

基于 PSCAD/EMTDC 的牵引供电系统仿真模型研究

王 奇, 刘志刚, 白玮莉, 涂福荣

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 在分析了现有牵引供电系统仿真研究的基础上, 针对其模型复杂、不易实现的弊端, 提出采用已有仿真软件实现牵引供电系统的电气特性分析。利用 PSCAD/EMTDC 对牵引供电系统的典型元件进行建模, 分别对 Scott 接线牵引变压器的 AT 供电方式以及 V/v 接线牵引变压器的带回流线的直接供电方式两种应用广泛的牵引供电系统进行了仿真分析, 重点研究了两种供电方式下牵引网的网压水平, 通过比较仿真结果证明所建立的牵引供电系统仿真模型的正确性, 该模型能够满足牵引供电系统的电气分析要求。

关键词: 牵引供电系统; 供电方式; PSCAD/EMTDC; 仿真模型; 网压水平

Research on the simulation model of traction power supply system based on PSCAD/EMTDC

WANG Qi, LIU Zhi-gang, BAI Wei-li, TU Fu-rong

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

Abstract: Based on the analysis to the existing research in the simulation of the traction power supply system, according to its disadvantages of complex model and difficult implementation, this paper puts forward analysis method of electrical specification of the traction power supply system based on existing simulation software. The typical element models of the traction power supply system are built by the PSCAD/EMTDC, the AT power supply mode with Scott transformer and DN power supply mode with V/v transformer are simulated and analysed, and the catenary voltage level is mainly studied. Finally, the validity of the model is proved by comparing the simulation results. The model built in the paper can satisfy the request of electrical analysis of the traction power supply system.

This work is jointly supported by the Fok Ying Tung Education Foundation (No. 101060) and the Science Fund for Distinguished Young Scholar of Sichuan (No. 07ZQ026-012).

Key words: traction power supply system; power supply mode; PSCAD/EMTDC; simulation model; catenary voltage level

中图分类号: TM77; U223 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)16-0035-06

0 引言

电气化铁路以其高效、节能和环保等特点被认为是目前最为理想的交通运输方式, 同时它也成为我国铁路“十一五”规划的重点项目。牵引供电系统是电气化铁路中的重要组成部分, 它将电力系统的电能传递给电力机车, 使其完成牵引运行。由于电力机车的单相取流, 使得牵引供电系统不同于一般的三相电力系统, 它是一个单相的不对称系统, 通过特殊的电气元件实现三相向单相的转换。牵引供电系统由于其供电方式的多样性以及其自身结构的特殊性使得系统分析的复杂程度较高, 进而导致

设计难度增大且精度降低。通过对牵引供电系统的数学建模^[1-3]能够较为准确地对其进行分析计算, 但需要通过编程语言来实现, 增大了操作的难度。文献[4,5]对目前牵引供电系统的仿真模型进行了总结分析, 从中可以看出仿真分析的主流依然倾向于通过数学模型编程实现。文献[6]利用 Matlab/Simulink 建立了 AT 牵引供电系统的仿真模型, 但其模型不够完善, 不能直观表现出牵引供电系统的所有特性。如何通过现有软件建立较为精确实用的牵引供电系统仿真模型已经成为铁路研究领域的重要课题。

PSCAD/EMTDC 是目前应用最为广泛的电磁暂态仿真程序, 其在电力系统暂态分析、故障分析以及谐波分析等领域发挥了重要作用。本文利用 PSCAD/EMTDC 丰富的模型库建立牵引供电系统仿真

基金项目: 霍英东高等院校青年教师基金(101060); 四川省杰出青年基金(07ZQ026-012)

模型, 分别对 AT 方式和带回流线的直接供电方式两种牵引供电系统进行了仿真分析, 通过比较仿真结果与理论数据, 验证所建立的系统仿真模型的正确性。

1 牵引供电系统

牵引供电系统由外部电源、牵引变电所、接触网和电力机车等组成^[7]。其结构如图 1 所示。

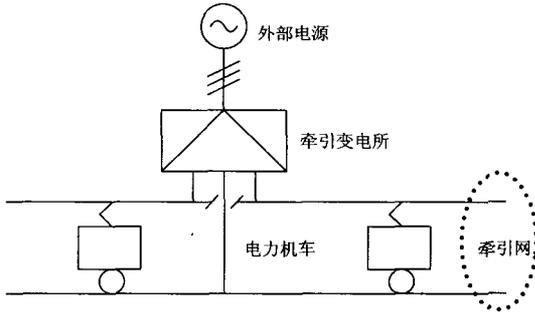


图 1 牵引供电系统结构

Fig.1 Structure of traction power supply system

外部电源是电气化铁路的能量来源, 它负责向电气化铁路提供高压电源, 其电压等级为 110 kV 或 220 kV。目前, 我国电气化铁路大多接入 110 kV 电网, 而高速客运专线则接入 220 kV 电网。

牵引变电所的作用是将电力系统供应的电能转变为适合于电力机车的电能, 即将外部电源 110 kV 或 220 kV 电压变为牵引网上的额定 27.5 kV 或 55 kV 电压。牵引变电所中的核心元件是牵引变压器, 牵引变压器的类型很多, 如 YND11 接线牵引变压器、单相牵引变压器、V/v 接线牵引变压器、Scott 平衡变压器以及阻抗匹配平衡型牵引变压器等, 上述类型的变压器在我国铁路中都有应用, 但就今后发展趋势看, V/v 接线变压器和 Scott 平衡变压器将逐步取代其他类型变压器成为主流牵引变压器。

牵引网由馈电线、接触线、承力索、钢轨、回流线等组成, 这些部分共同组成牵引供电回路, 统称为悬挂系统。悬挂系统沿铁路线布置, 将电能传递给运行中的电力机车。悬挂系统是一个复杂性高, 不确定因素多的综合性系统, 而其又是牵引供电系统分析中的重要部分, 因此对其正确等效与化简至关重要, 文献[2,7]在这方面做了详细论述, 后面的模型等效将基于文献中的理论进行。

除了以上组成部分外, 牵引供电系统的另一个重要部分是其供电方式, 分为直接供电方式、带回流线的直接供电方式、BT 供电方式、AT 供电方式等。目前在国内应用普遍的有带回流线的直接供电

方式和 AT 供电方式, 二者原理如图 2 所示。

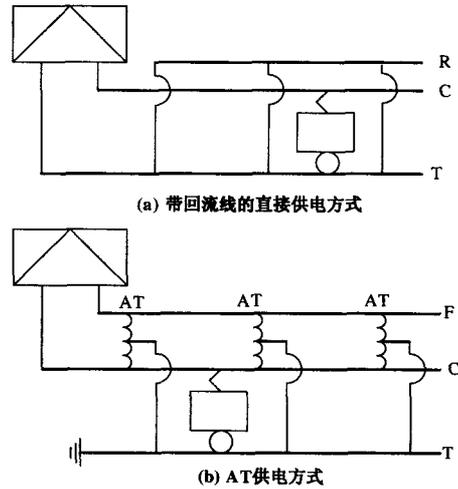


图 2 供电方式原理图

Fig.2 Schematic diagram of the power supply mode

2 系统元件仿真模型

2.1 外部电源模型

外部电源为电气化铁路提供所需的电能, 它是保证电气化铁路正常运行的先决条件。本文仿真模型采用带有序阻抗的三相电压源作为电力系统电源, 为牵引负荷提供 110 kV 或 220 kV 电压, 模型如图 3 所示。

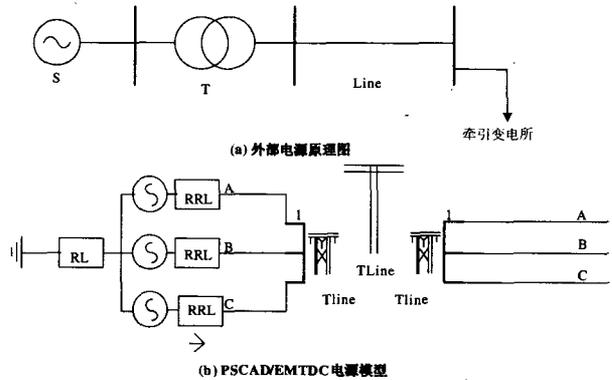


图 3 外部电源模型

Fig.3 The model of exterior power supply

由于所研究的对象重点是牵引系统电气量, 对外部电源只作简单建模, 升压变压器等不影响后续研究的部分略去。对于电压源的额定电压, 考虑输电线路的电压降一般为 10% 且用电设备允许电压偏差为 ±5%, 故始端电压源的额定电压应设为线路额定电压的 105%。

2.2 牵引变压器模型

牵引变压器是牵引变电所的核心元件, 是整个系统中保证电压转换的重要元件, 对其建模的准确性直接影响对牵引网电压及轨道电位的研究, 文中只对 Scott 和 V/v 接线变压器进行了仿真模型研究。

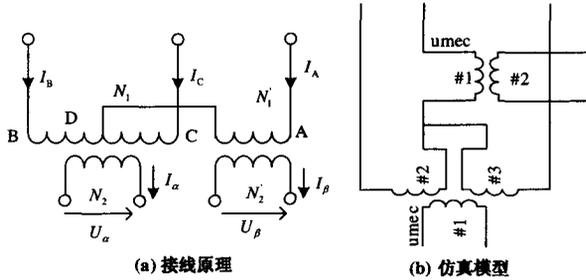


图 4 Scott 变压器原理及模型

Fig.4 Principle and model of the Scott transformer

Scott 接线变压器原理如图 4 (a) 所示, 其绕组匝数及电气量关系如下:

$$\frac{N_1'}{N_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1)$$

$$\frac{N_2'}{N_2} = 1 \quad (2)$$

$$U_\alpha = j \frac{N_2}{N_1} U_{AB} \angle -30^\circ \quad (3)$$

$$U_\beta = -\frac{N_2'}{N_1'} \frac{\sqrt{3}}{2} U_{AB} \angle -30^\circ \quad (4)$$

$$I_A = -\frac{N_2'}{N_1'} I_\beta = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} I_\beta \quad (5)$$

$$I_B = -\frac{I_A}{2} + \frac{N_2}{N_1} I_\alpha = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_\beta + I_\alpha \right) \quad (6)$$

$$I_C = -\frac{I_A}{2} - \frac{N_2}{N_1} I_\alpha = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_\beta - I_\alpha \right) \quad (7)$$

利用 PSCAD/EMTDC 中的单相双绕组和三绕组变压器组合成为 Scott 接线变压器, 如图 4 (b) 所示。由于双绕组变压器与三绕组变压器分别向牵引网的两臂供电, 故设置二者容量分别为牵引变压器容量的一半, 按照上述公式, 设置两个变压器的变比使其满足 Scott 接线变压器的电气特性, 变压器漏抗由变压器短路阻抗百分比求得。

V/v 接线与自耦变压器相对于 Scott 接线要简单的多, 利用两个单相双绕组变压器并联组成 V/v 接线变压器。将单相变压器原次边绕组串联并抽出形成 AT 自耦变压器, 二者原理及仿真模型如图 5 所示。

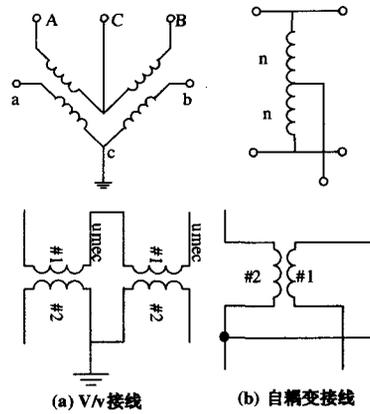


图 5 变压器原理及仿真模型

Fig.5 Principle and model of the transformer

2.3 悬挂系统模型

牵引网悬挂系统是一个结构复杂, 涉及方面广泛的综合性系统, 是整个仿真建模的重要部分, 对其进行合理的化简和等效, 是必要的和可行的。基于上述原因, 在对悬挂系统建模过程中进行了一定的等效与化简, 相关理论参考文献[7]。

牵引网悬挂系统各导线位置关系如图 6 所示, 图中数据均为施工常用典型数据。

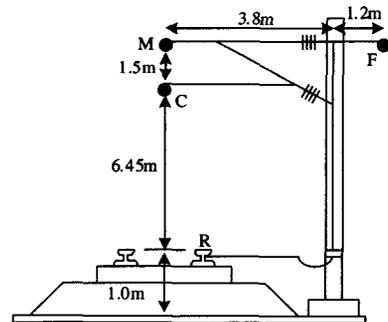


图 6 牵引网悬挂系统

Fig.6 Catenary system

考虑在不影响研究对象电气量特性的条件下, 对承力索 (M)、接触线 (C)、正馈线 (F) 以及钢轨 (R) 进行化简和等效。两条钢轨对称分布, 将其等效为处于二者中间的单根导体, 承力索与接触线共同传递电流, 但大部分电流集中在接触线传递, 由于接触线呈之字形布置, 其与承力索位置较为复杂, 不易计算, 故将二者等效为一根导体且平行于钢轨与正馈线。最终系统等效为相互平行的三条导体。根据多导体电力传输线理论以及各条导线的参数, 可以计算得到下列数据:

各导体单位自阻抗与互阻抗数值如下:

$$Z_C = 0.119 + j0.752 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_F = 0.204 + j0.885 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_R = 0.162 + j0.671 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_{CR} = 0.057 + j0.388 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_{CF} = 0.057 + j0.395 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_{RF} = 0.057 + j0.341 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$C'_{CF} = 0.000504 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$$

$$C'_{CR} = 0.002057 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$$

$$C'_{FR} = 0.003262 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$$

将线路间互阻抗分别归算到相应导线上，求出电抗相应的电感值，利用 PSCAD/EMTDC 对线路建立 T 形等效模型，如图 7 所示，扩展单位长度等效模型即可得到任意长度线路模型。

忽略掉钢轨对地电容，将各导体的自电容和互电容等效后，归算得到导体的线间电容为：

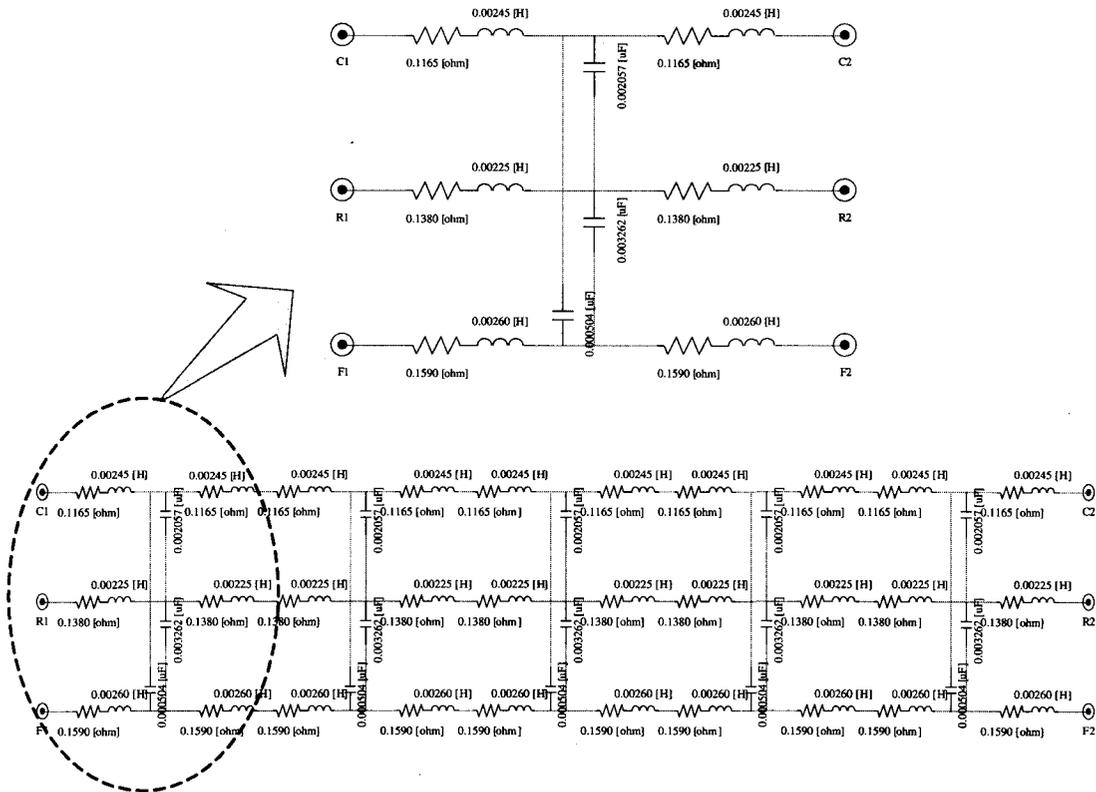


图 7 线路仿真模型

Fig.7 Simulation model of the line

2.4 电力机车模型

本文对电力机车的仿真模型考虑较为简单，并未考虑其谐波影响。已有文献中对于电力机车的等效基本采取将其看成恒阻抗源或恒流源的做法，但这两种等效都存在一定的不合理性。机车在其不同运行状态所表现出来的电气特性不同，不过在每种状态机车的功率基本保持恒定，因此，将机车等效为一个恒功率源更符合实际情况。本文仿真模型采用电流源并联阻抗电路为恒功率模型，调整电流及阻抗值保证机车端电压以及机车取流乘积保持恒定，即机车功率恒定。

3 系统仿真分析

利用前面的系统元件仿真模型组建两种不同方式的牵引供电系统模型，分别对 Scott 接线牵引变压器的 AT 供电方式以及 V/v 接线牵引变压器的带回流线的直接供电方式进行了仿真分析。

对单线铁路的一个供电区间进行了建模和仿真，牵引网长度为左臂 30 km、右臂 20 km。仿真系统参数如表 1 所示，AT 供电方式的牵引供电系统仿真模型如图 8 所示，直接供电方式相对于 AT 方式牵引网的连接要简单的多，这里不再给出直接供

电方式的系统仿真模型。

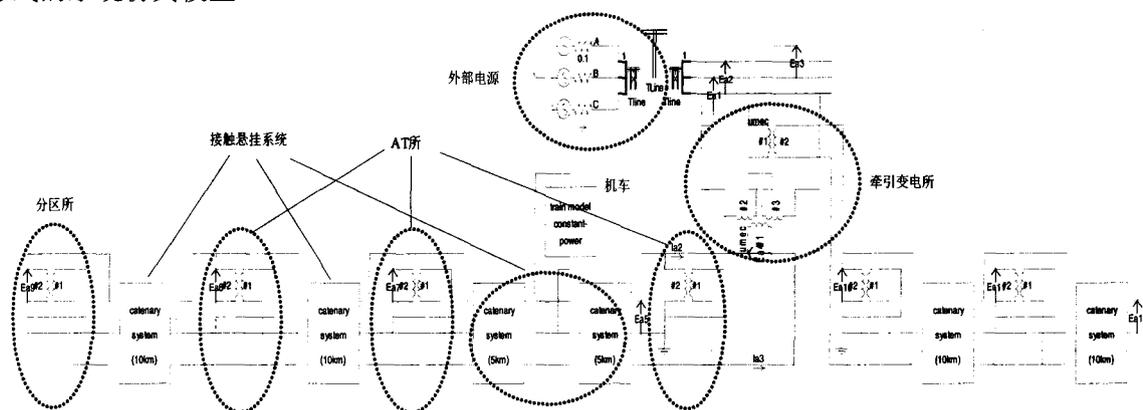


图 8 系统仿真模型

Fig.8 Simulation model of the system

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

参数名称	参数取值
110 系统	
系统容量/MVA	100
额定电压/kV	110×1.05
输电线长度/km	10
容量/MVA	50
Scott 变压器	
短路阻抗/(%)	10.5
变比	110/55
容量/MVA	25+20
V/v 变压器	
短路阻抗/(%)	8.4
变比	110/27.5
自耦变压器	
容量/MVA	5
变比	55/27.5
电力机车	
功率/MW	10
功率因数	0.98

表 2 AT 供电方式下的网压分布及电流值

Tab.2 Catenary voltage distribution and current value of the AT mode

机车位置/km	机车取流/kA	机车变压器端电压/kV	牵引网(左臂)电压分布/kV						
			0	5	10	15	20	25	30
0	0.365	55.41	27.38	28.19	28.94	29.37	29.74	29.91	30.02
5	0.386	54.92	27.14	25.96	27.58	28.09	28.55	28.72	28.83
10	0.382	54.72	27.27	26.72	26.24	26.83	27.37	27.55	27.66
15	0.420	54.33	27.09	26.36	25.67	23.81	25.36	25.64	25.86
20	0.409	54.41	27.16	26.62	26.08	25.26	24.51	24.85	25.14
25	0.496	53.68	26.79	25.78	24.79	23.57	22.45	20.20	21.54
30	0.473	53.86	26.89	26.01	25.16	24.20	23.29	22.13	21.15

AT 方式下, 机车运行在 15 km 处时, 整个牵引网的电压变化如图 9 所示, 与文献[8,9]中理论计算结果较为接近, 且更加符合实际情况, 证明机车运行在线路中间时, 模型中牵引网所表现出来的电气特性符合要求。

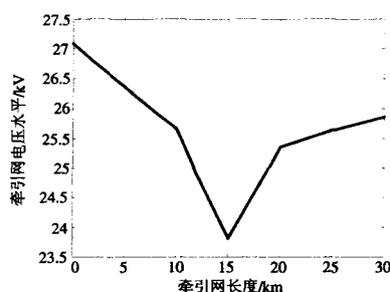


图 9 牵引网电压分布曲线

Fig.9 Curve of the catenary voltage distribution

机车分别在左臂和右臂时, 牵引网所表现出来的特性基本一致, 相互间的影响很小。这与 Scott 接线牵引变压器的 M 座绕组垂直于 T 座绕组, 即两臂电压垂直, 相互间没有影响相吻合。本文仅讨论机车运行在左臂的情况。

改变机车位置即可得到机车运行在牵引网各个位置时整个牵引网的电压分布情况, 此外机车从牵引网的取流、回流线电流、轨道电位等信息都可以方便获得。AT 方式下的牵引网仿真结果如表 2 所示, 从表 2 中可以看出, 机车距离牵引变电所越远时, 整个牵引网的电压水平越低。牵引变压器端口电压也随着机车位置的变化而变化, 当机车远离牵引变电所时, 总体呈现下降的趋势, 机车取流总体呈现上升趋势。上述电气量的变化特性与实际牵引网的特性基本一致。

机车运行在不同位置时的机车端电压的变化情况如图 10 所示, 从图中可以看出机车端电压总体呈现下降趋势, 但在每个 AT 段中端电压的变化呈现非线性变化, 即机车靠近自耦变压器时的端电压较

机车处于 AT 段中时要大。将图 10 的 AT 方式下的机车端电压变化曲线与文献[8,9]中的理论值进行对比,可以看出仿真结果与理论值相一致,且更加符合实际情况,证明了整个牵引网仿真模型的正确性。

表 3 带回流线的直接供电方式下网压分布及电流值

Tab.3 Catenary voltage distribution and current value of the DN mode

机车位置/km	机车取流/kA	回流线电流/kA	牵引网(左臂)电压分布/kV						
			0	5	10	15	20	25	30
0	0.368	0.031	27.30	28.03	28.64	29.11	29.46	29.66	29.73
5	0.375	0.177	27.19	26.75	27.33	27.78	28.10	28.30	28.37
10	0.403	0.188	27.06	25.64	24.94	25.35	25.65	25.83	25.94
15	0.441	0.205	26.95	24.71	23.31	22.94	23.21	23.37	23.43
20	0.490	0.228	26.80	23.41	21.01	20.00	20.59	20.74	20.79
25	0.518	0.234	26.65	22.54	19.42	17.25	18.60	19.51	20.52
30	0.543	0.246	26.50	21.39	16.84	13.55	12.63	14.57	18.67

带回流线的直接供电方式下的牵引网仿真结果如表 3 所示,从结果中可以看出其牵引网压分布与 AT 供电方式下基本一致。机车在整条线路中运行时的端电压变化如图 10 所示,从图中可以看出,带回流线的直接供电方式下的牵引网网压水平仅仅在距离牵引变电所较近的一段要好于 AT 方式,整个牵引网的大部分区段其网压水平要比 AT 方式差,且在牵引网末端机车端电压已经不能满足机车受电弓的最低工作电压,这也证明了实际情况中直接供电方式的线路长度要比 AT 方式的线路短的多。

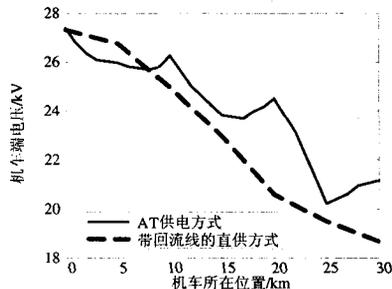


图 10 机车端电压变化曲线

Fig.10 Curves of the voltage change on the train

表 4 牵引网空载电压分布

Tab.4 No-load voltage distribution of the traction network

供电方式	牵引网空载电压分布/kV						
	0	5	10	15	20	25	30
AT	28.03	28.71	29.31	29.75	30.12	30.29	30.39
直供	27.33	28.07	28.67	29.15	29.49	29.69	29.76

牵引网空载时,网压分布如表 4 所示。由表 4 可知,带回流线的直接供电方式的空载网压水平也

是明显低于 AT 方式的网压水平。

当有两台机车同时运行在左臂时牵引网的电压分布如表 5 所示,从表 5 中可以看出,两台机车追踪距离为 5 km 且靠近牵引变电所运行时,牵引网的网压水平较好。当两台机车追踪距离 10 km 且一台机车靠近牵引网末端时,牵引网的网压水平明显下降,若机车在牵引网末端时,网压水平可能达不到要求。机车追踪距离为 30 km,网压水平较好,满足机车端电压要求。

表 5 AT 方式下双机车运行时牵引网压分布

Tab.5 Voltage distribution of the traction network with double trains in the AT mode

机车 1 位置/km	机车 2 位置/km	牵引网电压分布/kV						
		0	5	10	15	20	25	30
0	5	27.44	27.33	28.34	28.78	29.16	29.33	29.42
5	10	27.12	26.53	25.77	26.33	26.84	27.01	27.11
10	20	26.22	24.41	23.11	22.66	22.29	22.51	22.71
10	30	25.70	23.29	21.51	20.48	19.51	18.45	17.77
0	30	27.08	26.85	26.59	26.22	25.87	25.38	25.00

4 结论

本文利用 PSCAD/EMTDC 建立了典型牵引供电系统模型,分别对 AT 方式和带回流线的直接供电方式的牵引供电系统进行了仿真分析,通过比较仿真结果与文献[8,9]的理论计算结果,说明了所建立的模型的正确性。通过比较两种供电方式的仿真结果,对二者的网压水平进行了分析比较,验证了 AT 方式网压水平优于直接供电方式网压水平。本文所建立的仿真模型灵活多变,参数设置方便,对于牵引供电系统的设计和分析以及行车组织的安排能够起到一定的指导作用。

参考文献

[1] 李群湛. 牵引变电所电气量的通用变换方法及其应用[J]. 铁道学报, 1994, 16(1): 17-23.
LI Qun-zhan. A Generalized Transforming Method for Electrical Values in AC Traction Substations and Its Applications[J]. Journal of the China Railway Society, 1994, 16(1): 17-23.

[2] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.

[3] 张丽, 李群湛. 牵引供电系统三相模型及其序网[J]. 电气化铁道, 2006, (Z1): 161-164.
ZHANG Li, LI Qun-zhan. Three-phase and Sequence Network of Traction Power Supply System[J]. Electric Railway, 2006, (Z1): 161-164.

(下转第 45 页 continued on page 45)

- Industrial Construal, 2005, 35(4): 55-59.
- [13] 吕小青,曹彪,曾敏,等. 确定延迟时间互信息法的一种算法[J]. 计算物理, 2006,23(2):184-188.
Lü Xiao-qing, CAO Biao, ZENG Min, et al. An Algorithm of Selecting Delay Time in the Mutual Information Method[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2006,23(2):184-188.
- [14] Fraser A M, Swinney H I. Independent Coordinates for Strange Attractors from Mutual Information[J]. Phys Rev A, 1986,33:1134-1140.
- [15] 陈铿,韩伯棠. 混沌时间序列分析中的相空间重构技术综述[J]. 计算机科学, 2005,32(4): 67-70.
CHEN Keng, HAN Bo-tang. A Survey of State Space Reconstruction of Chaotic Time Series Analysis[J]. Computer Science, 2005,32(4): 67-70.
- [16] Rosenstein M T, Collins J J, de Luca Carlo J. Reconstruction Expansion as a Geometry-based Framework for Choosing Proper Delay Times[J]. Physics D, 1994,73:82-98.
- [17] 陆振波,蔡志明,姜可宇. 基于改进的 C-C 方法的相空间重构参数选择[J]. 系统仿真学报, 2007,19(11): 2527-2529.
LU Zhen-bo, CAI Zhi-ming, JIANG Ke-yu. Determination of Embedding Parameters for Phase Space Reconstruction Based on Improved C-C Method[J]. Journal of System Simulation, 2007,19(11):2527-2529.
- [18] Eckmann J P, Ruelle D. Fundamental Limitations for Estimation Dimensions and Lyapunov Exponents in Dynamical Systems[J]. Physica D, 1992, 56: 185-187
- [19] Kennel M, Brown R, Abarbanel H. Determining Embedding Dimension for Phase-space Reconstruction Using a Geometrical Construction[J]. Phys Rev A, 1992,45(6): 3403-3406
- [20] 任晓华,蔡述明,任宪友. 奇异值分解法在湖北省农业土地利用时空变化研究中的应用[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2004,38(4):516-518.
REN Xiao-hua, CAI Shu-ming, REN Xian-you. Application of Singular Value Decomposition in Investigation of Land Use in Hubei Province[J]. Journal of Central China Normal University(Natural Sciences), 2004,38(4):516-518.
- [21] 雷绍兰, 孙才新, 周淦等. 电力短期负荷的多嵌入维一阶局域预测[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 45-49.
LEI Shao-lan, SUN Cai-xin, ZHOU Quan, et al. Short-term Load Forecasting Using One-rank Local-region Method in Multi-Dimension Embedding Phase Space[J]. Power System Technology, 2005,29(13): 45-49.
- [22] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the Strangeness of Strange Attractors[J]. Physica D, 1983,9: 189-208.

收稿日期: 2008-09-01; 修回日期: 2008-11-26

作者简介:

陈敏(1978-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事神经网络、混沌时间序列、数据挖掘等研究。E-mail: milechen@163.com

(上接第 40 页 continued from page 40)

- [4] 万庆祝, 陈建业, 王赞基. 电气化铁道系统计算机仿真的研究进展[J]. 机车电传动, 2006, (3): 1-5.
WAN Qing-zhu, CHEN Jian-ye, WANG Zan-ji. Progresses on Study of Computer Simulation for Electrified Railway Systems[J]. Electric Drive for Locomotives, 2006, (5): 2-5.
- [5] 何天健, 池云莉, 邵乐基, 等. 电气化铁道动力供电系统模拟[J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(3): 93-107.
HE Tian-jian, CHI Yun-li, SHAO Le-ji, et al. Traction Power System Simulation in Electrified Railways[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2005, 5(3): 93-107.
- [6] XIE Shao-feng. Study on Methods to Reducing Rail Potential of High-Speed Railway[A]. in: Proceedings of 32nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society[C]. France: 006.
- [7] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [8] SI Pao-hsiang, CHEN Shi-lin, LI Ray-jong. Simulating On-line Dynamic Voltages of Multiple Trains Under Real Operating Conditions for AC Railways[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 452-459.
- [9] 何正友, 方雷, 郭东, 等. 基于 AT 等值电路的牵引网潮流计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(1): 1-7.
HE Zheng-you, FANG Lei, GUO Dong, et al. Algorithm for Power Flow of Electric Traction Network Based on Equivalent Circuit of AT-Fed System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(1): 1-7.

收稿日期: 2008-09-25

作者简介:

王奇(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为铁道电气化及牵引供电系统分析; E-mail: kongling435@qq.com

刘志刚(1975-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代信号处理技术及其在电力系统中的应用、轨道交通电气化自动化技术;

白玮莉(1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为 HHT 及其在电力系统中的应用。