

基于PMU和缓变功率的发电机组运动方程参数在线辨识

段刚¹,李海峰²,武二克¹,娄霄楠¹,刘刚¹

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司,北京 100085;2. 国网江苏省电力有限公司,江苏 南京 210024)

摘要:由于发电机机械功率无法被直接测量,并且电磁参数会因动态过程不同而发生较大变化,在发电机组综合参数辨识中,运动方程参数不能被准确辨识。提出了缓变功率的概念,基于相量测量装置(PMU)数据对发电机运动方程参数进行独立辨识。首先,对发电机运动方程进行变换,使得所测电磁功率由缓变功率和快变功率组成,其中缓变功率由不可测的机械功率和恒定功率组成,快变功率由待辨识的运动参数和可测得的转速组成;然后,采用低通滤波器从实测电磁功率中获取缓变功率曲线,从而将含有不可测变量的运动方程转化为以待辨识参数为未知量的可辨识方程。应用结果表明所提方法能够减少参数辨识中不考虑机械功率变化或者认为机械功率变化与转速偏差具有线性关系所引起的误差。

关键词:转动惯量;阻尼系数;PMU;低通滤波;发电机;参数辨识;缓变功率

中图分类号:TM 744

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004015

0 引言

转动惯量和阻尼系数是表征发电机组动态特性的重要参数,对电网的安全稳定分析具有重要影响^[1]。转动惯量参数通常基于甩负荷试验获得,由于试验检测影响机组的正常运行和寿命,通常只在机组投运前或大修后进行。然而,甩负荷试验得到的转速飞升曲线含涡动和噪声,严重影响转子加速度的计算精度,因此仅靠几次甩负荷试验难以得到可信的转动惯量^[2]。对于阻尼系数,由于其与转速及定、转子间相对磁场的角频率有关,会随电网运行工况的变化而变化^[3-5],但是在实际的各种发电机模型中,其均被简化为固定的比例系数^[6]。如何根据不同工况,将动态非线性变化阻尼系数等值为静态线性化阻尼系数是甩负荷试验所不能解决的问题。

传统的发电机参数辨识基于录波数据实现^[7],但是录波数据只有在大故障下才能触发,难以满足对不同工况进行在线辨识的需求。近年来,利用相量测量装置(PMU)数据进行发电机参数辨识的方法^[8-20]被提出,然而其应用效果并不理想,分析可知存在以下3个方面问题。

(1)现有方法通常将运动方程参数和电磁参数进行联合辨识,然而电磁参数实际上是动态变化的,目前还存在未解决的可辨识性问题,较低的电磁参数辨识精度影响了运动方程参数的辨识精度。例如,文献[13]指出发电机暂态和次暂态参数与扰动性质有关;文献[14-17]指出对于经派克变换后发电机d轴电路参数而言,仅利用扰动前稳态及动态过程的数据,其参数是无穷不可辨识的;文献[18]指出经派克变换后的发电机模型并不能够完全反映电机的真实结构,导致根据不同扰动事件会得到不同的

辨识结果。

(2)由PMU测得的相量是对1个完整工频正弦波的表示,不能准确反映不具有完整正弦波的次暂态过程,即基于PMU数据不能实现对次暂态和暂态电磁参数的准确辨识,因此在发电机参数联合辨识中,电磁参数的不准确会影响运动方程参数的准确性。

(3)由于发电机机械功率不能被直接测量,现有运动方程参数辨识没有合理处理发电机的机械功率。例如,文献[7,13-15,19]认为机械功率恒定或不考虑运动方程参数辨识;文献[11]则将PMU测得的电磁功率近似作为机械功率,引入很大误差;文献[21]将调差系数作为已知量,根据转速偏差计算机械功率变化量,然而转速偏差与机械功率变化并非线性关系,而且调差系数会随运行点变化而变化。

对于问题(1)和(2),可以将运动方程参数辨识与电磁方程参数辨识解耦来解决。这是因为机械转速变化的时间常数为秒级,PMU 10 ms级的量测精度足够反映转速的动态变化;而且由于运动方程参数只出现在发电机运动方程中,当各时刻的电磁功率通过PMU测得后,运动方程参数辨识过程中可以不出现电磁暂态方程,从而避免电磁暂态和次暂态参数辨识不准确对运动方程参数辨识所造成的不良影响。对于问题(3),本文提出了利用低通滤波器从实测电磁功率曲线获取缓变功率曲线的方法,用可知的缓变功率重新构造运动方程,从而避免无法测量机械功率所带来的问题。将此技术与前述运动方程参数在线辨识的方法相结合,即可实现对运动方程参数的准确辨识。

1 扰动事件的选择

为保证参数辨识的准确性,降低噪声对有效动态变化信号的干扰,只选择信噪比大的大扰动事件

PMU动态曲线进行辨识。获取已识别出的扰动事件对应的PMU实测发电机组动态曲线,包括扰动期间的机端有功电磁功率 P_e 曲线与发电机组角速度 ω ,实测曲线。由于常见的两极汽轮发电机惯性时间常数的取值范围是2.5~6.0 s,考察5 s时间窗内功率和频率发生大变化的动态曲线作为在线辨识的数据源。为了能够在实际电网环境中获得足够次数的辨识曲线,大扰动事件的筛选阈值不能设置得过高。

综合考虑上述扰动事件筛选依据,结合对实际电力系统扰动事件的观察统计,采用下面的参数和方法获取满足上述要求的扰动曲线:监视发电机组PMU实时动态数据(通常为50帧/s或25帧/s),当发现5 s移动时间窗口内转速与额定转速的差值超过4 r/min或频率最大值与最小值之差超过0.066 Hz,且对应时段有功功率最大值与最小值之差超过机组额定功率的5%,将该5 s时段及其前0.5 s和后0.5 s共6 s称为扰动时间。这6 s内的PMU实时动态数据为扰动动态数据,包括发电机组的转速 n 、频率 f 、发电机组有功电磁功率 P_e 及相应的时标。进一步地,将上述实测转速或频率曲线转化为实测角速度 ω 曲线,并优先采用由转速转化得到的实测角速度曲线,这是因为PMU中的频率是根据电压角度计算得到的,并不能真实地反映转轴的机械转速或角速度。

2 发电机缓变功率定义及其获取

发电机转子的运动方程为:

$$M d\omega/dt + D\omega = P_m/\omega - P_e/\omega \quad (1)$$

其中, P_e 为发电机电磁功率; P_m 为机械功率; M 为转动惯量; D 为阻尼系数; ω 为角速度。 P_e 和 ω 为运动方程参数在线辨识的输入量,均可以由PMU直接测量得到,其中 $\omega = \omega_r$,即第1节获取得到的有效扰动期间的 P_e 和 ω 2条曲线; M 和 D 为待辨识量,即参数在线辨识的输出结果。因此需要找到获取 P_m 的方法。发电机机械转矩的直接测量需要加装传感器,根据弹性元件变形的几何参数得到,目前在电力行业还未见采用。

少数电厂采用PMU实现了对汽门开度和调节级压力的量测, P_m 与这2个量均存在非严格的线性相关性,因此根据这2个量只能定性研究 P_m 的变化,不能对 P_m 进行定量衡量。附录中图A1给出了某电厂利用PMU实测得到的机械功率、汽门开度和调节级压力在某次厂内控制系统引起的振荡事件中的实时曲线,从中可以看到由于(高调门)汽门开度可以在1 s内快速变化,调节级压力在一直升高,发电机机械功率会在1 s内快速变化,可见通常认为机械功率在短时间内维持恒定的假设不成立。

因此,如何仅利用已有的PMU量测量解决无法测量 P_m 的问题,对于推广应用发电机组运动方程参

数的在线辨识非常重要。本文利用PMU量测的发电机电磁功率,采用低通滤波技术近似得到发电机缓变功率,并基于缓变功率计算运动方程参数。所提方法原理如下。

令 $\omega = \omega_{50} + \Delta\omega$,则由式(1)可得:

$$P_e = P_m - D(\omega_{50} + \Delta\omega)^2 - M\omega d\omega/dt \quad (2)$$

$$P_e = P_m - D\omega_{50}^2 - [2D\omega_{50}\Delta\omega + D(\Delta\omega)^2 + M\omega d\omega/dt] \quad (3)$$

$$P_e = P_{\text{slow}} - 2D\omega_{50}(\omega - \omega_{50}) - D(\omega - \omega_{50})^2 - M\omega d\omega/dt \quad (4)$$

其中, ω_{50} 为50 Hz对应的额定角频率; $\Delta\omega$ 为角频率相对于额定角频率的偏差; P_{slow} 为缓变功率。

由式(3)可知, P_e 由2个部分组成:一部分为缓变功率;另一部分为快变功率,与转子角速度或角速度变化量直接相关。缓变功率与快变功率均为虚拟功率。缓变功率中 $D\omega_{50}^2$ 恒定,缓变成分为 P_m , P_m 通过调速器控制系统间接响应角速度(即转速)和电磁功率变化,调速器响应时间为1~5 s,时间常数为5~12 s,因此缓变功率曲线中变化量所包含的主要频率成分的周期大于10 s(取为最小时间常数的2倍或响应时间的4倍),频率小于0.1 Hz。快变功率中快变成分只与角速度相关,而发电机角速度对电磁功率变化的响应不经过控制系统,只与转子本身的转动惯量相关,其响应时间小于0.1 s,因此快变功率成分曲线中变化量所包含的主要频率成分的周期小于0.4 s(取为响应时间的4倍),频率大于2.5 Hz。由此可见缓变功率与快变功率所涉及的频段不同,可以利用低通滤波器将缓变功率从PMU测得的电磁功率中提取出来,变为已知成分。因此式(3)可以转化为式(4),其中只有 M 和 D 为2个常数未知量待辨识,其余量均可通过PMU测得或通过滤波得到,这样就可以用常规的优化方法对 M 和 D 进行求解。

通常有限长单位冲激响应(FIR)滤波器具有线性相位,有利于对时间延迟的补偿,但是根据上述参数设计的FIR滤波器的阶数高达2871阶,并且幅频精度较低。为了保证计算效率,改用无限冲击响应(IIR)滤波器,设计出的巴特沃斯低通滤波器为14阶。为将小于0.1 Hz的缓变功率从电磁功率中分离出,该滤波器参数设置如下:通带截止频率为0.12 Hz,阻带截止频率为0.15 Hz,通带波纹系数为1,阻带衰减系数为20,采样频率为100 Hz。14阶巴特沃斯低通滤波器幅频特性如图1所示。

为了消除巴特沃斯低通滤波器引入的非线性相移,采用一种零相移数字滤波器^[17,22],将滤波产生的时间延迟控制在0附近。具体方法为首先将时间序列数据正向通过巴特沃斯低通滤波器,然后将输出的时间序列数据反转,再次通过巴特沃斯低通滤波器,将第二次滤波的输出数据再次反转,即得到消除

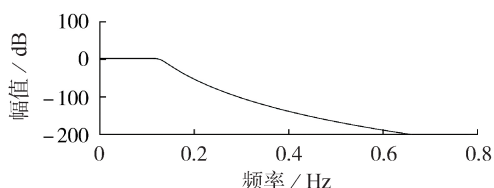


图1 14阶巴特沃斯低通滤波器幅频响应曲线

Fig.1 Amplitude-frequency response curve of

14-order Butterworth low-pass filter

时间延迟的滤波结果。此外,为了避免巴特沃斯低通滤波器在6 s曲线的边界附近产生误差,将6 s曲线向前后各延伸2 s,对10 s曲线的数据进行滤波,滤波完成后输出原6 s曲线的动态数据作为发电机组缓变功率曲线。

经上述设计的巴特沃斯低通滤波器进行滤波后,原始电磁功率曲线和缓变功率曲线的比较如图2所示。由图2可知缓变功率中振荡成分落后于电磁功率中振荡成分1/4个正弦波或略多,因为每1/4正弦波对应90°相位,即两者振荡成分大约有90°~150°的差值,因为缓变功率中的 $D\omega_{50}^2$ 为常数,因此缓变功率中的机械功率同样与电磁功率有90°~150°的差值。图A1所示的实测曲线显示某机组高调门开度曲线振荡成分大约落后电磁功率振荡成分1/4个正弦波或略多,即两者振荡成分大约有100°~160°的相位差值。尽管机组的高调门开度不完全与机械功率同相位,但是在主蒸汽压力短时间内通常不会有大变化的情况下,可以认为高调门开度与机械功率变化趋势或振荡成分的相位基本一致。即从定性角度分析,图2中经低通滤波器后得到的缓变功率曲线所反映出的机械功率与电磁功率的角度差值范围,与图A1中实测曲线所反映的机械功率与电磁功率的角度差值范围一致,验证了通过低通滤波器获取机械功率曲线的合理性。

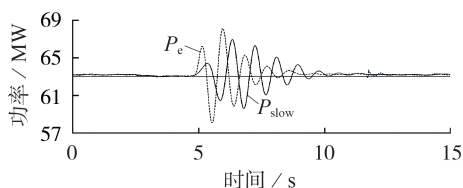


图2 电磁功率和缓变功率曲线的比较

Fig.2 Comparison of electromagnetic power and slow-varying power

3 基于运动方程曲线拟合的参数辨识

式(1)中发电机转子运动方程经变换后得到式(4),由式(4)经离散化可进一步推出式(5):

$$\omega_n = \omega_{n-1} + \Delta t \left[P_{\text{slow},n} - P_{e,n} - 2D\omega_{50}(\omega_{n-1} - \omega_{50}) - D(\omega_{n-1} - \omega_{50})^2 \right] / (M\omega_{n-1}) \quad (5)$$

其中, n 为采样点编号, $n \geq 1$; $P_{e,n}$ 为 P_e 曲线上的第 n 个采样点; $P_{\text{slow},n}$ 为 P_{slow} 曲线上第 n 个采样点; ω_n 为角速度计算曲线(或仿真曲线)上第 n 个采样点的值; Δt 为采样时间步长。扰动期间 P_e 的动态曲线可由高密度采样的PMU获得, P_{slow} 曲线可由第2节所提出的低通滤波器获得。设 ω_0 为角速度计算曲线(或仿真曲线)上第0个采样点的值, ω_{r-0} 为实测角速度曲线第0个时间点的实测值, $\omega_0 = \omega_{r-0}$ 。在假定机组 M 和 D 已知的情况下,可由式(5)得到机组角速度 ω 的仿真动态曲线。通过将机组角速度的仿真动态曲线与PMU实测的角速度动态曲线进行拟合比较即可判断所取的 M 和 D 是否正确;根据实测曲线与仿真曲线的偏差情况对 M 和 D 进行反复修正,可得到 M 和 D 接近真实值的最优解。

上述曲线拟合过程等效为以 M 和 D 为未知数求解目标函数的最小值:

$$\min E(M, D) = \sum_{n=1}^K (\omega_n - \omega_{r-n})^2 \quad (6)$$

其中, $E(M, D)$ 为目标函数; K 为基于实测的角速度动态过程曲线中包含的采样点总数; ω_{r-n} 为实测角速度曲线第 n 个时间点的实测值。由式(5)可知 ω_n 为包含未知量 M 和 D 的递归函数,由于 K 很大,递归次数很多,式(6)的目标函数对 M 和 D 求偏导的算法非常复杂,用常规的非线性规划法或内点法等基于偏导数计算的优化方法求解非常困难,因此本文采用不依赖偏导数计算且全局寻优性能好的遗传算法求解该问题,具体步骤如下。

(1) 个体编码和初始种群生成。

发电机组的2个运动方程参数 M 和 D 构成遗传算法个体 $[M, D]$,不同的取值代表不同的个体,对遗传算法个体 $[M, D]$ 采用十进制编码,种群的数目设为200个,在辨识参量的物理上下限范围内随机产生参量值,生成初始的200个个体。其中, M 的初始值的取值范围对应的惯性时间常数的范围为 $[1, 8]$ s,适当大于常规发电机惯性时间常数的可能范围 $[2.5, 6.0]$ s,以避免搜索空间中遗漏最优解。对于正常运行的发电机组,其运动方程阻尼系数的标幺值是接近于0的正数,因此 D 的初始值的取值范围为 $[0, 0.5]$ p.u.。

(2) 计算个体的适应度。

首先对于每个个体 $[M, D]$,由式(5)计算出其与实测角速度曲线对应的仿真角速度曲线。然后,由式(7)计算出每个个体 $[M, D]$ 的适应度 $F(M, D)$:

$$F(M, D) = \frac{1}{E(M, D)} = \frac{1}{\sum_{n=1}^K (\omega_n - \omega_{r-n})^2} \quad (7)$$

可见,当个体参数 $[M, D]$ 的取值使得仿真曲线与实测曲线之间的误差较小时,相应的遗传算法个

体的适应度较大。

(3)终止条件判断。

选择出适应度 $F(M, D)$ 最大的个体,由该个体的参数 $[M, D]$ 推算出的角速度仿真曲线与角速度实测曲线的误差 $E(M, D)$ 作为本次循环得到的最小误差 $E_{\min}(M, D)_{\text{present}}$, 将其与上一次循环得到的误差 $E_{\min}(M, D)_{\text{last}}$ 的减小量 A_{improve} 作为本次循环改进量,即:

$$A_{\text{improve}} = E_{\min}(M, D)_{\text{present}} - E_{\min}(M, D)_{\text{last}} \quad (8)$$

由于每次的交叉、复制和变异等遗传操作均采用最优保留策略,每次循环得到的改进量均大于等于0。当连续循环100次,每次得到的改进量均小于0.0001,则停止寻优;本次循环得到的 $E_{\min}(M, D)_{\text{present}}$ 所对应的参数 $[M, D]$,即为最优参数 M 和 D ;否则执行步骤(4)。

(4)根据轮盘赌选择算法选择和复制新个体。

首先,直接保留适应度最优的1个个体;然后执行轮盘赌选择算法199次,从总种群中选择和复制出剩余的199个个体。种群中第 i 个个体在每次轮盘赌选择中被选中的概率为:

$$p_i = F(M_i, D_i) / \sum_{k=1}^{200} F(M_k, D_k) \quad (9)$$

其中, $F(M_i, D_i)$ 为第 i 个个体的适应度函数; k 为种群中个体的序号。

(5)交叉操作产生新个体。

对步骤(4)产生的个体进行交叉操作,产生新的200个个体。首先,将适应度最优的1个个体直接复制为2个个体到下一代,并将其中的1个标记为不可变异;然后,执行99次交叉操作,即从步骤(4)产生的200个个体中任选2个个体,进行参数 M 的互换,得到新的2个个体。

(6)筛选生成变异个体。

在步骤(5)中产生的除标记为不可变异的最优个体外的199个个体中,任选10个,对每个个体任选 M 或 D ,然后在 M 或 D 的取值范围内随机产生新的参量值生成新的10个变异个体,返回步骤(2)。

在实际应用中,根据一台发电机组的每次扰动事件,都可以计算出一组转动惯量和阻尼系数。为了尽可能消除扰动事件中各类噪声干扰信号的影响,通常将一段时间内若干次的计算结果取平均值,获得最可信的该机组的转动惯量和阻尼系数值。

4 实例分析

本文所提出的方法已经应用于江苏省调广域测量系统(WAMS)中,利用实时测得的发电机组有功出力曲线和角速度曲线,实现对WAMS所监视全部发电机组运动方程参数的在线辨识。以句容电厂额定功率为1000 MW(额定容量为1145 MV·A)的2号机组为例验证本文发电机组运动方程参数在线辨识方

法的有效性。厂家提供的轴系转动惯量设计值为107 838 kg·m²,转换成惯性时间常数为4.65 s,厂家无法提供机组的阻尼系数。

在线辨识程序捕捉到若干次频率和功率波动幅度足够大的机组扰动事件,其中一次典型机组扰动事件的机端有功功率和转速曲线见图3。

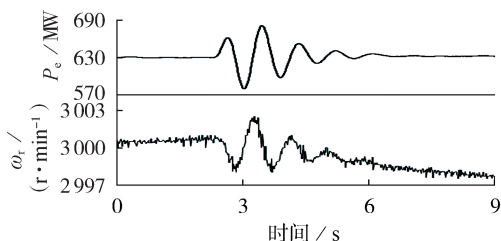


图3 转速和功率波动幅度均满足要求的机组扰动事件

Fig.3 Disturbance event with change amplitudes of rotation speed and power satisfying requirements

利用这几次扰动的实测曲线进行发电机组运动方程参数辨识,并取各次辨识结果的平均值,可以获得句容发电厂2号机组的最可信运动方程参数。为了方便判断辨识结果的正确性,将转动惯量值转换为惯性时间常数,如式(10)所示。

$$H = \frac{1}{2} \frac{M \omega_e^2}{S_e} \quad (10)$$

其中, H 为惯性时间常数; ω_e 为额定角速度; S_e 为机组容量。根据式(11)将阻尼系数 D 转换为标么化的阻尼系数 $\bar{D}$:

$$\bar{D} = D \omega_e^2 / S_e \quad (11)$$

经过上述变换,2号机组转动方程参数的在线辨识结果见表1。

表1 发电机组转动方程参数在线辨识结果

Table 1 Online parameter identification results of generator motion equation

运动方程参数	辨识值	运动方程参数	辨识值
$M / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	108 995	$D / (\text{s} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	435
H / s	4.7	$\bar{D}$	0.038

表2给出了根据各次有效扰动计算出的辨识值及相对于厂家所提供设计值的偏差。3次扰动事件下, M 辨识值、设计值、偏差的平均值分别为108 995 kg·m²、107 838 kg·m²、1.07%, H 、 D 辨识值的平均值分别为4.7 s、435 s·N/m。由此可见各次扰动的辨

表2 转动惯量辨识值与设计值的比较

Table 2 Comparing identified values to designed values of rotational inertias

扰动事件	M 辨识值 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	M 设计值 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	M 偏差 / %	H 辨识值 / s	D 辨识值 / ($\text{s} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	109 015	107 838	1.09	4.70	416
2	111 043	107 838	2.97	4.79	407
3	106 927	107 838	-0.84	4.61	482

识偏差均在3%以内, M 偏差平均值进一步缩减为1.07%。此外根据文献[6], 两极汽轮发电机惯性时间常数的范围为2.5~6.0 s, 可见各次惯性时间常数辨识值也均在合理范围内。

附录中图A2给出2号机组100%甩负荷试验转速曲线, 附录中图A3给出根据甩负荷试验上升段时长0.14 s的转速曲线计算100%甩负荷平均加速度的线性化曲线, 由平均加速度279.72 r/(s·min)计算出该机组由试验测得的转动惯量为107 855 kg·m², 在线实测值与该试验测量值偏差为1.06%, 两者非常接近。而对于阻尼系数, 目前电力行业还没有标准的试验测量方法。

针对图3所示发电机组扰动事件, 图4为大扰动时间段内利用辨识出的运动方程参数进行仿真得到的计算角速度 ω 与PMU实测角速度 ω_r 曲线, 可见在此组参数下仿真曲线与实测曲线拟合得很好。

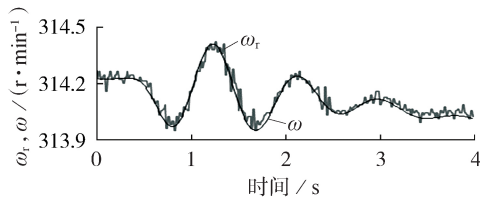


图4 计算角速度曲线与实测角速度曲线的比较

Fig.4 Comparison of simulative and measured angle speeds

5 结论

通过分析基于PMU数据不能准确辨识发电机的电磁暂态和次暂态参数的原因, 指出对发电机运动方程参数进行独立辨识的必要性, 避免发电机电磁参数辨识不准确对其运动方程参数辨识的影响。

针对在实际电网中发电机机械功率不能由PMU直接或间接测量的问题, 提出了缓变功率的概念, 利用缓变功率重新构造运动方程; 并提出了在动态辨识过程中, 用低通滤波器从实测电磁功率获取缓变功率的方法, 从而减少不考虑机械功率变化或者认为机械功率变化与转速偏差具有线性关系所引起的误差。这也使得在辨识中可使用易于获取的较长时间的动态过程曲线, 而不受甩负荷试验有效曲线时间短的限制。

该方法已成功应用于实际电网中, 帮助调度人员利用日常扰动数据对发电机组转动惯量和阻尼系数等运动方程参数进行在线辨识、校核和修正。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 杨赞, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3):

125-131.

YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.

[2] 田丰. 甩负荷试验转子转动惯量计算方法研究[J]. 中国电力, 2005, 38(7): 37-41.

TIAN Feng. Calculation methods for inertia moment of steam turbogenerator rotor using load rejection test[J]. Electric Power, 2005, 38(7): 37-41.

[3] 许国瑞, 刘晓芳, 罗应立, 等. 汽轮发电机转子阻尼系统对第一摆稳定性影响的仿真计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 214-222.

XU Guorui, LIU Xiaofang, LUO Yingli, et al. Simulation study of the first swing stability affected by rotor damping systems of turbine generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 214-222.

[4] 刘志坚, 束洪春, 于继来, 等. 计及网侧工况的阻尼影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 49-53.

LIU Zhijian, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Analysis of damping influencing factors considering operational condition at network side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 49-53.

[5] 余一平, 宋忠鹏, 鞠平, 等. 同步发电机简化模型的等效阻尼系数分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 15-20.

YU Yiping, SONG Zhongpeng, JU Ping, et al. Analysis of equivalent damping coefficient for simplified model of synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 15-20.

[6] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. New York, USA: McGraw-Hill Companies Inc., 1994: 128-136.

[7] 苏小林, 周双喜. Prony法在同步发电机参数辨识中应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(9): 1-4.

SU Xiaolin, ZHOU Shuangxi. Application of Prony method to parameter identification of synchronous generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(9): 1-4.

[8] 段刚, 严亚勤, 谢晓冬, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 73-80.

DUAN Gang, YAN Yaqin, XIE Xiaodong, et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 73-80.

[9] HUANG Z, DU P, KOSTEREV D, et al. Generator dynamic model validation and parameter calibration using phasor measurements at the point of connection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1939-1949.

[10] GHahremani E, KARRARI M, MALIK O P. Synchronous generator third-order model parameter estimation using online experimental data[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(5): 708-719.

[11] 王云, 江全元, 宋军英, 等. 电力系统发电机参数整体辨识的多情景并行内点算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 75-81.

WANG Yun, JIANG Quanyuan, SONG Junying, et al. Multi-scenario parallel interior algorithm for generator parameter identification in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 75-81.

[12] 姜涛, 刘方正, 陈厚合, 等. 基于多通道快速傅里叶小波变换的电力系统主导振荡模式及模态协同辨识方法研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 125-132.

JIANG Tao, LIU Fangzheng, CHEN Houhe, et al. Cooperated identification method of dominant oscillation modes and mode shapes for power system based on multi-channel fast Fourier transform based continuous wavelet transform[J]. Electric Po-

- wer Automation Equipment, 2019, 39(7): 125-132.
- [13] 王正风, 毕天姝. 基于PMU的同步发电机在线参数辨识研究[J]. 东北电力技术, 2012, 33(10): 1-5.
WANG Zhengfeng, BI Tianshu. Study on on-line parameter identification of synchronous generator based on PMU[J]. Northeast Electric Power Technology, 2012, 33(10): 1-5.
- [14] 孙黎霞, 鞠平, 高运华, 等. 基于Park模型的同步发电机参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 50-56.
SUN Lixia, JU Ping, GAO Yunhua, et al. Parameter estimation of synchronous generator based on Park model[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 50-56.
- [15] 唐昆明, 康丽红, 殷家敏, 等. 基于可量测量的同步发电机参数时域辨识[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 135-139, 146.
TANG Kunming, KANG Lihong, YIN Jiamin, et al. Time-domain parameter identification based on measurable variables for synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 135-139, 146.
- [16] 杨浩, 项丹, 冯树辉, 等. 基于直接积分最小二乘法的同步发电机的参数辨识[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(7): 69-73.
YANG Hao, XIANG Dan, FENG Shuhui, et al. Parameter identification of synchronous generator based on direct integration least square algorithm[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2013, 40(7): 69-73.
- [17] 伍双喜, 吴文传, 张伯明, 等. 用PMU实测数据辨识同步发电机参数的关键问题[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 50-55.
WU Shuangxi, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Key issues of synchronous generator parameter identification using PMU measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 50-55.
- [18] 孙昊, 王茂海, 齐霞. 基于PMU实测数据的同步发电机参数在线辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 31-36.
SUN Hao, WANG Maohai, QI Xia. Synchronous generator parameters identification based on PMU data[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 31-36.
- [19] 金宇清, 岳陈熙, 甄威, 等. 基于功角测量的同步发电机参数辨识频域法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 7-11.
JIN Yuqing, YUE Chenxi, ZHEN Wei, et al. On-line frequency response method of synchronous machine parameter identification based on rotor angle measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 7-11.
- [20] 田田, 郭琦, 刘昌玉, 等. 基于改进闭环子空间的水电机组参数辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 169-176.
TIAN Tian, GUO Qi, LIU Changyu, et al. Parameter identification method for hydropower generator based on improved closed-loop subspace[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 169-176.
- [21] 米增强, 陈志忠, 南志远, 等. 同步发电机动态参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 100-105.
MI Zengqiang, CHEN Zhizhong, NAN Zhiyuan, et al. Dynamic parameter identification of synchronous machines[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(2): 100-105.
- [22] 徐磊, 陈淑珍, 肖柏勋. 一种新的零相移数字滤波器的改进算法[J]. 计算机应用研究, 2005, 25(4): 21-22.
XU Lei, CHEN Shuzhen, XIAO Boxun. Designing of an improved algorithm of zero phase digital filter[J]. Application Research of Computers, 2005, 25(4): 21-22.

作者简介:



段刚(1972—),男,山东烟台人,高级工程师,博士,主要从事广域测量系统、安全稳定控制系统以及企业电网事故紧急控制方面的研发工作(E-mail: duangang@sf-auto.com)。

(编辑 王欣竹)

Online parameter identification of generator motion equation based on PMU and slow-varying power

DUAN Gang¹, LI Haifeng², WU Erke¹, LOU Xiaonan¹, LIU Gang¹

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: Since the mechanical power of generator cannot be directly measured and the electromagnetic parameters vary greatly due to different dynamic processes, the parameters of the motion equation cannot be accurately identified in the integrated parameter identification of generator set. The concept of slow-varying power is proposed, and the parameters of generator motion equation are identified independently based on PMU (Phase Measurement Unit) data. Firstly, the motion equation of generator is transformed so that the measured electromagnetic power is composed of slow-varying power and fast-changing power, in which the slow-varying power is composed of unmeasurable mechanical power and constant power, and the fast-changing power is expressed by the motion parameters to be identified and the measurable rotating speed. Then, a low-pass filter is used to obtain the slow-varying power curve from the measured electromagnetic power, so as to transform the motion equation with unmeasurable variables into the identifiable equation with the parameters to be identified as the unknown quantities. The practical application results show that the proposed method can reduce the identification errors caused by not considering the variation of mechanical power in parameter identification or considering the linear relationship existing between the variation of mechanical power and the deviation of rotating speed.

Key words: moment of inertia; damping coefficient; PMU; low-pass filtering; electric generators; parameter identification; slow-varying power

附录

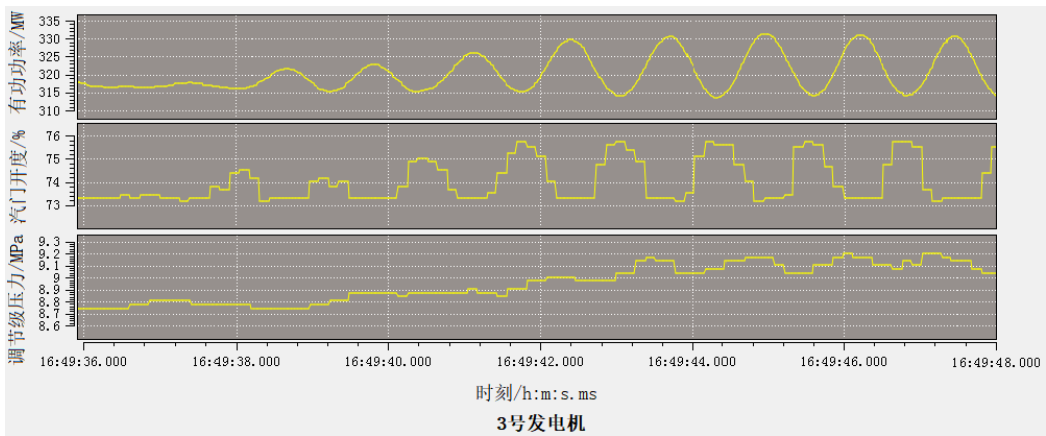


图 A1 PMU 实测调门开度、调节级压力和机端功率

Fig.A1 Valve position, regulation stage pressure and active power of generator measured by PMU

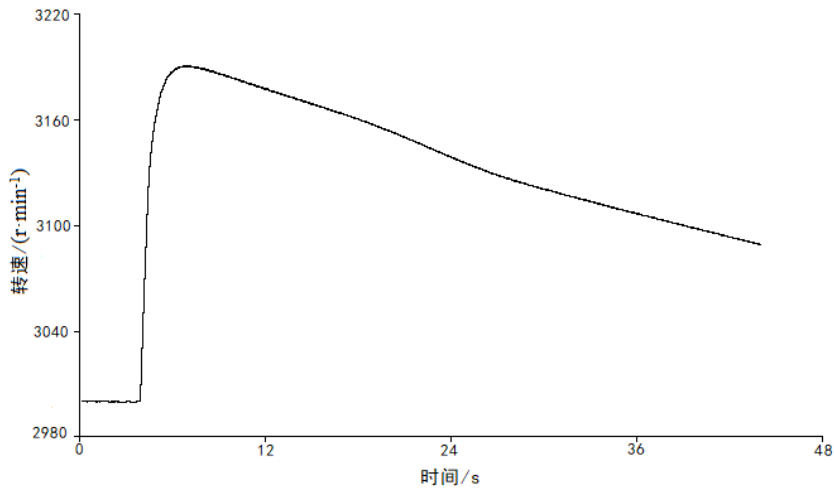


图 A2 2 号机组 100%甩负荷试验转速曲线

Fig.A2 Speed curve of 100% load shedding test for Unit 2

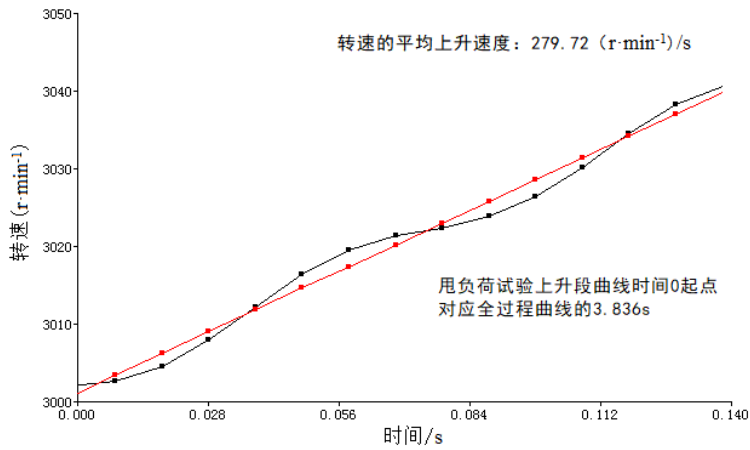


图 A3 2 号机组 100%甩负荷试验加速度曲线

Fig.A3 Acceleration curve of 100% load rejection test for Unit 2