



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101621271 B

(45) 授权公告日 2012. 01. 11

(21) 申请号 200910184027. X

(56) 对比文件

(22) 申请日 2009. 07. 31

CN 101436035 A, 2009. 05. 20, 全文.

CN 101359875 A, 2009. 02. 04, 全文.

(73) 专利权人 国网电力科学研究院

CN 101394200 A, 2009. 03. 25, 全文.

地址 210003 江苏省南京市南瑞路 8 号

专利权人 南京南瑞集团公司

审查员 马永祥

(72) 发明人 吕宏水 冯炜 杨波 王德顺

徐晓楠 柴佳

(74) 专利代理机构 南京苏科专利代理有限责任

公司 32102

代理人 牛莉莉

(51) Int. Cl.

H02P 1/30 (2006. 01)

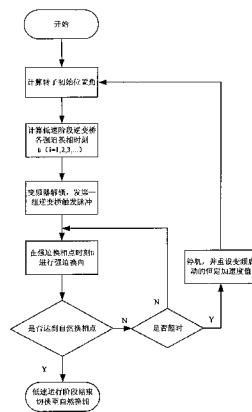
权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 6 页

(54) 发明名称

抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法

(57) 摘要

抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法,包括:计算转子初始位置;根据预设恒定加速度值估算低速阶段逆变桥各强迫换相点时刻;在变频器解锁时刻,根据转子初始位置所属的区间,让指定的两相绕组通电;在强迫换相点时刻,整流桥转入逆变运行方式,待变频器回路断流,逆变桥各桥臂可靠关断后,根据此时转子位置角所属区间,给指定的两相绕组所对应的晶闸管桥臂发触发脉冲,同时整流桥转入到整流运行方式,单次强迫换相结束;如果转子速度大于或等于机组额定转速的 5%,则低速运行阶段结束,切换到基于机端电压的自然换相阶段,否则再次强迫换相。如果启动超时,则调整恒定加速度值预设值,重新启动,直到启动成功。本发明只需要调整机组启动恒定加速度设定值,即可实现抽水蓄能电站机组低速阶段的快速可靠变频启动。



1. 抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法,包括以下步骤:

1) 计算转子初始位置角  $\theta$ ;

2) 采用公式 (1) 估算以变频器解锁时刻  $t_0$  为起始点的低速阶段逆变桥各强迫换相点时刻  $t_i$ ,

$$t_i = \begin{cases} \sqrt{\frac{2[\theta - \frac{\pi}{3} \bmod(\frac{3\theta}{\pi})]}{a}} & i=1 \\ \sqrt{(t_{i-1} - t_0)^2 + \frac{2\pi}{3a}} & i=2, 3, \dots \end{cases} \quad (1)$$

上式中,  $a$  为机组变频启动的恒定加速度值,  $\theta$  为转子初始位置角,  $\bmod$  表示整除运算;

3) 变频器解锁, 整流桥进入整流运行方式, 在变频器解锁时刻, 根据转子初始位置角  $\theta$  所属的区间, 给能够使机组产生最大反向转矩的两相绕组所对应的晶闸管桥臂触发脉冲, 从而使得机组开始反向旋转;

4) 在强迫换相点时刻  $t_i$ , 整流桥由整流运行方式转入逆变运行方式, 待变频器回路断流, 逆变桥各桥臂可靠关断后, 根据此时转子位置角所属区间, 给能够使机组产生最大反向转矩的两相绕组所对应的晶闸管桥臂触发脉冲, 同时整流桥转入到整流运行方式, 单次强迫换相结束, 转至步骤 5);

5) 如果转子速度大于或等于机组额定转速的 5%, 则低速运行阶段结束, 切换到基于机端电压的自然换相阶段, 否则转至步骤 4)。

2. 根据权利要求 1 所述的抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法, 其特征是: 所述步骤 5) 中还进行启动超时判断, 从变频器解锁时刻开始计时, 如果经过超时时间  $T$  后, 转子速度仍然小于机组额定转速的 5%, 则启动超时, 停机并重新调整机组变频启动的恒定加速度值  $a$ , 并转至步骤 1), 超时时间  $T$  的取值范围为 [30s, 50s]。

3. 根据权利要求 1 所述的抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法, 其特征是: 机组首次运行时, 步骤 4) 中机组变频启动的恒定加速度值  $a$  根据转子运动方程

$$a = \frac{T_e - T_M}{H}$$

估算而得, 式中  $T_e$  为静止变频器提供的电磁转矩,  $T_M$  为机组启动阻力矩,  $H$  为机组惯性时间常数。

4. 根据权利要求 1 所述的抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法, 其特征是步骤 1) 中, 计算转子初始位置角  $\theta$  的方法是: 在机组处于静止状态时, 对转子突加励磁, 使励磁电流上升, 在励磁电流上升的过程中, 时时检测定子三相绕组感应出的线电压  $u_{ab}$ 、 $u_{bc}$ 、 $u_{ca}$ , 并计算准转子初始位置角  $\theta'$ , 准转子初始位置角  $\theta'$  伴随励磁电流的上升逐渐逼近真实的转子初始位置角, 当励磁电流上升至空载额定励磁电流 1.2-1.8 倍时的, 准转子初始位置角  $\theta'$  设定为转子初始位置角  $\theta$ 。

5. 根据权利要求 1 所述的抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法, 其特征是: 在上一次启动成功的恒定加速度设定值基础上增加  $0.2 \text{ rad/s}^2$  用于本次启动, 如此递推, 调试若干次, 直至首次出现启动失败的情况, 则该次启动失败的恒定加速度设定值减去  $0.2 \text{ rad/s}^2$  后的差值, 即为机组启动恒定加速度的最佳设定值。

6. 根据权利要求 1 所述的抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法, 其特征

是：所述步骤 2)、3) 同时进行。

7. 根据权利要求 1 所述的抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法,其特征是：步骤 2) 在步骤 3) 之后进行。

## 抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段无位置传感器的启动控制方法,属于抽水蓄能电站静止变频启动技术。

### 背景技术

[0002] 目前,在各国,抽水蓄能电站一般都将静止变频启动作为首选的启动方式,在抽水蓄能电站自动控制系统及成套设备中,静止变频器为其中的关键启动设备,对于保证大型抽水蓄能机组的快速可靠启动和抽水蓄能电站的稳定运行具有重要意义。长期以来,我国大型抽水蓄能电站控制系统设备一般采用与主机捆绑招标的方式从国外引进,国内的研究单位和设备厂商参与甚少。因此,国内在此方面的研究很少,尤其在抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段无位置传感器启动的控制这一核心技术方面,国内尚无文献对此进行深入研究。

[0003] 抽水蓄能电站静止变频器为“交-直-交”电流源型,整流桥将交流电整流成直流电,逆变桥再将直流电逆变为频率可调的交流电,中间的平波电抗器用于整流桥输出后的平波和去耦,使变频器主回路的直流电流波形平直、脉动小,具有电流源特性。基本工作原理为:控制系统根据电机转速和位置信号,控制晶闸管静止变频装置对同步电机进行变频调速,从而产生从零到额定频率值的变频电源,同步地将机组拖动起来。

[0004] 抽水蓄能电站静止变频启动过程主要分为人工强迫换相和基于机端电压的自然换相两个阶段。在自然换相阶段,机端电压已较高,完全可以利用电压互感器测量得到的机端电压信号的过零点来作为逆变桥换相依据,但是抽水蓄能机组作水泵方式变频启动前,转子处于静止状态,由于在磁通一定的情况下,机端电压和频率成正比,所以机组端电压的幅值为零,并且低速阶段机端电压也非常微弱,导致定子或转子侧电流因转子位置变化而引起的变化量也非常微弱,很难从相关电气测量量得到转角位置信号。因此,变频启动低速阶段无位置传感器的启动控制技术成为我国抽水蓄能电站静止变频启动装置国产化的一个技术难点。

### 发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题是,克服现有技术的缺点,提供的抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段无位置传感器的启动控制方法,为大电网多区域的在线安全稳定控制决策提供当前状态下最真实的运行方式。

[0006] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案如下:抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法,包括以下步骤:

[0007] 1) 计算转子初始位置角  $\theta$ ;

[0008] 2) 采用公式 (1) 估算以变频器解锁时刻  $t_0$  为起始点的低速阶段逆变桥各强迫换相点时刻  $t_1$ ,

$$[0009] \quad t_i = \begin{cases} \sqrt{\frac{2[\theta - \frac{\pi}{3} \bmod(\frac{3\theta}{\pi})]}{a}} & i=1 \\ \sqrt{(t_{i-1} - t_0)^2 + \frac{2\pi}{3a}} & i=2, 3, \dots \end{cases} \quad (1)$$

[0010] 上式中, a 为机组变频启动的恒定加速度值,  $\theta$  为转子初始位置角, mod 表示整除运算;

[0011] 3) 变频器解锁, 整流桥进入整流运行方式, 在变频器解锁时刻, 根据转子初始位置角  $\theta$  所属的区间, 给能够使机组产生最大反向转矩的两相绕组所对应的晶闸管桥臂触发脉冲, 从而使得机组开始反向旋转;

[0012] 4) 在强迫换相点时刻  $t_i$  (在恒定加速度值 a 选取恰当的情况下, 此时转子位置角已位于下一个区间内), 整流桥由整流运行方式转入逆变运行方式, 待变频器回路断流, 逆变桥各桥臂可靠关断后, 根据此时转子位置角所属区间, 给能够使机组产生最大反向转矩的两相绕组所对应的晶闸管桥臂触发脉冲, 同时整流桥转入到整流运行方式, 单次强迫换相结束, 转至步骤 5);

[0013] 5) 如果转子速度大于或等于机组额定转速的 5%, 则低速运行阶段结束, 切换到基于机端电压的自然换相阶段, 否则转至步骤 4)。

[0014] 其中, 步骤 2)、3) 可同时进行, 也可颠倒进行, 即先做步骤 3)、再做步骤 2)。

[0015] 在机组首次运行时, 不知道恒定加速度值 a 的情况下, 机组变频启动的恒定加速度值 a 可以根据转子运动方程  $a = \frac{T_e - T_M}{H}$  估算而得, 式中  $T_e$  为静止变频器提供的电磁转矩,  $T_M$  为机组启动阻力矩, H 为机组惯性时间常数; 恒定加速度值 a 也可根据经验进行选取并调试。

[0016] 步骤 5) 中还进行启动超时判断, 从变频器解锁时刻开始计时, 如果经过超时时间 T 后, 转子速度仍然小于机组额定转速的 5%, 则启动超时, 停机并重新调整机组变频启动的恒定加速度值 a, 并转至步骤 1), 超时时间 T 的取值范围为 [30s, 50s]。只需要做有限次的试验就可以获得符合要求的恒定加速度值 a。

[0017] 本发明的原理如下: 转子每转过  $360^\circ$  电角度 (即  $360^\circ / p$  机械角度, p 为机组极对数), 将其划分为 6 各区间, 每个区间跨度为  $60^\circ$  电角度, 每当转子转过  $60^\circ$  电角度时, 则表明转子位置已进入下一区间。每个区间对应两相可使处于该区间内的转子获得最大反向力矩的绕组, 如果确定转子位置角, 就能通过对相应的两相绕组通电使得转子获得最大反向力矩。本发明的难点在于如何在没有位置传感器的情况下, 判断转子是否进入下一区间或者说转子是否转过了  $60^\circ$  电角度。申请人想到, 假设转子以一个恒定的加速度旋转, 则可根据动力学方程计算得到转子每转过  $60^\circ$  电角度的时刻, 结合转子初始位置角, 就可知道一系列转子进入下一区间的时刻, 该时刻就是本发明所述的强迫换相点时刻, 在强迫换相点时刻对与区间相应的两相绕组通电, 即可获得最大旋转力矩, 使机组在最短的时间内得以启动。

[0018] 本发明所提出的抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段无位置传感器的启动控制方法, 具有以下明显优点:

[0019] 1、根据蓄能机组发电电动机转子初始位置，并利用所设定的机组启动恒定加速度计算出低速阶段逆变桥各强迫换相点时刻，结合转子运动方程步进式地使转子转速平滑上升至脉冲换相结束点（自然换相点）。

[0020] 2、调试简单。只需调整一个非电气量参数——机组启动恒定加速度的设定值，一旦调试达到较好启动效果，以后则均按此加速度设定值实现机组低速阶段的变频启动。

[0021] 3、参数可调范围大。所需调整的参数——机组启动恒定加速度的设定值在较大范围内取值，均能确保机组低速阶段变频启动成功。

[0022] 4、易获得最优启动性能。可在上一次启动成功的恒定加速度设定值基础上增加  $0.2\text{rad/s}^2$  用于本次启动，如此递推，调试若干次，直至首次出现启动失败的情况，则该次启动失败的恒定加速度设定值减去  $0.2\text{rad/s}^2$  后的差值，即为机组启动恒定加速度的最佳设定值，机组低速阶段变频启动将不仅时间最短，而且转速曲线的线性度最好。

### 附图说明

[0023] 图 1 抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制流程 1。

[0024] 图 2 抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制流程 2。

[0025] 图 3 抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制流程 3。

[0026] 图 4 抽水蓄能机组静止变频启动系统结构图。

[0027] 图 5 为静止变频启动低速阶段设定恒定加速度  $a = 2.0\text{rad/s}^2$  时转速仿真上升曲线。

[0028] 图 6 为静止变频启动低速阶段设定恒定加速度  $a = 2.2\text{rad/s}^2$  时转速仿真上升曲线。

[0029] 图 7 为静止变频启动低速阶段设定恒定加速度  $a = 3.0\text{rad/s}^2$  时转速仿真上升曲线。

[0030] 图 8 为静止变频启动低速阶段设定恒定加速度  $a = 4.0\text{rad/s}^2$  时转速仿真上升曲线。

[0031] 图 9 为静止变频启动低速阶段设定恒定加速度  $a = 5.2\text{rad/s}^2$  时转速仿真上升曲线。

[0032] 图 10 为静止变频启动低速阶段设定恒定加速度  $a = 5.4\text{rad/s}^2$  时转速仿真上升曲线。

### 具体实施方式

[0033] 下面参照附图并结合实例对本发明作进一步详细描述。但是本发明不限于所给出的例子。

[0034] 本发明所提出的抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段无位置传感器的启动控制方法，应用于抽水蓄能机组变频启动过程中低速阶段，具体包括以下步骤（流程图见图 1）：

[0035] 抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法，包括以下步骤：

[0036] 1) 计算转子初始位置角  $\theta$ ；

[0037] 静止状态转子初始位置角计算方法有多种，本例中选用的方法如下：在抽水蓄能机组处于静止状态时，对转子突加励磁，使励磁电流上升，在励磁电流上升的过程中，时时

检测定子三相绕组感应出的线电压  $u_{ab}$ 、 $u_{bc}$ 、 $u_{ca}$ ，并计算准转子初始位置角  $\theta'$ ，准转子初始位置角  $\theta'$  伴随励磁电流的上升逐渐逼近真实的转子初始位置角，当励磁电流上升至空载额定励磁电流 1.2-1.8 倍时的，准转子初始位置角  $\theta'$  设定为转子初始位置角  $\theta$ 。该方法较为简单易行，属于本领域常规技术。

[0038] 2) 采用公式 (1) 估算以变频器解锁时刻  $t_0$  为起始点的低速阶段逆变桥各强迫换相点时刻  $t_i$ ，

$$[0039] \quad t_i = \begin{cases} \sqrt{\frac{2[\theta - \frac{\pi}{3} \bmod(\frac{3\theta}{\pi})]}{a}} & i=1 \\ \sqrt{(t_{i-1} - t_0)^2 + \frac{2\pi}{3a}} & i=2, 3, \dots \end{cases} \quad (1)$$

[0040] 上式中， $a$  为机组变频启动的恒定加速度值， $\theta$  为转子初始位置角， $\bmod$  表示整除运算；

[0041] 当机组首次运行或不确定机组变频启动的恒定加速度值时，则需要对该恒定加速度值进行设定，该加速度值可以根据经验设定，也可以根据转子运动方程式估算：

$a = \frac{T_e - T_M}{H}$ ，式中  $T_e$  为静止变频器提供的电磁转矩， $T_M$  为机组启动阻力矩， $H$  为机组惯性时间常数。

[0042] 3) 变频器解锁，整流桥进入整流运行方式，在变频器解锁时刻，根据转子初始位置角  $\theta$  所属的区间，给能够使机组产生最大反向转矩的两相绕组通电，从而使得机组开始反向旋转；本步骤中，使绕组通电的方法是：给该两相绕组所对应的晶闸管桥臂发出触发脉冲。

[0043] 本实施例中的具体做法如下：如图 4 所示为抽水蓄能机组静止变频启动系统结构图，其中晶闸管桥臂 T11-T16 构成整流桥，晶闸管桥臂 T21-T26 为逆变桥。根据计算所得的转子初始位置角值  $\theta$ ，结合表 1，确定  $\theta$  所在区间所对应的扇区编号  $n$  ( $1 \leq n \leq 6$ )。导通管编号所对应的晶闸管桥臂见附图 4 所示。同时，脉冲编码为使对应桥臂导通的控制命令编码。控制系统确定扇区后，发出对应的脉冲编码给触发系统，触发系统发出第一组触发脉冲，使扇区  $n$  对应的导通桥臂导通，使得电机在该转角位置获得最大的启动加速力矩，电机开始反向旋转。

[0044] 表 1 脉冲换相向量控制

[0045]

电机方向	扇区编号	转子位置区间	导通桥臂编号	脉冲编码
反转	1	60° ~ 120°	T26 T25	000011
	2	0° ~ 60°	T25 T24	000110
	3	300° ~ 360°	T24 T23	001100
	4	240° ~ 300°	T23 T22	011000
	5	180° ~ 240°	T22 T21	110000
	6	120° ~ 180°	T21 T26	100001

[0046] 注：规定发电状态时转子的旋转方向为正转。换向超前角  $\gamma = 0^\circ$

[0047] 4) 在强迫换相点时刻  $t_i$ ，整流桥由整流运行方式转入逆变运行方式，待变频器回路断流，逆变桥各桥臂可靠关断后，根据此时转子位置角所属区间，给能够使机组产生最大反向转矩的两相绕组所对应的晶闸管桥臂发触发脉冲，同时整流桥转入到整流运行方式，单次强迫换相结束，转至步骤 5)；

[0048] 本实施例中具体的做法是：控制系统给逆变桥发出一组新的逆变桥触发脉冲，即该组新的触发脉冲的组合编码为将上一次（步骤七所发脉冲编码序号）触发脉冲的六位二进制组合编码全部循环左移一位所得，（其中，如若上一次编码为“110000”或“100001”即“48”或“33”，则本次编码应为“100001”或“000011”即“33”或“3”）。

[0049] 5) 判断转子是否达到自然换相点，如果转子速度大于或等于机组额定转速的 5%（机组参数不同判断的阈值会有所调整），则低速运行阶段结束，切换到基于机端电压的自然换相阶段，否则转至步骤 4)。

[0050] 如图 2 或图 3 所示，步骤 5) 中述进行了超时判断，即从变频器解锁时刻开始计时，如果经过超时时间 T 后，转子速度仍然小于机组额定转速的 5%，则启动超时，重新调整机组变频启动的恒定加速度值 a，并转至步骤 1)，超时时间 T 的取值范围为 [30s, 50s]。如图 2 所示，超时判断置于自然换相点判断之前，如果判断超时，则停机并重新调整整机组变频启动的恒定加速度值 a，并转至步骤 1)，如果不超时，则进行自然换相点判断。如图 3 所示，超时判断置于自然换相点判断之后，如果还未到达自然换相点，则进行超时判断，如果超时，则停机并重新调整整机组变频启动的恒定加速度值 a，并转至步骤 1)，如果不超时，则继续在强迫换相点时刻进行强迫换相。

[0051] 本发明还提供了一种优化选取恒定加速度值 a 的方案，即在上一次启动成功的恒定加速度设定值基础上增加  $0.2\text{rad/s}^2$  用于本次启动，如此递推调试若干次，直至首次出现启动失败的情况，则该次启动失败的恒定加速度设定值减去  $0.2\text{rad/s}^2$  后的差值，即为机组启动恒定加速度的最佳设定值，机组低速阶段变频启动将不仅时间最短，而且转速曲线的线性度最好。

[0052] 综上所述，本发明所提出的抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段启动控制方法，只要简单调整一个非电气量参数——机组启动恒定加速度设定值 a，且 a 在较大范围内便可保证抽水蓄能电站机组低速阶段变频成功启动。是抽水蓄能电站静止变频启动低速阶段有效的启动方法。并可以通过对 a 值的优化调整，达到改善及提高机组低速阶段变频启动



时间特性及优化机组的启动转速曲线的目的。

[0053] 仿真示例：

[0054] 下面参照附图并结合潘家口抽水蓄能电站对本发明作进一步详细描述。但是本发明不限于所给出的例子。潘家口抽水蓄能电站静止变频器为 6 脉波高-高结构。基于潘家口抽水蓄能电站静止变频器实际参数,估算  $a$  值得  $a = 3.0\text{rad/s}^2$ , 设定当机组转速从零上升到转速  $w = -15.7\text{rad/s}$  (以电动机旋转方向为负方向), 作为自然换相点速度值。此时机端电压已足够大, 可以由变频启动低速阶段的人工强迫换相切换到基于机端电压的自然换相。

[0055] 采用电力系统实时数字仿真器 (RTDS) 对潘家口蓄能电厂静止变频启动系统建立实时数字仿真模型, 对此发明的方法进行了仿真验证。按照本发明所提出的控制步骤, 设定加速度  $a = 3.0\text{rad/s}^2$ , 转速曲线如图 7 所示, 转速能达到  $w = -15.7\text{rad/s}$ , 显然启动成功。为获得更好的启动性能, 则在上一次启动成功的恒定加速度设定值基础上增加  $0.2\text{rad/s}^2$  用于本次启动, 如此递推, 经过 13 次静止变频启动, 当  $a = 5.4\text{rad/s}^2$  时, 首次出现启动失败情况, 则  $a = 5.2\text{rad/s}^2$  为机组启动恒定加速度的最佳设定值, 以后低速阶段变频启动均按设定值  $a = 5.2\text{rad/s}^2$  启动。

[0056] 下面结合本发明的控制步骤, 对按照最佳加速度设定值  $a = 5.2\text{rad/s}^2$  进行启动情况进行详细说明。控制流程按照步骤 1) 至步骤 5) 依次进行。由步骤 1) 计算得到转子初始位置角  $\theta = 180.143^\circ$ 。定义变频器解锁时刻为时间参考点, 则经过步骤 2) 计算得到得逆变桥各强迫换相点时刻  $t_i$  如表 2 所示。

[0057] 表 2  $\theta = 180.143^\circ$ 、 $a = 5.2\text{rad/s}^2$  时逆变桥各强迫换相点时刻表

[0058]

逆变桥第 $i$ 个换相点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
该换相点时刻(s)	0.031	0.658	0.914	1.113	1.281	1.429	1.563	1.687	1.802	1.91
逆变桥第 $i$ 个换相点	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
该换相点时刻(s)	2.013	2.111	2.2	2.29	2.376	2.459	2.54	2.618	2.694	2.768
逆变桥第 $i$ 个换相点	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
该换相点时刻(s)	2.84	2.91	2.978	3.045	3.11	3.174	3.237	3.299	—	—

[0059] 当启动达到各换相时刻后, 控制系统进行强迫换相, 一旦转速达到  $w = -15.7\text{rad/s}$ , 则停止按表 2 各时刻依次发送逆变桥触发脉冲, 机组转入自然换相方式运行。抽水蓄能机组静止变频启动低速阶段启动完毕。

[0060] 为方便比较, 当  $a = 2\text{rad/s}^2$ 、 $a = 2.2\text{rad/s}^2$ 、 $a = 3\text{rad/s}^2$ 、 $a = 4\text{rad/s}^2$ 、 $a = 5.2\text{rad/s}^2$ 、 $a = 5.4\text{rad/s}^2$  时的仿真结果分别如图 5 ~ 10 所示。不同启动恒定加速度情况下的机组转速上升曲线可见：

[0061] 当设定的启动恒定加速度  $a$  太小或太大, 如在此仿真中  $a \leq 2.0 \text{rad/s}^2$  或  $a \geq 5.4 \text{rad/s}^2$  时, 低速阶段变频启动失败, 即机组转速在 40s 内未达到  $-15.7 \text{rad/s}$  ;

[0062] 当设定的启动恒定加速度  $a$  大小适当, 如在此仿真中  $a$  在  $2.2 \text{rad/s}^2 \sim 5.2 \text{rad/s}^2$  的较大范围内, 均能变频启动成功 ;

[0063] 在  $a$  保证变频启动成功的较大范围内, 随着  $a$  逐渐增大, 低速阶段变频启动所需的时间逐渐缩短, 转速上升曲线的线性度也越来越好, 当  $a = 5.2 \text{rad/s}^2$  时, 如图 9 所示, 转速曲线几乎呈线性上升且机组低速阶段变频启动最快, 因此, 潘家口蓄能电站的静止变频启动低速阶段  $a = 5.2 \text{rad/s}^2$  时为最佳值。

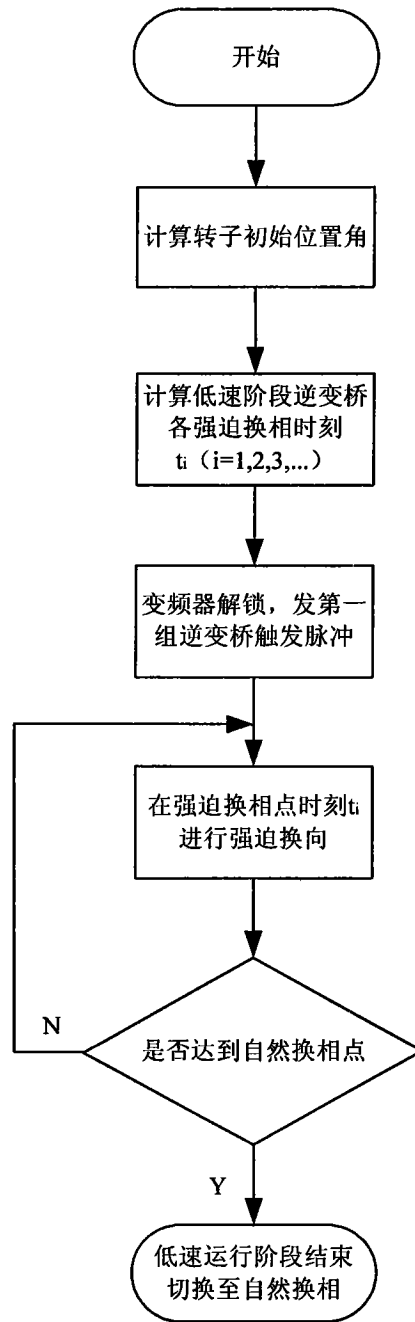


图 1

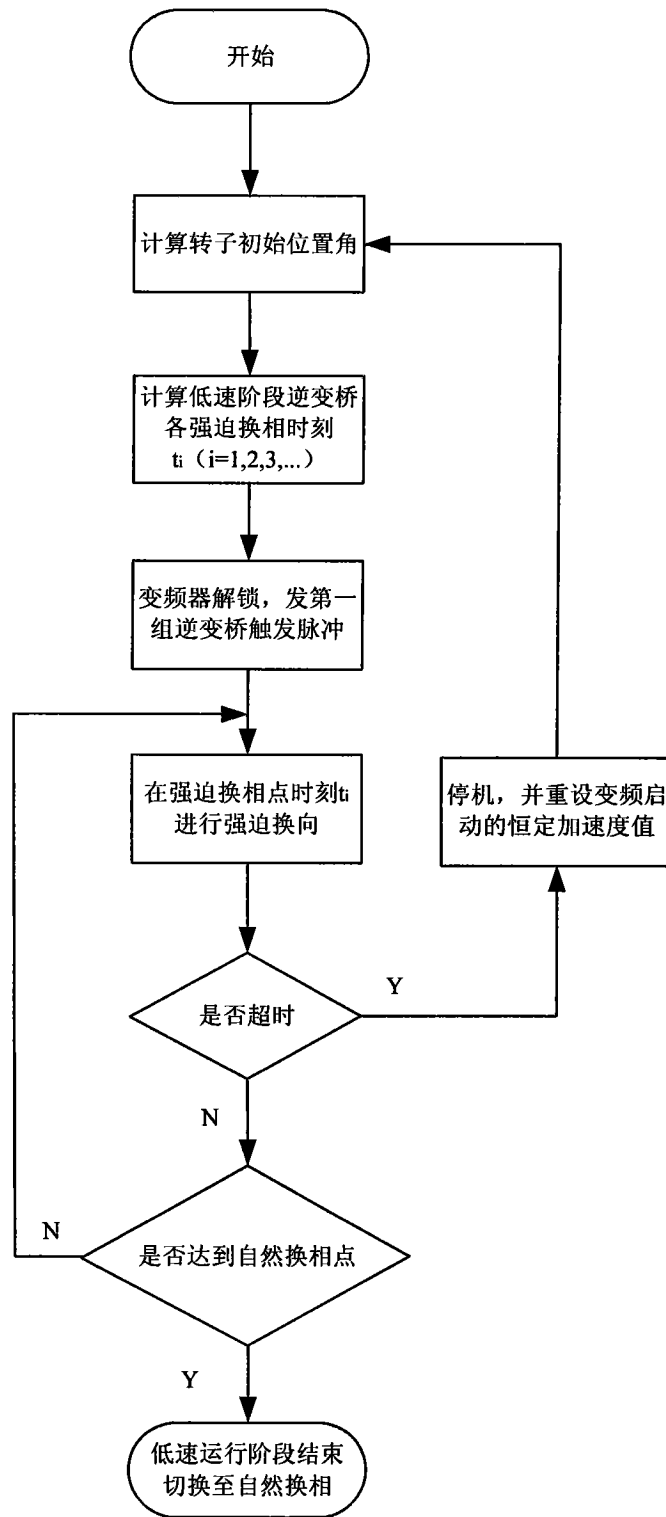


图 2

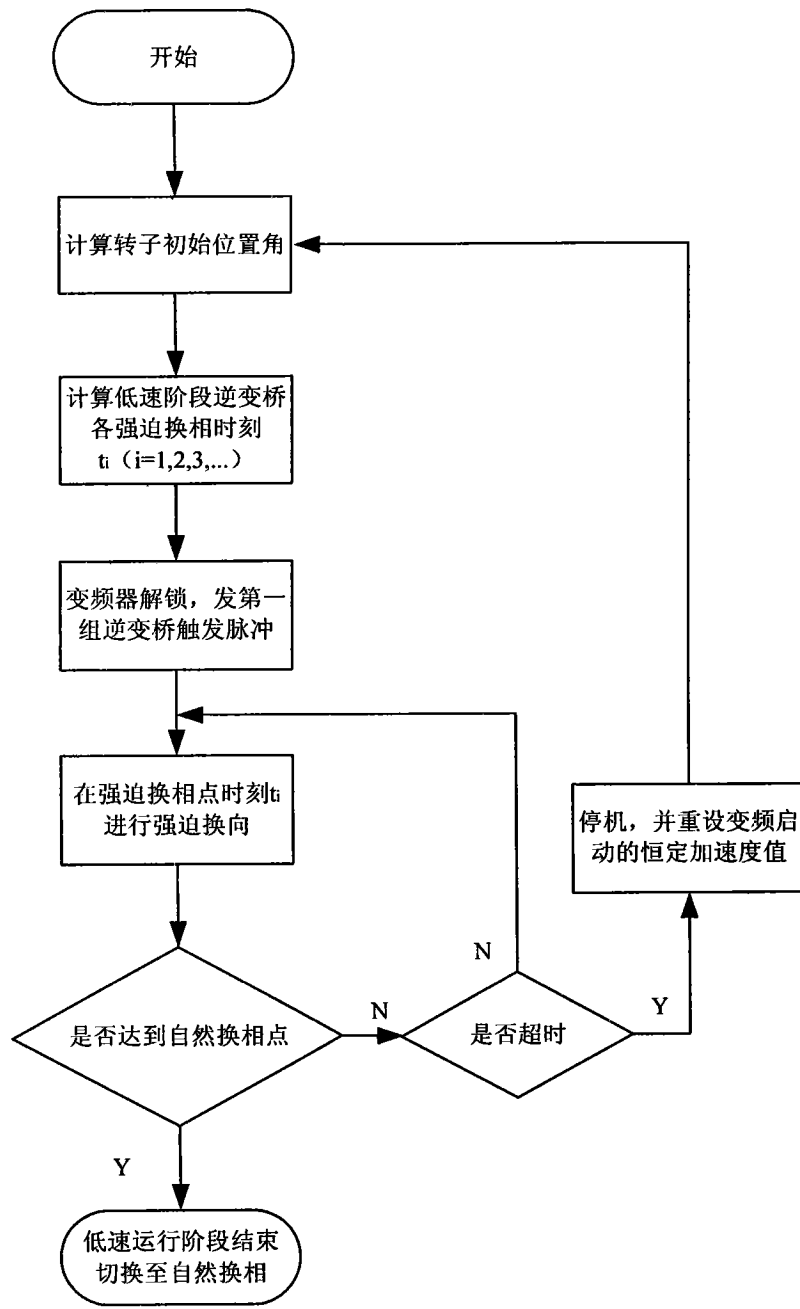


图 3

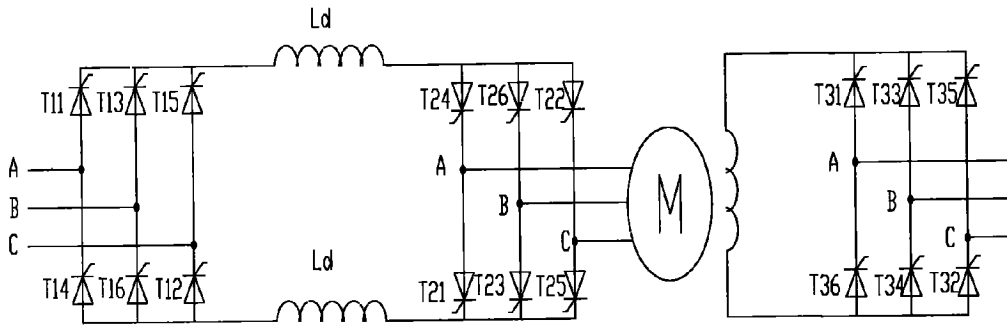


图 4

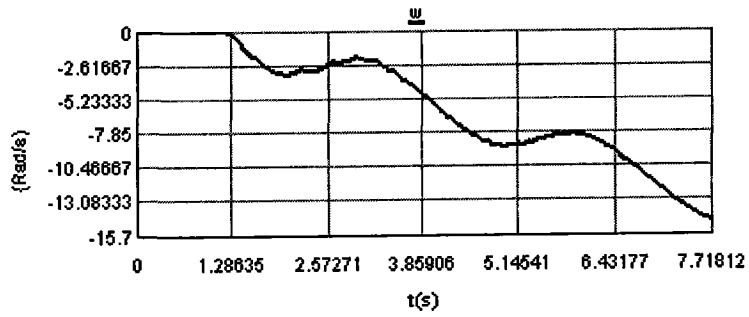


图 5

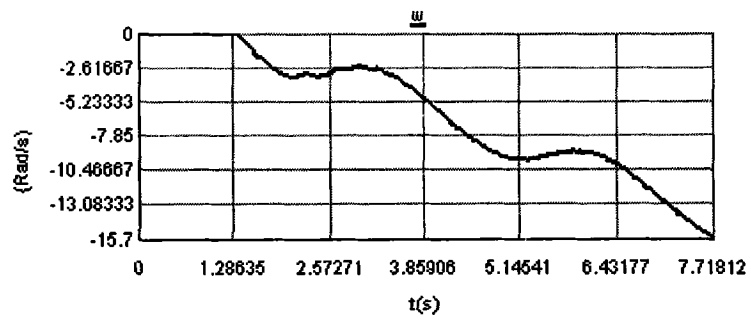


图 6

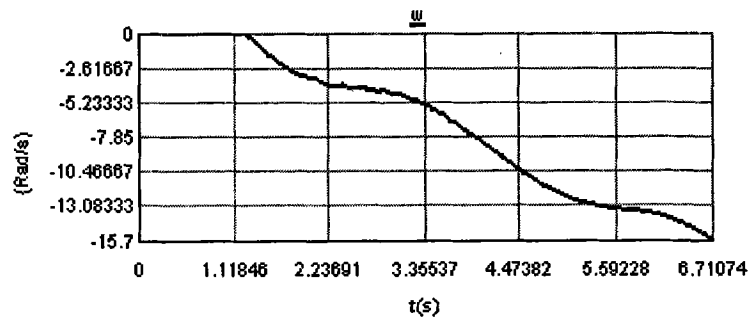


图 7

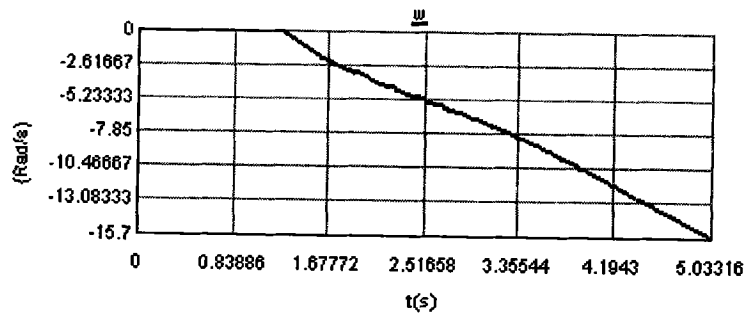


图 8

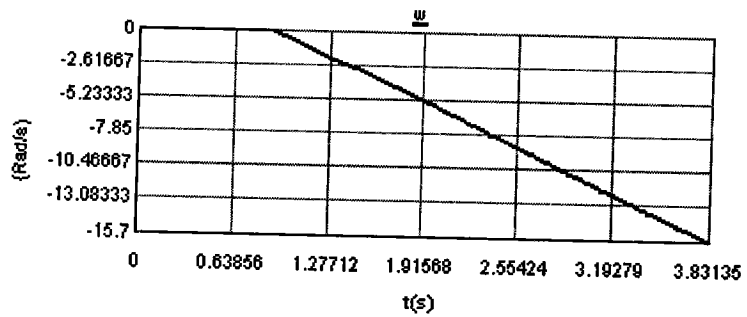


图 9

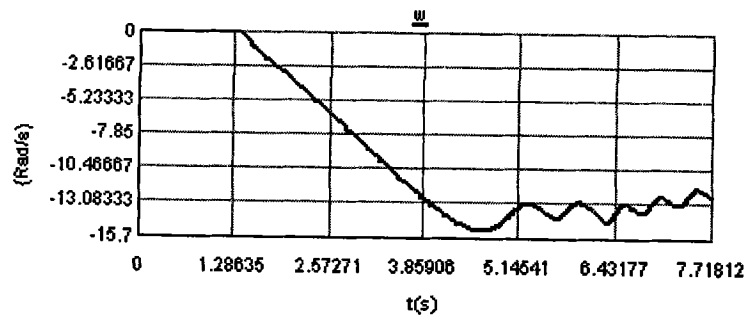


图 10