

相控整流谐波和馈线保护动作分析

赵四洪¹, 王晓茹¹, 王倩¹, 王皖珠²

(1. 西南交通大学铁道电气化自动化研究所, 四川 成都 610031;

2. 昆明铁路局昆明供电段, 云南 昆明 650206)

摘要: 通过对 SS_{3B} 型电力机车电路模型的分析, 阐述了机车相控整流谐波产生的机理。运用离散傅立叶算法和电力电子技术, 对机车理论负荷电流的谐波进行了分析计算。借助牵引变电所负荷录波装置, 对实际馈线电流电压波形进行频谱分析。得出机车在几种运行状态下的负荷特征, 验证了理论与实际负荷分析的一致性。

关键词: 谐波分析; SS_{3B} 型电力机车; 牵引馈线保护; 负荷录波

中图分类号: U224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)04-0030-05

1 引言

电气化铁道牵引供电系统为一特殊的电力子系统, 其负载电力机车为波动性很大的大功率单相整流负荷。牵引供电系统在电网中产生较大的负序分量和高次谐波, 同时负荷变化剧烈造成电网电压波动。由于电气化铁路分布日益广泛, 对大电网的影响也越来越严重。全面研究电力牵引的工况和故障特性, 对牵引供电继电保护动作的可靠性将起到推动作用。

为了分析电气化铁道牵引工况, 人们运用仿真模型研究了负荷的动态过程, 提出了供电臂内单机和多机的负荷谐波过程^[1]。但是, 电力机车随时处于高速运动状态, 网压波动大, 机车操作过程因人而异, 线路状况变化多端, 加上接触网闪络、接地等故障, 这就使得如果要求仿真模型具有较高的准确性、普遍性、灵活性变得较为困难。本文从相控机车的变压器和整流电路出发, 运用变压器原理和电力电子变流技术分析机车谐波产生的原因。实际录波分析证明, 机车在各种运行状态下, 这种理论分析是正确的。

牵引工况和故障状态的馈线电流电压均含有丰富的信息, 人们很早就开始研究这些高频分量对继电保护的作用。录波装置为实时获取馈线电流电压的波形带来了可能。本文利用石板滩变电所的录波设备, 对馈线电流电压波形进行实时采样, 借助傅立叶变换分析其在牵引工况和故障态时的谐波、相位特征。

2 SS₃ 型 4000 系列电力机车

2.1 SS₃ 型 4000 系列电力机车总体概况^[2]

目前电气化铁路运行较多的机车为韶山系列。这些机车按照调压方式的不同, 可以分为变压器抽头调压 (主要是 SS₁ 型) 和相控调压 (例如 SS₃ 型 4000 系列、SS₄ 型、SS₈ 型等), 以及两种调压相结合的方式 (例如 SS_{3A} 型)。对于相控机车又可以分为半控和全控方式。

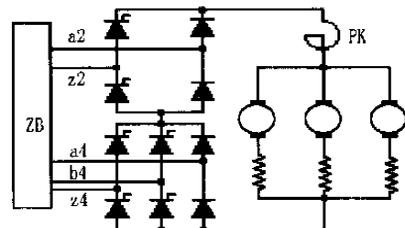


图 1 一个转向架的整流主回路

Fig. 1 Rectifier circuit on a redirector

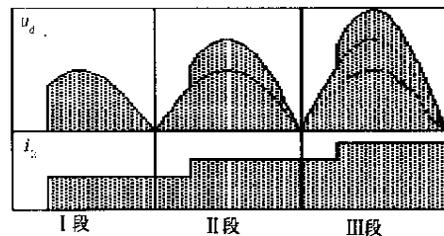


图 2 三段桥顺序控制波形

Fig. 2 Waveform of 3 - band sequence control

石板滩变电所两供电臂上下行运用机车主要为 SS₃ 型 4000 系列 (简称 SS_{3B} 型)。该机车 6 台 800 kW 脉冲牵引电机分布在两转向架上, 属于晶闸管不等分三段桥半控机车。调压整流装置原理如图 1 所示, ZB 为主变, PK 为平波电抗器。主回路采用全波桥式整流, 主整流桥为三段桥式串接法, 其中二、

三段小桥是一种叠加式经济桥接法。每段桥的整流电压波形和整流电流波形如图 2 所示。电阻制动时 6 台电机接成它励发电机状态,由主回路相控整流统一提供励磁电流。

机车自用三相电源由辅助电路提供。辅助电路取自于主变低压侧,通过 2 台旋转式劈相机把单相 380 V 电源变成线电压为 380 V 的三相电源向辅助机组供电。由于三相异步电动机在高次谐波下产生的电流基本上是感性的无功电流^[4],因此在对机车负荷分析当中,可以只考虑对馈线电流基波功率因数的影响。

2.2 谐波产生的原理分析

相控机车运行时,随着机车变压器的励磁涌流、晶闸管开放角度的变化等,在馈线电流和电压产生较多的高次谐波。

2.2.1 机车主变压器

机车主变压器空载合闸和过电分相时产生励磁涌流。当电网电压为正弦波时,变压器一次侧回路的电动势方程为:

$$u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \phi_0) = i_0 R_1 + N_1 \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

式中: ϕ_0 为合闸时电网电压 u_1 的初相角; ψ 为和一次绕组交链的总磁通,包括主磁通和漏磁通。

电阻压降 $i_0 R_1$ 很小,是合闸电流衰减的主要原因,在分析瞬变过程时可以忽略。忽略 $i_0 R_1$ 时,由式(1)以及边界条件($t=0$ 时, $\psi=0$)可得:

$$i_0 = \frac{m}{R_1} \cos \phi_0 - \frac{m}{R_1} \cos(\omega t + \phi_0) \quad (2)$$

式中: m 为磁通的稳态分量,因为忽略了 R_1 ,所以没有衰减。

由式(2)可知,最不利条件时合闸可以产生稳态磁通分量的 2 倍。加上变压器磁通饱和,合闸电流可达额定电流的 5~8 倍^[4]。

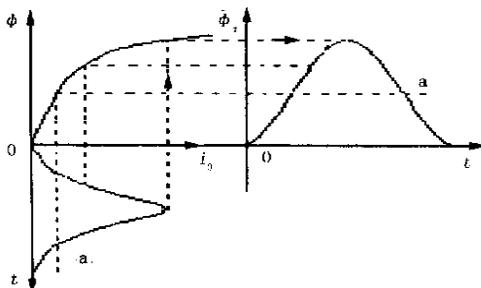


图 3 磁路饱和时主磁通和励磁电流波形

Fig. 3 Waveform of base - flux and excitation current under saturation

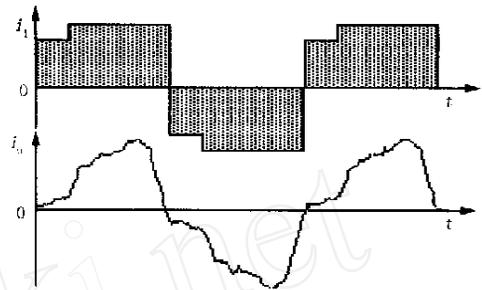


图 4 变压器原边电流的理论和实测波形

Fig. 4 Transformer primary current waveform in theory and actual

如图 3 所示为 $\phi_0 = 0$ 时合闸所产生的主磁通与励磁电流曲线。根据变压器原理^[4],当外加电压 u_1 为正弦波时,和它相平衡的电动势以及感应的主磁通 ψ 也应是正弦波,但由于铁心的饱和使励磁电流波形畸变为尖顶波。图中虚线 a 为主磁通峰值的一半以及所对应的励磁电流,显然励磁电流关于虚线 a 不对称。实际励磁涌流录波波形见文中图 7(d) 所示。

2.2.2 整流电路

SS_{3B} 型电力机车整流回路如图 1 所示。整流电路的控制方式为:第 1 段逐渐开放 a_2x_2 绕组上晶闸管到全导通,此时输出整流电压最大达到 0.5 倍额定值。第 2 段维持 a_2x_2 绕组全导通,逐渐开放 a_4b_4 绕组上晶闸管到全导通,此时输出电压最大达到 0.75 倍额定值。第 3 段维持 a_2x_2 绕组全导通,逐渐开放 a_4x_4 绕组上晶闸管,整流电压达到额定值,此时 a_4b_4 绕组上晶闸管因为施加反向电压而截止。

由于整流电路为大电感带反电动势负载,电机电流连续且近似为波浪线。当某一绕组上晶闸管未加触发脉冲时,该绕组整流输出电压为零,对应变压器 2 次绕组无电流流过。当输出整流电压瞬时值 u_a 小于零时,晶闸管截断,变压器 2 次绕组无电流流过,整流二极管起到续流作用使电机电流连续^[5]。各段桥整流电压波形和变压器 1 次绕组理论电流波形如图 2 所示。但由于变压器漏感的存在,同时考虑牵引绕组的漏感,整流器不能实现瞬时换向,这就存在着换向重叠角。重叠角的存在将削弱较高次数的谐波,使变压器 1 次侧电流接近于正弦波。在下文对主变 1 次侧电流的分析当中,将以理论电流波形为模型,这对 3 次谐波的影响不是很明显,对 5、7、9 次谐波的影响将逐渐增大^[3]。理论和实测的变压器 1 次侧电流波形如图 4 所示。

3 牵引工况谐波分析

3.1 变压器励磁涌流分析

随着变压器投入时刻的电压初相角 θ_0 和磁饱和程度的不同,各次谐波含量也不同。若仅仅考虑励磁电流的 2、3 次谐波,可以将变压器铁心磁化曲线近似表示为^[3]:

$$i_1 = at + b \frac{3}{t} \quad (a, b > 0) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),则有励磁电流:

$$i_1 = \cos \theta_0 - \cos(\omega t + \theta_0) + k[\cos \theta_0 - \cos(\omega t + \theta_0)]^3 \quad (4)$$

式中 k 为系数,与铁心磁化曲线、铁心截面积有关, $k = b \frac{2}{m'} > 0$ 。

由于励磁涌流过程只有几个周波,且第一个周波电流畸变最严重,所以在此仅对第一周波进行谐波分析。当 $0 < t < 2\pi$ 时,计算出式(4)的傅氏系数 a_k 和 b_k ,令第 k 次谐波有效值为 $i_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$,含量为 i_k / i_1 。当 θ_0 取 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时,2、3 次谐波电流的含量(%)和 k 的关系如图 5(a)所示,图中阴影部分 a 和 b 为 2 次谐波含量所在范围,阴影部分 b 为 3 次谐波含量范围,其最小值均为零。从图中可以看出,当 $k = 0.4$ 时,2、3 次谐波含量的包络线出现拐点,这说明磁路已经开始饱和,当 $k > 1.0$ 时磁路已经饱和,2 次谐波含量已无明显变化。同时该图表明,当机车变压器合闸时,在最不利情况下,考虑磁路完全饱和,2 次谐波的含量将会达到 30%,此时 3 次谐波的含量也超过 10%。

取 $k = 0.4$ 时,2、3 次谐波含量与初相角 θ_0 的关系如图 5(b)所示。图中曲线 1 为 2 次谐波含量,曲线 2 为 3 次谐波含量。可知 2 次谐波最大值出现在 0° 和 180° 时,3 次谐波最大值出现在 90° 时。当 k 取不同的值,谐波含量曲线形状相同,最大值为图 5(a)所示包络线。

3.2 相控角和相控整流分析

SS_{3B}型电力机车司机操作台级位手柄通过电子插件板控制晶闸管的相控角和桥间开闭逻辑。馈线电流即变压器 1 次侧电流 i_1 随着整流电压 u_d 、机车牵引力和电机的反电动势(与机车运行速度相关)的大小而变化。

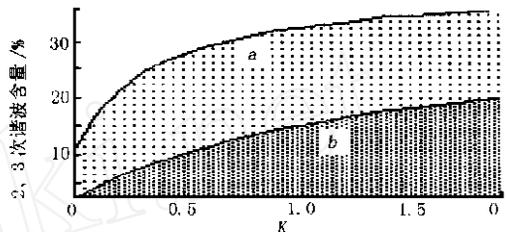
3.2.1 机车启动和级位运行时的谐波

整流一段桥开放过程中,主变压器 1 次侧一个周期的电流 i_1 理论波形表达式为:

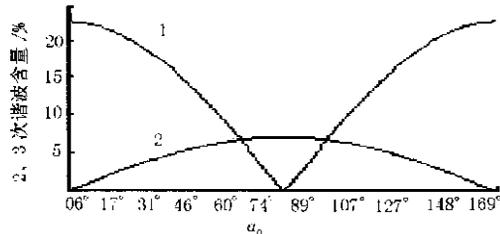
$$i_1 = \begin{cases} i_d & (0 \leq t < \pi) \\ -i_d & (\pi \leq t < 2\pi) \end{cases} \quad (5)$$

这种波形正负半周完全相同,所以不含有直流

分量和偶次谐波。对其进行傅立叶分析,以基波含量为参照,3、5、7、9 次谐波的含量随着晶闸管相控角 α_0 的变化如图 6(a)所示。



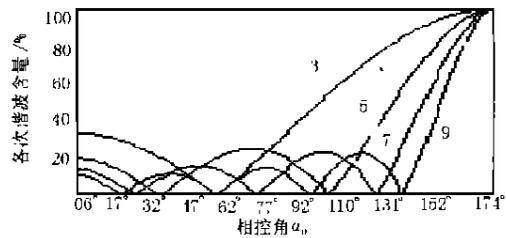
(a) 含量-系数 K 曲线



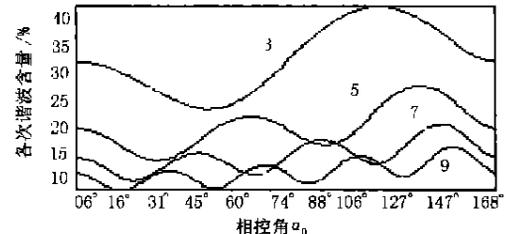
(b) 含量-初相角曲线

图 5 励磁涌流 2、3 次谐波含量

Fig. 5 Second and third harmonic content of excitation current



(a) 一段桥相控时



(b) 二段桥相控时

图 6 谐波含量与相控角的关系

Fig. 6 Relation between harmonic content and controlled angle

整流二段三段桥开放过程中,主变 1 次侧电流 i_1 和 i_1'' 理论波形的表达式如下。二段桥谐波含量与相控角的关系如图 6(b)所示。

$$i_1 = \begin{cases} 0.5 i_d & (0 \leq t < \pi) \\ i_d & (\pi \leq t < 2\pi) \\ -0.5 i_d & (2\pi \leq t < 3\pi) \\ -i_d & (3\pi \leq t < 4\pi) \end{cases}$$

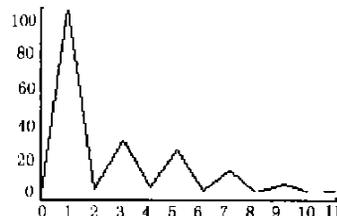
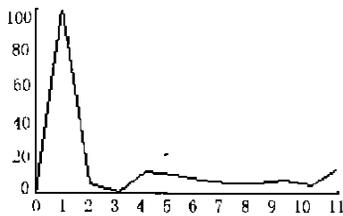
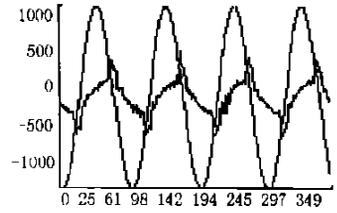
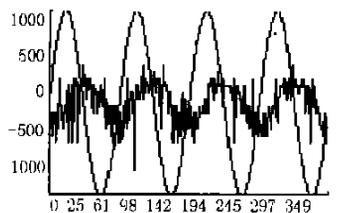
$$i'''_1 = \begin{cases} 0.75 i_d & (t) \\ i_d & (t) \\ -0.75 i_d & (t +) \\ -i_d & (+ t 2) \end{cases} \quad (6)$$

从以上分析可知,晶闸管满开放时($\alpha = 0$),3次谐波的理论含量均为33.3%,5次和7次谐波的理论含量均为20%和14.3%。一段桥开放,各次谐波含量变化较大,当 $\alpha = 60^\circ$ 时,3次和9次谐波含量为零,5次和7次谐波含量为20%和14.3%。二段桥开放,3次谐波含量基本在33.3%左右, $\alpha = 60^\circ$ 时含量最小为24%;5次谐波含量也基本在20%左右,

$\alpha = 36^\circ$ 时含量最小为14%。三段桥开放时,各次谐波的变化规律与二段桥时一样,但谐波含量变化幅度较为平缓。这是因为此时电流波形一样,只有电流幅值不同。考虑变压器等元件漏感的影响,实际测量中5、7次谐波含量将比理论值有所减少。

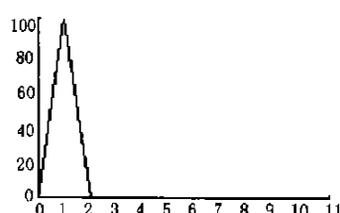
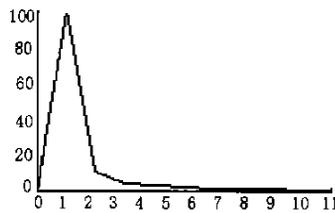
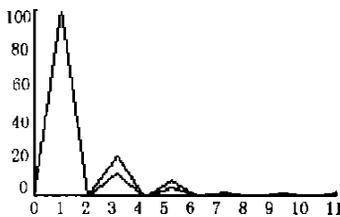
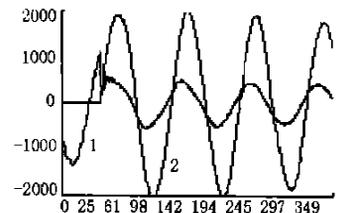
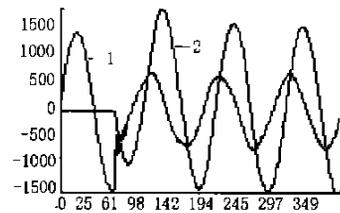
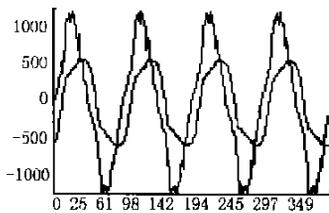
3.2.2 机车启动和提速运行的电流上升率

从运行稳定性和电气设备安全出发,列车启动和提速时牵引电机电流变化应该有一定的限制。由于机车主回路时间常数较小,电机电流将随司机操纵纵台级位手柄移动的快慢和进位的大小而急剧变



(a) 惰行运行(电流瞬时值放大了100倍)

(b) 轻负荷运行(电流瞬时值放大了10倍)



(c) 重负荷运行(包含电压和电流含量曲线,3次谐波电流含量在上)

(d) 励磁涌流(波形图中曲线1为电压,曲线2为电流。)

(e) 馈线接地短路(波形图中曲线1为电压,曲线2为电流。)

图中的录波波形图,横坐标为采样点序号,每两个序号间隔时间为0.2ms。纵坐标中电压为缩小 $20\sqrt{2}$ 倍的值,电流中未注明者为缩小 $\sqrt{2}$ 倍的值。

图7 几种工况下录波电压电流波形和谐波电流含量

Fig. 7 Recorded waveforms of voltage and current and harmonic current content

化,为此在牵引特性插件板中设置给定积分器。由于给定积分器的限制作用,单台电机电流实际上升率为 125 A/s。根据主变变比(25kV/1071V/1606.5V/2142V),当每段桥均满开放时,对应的馈线电流上升率一段桥为 32.1 A/s,二段桥为 48.2 A/s,三段桥为 64.2 A/s。

SS_{3B}型电力机车为恒流启动,每级位电流变化 90 A。根据机车牵引力特征曲线^[2],当牵引吨位较小时整流桥为一段开放;而当牵引吨位较大时则可能二段桥或者三段桥开放才能保持较大的启动电流。考虑较小和较大牵引力两种情况。较小牵引力时,机车以 1 级位 90 A 电流恒流启动,一段桥开放,馈线电流大约上升(90/32.1 3 s)才能使列车完成启动过程。较大牵引力时,若机车以 5 级位 450 A 电流启动,三段桥开放,则大约上升(450/64.2 7 s)才能完成启动过程。机车启动后电流沿机车速度特征曲线下降,进入准恒速运行状态。

4 现场录波波形分析

4.1 采样录波装置

石板滩变电所录波设备采用 32 位模数转换芯片,数据范围是(-32768,32767),采样频率为 5 kHz,对应每个周波采样 100 个数据。图 7 中的录波波形图,横坐标为采样点序号,每两个序号间隔时间为 0.2 ms。纵坐标中电压为缩小 $20\sqrt{2}$ 倍的值,电流中未注明者为缩小 $\sqrt{2}$ 倍的值。录波电压和电流均从变电所馈线出口端采样。

4.2 负荷录波分析

对牵引供电保护而言,一般考虑最严重的负荷情况,所以在此选取几种典型的运行状态:惰行运行、轻负荷运行、重负荷运行、励磁涌流和馈线接地短路。石板滩下行线为单线区间,一个供电臂内经常只有一列机车运行。在此所有的录波波形均为单机车运行状态,且每种状态经过多次录波,其波形和谐波含量绝大部分与下面所列出的相同。多机车运行时,由于负荷均为电力机车,牵引时电流基波可以近似进行简单的线性相加,对高次谐波则应作相应的处理。

5 结论

从图 7 的波形分析可知:

(1)当机车惰行或站内升弓停车时,主要负荷为机车主变励磁电流、辅助机组感性负载和接触网绝缘污闪雾闪等,负荷功率因数角较大。同时由于污闪等

放电,各次谐波含量丰富且无明显差别。

(2)负荷运行时,3、5、7 次谐波含量较为明显,基本无偶次谐波。3 次谐波含量在 20%~40%范围,5 次谐波含量在 10%~25%范围,7 次谐波含量低于 15%,这与理论分析的结果相吻合。重负荷运行时,电压波形畸变严重,有 10%左右的 3 次谐波,但是电流各次谐波的含量要小于轻负荷运行时。这是因为二三段桥开放时整流电流较接近正弦波。

(3)励磁涌流时,瞬时电流在第一周波甚至达到重负荷的 3 倍以上,此时电压同时下降,且出现较多的高次谐波。从谐波含量曲线可知第一周波电流有 15%的 2 次谐波和 5%的 3 次谐波,与励磁涌流理论分析吻合。机车过电分相时,当机车在无电区,辅助机组断开但仍在高速旋转;当机车进入有电区,辅助机组闭合,剩余电势在主变产生感应磁势使主变带有剩磁。这种带有剩磁的励磁涌流过程其馈线电流有时相当大,比不带剩磁时要严重的多。

(4)馈线接地时,一周波内电压下降到网压的 1/3,同时电流上升到最大值。即使是大电阻接地,接地电流与重负荷电流相当,但与接地电路上升率相比,牵引时电路上升通常要缓慢。

(5)由于铁路路基的起伏和机车受电弓固有的机械时间常数,当列车高速行驶时,受电弓会短时脱离接触线产生电弧。这种现象包含两个物理过程:(a)电弧放电,产生各次谐波,且含量丰富;(b)带剩磁的励磁涌流,此时馈线电流含有一定量的 2、3 次谐波,但由于受电弓通过电弧和接触网接触,相当于串接有大电阻,机车励磁涌流电流不是很大。

参考文献:

- [1] 周立平. 电牵引负荷动态谐波仿真[J]. 铁道学报(铁道牵引电气化与自动化专辑), 1991.
- [2] 刘友梅. 韶山 3 型 4000 系列电力机车[M]. 北京:中国铁道出版社, 1996.
- [3] 吴竟昌. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- [4] 许实章,等. 电机学(第 3 版) [M]. 北京:机械工业出版社, 1996.
- [5] 王兆安,黄俊. 电力电子技术(第 4 版) [M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [6] 连级三. 电力牵引控制系统[M]. 北京:中国铁道出版社, 1996.
- [7] C S Chang, T Feng, A M Khambadkone and S Kumar. Remote short-circuit current determination in DC railway systems using wavelet transform[J]. IEE Proc. - Electr. Power Appl., 2000, 147(6).

(下转第 75 页)

每个遥信点可以进行个性化延时去抖动设置,对各类型接点开关量有很强的适应性。

与微机保护的通讯支持完善,串口多,功能强大。

d) 增强 SCADA 系统处理保护报文的功能

随着微机保护的快速发展,SCADA 系统对微机保护报文的智能化处理能力需要进一步加强和完善:例如增加对保护报文的分类处理和屏蔽特定设备的特定报文的手段,以屏蔽大量类似“风扇启动”等的次要报文。

4 结论

综上所述,运动事件信息的准确采集决定于信息源(电磁保护设备和微机保护及自动装置)、RTU 装置的可靠工作,远动装置和二次设备的良好匹配以及功能的不断完善和扩展。

通过对远动系统进行上述完善和改进,北区供电局远动系统的遥信和微机保护运行准确率有了很大提高,极大减轻了变电和调度运行人员的工作强度。

目前,随着越来越多的新技术也投入使用,变电

站建设已经完全按综合自动化标准进行设计和施工,对信息量的准确采集提出了更高的要求。这就对广大远动和继保专业人员提出了更高的要求。因此,我们不但在思想上,在新专业知识学习和分析能力提高上也必须与时俱进,通过不断提高专业技术水平,保障电力系统自动化的真正可靠实现。

参考文献:

- [1] 李鹏,陈家麟,金波,等. 调度自动化设备抗干扰防过电压措施研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 60-62.
- [2] 王凤萍,刘晋萍,任景红,等. 电网调度自动化系统通信误动和抖动问题的解决[J]. 电网技术, 1993, 23(3): 74-75.

收稿日期: 2002-07-16

作者简介:

陈刚(1972-),男,助工,从事调度自动化和继电保护方面的工作;

蔡泽祥(1960-),男,教授,博士生导师,研究方向主要有电力系统继电保护,电力系统暂态稳定性等。

Analysis and improvement of remote information collection in substations

CHEN Gang¹, CAI Ze-xiang²

(1. Guangzhou Branch of Guand - dian Power Grid Group Co.Ltd, Guangzhou 510410, China;

2. College of Electrical Engineering, South China University of Science and Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: During the course of RTU gathering remote information, including remote signals and special reports from microcomputer-based protection, it often occurs that remote signals are mal-transmitted or lost and protection reports are missed or abnormal. In this paper, the reasons of occurrence are analyzed and practical improvement measures are presented. It is proved to be feasible and effective on maintenance and engineering.

Key words: RTU; remote signals; reports from microcomputer-based protection

(上接第 34 页)

- [8] 杨新民,杨隽琳,等. 电力系统微机保护培训教材[M]. 北京:中国电力出版社,2000.

收稿日期: 2002-07-25; 修回日期: 2002-11-04

作者简介:

赵四洪(1974-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及自动化、变电站综合自动化;

王晓茹(1962-),女,教授,主要研究方向为电力系统及自动化,配电自动化,小波理论;

王倩(1961-),女,教授,主要研究方向为电力系统及自动化,配电自动化。

Analysis of phase - controlled rectifier harmonic and feeder protect - action

ZHAO Si-hong¹, WANG Xiao-ru¹, WANG Qian¹, WANG Wan-zhu²

(1. Railroad Electrification Automation Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Kunming power supply station, Kunming Railroad Bureau, Kunming 650206, China)

Abstract: Based on the analysis of circuit model of SS_{3B} electric locomotive, the paper expatiates the reason of rectifier harmonic. Applying DFT arithmetic and power electrical technique to harmonic analyses the loading - current in theory. With the assist of waveform recorded in substation to sample the data, proceed to form the actual current and voltage frequency spectrum. In the end achieve the loading characteristic in some types of state, and conclude the loading analysis in theory and in practice is consistency.

Key words: harmonic analysis; SS_{3B} electric locomotive; feeder protect; waveform recording