

牵引负荷负序电流对电网运行状况影响研究

刘乾勇^{1,2}, 李欣然¹, 肖 聪³, 李金鑫⁴

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南省电力公司邵阳电业局, 湖南 邵阳 422000; 3. 湖南省电力公司益阳电业局, 湖南 益阳 413000; 4. 合肥供电公司, 安徽 合肥 230002)

摘要:牵引负荷是大功率单相整流负荷,是一个典型的负序谐波源,投入电网会产生深远影响。利用电力系统分析综合程序(power system analysis software package, PSASP)的用户自定义(User Design, UD)模型功能实现将一种牵引负荷负序电流源模型接入电网,以 EPRI-36 节点为网络背景进行谐波仿真计算,通过对不同牵引负荷水平下的仿真,定量的分析电气化铁路牵引负荷对发电机、变压器、线路、继电保护等方面的影响,并得出相关结论。

关键词:牵引负荷; 负序电流; PSASP/UD; 谐波仿真

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1003-3076(2013)04-0007-04

1 引言

目前,电气化铁路已经发展为重要的交通方式,给国民经济和社会发展带来了巨大的效益。但也暴露出一些问题和弊端。电力机车是大功率单相整流负荷,且具有复杂多变的运行状态和很大的随机性,投入电网运行会产生大量的负序电流和谐波电流,通过牵引变电站注入电力系统,影响旋转电机和变压器的出力、降低线路的输电能力、干扰继电保护的正常动作、引起电网三相不对称、电压波形的畸变以及功率因数降低等现象,对电网的电能质量、电气设备及电力系统的稳定安全经济运行造成了一定的危害^[1-4]。

因此,系统地分析电气化铁路牵引负荷对电网运行状况的影响,确保在电气化铁路牵引负荷影响下电网安全、稳定、经济运行和电网的电能质量具有迫切的现实工程意义。本文利用 PSASP/UD 功能实现将牵引负荷负序电流源模型与 PSASP 谐波计算相连接,以 EPRI-36 节点为例,对不同牵引负荷水平下的仿真计算,定量的分析电气化铁路牵引负荷负序电流对电网运行状况的影响。

2 负序电流源模型介绍

文献[5]中的负序电流源模型从能量的角度出发,整个牵引系统的全部功率来自网侧供电系统提供的基波功率。电力机车作为单相不对称负载将导致三相供电系统不平衡,而供电系统供给机车的功率可视为正序功率,机车运行于不同的牵引工况时,反应到网侧对应的就是牵引网与供电系统交换的基波正序有功及无功功率。提出用机车与网侧供电系统交换的三相基波正序功率作为模型的激励,负序电流的实部、虚部作为响应,用以评价牵引负荷的负序电流特性。模型结构为:

$$\begin{aligned} I^- = F(P, Q, C) = & C_1 + C_2P + C_3P^2 + C_4P^3 + \\ & C_5P^4 + C_6P^5 + C_7Q + C_8Q^2 + C_9Q^3 + \\ & C_{10}Q^4 + C_{11}Q^5 \end{aligned}$$

(1)

式中, I^- 为负序电流向量的实部或虚部; P 、 Q 为机车与供电系统交换的基波正序有功及无功功率; $C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ \cdots \ C_{11}]$ 为模型参数向量, $C_1 \sim C_{11}$ 为具体模型参数。

3 负序电流源在 PSASP 谐波分析中的实现

3.1 负序电流源的用户自定义模型实现

收稿日期: 2012-03-15
基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070532052)
作者简介: 刘乾勇(1985-),男,湖南籍,硕士研究生,研究方向:电力系统稳定性分析与控制;
李欣然(1957-),男,湖南籍,教授,研究方向:负荷建模,电力系统稳定性分析与控制。

PSASP 是由中国电力科学研究院开发的电力系统计算分析程序,用户自定义功能即 PSASP/UD,可以供用户按自己计算分析需要设计各种模型以共同完成某计算任务^[6]。图 1 是本文根据负序电流源模型设计的 UD 模型,其中功能参数框 A1 ~ A11 及 A12 ~ A22 分别对应负序电流实部和虚部的模型参数 $C_1 \sim C_{11}$; P_L 和 Q_L 表示负荷功率。

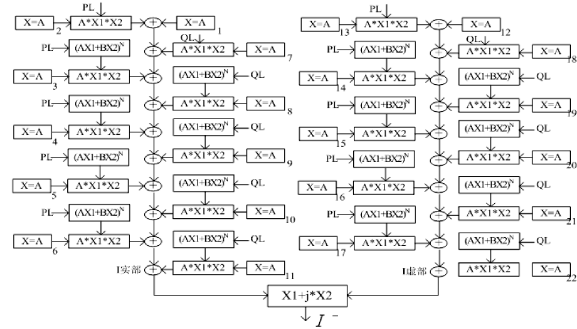


图 1 负序电流源用户自定义模型

Fig. 1 User design model of negative sequence current source

根据谐波计算功能及 PSASP 与 UD 之间的约定规则,即谐波分析功能是以常规潮流作业为基础的,谐波分析作业需要根据常规潮流作业中的计算结果来进行计算分析。因此,在计算基础潮流作业时,把牵引负荷当作一个恒定功率负荷进行计算,通过调用 UD 模型,得出结果,输入“谐波分析”计算功能中负序电流源的对话框,计算流程如图 2 所示。

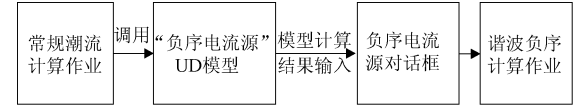


图 2 仿真计算流程

Fig. 2 Simulation process

3.2 负序电流源 UD 模型正确性验证

文献[5]中基于不同牵引变电站实测数据,利用总体测辨法建模,得到列车不同运行工况下的模型参数,表 1 为某一牵引工况下的两组辨识所得参数。

在将牵引负荷模型应用于电网进行仿真计算前,必须验证用户自定义模型的正确性。文献[7]利用差分方程自定义动态模型与 PSASP 中感应电动机模型,在仿真时对应的发电机功角和母线电压曲线变化趋势一致来验证接口的正确性;本文根据计算时不断调用 UD 模型的结果与实测负序电流源数据的比较,来验证模型接口的正确性。以 EPRI-36 节点系统为例进行仿真计算,UD 模型参数如表 1,

表 1 某一工况下的模型参数

Tab. 1 Parameters of work conditions

参数	负序实部	负序虚部	参数	负序实部	负序虚部
C_1	1121	67.17	C_7	-2129	628.7
C_2	140.2	-422.7	C_8	1415	-392.2
C_3	-51.28	151.7	C_9	-468.2	119.9
C_4	9.296	-26.82	C_{10}	77.01	-17.82
C_5	-0.837	2.344	C_{11}	-5.04	1.024
C_6	0.03	-0.081			

系统接线方式如图 3 所示。在 BUS50 上接入牵引负荷,通过不断仿真计算,设置与实测负序电流序列相对应的负荷功率序列,将 PSASP/UD 中用户打印变量得到的模型响应序列与实测负序电流序列进行对比,两序列曲线完全重合,说明文中牵引负荷负序电流源模型与 PSASP 稳定计算程序正确连接。

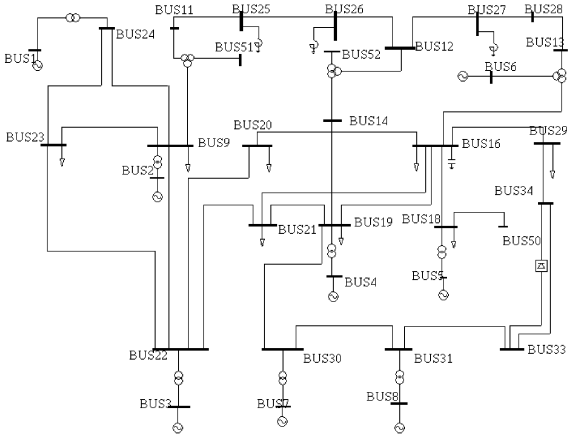


图 3 ERRI-36 节点系统结构

Fig. 3 Configuration of ERRI-36 bus system

4 负序电流的影响分析

电力机车按照运行工况可分为级位运行、惰行、制动和停车。本节中以 EPRI-36 节点系统为例,研究牵引负荷(不同负荷水平)对电网运行状况的影响。不同负荷水平分别为:① P_L 6.69MW, Q_L 2.97Mvar; ② P_L 12.85MW, Q_L 6.13Mvar; ③ P_L 19.19MW, Q_L 11.34Mvar;或者分别代表一辆、二辆、三辆电力机车的级位运行额定功率。

4.1 对变压器的影响

负序电流会造成三相电流不对称,因而变压器三相电流中有一相电流最大而不能有效发挥变压器的额定出力,使变压器容量利用率下降。另外,还造成变压器的附加能量损失、在变压器铁芯磁路中产生附加发热^[3]。可根据变压器中电流不平度的大

小来判定其对系统变压器的影响,不平衡度越大,就表示影响越大。电流不平衡度计算公式如下:

$$\varepsilon_i = I_2/I_1 \tag{2}$$

式中, I_2 和 I_1 分别表示流经系统变压器的负序电流和正序电流。经仿真计算,系统变压器的电流不对称度情况如表 2 所示。

表 2 变压器 ε_i 仿真结果

Tab. 2 ε_i simulation results of transformer
(单位:A)

I 侧母线	J 侧母线	①	②	③
BUS17	BUS16	0. 0213	0. 0905	0. 1551
BUS5	BUS18	0. 0137	0. 0585	0. 1005
BUS10	BUS11	0. 0029	0. 0122	0. 0209
BUS10	BUS9	0. 0027	0. 0116	0. 0199
BUS3	BUS22	0. 0024	0. 0100	0. 0172

由表 2 可知,当电力机车从一辆变为两辆时,电流不平衡度增加到之前的四倍左右,从两辆变为三辆时,电流不平衡度变化相对不是太明显。牵引负荷越大,变压器中电流不平衡度越大,对变压器容量利用率影响越大,影响了变压器的额定出力。

4.2 对输电线路的影响

负序电流流过送电线路时,负序功率实际上并不做功,而只造成电能损失,增加了网损,降低了送电线路的输送能力^[3]。可根据反映到网侧交流线上负序电流的大小来判定对交流线输送能力的影响,输电线路上的仿真计算结果如表 3。

表 3 交流线上负序电流仿真结果

Tab. 3 Simulation results of AC line negative sequence current
(单位:A)

I 侧母线	J 侧母线	①	②	③
BUS18	BUS50	12. 81	54. 80	94. 52
BUS16	BUS18	5. 61	23. 93	41. 17
BUS16	BUS29	1. 82	7. 76	13. 37
BUS16	BUS20	0. 53	2. 25	3. 86
BUS27	BUS28	0. 47	1. 99	3. 41

由表 3 可知,当电力机车从一辆变为两辆时,负序电流增加到之前的四倍以上,当从两辆变为三辆时,负序电流大约增加到之前的两倍。牵引负荷越大,各交流线上的负序电流越大,对网侧交流线的输电能力影响越大,降低了输电线路的输电能力。

4.3 对发电机负序保护的影响

牵引负荷为单相大功率负荷,在一定区段内造

成电网三相失衡且难以调节。负序电流将使发电机转子发热和产生附加损耗,引起机组振动。在实际运行中,由于牵引负荷引起的负序电流超标,常常导致附近的小发电机组频繁跳闸,不能就近并网。不同容量的发电机,允许流过发电机的负序电流不同,最大不超过额定电流的 8%^[8]。各发电机的负序电流与额定电流的比值的仿真计算结果如表 4。

表 4 发电机 $I^-/I_{N.g}$ 仿真结果

Tab. 4 $I^-/I_{N.g}$ simulation results of generator

发电机	限值	①	②	③
GEN 4	8%	0. 696%	2. 720%	4. 720%
GEN 5	6. 5%	0. 088%	0. 400%	0. 640%
GEN 2	6. 1%	0. 064%	0. 320%	0. 560%
GEN 7	8%	0. 064%	0. 240%	0. 480%
GEN 8	8%	0. 040%	0. 160%	0. 320%

由表 4 可知,当电力机车从一辆变为两辆时,流过各发电机的负序电流增加到之前的四倍左右,当从两辆变为三辆时,增加到之前的两倍上下。在不同的负荷水平下,虽然流过各发电机的负序电流并没有超过发电机连续运行时的限值。但是介于本文所采用的 EPRI-36 网络中发电机额定功率容量相对较大,所以负序电流对小发电机组的影响是不可以被忽略的。

4.4 对变压器负序过流保护的影响

当负序电流作用时间较长时,容易使电力系统中以负序分量启动的继电保护装置误动作。变压器负序过流保护反映不对称故障,但由于牵引负荷的单相性,负序电流较大,容易超过继电保护中负序电流的整定值,从而误动作。负序电流启动值为^[9]:

$$I_{2. act} = (0.5 \sim 0.6) I_{N.T} \tag{3}$$

式中, $I_{2. act}$ 和 $I_{N.T}$ 分别表示负序电流启动值和变压器额定电流。可根据变压器中流过的负序电流值与额定电流值的比值是否大于 0.6 来判断是否会引起继电保护的误动作,系统变压器中负序电流与额定电流的比值仿真计算结果如表 5。

表 5 变压器 $I^-/I_{N.T}$ 仿真结果

Tab. 5 $I^-/I_{N.T}$ simulation results of transformer

I 侧母线	J 侧母线	①	②	③
BUS17	BUS16	0. 0234	0. 0995	0. 1706
BUS5	BUS18	0. 0151	0. 0644	0. 1106
BUS10	BUS11	0. 0032	0. 0134	0. 0230
BUS10	BUS9	0. 0030	0. 0128	0. 0219
BUS3	BUS22	0. 0026	0. 0110	0. 0189

由表 5 可知,当电力机车从一辆变为两辆时,负序电流增加到之前的四倍以上,当从两辆变为三辆时,负序电流大约增加到之前的两倍。在不同负荷水平下,流过各变压器的负序电流没有超过负序电流整定值,但是也有牵引负荷引起变压器继电保护误动作的实例^[1],这个问题是不容小觑的。

4.5 对电动机的影响

正序电流产生转矩,使电动机运转,负序电流产生一反转矩,直接影响异步电动机的效率,威胁其安全可靠运行。一般情况下,15%~20%的负序电压所产生的负序损耗与电动机额定运行时所产生的铜耗数值上相当,负序损耗是随负序电压分量的二次方成正比的。当 $U_2=0.05U_N$ 时, I_2 可达 20%~35% I_N 。因此负序电压对异步电动机的影响是很大的,可引起电动机的额外发热,严重时甚至会烧毁电动机^[3]。因此可根据供带负荷的母线上负序电压与额定电压的比值大小来判定对电动机的影响,仿真结果见表 6。

表 6 母线 U^-/U_N 仿真结果

Tab. 6 U^-/U_N simulation results of bus

母线名	①	②	③
BUS18	0.0011	0.0046	0.0079
BUS16	0.0004	0.0015	0.0027
BUS29	0.0004	0.0015	0.0026
BUS20	0.0002	0.0010	0.0017
BUS19	0.0002	0.0007	0.0012

由表 6 可知,当电力机车从一辆变为两辆时,负序电压增加到之前的四倍以上,当从两辆变为三辆时,负序电压大约增加到之前的两倍。在不同负荷水平下,虽然各母线的负序电压没有达到损坏电动机的定值,但也较大地影响了电动机的运行效率。

5 结论

本文利用 PSASP/UD 实现了将牵引负荷负序电流源模型接入 PSASP 参与谐波分析仿真的目的。通过提出各个指标,分析了牵引负荷在不同负荷水平下对电网运行状况的影响,为进一步研究牵引负荷对实际电网安全稳定运行影响提供了一定的基础,也为进一步深入研究负序电流的影响分析和实际工程的研究提供了一定的参考价值,并得出以下结论:

(1) 当牵引负载从一辆变成两辆时,负序电流对变压器、输电线路、发电机保护和电动机的影响会

增加到之前的 4~5 倍左右。而从两辆变成三辆时,各个指标值变化相对较缓一些,这与电网的承受能力是很有关系的。

(2) 与负序电流源电气距离越近,仿真结果数据越大,影响亦越大。

参考文献 (References):

[1] 张力强, 罗文杰, 吕力军 (Zhang Liqiang, Luo Wenjie, Lv Lijun). 电气化铁路牵引负荷的不利影响及治理方案 (Disadvantage and manage project on electrization railway draught load) [J]. 电网技术 (Power System Tech.), 2006, 30(增刊): 196-198.

[2] 贾善杰, 赵义术, 宫兵, 等 (Jia Shanjie, Zhao Yishu, Gong Bing, et al.). 胶济线电气化铁路对山东电网电能质量的影响 (Influence of Jiao-ji electric railway to power quality of Shandong grid) [J]. 电网技术 (Power System Tech.), 2006, 30(增刊): 11-16.

[3] 姚宗溥, 侯世英, 祝石厚 (Yao Zongpu, Hou Shiyong, Zhu Shihou). 电气化铁路牵引负荷对固原电网的影响 (Influence of electrical railway's traction load on Guyuan power network) [J]. 电网技术 (Power System Tech.), 2007, 31(增刊 1): 15-19.

[4] 姚金雄, 张涛, 林榕 (Yao Jinxiang, Zhang Tao, Lin Rong). 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施 (Impacts of negative sequence current and harmonics in traction power supply system for electrified railway on power system and compensation measures) [J]. 电网技术 (Power System Tech.), 2008, 32(9): 61-64.

[5] 刘乾勇, 李欣然, 肖园园 (Liu Qianrong, Li Xinran, Xiao Yuanyuan). 电铁牵引负载负序电流源模型研究 (Research of the electric railway traction load negative sequence current source model) [A]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第 27 届学术年会论文摘要集 (27th Chinese of Universities Symposium on Electrical Power System Automation) [C]. 秦皇岛 (Qinhuangdao), 2011.

[6] 中国电力科学研究院 (State Grid Corporation of China). 电力系统分析综合程序—用户手册 (Power system analysis software package-user's manual) [Z]. 2000.

[7] 韩民晓, 朱军飞, 贺仁睦 (Han Minxiao, Zhu Junfei, He Renmu). 自定义负荷模型与综合程序接口的实现 (Interfacing of user defined load models with power system simulation software package) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(7): 26-30.