

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2021.06.005

含地面再生制动能量利用装置的 供电设计和节能指标评估

刘 炜, 张 戩, 马庆安, 曾佳欣, 杨乾锋

(西南交通大学电气工程学院, 成都 611756)

摘 要: 逆变回馈装置和储能装置等地面再生制动能量利用装置(GRUD)在城市轨道交通牵引供电系统中的应用逐渐普遍。针对 GRUD 的供电系统设计问题, 首先建立不同 GRUD 的供电计算模型, 并以此为基础, 建立 GRUD 的优化设计与运营模型, 设计阶段目标函数为 GRUD 寿命期限内的系统综合成本, 运营阶段目标函数为系统牵引能耗。针对含 GRUD 供电系统的节能效果评估问题, 提出从牵引能耗和主变电所能耗两个角度计量的节能效果评估指标, 并提出基于节能效果评估的在线监测与控制系统。最后, 对含 GRUD 的供电系统设计提出应转变的思路, 为系统设计提供一定参考。

关键词: 城市轨道交通; 再生制动能量利用装置; 供电设计; 节能效果评估

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2021)06-0032-07

Power Supply Design of Ground Regenerative Braking Energy Utilization Device and the Energy-saving Effect Evaluation Indices

LIU Wei, ZHANG Jian, MA Qingan, ZENG Jiabin, YANG Qianfeng

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756)

Abstract: Energy feedback systems and energy storage systems are widely used in urban rail DC traction power supply systems. Aiming at the design of a power supply system with ground regenerative braking energy utilization devices, this study first builds power supply calculation models for different ground regenerative braking energy utilization devices. Based on these models, the theory of optimal design and operation of the power supply system is proposed, which takes the comprehensive cost of the system within the lifetime of the regenerative braking energy utilization device as the objective function in the design phase, and the system traction energy consumption as the objective function in the operation phase. To evaluate the energy-saving effect of the power supply system with ground regenerative braking energy utilization devices, two energy-saving effect evaluation indexes are proposed, which measure energy from traction energy consumption and main transformer energy consumption, respectively. An online monitoring and control system based on an energy-saving effect evaluation is proposed. Finally, some ideas for the design of the power supply system that should be adjusted are presented, which provide a reference for the system design.

Keywords: urban rail transit; regenerative braking energy utilization device; power supply design; energy saving evaluation

收稿日期: 2021-08-06 修回日期: 2021-08-24

第一作者: 刘炜, 男, 博士, 副教授, 研究方向为城市轨道交通牵引供电系统理论与仿真研究、再生制动能量利用、杂散电流及钢轨电位研究, liuwei_8208@swjtu.cn

引用格式: 刘炜, 张戩, 马庆安, 等. 含地面再生制动能量利用装置的供电设计和节能指标评估[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(6): 32-38.

LIU Wei, ZHANG Jian, MA Qingan, et al. Power supply design of ground regenerative braking energy utilization device and the energy-saving effect evaluation indices[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(6): 32-38.

随着城市轨道交通发展速度越来越快,其能源消耗的问题也越来越突出,针对能源问题,地面再生制动能量利用装置(ground regenerative braking energy utilization device, GRUD)为节能减排提供了路径,但如何评价 GRUD 的节能效果尚无定论。Alfieri 等^[1]研究了不同列车运行模式的能量差别,并提出如果安装逆变回馈装置(energy feedback system, EFS),13%的牵引能耗可被节省,安装双向交流装置可节省 7%~19%。田忠北等^[2-3]研究发现,不同发车间隔的能耗差距最大可达 27%,并从系统角度出发评估能耗,含 EFS 系统能耗降低 10%至 40%。对含 GRUD 的供电系统,应从系统角度出发评估其节能效果。

供电计算对 GRUD 的系统设计和节能效果评估有着重要的作用。文献[4]提出了一种考虑 EFS 间歇工作制的城市轨道交通直流供电计算算法;文献[5]建立了地面式储能装置(energy storage system, ESS)的黑盒模型,并设计了 ESS 的多状态切换策略。文献[6]建立了考虑下垂率输出外特性的双向变流装置供电计算模型,采用交直流一体迭代潮流算法求解。在 GRUD 的系统设计方面,文献[7-9]建立了列车和超级电容储能装置的城轨交通供电系统,并对超级电容的储能系统能量管理策略和容量配置方案进行优化。文献[10]建立了城轨牵引供电系统逆变回馈装置定容选址优化模型。文献[11]基于遗传算法对 EFS 的启动电压和下垂率进行优化。以上文献均只考虑了含单一 GRUD 的供电计算或系统设计,而目前的供电系统设计趋势为优化设计模式,即 EFS 和 ESS 混合设计模式。

首先建立了含不同 GRUD 的供电计算模型,提出含混合式 GRUD(即同时包含 EFS 和 ESS)的优化模型,从设计阶段和运营阶段两个角度建立目标函数。其次,从系统总能耗角度和牵引能耗角度提出节能效果评估指标,并给出在线节能监测与控制系统的结构。最后,给出了含 GRUD 的供电系统在设计时应转变的几点思路。

1 含 GRUD 的供电系统优化设计与运营理论

城轨供电系统潮流计算在其设计工作中占有极其重要的地位,是供电系统设计必须进行的一项工作,它关系到供电系统构成、牵引供电方式、变电所设置等多项系统设计的关键因素。因此,需要对 GRUD 在供电系统中进行建模。

1.1 GRUD 供电计算模型

为实现城轨供电系统的潮流计算,必先建立其数学模型。城轨供电系统的数学模型必须考虑其运行特点和控制方式。24 脉波不可控桥式整流器等效电路图如图 1 所示^[1]。 U_{si} 和 I_{si} 分别为整流机组交流侧节点电压幅值和电流; φ_i 为整流机组的功率因数角; U_{di} 和 I_{di} 为整流机组直流牵引侧节点电压和输出电流; P_{si} 、 Q_{si} 为整流机组交流侧有功功率、无功功率; n_t 为整流器桥数; k_t 为整流变压器的变比; k_γ 为整流机组工作效率,取 0.995; P_{di} 为整流机组直流牵引侧功率。电路方程见公式(1)。

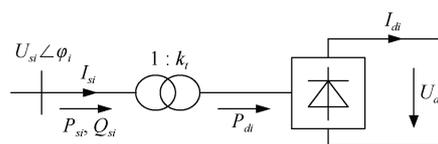


图 1 整流机组等效电路图

Figure 1 Equivalent circuit diagram of rectifier unit

$$\begin{cases} U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_t U_{si} - \frac{3}{\pi n_t} X_C I_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_\gamma k_t U_{si} \cos \varphi_i \\ P_i = \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + U_{di} I_{di} \\ Q_i = \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + U_{di} I_{di} \tan \varphi_i \end{cases} \quad (1)$$

EFS 主要包含逆变器、逆变电抗器、直流电容器等。本文对 EFS 采用电压源型换流器 VSC 建模,其等效电路图如图 2 所示。假设 EFS 交流侧接入点的电压和注入功率为 $U_{si} \angle \theta_{si}$ (θ_{si} 为交流侧节点电压相角), P_{si} 、 Q_{si} 为 VSC 交流侧有功功率、无功功率;逆变器等效阻抗为 Z_i , VSC 交流侧的电压和注入功率为 $U_{ci} \angle \theta_{ci}$ (θ_{ci} 为换流桥侧节点电压相角), P_{ci} 、 Q_{ci} 为 VSC 交流侧有功功率、无功功率; U_{di} 和 I_{di} 为 VSC 直流牵引侧节点电压和输出电流。EFS 交流、直流侧功率方程如公式(2)所示。

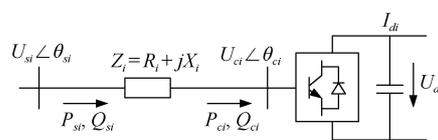


图 2 EFS 等效电路图

Figure 2 Equivalent circuit diagram of EFS

$$\begin{cases} P_{si} = -(\mu_i M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{sj} Y_i \cos(\theta_{ij} + \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i \\ Q_{si} = -(\mu_i M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{sj} Y_i \sin(\theta_{ij} + \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i \\ U_{di} I_{di} = -(\mu_i M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{sj} Y_i \cos(\theta_{ij} + \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i \end{cases} \quad (2)$$

目前，交直流系统的潮流算法主要分为 2 类：联合求解法和交替求解法。联合求解法将交直流系统的迭代方程联立、求解。算法具有与原交流系统潮流计算相近的收敛性和计算效率。交替求解法将交流系统方程和直流系统方程交替迭代求解。该方法能够充分利用原有的交流潮流计算程序，实现较为简便，但有时收敛性差^[6]。

储能装置可视为黑盒模型，其工作特性曲线如图 3 所示^[5]。

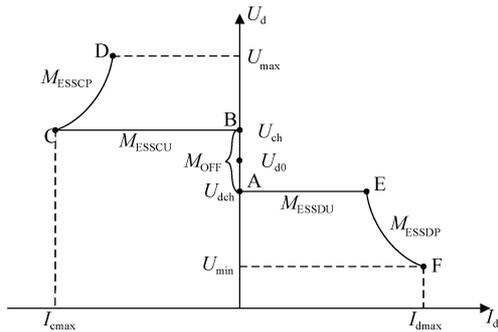


图 3 储能装置 U-I 特性图

Figure 3 U-I characteristic diagram of energy storage device

图 3 中， I_d 值为负表示储能装置充电， I_d 值为正表示储能装置放电。 $[U_{\min}, U_{\max}]$ 为储能装置在正常工作时其两端电压允许的波动范围； U_{ch} 、 U_{dch} 分别为储能装置充电电压阈值、放电电压阈值； $[I_{cmax}, I_{dmax}]$ 为储能装置在正常工作时允许流过电流的范围，其中， I_{cmax} 和 I_{dmax} 分别为装置允许的最大充电电流与最大放电电流。 M_{OFF} 为关断模式。储能装置启动后共有 4 种运行模式：BC 段所示的恒电压充电模式(M_{ESSCU})、CD 段所示的最大功率充电模式(M_{ESSCP})、AE 段所示的恒电压放电模式(M_{ESSDU})及 EF 段所示的最大功率放电模式(M_{ESSDP})。

当储能装置工作在恒电压充电模式 M_{ESSCU} 下或恒电压放电模式 M_{ESSDU} 下，为稳定牵引网电压，此时，在供电仿真的直流侧潮流计算中，将储能装置等效为电压源模型，即 $U_s = U_{ch}$ 或 $U_s = U_{dch}$ 。当储能装置工作在最大功率充电模式 M_{ESSCP} 下或最大功率放电模式 M_{ESSDP} 下，牵引网压超过 U_{ch} 或低于 U_{dch} 且 $|U_d I_d|$ 达到

装置最大充电功率 P_{cmax} 或最大放电功率 P_{dmax} ，此时储能装置的有功功率 P_s 恒定为该最大功率。因此，在供电仿真的直流侧潮流计算中，将储能装置等效为功率源模型，并采用随 U_d 变化的受控电流源 I_s 对装置进行建模。此时，储能装置的供电计算模型如公式(3)所示。

$$\begin{cases} P_s = P_{cmax} \text{ or } P_s = P_{dmax} \\ I_s = \frac{P_s}{U_d} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 含混合式 GRUD 的供电系统优化模型

含混合式 GRUD 的城轨供电系统的优化设计与运营阶段，需要考虑 EFS、ESS 的容量、功率、选址问题，也需要考虑系统综合运行的成本，且设计阶段与运营阶段，优化设计的目标并不相同，需要分别考虑优化目标。

1.2.1 决策变量

选取 EFS 的安装位置及容量、ESS 的安装位置及最大充放电功率、EFS 和 ESS 及整流机组参数作为优化模型的决策变量，储能装置的容量由其最大充放电功率决定。

决策变量 x 的表示方式如公式(4)所示，共 $3 \times M$ 维。 M 为线路中牵引降压混合所(以下简称牵混所)的数量。

$$x = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 & \dots & S_M \\ A_1 & A_2 & \dots & A_M \\ B_1 & B_2 & \dots & B_M \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中， S_i 为第 i 个牵引变电所中 GRUD 的安装容量(kW)，其取值为等差的离散变量， $S_i=0$ 代表该牵引变电所不安装 GRUD； A_i 、 B_i 为第 i 个牵引变电所中逆变回馈装置与储能装置的配置变量，其取值如公式(5)所示。

$$A_i = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个牵引变电所安装逆变回馈装置} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 个牵引变电所不安装逆变回馈装置} \end{cases} \quad (5)$$

$$B_i = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个牵引变电所安装储能装置} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 个牵引变电所不安装储能装置} \end{cases}$$

决策变量 v 的表示方式如式(6)所示，共 $4 \times M$ 维。

$$v = \begin{pmatrix} U_r & U_r & \dots & U_r \\ U_{s1} & U_{s2} & \dots & U_{sM} \\ U_{c1} & U_{c2} & \dots & U_{cM} \\ U_{d1} & U_{d2} & \dots & U_{dM} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中， U_{ri} 为整流机组的空载电压， U_{si} 为第 i 个牵混所中 EFS 的启动电压， U_{ci} 为第 i 个牵混所中 ESS 的充

电电压, U_{di} 为第 i 个牵混所中 ESS 的放电电压。

1.2.2 设计阶段目标函数

设计阶段, 目标函数的选择应在考虑设备安装成本及后期维护成本的同时兼顾节能效果带来的经济效益; 运营阶段, 目标函数应以系统能耗最低为目标, 以使节能效果最佳。

考虑到 EFS、ESS 寿命期限, 从供电系统经济性角度出发, 应计算到达 EFS、ESS 寿命期限时, 系统总体的成本, 以体现 GRUD 节省投资的效果。针对所提优化问题, 建立参数设计模型如公式(7)所示:

$$\begin{cases} \min & F(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = f_1(\mathbf{x}) + f_2(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \mathbf{x} \in \varepsilon_x \\ \mathbf{v} \in \varepsilon_v \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $F(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ 为优化目标, 为到达 GRUD 寿命期限时的系统综合成本, 由子目标函数 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ 构成; ε_x , ε_v 为 \mathbf{x} 和 \mathbf{v} 的可行域。

子目标函数 $f_1(\mathbf{x})$ 为 EFS 在到达寿命周期时的总成本, 如公式(8)所示:

$$f_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N c_{\text{insi}} r^y + \sum_{y=1}^Y \sum_{i=1}^N c_{\text{mti}} r^y \quad (8)$$

式中, c_{insi} 为安装第 i 个牵混所中 GRUD 所需成本; c_{mti} 为后期维护第 i 个牵混所中 GRUD 每年所需成本; r 为货币通胀系数, y 为从 EFS 安装开始的年数, Y 为 EFS 寿命周期的年数。 c_{insi} 的计算方式如公式(9)所示:

$$c_{\text{insi}} = C_0 + H \times S_i \quad (9)$$

式中, C_0 为基本元件成本, 元; H 为装置每 kW 的元件成本, 元/kW; S_i 为装置容量。储能装置与逆变回馈装置成本的计算方式相同, 但 C_0 与 H 的取值不同。

子目标函数 $f_2(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ 为在到达 GRUD 寿命期限时的总牵引电费, 如公式(10)所示:

$$f_2(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \sum_{y=1}^Y W_{\text{TRy}}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) E_y r^y \quad (10)$$

式中, $W_{\text{TRy}}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ 为对应 \mathbf{x} , \mathbf{v} 配置的第 y 年全线实际牵引能耗 W_{TR} , 如公式(11)所示; E_y 为第 y 年电价。

$$W_{\text{TR}} = W_M - W_S = W_T - W_F + W_R \quad (11)$$

其中, W_M 为全线主变压器有功电度, W_T 为全线整流机组总有功电度, W_F 即全线 EFS 交流侧反馈电量, W_R 即全线主变电所处返送电量, W_S 为全线降压负荷有功电度。

1.2.3 运营阶段目标函数

系统处于运营阶段时, GRUD 容量为已知量, 因

此仅将 \mathbf{v} 作为优化变量。此外, 不需要对到达 GRUD 寿命期限时的系统总成本进行计算, 仅计算当前的系统全线实际能耗即可。建立运营优化模型如公式(12)所示:

$$\begin{cases} \min & F(\mathbf{v}) = W_{\text{TR}}(\mathbf{v}) \\ \text{s.t.} & \mathbf{v} \in \varepsilon_v \end{cases} \quad (12)$$

1.2.4 约束条件

装置的工作特性约束包括逆变回馈装置的工作电流、工作电压约束、逆变回馈装置启动电压的取值范围约束、储能装置的工作电流约束以及储能装置的荷电状态约束, 约束条件如公式(13)所示:

$$\begin{cases} |I_{\text{dEFS},i}| \leq I_r \\ U_{\text{dEFS},i} \leq U_r \\ I_{\text{cmax}} \leq I_{\text{dESS},i} \leq I_{\text{dmax}} \\ \text{SOC}_{\text{min}} \leq \text{SOC}_{\text{ESS},i} \leq \text{SOC}_{\text{max}} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,M \quad (13)$$

式中, I_{dEFS} 为第 i 个牵引变电所中逆变回馈装置的直流侧电流; $U_{\text{dEFS},i}$ 为第 i 个牵引变电所中逆变回馈装置的直流侧电压; $I_{\text{dESS},i}$ 为第 i 个牵引变电所中储能装置的直流侧电流; $\text{SOC}_{\text{ESS},i}$ 为第 i 个牵引变电所中储能装置的荷电状态; SOC_{min} 、 SOC_{max} 为储能装置允许的最小、最大 SOC。

为保证供电系统安全可靠平稳地运行和潮流计算结果的有效性, 直流牵引网压及钢轨电位应满足相应的约束条件, 潮流计算结果应满足如公式(14)所示的收敛条件。

$$\begin{cases} U_{\text{d,min}} \leq U_d \leq U_{\text{d,max}} \\ |U_{\text{rail}}| < 120\text{V} \\ \forall |P_{si}^{(k)} - P_{si}^{(k-1)}| < \varepsilon \\ \forall |Q_{si}^{(k)} - Q_{si}^{(k-1)}| < \varepsilon \end{cases} \quad i=1,2,\dots,M \quad (14)$$

式中, $U_{\text{d,min}}$ 、 $U_{\text{d,max}}$ 为直流牵引网电压波动的下限值、上限值; U_{rail} 为钢轨电位; P_{si} 、 Q_{si} 为第 i 个牵引变电所根据潮流方程计算得到的交流侧有功功率、无功功率; $P_{si}^{(k)}$ 、 $Q_{si}^{(k)}$ 为第 i 个牵引变电所当前次迭代得到的交流侧有功功率、无功功率; k 为潮流计算的迭代次数; ε 为潮流计算的收敛精度。

含混合式 GRUD 的城轨供电系统优化模型中, 牵引所既可以设置储能装置(ESS), 也可以设置为逆变回馈装置(EFS), 但不在一个牵引所同时设置 EFS 和 ESS, 以避免投资成本的增加。对牵引所中的装置数量进行如公式(15)所示的约束:

$$\begin{cases} 0 \leq A_i + B_i \leq 1 \\ \sum_{i=1}^M A_i + B_i \leq M \end{cases} \quad (15)$$

2 含 GRUD 的供电系统节能效果评估

为科学地对城市轨道交通能耗进行评价, 需要制定节能效果评估指标。而对于含 GRUD 的供电系统而言, 按节能指标计量位置区分, 以下两种方案可实现系统的在线节能指标评估, 一是在供电系统的外部电源接入点处对系统总能耗进行节能效果评估, 即系统总能耗角度的评估; 二是通过地铁牵混所各设备(如整流机组、逆变回馈装置)及主变电所实测的电能数据对牵引能耗节能效果进行评估。

2.1 牵引能耗角度评估

通过地铁主变电所及牵混所内整流机组、逆变回馈装置的电能实测数据, 可对供电系统的节能效果进行评价。

首先定义参考系统和对照系统。参考系统为所有 EFS 不投入时的地铁供电系统, 当列车全日运行计划改变时, 对所有 EFS 下发不投入运行的控制指令, 并持续 24 h 或者多个 24 h 周期, 如图 4(a)所示。对照系统为 EFS 投入运行后的系统, 参考系统与对照系统的列车发车计划保持一致; 对照系统中, EFS 设置不同的启动电压, 如图 4(b)所示。

定义参考系统中, 所有整流机组(rectifier, REC)的 24 h 平均能耗值为 W_{T1} ; 定义对照系统中, 所有 REC 的 24 h 平均能耗值为 W_{T2} , 所有 EFS 的 24 h 平均反馈电量值为 W_F , 所有主变电所(main station, MS)中主变压器(main transformer, MT)的 24 h 平均返送有功电度为 W_R 。计算对照系统实际牵引能耗 W_{TR} , 计算所有 REC 的 24 h 平均能耗值减去所有 EFS 的 24 h 平均反馈电量值与所有 MS 中 MT 的 24 h 平均返送有功电度的差, 因为反馈电量可用于降压负荷, 可视为节能电量, 但经主变压器返送的部分不能为降压负荷利用, 即:

$$W_{TR} = W_{T2} - (W_F - W_R) \quad (16)$$

计算系统级牵引能耗节能量 W_{ES} , 即:

$$W_{ES} = W_{T1} - W_{TR} \quad (17)$$

计算从牵引能耗角度评估的节能率 ζ , 即:

$$\zeta = W_{ES} / W_{T1} \quad (18)$$

2.2 主变电所能耗角度评估

通过测量, 可得到主变电所在一段时间内所消耗的电能。这部分能量包括了牵引供电系统能耗和动力

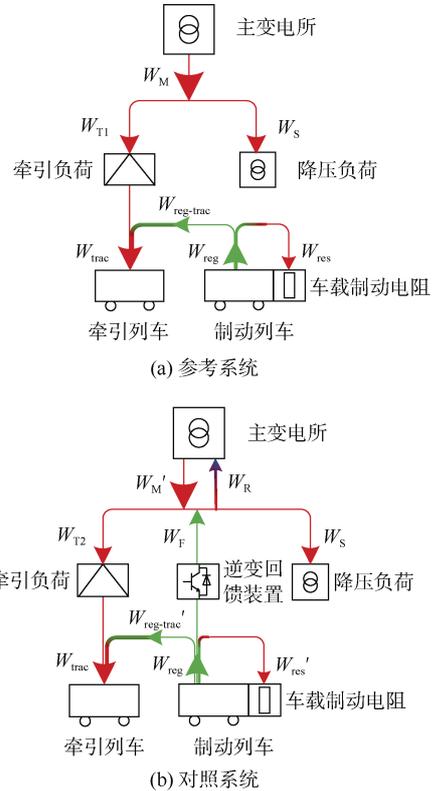


图 4 城市轨道交通供电系统能量流动
Figure 4 Energy flow diagram of urban rail power supply system

照明系统能耗。建立参考系统和对照系统, 假设在以上计量时段, 车辆、客流、天气等条件均相同。从主变电所能耗角度计量的节能率 ζ' 如公式(19)所示, 其中, 参考系统所有 MT 的 24 h 平均有功电度为 W_M , 对照系统所有 MT 的 24 h 平均有功电度为 W_M' 。如果是针对分散式供电系统, 计量点可设置在电力系统与地铁供电系统的接入位置。

$$\zeta' = \frac{W_M - W_M'}{W_M} \quad (19)$$

采用这种计量方式, 计量点少, 系统设置简单。但是, 对照系统和参考系统中, 动力照明负荷的用电波动对节能指标计算结果的影响较大, 甚至有可能造成节能指标计算结果错误。

2.3 基于节能效果评估的在线监测与控制系统

在线监测与控制的目的是在保证既有运营体系不变的情况下, 监测地铁能耗数据, 对地铁中的系统参数(如逆变回馈装置、储能装置、整流机组的等值参数)进行主动辨识并远程控制, 真实反映系统的节能效果, 并以节能指标较优为目标, 自适应调整, 从而实现系统级节能。

对于地铁节能在线监测与控制系统,如图5所示,所有MS内主变压器110 kV侧电能计量装置传感器内安装有主变电所能耗监测单元(MSU),实时采集电压、电流数据;所有TS内REC及EFS 35 kV侧测量回路传感器内安装有牵引降压所能耗监测单元(TSU),实时采集电压、电流数据;节能指标控制中心(CC)与地铁线路内所有MSU及所有TSU存在信号传输通道,所有MSU及所有TSU向CC传输实时电压、电流数据;CC将各监测单元的电压、电流计算为功率并存储数据;CC将控制指令下发至所有TS内EFS;EFS根据控制指令的要求实现装置启停或改变启动工作电压 U_s 。通过设置不同EFS的工作电压,如 U_{s1} 、 U_{s2} 、 U_{s3} 等,并依次经CC下发每个工作电压指令运行 Hh ,可计算不同 U_s 下的从牵引能耗角度评估的节能率 ζ 或从主变电所能耗角度评估的节能率 ζ' 。对比找出最大值即为系统最佳的启动电压阈值,设置EFS的启动电压。

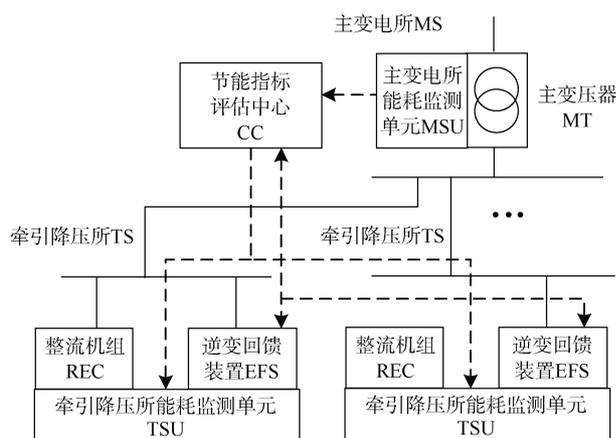


图5 地铁节能监测系统

Figure 5 Metro energy saving monitoring system

3 含GRUD的供电系统设计转变

目前,含GRUD的供电系统设计需要在以下几个方面进行转变。

1) 由目前的全所安装的保守设计模式转向优化设计模式。现有的地铁供电系统在采用GRUD时,往往采取每个牵引变电所都安装再生制动能量吸收和利用装置的设计模式。在这种设计理念下,供电系统的投资成本显著增加。GRUD吸收和再利用的是不能被邻近车辆吸收的剩余再生制动能量。理想情况下,牵引供电系统能耗的15%是GRUD节能的上限。然而再生制动能量吸收装置的安装数量增长到一定程度后,该节能指标增长的速度减缓。含GRUD的供电系统设

计应转向优化设计模式。设计模式应考虑:①不同车型的影响。如A型车较重,列车制动能量较大,地面逆变回馈装置的容量应适当增大,数量应适当增多;②减少安装节能效果不明显的GRUD,缩短GRUD的投资回报周期;③可采取少量ESS与EFS混合安装的设计理念,以避免大量安装EFS带来的主变电所电量返送的问题。

2) 重视GRUD的控制钢轨电位效果。部分运营中的异常钢轨电位问题是由列车再生制动能量的跨区间电流传输造成的,而这类钢轨电位问题只有通过供电系统正负极之间加入再生制动能量吸收利用装置,缩短再生制动电流传输距离才能解决。

3) 重视已安装再生制动能量吸收和利用装置的优化运行控制,提高运行性能和节能指标。

4 结论

逆变回馈装置和储能装置在列车再生制动能量利用方面得到了广泛地应用。本文讨论了含地面再生制动能量利用装置的供电系统优化设计理论和运营优化决策模型,地面再生制动能量利用装置的节能效果评估方法和其供电系统设计理念,可以为地面再生制动能量利用装置的供电系统设计提供依据和指导。

参考文献

- [1] ALFIERI L, BATTISTELLI L, PAGANO M. Energy efficiency strategies for railway application: alternative solutions applied to a real case study[J]. IET electrical systems in transportation, 2018, 8(2): 122-129.
- [2] TIAN Z, HILLMANSEN S, ROBERTS C, et al. Energy evaluation of the power network of a DC railway system with regenerating trains[J]. IET electrical systems in transportation, 2016, 6(2): 41-49.
- [3] TIAN Z, ZHANG G, ZHAO N, et al. Energy evaluation for dc railway systems with inverting substations[C]// 2018 IEEE international conference on electrical systems for aircraft, railway, ship propulsion and road vehicles & international transportation electrification conference (ESARS-ITEC). IEEE, 2019.
- [4] 刘炜, 李由, 张骞, 等. 计及逆变回馈装置间歇工作制的城轨供电计算[J]. 西南交通大学学报, 2021, 25(7): 1-8. LIU Wei, LI You, ZHANG Jian, et al. Calculation of urban rail AC/DC power supply with intermittent duty of inverter feedback devices[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 25(7): 1-8.
- [5] 刘炜, 吴拓剑, 禹皓元, 等. 直流牵引供电系统地面储能装置建模与仿真分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4207-4215.

- LIU Wei, WU Tuojian, YU Haoyuan, et al. Modeling and simulation of way-side energy storage devices in DC traction power supply system[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2020, 35(19): 4207-4215.
- [6] 张戢, 刘炜, 周瑞兵, 等. 基于双向变流装置的城市轨道交通牵引供电系统潮流计算[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 92-98.
ZHANG Jian, LIU Wei, ZHOU Ruibing, et al. Power flow calculation of urban rail traction power supply system based on bidirectional converter[J]. China railway science, 2020, 41(1): 92-98.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 陈怀鑫, 杨中平, 林飞, 等. 基于遗传算法的城轨交通超级电容储能装置能量管理和容量配置优化研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(9): 59-66.
CHEN Huaixin, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. Management and configuration for stationary super-capacitor energy storage system applied in urban rail transit based on genetic algorithm[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41(9): 59-66.
- [10] 刘炜, 张浩, 张戢, 等. 城轨牵引供电系统逆变回馈装置定容选址[J]. 西南交通大学学报, 2021, 20(8): 1-8.
LIU Wei, ZHANG Hao, ZHANG Jian, et al. Optimal siting and sizing for inverter feedback devices applied in urban rail transit based on NSGA-II [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 20(8): 1-8.
- [11] 刘志刚, 郝峰杰, 陈杰, 等. 城轨牵引供电系统车-地配合参数优化方法[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 79-87.
LIU Zhigang, HAO Fengjie, CHEN Jie, et al. Optimization method of train-ground coordination parameters for urban traction power supply system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 79-87.

(编辑: 王艳菊)

(上接第23页)

参考文献

- [1] 王俭朴, 任成龙. 城市轨道交通车辆储能技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(1): 124-127.
WANG Jianpu, REN Chenglong. Research of energy storage technology for urban rail transit vehicle[J]. Urban mass transit, 2017, 20(1): 124-127.
- [2] 胡斌. 超级电容储能型现代有轨电车供电系统设计要点分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 128-132.
HU Bin. Analysis of the design essentials in modern tram power supply system with super capacitor[J]. Urban mass transit, 2019, 22(5): 128-132.
- [3] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通列车再生制动能量地面利用系统: GB/T 36287—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [4] Railway applications-fixed installations-stationary energy storage system for DC traction systems: IEC 62924(2017-01)[S]. Geneva, Switzerland: IHS, 2017.
- [5] IEEE guide for wayside energy storage system for DC traction applications: IEEE 1887-2017[S]. New York, USA: IEEE standards association, 2017.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 超级电容器 第1部分: 总则: GB/T 34870.1—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力储能用锂离子电池: GB/T 36276—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电化学储能系统储能变流器技术规范: GB/T 34120—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统电化学储能系统通用技术条件: GB/T 36558—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电化学储能电站运行指标及评价: GB/T 36549—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电化学储能电站设计规范: GB 51048—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [12] Standard for the installation of stationary energy storage systems: NFPA 855-2020[S]. Quincy, USA: technical committee on energy storage systems, 2019.

(编辑: 王艳菊)