

文章编号: 1001-8360(2019)09-0059-08

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

陈怀鑫^{1,2}, 杨中平¹, 林 飞¹, 夏 欢¹, 王 彬¹

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司 电气化设计院分公司, 天津 300250)

摘 要: 在城轨交通供电系统中应用超级电容储能装置可以有效回收列车制动能量,抑制直流网压波动。首先建立了包含列车和超级电容储能装置的城轨交通供电系统仿真平台,且综合考虑节能电量、投资成本和电价等因素,计算超级电容储能装置的经济效率,并将其作为储能装置能量管理和容量配置优化的目标函数。提出了一种结合城市轨道交通供电系统仿真模拟平台和遗传算法的优化方法,实现储能装置能量管理控制参数和容量配置方案的同时优化。最后以某条地铁线路为例,通过仿真对比验证论文提出优化方法的有效性,使应用于城轨交通供电系统的超级电容储能装置得到最大的经济效率。

关键词: 超级电容; 城轨交通供电系统; 能量管理; 容量配置; 遗传算法; 经济效率

中图分类号: TM315 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2019.09.008

Management and Configuration for Stationary Super-capacitor Energy Storage System Applied in Urban Rail Transit Based on Genetic Algorithm

CHEN Huaixin^{1,2}, YANG Zhongping¹, LIN Fei, XIA Huan¹, WANG Bin¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Railway Electrification Surrey & Research Institute, China Railway Liuyuan Group Co.,Ltd.,Tianjin 300250, China)

Abstract: The installation of super capacitor in urban rail transit power supply system can recycle train braking energy and stabilize DC network voltage. Firstly in this paper, the simulation platform of urban rail transit power supply system was established which includes trains and super capacitor energy storage systems. Then the objective function of energy management and capacity configuration optimization of energy storage systems was put forward with consideration of many factors including electricity savings, investment cost and electricity price to calculate the economic efficiency of supercapacitor energy storage system. A novel optimization method that combines simulation platform of urban rail transit power supply system and genetic algorithm was proposed, to realize simultaneous optimization of energy management control parameters and capacity configuration schemes of energy storage systems. Finally, a case study of a metro line was conducted to verify the effectiveness of the proposed optimization method through simulation comparison, to maximize the economic efficiency of the supercapacitor energy storage system.

Key words: super capacitor; urban railway power supply system; energy management; capacity configuration; genetic algorithm; economic efficiency

近年来,城市轨道交通在中国发展十分迅速,其具有速度快、运量大、安全、准时等优点。在城市轨道交

通供电系统应用超级电容储能装置可以实现直流网压波动的抑制和再生制动能量的回收^[1-8]。

与其他储能装置相比,超级电容储能装置具备充放电功率高、循环寿命长等优点,与城市轨道交通运行列车牵引及制动功率高、启停频繁等特征相互匹配。超级电容储能装置根据其安装位置可分为车载式和地

收稿日期: 2016-06-29; 修回日期: 2019-01-10
作者简介: 陈怀鑫(1991—),男,福建三明人,工程师,硕士。
E-mail: 13121389@bjtu.edu.cn

面式。本文主要对地面式超级电容储能装置的能量管理策略和容量配置方案进行优化研究。

文献[9-11]研究了地面式超级电容储能装置的能量管理策略。其中文献[9]提出了基于列车动能的能量管理策略,根据超级电容储能装置的储存能量和列车速度,控制储能装置的充放电功率;文献[10]建立了轻轨列车供电系统的仿真模型,并提出一种超级电容储能装置能量管理的优化方法,可以使牵引变电所总输出能耗达到最低。同样,对于如何确定超级电容储能装置在城轨交通供电系统安装的位置及容量配置优化问题,许多文献亦有相应介绍^[12-15]。文献[12]以节能效率和电压改善率作为目标函数,讨论了超级电容储能装置的容量配置方案优化。文献[13]提出通过结合神经网络和遗传算法,可以得到超级电容储能装置应用于城轨交通供电系统的最优容量配置方案。

然而上述研究依然存在一些不足。一是在许多论文中,城市轨道交通供电系统模型与实际情况相差太大,列车和牵引变电所数量少,且忽视列车和牵引所整流机组的非线性和时变性;二是对于超级电容储能装置,其能量管理策略的优化与容量配置方案的优化具有相关性,相互影响。若能量管理策略不同,则超级电容储能装置容量配置的最优方案也是不同的。文献[13-15]对于超级电容储能装置能量管理策略或容量配置方案的研究,都是基于另一者恒定的基础上进行。因此,本文重点研究了如何对超级电容储能装置的能量管理策略和容量配置方案实现同时优化。

本文首先建立包含列车和超级电容储能装置的城轨交通供电系统仿真平台,实现对于供电系统在不同运行条件下的模拟仿真。然后综合考虑节电量、投资成本和电价等因素,给出经济效率的计算方法,并将其作为超级电容储能装置能量管理和容量配置优化的目标函数。最后提出一种结合供电系统仿真模拟平台和遗传算法的优化方法,实现储能装置能量管理控制策略和容量配置方案的同时优化,使应用于城轨交通供电系统的超级电容储能装置得到最大经济效率。

1 建模

1.1 城轨交通直流供电网络建模

城轨交通直流供电网络结构见图 1,其中包括牵引变电所、列车和地面式超级电容储能装置。牵引变电所由于采用二极管不控整流方式,电流流向具有单向性;而不同列车之间及列车与牵引变电所之间的接触网及钢轨阻抗会随其间距的变化而实时改变,因此具备时变性。图 1 中,ESS 为超级电容储能装置,TSS 为牵引变电所; Z 为线路阻抗。

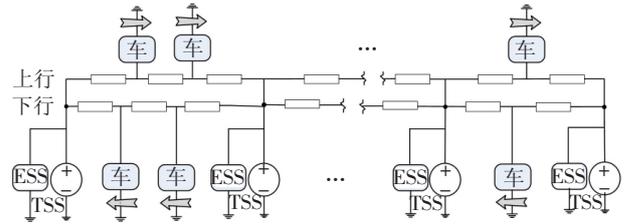


图 1 装有超级电容储能装置的直流牵引供电网络结构

牵引变电所模型见图 2,由理想电压源、等效内阻和二极管串联模拟整流机组的外特性。当牵引变电所

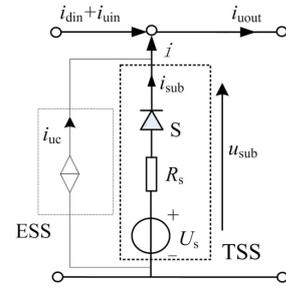


图 2 牵引变电所模型

输出电流增大时,其输出电压相应降低。图 2 中: R_s 为牵引变电所整流机组等效内阻; S 为二极管; u_{sub} 、 i_{sub} 分别为牵引变电所输出电压、输出电流; i_{uc} 为超级电容储能装置输出电流; i_{din} 、 i_{uin} 分别为牵引变电所左供电臂下行输入电流、上行输入电流; i_{uout} 为牵引变电所输出至右供电臂电流。

$$i_{uout} = i_{uin} + i_{din} + i \quad (1)$$

$$i = i_{uc} + i_{sub} \quad (2)$$

$$i_{sub} \geq 0 \quad (3)$$

牵引变电所整流机组输出特性曲线见图 3, U_0 为牵引变电所空载电压。

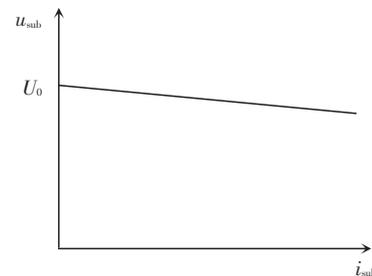


图 3 牵引变电所整流机组输出特性曲线

列车模型见图 4,通过设置受控电流源模拟列车从直流供电网吸收牵引电流或回馈制动电流。图 4 中: R_b 为列车制动电阻; R_f 为列车滤波电阻; L_f 为列车滤波电感; C_{fc} 为列车支撑电容; R 为线路电阻; L 为线路电感; P_{aux} 为列车辅助电源功率; P 为列车牵引功率; u_{fc} 为列车直流侧电压; i_{inv} 为列车牵引电流; i 为列车总电流; i_{in} 为列车左侧线路电流; i_{out} 为列车右侧

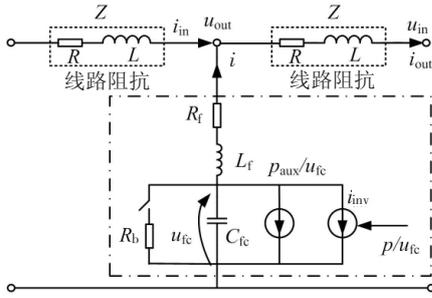


图4 列车模型

线路电流; u_{out} 为列车受电弓电压。

$$u_{out} = u_{in} + Ri_{out} + L \frac{di_{out}}{dt} \quad (4)$$

$$i_{out} = i_{in} + i \quad (5)$$

$$i = -i_{inv} - \frac{p_{aux}}{u_{fc}} - C_{fc} \frac{du_{fc}}{dt} \quad (6)$$

超级电容储能装置模型见图 5, 由受控电流源模拟, 并且并联在牵引变电所的输出侧, 其电流由能量管理模块和容量配置模块实时决定。

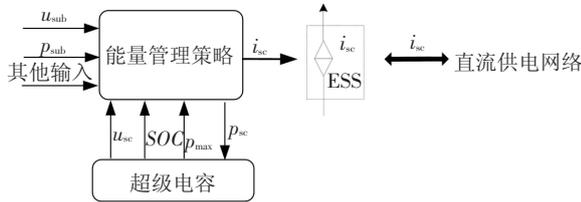


图5 超级电容储能装置模型

图 5 中, p_{sub} 为牵引变电所输出功率; u_{sc} 为超级电容电压; p_{sc} 为超级电容充放电功率; p_{max} 为超级电容充放电峰值功率; i_{sc} 为超级电容电流。SOC 为超级电容充电状态, 定义为

$$SOC = \frac{E_{sc}}{E_{scmax}} = \frac{\frac{1}{2}Cu_{sc}^2}{\frac{1}{2}CU_{scmax}^2} = \left(\frac{u_{sc}}{U_{scmax}}\right)^2 \quad (7)$$

式中: E_{sc} 为超级电容的储能量; E_{scmax} 为超级电容的最大储能量; C 为超级电容的电容量; U_{scmax} 为超级电容的最高充电电压。

1.2 城轨交通供电系统仿真平台

基于 1.1 建立的城轨直流供电网络 DC-NLS, 结合列车参数输入模块 TPS 及超级电容储能装置参数输入模块 SCESS, 搭建城轨供电系统仿真平台, 见图 6。图 6 中, TPS 为列车参数输入模块, 输出上下行列车的位置及电功率等; SCESS 为超级电容储能装置参数输入模块, 设置超级电容储能装置的能量管理策略和容量配置方案, 为后续直流供电网 DC-NLS 的潮流计算提供基础数据; DC-NLS 为城轨直流供电网络。

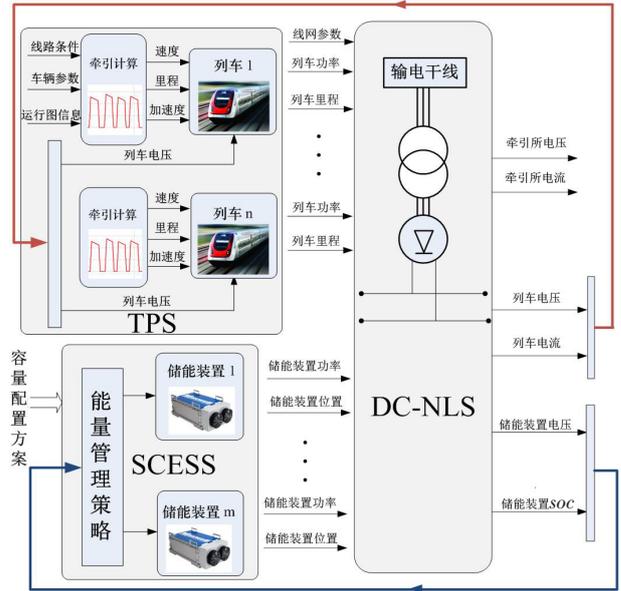


图6 城轨交通供电系统仿真平台

1.2.1 实际线路参数

以北京某条地铁线路为例进行仿真研究, 将其线路参数和车辆信息分别输入至城轨交通供电系统仿真平台, 具体数据见表 1、表 2。

表 1 线路牵引变电所参数

牵引变电所	站 1— 站 2	站 2— 站 3	站 3— 站 4	站 4— 站 5	站 5— 站 6	站 6— 站 7
站间距/km	1.1	1.9	2.2	2.3	2.1	2.7

表 2 列车和直流供电网参数

参数	数值	参数	数值
编组	3M3T	电机功率/kW	180×12
载重/t	313	电机效率	0.915
额定电压/V	750	逆变器效率	0.97
最高速度/(km·h ⁻¹)	80	齿轮箱效率	0.93
最大加速度/(m·s ⁻²)	1	辅助逆变器功率/ kVA	160×2
受电弓阻抗/Ω	0.015	辅助逆变器效率	0.85
接触网阻抗/(Ω·km ⁻¹)	0.007	变电所空载电压/V	836
钢轨阻抗/(Ω·km ⁻¹)	0.009	变电所等效内阻/Ω	0.07

1.2.2 城轨交通供电系统仿真平台输出波形

若在城轨交通供电系统中隔站分别配置 14 kW·h 的超级电容储能装置, 并采用电压外环电流内环的双环能量控制策略^[10], 则城轨交通供电系统仿真平台输出波形见图 7。其中包括列车随时间变化的速度、功率、受电弓电压、受电弓电流(图 7(a)~图 7(d)); 变电所随时间变化直流母线电压、电流(图 7(e)~图 7

(f); 超级电容储能装置随时间变化的充放电功率、SOC 值(图 7(g)~图 7(h))。列车经过 12 个车站,其

中有 7 个为牵引变电所。超级电容储能装置 SOC 值变化范围在 0.25~1.00 之间。

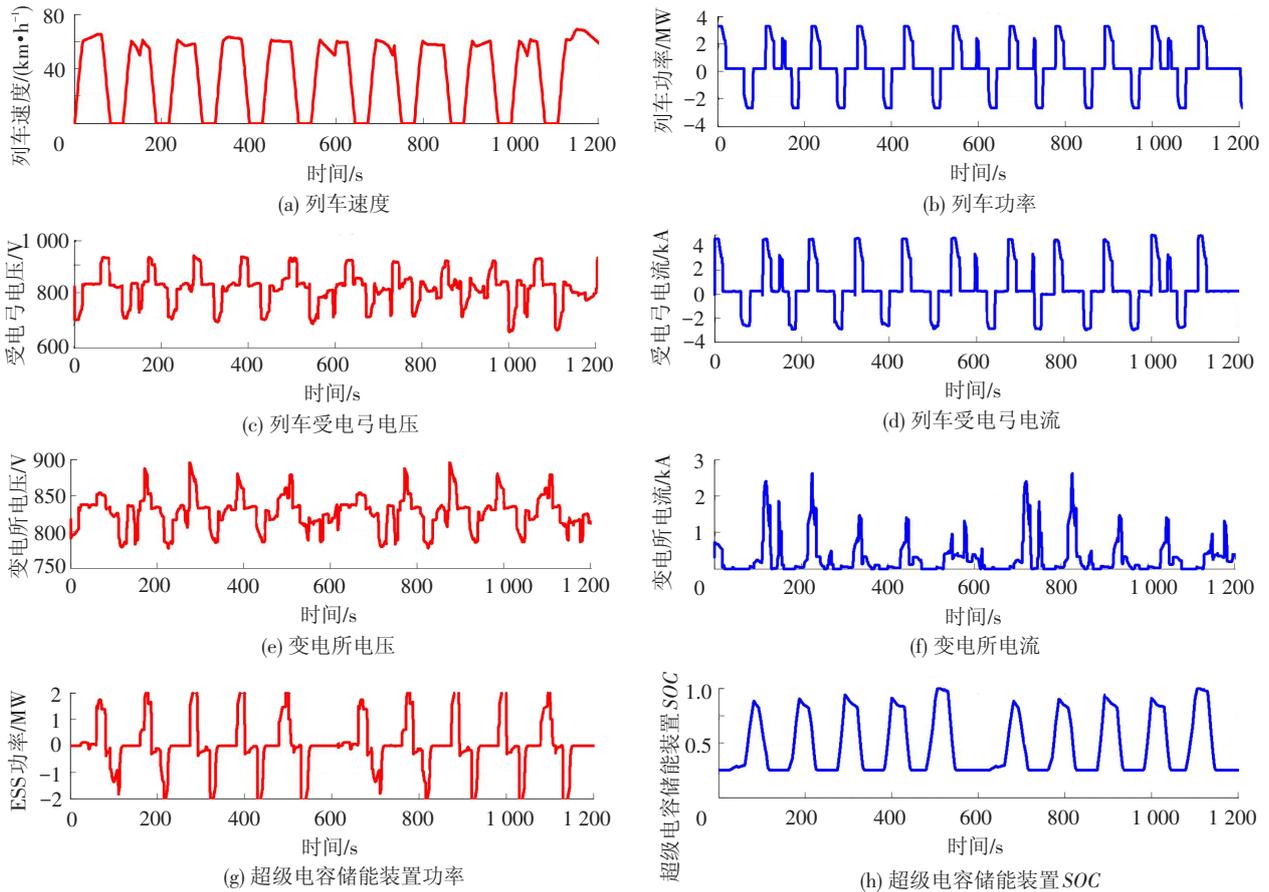


图 7 城轨交通供电系统仿真平台输出波形

2 目标函数

本文优化超级电容储能装置能量管理策略和容量配置方案的目标是尽可能地减少投资成本并增大超级电容节能效果,故本文综合考虑节约电量、投资成本和电价等因素,提出经济效率作为超级电容储能装置优化的目标函数。

2.1 投资成本

一套正在北京通州北苑地铁站挂网试验的超级电容储能装置见图 8,各组成设备完善,其主要包含双向 DC/DC 变换器、超级电容模组以及其他连接设备,主要电路结构见图 9。

超级电容单个模组(BMOD0063P125)参数见表 3。超级电容通过串并联多个模组以增大其端电压和总储存容量。超级电容模组串联后其最高端电压设计为 750 V,选取超级电容模组串联数为 6,并由并联数 n 决定超级电容总的容量。



图 8 超级电容储能装置安装于牵引变电所

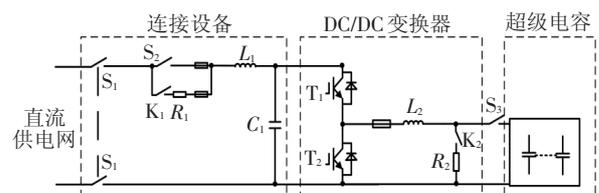


图 9 超级电容储能装置电路结构

表 3 超级电容模组(BMOD0063P125)

参数	数值	参数	数值
额定电压/V	125	容值/F	63
最大持续电流/A	240	最大持续功率/kW	30
内阻/ Ω	0.018	能量/kW·h	0.137
价格/元	32 000		

超级电容储能装置安装在城轨交通供电系统第 i 个牵引变电所的投资成本为

$$Cost_i = \begin{cases} 0 & n_i = 0 \\ (C + n_i \times p \times m) \times (1 + r)^l & 0 < n_i \leq 18 \end{cases} \quad (8)$$

式中: n_i 为安装在第 i 个牵引变电所的超级电容模组并联数,若 n_i 为 0,表示超级电容储能装置不安装于第 i 个牵引变电所。若 n_i 不为 0,则超级电容储能装置在第 i 个牵引变电所的投资成本包含 2 部分; $n_i \times p \times m$ 表示投资成本中与超级电容储能装置容量直接相关的部分,包括双向 DC/DC 变换器和超级电容的经济成本; C 表示投资成本中与超级电容储能装置容量不相关的部分,包括连接设备和储能装置的安装及维护费用; p 为超级电容模组串联数为 6,并联数为 1 时的总功率; m 为超级电容和双向 DC/DC 变换器总的单位功率经济成本; r 为市场资本年利率; l 为超级电容储能装置的使用寿命。考虑到北京地铁牵引变电所的空间裕量,设置超级电容模组并联数 n_i 不大于 18。

2.2 节能效果

计算城轨交通供电系统所有牵引变电所的年供电总能耗为

$$E_{sub} = \sum_{i=1}^i \left[\int_0^T (U_{sub}^i \cdot I_{sub}^i) dt \right] \times \frac{365}{3\ 600\ 000} \quad (9)$$

式中: I_{sub} 为牵引变电所直流输出电流; i 为牵引变电所的数量; T 为牵引变电所 1 d 的运行时间; E_{sub} 为牵引变电所的总输出能耗。

$$P_{sub}^{nosc} = E_{sub}^{nosc} \times \epsilon \times \frac{l[2 + (l - 2)i]}{2} \quad (10)$$

$$P_{sub}^{sc} = E_{sub}^{sc} \times \epsilon \times \frac{l[2 + (l - 2)i]}{2} + \sum_{j=1}^j Cost_j \quad (11)$$

式中: P_{sub}^{nosc} 是在 l 年期间内,城市轨道交通供电系统在不安装超级电容储能装置情况下的使用电费; P_{sub}^{sc} 是在 l 年期间内,城市轨道交通供电系统在安装超级电容储能装置情况下的使用电费与超级电容储能装置投资成本的总和; E_{sub}^{nosc} 和 E_{sub}^{sc} 是城市轨道交通供电系统分别在不安装和安装超级电容储能装置 2 种情况下的每年供电能耗; ϵ 为电价,单位为元/kW·h; i 为电

价的年通胀指数。

2.3 经济效率

为了同时考虑超级电容储能装置的投资成本、节约电量以及电价等因素,本文提出经济效率作为超级电容储能装置能量管理策略和容量配置方案优化的目标函数,定义如下

$$ObjV = \frac{P_{sub}^{nosc} - P_{sub}^{sc}}{P_{sub}^{nosc}} \times 100\% \quad (12)$$

计算超级电容储能装置经济效率需要的参数见表 4。

表 4 计算经济效率需要的参数

参数	数值	参数	数值
P /kW	180	ϵ /[元·(kW·h) ⁻¹]	1
m /(元·W ⁻¹)	1.5	r /%	5
C /万元	100	i /%	5
l /a	10		

3 基于遗传算法优化超级电容储能装置能量管理策略和容量配置方案的方法

3.1 能量管理策略

为了提高超级电容储能装置的经济效率,本文采用一种电压外环、电流内环的双环能量管理策略,其控制框图见图 10。

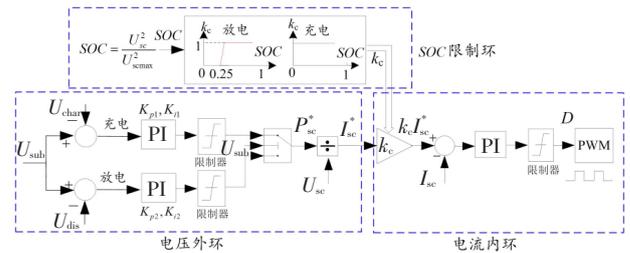


图 10 超级电容储能装置双环能量管理策略

图 10 中: U_{char} 为超级电容储能装置充电阈值; U_{dis} 为超级电容储能装置放电阈值; K_p 、 K_i 为电压外环 PI 控制器参数; P_{sc}^* 为超级电容储能装置的充放电功率指令值; U_{sc} 为超级电容储能装置电压; $U_{sc\ max}$ 为超级电容储能装置最高电压; k_c 为 SOC 限制值; I_{sc} 为超级电容储能装置充放电电流; I_{sc}^* 为超级电容储能装置的充放电电流指令值; D 为双向变流器开关占空比。

双环能量管理策略包含 3 个部分:电压外环、SOC 限制环和电流内环。

电压外环实时检测牵引变电所端电压 U_{sub} 。当牵引变电所电压 U_{sub} 高于充电阈值 U_{char} 时,超级电容储能装置处于充电模式,电压外环根据牵引变电所电压 U_{sub} 和充电阈值 U_{char} ,得到超级电容储能装置的充电

功率指令值 P_{sc}^* ；当牵引变电所电压 U_{sub} 低于放电阈值 U_{dis} 时，超级电容储能装置处于放电模式，电压外环根据牵引变电所电压 U_{sub} 和放电阈值 U_{dis} ，得到超级电容储能装置的放电功率指令值 P_{sc}^* ；当牵引变电所电压 U_{sub} 处于充电阈值 U_{achr} 和放电阈值 U_{dis} 之间时，超级电容储能装置处于待机模式，其功率指令值 P_{sc}^* 为 0；当牵引变电所电压 U_{sub} 高于电压上限值 U_{max} 或低于电压下限值 U_{min} 时，超级电容储能装置处于禁止工作模式。超级电容储能装置工作模式切换见图 11。

超级电容储能装置的充放电电流指令值 I_{sc}^* 由以下公式得到

$$I_{sc}^* = \frac{P_{sc}^*}{U_{sc}} \quad (13)$$

式中： U_{sc} 为超级电容储能装置的端电压。

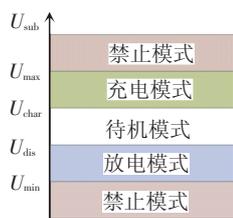


图 11 超级电容储能装置工作模式切换

SOC 限制环实时检测超级电容储能装置的 SOC 值，防止超级电容储能装置过充和过放。当超级电容储能装置的 SOC 处于正常工作范围时（一般为 0.25~1），SOC 限制环不工作；当超级电容储能装置的 SOC 低于下限值时（一般为 0.25）或高于上限值时（一般为 1），SOC 限制环使超级电容储能装置的电流指令值 I_{sc}^* 为 0。

电流内环根据电压外环和 SOC 限制环输出的电流指令值 $k_c I_{sc}^*$ ，产生 PWM，控制双向 DC/DC 变换器，使超级电容储能装置的电流等于电流指令值 I_{sc}^* 。

在双环能量管理策略中，6 个待定参数 K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{p2} 、 K_{i2} 、 U_{char} 、 U_{dis} 都能决定超级电容储能装置的节能效果。在本文中，超级电容储能装置双环能量管理策略的 6 个待定参数以及超级电容储能装置在每个牵引变电所配置的容量都由遗传算法结合城轨供电系统仿真平台优化得到。

3.2 基于遗传算法优化超级电容储能装置能量管理策略和容量配置方案

3.2.1 遗传算法

为了得到超级电容储能装置最大的经济效率，本文改进遗传算法以同时优化超级电容储能装置能量管理控制参数和具体容量配置方案。遗传算法是建立在自然进化理论和遗传学机理基础之上的自适应概率论

搜索方法，包含编码、适应度评估和遗传操作 3 大模块。与传统优化算法相比，遗传算法具有更好的收敛性，计算时间短，鲁棒性高。结合本文要求，遗传算法基本步骤如下：

Step1 编码

改进型能量管理策略中的 6 个待定参数 K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{p2} 、 K_{i2} 、 U_{char} 、 U_{dis} 以及超级电容储能装置在全线 7 座牵引变电所配置的容量，可以编码成 X 染色体的 13 个参数，见图 12。

$$X = [k_{p1} \ k_{i1} \ k_{p2} \ k_{i2} \ u_1 \ u_2 \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7]$$

TSS×7
能量管理策略参数 容量配置方案

图 12 X 染色体编码

每个 X 染色体作为遗传算法的一个种群个体，其中前 6 个参数决定超级电容储能装置双环能量管理策略中的具体参数；后 7 个参数分别代表安装在 7 个牵引变电所的超级电容储能装置的模组并联数。

Step2 适应度评估

在本文中，对超级电容储能装置能量管理策略控制参数和具体容量配置方案的优化通过寻找最大的目标函数来实现，因此把目标函数 $ObjV$ 的倒数作为个体的适应度值。目标函数值最大，适应度值越小，个体越优。适应度计算公式为

$$Fitness[X] = \frac{1}{ObjV[X]} \quad (14)$$

式中： $ObjV[X]$ 为超级电容储能装置能量管理策略控制参数和具体容量配置方案由 X 染色体的参数组决定时取得的目标函数。

Step3 遗传操作

遗传操作主要包括染色体选择、交叉、变异等，通过不断交换染色体信息以及更新优良个体寻找全域最优解。遗传算法的交叉和变异操作都具有典型的组合特征，因此在组合优化和离散优化方面，遗传算法具有十分良好的优化性能。

3.2.2 结合遗传算法与城轨供电系统仿真平台的优化方式

将遗传算法与城轨供电系统仿真平台相互结合的原理图见图 13，遗传算法通过不断优化种群个体 X 染色体的编码，即不断优化超级电容储能装置的能量管理策略参数和容量配置方案，并输入城轨交通供电系统仿真平台，经过仿真得到对应的目标函数，并由此进行下一代种群优化。随着遗传代数的不断增长，遗传算法可以得到最大目标函数，并得到超级电容储能装置最优的能量管理策略参数和容量配置方案。

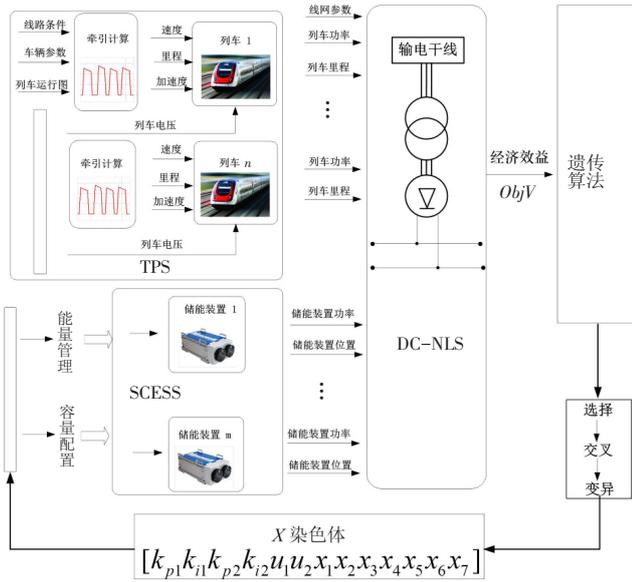


图 13 结合遗传算法与仿真平台进行优化的原理

图 13 中, $k_{p1} k_{i1} k_{p2} k_{i2} u_1 u_2 x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7$ 为染色体编码; $ObjV$ 为经济效益目标函数。

遗传算法的相应参数设定见表 5, 其中 $NIND$ 为种群规模, $MAXGEN$ 为遗传算法的代数, P_c 为遗传操作的交叉概率, P_m 为遗传操作的变异概率, G_{GAP} 为种群代沟。

表 5 遗传算法相应参数

参数	$NIND$	$MAXGEN$	P_c	P_m	G_{GAP}
数值	100	100	0.7	0.015	0.95

3.2.3 遗传算法优化结果

采用 2 种不同优化方法得到的仿真结果见图 14。优化方法一只优化了超级电容储能装置在不同牵引变电所的容量配置, 但其能量管理策略参数始终恒定。优化方法二基于遗传算法同时优化能量管理策略参数和容量配置方案。

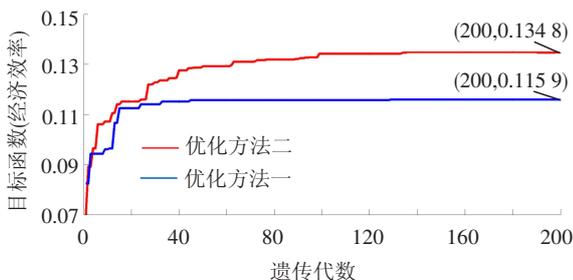


图 14 2 种优化方法的仿真结果对比

由图 2 可见, 随着遗传代数的增大, 2 种不同优化方法得到的目标函数都在不断增大, 并最终稳定在最大目标函数。优化方法一得到的最大目标函数为

11.59%, 而优化方法二得到的最大目标函数为 13.48%, 进一步提升了超级电容储能装置安装在城轨交通供电系统的经济效率。

2 种不同优化方法在得到最大目标函数时对应的能量管理策略参数见表 6。优化方法一采用的能量管理策略参数始终恒定; 优化方法二基于遗传算法不断优化且得到了最佳控制参数。

表 6 2 种优化方法得到的能量管理策略

优化方法	能量管理策略参数					
	K_{p1}	K_{i1}	K_{p2}	K_{i2}	U_{char}	U_{dis}
优化方法一	50	50	50	50	850	820
优化方法二	30	47	92	50	838	815

2 种优化方法得到的容量配置方案见表 7。由表 7 可以看出, 超级电容储能装置在采用不同能量管理策略参数的前提下, 最优的容量配置方案也是不同的。2 种优化方法得到的最优容量配置方案都只是在部分的牵引变电所配置超级电容储能装置, 并且在每个站配置的容量也基本不同。基于此可以得出, 只在部分特定的牵引变电所配置超级电容储能装置相对于在全线所有牵引变电所都配置超级电容储能装置的方式, 可以得到更高的经济效率, 而在每个站的容量配置最优值可由本文的优化方法得到。

表 7 2 种优化方法得到的容量配置方案

优化方法	容量配置方案						
	1	2	3	4	5	6	7
优化方法一	10	0	18	9	0	11	0
优化方法二	0	9	15	8	0	12	0

从仿真结果可以看出, 本文提出的优化方法可以同时优化并得到超级电容储能装置最佳的能量管理策略控制参数和具体容量配置方案, 并且这种优化方法可以使超级电容储能装置的经济效率最大值得到进一步提高, 达到 13.48%。

4 结束语

本文首先建立了包含列车和超级电容储能装置的城轨交通供电系统仿真平台, 可以得到供电系统在不同运行条件下的输出波形, 并且综合考虑节电量、投资成本和电价等因素, 给出了经济效率的计算方法, 并将其作为超级电容储能装置能量管理策略和容量配置方案优化的目标函数。从仿真结果可以看出, 只在部分特定的牵引变电所配置超级电容储能装置相对于在全线所有牵引变电所都配置超级电容储能装置的方式,

可以得到更高的经济效率。另外,同时优化超级电容储能装置的能量管理策略控制参数和具体容量配置方案可以进一步提高超级电容储能装置的经济效率,并达到 13.48%。本文优化后的超级电容储能装置能量管理策略参数和容量配置方案,以及取得的经济效率,可以为地铁公司在改善列车制动能量回收和提高公司运营经济收入等方面提供相应参考帮助。

参考文献:

- [1] 赵坤,杨中平,游小杰.车载超级电容容量配置及控制策略的研究[J].电工技术学报, 2011,26(S):149-154.
ZHAO Kun, YANG Zhongping, YOU Xiaojie. Capacity Configuration and Control Strategy of the On-board Super Capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011,26(S):149-154.
- [2] STEINER M, KLOHR M. Energy Storage System with Ultra Caps on Board of Railway Vehicles[C]//Power Electronics and Applications. Aalborg: IEEE, 2007: 2-5.
- [3] 陈怀鑫,杨中平,林飞.应用于城轨交通供电系统的超级电容储能装置稳定性研究[J].铁道学报, 2016,38(3): 59-65.
CHEN Huaixin, YANG Zhongping, LIN Fei. Stability Research of Stationary Super-capacitor Energy Storage Applied in Urban Rail Power Supply System[J]. Journal of the China Railway Society, 2016,38(3):59-65.
- [4] 陈怀鑫.基于混合粒子群算法的城轨交通超级电容储能系统能量管理和容量配置优化研究[D].北京:北京交通大学,2016:47-59.
- [5] 赵坤.城轨交通车载超级电容储能系统能量管理及容量配置研究[D].北京:北京交通大学,2013:84-90.
- [6] BARRERO R, TACKOEN X, VAN MIERLO J. Energy Savings in Public Transport[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2008,3(3):26-36.
- [7] 刘炜.城市轨道交通列车运行过程优化及牵引供电系统动态仿真[D].成都:西南交通大学,2009:29-37.
- [8] 夏欢,杨中平,李旭阳.基于动态阈值控制策略的城轨超级电容储能系统寿命优化研究[J].铁道学报, 2016,38(9): 23-30.
- XIA Huan, YANG Zhongping, LI Xuyang. Research on Life Optimization of Supercapacitor Energy Storage System in Urban Rail Based on Dynamic Threshold Control Strategy[J]. Journal of the China Railway Society, 2016,38(9): 23-30.
- [9] CICCARELLI F, DEL P A, IANNUZZI D. Improvement of Energy Efficiency in Light Railway Vehicles Based on Power Management Control of Wayside Lithium-ion Capacitor Storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1):275-286.
- [10] CICCARELLI F, IANNUZZI D, SPINA I. Comparison of Energy Management Control Strategy Based on Wayside ESS for LRV Application[C]//IECON 2013—39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna: IEEE, 2013: 1548-1554.
- [11] IANNUZZI D, TRICOLI P. Metro Train Equipped On-board with Supercapacitors: a Control Technique for Energy Saving[C]//International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. 2010. Pisa: IEEE, 2010: 750-756.
- [12] IANNUZZI D, PAGANO E, TRICOLI P. A Study on Stationary Supercapacitor Sets for Voltage Droops Compensation of Streetcar Feeder Lines[C]//Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna: IEEE, 2010: 1-8.
- [13] WANG B, YANG Z, LIN F, et al. An Improved Genetic Algorithm for Optimal Stationary Energy Storage System Locating and Sizing[J]. Energies, 2014, 7(1):6434-6458.
- [14] TEYMOURFAR R, ASAEI B, IMAN-EINI H. Stationary Super-capacitor Energy Storage System to Save Regenerative Braking Energy in a Metro Line[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 56(1):206-214.
- [15] TACKOEN X, BARRERO R, MIERLO VAN J. Stationary or Onboard Energy Storage Systems for Energy Consumption Reduction in a Metro Network[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: J Rail Rapid Transit, 2010,224(3):207-225.

(责任编辑 何 芳)