [J]. China Railway Science, 2015,36 (01): 104-110
- [4] Y. S. Tzeng, R. N. Wu, and N. Chen, "Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 47, no. 4, pp. 1405–1412, Nov. 1998.
- [5] Z. Zhong, Z. Yang, X. Fang, F. Lin and Z. Tian, "Hierarchical Optimization of an On-Board Supercapacitor Energy Storage System Considering Train Electric Braking Characteristics and System Loss," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 3, pp. 2576-2587, March 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.2967467.
- [6] Q. Qin, T. Guo, F. Lin and Z. Yang, "Energy Transfer Strategy for Urban Rail Transit Battery Energy Storage System to Reduce Peak Power of Traction Substation," in IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- [7] 禹皓元. 城轨飞轮储能式再生制动能量利用装置的仿真与系统设计[D].西南交通大学,2019.  
Yu Haoyuan. Simulation and system design of flywheel regenerative braking energy utilization device for urban rail transit [D]. Southwest Jiaotong University, 2019
- [8] H. Hayashiya, Y. Nakao, Y. Aoki, S. Kobayashi and M. Ogihara, "Comparison between energy storage system and regenerative inverter in D.C. traction power supply system for regenerative energy utilization," 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Warsaw, 2017, pp. P.1-P.7.
- [9] Z. Tian, G. Zhang, N. Zhao, S. Hillmansen, P. Tricoli and C. Roberts, "Energy Evaluation for DC Railway Systems with Inverting Substations," 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, 2018, pp. 1-6
- [10] G. Cippolletta et al., "Monitoring a DC Train Supplied by a Reversible Substation," 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Dubrovnik, Croatia, 2020, pp. 1-6
- [11] 潘雷,荀浩.地铁再生制动回馈装置分站设置研究[J].电气技术,2020,21(10):59-62+70.  
Pan Lei, Xun Hao. Study on substation setting of regenerative braking energy feedback device for Metro [J]. Electrical technology, 2020,21 (10): 59-62 + 70
- [12] 张钢,刘志刚,牟富强.双向变流器在城轨牵引供电系统中的应用[J].都市快轨交通,2014,27(04):109-112.  
Zhang Gang, Liu Zhigang, Mou Fuqiang. Application of bidirectional converter in urban rail traction power supply system [J]. Urban rail transit, 2014,27 (04): 109-112

- [13] 郑旺. 城市轨道交通牵引供电双向变流器应用研究 [D]. 中国矿业大学, 2019.  
Zheng Wang. Research on Application of bidirectional converter for traction power supply in urban rail transit [D]. China University of mining and technology, 2019
- [14] H.Hayashiya, M.Akagi, T.Konishi and A.Okui, Survey of power electronics and electric machine application for on-site railway power system in Japan to realize eco-friendly transportation [C], Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010, Ohrid, 2010, pp. S7- 17- S7-24.
- [15] 杨树松, 李辉, 朱纪法. 双向变流器应用于城市轨道交通供电系统的功能性验证 [J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(01): 187-190.  
Yang Shusong, Li Hui, Zhu Jifa. Functional verification of bidirectional converter applied in urban rail transit power supply system [J]. Urban rail transit research, 2020, 23 (01): 187-190
- [16] 靳佩跃. 双向变流器在轨道交通牵引供电系统的应用研究 [J]. 电气化铁道, 2020, 31(S1): 156-159  
Jin peiyue. Research on Application of bidirectional converter in traction power supply system of rail transit [J]. Electrified railway, 2020, 31 (S1): 156-159
- [17] W.Jefimowski and A.Szeląg, "The multi-criteria optimization method for implementation of a regenerative inverter in a 3 kV DC traction system," Elect. Power Syst. Res., vol. 161, pp. 61–73, Aug. 2018.
- [18] C. H. Bae, "A simulation study of installation locations and capacity of regenerative absorption inverters in DC 1500V electric railways system," Simul. Modelling Pract. Theory, vol. 17, no. 5, pp. 829–838, May 2009.
- [19] T.Suzuki, "DC power-supply system with inverting substations for traction systems using regenerative brakes," in IEE Proceedings B - Electric Power Applications, vol. 129, no. 1, pp. 18-26, January 1982.
- [20] H.J.Chuang, "Optimisation of inverter placement for mass rapid transit systems by immune algorithm," in IEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. 152, no. 1, pp. 61-71, 7 Jan. 2005.
- [21] G.Zhang, Z.Tian, P.Tricoli, S.Hillmansen, Y.Wang and Z.Liu, "Inverter Operating Characteristics Optimization for DC Traction Power Supply Systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 4, pp. 3400-3410, April 2019.
- [22] P.Arboleya, "Heterogeneous multiscale method for multirate railway traction systems analysis," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 18, no. 9, pp. 2575–2580, Sep. 2017.

## 作者简介:



陈雯

陈雯 (1997), 女, 工学硕士, 主要从事城轨双向供电方面的研究工作, [19121418@bjtu.edu.cn](mailto:19121418@bjtu.edu.cn)。