

基于转子位置传感器的同步发电机 E_q 波形实时生成方法

王少荣¹, 程时杰¹, 江忠旭²

(1 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2 武汉武大电力科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 同步发电机空载电势 E_q 的有关参数对电力系统的运行与控制都是非常重要的, 但是, 目前现场的监控装置想要得到 E_q 的相关参数仍然存在困难。文中提出一种基于转子位置传感器的同步发电机 E_q 波形的实时生成方法, 依据该方法开发的装置能够输出频率和相位都与空载电势 E_q 一致而幅值恒定的正弦电压信号, 从而使得现场的监控装置能够像测量发电机机端电压那样方便地测量空载电势 E_q 的有关参数。详细地介绍了这种方法的工作原理和实现技术。

关键词: 同步发电机; 转子位置传感器; E_q 波形实时生成; 功角测量

A novel method based on rotor position sensors for real-time generating synchronous machine E_q waveforms

WANG Shao-rong¹, CHENG Shi-jie¹, JIANG Zhong-xu²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, HUST, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Wuda Science and Technology Co., Ltd, Wuhan 430074, China)

Abstract: The E_q phasor's parameters of synchronous machines are very significant for operation and control of power systems. But up to now, it is difficult to get the parameters of an E_q phasor. In this paper, a novel method based on rotor position sensors for real-time generating synchronous machine E_q waveforms is proposed. A new kind of device based on the proposed method is developed which can generate a constant-amplitude sine voltage waveform with the same phase and frequency as the E_q phasor of the involved synchronous machine. With this new kind of device, other monitoring and control equipments in the same plant can get the parameters of the E_q phasor easily, just as getting the parameters of the terminal voltage. In this paper, the basic principle and the implementation of the proposed method are introduced in detail.

Key words: synchronous machine; rotor position sensor; real-time generation of E_q waveforms; rotor angle measurement

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)20-0023-04

0 引言

实时获取发电机空载电势 E_q 的准确参数对电力系统的运行与控制都具有非常重要的意义。遗憾的是, 在负载条件下, 空载电势 E_q 不可能直接测量。近十年来, 在电力系统广域测量系统(WAMS)的研究中, 人们已经较好地解决了与 E_q 的相位直接相关的功角测量问题^[1-3]。但是, 现场的其它监控装置想要得到 E_q 的相关参数仍然存在困难。一方面是当前的 WAMS 通常只考虑将监测数据直接送给调度中心, 而未考虑给现场的其它设备提供 E_q 的参数; 另一方面是现场控制设备需要的是, 非常可靠、且响应速度较高的 E_q 参数的测量值, 而目

前面向监视的 WAMS 的测量数据未必能够满足这一要求。鉴于上述背景, 我们认为对发电机空载电势 E_q 的测量作更深入的研究是非常必要的。于是, 作者研究了一种基于转子位置传感器的同步发电机 E_q 波形的实时生成方法, 依据该方法开发的 E_q 波形实时生成装置能够生成一个频率和相位都与空载电势 E_q 一致而幅值恒定的正弦电压信号, 并将该正弦信号进行功率放大和变压器隔离提供给用户。很显然, 我们可以通过功率放大器的设计和变压器变比的选择, 使上述 E_q 波形实时生成装置具有一定的带负载能力, 并使其输出电压达到 $100/\sqrt{3}$ V。这样, 就使得现场的监控装置能够像测量发电机机端电压那样方便地测量空载电势 E_q 的有关参数。

同时, WAMS 也可以采用 PMU 直接测量发电机空载电势 E_q , 使得母线电压相量测量和同步发电机功角测量达到统一。

1 E_q 相位的实时跟踪方法

同步发电机空载电势 E_q 包含幅值、频率和相位 3 个参数, 其中, 幅值与励磁电流的大小直接相关, 暂不讨论, 这里仅考察频率和相位的实时跟踪问题。从实时跟踪的角度看, 只要准确、实时地跟踪了相位, 同时也实现了频率跟踪。所以, 本文的方法从相位的实时跟踪入手。

E_q 是与励磁电流对应的定子各相绕组上的感应电势(下文将各相空载电势相量分别以 E_{qA} 、 E_{qB} 和 E_{qC} 表示, 对应的瞬时值分别以 e_{qA} 、 e_{qB} 和 e_{qC} 表示), 由于电枢反应的作用, 在发电机带负载后实际上不可直接测量。在同步发电机稳态运行时, E_q 的频率与机端电压相同, 如果与当时运行工况相应的发电机参数已知(因为要考虑铁芯饱和因素), 其相位可以通过发电机机端电压和机端电流的测量值求出^[4-6]。但是, 人们更感兴趣的是动态过程中 E_q 的实时相位。若要在发电机的任何运行工况下都能准确跟踪 E_q 的相位, 最直接的方法就是采用转子位置传感器获取转子位置信号^[7]。下面我们采用如图 1 所示的 2 磁极的同步发电机时空矢量图(参见文献[4])来说明本文采用的方法。

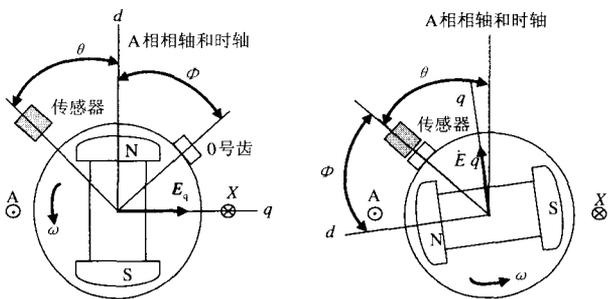


图 1 2 磁极的同步发电机时空矢量图

Fig.1 Relations of time-space vectors of synchronous generator with a pair of poles

图 1 中, 在发电机机架上安装了传感器, 该传感器固定不动; 在发电机转轴上则安装了带 N 个齿的齿盘(齿的编号从 0 至 $N-1$), 它随转子一起旋转。当发电机运行时, 齿盘的齿将顺序通过传感器, 当转子旋转一周时, 传感器输出 N 个电脉冲, 这 N 个电脉冲与 N 个齿一一对应。为了准确获得转子位置, 需要特别加宽 0 号齿, 使对应于 0 号齿的电脉

冲比其它的宽, 以便后续的微处理器能够识别^[1]。在图 1 中, 假设齿盘 0 号齿的轴线滞后转子 d 轴电角度, 传感器轴线滞后定子 A 相轴线 θ 电角度。图 1 (a) 对应于定子 A 相绕组的励磁磁通达最大值而 A 相空载电势 e_{qA} 正好从负到正的过零时刻; 图 1 (b) 则对应于转子位置传感器感应 0 号齿而发出脉冲上升沿的时刻。比较图 1 (a) 和图 1 (b) 易知, A 相空载电势 e_{qA} 超前 0 号齿的转子位置脉冲前沿 $\theta + \Phi$ 电角度。这一关系在发电机的任何运行工况下都不会改变, 除非传感器或齿盘经过了重装。

再记 0 号齿轴线滞后 $N-1$ 号齿 α_0 电角度、1 号齿轴线滞后 0 号齿 α_1 电角度、2 号齿轴线滞后 1 号齿 α_2 电角度、...、 $N-1$ 号齿滞后 $N-2$ 号齿 α_{N-1} , 显然有

$$\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{N-1} = 360^\circ \quad (1)$$

对应于 0 至 $N-1$ 个转子位置脉冲的上升沿时刻 t_i ($i=0, 1, 2, \dots, N-1$), e_{qA} 的电角度分别为 $\theta + \Phi$ 、 $\theta + \Phi + \alpha_1$ 、 $\theta + \Phi + \alpha_1 + \alpha_2$ 、...、 $\theta + \Phi + \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{N-1}$ 。

根据上述时间和相位的对应关系, 可以构造一个幅值恒定的正弦波形 e_{rA} , 该波形的频率和相位都与 A 相空载电势 e_{qA} 相同, 如图 2 所示。

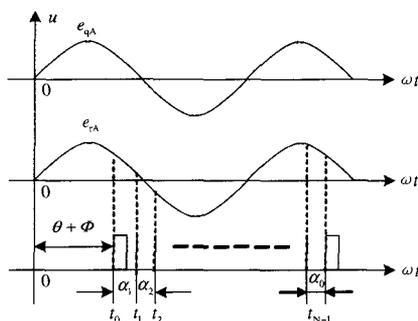


图 2 转子位置脉冲、 e_{rA} 与 A 相空载电势 e_{qA} 的关系

Fig.2 Phase relations among the rotor position signal, e_{rA} and unload voltage of the generator

因此, 如果不考虑幅值, 我们可以把波形 e_{rA} 看作 e_{qA} , 从而实现了 A 相空载电势的频率和相位的实时跟踪。同样地, 我们可以得到与 B 相和 C 相空载电势 e_{qB} 和 e_{qC} 对应的波形 e_{rB} 和 e_{rC} 。

2 实际应用相位跟踪方法的若干问题

在实际应用相位跟踪方法时, 需要解决初始化、相位插值和精度提高 3 个问题。下面介绍对这

3 个问题的处理。

从第 1 节知, 实现相位实时跟踪, 首先要知道 $\theta + \Phi$ 和 α_i ($i=0, 1, 2, \dots, N-1$), 这就是初始化问题。初始化需要在发电机额定空载运行时进行, 因为此时发电机空载电势等于机端电压, 因而可以通过转子位置信号的脉冲前沿与机端电压的过零时刻进行比相求取 $\theta + \Phi$ 和 α_i 。实际中, 为了准确测得 $\theta + \Phi$ 和 α_i , 需要通过多次测量求取平均值^[8]。此外, 考虑到在发电机组检修时因为拆卸和重装了传感器和齿盘, $\theta + \Phi$ 的值会发生改变, 应该重新初始化。鉴于这种情况, 宜在每次发电机开机时自动进行初始化, 而且应该引入发电机断路器位置信号, 作为自动初始化的判据。值得提及的是, 因为采用了自动初始化, 对传感器和齿盘的安装位置精度以及齿盘的机械加工精度都没有很高要求。

相位插值是在转子位置信号的两个相邻脉冲之间插入尽可能准确的计算相位值以便得到光滑的 e_r 波形, 因为齿盘的齿不可能非常密, 仅由转子位置信号构造的 e_r 波形过于粗糙。考虑到在动态过程中发电机的转速是不断变化的, 在相位插值时至少要考虑平均加速度。假设要在转子位置信号的第 j 个脉冲和第 $j+1$ 个脉冲之间均匀插入 p 个相位值, 那么, 两个相邻插值点之间的相位差为

$$\Delta\alpha_j = \alpha_{j+1} / (p+1) \quad (2)$$

现在要求这 p 个相位值何时插入。设第 j 个脉冲上升沿对应的时间为 t_j , 已求得此时的平均角速度和平均角加速度分别为 ω_j 和 σ_j , 则根据含加速度的路程计算公式可求得相位插值点与第 j 个脉冲前沿之间的时间偏差 $\Delta t_j(k)$ 为

$$\Delta t_j(k) = \frac{-\omega_j + \sqrt{\omega_j^2 + 2\sigma_j \Delta\alpha_j k}}{\sigma_j} \quad (3)$$

其中: $k=1, 2, \dots, p$ 。因此, 要插入的 p 个相位值分别在 $t_j + \Delta t_j(1)$ 、 $t_j + \Delta t_j(2)$ 、 \dots 、 $t_j + \Delta t_j(p)$ 时刻插入, 对应的相位分别为 $\theta + \Phi + \alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_j + \Delta\alpha_j$ 、 $\theta + \Phi + \alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_j + 2\Delta\alpha_j$ 、 \dots 、 $\theta + \Phi + \alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_j + p\Delta\alpha_j$ 。

影响相位跟踪精度的主要因素是转子位置脉冲上升沿的抖动, 而且这种抖动主要由传感器支架振动、机组大轴摆动及传感器检测门槛值分散性等引起。如果转子位置脉冲上升沿抖动的影响不消除, 可能产生较大的相位误差^[1]。为了在提高精度的同时兼顾响应速度, 本文采用多传感器方案^[7]。这种方案将多个传感器在发电机大轴周围近似对称布置, 多个传感器输出的转子位置信号同时输入微处理器系统进行对比分析并加以适当滤波, 最后得出

更加准确的转子位置信号。作者曾将这种方案用在多台水轮发电机组的功角测量中, 效果良好。

3 E_q 波形实时生成系统

E_q 波形实时生成系统包括转子位置传感器(含齿盘)单元、转子位置信号处理单元、 E_q 波形形成单元、功率放大单元和隔离变压器单元, 其硬件框图如图 3 所示。该系统的工作过程是: DSP 系统实时比较和处理 4 路转子位置脉冲序列, 输出 2 路脉冲信号, 其中一路输出经过相位插值且相位均匀化的每周波 360 个脉冲的转子位置信号, 另一路在每周 E_q 波形从负到正的过零时刻输出一个脉冲。前一路信号用于波形形成单元地址计数器的计数脉冲, 后一路信号用于复位计数器, 使计数器从 0 开始重新计数。

我们用 2 片 ROM 和计数器构成典型的波形发生器, 这种波形发生器有很好的响应速度和稳定性^[9]。在 2 片 ROM 存储器中存储了 16 位的正弦波函数值, 它们的地址线接计数器输出, 当计数器的计数值变化时, ROM 的输出经过 16 位 D/A 转换器后实时形成了空载电势 E_q 的波形。后者经过正弦波功率放大器和变压器隔离供给需要的监控装置使用。如果需要监测 E_q 参数的监控装置较多, 可以考虑输出多路相同的信号, 图 3 中只画出了 2 路输出。

需要指出的是, 图 3 采用了 4 个传感器, 实际应用中可以根据需要增加或减少。此外, 如果选用的微处理器具有足够的处理速度, 可以省去波形形成单元的计数器和 ROM, 由微处理器直接将波形数据实时送给 D/A 转换器。

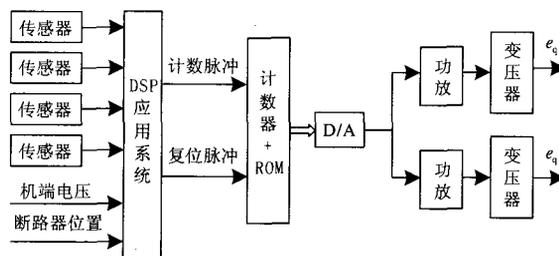


图 3 E_q 波形实时生成系统的硬件框图

Fig.3 Hardware diagram of E_q waveform real-time generation system

4 结束语

要在同步发电机的所有运行工况下准确跟踪其

空载电势 E_q 的频率和相位有一定难度, 相应的实际系统也比较复杂。如果每种需要 E_q 参数的监控系统都配置完整的空载电势测量功能, 一是造成浪费, 二是难于标准化, 三是难以保证测量精度和响应速度。因此, 本文的主要指导思想是, 将 E_q 的测量问题从其应用系统中分离出来, 采用一套可靠并具有优良性能指标的 E_q 波形实时生成装置为其它应用系统服务。本文提出的方法能够及时准确地跟踪 E_q 的频率和相位, 并且任何需要监测 E_q 的监控装置只要象测量发电机机端电压一样引入生成的 E_q 信号即可实现测量, 实际应用非常方便, 可以说比较好地解决了 E_q 的测量问题。作者相信本文介绍的方法能在实际工程中发挥应有的作用。

参考文献

- [1] 王少荣, 孙海顺, 苗世洪, 等. 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, 1998, 6(10): 667-670.
WANG Shao-rong, SUN Hai-shun, MIAO Shi-hong, et al. High Precision Measurement for the Rotor Angle of the Synchronous Generators and Its Implementation[J]. China Mechanical Engineering, 1998, 6(10): 667-670.
- [2] 严登俊, 鞠平, 吴峰, 等. 基于 GPS 时钟信号的发电机功角实时测量方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8): 38-40.
YAN Deng-jun, JU Ping, WU Feng, et al. The real-time Measurement for Power Angle of the Synchronous Generator Based on GPS and Tachometer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 38-40.
- [3] 谢小荣, 肖晋宇, 李建, 等. 一种估计发电机功角的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 106-110.
XIE Xiao-rong, XIAO Jin-yu, LI Jian, et al. A New Approach to Estimating Power Angle of Synchronous Generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 106-110.
- [4] 许实章. 电机学(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
XU Shi-zhang. Electric Machinery Theory(The last volumn)[M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [5] 何仰赞, 温增银, 汪馥英, 等. 电力系统分析(上册)[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1984.
HE Yang-zan, WEN Zeng-yin, WANG Fu-ying, et al. Power System Analysis (First Volume) [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1984.
- [6] 曲和南, 王少荣. 同步发电机运行变量的在线算法研究[J]. 华北电力学院学报, 1990, (2): 23-31.
QU He-nan, WANG Shao-rong. Study on the Online Algorithm for Calculating Synchronous Generator Operation State Variables[J]. Proceedings of North China Electric Power College, 1990, (2): 23-31.
- [7] 王少荣. 电力系统分布式广域同步并行处理平台研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
WANG Shao-rong. A Distributed Wide-area Synchronized Parallel Processing Platform for Power System Monitoring and Control[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [8] 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.
LI Gang, WANG Shao-rong, XIA Tao, et al. Direct Measurement of Power Angles in Wide-area Power System Dynamic Supervisory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 45-50.
- [9] 赵明富, 包明. 存储器函数变换技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
ZHAO Ming-fu, BAO Ming. Memory Based Function Converter's Technology and Its Application[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004.

收稿日期: 2007-07-30; 修回日期: 2007-08-22

作者简介:

王少荣 (1960-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制、强电磁干扰环境下的监测与控制系统等; E-mail: wsrwy96@vip.sina.com

程时杰 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定性分析及其控制、人工智能在电力系统中的应用及低压电力线载波;

江忠旭 (1963-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化产品研制。

许继牌电力自动化监控设备荣获“中国名牌”产品称号

在北京人民大会堂举行的 2007 年度中国名牌命名大会上, 许继牌电力自动化监控设备荣获“中国名牌”产品称号。许继电力自动化监控设备争创中国名牌的成功, 将为公司主导产品进一步扩大市场影响, 参与市场竞争起到积极的推动作用。

据了解, 今年, 中国名牌产品评价在机械、电子信息、食品、轻工、纺织、船舶、石油化工、钢铁、建材、农资、环保、医疗器械、体育用品、安防、林业等 16 个行业的 183 种产品中进行, 获奖产品共有 800 多个。今年河南省新增 19 个中国名牌产品, 12 个产品第二次当选中国名牌, 至此河南省中国名牌总数已达 65 个。