

城市轨道交通交直流统一的牵引供电计算

刘 炜, 李群湛, 陈民武

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对城轨牵引供电计算现状, 即一般将交流系统等效至直流侧进行计算或者交直流侧分开迭代, 简化了交直流系统的内在联系, 在一定程度上影响计算的精度, 探讨了一种基于整流机组模型的城轨牵引供电系统交直流统一的牵引供电计算方法, 并采用改进的牛顿-拉夫逊法和高斯-赛德尔法求解, 利用 10 节点直流牵引供电系统进行了验证。提出的交直流统一的牵引供电计算方法已成功应用在城轨牵引供电仿真系统中。

关键词: 城市轨道交通; 牵引供电计算; 仿真分析

Study of unified AC / DC power flow in DC traction power supply system

LIU Wei, LI Qun-zhan, CHEN Min-wu

(School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Traditional power flow for DC traction power supply system usually carries out at DC traction side or executes separately at AC/DC sides, which simplifies the internal relationship and reduces the calculation precision. Through analyzing the model of parallel-connected 12 pulse uncontrolled rectifier, a unified AC/DC power flow for DC traction power system based on improved Newton-Raphson method and Gauss-Seidel method is discussed and applied in 10-node hybrid traction power supply system for practical verification. The unified AC/DC power flow algorithm has been successfully applied in simulation system of DC traction power supply system.

Key words: urban railway; traction power calculation; simulation analysis

中图分类号: U231.92; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2010)08-0128-06

0 引言

牵引供电计算在城轨供电系统的设计工作中占有极其重要的地位, 是进行供电系统设计必须的一项工作, 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。

国内外众多学者对城轨牵引供电计算进行了深入的研究。Tylavsky 对 6 脉波整流机组建立功率电压方程, 采用牛顿-拉夫逊法求解牵引供电系统交直流混合潮流^[1]。Yii-Shen Tzeng 指出直流牵引供电系统中 R/X 较大, 忽略换相电阻会导致潮流计算误差, 其建立的 6 脉波整流机组模型中详细考虑了换相电阻和精确的基波电流, 并提出一种城市轨道交通交直流统一的潮流计算方法^[2]。蔡炎等建立了考虑复杂电网模型的多支路直流牵引供电网络模型, 并采用节点电压法进行数值求解^[3]。C.S.Chen, Y.S.Tzeng 分析了 12 脉波整流机组带平衡电抗器和不带平衡电抗器, 各工作模式下的基波、谐波数学模型^[4-5]。王

晓东基于 CAD 技术、电路网络理论提出了一种城轨牵引供电系统仿真方法, 这种研究方法成功应用在上海地铁 1 号线、2 号线、东方明珠线的牵引供电系统研究中^[6]。于松伟、史凤丽建立了牵引网动态模型, 采用回路法求解牵引供电系统, 并开发了城市轨道交通牵引供电仿真软件 URTPS^[7]。刘海东将列车牵引计算和供电计算结合, 建立了实时计算牵引变电所负荷过程的供电仿真系统^[8]。刘学军提出了城轨牵引供电计算的 RS 模型及其算法^[9]。

目前比较成熟的直流牵引供电系统仿真分析软件有 Carnegie-Mellon 大学的 EMM^[10]; ELBAS 针对城轨牵引供电系统仿真的 SINANET^[11], 该系统国内设计院均有引进。国内的一些设计院和科研院所也自行研发了仿真分析设计软件。

城轨牵引供电计算一般将交流侧等效至直流侧进行或者交、直流侧分开迭代。实际上城轨供电系统是一混合系统, 交直流互相耦合, 相互影响。本文在 12 脉波整流机组模型的基础上, 提出城市轨道交通

交直流统一迭代的牵引供电计算方法: 首先进行列车牵引计算^[12-13], 根据运行图获得任一运行时刻电路上列车的位置和功率分布, 通过基于整流机组模型的城轨交直流统一的供电计算, 获得城轨牵引供电系统中任一节点的电压、负荷等随时间的变化过程。统一迭代法完整考虑交直流、变量之间的耦合关系, 其收敛特性比交替迭代算法好^[14]。

1 整流机组的模型

城市轨道交通 12 脉波整流机组一般采用 3 绕组或 4 绕组整流变压器, 将两组低压绕组之间相位相差 30°接入由两个三相桥式全波整流电路并联组成的整流器, 形成 12 脉波输出。

图 1 为 12 脉波整流机组的连接形式(不加桥间平衡电抗器)。

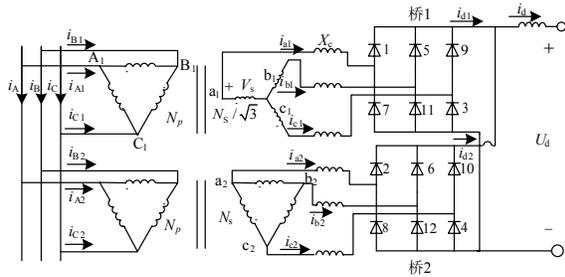


图 1 12 脉波整流机组连接形式

Fig.1 12 pulse uncontrolled rectifier connection form

不带桥间平衡电抗器运行时, 整流机组两电桥间会有互动, 共有七种工作模式(工作模式以同时刻二极管导通数目区分), 其中在正常操作下, 随着电抗因素 RF (Reactance Factor) 的改变存在五种工作模式^[4-5]。在牵引供电计算中, 可用模式 3 代表正常运行状态^[15]。模式 3 又称 5-4 模式。其负载电流是连续的, 二极管导通数目以 5 个、4 个依次导通, 变换周期为 $\pi/6$, 直流侧电压、电流, 交流侧基波功率, 如式(1)所示。

$$E_d = \frac{6U}{\pi} \left\{ \frac{\sqrt{2}(3+2\sqrt{3})}{7} [\sin(\alpha_1 + \mu) - \sin \alpha_1] + \frac{1+\sqrt{3}}{2} \left[\sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{12}\right) - \sin\left(\alpha_1 + \mu - \frac{\pi}{12}\right) \right] \right\}$$

$$I_d = \frac{\sqrt{2}U}{X_C} \left\{ -\sqrt{3} [\sin(\alpha_1 + \mu) - \sin \alpha_1] + 2 \left[\sin\left(\alpha_1 + \mu - \frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(\alpha_1 - \frac{\pi}{6}\right) \right] + \frac{\sqrt{3}-1}{4\sqrt{2}} \left[\sin\left(\alpha_1 - \frac{5\pi}{12}\right) - \sin\left(\alpha_1 + \mu - \frac{7\pi}{12}\right) \right] \right\}$$

$$P_1 + jQ_1 = 2\sqrt{3}U (I_{a2,r1} + jI_{a2,l1})$$

$$P_1 = \frac{4\sqrt{3}U^2}{\pi X_C} \left\{ \begin{aligned} &\sin \mu \psi_{31}(\mu) + \sin\left(\frac{\pi}{6} - \mu\right) \psi_{32}(\mu) + \sin\left(\mu + \alpha_1 - \frac{\pi}{3}\right) \psi_{33}(\mu) + \\ &\sin\left(\mu + \alpha_1 + \frac{\pi}{3}\right) \psi_{34}(\mu) + \sin(\mu + \alpha_1) \psi_{35}(\mu) + 0.7588 \end{aligned} \right\}$$

$$Q_1 = \frac{4\sqrt{3}U^2}{\pi X_C} \left\{ \begin{aligned} &-\sin \mu \psi_{31}(\mu) - \sin\left(\frac{\pi}{6} - \mu\right) \psi_{32}(\mu) - \\ &\cos\left(\mu + \alpha_1 - \frac{\pi}{3}\right) \psi_{33}(\mu) - \cos\left(\mu + \alpha_1 + \frac{\pi}{3}\right) \psi_{34}(\mu) - \\ &\cos(\mu + \alpha_1) \psi_{35}(\mu) + 0.4375\mu + 0.058\left(\frac{\pi}{6} - \mu\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: U, P_1, Q_1 为 12 脉波整流机组交流侧线电压有效值, 基波有功功率, 基波无功功率; E_d, I_d 为 12 脉波整流机组直流侧电压, 电流; X_C 为整流机组换相电抗; α_1 为延迟导通角, $\alpha_1 = \tan^{-1}\left(\frac{2-\sqrt{3}}{7}\right) \approx$

2.192°; μ 为换相重叠角, 满足式(2)。

$$\frac{X_C I_d}{\sqrt{2}U} + \cos(\alpha_1 + \mu) - \cos \alpha_1 - \frac{\sqrt{3}-1}{4\sqrt{2}} \left[\sin\left(\alpha_1 - \frac{5\pi}{12}\right) - \sin\left(\alpha_1 + \mu - \frac{7\pi}{12}\right) \right] = 0 \quad (2)$$

等效 24 脉波整流机组由两台 12 脉波牵引整流变压器组成, 网侧绕组采用延边三角形联结法, 分别移相 $\pm 7.5^\circ$, 使四组阀侧绕组的线电势之间形成 15° 的相位差, 经不可控三相桥式整流后, 在直流侧并联输出。详述 24 脉波整流机组的数学模型比较复杂, 一般情况下可认为两台 12 脉波整流机组并列独立工作。本文中, 等效 24 脉波整流机组模型简化描述如式(3)所示。

$$E'_d = E_d \quad I'_d = 2I_d \quad P'_1 = 2P_1 \quad Q'_1 = 2Q_1 \quad (3)$$

式中: E'_d, I'_d, P'_1, Q'_1 为 24 脉波整流机组直流电压、电流和基波有功功率、无功功率。

2 城市轨道交通直流统一的牵引供电计算

2.1 基于牛顿法求解的城轨交直流牵引供电计算

城轨牵引供电系统是一交直流混合的系统, 交流侧接入系统电源后, 通过集中供电、分散供电或混合供电方式, 降压后整流成直流传输至牵引网供给列车功率。在牵引供电计算中, 12 脉波整流机组的模型可用图 2 表示。采用文献[1-2]的标么值系统后, 整流机组交、直流侧节点的功率方程同式(1)。

当节点电压以极坐标的形式表示时, 整流机组交流侧节点 p 、直流侧节点 t 的功率偏差方程为式(4)、(5), 其中: N 为交流系统节点总数; M 为直流系统节点总数。

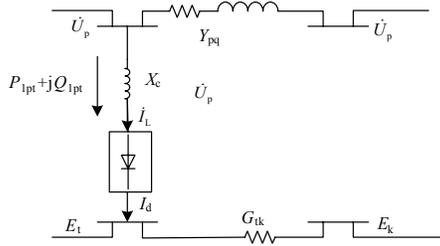


图 2 潮流计算中的 12 脉波整流机组模型
Fig.2 Power flow model of 12-pulse rectifier

$$\Delta P_p = P_p - \sum_{i=1}^N U_p U_i (G_{pi} \cos \delta_{pi} + B_{pi} \sin \delta_{pi}) - P_{1pt} \quad (4)$$

$$\Delta Q_p = Q_p - \sum_{i=1}^N U_p U_i (G_{pi} \sin \delta_{pi} - B_{pi} \cos \delta_{pi}) - Q_{1pt}$$

$$\Delta P_t = P_t - \sum_{i=1}^M E_i E_i G_{it} + E_t I_d \quad (5)$$

整流机组交直流节点的功率偏差方程由于增加了两个待求变量 I_d 、 μ_p ，需再追加两个方程。式(6)、(7)为标幺值体系下，12 脉波整流机组直流输出电压与直流输出电流的表达式。

$$R_1 = E_t - \sqrt{2} U_p \left\{ \frac{\sqrt{2}(3+2\sqrt{3})}{7} [\sin(\alpha_1 + \mu) - \sin \alpha_1] + \frac{1+\sqrt{3}}{2} \left[\sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{12}\right) - \sin\left(\alpha_1 + \mu - \frac{\pi}{12}\right) \right] \right\} = 0 \quad (6)$$

$$R_2 = I_d - \frac{6U_p}{\pi X_c} \left\{ -\sqrt{3} [\sin(\alpha_1 + \mu) - \sin \alpha_1] + 2 \left[\sin\left(\alpha_1 + \mu - \frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(\alpha_1 - \frac{\pi}{6}\right) \right] + \frac{\sqrt{3}-1}{4\sqrt{2}} \left[\sin\left(\alpha_1 - \frac{5\pi}{12}\right) - \sin\left(\alpha_1 + \mu - \frac{7\pi}{12}\right) \right] \right\} = 0 \quad (7)$$

将式(6)、(7)写成 $f(x)=0$ 的形式，并采用牛顿法求解潮流，雅克比矩阵如式(8)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_p \\ \Delta Q_p \\ \Delta R_{1p} \\ \Delta R_{2p} \\ \vdots \\ \Delta P_q \\ \Delta Q_q \\ \vdots \\ \Delta P_t \\ \vdots \\ \Delta P_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{pp} & \bar{N}_{pp} & 0 & A_{pp} & \dots & H_{pq} & N_{pq} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \bar{J}_{pp} & \bar{L}_{pp} & 0 & B_{pp} & \dots & J_{pq} & L_{pq} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_{pp} & 0 & D_{pp} & \dots & 0 & 0 & \dots & E_{pt} & \dots & 0 \\ 0 & F_{pp} & G_{pp} & I_{pp} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ H_{qp} & N_{qp} & 0 & 0 & \dots & H_{qq} & N_{qq} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ J_{qp} & L_{qp} & 0 & 0 & \dots & J_{qq} & L_{qq} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & K_{tp} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \bar{N}_{tt} & \dots & N_{tk} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & N_{kt} & \dots & N_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_p \\ \Delta U_p / U_p \\ \Delta I_{dp} \\ \Delta \mu_p \\ \vdots \\ \Delta \delta_q \\ \Delta U_q / U_q \\ \vdots \\ \Delta E_t / E_t \\ \vdots \\ \Delta E_k / E_k \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中：

$$A_{pp} = \frac{\partial \Delta P_p}{\partial \Delta \mu_p} \quad B_{pp} = \frac{\partial \Delta Q_p}{\partial \Delta \mu_p} \quad C_{pp} = \frac{\partial \Delta R_{1p}}{\partial \Delta U_p} U_p \quad D_{pp} = \frac{\partial \Delta R_{1p}}{\partial \Delta \mu_p}$$

$$F_{pp} = \frac{\partial \Delta R_{2p}}{\partial \Delta U_p} U_p \quad G_{pp} = \frac{\partial \Delta R_{2p}}{\partial \Delta I_{dp}} \quad I_{pp} = \frac{\partial \Delta R_{2p}}{\partial \Delta \mu_p} \quad K_{tp} = \frac{\partial \Delta P_t}{\partial I_{dp}}$$

等效 24 脉波整流机组可简化为两台 12 脉波整流机组并列独立运行交直流侧功率偏差如式(9)所示，同理可据式(8)写出其雅克比矩阵。

$$\Delta P_p + j \Delta Q_p = P_p + j Q_p - \dot{U}_p \left(\sum_{q=1}^N Y_{pq} \dot{U}_q \right)^* - 2P_{1pt} - j2Q_{1pt}$$

$$\Delta P_t = P_t - E_t \left(\sum_{k=1}^M G_{tk} E_k \right) + 2E_t I_d \quad (9)$$

基于牛顿法求解的城轨交直流统一的牵引供电计算步骤如下：

(1) 建立城轨交流供电系统的导纳矩阵 Y 。

(2) 在当前仿真时刻 t ，根据运行图和列车牵引计算结果确定线路上列车的位置及功率 P_t ，建立直流牵引系统电导矩阵 G 。

(3) 设定各节点电压初值，交流系统节点电压初值设为 $1 \angle 0^\circ$ ，直流系统节点电压设为 1；设定整流机组处于正常运行状态，初始参数， $I_d=0.1$ ， $\mu=0.18$ rad(10°)。

(4) 对 12 脉波整流机组交流侧、直流侧节点，按照式(4)、(5)、(6)、(7)计算偏差项；对 24 脉波整流机组，按照式(9)计算偏差，根据式(8)建立雅可比矩阵。求解方程，得到 ΔU 、 $\Delta \delta$ 以及整流机组的 ΔI_d 、 $\Delta \mu$ 。

(5) 修正节点电压值以及整流机组元件的直流电流和换相重叠角。

(6) 检查是否收敛，如果不收敛，则以各节点电压以及整流机组参数的新值作为初值，返回步骤(3)重新开始执行，否则进入下一步。

(7) 若已到仿真时刻终点，退出仿真；否则，进入下一仿真时刻 $t=t+1$ ，返回步骤(2)。

2.2 高斯-赛德尔法城轨牵引供电计算

整流机组在交流供电系统的迭代中可视为一负荷 $S_p=P_{1pt}+jQ_{1pt}$ ，在直流系统中等效为一带内阻的电压源。采用高斯-赛德尔法求解城轨交直流牵引供电计算的步骤如下：

(1) 在当前仿真时刻 t ，根据运行图和列车牵引计算结果确定线路上列车的位置及功率 P_t 。

(2) 设定所有节点电压的初值和整流机组的直流电流 I_d 和换相重叠角 μ 。

(3) 根据整流机组交流侧电压 U ，换相重叠角

μ , 根据式(1)计算从交流侧看去的整流机组功率 S_p 。

(4) 更新交流系统电压, 电压迭代式如式(10)所示, 其中整流机组交流侧节点的功率由步骤(3)得到。

$$\dot{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{U_i^{(k)}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N Y_{ij} \dot{U}_j^{(k)} \right) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

(5) 更新直流系统电压。整流机组直流侧节点电压可由式(6)得到; 列车节点牵引网电压迭代如式(11)。

$$E_i^{(k+1)} = \frac{1}{G_{ii}} \left(\frac{P_i}{E_i^{(k)}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M G_{ij} E_j^{(k)} \right) \quad (11)$$

(6) 按式(12)计算整流机组直流侧节点 i 的注入电流 I_{di} , 并求解标么值下的式(2)更新整流机组的 μ 值。

$$I_{di} = \sum_{j=1}^M G_{ij} E_j \quad (12)$$

(7) 所有节点电压前一次迭代值与后一次迭代值向量差的模如果小于允许误差 ε , 则进入下一步; 否则重新返回步骤(2)。

(8) 若已到仿真时刻终点, 退出仿真; 否则, 进入下一仿真时刻 $t=t+1$, 返回步骤(2)。

2.3 模型及其算法的比较

计算对比系统为文献[1-2]的 10 节点直流牵引供电系统, 如图 3 所示。Case 1 为文献[2]采用 6 脉波整流机组的计算结果, Case 2 采用 12 脉波整流, 利用本文提出的基于牛顿法求解的交直流统一的牵引供电计算方法进行计算, Case 3 同样采用 12 脉波整流, 利用高斯-赛德尔法迭代求解。计算过程中忽略换相电阻 R_C , 取收敛精度为 $\varepsilon=1 \times 10^{-8}$, 计算结果对比如表 1、表 2、表 3 所示。

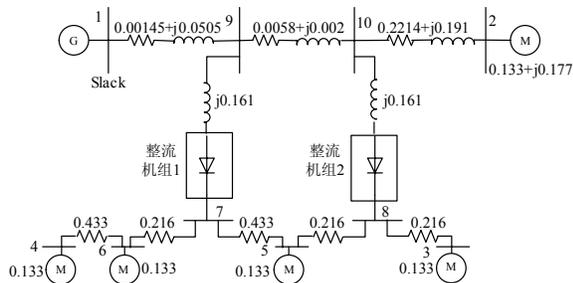


图 3 10 节点直流牵引供电系统

Fig.3 10-node hybrid traction power supply system

表 1 10 节点牵引供电系统电压计算结果

Tab.1 Voltage result of 10-node hybrid traction system

节点	Case 1	Case 2	Case3
1	1∠0°	1∠0°	1∠0°
2	0.909 2∠-1.170°	0.909 5∠-1.159°	0.909 6∠-1.153°
3	0.927 0	0.937 7	0.937 8
4	0.813 4	0.829 8	0.829 8
5	0.935 5	0.947 3	0.947 3
6	0.884 2	0.899 2	0.899 2
7	0.952 0	0.965 7	0.965 8
8	0.958 0	0.968 4	0.968 4
9	0.981 7∠-2.094°	0.981 9∠-2.083°	0.982 0∠-2.078°
10	0.978 9∠-2.058°	0.979 2∠-2.045°	0.979 2∠-2.040°

表 2 10 节点牵引供电系统整流机组计算结果

Tab.2 Rectifier result of 10-node system

	整流机组 1			整流机组 2		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
P_{ac}	0.335 1	0.337 8	0.335 9	0.237 2	0.230 9	0.230 9
Q_{ac}	0.084 3	0.077 7	0.077 3	0.049 8	0.051 5	0.051 5
μ	20.0234°	10.6877°	10.6872°	16.7936°	8.0757°	8.0755°
E_d	0.952 0	0.965 7	0.965 8	0.958 0	0.968 4	0.968 4
I_d	0.352 0	0.350 9	0.350 9	0.247 6	0.239 6	0.239 6

表 3 迭代次数和计算时间

Tab.3 Iteration number and computation time

方法	Case 1	Case 2	Case 3
迭代次数	5	4	280
计算时间/s	0.046	0.033	2.567

从表 1、表 2 可以看出, 本文基于 12 脉波整流机组模型的城市轨道交直流统一的牵引供电计算方法是有效的。采用 12 脉波整流机组整流后, 牵引网电压得到提高。

3 城轨交直流混合潮流计算实例

作者利用 VC.Net2005 开发了城轨牵引供电仿真软件, 选取某新建地铁工程 1 号线供电系统设计方案进行仿真分析和验证, 供电系统结构如图 4 所示。线路一期工程全长 25.20 km, 集中供电, 设 2 座主变电所(BSS), 正线设 8 座牵引降压混合所(TSS), 20 个车站。采用 B 型车, 4 动 2 拖编组, 降压变电所仅考虑一、二级负荷, 功率因素 0.9, 滞后。24 脉波整流机组在潮流计算中简化为 2 组 12 脉波整流机组并联独立运行。牵引网综合阻抗 $0.024 5 \Omega / \text{km}$ 。上行方向列车牵引计算结果如图 5 所示。城轨交直流统一的潮流计算中, 标么值基准取

做 $S_{ac,base}=10 \text{ MVA}$, $U_{ac,base}=110 \text{ kV}$, $E_{dc,base}=1593 \text{ V}$ 。

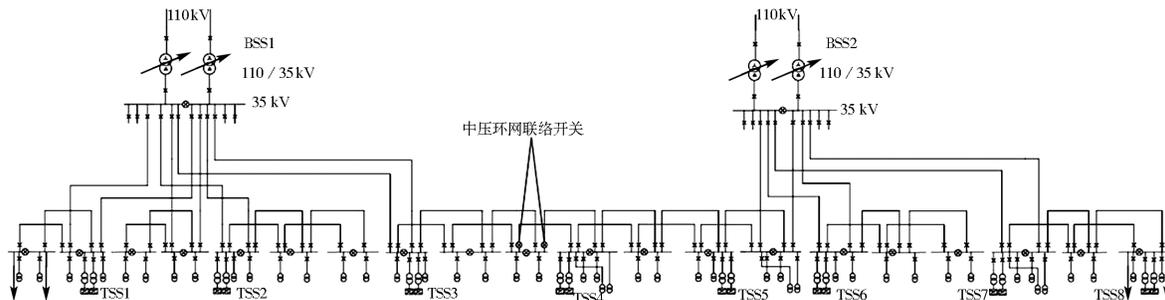


图 4 某地铁工程供电系统结构
Fig.4 Power supply structure of a subway project

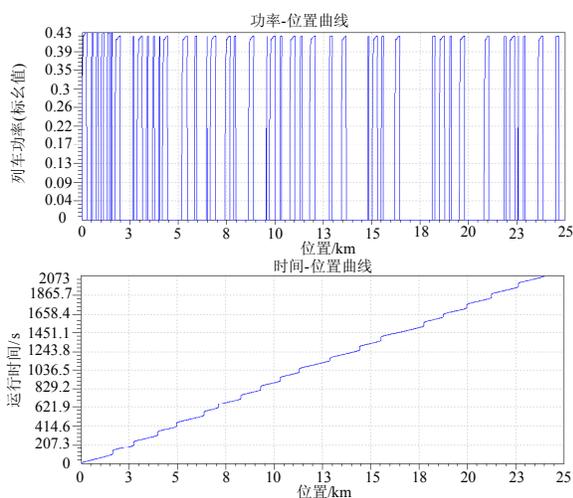


图 5 上行方向, 列车牵引计算结果

Fig.5 Train performance calculation result of up direction

将城轨供电系统接入点(PCC)处视为平衡节点、各进线端系统短路容量设为 2000 MVA。采用本文提出的基于牛顿法的城轨交直流统一的牵引供电计算方法求解, 收敛精度设为 $\epsilon=1 \times 10^{-8}$ 。列车发车间隔 20 对/小时, 直流侧电气拓扑结构呈周期性变化。一个周期 180 s 内牵引网最低电压变化如图 6 所示, 最低牵引网网压 1274 V。主变电所 BSS1 左侧进线有功功率变化曲线见图 7。

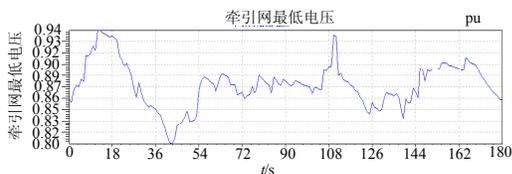


图 6 牵引网最低网压变化

Fig.6 Minimum voltage of traction network

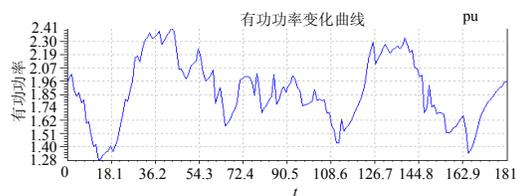


图 7 BSS1 主所左侧进线有功功率变化曲线

Fig.7 Active power curve of BSS1's left side

4 结论

本文建立了基于整流机组模型的城轨交直流统一的牵引供电计算方法, 并采用改进的牛顿法和高斯-赛德尔法进行求解。利用 10 节点交直流牵引供电系统验证了所提方法的正确性。与列车牵引计算结合、根据列车运行图截面法, 采用本文提出的牛顿法求解的城轨交直流统一牵引供电计算方法, 可动态仿真不同牵引负荷下, 城轨牵引供电系统中各节点电气参数变化过程, 从而进一步指导供电系统的分析与设计。

参考文献

- [1] Tylavsky Daniel J. The Newton Raphson Load Flow Applied to AC/DC Systems with Commutation Impedance[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1983, IA-19(6):940-948.
- [2] Tzeng Yii-Shen, CHEN Nan-ming. A Detailed R-L Fed Bridge Converter Model for Power Flow Studies in Industrail[J]. IEEE Trans on Industrial Electronic, 1995, 42(5):531-538.
- [3] Cai Y, Irving M R, Case S H. Modelling and Numerical Solution of Multibrached DC Rail Traction Power Systems[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 1995, 142(5): 323-328.
- [4] Tzeng Yii-Shen, CHEN Nan-ming, Wu Ruay-Nan.

- Modes of Operation in Parallel-connected 12-pulse Uncontrolled Bridge Rectifiers without an Interphase Transformer[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1997, 44(3):344-355.
- [5] Chen C S, Chuang H J, Shiau H M. Stochastic Harmonic Analysis of Mass Rapid Transit Power Systems with Uncontrolled Rectifiers[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(2):224-232.
- [6] 王晓东, 张洪斌. 城市轨道交通直流牵引供电系统的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(12):1692-1697. WANG Xiao-dong, ZHANG Hong-bin. Simulation Study of DC Traction Power Supply System for Urban Rail Transportation[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(12):1692-1697.
- [7] 于松伟, 杨兴山. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008. YU Song-wei, YANG Xing-san. Design Principle and Application for Urban Rail Power System [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2008.
- [8] 刘海东, 何天健, 袁振洲, 等. 城市轨道交通直流牵引供电仿真系统的研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1944-1947. LIU Hai-dong, HE Tian-jian, YUAN Zhen-zhou, et al. Simulation of DC Traction Power for Mass Transit Railway[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9): 1944-1947.
- [9] 刘学军, 于松伟, 刘学. 轨道交通牵引供电仿真模型与算法的研究[J]. 计算机仿真, 2004, 21(12): 213-218. LIU Xue-jun, YU Song-wei, LIU Xue. Model and Algorithm for Traction Power System Simulation of Urban Rail-line[J]. Computer Simulation, 2004, 21(12): 213-218.
- [10] Tzeng Y S, Wu R N, Chen N. Unified AC/DC Power Flow for System Simulation in DC Electrified Transit Railways[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 1995, 142(6):345-354.
- [11] Harris Ken. Jane's World Railways[M]. UK: Jane's Information Group Limited, 2001.
- [12] 毛保华, 何天健. 通用列车运行模拟软件系统研究[J]. 铁道学报, 2000, 22(1):1-6. MAO Bao-hua, HE Tian-jian. A General-purposed Simulation System on Train Movement[J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(1): 1-6.
- [13] 刘炜, 李群湛. 地铁牵引仿真计算中的牵引策略研究[J]. 机车电传动, 2006(1): 46-49. LIU Wei, LI Qun-zhan. Study on Traction Strategy in Simulation Calculations of Metro Tractions[J]. Electric Drive for Locomotive, 2006(1): 46-49.
- [14] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003. WANG Xi-fan. Modern Power System Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [15] Chuang H J. Optimization of Inverter Placement for Mass Rapid Transit Systems by Immune Algorithm[J]. IEE Proceedings on Electric Power Applications, 2005, 152(1): 61-71.

收稿日期: 2009-05-08 修回日期: 2009-06-05

作者简介:

刘 炜 (1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为供电系统仿真与优化; E-mail: liuwei_8208@hotmail.com

李群湛 (1957-), 男, 教授, 工学博士, 博导, 研究方向为牵引供电理论, 电力系统分析, 电能质量与控制等。

(上接第 91 页 continued from page 91)

- [17] 孙克勤, 钟秦. 火电厂烟气脱硝技术及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. SUN Ke-qin, ZHONG Qin. Thermal Power Plant Flue Gas Denitrification Technology and It's Engineering Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [18] 任红松, 叶凯, 等. 投资项目动态盈亏平衡分析及 EXCEL 计算方法[J]. 技术经济与管理研究, 2007(6): 10-11. REN Hong-song, YE Kai, et al. Investment Projects Breakeven Analysis and Dynamic Calculation Method EXCEL[J]. Technical and Economic and Management

Research, 2007(6): 10-11.

收稿日期: 2009-08-27; 修回日期: 2010-03-18

作者简介:

周建国 (1965-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电厂环境技术经济分析与评价、电力工程投资管理分析;

E-mail: dldxzjg@126.com

安园园 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力行业技术经济及管理研究;

段三良 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为烟气脱硫脱硝技术经济评价。