

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2012 年 10 月 4 日 (04.10.2012)



(10) 国际公布号
WO 2012/130163 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 3/24 (2006.01) G01R 23/16 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2012/073327
- (22) 国际申请日: 2012 年 3 月 30 日 (30.03.2012)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201110081957.X 2011 年 4 月 1 日 (01.04.2011) CN
- (71) 申请人 (对除美国外的所有指定国): 南京南瑞继保电气有限公司 (NR ELECTRIC CO., LTD) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区苏源大道 69 号, Jiangsu 211102 (CN)。 南京南瑞继保工程技术有限公司 (NR ENGINEERING CO., LTD) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁经济技术开发区胜太路 99 号, Jiangsu 211102 (CN)。
- (72) 发明人; 及
- (75) 发明人/申请人 (仅对美国): 张琦雪 (ZHANG, Qixue) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区苏源大道 69 号, Jiangsu 211102 (CN)。 牛红海 (NIU, Hong-hai) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区苏源大道 69 号, Jiangsu 211102 (CN)。 柏传军 (BAI, Chuan-jun) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区苏源大道 69 号, Jiangsu 211102 (CN)。 熊良根 (XIONG, Li-anggen) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区苏源大道 69 号, Jiangsu 211102 (CN)。

道 69 号, Jiangsu 211102 (CN)。 王凯 (WANG, Kai) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区苏源大道 69 号, Jiangsu 211102 (CN)。 陈俊 (CHEN, Jun) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区苏源大道 69 号, Jiangsu 211102 (CN)。 严伟 (YAN, Wei) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区苏源大道 69 号, Jiangsu 211102 (CN)。

(74) 代理人: 南京经纬专利商标代理有限公司 (NNANJING JINGWEI PATENT & TRADEMARK AGENCY CO., LTD); 中国江苏省南京市鼓楼区中山路 179 号 12 楼 B 座, Jiangsu 210005 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,

[见续页]

(54) Title: METHOD FOR GENERATOR SUBSYNCHRONOUS CURRENT CALCULATION, SUBSYNCHRONOUS OVER-CURRENT AND DIVERGENCE PROTECTION

(54) 发明名称: 发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法

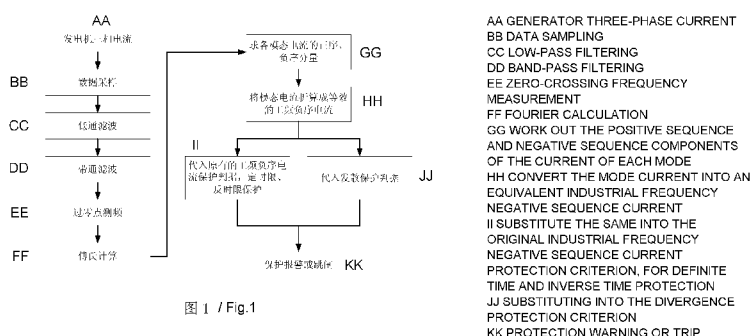


图 1 / Fig.1

(57) Abstract: A method for generator subsynchronous current calculation, subsynchronous over-current and divergence protection comprises: collecting a three-phase current signal of a generator; converting the positive sequence and negative sequence components of the subsynchronous current of each mode into an equivalent industrial frequency negative sequence current, which is substituted into the original industrial frequency negative sequence over-current protection criterion of the generator, for judging definite time and inverse time protection; and at the same time judging whether the equivalent industrial frequency negative sequence over-current increases continuously, which constitutes the divergence protection criterion. The present invention can detect the multi-mode subsynchronous current in the armature current of the generator, and realize over-current protection and divergence protection of the subsynchronous current.

[见续页]

IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, **本国际公布:**
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, — 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD,
TG)。

(57) 摘要:

一种发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法,包括采集发电机的三相电流信号,将电流的各模态次同步电流的正序、负序分量折算成等效的工频负序电流,代入发电机原有的工频负序过电流保护判据中,进行定时限和反时限保护判别,同时判别等效的工频负序过电流是否持续的增长,构成发散保护判据。本发明可以检测发电机电枢电流中多个模态的次同步电流,并实现次同步电流的过电流保护及发散保护。

发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法

技术领域

本发明涉及电力系统中发电机保护的技术领域,更具体地涉及汽轮发电机的次同步振荡,并涉及发电机电枢电流中次同步电流检测、过电流保护、发散保护方法和相应的继电保护装置或监测装置。

背景技术

一些大型火电厂远离负荷中心,发电机组容量大,多采用长距离输电,并在输电线路中配置串联电容补偿、可控串联电容补偿等电力电子设备,有时也采用直流输电方式。这些机组经过电容补偿的线路或空载长距离线路,当参数配合不当时,可能发生异步自励磁现象(简称异步自激),发电机定子绕组当中的电枢电流出现略低于同步频率(工频)的次同步频率的电流,次同步电流会产生脉振转矩,引起机械谐振、大轴扭振,使机组发热、振动加剧,严重时 would 损伤设备。次同步振荡频率大多在 10Hz~45Hz 之间。

比如,我国内蒙古大唐托克托电厂,装机容量为 $8 \times 600\text{MW}$,经托源四回线输送至浑源变电站,再经源安双回线、源霸双回线向京津唐电网送电。在浑源变电站的线路上安装了 8 套固定电容串补。经过分析,存在次同步谐振风险,为此在发电机主变压器的高压侧装设了静态阻塞滤波器(SBF),并为机组安装了轴系扭振保护(TSR)。其中 SBF 是由一组电感、电容相互串并联的电路。2008 年 4 月,托克托电厂在试验 SBF 投入的过程中,发电机组出现了明显的异步自激,且电流呈发散趋势,使发电机组不能正常并网运行。之后调整了 SBF 的设计参数,2 年后,SBF 才正式投入运营,异步自激得到抑制。为防止出现类似的异步自激而损坏设备,需装设次同步过电流保护装置。

当发电机出现异步自激振荡时,发电机定子绕组的三相电流中既有工频(50Hz)分量,又包含次同步(10Hz~45Hz)分量,有时可出现多个次同步分量,每个次同步分量,称为对应频率的模式分量。发电机电枢绕组中流过三相稳态次同步电流,其正序、负序电流产生旋转磁场,与转子有相对运动,在转子产生转差频率的涡流,使转子发热,还会引起振动。

目前,专门针对次同步电流的过电流保护很少,通常只是通过一个滤波器提取出一个模式的次同步电流,然后将电流的幅值与一个预设的定值进行比较,经过一个预设的延时发出报警或跳闸信号。这种方法虽然简单,但是存在明显缺点:(1)只提取一个模式的电流是不够的,实际机组运行时有可能同时存在多个模式的次同步电流,比如托克托电

厂的发电机异步自激时曾出现 27Hz、39Hz 附近的两个频率的次同步电流；(2) 保护定值的整定是随意设定的，缺乏理论依据；(3) 保护功能单一，仅提供定时限过电流保护。

发明内容

本发明的目的是：提出一种可以检测发电机电枢电流中多个模态的次同步电流的方法，并实现次同步电流的过电流保护及发散保护的方法。

本发明采取的技术方案是：检测发电机电枢电流中多个次同步模态分量，折算成等效的工频负序电流后，实现定时限、反时限过电流保护以及发散保护的方法。

保护装置或监测装置用固定采样频率采集发电机的三相电流信号 i_A 、 i_B 、 i_C ，经过低通滤波和带通滤波，分离出多组各模态次同步模态频率的信号 $i''_{m,A}$ 、 $i''_{m,B}$ 、 $i''_{m,C}$ ，模态 $m=1,2,\dots$ ；采用过零点算法得到次同步模态的频率 f_m ，采用傅氏计算得到模态信号的幅值序列 $I_{m,i}(n)$ 和对应的相量 $\vec{I}_{m,i}(n)$ ；求出各模态的三相电流对应的正序分量 $I_{m,1}$ 、负序分量 $I_{m,2}$ ；将各模态的正序、负序分量折算成等效的工频负序电流 $I_{eq,2}$ ；然后再进行定时限、反时限过电流保护以及发散保护的计算。

(1) 电流信号采样。保护装置或监测装置使用固定采样频率，对发电机机端电流互感器 CT 二次侧电流进行采样，得到三相电流 i_A 、 i_B 、 i_C ；

(2) 低通滤波，滤波参数固定在保护装置或监测装置的定值中，不需要调整。将 i_A 、 i_B 、 i_C 经过一个高阶的低通滤波，结果为：

$$\begin{bmatrix} i'_A \\ i'_B \\ i'_C \end{bmatrix} = H_L(s) \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad \text{式 1}$$

其中， $H_L(s)$ 为低通滤波器，截止频率在 43Hz~48Hz 范围内。

(3) 带通滤波，滤波参数固定在保护装置或监测装置的定值中。根据被保护的发电机的需求，确定需要 m 组高阶带通滤波器，一般 2~4 个即可，比如只关心两个模态频率的次同步电流，则只需设计 2 个带通滤波器，如覆盖 27Hz、39Hz 附近的两个频率的带通滤波器。将上述信号进一步滤波，得到三相次同步模态电流：

$$\begin{bmatrix} i''_{m,A} \\ i''_{m,B} \\ i''_{m,C} \end{bmatrix} = H_{B,m}(s) \begin{bmatrix} i'_{A} \\ i'_{B} \\ i'_{C} \end{bmatrix} \quad m=1,2,\dots \quad \text{式 2}$$

其中, $H_{B,m}(s)$ 为第 m 个带通滤波器。

(4) 过零点测频和傅氏滤波。经过上述处理后得到的信号都是正弦度比较好的正弦波。可采用过零点算法计算出信号 $i''_{m,A}$ 、 $i''_{m,B}$ 、 $i''_{m,C}$ 的频率, 三相次同步模态电流的频率取平均值作为最终的模态频率 f_m 。采用傅氏算法计算出次同步模态信号 $i''_{m,A}$ 、 $i''_{m,B}$ 、 $i''_{m,C}$ 的幅值序列 $I_{m,i}(n)$ 和对应的相量 $\vec{I}_{m,i}(n)$, 得到:

$$\begin{cases} \vec{I}_{m,i}(n) = g_m (a_{m,i}(n) - j \cdot b_{m,i}(n)) \\ I_{m,i}(n) = g_m \sqrt{a_{m,i}^2(n) + b_{m,i}^2(n)} \\ a_{m,i}(n) = \frac{2}{N_m} \left[\sum_{k=0}^{N_m-1} i''_{m,i}(n - N_m + k) \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{N_m}\right) \right] \\ b_{m,i}(n) = \frac{2}{N_m} \left[\sum_{k=0}^{N_m-1} i''_{m,i}(n - N_m + k) \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{N_m}\right) \right] \\ N_m = \text{round}(f_s / f_m) \end{cases} \quad i = A, B, C, m = 1, 2, \dots \quad \text{式 3}$$

其中, f_s 为保护装置或监测装置的采样频率, f_m 为次同步模态频率, N_m 为对应 f_m 的数据窗长度, $I_{m,i}(n)$ 是次同步电流的幅值序列, $\vec{I}_{m,i}(n)$ 是对应的相量。由于前面两次滤波有可能造成信号衰减, 所以式 3 中增加了增益校正系数 g_m , 进行幅值校正。校正系数是模态频率的函数, 事先由滤波器的幅频特性确定。

(5) 对各模态的三相电流, 求出它们的正序、负序分量, 得:

$$\begin{cases} I_{m,1} = |\vec{I}_{m,A}(n) + \alpha \cdot \vec{I}_{m,B}(n) + \alpha^2 \cdot \vec{I}_{m,C}(n)| / 3 \\ I_{m,2} = |\vec{I}_{m,A}(n) + \alpha^2 \cdot \vec{I}_{m,B}(n) + \alpha \cdot \vec{I}_{m,C}(n)| / 3 \\ \alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{cases} \quad \text{式 4}$$

(6) 将各模态的正序、负序分量折算成等效的工频负序电流 $I_{eq,2}$ 。

$$\begin{cases} I_{eq,m,1} = k_{m,1} I_{m,1} \sqrt{\left(\frac{f_n - f_m}{2f_n}\right)^{1.5}} \\ I_{eq,m,2} = k_{m,2} I_{m,1} \sqrt{\left(\frac{f_n - f_m}{2f_n}\right)^{1.5}} \\ I_{eq,2} = \sqrt{\sum_m (I_{eq,m,1}^2 + I_{eq,m,2}^2)} \end{cases} \quad \text{式 5}$$

这样折算的理论基础是：发电机电枢绕组中流过三相稳态次同步电流，其正序、负序电流产生旋转磁场，与转子有相对运动，在转子产生转差频率的涡流，这与发电机工频负序电流在转子上产生 2 倍频的涡流的原理是相似的；若将发电机看成一个理想的模型，对于汽轮发电机的实心转子，某一频率的涡流，其损耗与频率的 1.5 次方成正比，与磁场幅值的平方成正比，近似与产生该磁场的电枢电流序分量的有效值的平方成正比。为此，可将次同步电流转化成等效的工频负序电流。

上述公式 5 当中， $k_{m,1}$ 和 $k_{m,2}$ 是修正系数， f_n 为实测的工频频率。

对于实际的汽轮发电机，转子结构很复杂，转子上开槽，且有通风孔、月牙槽，都会对磁场及涡流的路径产生影响；铝材料或磁性材料的槽楔与转子端部护环构成阻尼回路，阻尼回路会有涡流，对磁场的影响更复杂；此外，转子涡流还会对磁场产生削弱作用。磁场饱和将使磁路中的等效气隙增加，削弱磁场。因此，公式 5 当中保留了修正系数 $k_{m,1}$ 和 $k_{m,2}$ ，取值范围是 0.8~1.0，根据经验可取 0.9。必要时，采用电磁场有限元的计算方法准确地定量计算次同步电枢电流在转子上产生的损耗，由此确定准确的 $k_{m,1}$ 和 $k_{m,2}$ 。

(7) 参照发电机工频负序过电流保护，进行定时限和反时限保护判别，判据为：

$$\text{定时限判据: } I_{eq,2} > I_{set} = \frac{K_{rel} I_{2\infty}}{K_r} \text{ 且 } t > t_{set} \quad \text{式 6}$$

$$\text{反时限判据: } t = \frac{A \cdot I_n^2}{I_{eq,2}^2 - I_{2\infty}^2} \text{ 且 } I_{eq,2} > I_{pk} \text{ 且 } t > t_{min} \quad \text{式 7}$$

其中， K_{rel} 为可靠系数，取值范围 1.0~1.2； K_r 为返回系数，取值范围 0.8~1.0； t_{set} 为定时限保护延时，取值范围 0~20s， t_{min} 为反时限保护最小动作延时，取值范围 0~20s； A

为发电机承受工频负序电流能力的常数，由主机厂提供，取值范围 1~100； $I_{eq,2}$ 为采用式 5 折算的等效工频负序电流； $I_{2\infty}$ 为发电机长期允许负序电流值， I_{set} 为定时限电流定值， I_n 为发电机额定电流值， I_{pk} 为反时限保护电流启动值，这些电流值均为 CT 二次值。这里完全借用原有的工频负序电流过负荷保护，保护判据形式不变、定值不变。

(8) 进行发散保护判别，保护判据为：

$$I_{eq,2}(n) > I_{eq,2}(n-T) \quad \text{式 8}$$

$$Cnt > C_{set} \quad \text{式 9}$$

其中，T 为数据比较间隔定值， C_{set} 为发散计数定值。

当前述的定时限、反时限保护启动时，对式 8 进行判别，若式 8 满足，则对应的计数器 Cnt 加 1；如果保护没有启动或式 8 不满足，则计数器 Cnt 减 1，直至减到 0 为止；当式 9 满足时，判为出现持续发散。保护装置报警或跳闸。

一般的，次同步发散的过程不会太快，因此数据比较间隔定值 T 的取值可按其对应的时间在 0.02s~1s 的范围内来确定，比如采样频率为 1200Hz， $T=120$ 时，对应的时间为采样 120 个点对应的的时间，是 0.1s。

当电力系统出现扰动（短路、断路、重合闸、甩负荷等）时，会使电流信号中出现次同步频段的量，但其衰减很快，一般为在 0.2s~0.5s 内可衰减完毕。发散计数定值可按躲过这个衰减时间来确定，比如采样频率为 1200Hz， $C_{set} = 1800$ 时，对应的时间为采样 1800 个点对应的的时间，是 1.5s。

前述的定时限、反时限保护只是针对较为稳定的异步自激现象，实际有可能出现次同步电流逐渐增大的情况，发散保护是一个功能上的补充。

本发明的有益效果是：通过高阶的低通滤波和带通滤波，可以分离出多个模态电流的瞬时值；采用傅氏算法可以准确计算各个模态信号的幅值及相量，并对各模态的三相电流计算出正序、负序分量；采用与工频负序电流在转子上产生涡流相类比的原理，将各模态电流的正序、负序分量进行折算，折算成等效的工频负序电流，可借用原有的工频负序电流保护，实现定时限、反时限过电流保护，保护判据形式可不变，定值可不变；最后，通过判别等效电流的幅值是否持续增长，实现发散保护；本发明计算量较大，必

要时可采用多 CPU 并行计算，但是保护设计有理论依据，定时限、反时限过流保护的判据形式和定值整定与原有的工频负序过电流保护一样。

附图说明

图 1 是本发明计算过程的总流程图，

图 2 是本发明设计的一个 8 阶 Chebyshev II 型低通滤波器的幅频特性图，

图 3 是本发明设计的 2 个 8 阶 Chebyshev II 型带通滤波器的幅频特性图，

图 4 是本发明定时限、反时限保护逻辑图，

图 5 是本发明发散保护逻辑图。

图 4 中：

- a. 式 6 中的电流判据逻辑元件。条件满足时输出 1，否则输出 0。
- b. 式 6 中的“延时”逻辑元件。当输入由 0 变 1 时，经过延时 t_{set} 输出 1，当输入为 0 不变或由 1 变为 0 时，输出为 0。
- c. 定时限保护报警或跳闸结果输出。
- d. 式 7 中的电流启动逻辑元件。条件满足时输出 1，否则输出 0。
- e. 式 7 中的与电流值相关的“延时”逻辑元件。时间 t 由式 7 确定，是电流 $I_{eq,2}$ 的函数。当输入由 0 变 1 时，计时器开始计时，延时到达 t 时，逻辑输出 1；当输入为 0 不变或由 1 变为 0 时，计时器开始递减直到为 0，此时逻辑输出 0。
- f. 式 7 中的最小时间 t_{min} 的“延时”逻辑元件。当输入由 0 变 1 时，经过延时 t_{min} 输出 1，当输入为 0 不变或由 1 变为 0 时，输出为 0。
- g. “与”门操作逻辑。
- h. 反时限保护报警或跳闸结果输出。

图 5 中：

- a. 式 6 中的电流判据逻辑元件。条件满足时输出 1，否则输出 0。
- b. 式 7 中的电流启动逻辑元件。条件满足时输出 1，否则输出 0。
- c. 式 8 的电流判据逻辑元件。条件满足时输出 1，否则输出 0。
- d. “或”门逻辑操作。
- e. “与”门操作逻辑。
- f. 发散计数。当输入为 1 时，进行计数累加递增；当输入为 0 时，计数递减直到为 0；

输出为计数值 Cnt。

g. 式 9 的计数比较逻辑元件。条件满足时输出 1，否则输出 0。

h. 发散保护报警或跳闸结果输出。

具体实施方式

本发明设计了一种可以检测发电机电枢电流中多个模态的次同步电流，并实现次同步电流的过电流保护及发散保护的方法。下面结合某电厂一台 600MW 汽轮发电机的具体情况，说明该方法的具体实施方式。

该发电机组在主变压器高压侧安装了静态阻塞滤波器 SBF，SBF 是一些电感和电容相互串并联的电路。现场试验表明，SBF 投入后，发电机曾出现异步自激现象，发电机三相电流中包含 27.0Hz 和 39.0Hz 附近频率的这两个次同步模态分量；后调整 SBF 的参数后，异步自激得到一定程度的抑制。为防止异步自激振荡损坏发电机组，安装了扭振保护装置 TSR 和次同步过电流（异步自激）保护装置。为了便于说明具体的方法，这里假设出现了 27.0Hz 和 39.0Hz 这两个模态频率的次同步电流为例进行说明。按图 1 所示的计算过程，具体步骤如下：

(1) 保护装置或监测装置以固定采样频率（比如是 1200Hz）进行采样，得到发电机机端电流互感器 CT 二次侧电流，即得到三相电流信号 i_A 、 i_B 、 i_C 。

(2) 设计一个低通滤波器 $H_L(s)$ ，其截止频率在 43Hz~48Hz 范围内。设计完成的滤波器参数作为定值固定下来，保存在保护装置或监测装置中。这里给一个实例，采用一个 8 阶的 Chebyshev II 型低通滤波器，低通滤波器 $H_L(s)$ 的转移函数为：

$$H_L(s) = \left(\sum_{i=0}^8 b_i s^{(8-i)} \right) / \left(\sum_{i=0}^8 a_i s^{(8-i)} \right)$$

滤波器中各参数为：

b0~b8 的结果（用科学计数法表示）分别为：0.01, -1.1910e-14, 3.1583e4, 4.3568e-9, 1.5585e10, 2.9148e-3, 2.4612e15, 2.9683e2, 1.2145e20。

a0~a8 的结果（用科学计数法表示）分别为：1.0, 1.5282e3, 1.1680e6, 5.8185e8, 2.0770e11, 5.4613e13, 1.0651e16, 1.4105e18, 1.2145e20。

低通滤波器的参数与模态频率无关，是固定的定值。滤波器的幅频特性如图 2 所示。滤波器的型式不限于 Chebyshev II 型。按式 1 计算得到第一次滤波后的值 i'_A 、 i'_B 、 i'_C 。

(3) 针对 27.0Hz 和 39.0Hz 这两个模态频率，设计 2 组高阶带通滤波器。设计完成的滤波器参数作为定值固定下来，保存在保护装置和监测装置中。这里给一个实例，选择 8 阶的 Chebyshev II 型带通滤波器，形式为： $H_B(s) = \left(\sum_{i=0}^8 b_i s^{(8-i)} \right) / \left(\sum_{i=0}^8 a_i s^{(8-i)} \right)$ ，2 组带通滤波器的中心频率分别为 27.0Hz 和 39.0Hz，具体的滤波器参数如下：

$H_{B,1}(s)$ 的参数：

b0~b8 的结果（用科学计数法表示）分别为：0.01, -1.4043e-016, 2.0466e3, -3.4929e-011, 1.0471e8, -3.3800e-006, 1.3394e12, -1.4832e-002, 4.2829e15。

a0~a8 的结果（用科学计数法表示）分别为：1.0, 152.84, 1.1402e5, 1.2258e7, 4.5378e9, 3.1359e11, 7.4618e13, 2.5588e15, 4.2829e17。

$H_{B,2}(s)$ 的参数：

b0~b8 的结果（用科学计数法表示）分别为：0.01, 1.1199e-015, 3.2972e3, 2.5408e-010, 3.2334e8, 6.3763e-006, 1.0656e13, -0.10984, 1.0445e17。

a0~a8 的结果（用科学计数法表示）分别为：1.0, 152.84, 2.3909e5, 2.6595e7, 2.0733e10, 1.5119e12, 7.7268e14, 2.8080e16, 1.0445e19。

滤波器的型式不限于 Chebyshev II 型。滤波器的幅频特性如图 3 所示。按式 2 计算得到两组次同步电流信号(m=1,2)： $i''_{m,A}$ 、 $i''_{m,B}$ 、 $i''_{m,C}$ 。

(4) 对得到的次同步电流信号进行过零点测频和傅氏计算。

经过上述处理后得到的信号都是正弦度比较好的正弦波。可采用过零点算法计算出模态频率 f_m 。过零点方法测频：测量正弦波形相邻两次由负变正（或由负变正）的过零点对应的时间长度，时间的倒数就是频率，从而得到 $i''_{m,A}$ 、 $i''_{m,B}$ 、 $i''_{m,C}$ 的频率，三个频率取平均值作为最终的模态频率 f_m 。对于一个次同步模态频率，如果其三相电流中有一相电流信号太小，不足以准确测出频率，则取两相模态电流的频率做平均；类似的，如

果其三相电流中有两相电流信号太小，则取剩下的那一个信号较大的电流的频率为测频结果；如果其三相电流信号都很小，则取带通滤波器的中心频率（27.0Hz 和 39.0Hz）作为模态频率的测量结果。

设测量到的 2 个模态频率分别为 $f_{1,2} = 27.0\text{Hz}, 39.0\text{Hz}$ ，由此得到傅氏计算的数据窗长度为 $N_1 = \text{round}(1200\text{Hz}/27.0\text{Hz}) = \text{round}(44.4) = 44$ ， $N_2 = \text{round}(1200\text{Hz}/39.0\text{Hz}) = \text{round}(30.8) = 31$ 。

采用傅氏算法（式 3）计算出次同步模态信号 $i''_{m,A}$ 、 $i''_{m,B}$ 、 $i''_{m,C}$ 的幅值序列 $I_{m,i}(n)$ 和对应的相量 $\vec{I}_{m,i}(n)$ 。其中，因为两次滤波造成信号衰减，所以还要确定式 3 当中的增益校正系数 g_m 。根据测量频率的结果，查低通滤波器和带通滤波器对应的幅频特性图 2 和图 3，找到信号经过两次滤波的增益 $g_L(f_m)$ 和 $g_{B,m}(f_m)$ ，则模态频率 $f_1 = 27.0\text{Hz}$ 的增益系数为： $g_1 = (1/1.0) \times (1/1.0) = 1.0$ ，模态频率 $f_2 = 39.0\text{Hz}$ 的增益系数为： $g_2 = (1/0.8602) \times (1/1.0) = 1.1625$ 。

(5) 采用式 4，计算 2 个模态的三相电流所对应的正序分量 $I_{eq,1,1}$ 、 $I_{eq,2,1}$ ，和负序分量 $I_{eq,1,2}$ 、 $I_{eq,2,2}$ 。

(6) 采用式 5，将所有的正序、负序分量折算成等效的工频负序电流 $I_{eq,2}$ 。式 5 中的修正系数 $k_{m,1}$ 和 $k_{m,2}$ 取 0.9。

(7) 参照发电机工频负序过电流保护，进行定时限和反时限保护判别，将折算 $I_{eq,2}$ 代入判据式 6 和式 7。对于这里所举的实例，按原有的工频负序电流保护进行定值整定， $K_{rel}=1.05$ ， $K_r=0.95$ ，发电机额定电流 $I_n = 3.5\text{A}$ （机端 CT 的二次值，CT 的变比为 25kA/5A），发电机长期允许负序电流值 $I_{2\infty} = 8\%I_n = 0.28\text{A}$ ，定时限电流定值 $I_{set} = 0.31\text{A}$ ，定时限延时 $t_{set} = 5.0\text{s}$ （躲过主变高压侧两相短路产生的负序电流保护动作延时，防止区外故障抢先动作），发电机承受工频负序电流能力的常数 $A = 10$ ，反时限保护电流启动值 $I_{pk} = 0.33\text{A}$ ，反时限保护最小动作延时 $t_{min} = 2.0\text{s}$ 。这些保护定值与原有的工频负序电流保护的定值完全相同。

(8) 进行发散保护判别，将折算 $I_{eq,2}$ 代入判据式 8，结合式 7 进行判别。

一般的，次同步发散的过程不会太快，因此数据比较间隔定值 T 的取值可按其对应的时间在 0.02s~1s 的范围内来确定，比如采样频率为 1200Hz， $T=120$ 时，对应的时间为

采样 120 个点对应的的时间，是 0.1s。

当电力系统出现扰动（短路、断路、重合闸、甩负荷等）时，会使电流信号中出现次同步频段的量，但其衰减很快，一般为在 0.2s~0.5s 内可衰减完毕。发散计数定值可按躲过这个衰减时间来确定，比如采样频率为 1200Hz， $C_{\text{set}} = 1800$ 时，对应的时间为采样 1800 个点对应的的时间，是 1.5s。

采用上述方法，即可检测发电机电枢电流中多个模态的次同步电流，并实现次同步电流的过电流保护及发散保护。

权利要求书

1、发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法，其特征是：采集发电机的三相电流信号，将电流的各模态次同步电流的正序、负序分量通过如下的公式折算成等效的工频负序电流：

$$\begin{cases} I_{eq,m,1} = k_{m,1} I_{m,1} \sqrt{\left(\frac{f_n - f_m}{2f_n}\right)^{1.5}} \\ I_{eq,m,2} = k_{m,2} I_{m,1} \sqrt{\left(\frac{f_n - f_m}{2f_n}\right)^{1.5}} \\ I_{eq,2} = \sqrt{\sum_m (I_{eq,m,1}^2 + I_{eq,m,2}^2)} \end{cases} \quad m=1,2,\dots \quad \text{式 1}$$

其中： $I_{eq,2}$ 是最终折算的等效的工频负序电流值； $I_{m,1}$ 和 $I_{m,2}$ 是各模态次同步电流的正序、负序分量； $k_{m,1}$ 和 $k_{m,2}$ 是修正系数； f_n 为实测的工频频率； f_m 是实测的模式频率。

2、如权利要求 1 所述的发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法，其特征是：采集发电机的三相电流信号，经过低通滤波和带通滤波，分离出多组次同步模式频率的信号；通过对多组次同步信号进行计算得到次同步模式的频率，模式信号的幅值序列和对应的相量；然后再求出各模式的三相电流对应的正序分量、负序分量：最后将各模式的正序、负序分量通过式 1 折算成等效的工频负序电流。

3、如权利要求 2 所述的发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法，其特征是：将计算所得的等效的工频负序电流代入发电机原有的工频负序过电流保护判据，进行定时限和反时限保护判别，当定时限保护或反时限保护启动后，观测等效的工频负序电流是否有增长趋势，若当前工频负序电流值大于以前的值工频负序电流，则发散计数器累加，否则递减，计数器的计数值超过预设的定值，则认为是持续的增长，判为发散保护动作。

4、如权利要求 2 或 3 所述的发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法，其特征是：保护装置或监测装置用固定采样频率采集发电机的三相电流信号 i_A 、 i_B 、 i_C ，经过低通滤波和带通滤波，分离出多组次同步模式频率的信号 $i''_{m,A}$ 、 $i''_{m,B}$ 、 $i''_{m,C}$ ，模式 $m=1,2,\dots$ ；采用过零点算法得到次同步模式的频率 f_m ，采用傅氏计算得到模式信号的幅值序列 $I_{m,i}(n)$ 和对应的相量 $\vec{I}_{m,i}(n)$ ；求出各模式的三相电流对应的正序分量 $I_{m,1}$ 、负序分量 $I_{m,2}$ ；将各模式的正序、负序分量折算成等效的工频负序电流 $I_{eq,2}$ ：

计算各个次同步模态信号的幅值序列和相量，采用的傅氏计算的公式为：

$$\begin{cases} \vec{I}_{m,i}(n) = g_m (a_{m,i}(n) - j \cdot b_{m,i}(n)) \\ I_{m,i}(n) = g_m \sqrt{a_{m,i}^2(n) + b_{m,i}^2(n)} \\ a_{m,i}(n) = \frac{2}{N_m} \left[\sum_{k=0}^{N_m-1} i_{m,i}''(n - N_m + k) \cos \left(k \cdot \frac{2\pi}{N_m} \right) \right] \\ b_{m,i}(n) = \frac{2}{N_m} \left[\sum_{k=0}^{N_m-1} i_{m,i}''(n - N_m + k) \sin \left(k \cdot \frac{2\pi}{N_m} \right) \right] \\ N_m = \text{round}(f_s / f_m) \end{cases} \quad i = A, B, C, m = 1, 2, \dots \quad \text{式 2}$$

其中， g_m 为增益校正系数， f_s 为保护装置或监测装置的采样频率， f_m 为次同步模态频率， N_m 为对应 f_m 的数据窗长度；

各模态次同步电流的正序、负序分量的计算公式为：

$$\begin{cases} I_{m,1} = |\vec{I}_{m,A}(n) + \alpha \cdot \vec{I}_{m,B}(n) + \alpha^2 \cdot \vec{I}_{m,C}(n)| / 3 \\ I_{m,2} = |\vec{I}_{m,A}(n) + \alpha^2 \cdot \vec{I}_{m,B}(n) + \alpha \cdot \vec{I}_{m,C}(n)| / 3 \\ \alpha = e^{j \frac{2\pi}{3}} \end{cases} \quad \text{式 3}$$

然后将结果代入式 1 中进行计算得到各模态的正序、负序分量折算成等效的工频负序电流 $I_{eq,2}$ 。

5、如权利要求 1 或 2 所述的发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法，其特征是：发电机工频负序过电流保护，进行定时限和反时限保护判别，判据为：

定时限判据：

$$I_{eq,2} > I_{set} = \frac{K_{rel} I_{2\infty}}{K_r} \quad \text{且 } t > t_{set} \quad \text{式 6}$$

反时限判据：

$$t = \frac{A \cdot I_n^2}{I_{eq,2}^2 - I_{2\infty}^2} \quad \text{且 } I_{eq,2} > I_{pk} \quad \text{且 } t > t_{min} \quad \text{式 7}$$

其中， K_{rel} 为可靠系数； K_r 为返回系数； t_{set} 为定时限保护延时； t_{min} 为反时限保护最小动作延时； A 为发电机承受工频负序电流能力的常数，由主机厂提供，； $I_{eq,2}$ 为采用式 1 折算的等效工频负序电流； $I_{2\infty}$ 为发电机长期允许负序电流值； I_{set} 为定时限电流定值； I_n 为发电机额定电流值； I_{pk} 为反时限保护电流启动值；

发散保护判据为：

$$I_{eq,2}(n) > I_{eq,2}(n-T) \quad \text{式 8}$$

$$Cnt > C_{set} \quad \text{式 9}$$

其中，T 为数据比较间隔定值， C_{set} 为发散计数定值；

当所述的的定时限、反时限保护启动时，对式 8 进行判别，若式 8 满足，则对应的计数器 Cnt 加 1；如果保护没有启动或式 8 不满足，则计数器 Cnt 减 1，直至减到 0 为止；当式 9 满足时，判为出现持续发散，保护装置报警或跳闸。

6、如权利要求 1 或 2 所述的发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法,其特征是：用固定采样频率采集发电机的三相电流信号。

7、如权利要求 1 或 2 所述的发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法,其特征是：修正系数 $k_{m,1}$ 和 $k_{m,2}$ 采用电磁场有限元的计算方法准确地定量计算次同步电枢电流在转子上产生的损耗，由此确定准确的 $k_{m,1}$ 和 $k_{m,2}$ 。

8、如权利要求 2 或 3 所述的发电机次同步电流计算和次同步过电流及发散保护方法,其特征是：次同步发散的过程不会太快，因此数据比较间隔定值 T 的取值按其对应的时间在 0.02s~1s 的范围内来确定；当电力系统出现短路、断路、重合闸、甩负荷等扰动时，会使电流信号中出现次同步频段的量，但其衰减很快，一般在 0.2s~0.5s 内可衰减完毕；发散计数定值按躲过这个衰减时间来确定。

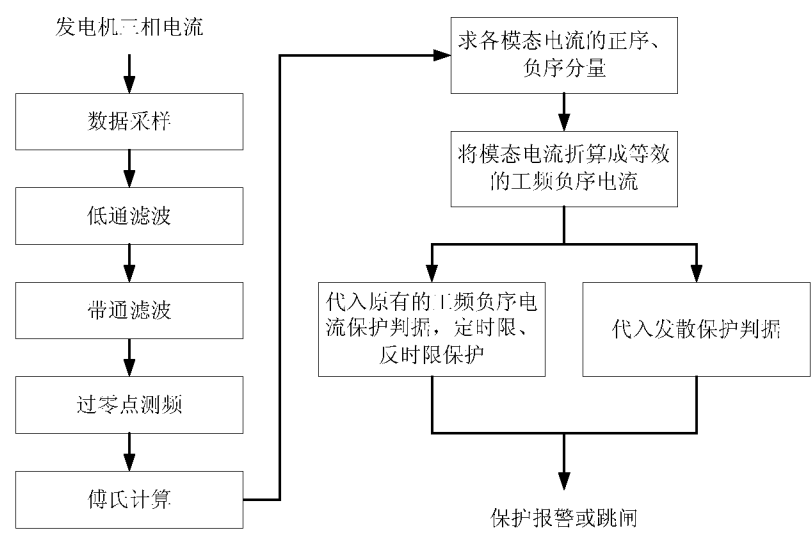


图 1

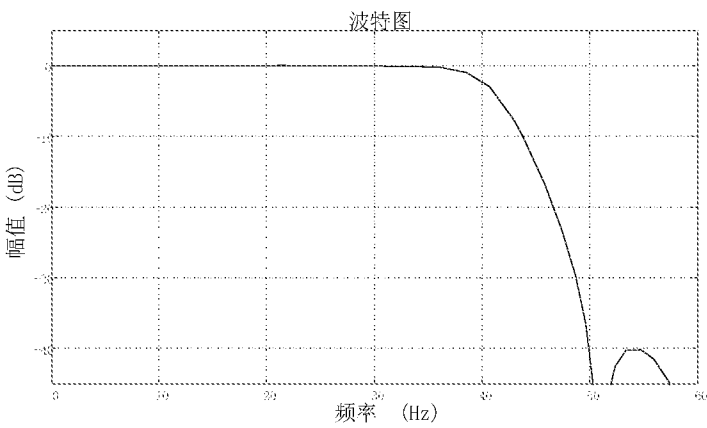


图 2

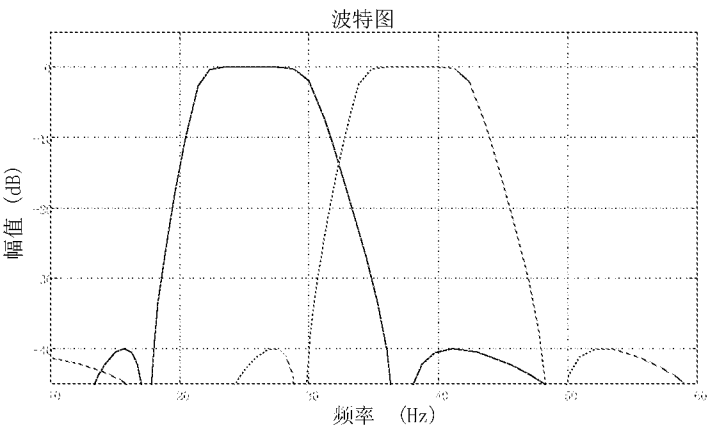


图 3

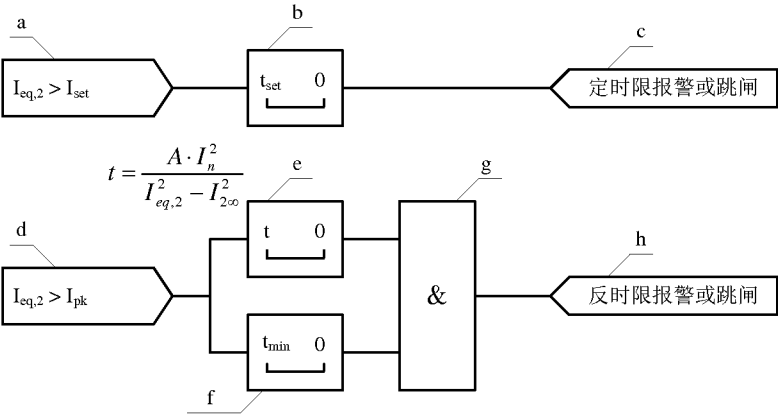


图 4

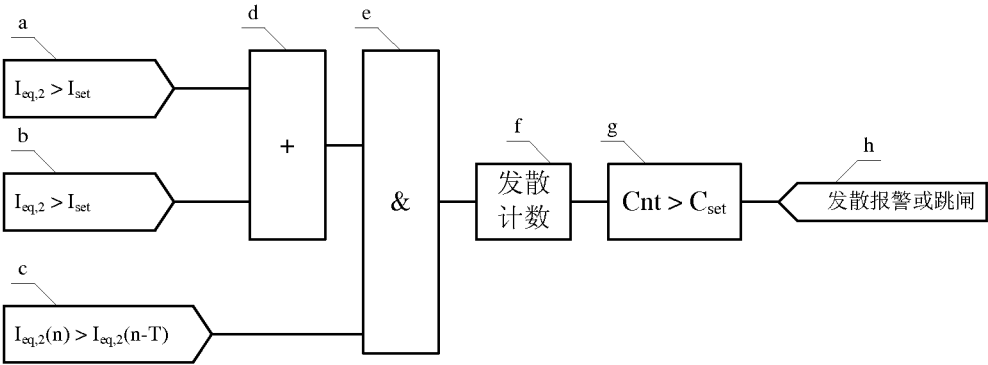


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/2012/073327

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See the extra sheet

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC:H02J, H02H, H02P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI EPODOC CNPAT CNKI TORSIONAL SUBSYNCHRONOUS DETECT MONITOR SSR SSO

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US4218718A (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP) 19 Aug.1980(19.08.1980) the description, column 5 line 45 to column 10 line 33, Fig. 4	1-8
A	CN1093171A(UNIV QINGHUA) 05 Oct.1994(05.10.1994) the whole document	1-8
A	JP2000224896A (DENGGEN KAIHATSU KK etc.) 11 Aug. 2000(11.08.2000)) the whole document	1-8
P,X	CN102185283A(NANJING NARI-RELAYS ENG TECHNOLOGY CO etc.) 14 Sep. 2011 (14.09.2011) claims 1-8	1-8

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents: “A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art “&”document member of the same patent family
Date of the actual completion of the international search 15 Jun.2012(15.06.2012)	Date of mailing of the international search report 12 Jul.2012(12.07.2012)	
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10)62019451	Authorized officer XIAO, Jijun Telephone No. (86-10)62411808	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/2012/073327

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
US4218718A	19.08.1980	DE2944522A	22.05.1980
		E7909203A	09.06.1980
		GB2037511A	09.07.1980
		FR2441284A	11.07.1980
		BR7907180A	16.09.1980
		GB2037511B	10.11.1982
		IT1125623B	14.05.1986
CN1093171A	05.10.1994	CN1029647C	30.08.1995
JP2000224896A	11.08.2000	JP3184812B2	09.07.2001
CN102185283A	14.09.2011	NONE	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/2012/073327

Continuation of: Box A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER , second sheet

H02J3/24 (2006.01)i

G01R23/16 (2006.01)i

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2012/073327

A. 主题的分类

见附加页

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: H02J, H02H, H02P

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

WPI EPODOC CNPAT CNKI 次同步 检测 监测 电流 振荡 谐振 负序 正序 TORSIONAL
SUBSYNCHRONOUS DETECT MONITOR SSR SSO

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	US4218718A (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP) 19.8 月 1980 (19.08.1980) 说明书第 5 栏 45 行至第 10 栏 33 行, 附图 4	1-8
A	CN1093171A (清华大学) 05.10 月 1994(05.10.1994) 全文	1-8
A	JP2000224896A (DENGEN KAIHATSU KK 等) 11.8 月 2000(11.08.2000) 全文	1-8
P,X	CN102185283A (南京南瑞继保电气有限公司等) 14.9 月 2011(14.09.2011) 权利要求 1-8	1-8

☐ 其余文件在 C 栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期
15.6 月 2012(15.06.2012)

国际检索报告邮寄日期
12.7 月 2012 (12.07.2012)

ISA/CN 的名称和邮寄地址:
中华人民共和国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088
传真号: (86-10)62019451

受权官员

肖继军
电话号码: (86-10) **62411808**

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2012/073327

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
US4218718A	19.08.1980	DE2944522A	22.05.1980
		SE7909203A	09.06.1980
		GB2037511A	09.07.1980
		FR2441284A	11.07.1980
		BR7907180A	16.09.1980
		GB2037511B	10.11.1982
		IT1125623B	14.05.1986
CN1093171A	05.10.1994	CN1029647C	30.08.1995
JP2000224896A	11.08.2000	JP3184812B2	09.07.2001
CN102185283A	14.09.2011	无	

续：第 2 页 A.主题的分类

H02J3/24 (2006.01)i

G01R23/16 (2006.01)i