

无位置传感技术在大型燃气轮机变频起动控制中的应用

提出了一种燃气-蒸汽联合循环机组静止起动控制方法,并结合理想同步电动机的电压、磁链方程,对无位置传感器转子位置检测技术进行了分析。实现了一种包括盘车速度的起动全程速度范围的无位置传感器转子检测技术。建立了燃气-蒸汽联合循环机组静止起动控制系统仿真模型,对燃气-蒸汽联合循环机组静止起动控制算法及数学模型进行了仿真研究,实现了水泵起动过程的转子位置检测、脉冲换相、自然换相及同期控制。证明了在燃气-蒸汽联合循环机组静止起动控制中,该策略是一种有效的控制方法。

张勇红/甘肃省电力公司 王德顺 桑丙玉 姬联涛 鄢盛驰/中国电力科学研究院



张勇红/高级工程师

关键词/Keywords

燃气-蒸汽联合循环 ·
LCI ·
变频起动 ·
无位置传感器 ·

燃气-蒸汽联合循环机组凭借其热效率高、清洁环保以及快速反应性能好等众多特点,在电网中发挥调峰、调频或应急备用等作用。燃气轮机在起动时,必须由其他动力装置来使机组先转动起来,并达到自持转速。这个起动装置是在燃气轮机的控制系统命令下,帮助燃气轮机按照起动程序旋转、点火和升速,最后完成燃气轮机的起动。传统起动方式采用同轴外加起动电动机方式,通过齿轮箱实现不同机械转矩输出,对机组大轴冲击较大,且旋转部件及齿轮箱等部件故障率较高,严重影响了设备的安全稳定运行。机组起动设备作为大型燃气-蒸汽联合循环发电重要组成设备之一,其同涡轮设备、励磁设备等发电装置配合,实现发电机组从静止到自持转速的控制。

采用负载换相逆变器 (Load

Commutated Inverter, LCI), 以变频的方式对发电机起动控制,实现各种工况运行,由于元件静止,通过基于无位置传感器技术实现机组平滑起动,可大大减少电站的检修、维护工作量,提高系统可靠性,保障燃气电站快速起动能力,参与电网调峰、调频。

由于国内引入大型燃气轮机较晚,因此国内针对大型燃气机组静止变频器起动控制技术的研究仍处于空白。文献

[1] 对大型燃气轮机起动模式进行了分析,但控制原理涉及较少。文献[2]对国外不同厂家的燃气机组综合控制技术进行了较详细分析,但针对起动控制策略并未进行描述。文献[3, 4]结合国外燃机变频技术对静止位置时的转子位置检测进行了说明,但未提及具体的检测方法。文献[5, 6]提出了利用反电动势实现无位置传感器无刷直流电动机控制,但电动机在静止或低速阶段由于反电动势较低无法确定换相时刻。文献[7]利用直流母线电压计算换相时刻,适用于电压源型逆变器。文献[8]实现了永磁同步电动机的无速度传感器静止位置检测,但同样仅适用于电压源型逆变器。

本文提出适用于电流源型晶闸管变频的全程无位置传感器燃气-蒸汽联合循环机组静止起动控制方法,解决了燃气机组起动控制技术关键,建立了LCI控制系统模型,并利用仿真验证了所提出的控制算法可以实现燃气-蒸汽联合循环发电机组静止起动控制。

国家科技支撑项目支持 (2013BAA02B01)。

大型燃气机组启动原理

燃气轮机联合循环过程中,经过滤的空气进入压气机,产生的压缩空气一部分与天然气混合,在火焰筒内燃烧,产生高温高压的燃气;另一部分作为冷却介质冷却各高温部件,最后同高温高压的燃气一并进入透平内膨胀做功,带动发电机做功输出电能。此外,燃气轮机的排烟温度较高,其尾部排烟经过烟道排入余热锅炉中,应用热交换器原理产生高温高压的蒸汽,进入蒸汽轮机做功,带动机组发电。运行中燃气轮机产生的功一部分给压缩机提供功率,另一部分为发电机组提供机械功。由于在启动时,燃气轮机没有做功,需要有一套额外的装置供给燃机功率。

为使燃气轮机能够开始运转,目前广泛采用LCI装置,即静止变频启动。当压气机产生足够压缩比的气体时,进入燃烧室的天然气点火燃烧,燃气轮机就开始旋转,当速度升至其自持转速时,燃气轮机就可以自己维持旋转了。即在此速度下,机组可以产生使自己不断升速的功率,且能提供压气机运行所需动力,LCI装置即可退出运行。LCI装置主要包括整流桥、直流电抗器、逆变桥、高压开关和控制系统等,其主电路如图1所示,主回路为六脉波电流源型变频器结构,直流环节采用平波电抗器以抑制电流纹波,保证直流电流连续。

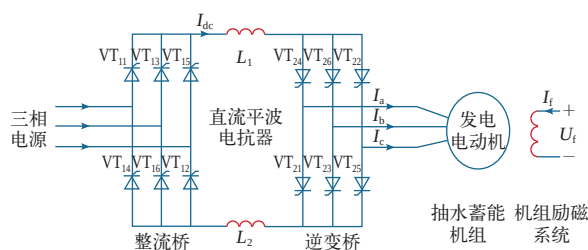


图1 LCI主电路

逆变器的负载是同步电动机,由于采用半控型晶闸管方式实现变频启动,逆变器仅能输出6组电流相量,其对应触发的晶闸管编号分别为VT₂₆、VT₂₁、VT₂₁、VT₂₂、VT₂₂、VT₂₃、VT₂₃、VT₂₄、VT₂₄、VT₂₅、VT₂₅、VT₂₆,对应的同步电动机定子绕组电流如表1所示, I_a 、 I_b 和 I_c 为三相定子电流, I_{dc} 为直流电流。

表1 晶闸管触发引脚与同步电动机定子电流

晶闸管编号	同步电动机定子电流		
	I_a	I_b	I_c
VT ₂₆ 、VT ₂₁	$-I_{dc}$	$+I_{dc}$	0
VT ₂₁ 、VT ₂₂	$-I_{dc}$	0	$+I_{dc}$
VT ₂₂ 、VT ₂₃	0	$-I_{dc}$	$+I_{dc}$
VT ₂₃ 、VT ₂₄	$+I_{dc}$	$-I_{dc}$	0
VT ₂₄ 、VT ₂₅	$+I_{dc}$	0	$-I_{dc}$
VT ₂₅ 、VT ₂₆	0	$+I_{dc}$	$-I_{dc}$

当机组启动时,控制系统使燃气机组从盘车转速启动最终达到自持转速整个过程,需要根据同步机组转子当前的电气位置确定晶闸管的触发编号,按一定顺序提供逆变器输出电流相量给机组定子绕组,保障燃气机组的启动。根据燃机启动的不同阶段,转子位置检测分为三个阶段:盘车速度启动过程、低频阶段强迫换相过程和负载换相启动控制过程。

大型燃气机组变频启动控制策略

LCI控制系统与励磁系统、机组控制系统及涡轮控制系统共同作用,对变频器进行控制,最终实现机组同步变频启动。控制功能模型如图2所示,转速和电流双闭环实现网侧整流阀组的触发控制,使机组转速按透平控制系统速度要求指令运行。电压和励磁双闭环控制机组电压。

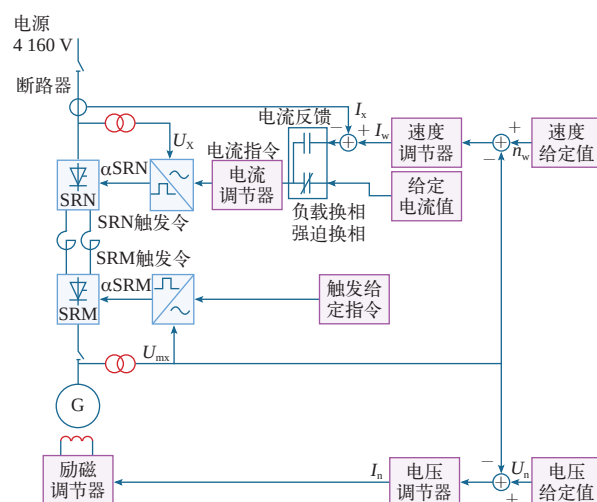


图2 LCI控制功能模型

工作开始前,LCI控制励磁系统突加按一定上升率变化的励磁电流,通过检测机组机端电压,

计算燃机转子在盘车速度时的电气位置。按照为能够产生最大正向转矩的定子绕组通电流，机组加速转动。透平控制系统输出给定速度参考值，经限幅和变化率限制后，与负载侧速度反馈值进行比较，误差信号进入PI调节，PI调节器输出网侧参考电流指令，作为电流调节器的输入。电流闭环控制分为强迫换相及负载换相方式。低速阶段由于机组反电动势未达到负载换相要求，采用强迫换相方式，转速闭环不被开启，电流指令为开环给定。当转速上升、反电动势逐渐增加到满足负载换相要求时（取5 Hz作为切换点），转速闭环被使能。转速调节器输出参考电流指令，经斜率等限制后，同网侧电流反馈值进行比较，差值信号进入电流PI调节器，PI调节器输出网侧整流器整流触发角参考值，对整流侧晶闸管进行触发，最终实现转速控制。逆变器触发角采用定角度控制。

无位置传感器转子位置检测技术应用

1. 盘车转速状态起动控制

燃气机组起动前盘车将燃机拖动至3~4 r/min，此时同步机组虽然已经有一定的转速，但相对于同步转速3 000 r/min很低。该阶段转子位置检测为燃气变频起动控制技术关键。

在转子励磁的情况下，很难产生足够用于计算转子位置的机端感应电动势来实现转子位置检测。此时采用转子突加励磁过程中检测定子感应电动势，并从中解析转子位置信号。在突加励磁电流的瞬间，电动机定子三相绕组中会感应出电动势，利用该电动势，可以推算出转子的位置。

抽水蓄能机组发电电动机为大型同步电动机，其理想模型各绕组的电压平衡方程为

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ld} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{lq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_{fd} \\ i_{ld} \\ i_{lq} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p\psi_a \\ p\psi_b \\ p\psi_c \\ p\psi_{fd} \\ p\psi_{ld} \\ p\psi_{lq} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中， u 、 ψ 分别为定子电压、磁链； r 、 R 分别为定子回路、转子回路电阻；下标a、b、c、fd、1d和1q分别为定子a相绕组、b相绕组、c相绕组、转子励磁绕组、等效纵轴和等效横轴阻尼绕组。

在假定磁路不饱和情况下，各绕组的磁链可以通过各绕组自感 L 和绕组间互感 M 列出磁链方程

$$\begin{pmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_{fd} \\ \psi_{ld} \\ \psi_{lq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{afd} & M_{ald} & M_{alq} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & M_{bfd} & M_{bld} & M_{blq} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & M_{cfd} & M_{cld} & M_{clq} \\ M_{fda} & M_{fdb} & M_{fdc} & L_{ffd} & M_{fld} & 0 \\ M_{lda} & M_{ldb} & M_{ldc} & M_{ldfd} & L_{lld} & 0 \\ M_{lqa} & M_{lqb} & M_{lqc} & 0 & 0 & L_{llq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_{fd} \\ i_{ld} \\ i_{lq} \end{pmatrix} \quad (2)$$

当燃气机组从盘车转速开始起动时，为使燃机获得最大的起动转矩，控制系统需根据转子的位置判定通电的定子绕组相别，从而确定应该导通的晶闸管编号。由于式（2）中的系数矩阵为对称矩阵，转子的转动、绕组的自感和绕组间的互感将随着转子位置的改变而呈周期性的变化。在假定定子电流所产生的磁动势以及定子绕组与转子绕组间的互磁通在空间均按正弦规律分布的条件下，当突加励磁电流时，定子开路、定子绕组与励磁绕组间互感可以表示为

$$M_{afd} = M_{sfd0} \cos \gamma \quad (3)$$

$$M_{bfd} = M_{sfd0} \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (4)$$

$$M_{cfd} = M_{sfd0} \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (5)$$

式中， γ 、 M_{sfd0} 分别为转子轴线与a相轴线的夹角、定子绕组与励磁绕组互感比例系数。

当施加励磁电流时，定子三相绕组中因互感产生的磁链为

$$\psi_a = M_{afd} i_f = M_{sfd0} i_f \cos \gamma \quad (6)$$

$$\psi_b = M_{bfd} i_f = M_{sfd0} i_f \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (7)$$

$$\psi_c = M_{cfd} i_f = M_{sfd0} i_f \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (8)$$

$$i_f = \frac{u_f}{r_f} (1 - e^{-\frac{r_f}{L_f} t}) \quad (9)$$

式中, i_f 为励磁电流; u_f 、 r_f 和 L_f 分别为字子的电压、电阻和电感; t 为时间。

则当机组空载时, 机端电压与感应电动势相等, 联合式 (3) ~ 式 (9) 有

$$\begin{aligned} u_a = e_a &= -\frac{d\psi_a}{dt} = -\frac{d}{dt}(M_{sfd0}i_f \cos \gamma) \\ &= -M_{sfd0} \frac{u_f}{r_f} \frac{d}{dt}(1 - e^{-\frac{r_f}{L_f}t}) \cos \gamma \quad (10) \\ &= -M_{sfd0} \frac{u_f}{L_f} \cos \gamma e^{-\frac{r_f}{L_f}t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_b = e_b &= -\frac{d\psi_b}{dt} = -\frac{d}{dt}[M_{sfd0}i_f(\cos \gamma + \frac{2\pi}{3})] \\ &= -M_{sfd0} \frac{u_f}{r_f} \frac{d}{dt}(1 - e^{-\frac{r_f}{L_f}t}) \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \quad (11) \\ &= -M_{sfd0} \frac{u_f}{L_f} \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{r_f}{L_f}t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_c = e_c &= -\frac{d\psi_c}{dt} = -\frac{d}{dt}[M_{sfd0}i_f(\cos \gamma - \frac{2\pi}{3})] \\ &= -M_{sfd0} \frac{u_f}{r_f} \frac{d}{dt}(1 - e^{-\frac{r_f}{L_f}t}) \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \quad (12) \\ &= -M_{sfd0} \frac{u_f}{L_f} \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{r_f}{L_f}t} \end{aligned}$$

若设 $K = -M_{sfd0} \frac{u_f}{L_f} e^{-\frac{r_f}{L_f}t}$, 则利用式 (10) ~ 式 (12) 即可得到此时转子的初始位置为

$$\gamma_0 = \arctan \frac{u_c - u_b}{\sqrt{3}u_a} \quad (13)$$

利用上述方法对燃气机组盘车转速下进行转子位置计算时, 由于机组在旋转运行, 因此还需核算无位置传感器转子位置检测的计算周期。假设盘车转速为 4 r/min (每秒走过的电角度为 24°), 则控制程序转子位置计算采用 1 ms 计算周期, 由于转子运动带来的误差不超过 0.024° 电角度, 因此满足起动控制要求。

根据得到的转子位置信号, 按照表 2 对应触发脉冲进行逆变器电流相量控制, 从而使燃气机组从盘车速度开始加速, 变频装置进入到脉冲换相阶段。

2. 脉冲换相起动控制

燃气机组在低速运行时, 由于机端反电动

表 2 转子位置信号与晶闸管触发编号对应关系

转子位置 ($^\circ$)	触发脉冲编号
-30 ~ 30	VT ₂₅ 、VT ₂₆
30 ~ 90	VT ₂₆ 、VT ₂₁
90 ~ 150	VT ₂₁ 、VT ₂₂
150 ~ 210	VT ₂₂ 、VT ₂₃
210 ~ 270	VT ₂₃ 、VT ₂₄
270 ~ 330	VT ₂₄ 、VT ₂₅

势较小, 不足以使逆变器中的晶闸管在换相时关断, 因此需采用电流断续法换相, 也称脉冲换相。当根据转子位置信号判定出需要进行逆变器桥臂组换相时, 首先将整流器的触发脉冲迅速移至逆变状态 (触发角度大于 90°), 利用整流器直流输出电压的反向作用, 使变频器直流回路电流迅速下降为零。此时, 逆变器的所有晶闸管均被关断。再将整流桥的触发角减小, 使其处于整流状态, 同时根据转子位置信号发出新触发脉冲至逆变桥。采用脉冲换相时, 由于电流变化剧烈, 电磁转矩有较大波动, 为增大电磁转矩使机组速度迅速增加, 脉冲换相控制时换相超前角取 0° 。

由于燃气机组已经开始从盘车速度起动, 且励磁电流已经进入稳态, 采用突加励磁的方法测定机端电压已经不再适用, 且低频阶段 (尤其是在 0.5 Hz 以下) 由机组旋转产生的机端电压幅值非常小, 因此本文采用如下方法进行转子位置检测。

首先对机端电压进行深度低通滤波, 去除高频分量, 利用三相线电压经 Park 变换, 求出静止坐标系下相电压 U_α 、 U_β , 表达式为

$$\begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1/2 & 0 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{pmatrix} \quad (14)$$

则有

$$\gamma_t = a \tan(U_\alpha / U_\beta) + \gamma_b(\omega) \quad (15)$$

$$\gamma_b(\omega) = -a \tan(\omega / \omega_s) \quad (16)$$

式中, γ_t 为转子 t 时刻的位置角; $\gamma_b(\omega)$ 为低通滤波引起的角度偏移补偿角, 是角速度 ω 的函数。

利用上述方法对燃气机组脉冲换相过程进行转子位置计算时, 同样还需核算无位置传感器转

子位置检测的计算周期。假设脉冲换相最后阶段转速已经达到300 r/min（每秒走过的电角度为1 800°），则控制程序转子位置计算过程小于1 ms时，由于转子运动带来的误差不超过1.8°电角度，因此满足起动控制要求。脉冲换相阶段转子位置信号对应触发脉冲如表3所示，则可获得持续正向的起动转矩。

表3 脉冲转子位置信号与晶闸管触发编号对应关系

转子位置 (°)	触发脉冲编号
330	VT ₂₅ 、VT ₂₆
30	VT ₂₆ 、VT ₂₁
90	VT ₂₁ 、VT ₂₂
150	VT ₂₂ 、VT ₂₃
210	VT ₂₃ 、VT ₂₄
270	VT ₂₄ 、VT ₂₅

3. 自然换相控制

逆变器的负载本身是一台能自己发出反电动势的同步电动机，当机组频率大于5 Hz时，电动机的反电动势能够使逆变器实现自然换相。晶闸管

可直接利用电动机产生的反电动势来换相。为使晶闸管可靠换流, 自然换相时换相超前角取 60° 。

该阶段机端电压幅值较大, 控制系统电压采样电路可以通过电压过零点来确定转子位置信息, 电压过零点与触发脉冲信号对应关系如表4所示。

表4 自然换相阶段转子位置对应触发编号

状态	线电压参考点	脉冲编号	导通管子	换相超前角度 (°)
脉冲换相	CA - ↓	45	A + C -	$\gamma = 60$
	BC - ↑	56	B + C -	
	AB - ↓	61	B + A -	
	CA - ↑	12	C + A -	
	BC - ↓	23	C + B -	
	AB - ↑	34	A + B -	

仿真及分析

基于上述分析,建立无位置传感器机组变频起动控制系统模型,如图3所示,并对大型燃气机组变频起动控制过程进行仿真。

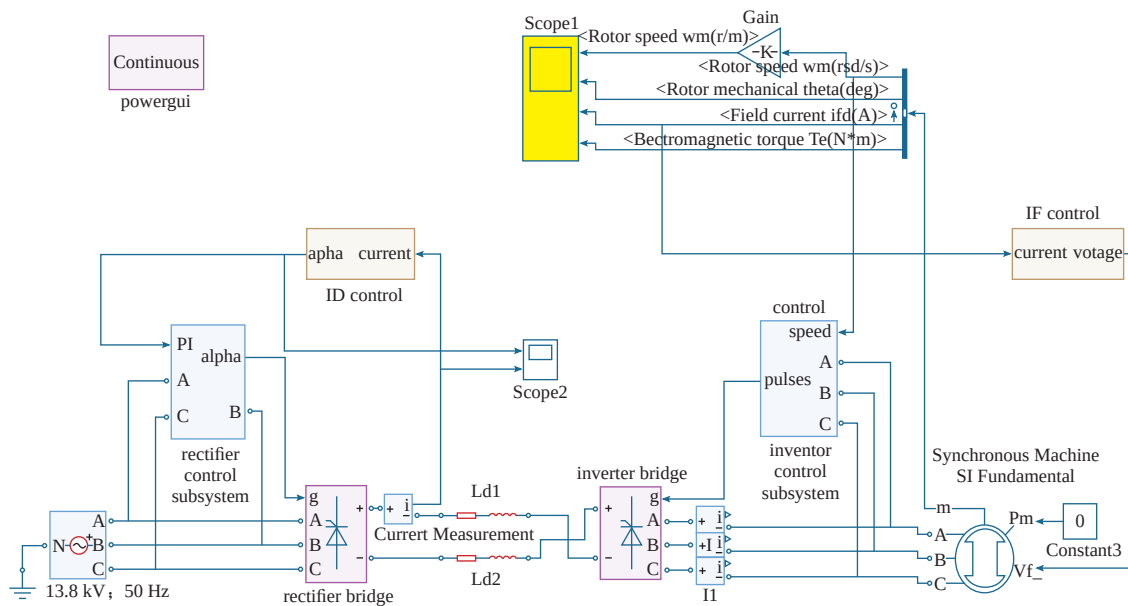


图3 燃气-蒸汽联合循环机组LCI控制系统仿真模型

燃机在盘车转速初始情况下, 设置转子位置为 100° , 仿真系统闭环控制励磁电流为 $0 \sim 1\,000\text{ A}$, 在此过程中转子位置检测及对应误差关系如图4所示。在 $0.5\text{ s} < t < 0.58\text{ s}$ 时间段内, 机组励磁电流上升速度较快, 电动机气隙磁通变化最大, 因此对

应机端电压幅值较大,此时通过式(13)计算转子位置相对较准确,误差范围约为 1° 。随着励磁电流逐渐接近设定值,励磁磁通变化变小,机端电压中所对应的转子位置信息相对减小,因此,在 $t > 0.58$ s时,检测误差相对增加,当 $t = 0.7$ s时,由

于机端电压已不到50 V, 此时计算出的转子位置误差约 12° 。

脉冲换相阶段仿真波形如图5所示, 逆变桥每隔 60° 电角度进行一次强迫换相, 每到换相时刻, 直流电流强迫为零, 对应机组侧定子绕组电流也强迫为零, 实现所有晶闸管的关断, 并实现可靠换相。

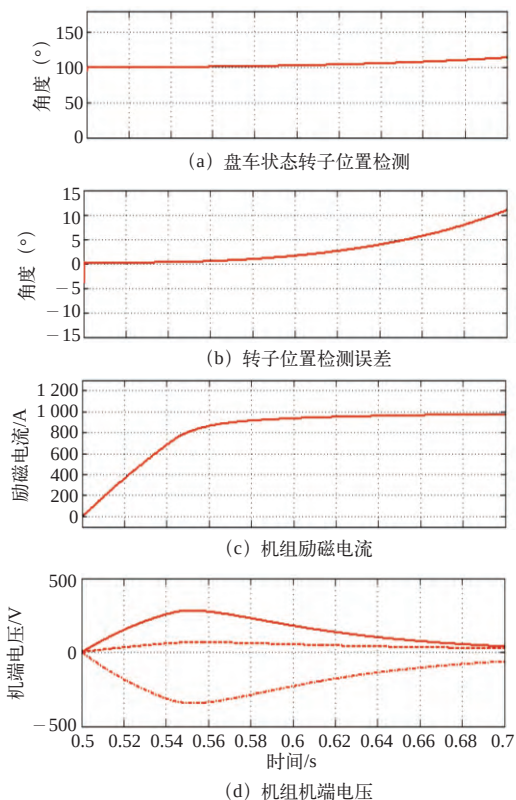


图4 盘车转速下转子初始位置检测、误差、励磁电流和机端电压波形

图6为脉冲换相过程中机组转子位置检测仿真波形, 可见励磁电流恒定不变, 但机端电压随着机组转速的升高已经逐渐建立起来, 利用式(15)即可算出瞬时的机组转子位置信号。转子位置周期为 360° , 由于整流、逆变控制过程中存在谐波, 在利用式(15)进行计算时, 对机端电压信号进行了低通滤波, 因此存在一定误差, 由仿真结果可见误差在 2° 左右。

图7为自然换相控制阶段仿真波形, 此时机组机端电压幅值及频率随着机组转速逐渐增加, 满足反电动势可靠换相要求, 控制方式从脉冲换相方式转化为负载换相方式。由仿真结果可见, 机

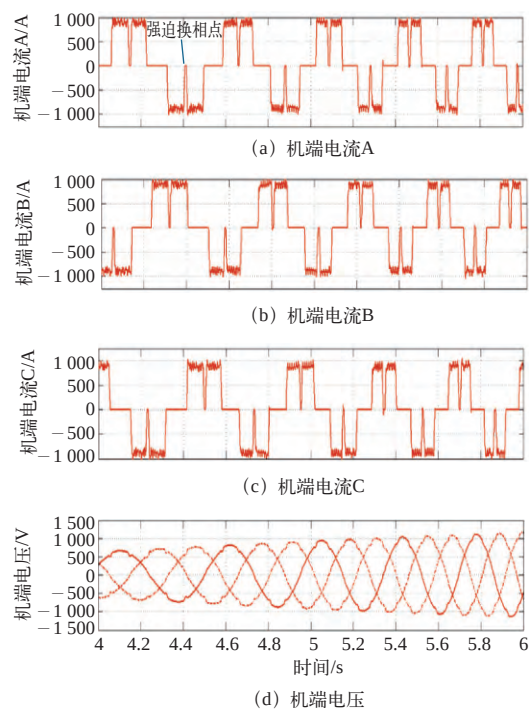


图5 脉冲换相控制阶段机组侧电流、电压波形

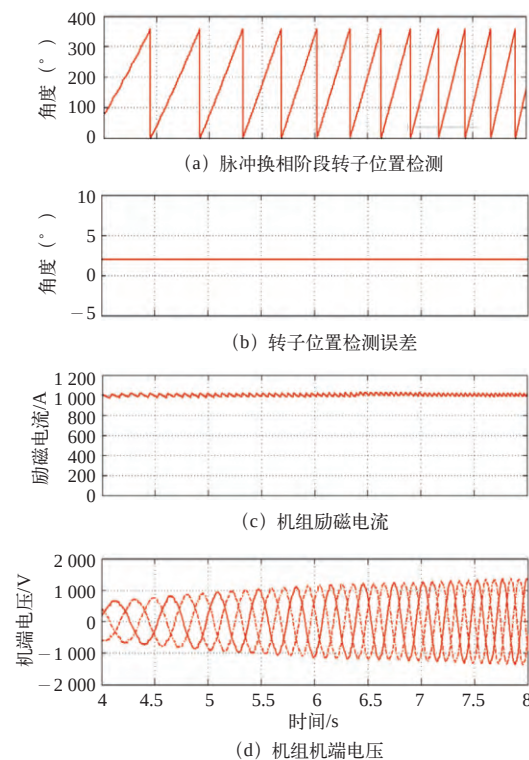


图6 脉冲换相时转子初始位置检测、误差、励磁电流和机端电压波形

端电流每经过 120° 电角度进行一次换相操作, 相比脉冲换相阶段转矩脉动更小。

图8为负载换相阶段转子位置检测仿真结果,

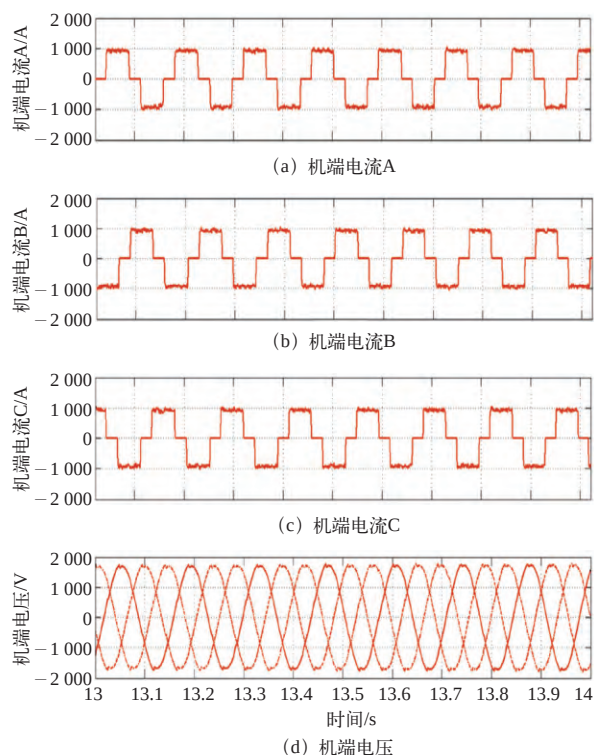


图7 自然换相控制阶段机组电流、机端电压波形

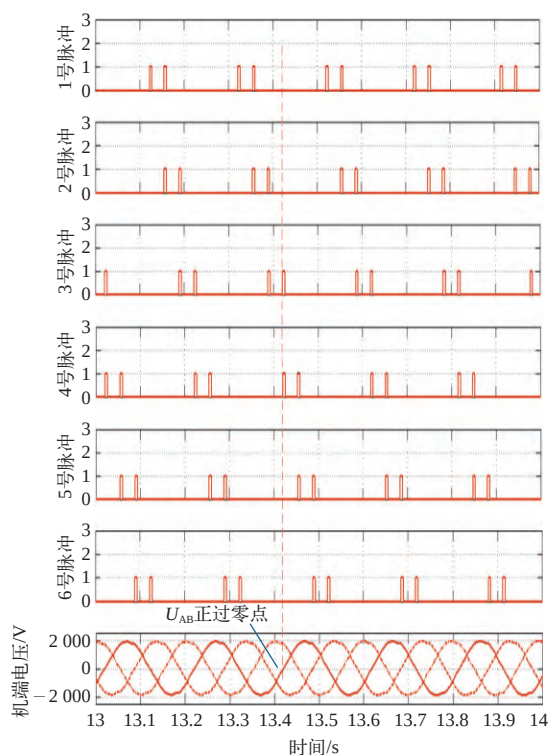


图8 负载换相时机端电压与触发脉冲编号关系

从图中可以看到，当机端电压 U_{AB} 正方向过零时，触发脉冲为3号、4号；当 U_{CA} 负方向过零时，触

发脉冲为4号、5号，依次类推，仿真结果同表4一致，机组获得了持续的加速转矩，直至并网。

结束语

综上所述，仿真结果证明了所提出的系统模型及控制方法，实现了联合循环机组从盘车速度变频起动控制，满足基于晶闸管的电流源型变频器实现机组起动要求。证明了转子全程无位置传感器检测、自然换相及脉冲换相等控制方法的实用性。表明在燃气-蒸汽联合循环机组变频起动控制系统中，所提出的方法是一种有效的控制方法。

参考文献

- [1] 陈元锁, 王建伟. S209FA燃气-蒸汽联合循环机组的起动概述及优化[J]. 燃气轮机技术, 2011, 24 (1): 60-64.
- [2] 李麟章. 大型单轴燃气-蒸汽联合循环机组控制系统及其特点[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (18): 99-102.
- [3] 刘明行, 赵玉, 项立铮. 燃气轮机发电机组静止变频起动装置研究[J]. 能源研究与信息, 2006, 22 (2): 98-102.
- [4] 胡宇明, 郭创新. 燃气-蒸汽单轴联合循环机组的控制特点与调试[J]. 华北电力技术, 2007 (8): 25-29.
- [5] 周波, 魏佳, 穆新华, 等. 反电势逻辑电平积分比较法实现的无刷直流电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2000, 15 (4): 5-9.
- [6] 吴小婧, 周波, 宋飞. 基于端电压对称的无位置传感器无刷直流电机位置信号相位校正[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (4): 54-59.
- [7] 史婷娜, 吴曙光, 方攸同, 等. 无位置传感器永磁无刷直流电机的起动控制研究[J]. 电机工程学报, 2009, 29 (6): 111-116.
- [8] RASMUSSEN H. Sensorless speed control including zero speed of non salient PM synchronous drives[J]. Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2006, 54 (3): 293-298.

(收稿日期: 2014-09-17) EA