

城市轨道交通供电多脉波整流机组分段外特性分析

傅晓锋, 康积涛, 刘 文, 刘东霖

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 基于 Matlab/Simulink 仿真和计算分析得到多脉波整流机组的分段外特性曲线, 用得到的分段外特性曲线详细计算得到其戴维宁等效电路, 再用得到的等效电路进行城市轨道交通电路的仿真, 并将结果和原仿真模型得到的结果进行比较, 表明其分析是有效的。

关键词: 多脉波整流机组; 戴维宁等效电路; 分段外特性

Abstract: The segmented external characteristic curve of multi-pulse rectifier unit is obtained by the simulation and calculation analysis based on Matlab/Simulink. With a detailed calculation of the obtained curve, Thevenin's equivalent circuit is constructed, and then the equivalent circuit is used for the simulation of urban track circuit. The results are compared with the results of original model, which shows that the analysis is valid.

Key words: multi-pulse rectifier unit; Thevenin's equivalent circuit; segmented external characteristics

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0074-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.017

0 前 言

地铁等城市轨道交通(以下简称城轨)供电系统的整流机组是其最关键的设备。其中多脉波整流机组(主要有 12 脉波整流和 24 脉波整流)不但实现了交流电源的整流,还使得得到的电能质量能满足于供电系统并减少注入电网的谐波。

然而,多脉波整流机组的详细分析十分复杂,而一般工程计算需要简化分析计算^[1]。基于 Matlab/Simulink 仿真,详细计算分析得到其外特性的分段模型,并进一步得到相应的戴维宁等效模型用于城轨供电仿真,将其与原仿真模型得到的结果进行比较。

1 12 脉波整流机组

1.1 机组构成

12 脉波整流机组由三相桥式整流电路和整流变压器等组成。两个三相桥式整流电路并联构成 12 脉波整流器。整流变压器一般采用轴向双分列式三绕组变压器,其简化结构图如图 1 所示^[2]。

1.2 机组输出电压特性

12 脉波整流机组有如下输出电压调整特性^[3]:

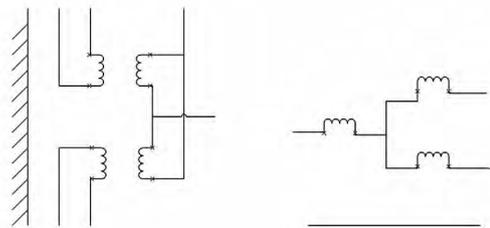


图 1 三相双绕组双分裂变压器简化图

$$RF = \frac{x_c I_d}{U_{d0}} \quad (1)$$

$$U_{d1} = U_{d0} - \frac{3}{2\pi} x_c I_d \quad (2)$$

$$U_{d2} = \frac{\sqrt{2}(\sqrt{3}+1)}{4} \sqrt{U_{d0}^2 - \frac{1}{2-\sqrt{3}} \left(\frac{3}{\pi} x_c I_d\right)^2} \quad (3)$$

$$U_{d3} = \frac{\sqrt{3(1-k)^2+1}}{2-\sqrt{3}k} U_{d0} - \frac{3}{2\pi} \frac{2+\sqrt{3}k}{2-\sqrt{3}k} x_c I_d \quad (4)$$

$$U_{d4} = \frac{\sqrt{3(1-k)}}{2-\sqrt{3}k} \sqrt{U_{d0}^2 - (2+\sqrt{3}k)^2 \left(\frac{3}{2\pi} x_c I_d\right)^2} \quad (5)$$

$$U_{d5.1} = \frac{\sqrt{3(1-k)}(8-3k^2)}{2(2-\sqrt{3}k)\sqrt{3(1-k)^2+1}} U_{d0} - \frac{9}{2\pi} \frac{(1-k^2)(2+\sqrt{3}k)}{2-\sqrt{3}k} x_c I_d \quad (6)$$

$$U_{d5.2} = \frac{\sqrt{3(1-k)}(4-3k)}{2\sqrt{3(1-k)^2+1}} U_{d0} - \frac{9}{2\pi} (1-k^2) x_c I_d \quad (7)$$

式中: RF 为电抗系数; U_{d0} 为理想空载直流电压; I_d

为直流输出电流; x_c 为换相电抗,由交流系统阻抗和变压器阻抗组成。上述区段的电压调整特性因耦合系数 k 的不同而出现不同区段。可以看出,当 k 一定时,输出电压 U_{d1} 、 U_{d3} 、 $U_{d5.1}$ 和 $U_{d5.2}$ 的外特性可表示为直线; U_{d2} 、 U_{d4} 则表现为曲线。此外, $U_{d1} \rightarrow U_{d2}$ 的临界条件为^[4]

$$\frac{x_c I_d}{U_{d0}} = \frac{\pi(2 - \sqrt{3})}{6} \quad (8)$$

$U_{d2} \rightarrow U_{d3}$ 的临界条件为

$$RF = \frac{x_c I_d}{U_{d0}} = \frac{\pi(\sqrt{3}k + 2)}{6(\sqrt{3} + 2)\sqrt{3k^2 - 6k + 4}} \quad (9)$$

$U_{d3} \rightarrow U_{d4}$ 的临界条件为

$$RF = \frac{x_c I_d}{U_{d0}} = \frac{2\pi}{3(\sqrt{3}k + 2)\sqrt{3k^2 - 6k + 4}} \quad (10)$$

$U_{d4} \rightarrow U_{d5.1}$ 的临界条件为

$$RF = \frac{x_c I_d}{U_{d0}} = \frac{\sqrt{3}(2 - k)\pi}{3(\sqrt{3}k + 2)\sqrt{3k^2 - 6k + 4}} \quad (11)$$

$U_{d5.1} \rightarrow U_{d5.2}$ 的临界条件为

$$RF = \frac{x_c I_d}{U_{d0}} = \frac{[4\sqrt{3} + 6 - (3 + 3\sqrt{3})k]\pi}{18(k + 1)\sqrt{3k^2 - 6k + 4}} \quad (12)$$

由上述公式可知外特性曲线比较复杂,因此工程中应用时常将其用分段线性化简化,即将各段曲线/直线的起点和终点连起来,得到的各段直线表达式的截距即是戴维宁等效电路的理想电压源值比上理想空载直流电压 U_{d0} 的值;斜率的绝对值乘以换相电抗 x_c 即得到戴维宁等效电路的内阻。下面将以实例计算分析其计算过程。

1.3 实例计算

若分裂变压器的额定容量 S_k 为 3 450 kVA,系统一次侧短路容量 S_T 为 100 MVA,网侧、阀侧电压 U_1 、 U_2 分别为 35 kV、1 180 V,分裂变压器穿越、半穿越阻抗百分比 $U_k\%$ 、 $U_b\%$ 分别为 8.0%、6.0%,额定直流电压 U_{dN} 为 1 500 V,额定空载直流电压 U_{dN0} 为 1 640 V,理想空载直流电压; $U_{d0} = 1.398 \times U_2 = 1.398 \times 1 180 = 1 649.64$ V,则有:

穿越阻抗为

$$x_k = \frac{U_k\%}{100} \times \frac{U_2^2}{S_T} = \frac{8}{100} \times \frac{1 180^2}{3 450 000} = 0.032 287 5 \Omega;$$

半穿越阻抗为

$$x_b = \frac{U_b\%}{100} \times \frac{U_2^2}{S_T/2} = \frac{6}{100} \times \frac{1 180^2}{3 450 000/2} = 0.048 431 3 \Omega$$

交流系统阻抗为

$$x_s = \frac{U_2^2}{S_k} = \frac{1 180^2}{100 000 000} = 0.013 924 \Omega$$

换相电抗为

$$x_c = x_s + x_b = 0.062 355 3 \Omega$$

双分裂变压器的耦合系数 k 为

$$k = \frac{x_s + 2x_k - x_b}{x_s + x_b}$$

由上述数据求得耦合系数 $k = 0.482 201$;由相

关文献可知,当 $\frac{\sqrt{3}-1}{3} < k < \frac{2}{3}$ 时,最后一个状态区间不会出现,所以将此时的 x_c 、 k 、 U_{d0} 带入式(8)至式(11)编程计算,依次求得:

$I_{d2} = 3 711.65$ A $I_{d3} = 7 834.11$ A $I_{d4} = 14 548.9$ A $I_{d5} = 19 123.9$ A (注:设 $U_{d1} \rightarrow U_{d2}$ 的临界电流标号为 I_{d2}),另起点为空载时,所以 $I_{d1} = 0$;

$RF2 = 0.140 298$ $RF3 = 0.296 124$ $RF4 = 0.549 94$, $RF5 = 0.722 87$ (注:设 $U_{d1} \rightarrow U_{d2}$ 的临界电抗系数标号为 $RF2$) $RF1 = 0$ 。

将得到的 I_{d2} 、 I_{d3} 、 I_{d4} 、 I_{d5} 分别带入式(2)~式(5)编程计算,依次求得

$U_{d2} = 1 539.14$ V $U_{d3} = 1 334.66$ V $U_{d4} = 848.048$ V, $U_{d5} = 261.641$ V 另 $U_{d1} = U_{dN0} = 1 640$ V。可得

$$\frac{U_{d1}}{U_{d0}} = \frac{1 640}{1 649.64} = 0.994 156$$

$$\frac{U_{d2}}{U_{d0}} = \frac{1 539.14}{1 649.64} = 0.933 013$$

$$\frac{U_{d3}}{U_{d0}} = \frac{1 334.66}{1 649.64} = 0.809 059$$

$$\frac{U_{d4}}{U_{d0}} = \frac{848.048}{1 649.64} = 0.514 081$$

$$\frac{U_{d5}}{U_{d0}} = \frac{261.641}{1 649.64} = 0.158 605$$

由上面得到的数据绘制得到如图2所示的12脉波整流机组分段外特性曲线图。

进一步可以得到各段戴维宁等效的内阻:

$$R_{eq1} = |k_1| x_c = \frac{0.994 156 - 0.933 013}{0.140 298 - 0}$$

$$\times 0.062 355 3 = 0.027 1752 \Omega$$

$$R_{eq2} = |k_2| x_c = \frac{0.933 013 - 0.809 059}{0.296 124 - 0.140 298}$$

$$\times 0.062 355 3 = 0.049 601 2 \Omega$$

$$R_{eq3} = |k_3| x_c = \frac{0.809 059 - 0.514 081}{0.549 94 - 0.296 124}$$

$$\times 0.062 355 3 = 0.072 467 8 \Omega$$

$$R_{eq4} = |k_4| x_c = \frac{0.514 081 - 0.158 605}{0.722 87 - 0.549 94}$$

$$\times 0.062 355 3 = 0.128 178 \Omega$$

式中 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为图 2 中各段直线斜率的绝对值,求得 $k_2 = 0.79546$ $k_3 = 1.16218$ 。

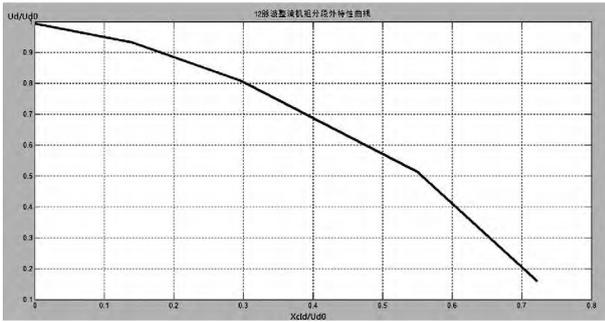


图 2 12 脉波整流机组分段外特性曲线

当上述 12 脉波整流机组工作在第一区时,其戴维宁等效电路的理想电压源电压 $U_{s1} = U_{d0} = 1649.64 \text{ V}$, 其内阻为 $R_{eq1} = 0.0271752 \Omega$ 。

当工作在第二区时,如图 3 所示黑色线段即为其工作区段,两 endpoint 坐标已在前面求出,延长线段两端交至坐标轴上如图细线所示,可求得与纵轴的交点坐标为 $(0, 1.044614)$, 即得截距为 1.044614, 所以得 $U_{s2} = \text{截距} \times 1649.64 = 1.044614 \times 1649.64 = 1723.24 \text{ V}$, 内阻 $R_{eq2} = 0.0496012 \Omega$ 。

当工作在第三区时,如图 4 所示黑色线段即为其工作区段,两 endpoint 坐标已在前面求出,延长线段两端交至坐标轴上如图细线所示,可求得与纵轴的交点坐标为 $(0, 1.153208)$, 即得截距为 1.153208, 所以得 $U_{s3} = \text{截距} \times 1649.64 = 1.153208 \times 1649.64 = 1902.38 \text{ V}$, 内阻 $R_{eq3} = 0.0724678 \Omega$ 。

2 24 脉波整流机组

2.1 机组构成

城轨用 24 脉波整流机组一般由两个相差 15° 的 12 脉波整流机组并联而成,仿真模型如图 5 所示。工程计算上使用时可认为其由 2 个 12 脉波整

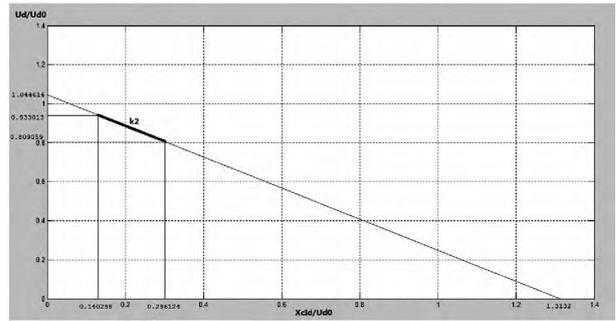


图 3 12 脉波整流机组分段第二区曲线

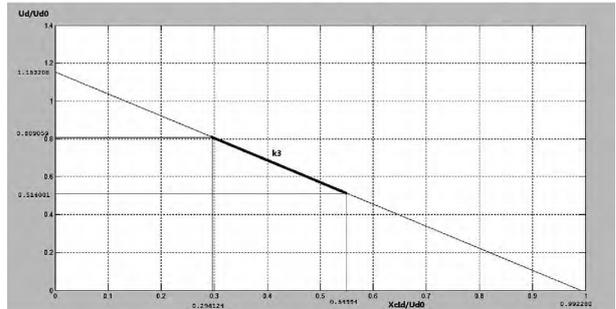


图 4 12 脉波整流机组分段第三区曲线

流电路并联独立工作。

2.2 仿真分析

2.2.1 原 24 脉波整流电路仿真分析

图 5 所示仿真电路中,变压器额定容量 S_k 为 3450 kVA, 系统一次侧短路容量 S_T 为 100 MVA, 网侧、阀侧电压 U_1 、 U_2 分别为 35 kV、1180 V, 整流器参数采用默认设置,连接的 RLC-Load 负载设置为纯 R 负载,其额定电压为 1500 V, 功率为 1.5 MW。

在 Matlab/Simulink 中仿真,结果如图 6 所示,负载电压有效值约为 1546 V, 负载电流有效值约为 1031 A。

2.2.2 24 脉波整流戴维宁等效电路仿真分析

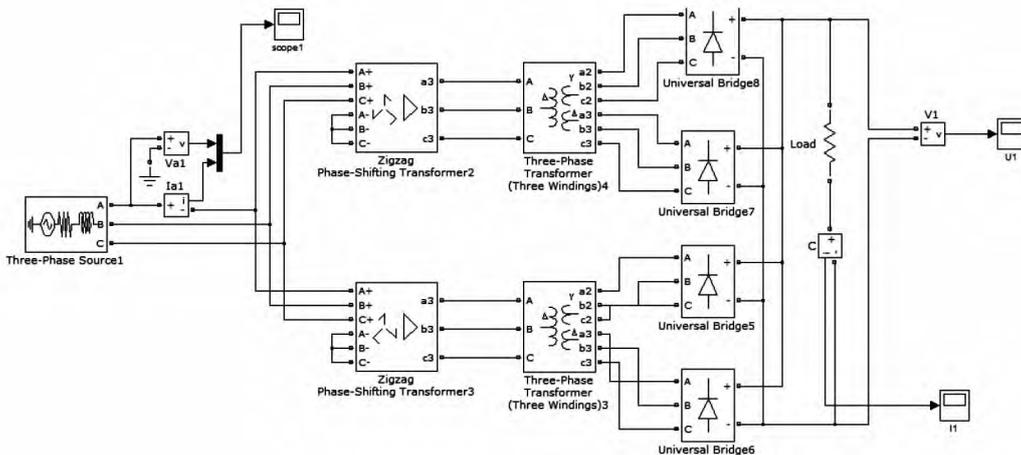
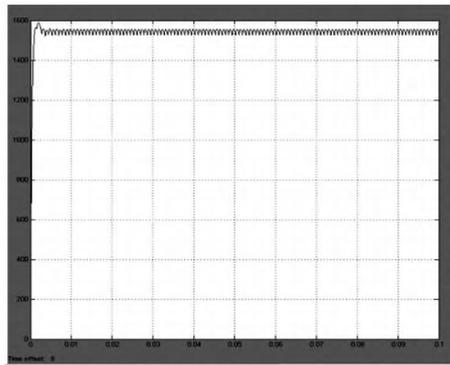
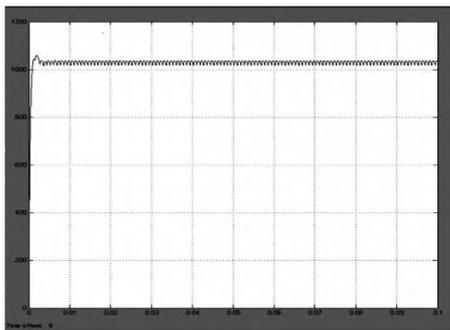


图 5 24 脉波整流电路仿真模型



(a) 负载电压波形图



(b) 负载电流波形图

图 6 24 脉波整流机组负载输出曲线

下面再用 1.3 节中得到的戴维宁等效电路来仿真,以整流器工作在第一个工作区间为例。此时的戴维宁等效电压源和内阻为 $U_{s1} = 1649.64 \text{ V}$ $R_{eq1} = 0.0271752 \Omega$ 根据等效 24 脉波并联叠加的等效原理将两个

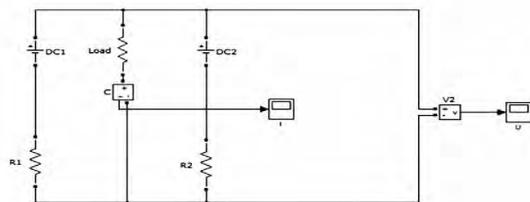


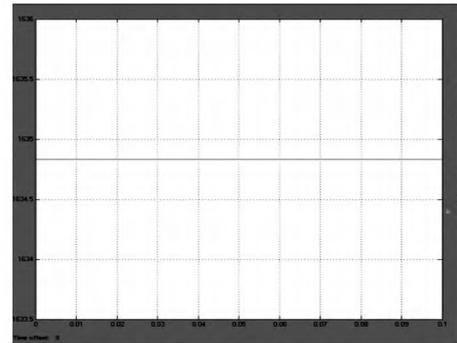
图 7 24 脉波整流电路戴维宁等效电路模型

12 脉波整流戴维宁等效电路并联,从而可以得到如图 7 所示的仿真电路,连接的负载参数同上。仿真结果如图 8 所示,负载电压有效值约为 1635 V,负载电流有效值约为 1090 A。

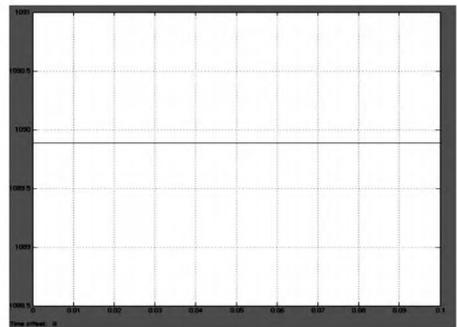
比较两组数据(1546 V, 1031 A)和(1635 V, 1090 A)可以发现简化的 24 脉波整流机组等效模型基本符合预期要求。

3 结 论

多脉波整流机组外特性分析是城轨供电系统的基础分析。从整流机组输出电压公式和各工作区间临界条件出发,详细推导计算了各工作区间对应的戴维宁等效电压源和内阻,并将等效电路应用在仿真模型中(图 7),进一步仿真其工作在第一区间时



(a) 负载电压波形图



(b) 负载电流波形图

图 8 戴维宁等效电路负载输出曲线

负载的电压和电流。同时运用原(非戴维宁等效的)24 脉波整流电路在相同的负载条件下进行仿真(图 5),通过比较两组模型中负载电压和电流的接近性,表明分段外特性的简化应用是符合要求的。

参考文献

- [1] 李良威. 城市轨道交通直流侧短路故障研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [2] 王念同, 魏雪亮. 轴向双分裂式 12 脉波牵引整流变压器均衡电流的分析计算(上)[J]. 变压器, 2000, 37(3): 1-6.
- [3] Pozzobon P. Transient and Steady-state Short-circuit Currents in Rectifiers for DC Traction Supply[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 1998, 47(4): 1390-1404.
- [4] 刘炜. 基于多折线为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): 61-64.

作者简介:

傅晓锋(1989), 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通供电系统;

康积涛(1961), 博士、教授, 研究方向为电力系统无功与电压稳定性、电力变压器原理、轨道交通牵引供电系统仿真计算等;

刘文(1990), 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与并网;

刘东霖(1990), 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与并网。

(收稿日期: 2015-09-07)