

基于 Gauss-Seidel 法的城市轨道交通直流牵引供电系统稳态短路计算方法

许嘉轩

(轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院),710043,西安//助理工程师)

摘要 城市轨道交通直流牵引供电系统短路电流难以精确求解。基于多折线整流机组外部特性曲线,对 24 脉波整流机组等效模型进行改进。考虑全线牵引所以及过渡电阻,构建等值电路模型,并建立其网孔电流方程。为得到各牵引所整流机组的工作区间和稳态短路电流,提出一种基于 Gauss-Seidel 迭代法的求解算法,并采用 MFC 程序实现。最后选取西安地铁 3 号线部分区间为算例,计算出稳态短路电流,验证了算法的有效性。

关键词 城市轨道交通;直流牵引供电;网孔电流;稳态短路

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.07.029

Steady State Short-circuit Calculation of DC Traction Power Supply System Based on Gauss-Seidel Iteration

XU Jiakuan

Abstract It is difficult to calculate accurately the short-circuit of DC power supply system in urban rail trains. Based on the external characteristic curve of multiple polyline rectifier unit, the 24 pulse rectifier equivalent model is improved. Then, an equivalent circuit model is built and the mesh current equation is formulated considering all of the rectifiers and transition resistance. In order to get the working range and steady short-circuit current of rectifier unit at each traction substation, the algorithm based on Gauss-Seidel iteration is proposed and implemented by MFC program. Finally, some sections on Xi'an Metro Line 3 are taken as the example, the steady state short-circuit current is calculated, and the validity of the algorithm is verified.

Key words urban rail transit; DC traction power supply; mesh current; steady state short-circuit

Author's address State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Information (FSDI), 710043, Xi'an, China

故障时,全线的牵引变电所都向短路点供电,且每个供电分区都可进行单边供电、双边供电或者大双边供电。

文献[1]基于整流机组多折线外特性模型,建立短路模型,并通过迭代方法求解短路电流。文献[2]在建立直流牵引供电系统的简单数学模型后,给出了求解算法和流程图。但模型只考虑了相邻两个牵引所的情况,且电路元件多采用简单模型,使其计算结果不够精确。文献[3]对地铁直流供电系统短路计算模型进行了分析与改进,从整流机组等效模型和拐点电流两方面给出了减小误差的方法,但并未考虑相邻所以及杂散电流收集网的影响。文献[4]采用解析法分析直流供电系统稳态短路,利用网孔电流法进行计算,但该方法对于全线牵引所都正常运行时的短路情况并不适用。文献[5]用迭代法求解短路电流,但并未给出详细的迭代计算过程。

因此,本文利用整流机组多折线模型,分析全线牵引所的影响,并考虑过渡电阻和杂散电流收集网阻抗,建立全线统一的网孔电流模型,并利用 Gauss-Seidel 迭代法解算网络。最后以西安地铁 3 号线部分区间为例,求解正常运行和解列运行情况下的稳态短路电流,验证了算法的有效性。

1 直流牵引供电系统稳态短路模型

1.1 整流机组模型

短路电流的计算和电力系统交流侧电网阻抗参数、牵引变电所分布、牵引变压器参数、整流器参数和外特性及牵引网阻抗等密切相关。

整流机组的负载特性难以精确得出,目前普遍采用的方法是通过建立 6 折线模型来等效 12 脉波整流机组的外特性。

文献[1,6]中详细表述了 12 脉波整流机组直

城市轨道交通牵引供电系统直流侧发生短路

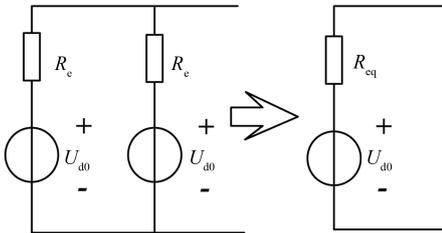
流输出电压调整特性以及各工作区之间的临界点。

然而对于 24 脉波整流机组,若直接采用单台 12 脉波整流器等效其外特性,存在以下问题:

1) 24 脉波整流机组正常运行与单台 12 脉波整流器故障退出运行两种情况下的短路计算结果相同,这显然是不合理的;

2) 误差范围较大,甚至可能超过 50%^[3]。

因此,采用文献[3]中的等效方法,将 2 台 12 脉波整流器并联。由于 2 台 12 脉波整流器的工作状态相同,因此可将其进一步简化,如图 1 所示。



注: U_{d0} ——整流器的理想空载电压; R_e ——整流器等效内阻;
 R_{eq} ——两台整流器并联后牵引所的等效内阻

图 1 外特性等效电路

对于 U_{d0} ,可通过式(1)得到^[4],即:

$$U_{d0} = K_{12} U_2 \quad (1)$$

其中:

U_2 ——整流变压器二次侧线电压额定值;

K_{12} ——空载整流系数,其值与负载电流 I_d 有关,计算方法如式(2)所示^[6-8]。

$$K_{12} = \begin{cases} 1.398 & (I_d < I_{dg}) \\ 1.350 & (I_d > I_{dg}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:

I_{dg} ——整流器负载特性的临界电流,计算公式如式(3)所示。

$$I_{dg} = 0.0259 \frac{U_{2L}}{X_F} \quad (3)$$

式中:

U_{2L} ——整流变压器二次绕组输出线电压有效值, V;

X_F ——轴向双分裂变压器分裂绕组间每相的分裂阻抗, Ω 。

1.2 等值电路

在城市轨道交通直流牵引供电系统中,多个牵引变电所与牵引网共同构成供电网络。图 2 为考虑全线牵引所影响情况下,直流侧某处发生短路故障时的等值电路。

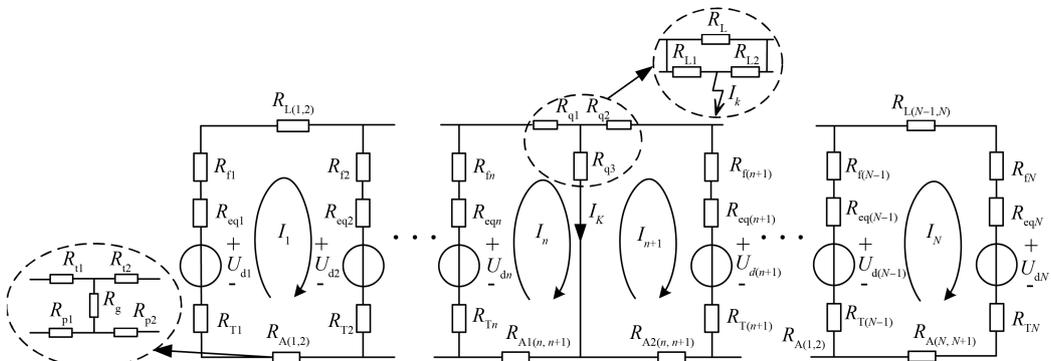
由基尔霍夫电压定律可得:

$$\begin{aligned} & (R_{eqn} + R_{fn} + R_{L(n,n+1)} + R_{eqn+1} + R_{fn+1} + \\ & R_{A(n,n+1)} + R_{Nn+1}) I_n - (R_{eqn} + R_{fn} + R_{Nn}) I_{n-1} - \\ & (R_{eqn+1} + R_{fn+1} + R_{Nn+1}) I_{n+1} = \\ & U_{dn} - U_{dn+1} \end{aligned} \quad (4)$$

令:

$$\begin{cases} R_{(n-1,n)} = - (R_{eqn} + R_{fn} + R_{Nn}) \\ R_{(n,n)} = R_{eqn} + R_{fn} + R_{L(n,n+1)} + R_{eqn+1} + \\ R_{fn+1} + R_{A(n,n+1)} + R_{Nn+1} \\ R_{(n,n+1)} = R_{eqn+1} + R_{fn+1} + R_{Nn+1} \\ U_n = U_{dn} - U_{dn+1} \end{cases} \quad (5)$$

则:



注: U_{dn} 和 R_{eqn} ——分别为第 n 个牵引所等效电压和等效内阻; R_{fn} ——整流机组出口到牵引网之间电缆电阻; R_{fn} ——钢轨与整流机组负极之间的电缆电阻; R_{q1}, R_{q2}, R_{q3} ——短路点左右两边接触网电阻做三-星变换后的等效电阻; $R_{L(n,n+1)}$ ——第 n 个牵引所与第 $n+1$ 个牵引所之间上下两行接触网的并联电阻; R_{fn} , R_{fn} ——钢轨纵向电阻; R_g ——两个牵引所之间钢轨对杂散电流收集网的过渡电阻; R_{p1}, R_{p2} ——杂散电流收集网的纵向电阻,三者可用综合回流电阻 $R_{A(n,n+1)}$ 等效; I_k ——短路点短路电流; R_{L1} ——短路点对侧接触网; R_{L1} ——短路点本侧上行方向接触网电阻; R_{L2} ——短路点本侧下行方向接触网电阻

图 2 稳态短路等值电路

$$\begin{bmatrix} R_{(1,1)} & R_{(1,2)} & 0 & \cdots & 0 \\ R_{(2,1)} & R_{(2,2)} & R_{(2,3)} & \cdots & 0 \\ 0 & R_{(3,2)} & R_{(3,3)} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & R_{(N,N)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

求解式(7)得到网孔电流,则短路电流 I_k 为:

$$I_k = I_n - I_{n+1} \quad (7)$$

同理可求得各牵引所整流机组的负载电流为:

$$I_{di} = I_i - I_{i-1} (i = 1, 2, \dots, N - 1, N) \quad (8)$$

2 求解算法

整流机组工作区间的确定是等值电路解算的前提。文献[2-3]通过提出迭代计算的方法来确定整流机组工作区间,即完成一次等值网络解算后,根据解算结果修正整流机组的工作区间,然后重新解算等值网络,直至得出最终值。该方法需要多次重复解算等值电路,因此并不是最理想的算法。

本文基于 Gauss-Seidel 迭代法^[8-9],提出一种新的求解方法,其步骤如下:

1) 设定最终迭代误差 e ;

2) 令各变电所整流机组负载电流为0,即 $I_{dn}^{(0)} = 0$,则由式(1)可得,整流机组空载电压为 $U_{d0} = 1.398 U_2$;

3) 假设整流机组工作在第一个区间,由图1可知,整流机组等效内阻 $R_{eqn}^{(0)} = 0$;

4) 由式(5)可得回路电阻 $R_{(n-1,n)}^{(k)}$ 、 $R_{(n,n)}^{(k)}$ 、 $R_{(n,n+1)}^{(k)}$ 以及电压 $U_n^{(k)}$ 的值;

5) 由 Gauss-Seidel 迭代法,可求得第 k 次计算结果,即

$$I_n^{(k)} = -\frac{1}{R_{(n,n)}} [R_{(n,n-1)} I_{n-1}^{(k)} + R_{(n,n+1)} I_{n+1}^{(k-1)} - U_n^{(k-1)}] \quad (9)$$

6) 计算迭代误差,即 $e^{(k)} = I_n^{(k)} - I_n^{(k-1)}$,并比较 $e^{(k)}$ 与 e 的大小,若 $e^{(k)} > e$,则转到步骤7),否则,转到步骤10);

7) 计算每个整流机组的负载电流 $I_{dn}^{(k)}$,并根据式(2)计算每个整流机组的理想空载电压 $U_{d0n}^{(k)}$;

8) 由图1可得整流机组的工作区间,并计算出空载电压 $U_{dn}^{(k)}$ 的值,由此可得各牵引所整流机组等效内阻 $R_{eqn}^{(k)}$;

9) 转到步骤4);

10) 由式(7)计算短路点的短路电流,由式(8)计算各牵引所整流机组的负载电流;

11) 输出短路计算结果并结束。

如图3所示,采用 MFC 程序设计实现上述算法,并利用 Excel 作为数据输入输出载体。



图3 MFC 程序设计界面

3 案例分析

为验证前文所述算法的有效性,选取西安地铁3号线吉祥村站—石家街站区段为仿真算例。各项基本参数见表1~3所示。

表1 线路基本参数

参数	取值
系统电压/V	1 500
接触网电阻/(Ω/km)	0.028
钢轨纵向电阻/(Ω/km)	0.026
杂散电流收集网电阻/(Ω/km)	0.094 6
钢轨对杂散电流收集网过渡电阻/($\Omega \cdot \text{km}$)	15

表2 整流机组基本参数

参数	数值
额定功率/(kVA)	3 300
理想空载电压/V	1 649.64
网侧额定电压/kV	35
阀侧额定电压/V	1 180
穿越阻抗百分比/%	8
半穿越阻抗百分比/%	6.5

表3 牵引所区间长度

起点牵引所	终点牵引所	区间长度/km
吉祥村站	大雁塔站	2.836
大雁塔站	青龙寺站	3.062
青龙寺站	咸宁路站	2.667
咸宁路站	通化门站	2.084
通化门站	石家街站	2.363

短路点位于大雁塔站与青龙寺站之间,距离大雁塔站500 m处,且短路发生在接触网与钢轨之间。假设上下行4根钢轨之间通过均流线并联,且全线整流机组一次侧短路容量均为150 MVA。迭代计

算开始前,设置迭代精度为 4A,经过 10 次迭代计算后,得到计算结果,如表 4 所示。此时短路点的稳态短路电流为 55 853 A。

此外,考虑牵引所故障运行情况,即大雁塔站单台整流机组解列运行和大雁塔站牵引所解列形成大双边运行两种情况,其短路计算结果如表 4 所示。

由表 4 可知,正常运行和单台整流机组解列运行两种情况下,大雁塔站牵引所的负载电流差别较大。这是由于单台整流机组解列后,牵引所等效内阻增大的缘故。当牵引所解列形成大双边供电时,等值电路支路减少,待解算的网孔电流也减少,因此迭代次数减少。

表 4 稳态短路电流计算结果比较

牵引所	正常运行			大雁塔站单台整流机组解列			大雁塔站牵引所解列		
	母线电压/V	负载电流/A	整流机组工作区间	母线电压/V	负载电流/A	整流机组工作区间	母线电压/V	负载电流/A	整流机组工作区间
吉祥村站	1 529.64	7 774.33	2	1 529.64	7 774.33	2	1 529.64	7 774.33	2
大雁塔站	979.64	26 443.76	4	1 114.64	11 087.74	3	0	0	
青龙寺站	1 489.64	9 725.24	2	1 489.64	9 725.24	2	1 489.64	9 725.24	2
咸宁路站	1 574.64	5 190.97	1	1 574.64	5 190.97	1	1 574.64	5 190.97	1
通化门站	1 599.64	3 802.47	1	1 599.64	3 802.47	1	1 599.64	3 802.47	1
石家街站	1 614.64	2 915.91	1	1 614.64	2 915.91	1	1 614.64	2 915.91	1
短路点电流		55 853			40 496			29 408	
迭代次数		10			12			7	

4 结论

1) 基于整流机组多折线外特性,考虑杂散电流收集网电阻和钢轨对杂散电流收集网的过渡电阻,并考虑全线牵引所,分析短路故障时的等值电路,建立网孔电流方程组;

2) 提出一种基于 Gauss-Seidel 迭代法的求解算法,仿真对比结果证明算法的可行性;

3) 仿真结果表明,牵引所不同运行方式下,短路电流差别较大,而采用 12 脉波整流器并联模型能够较准确地反映该差别。

参考文献

- [1] 刘炜,李群湛,李良威.基于多折线外特性模型的直流牵引供电系统稳态短路计算[J].机车电传动,2008(1): 61.
 [2] 龚廷志,吴命利.直流牵引供电系统短路稳态电流的计算[J].

电气自动化,2011(6): 48.

- [3] 许成,王慧芳,王晓保.直流牵引供电系统短路计算模型分析[J].电力系统保护与控制,2013(22): 84.
 [4] 张海波,张颖.直流牵引供电系统稳态短路分析[J].城市轨道交通研究,2010(3): 60.
 [5] 黄维军,周密,王滢.直流牵引网稳态短路电流计算[J].电气化铁道,2010(1): 39.
 [6] POZZOBON P. Transient and steady-state short-circuit currents in rectifiers for DC traction supply[J].IEEE Trans on Vehicular Technology,1998(4): 1390.
 [7] 于波,周才发.城市轨道交通整流机组几个参数的分析与计算[J].电气化铁道,2010(6): 48.
 [8] 程光辉.大型稀疏线性代数系统迭代解法研究[D].成都:电子科技大学,2008.
 [9] 刘伟,张来平,赫新,等.基于 Newton/Gauss-Seidel 迭代的 DGM 隐式方法[J].力学学报,2012(4): 792.

(收稿日期:2018-08-03)

(上接第 137 页)

- [5] WANG M J. Application of the queuing theory in characterizing and optimizing the passenger flow at the airport security[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics,2017(9): 1625.
 [6] 张素芳,张喜.北京南火车站客流流线组织优化的动态仿真分析[J].铁路计算机应用,2010(7): 11.
 [7] 杨林正,钟佐夫,章雍.铁路客运站旅客进站流程优化[J].中国铁路,2019(1): 45.
 [8] 戴建强.基于排队论和 AnyLogic 仿真的车站进站排队优化[J].铁路计算机应用,2018(9): 40.
 [9] 谢冰如.大型高速铁路客运站客设设施配置及流线优化仿真研究[D].成都:西南交通大学,2015.

- [10] 秦丽娇.铁路大型客运枢纽站检票设备合理配置方案及评价方法研究[D].北京:北京交通大学,2008.
 [11] 姜耀武.高速铁路车站售票及安检设备数量配置研究[D].长沙:中南大学,2013.
 [12] 广州铁路(集团)公司.广州铁路(集团)公司综合运输能力汇编[R].广州:广州铁路(集团)公司,2016.
 [13] 宫宇姝.大型铁路客运站进站流线优化与仿真研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
 [14] 李得伟,禹丹丹,张彦,等.基于旅客行为微观仿真的大型铁路客运站售票设备配置方案评估研究[J].铁道学报,2013(2): 5.

(收稿日期:2020-02-20)