

电气化铁路负序电流对发电机负序过流保护的影响

高 然, 徐永海, 夏瑞华

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 随着电气化铁路的迅速发展, 其对电力供电系统侧产生的影响日益突出。由于不同容量的发电机承受负序电流的能力不同, 也就相应造成发电机转子负序过负荷保护动作情况不一致。采用 PSCAD 仿真软件建立了某一实际电铁供电网仿真模型, 分析了电铁负荷在发电机端口处产生的负序电流对发电机转子负序过负荷保护的影响。在电铁负荷区域, 负序电流经常引起发电机定时限负序过负荷保护报警。分析了电铁负荷产生的负序电流对不同容量发电机转子负序过负荷保护的影响, 以及发电机机端加装电抗器对发电机端口处负序电流的影响, 提出了通过调节转子负序过负荷保护整定值和机端加电抗器来满足实际要求的方法。

关键词: 电气化铁路; 负序电流; 负序过流保护; 整定值; 电抗器

Analysis of the operation of the generator negative current protection impacted on by the electric railway loading

GAO Ran, XU Yong-hai, XIA Rui-hua

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the rapid development of electric railway, the negative current injected to the power system increases obviously, and effects increasingly on the power system. Based on the regional power supply network of railway loading, the simulation model is conducted using PSCAD/EMTDC. The paper analyzes the negative current that occurs in the generator stator by simulating the model, and studies further that negative current of electric railway impacts on the operating characteristics of generator negative current protection, and that changing the series reactor of the generator terminal affects the negative current in the power system. It gives some advices about regulating the setting value of the over-load of rotor negative current.

Key words: electric railway; negative current; negative current protection; setting value; reactor

中图分类号: TM714; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0041-05

0 引言

电气化铁路电力牵引负荷为波动性很大的大功率单相整流负荷。电力机车产生的不对称电流会破坏电力系统的对称运行条件, 使电力系统出现较大的负序分量, 进而会对系统侧的用电设备产生各种不利影响, 会造成发电机转子过热和振动、变压器额定出力不足、降低输电线路输送能力以及会对各种以负序滤波器为启动元件的保护装置产生干扰^[1-3]。

目前关于减小电气化铁路负序分量的方法大多是牵引变轮换相序接入供电系统、合理安排机车运行方式、采用三相/两相的平衡变压器和电容补

偿装置, 尽量削弱电气化铁路负序分量对电网的影响^[4-7]。在电力系统较为薄弱的地区, 电铁负荷引起的电力系统电能质量尤为突出。对于小电厂的投入运行, 带来极大不便。本论文着重讨论电铁产生的基波负序分量。由于电铁负荷造成的发电机转子负序过负荷保护不正常动作屡见不鲜。本文根据实际电铁供电网, 使用仿真软件PSCAD/EMTDC搭建模型, 分析电铁负荷在发电机端口处产生的负序电流以及发电机机端加装电抗器对发电机端口处负序电流的影响。在不会造成发电机转子负序过负荷保护误动和拒动的前提下, 调整可靠系数来满足负荷要求。

1 发电机转子负序过负荷保护整定计算

发电机转子负序过负荷保护整定计算^[7]。

项目资助: 国家电网公司电铁供电关键技术(SGKJ[2007]102)

1.1 负序定时限过负荷保护

定时限负序动作电流整定值 $I_{2.op.s}$ 按躲过发电机长期连续运行允许的负序电流计算, 即

$$I_{2.op.s} = K_{rel} \frac{I_{2.\infty}^*}{K_{re}} I_{g.n} \quad (1)$$

式中: K_{rel} 为可靠系数, 一般取 $K_{rel}=1.2$; K_{re} 为返回系数 (通常取 0.85~0.95); $I_{g.n}$ 为发电机额定二次电流(A)。

负序定时限动作时间整定值按与线路后备保护最大动作时间配合计算, 即

$$t_{2.op.s} = t_{op.1.max} + Vt \quad (2)$$

式中: $t_{2.op.s}$ 为发电机定时限转子表层负序过负荷保护动作时间整定值 (s); $t_{op.1.max}$ 为线路后备保护动作时间最大整定值(s); V_t 为时间级差, 一般取 0.5 s。

1.2 负序反时限过负荷保护

1.2.1 下限负序动作电流 $I_{2.op.dow}$ 整定值计算

按与定时限负序过电流保护动作电流配合计算, 即

$$I_{2.op.dow} = K_{rel} \times I_{2.op.s} \quad (3)$$

式中符号含义同前。

按下限负序动作时间为 1 000 s 计算。

$$I_{2.op.dow} = \sqrt{\frac{A_{set}}{1000} + I_{2.\infty}^* I_{g.n}} \quad (4)$$

1.2.2 不同负序电流时的动作时间 $t_{2.op}$ 计算。

$$t_{2.op} = \frac{A_{set}}{I_2^{*2} - I_{2.\infty}^{*2}} \quad (5)$$

2 牵引供电网模型

用仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建的负荷模型, 根据实际供电负荷不确定性地投入和退出运行的特点, 在仿真模型里每隔 0.5 s 投入或退出 2~3 台不等的机车, 投入的机车设置不同的档位, 以便更加逼近于实际地铁负荷运行的特点, 仿真时间为 10 s。牵引负荷系统侧部分供电示意图如图 1 所示。在仿真模型中, 携带电铁负荷的牵引变压器有 7 处, 牵引变携带机车为 4~8 台。机车正常运行时, 发电机端口处的负序电流为额定电流的 4.35%~44.17%, 国内外的大量实验结果表明, 汽轮发电机所允许的负

序电流为额定电流的 5%~20%, 仿真模型具有一定的代表性, 可用来做数据分析。

牵引变压器所接电力机车的投入和退出将对其直接相连的系统产生明显的影响。线路的负序电流将随着牵引变两供电臂所接机车负荷的不平衡性而变化, 运行机车台数的不同和机车速度, 级位的不同会对线路负序电流产生影响。特别是直接与牵引站相连的母线和线路受到的影响最大。

当多座牵引变电站接入同一系统母线时, 将牵引变电站换相接入系统可以在一定程度上降低系统的谐波和负序影响, 但是和系统的运行工况有关, 在机车负荷均接于牵引变同一供电臂的情况下, 换相能够大大地降低系统母线上的谐波电压总畸变率和系统变电站间传输线上的负序电流, 而当机车负荷分散于牵引变的不同供电臂上时, 抑制效果不够明显。

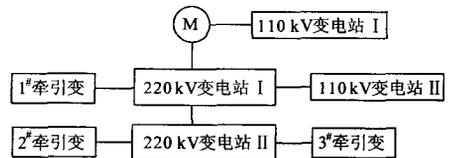


图 1 牵引负荷系统侧供电示意图

Fig.1 Supplying schematic diagram in the power system side of the electric railway loading

3 地铁负荷对不同容量发电机转子负序过负荷保护的影响

由于不同容量的发电机承受负序电流的能力不一, 造成负序过负荷保护动作情况不尽相同。对于不同容量的发电机, 保护用的 CT 变比不一样, 造成 CT 二次侧的负序电流有所差别, 进而影响到转子负序过负荷保护的動作。不同容量发电机的技术参数见表 1。

由表 1 和 2 提供的参数, 使用公式(1)可以计算出 200 MW、350 MW、600 MW 和 1000 MW 发电机的定时限负序过电流整定值分别为 0.460 A、0.385 A、0.368 A 和 0.324 A。负序定时限动作时间

表 1 不同容量发电机的技术参数

Tab.1 Technical parameters of the generators with different capacity

发电机容量/MW	定子额定电压/kV	定子额定电流/A	功率因数(滞后)	CT 变比
200	15.75	8 625	0.85	10 000/5
350	22	10 806	0.85	15 000/5
600	20	19 245	0.9	25 000/5
1 000	27	23 949	0.9	30 000/5

表 2 汽轮发电机长期连续运行允许的负序电流值和负序电流发热时间常数

Tab.2 Negative current value of long time continuous operation of the generator and the time constant for heating caused by the negative current

发电机额定功率/MW	长期连续运行时允许的最大负序电流相对值	A 值/s
≤350	0.08	8
350~900	$0.08 - \frac{S_{G,N} - 350}{30000}$	$8 - 0.00545 \cdot (S_{G,N} - 350)$
900~1 250		5
1 250~1 600	0.05	5

整定值计算由式(2)可得 $t_{2,op.s} = 5$ s。由式(3)和(4)计算得出反时限下限动作电流整定值分别为 0.518 A、0.433 A、0.440 A、0.377 A。

仿真得到 200 MW、350 MW、600 MW 和 1000 MW 发电机端口处的负序电流波形图如图 3~6 所示。

由图 2~5 仿真波形可知, 200 MW 发电机端口处的负序电流变化幅度较大, 时常超过定时限保护整定值。严重的时候负序电流达到 2.80 A, 会加剧发电机转子发热, 在转子表层产生很大的热量, 容

易损坏转子。在仿真过程中, 由于负序电流均过大, 触发反时限负序过负荷保护计时。因负序电流持续时间较短, 没有造成负序反时限保护动作。仿真过程中, 每隔 0.5 s 加入机车负载, 分析其在发电机端口处产生的负序电流的变化情况。机车负载经过牵引变压器时, 对电网的冲击很大, 导致大量的谐波电流和负序电流注入到系统侧。经过牵引变压器的时间不只 0.5 s, 结合实际情况, 由图 2 可知, 在 5.53~8.05 s 时段, 负序电流持续超过负序定时限保护整定值。定时限保护计时器会超过整定时间值 5 s, 导致保护发出警告。图 3 和图 4 负序电流波形较稳定, 在某些时刻, 有些超出整定值。图 5 为 1000 MW 发电机端口处的负序电流波形, 由图 5 可知, 负序电流某些时刻会超过整定值, 但与整定值的差值较小。

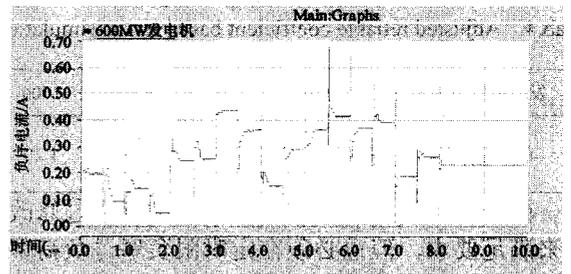


图 4 600 MW 发电机端口处的负序电流
Fig.4 Secondary value of negative current of the 600 MW generator

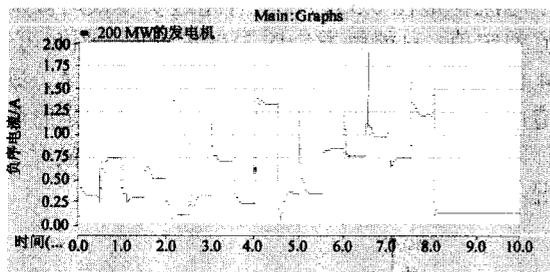


图 2 200 MW 发电机端口处的负序电流
Fig.2 Secondary value of negative current of the 200 MW generator

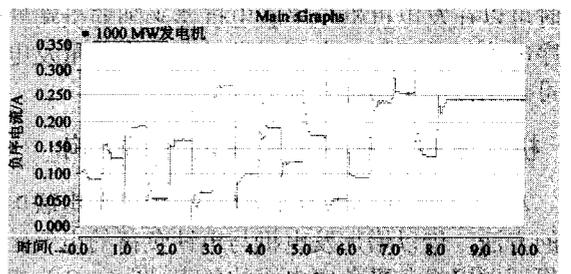


图 5 1000 MW 发电机端口处的负序电流
Fig.5 Secondary value of negative current of the 1000 MW generator

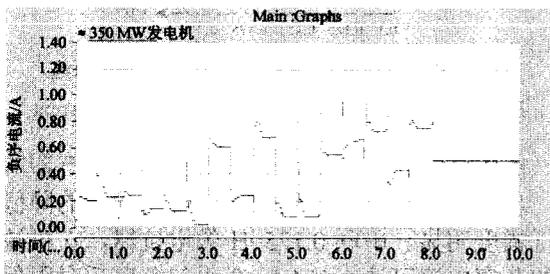


图 3 350 MW 发电机端口处的负序电流
Fig.3 Secondary value of negative current of the 350 MW generator

由于发电机容量不同, 电铁负荷反应在发电机端口处的负序电流差异比较大。由表 1 可知, 发电机容量不同, 保护用的 CT 变比差异很大, 造成发电机端口处的负序电流差异较大。虽然小容量的发电机承受负序电流的能力较强, 但是反应在发电机端口处的负序电流过大, 易造成转子负序过负荷保护的動作。

由图 2~5 可知, 大容量发电机端口处的负序电

流较小,影响发电机定时限负序过负荷保护动作的可能性降低。发电机负序过负荷保护判据设计时,视发电机为绝热体,没有考虑到转子本身传热作用,所以保护判据仍是偏于安全保守的^[8]。由式(1)可知,在不会造成保护拒动和误动的前提下,通过调整 K_{rel} 来满足实际要求。由式(1)、式(3)、表1和表2可得可靠系数调整的范围。

表3 理论上可靠系数的调整范围

Tab.3 Adjustment range of the reliable coefficient in theory

发电机容量/MW	200	350	600	1000
可靠系数 K_{rel} 调整的范围	1.20~1.35	1.20~1.34	1.20~1.43	1.20~1.57

表4为根据图2~5的仿真波形,调整 K_{rel} 来避免保护误动作的要求。

表4 根据仿真波形调整的可靠系数

Tab.4 Adjusted reliable coefficient based on the simulation waveform

发电机容量/MW	200	350	600	1000
可靠系数 K_{rel}	2.73	1.75	1.20	1.20

由表4可知,根据仿真波形,可以通过修改参数来满足要求,但也必须在定时限负序过负荷保护不发生误动和拒动的前提下修改可靠系数。对于200 MW和350 MW的发电机采用表4的参数来修改会造成保护的拒动。此时,定时限保护的整定值大于负序电流反时限保护的下限动作电流整定值。这时可以在发电机机端串联电抗器来削弱机端处的负序电流,进而保证电厂正常供电。大容量发电机的可靠系数满足实际要求。

4 机端串联电抗器对负序电流的影响

对容量为200 MW的发电机,采用机端串联电抗器的方法,借以增加发电机与电铁负荷的电气距离来保证发电机免受负序电流的危害。图6~8为串联电抗器后仿真波形图。

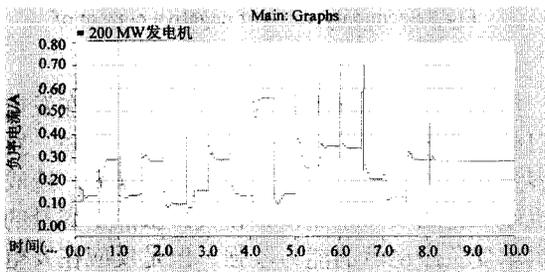


图6 串联电抗器为0.150 H时的负序电流

Fig.6 Negative current of the 0.150 H series reactor

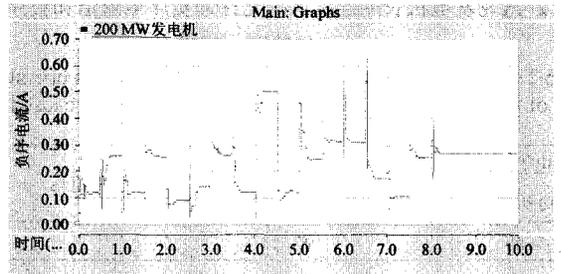


图7 串联电抗器为0.175 H时的负序电流

Fig.7 Negative current of the 0.175 H series reactor

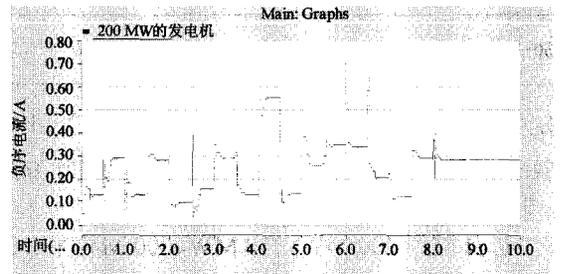


图8 串联电抗器为0.200 H时的负序电流

Fig.8 Negative current of the 0.200 H series reactor

由图6~8可知,机端串联电抗器可以削弱电铁负荷产生的负序电流,而且电抗器越大,机端产生的负序电流就越小。图6可知,在4.1~4.35 s时段,负序电流稳定在0.551 A,没有超过负序反时限动作电流整定值,只能触发定时限保护计时。图8可知,在4.1~4.35 s时段,负序电流保持在0.458 A,既不会造成负序反时限保护计时,也不会触发定时限保护计时。图9可以形象地显示出负序电流幅度变化情况。

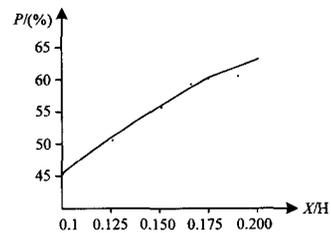


图9 串联电抗器削弱负序电流的百分数曲线

Fig.9 Percentage of weakening the negative current

由图9和表5可知,随着机端串联电抗器的增大,反应在发电机端口处的负序电流相应的降低,降低幅度明显。串联0.125 H的电抗器,在机端产生的负序电流可达0.614 A,会引起负序反时限保护计时。此时,由公式(5)计算得到反时限时间整定值为801 s。实际中,电铁负荷在负荷区域内的运行时

间会超过此值, 所以为了避免小容量发电机受到电铁负荷负序电流的影响, 可以考虑采用机端串联电抗器来削弱电铁负荷产生的谐波和负序电流, 进而发电机转子负序过负荷保护免受电铁负荷冲击的影响, 使得发电机可靠地供电。

表 5 串联电抗器引起负序电流的变化

Tab.5 Negative current with the change of series reactor

串联电抗器/H	负序电流值/A
0.100	0.690
0.125	0.614
0.150	0.551
0.165	0.521
0.175	0.500
0.185	0.483
0.200	0.458

5 结论

仿真分析得知, 电铁负荷对系统电网冲击性较大, 在机车投入运行时, 系统侧负序电流变化明显。牵引变轮换相序接入系统, 当负荷分散于不同供电臂时, 负序电流抑制效果不明显。

电铁负荷全部时, 大容量发电机端口处产生的负序电流二次值明显要比小容量发电机处的负序电流小, 也就造成在大容量发电机端口处产生的负序电流对发电机定时限负序过负荷保护影响较小。为了防止定时限保护的误动作, 可以通过调节定时限保护整定值算法中的可靠系数, 来避免保护的不正常动作。由表 4 可知, 小容量的发电机可靠系数调整的非常大, 不能配合反时限负序过负荷保护, 易造成定时限保护的拒动, 可以采用机端串联电抗器的方法来削弱机端的负序电流。大容量发电机可靠系数的调整可以接受, 可以避免电铁负荷带来的不利影响。

参考文献

- [1] Prudenzi A. Estimation of Electrical Traction Load Harmonic Impact on Distribution Networks[A]. in: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. 2003.
- [2] Calero F. Rebirth of Negative Sequence Quantities in Protective Relaying with Microprocessor-based Relays[A]. in: IEEE 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers[C]. 2004.
- [3] 吴竟昌. 供电系统谐波[M].北京: 中国电力出版社, 1985.
WU Jing-chang. Distribution System Harmonic [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [4] 何常红, 吴广宁, 张雪原, 等. 世界高速电气化铁道电能质量现状及治理措施[J]. 电气化铁道, 2008,(1): 11-15.
HE Chang-hong, WU Guang-ning, ZHANG Xue-yuan, et al. The Present Situation and Treatment Measures of International High-speed Electric Railway Power Quality[J]. Electric Railway, 2008,(1):11-15.
- [5] 姚金雄, 张涛, 林榕, 等. 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[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 65-68, 69.
YAO Jin-xiong, ZHANG Tao, LIN Rong, et al. Impacts of Negative Sequence Current and Harmonics in Traction Power Supply System for Electrified Railway on Power System and Compensation Measures[J]. Power System Technology, 2008,32(9):65-68,69.
- [6] 姚宗溥, 侯世英, 祝石厚. 电气化铁路牵引负荷对固原电网的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(S1):21-25.
YAO Zong-pu, HOU Shi-ying, ZHU Shi-hou. Influence of Electrical Railway's Traction Load on Guyuan Power Network[J]. Power System Technology, 2007,31(S1): 21-25.
- [7] 卢志海, 厉吉文, 周剑. 电气化铁路对电力系统的影响[J]. 继电器, 2004, 32(11):36-39.
LU Zhi-hai, LI Ji-wen, ZHOU Jian. The Impact of Electrified Railway on Electric Power System[J]. Relay,2004,32(11):36-39..
- [8] 高春如.大型发电机组继电保护整定计算与运行技术[M].北京: 中国电力出版社,2006.
GAO Chun-ru. The Coordination and Operation Technology of Large Generating Unit Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [9] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用[M].北京: 中国电力出版社,1996.
WANG Wei-jian. Relay Protection Principles and Application of Electric Main Equipments[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.

收稿日期: 2008-10-24; 修回日期: 2008-12-24

作者简介:

高 然 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail:gaoran3132@yahoo.com.cn

徐永海 (1966-), 男, 教授, 主要从事电力系统谐波, 电能质量等方面的研究工作;

夏瑞华 (1969-), 男, 副教授, 研究方向为微机保护与变电站综合自动化。