

文章编号: 1000-7709(2008)03-0156-04

水轮发电机转速和功角直接测量的新方案

何丽娜 毛承雄 陆继明 王丹

(华中科技大学 湖北省电力安全与高效利用重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对水轮发电机转速较慢、实现快速精确测量相对较难的问题, 提出了一种转速测量的新方案, 通过高精度测量齿之间的电角度实现, 并通过模拟实验和小机组实验验证了方案的有效性。在该方案的基础上研究了水轮发电机功角的测量方案。

关键词: 水轮发电机; 功角; 转速测量; 功角测量

中图分类号: TM 312

文献标志码: A

随着电力系统规模的扩大、远距离重负荷输电线路的出现及大型发电机的使用, 使电力系统的阻尼不断减弱, 引发了长时间低频振荡, 严重影响了电力系统的安全稳定运行^[1]。电力系统稳定器(PSS)能有效抑制低频振荡, 现已得到广泛应用。PSS是在自动电压调节器(AVR)上引入辅助信号, 提供正阻尼, 其中最直接有效的辅助信号为 $\Delta\omega$ ^[2]。所以, 实时、精确的测量转速对系统低频振荡的抑制起重要作用, 也为功角的精确测量提供了帮助。目前, 基于全球定位系统(GPS)的同步相量测量单元(PMU)的研制成功, 使高精度、快速的测量发电机转速和功角成为重要的研究内容, 其准确性和实时性对电力系统稳定控制将起重要作用^[3~8]。目前, 发电机转速的测量方法主要有计算法和直接法。计算法计算的转速很难真实反映实际的转速。直接法测量较为可靠, 但直接测量发电机转速较困难^[9], 尤其是水轮发电机转速较慢, 直接测量的精度不高、实时性差。鉴此, 本文提出了一种水轮发电机转速直接测量的新方案, 较好地解决了常规测速的问题。

设置一个位置传感器, 在齿头转过该传感器装置时触发脉冲信号。先精确测量齿间隔的电角度 θ_i ($i=1, 2, \dots, n$), 然后根据 $\omega=\theta_i/\Delta t_i$, 通过测量越过一个齿间隔的时间计算电气转速。为同时实现功角的测量, 设计齿盘的齿数等于发电极对数 p , 并在所有齿中设置一个特别齿(最宽或最窄)作为第1齿, 以便得到一个脉宽特别的脉冲确定转子的位置。

1.1.1 电角度测量原理

新方案设置两路传感器, 相隔角度约等于齿间隔角度, 不要求严格相等, 对加工精度要求不高。设第一个传感器超前第二个传感器约一个齿间隔角度, 如图1所示。

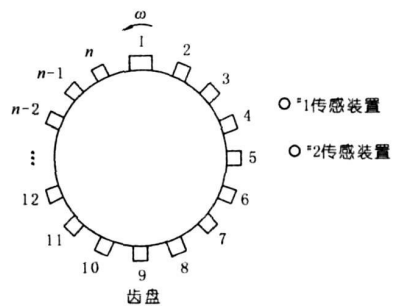


图1 新测速装置的示意图

Fig.1 Schematic diagram of new speed measurement equipment

1 水轮发电机转速测量的新方案

1.1 测速原理

在发电机转轴上安装齿间距均匀的齿盘, 并

收稿日期: 2008-03-06, 修回日期: 2008-04-01

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET-04-0710); 教育部科学技术研究基金资助重点项目(107128)

作者简介: 何丽娜(1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为同步发电机的励磁与控制, E-mail: hlna0116@163.com

通讯作者: 毛承雄(1964-), 男, 教授、博导, 研究方向为大型同步发电机的控制、大功率电力电子技术在电力系统中的应用及电力系统动态仿真, E-mail: cxmao@263.net

转子旋转时, #1、#2 传感装置相应获得脉冲 I 和脉冲 II 两路脉冲信号。由于两个传感器间隔角度约等于齿间隔角度, 两者脉冲信号的上升沿时刻 t_i 和 t'_{i+1} 接近, 如图 2 所示(信号脉宽的序号表示转过相应的齿所发出的脉冲)。

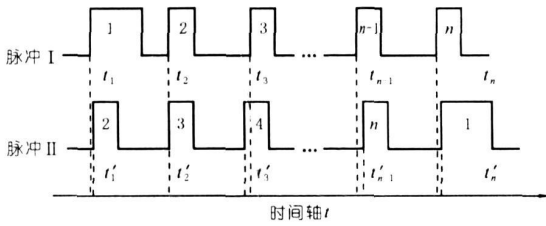


图 2 脉冲信号的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pulse signal

当 #1 传感器测得第一个齿间隔时间 Δt_1 时 ($\Delta t_1 = t_2 - t_1$), #2 传感器刚测得或稍后便测得第二个齿间隔时间 $\Delta t'_1$ ($\Delta t'_1 = t'_2 - t'_1$)。由于两个齿间隔时间几乎是在同一时刻测得的, 因此可近似认为是在同一转速下测得的时间, 即 $\theta_1 / \Delta t_1 = \theta_2 / \Delta t'_1 = \omega_1$, 再过一个齿间隔时间后 $\theta_2 / \Delta t_2 = \theta_3 / \Delta t'_2 = \omega_2$, 以此类推可得递推关系:

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{\Delta t_1}{\Delta t'_1} \theta_2 = \frac{\Delta t_1}{\Delta t'_1} \frac{\Delta t_2}{\Delta t'_2} \theta_3 \dots = \prod_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta t_i}{\Delta t'_i} \theta_n \\ \theta_2 = \frac{\Delta t_2}{\Delta t'_2} \theta_3 = \frac{\Delta t_2}{\Delta t'_2} \frac{\Delta t_3}{\Delta t'_3} \theta_4 \dots = \prod_{i=2}^{n-1} \frac{\Delta t_i}{\Delta t'_i} \theta_n \\ \dots \\ \theta_{n-1} = \frac{\Delta t_{n-1}}{\Delta t'_{n-1}} \theta_n \end{cases} \quad (1)$$

对各齿电角度求和:

$$\sum_{i=1}^n \theta_i = 2\pi p = \left[\sum_{k=1}^{n-1} \prod_{j=k}^{n-1} \frac{\Delta t_j}{\Delta t'_j} + 1 \right] \theta_n \quad (2)$$

根据式(1)依次计算:

$$\theta_i = \frac{2\pi p \prod_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta t_i}{\Delta t'_i}}{\sum_{k=1}^{n-1} \prod_{j=k}^{n-1} \frac{\Delta t_j}{\Delta t'_j} + 1} \quad (3)$$

实时计算两脉冲信号的时间间隔之比, 并结合记录的 $n-2$ 个时间间隔之比, 根据式(3)计算得到 θ_i , 并用相应的电角度 θ'_i 进行修正可得到:

$$\theta_{is} = (\theta_i + \theta'_i) / 2 \quad (i=1 \sim n) \quad (4)$$

1.1.2 转速计算

根据测得的 θ_{is} 和实测 Δt_i 实时计算转速:

$$\omega = \theta_{is} / \Delta t_i \quad (5)$$

该方案基于定时器能精确记录上升沿时刻, 将齿间电角度 θ_k 的计算转化为时间间隔的线性运算, 进而实现转速的测量。该方案计算量小、实时性好, 收敛较快。

1.2 误差分析

由相对误差的定义, 利用新方案实现转速测量的相对误差:

$$\Delta_\omega = (\omega - \omega_0) / \omega_0 = (\theta_i - \theta_{i0}) / \theta_{i0} = \left[\left[2\pi p \prod_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta t_i}{\Delta t'_i} \right] \left[\sum_{k=1}^{n-1} \prod_{j=k}^{n-1} \frac{\Delta t_j}{\Delta t'_j} + 1 \right] \right] \theta_{i0}^{-1} - 1 \quad (6)$$

新方案实现转速测量的基本关系式为 $\theta_i / \Delta t_i = \theta_{i+1} / \Delta t'_{i+1} = \omega$ 。在转速快速变化时, 该关系式为近似公式。对应脉冲 I 和 II 的关系式分别为: $\theta_0 = \Delta t_i \omega_i, \theta_{(i+1)0} = \Delta t'_{i+1} \omega'_{i+1}$ 。将该式依次代入式(6)可推出转速的相对误差为:

$$\Delta_\omega = \left[2\pi p \prod_{i=1}^{n-1} \frac{\omega'_i}{\omega_i} \right] \left[\sum_{k=1}^{n-1} \theta_{k0} \prod_{j=k}^{n-1} \frac{\omega'_j}{\omega_j} + \theta_{n0} \right] - 1 \quad (7)$$

式中, ω_0, θ_{i0} 分别为实际的转速和齿间隔角度。

常规测速中, 转速的相对误差为: $\Delta_{\omega c} = (\omega_c - \omega_0) / \omega_0 = (2\pi p / n - \theta_{i0}) / \theta_{i0}$ 。不难发现 $\Delta_{\omega c}$ 为机械加工误差, 根据工艺水平取 0.01, 无论转速是否变化, 其值恒定。当转子转速恒定时, 即 $\omega'_i / \omega_i = 1$ 时, 由式(7)计算得 $\Delta_\omega = 0$, 即截断误差为 0, $\Delta_\omega \ll \Delta_{\omega c}$; 当转速变化时, Δ_ω 与转速变化的快慢有关。为比较 Δ_ω 与 $\Delta_{\omega c}$ 值, 以三峡左岸水轮机组为例, 其机组转速为 75 r/min, 极对数 $p=40$, 测速齿盘的齿数为 40。为重点考虑齿距不均, 转速变化时的测速精度, 设实际的齿间隔的电角度分别为 $\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_{37} = 360^\circ, \theta_{38} = 357^\circ, \theta_{39} = 362^\circ, \theta_{40} = 361^\circ$, 且从 #1 齿开始匀速旋转, 转过 #38 齿时转速下降, 在转子转速变化的范围内假定脉冲 I: $\Delta t_{38} = 0.01983$ s, $\Delta t_{39} = 0.02066$ s, $\Delta t_{40} = 0.02149$ s; 脉冲 II: $\Delta t'_{38} = 0.02012$ s, $\Delta t'_{39} = 0.02076$ s, $\Delta t'_{40} = 0.02132$ s。利用式(6)可计算得 $\Delta_\omega = 0.0023, \Delta_\omega < \Delta_{\omega c}$ 。

由此可见, 新方案转速测量的误差较常规方案小, 在稳态或暂态情况下均可能较精确测量实时转速。

2 水轮发电机功角直接测量原理

水轮发电机功角直接测量是根据功角的定义测量发电机空载电势 E_q 和无穷大系统母线电压 V 之间的相角差。发电机空载电势很难测得, 但转子位置与空载电势有固定的相位关系^[10] 且测量相对容易, 故可由转子位置信号代替空载电势进行测量。

图 3 为发电机多对极情况下转子位置脉冲、机端电压方波及空载电势间的相位关系。

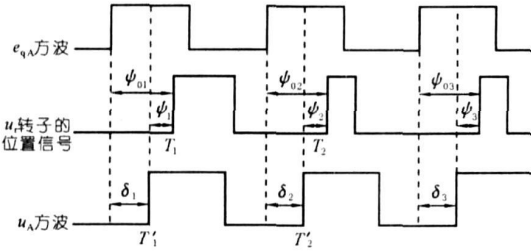


图3 转子位置脉冲波形与定子电压方波的相位关系
Fig. 3 Phase relation between rotor position pulse signal and square wave of generator terminal voltage

图3中, e_{qA} 为取自发电机空载时机端电压的正序分量, $\psi_k (k=1 \sim n)$ 为转子位置的初相。由于 ψ_k 在发电机运行中固定不变, 在开机运行时校准就可用于实时修正功角。功角为:

$$\hat{\delta} = \psi_k - \psi \quad (8)$$

若令 $\hat{\delta} = 0$, 即发电机输出的有功为零, 则 $\psi_k = \psi$, 故只需测量空载运行时的 ψ 便可得到对应的初相角 ψ_k 。式(8)中, $\psi = \omega(\Delta t_k - \Delta t'_k)$, 则功角为:

$$\hat{\delta} = \psi_k - \omega(\Delta t_k - \Delta t'_k) \quad (9)$$

齿盘设计了一个宽齿, 通过检测脉冲的宽度确定转子位置。即在每次监测到宽脉冲时, 程序就重新从 ψ_1 开始计算功角, 提高了程序的抗干扰性能, 减小了测量误差, 也使测量装置有能力记录诸如“滑齿”之类的转子瞬态变化过程。

3 实验系统设计及结果分析

3.1 硬件及软件设计

硬件设计的原理框图如图4所示。

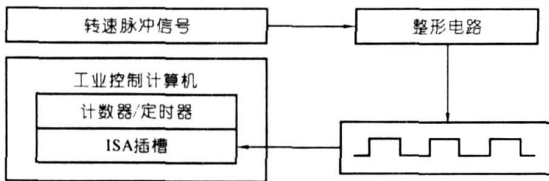


图4 转速实时测量的框图

Fig. 4 Chart of real time measure for speed

软件包括主程序、中断程序、初始化程序等, 该程序基于DOS系统, 利用PC机自身的中断系统进行控制。

3.2 模拟实验结果及分析

选用50 Hz的电压信号, 通过整形、移相处理模拟测速装置的脉冲信号I、II和机端电压, 如图5所示。其中, 利用脉冲I实现原有测速算法; 利用脉冲II实现新的测速方案, 转速测量结果如图6所示。

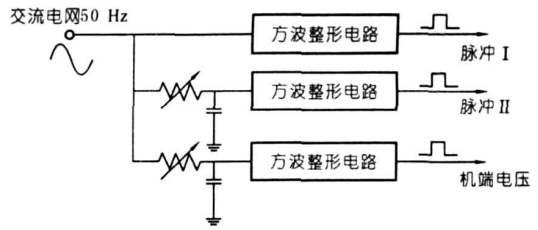


图5 模拟实验的信号源

Fig. 5 Signal source of simulate experiment

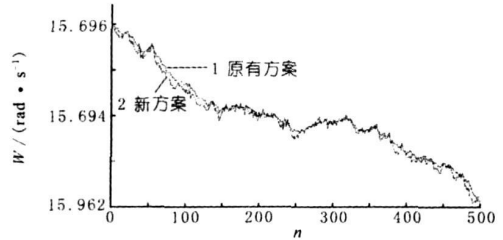


图6 50 Hz方波信号所得的转速波形图

Fig. 6 Generator speed waveform of 50 Hz square signal

由图6可知, 两条曲线大致相同。理想状况下转子匀速旋转, 频率恒定。由于电网频率的飘移, 测量信号可近似模拟暂态时的转速信号。在转速变化相对较大的区域, 当 n 为 $0 \sim 150, 350 \sim 500$ 时, 两曲线不重合, 曲线2转速下降明显快于曲线1, 与使用新方案测量误差结果相吻合。暂态测速时, 新方案较原方案有更强的实时跟踪能力, 在测量精度和实时性上均优于常规方案。

在新方案测量转速基础上进行功角测量, 实验结果见图7。由式(9)可知, 转速测量精度的提高直接使功角测量精度提高, 可为发电机在异常、故障及失步情况下判断提供了重要的参考依据, 有效地实现了系统的稳定监控。

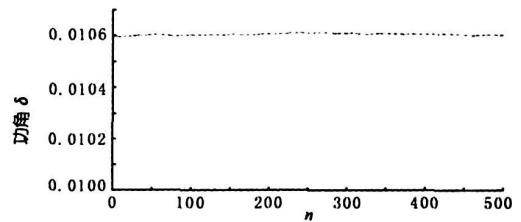


图7 功角的波形图

Fig. 7 Waveform of generator phase angle

3.3 小机组实验结果及分析

搭建硬件平台, 将新方案应用于实际机组进行转速和功角的测量, 原理框图见图8。该装置可在一定范围内调节转子转速, 模拟暂态时可验证改进算法应用于实际测量中。

通过调整转速可发现, 测得的转速值与数码表显示的转速值几乎同时变化。程序运行后得到

的转速值图形如图 9 所示。

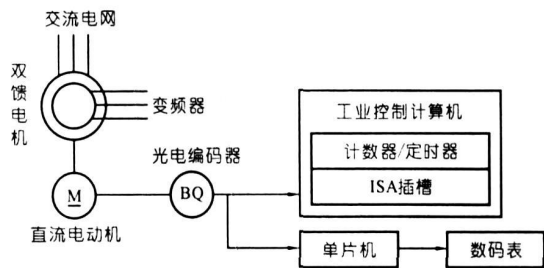


图 8 小机组实验原理图

Fig.8 Principle graph of small units speed measurement

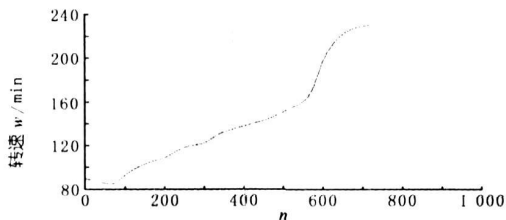


图 9 小机组转速变化时所测转速的波形图

Fig.9 Waveform of small unit speed change

4 结语

a. 针对水轮发电机转速较慢、快速准确测量难度较大的特点, 提出了一种转速测量的新方案, 并通过模拟实验验证了其精度优于以往方案, 尤其在发电机受到扰动、处于暂态时更为显著, 计算量小, 收敛性好。

b. 提出了一种发电机功角的直接测量方法, 其优点为: ①提高了水轮发电机转速测量的实时性和精度, 并为功角的精确测量奠定了基础; ②能准确确定转子的位置, 实现转子位置的自动校零; ③具有很强的抗干扰能力, 能诊断滑齿和干扰的具体位置。

New Scheme of Direct Measurement of Rotary Speed and Power Angle for Hydropower Generator

HE Lina MAO Chengxiong LU Jiming WANG Dan

(Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab, Dept. of Electrical Eng., HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: As one of the important measurement for power system monitoring, the rotary speed of hydro power generator is relatively slow, so that it is difficult to measure fast and accurately. In accordance with this characteristic, this paper puts forward a new scheme of rotary speed measurement. This scheme is able to improve real time quality and precision of speed measurement through the high precision measurement of the electric angles between teeth. The results of simulation experiment and generating unit experiment verify the effectiveness of the new scheme. At the same time, on the base of the new scheme of rotary speed measurement, the paper further analyses the measurement scheme of hydropower generator's power angle.

Key words: hydropower generator; power angle; rotary speed measurement; power angle measurement

参考文献:

- [1] Hurley J D, Baldwin M S. Stability Evaluation of High Initial Response Excitation of Turbo-generator [J]. IEEE Trans, 1982, 11: 4 211-4 221
- [2] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 李刚, 王少荣, 夏涛, 等. 电力系统广域动态监测中的功角直接测量技术[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 45-50
- [4] Phadke A G. Synchronized Phasor Measurements in Power System [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2): 10-15
- [5] Phadke A G, Pickett B, Adamiak M, et al. Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relay and Control[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(1): 442-452
- [6] Phadke A G. Synchronized Phasor Measurements—a Historical Overview [J]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, 2002(1): 476-479
- [7] Taylor C W, Erickson D C. Recording and Analyzing the July 2 Cascading Outage [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(1): 26-30
- [8] Ballance J W, Bhargava B, Rodriguez G D. Monitoring Power System Dynamics Using Phasor Measurement Technology for Power System Dynamic Security Assessment[C]. 2003 Bologna IEEE Power Tech conference Proceedings, Bologna, 2003 (3): 683-689
- [9] 陆继明, 毛承雄, 范瀚, 等. 同步发电机微机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [10] 王少荣, 孙海顺, 苗世洪. 同步发电机功角高精度测量方法及其实现[J]. 中国机械工程, 1999, 10(6): 667-669