

# 改进的同步电机阻尼绕组电流观测器

吴楠, 李尚盛, 查晓明

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 对现有的阻尼绕组电流观测器进行了改进, 观测器算法采用龙格-库塔 4 法 (R-K4), 相对于现有的一阶向前差分电流观测器而言, 精度更高。对观测器的初值和绝对稳定域问题进行了讨论, 给出了观测器的初值和投入时间不影响跟踪效果的条件。对 IEEE 次同步谐振第一标准模型中的阻尼绕组电流进行观测, 验证了改进后的阻尼绕组电流观测器的有效性。并对阻尼绕组电流成分进行分析, 分析了用其监测次同步振荡的可能性。

**关键词:** 阻尼绕组; 观测器; 绝对稳定域; 次同步振荡 (SSO); 同步电机

## Improved synchronous generator damper current observer

WU Nan, LI Shangsheng, ZHA Xiaoming

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Improved measures are taken on existing damping current observer. Runge-Kutta (R-K4) is adopted to the improved observer which has higher accuracy, comparing with the old observer which adopted one-order forward difference. Initial value and absolute stability region of the observer are discussed and the condition when the initial value and the time observer taken into operation have no influence on result is given. By observing damper current of synchronous generator in IEEE first bench case for SSR, validity of improved damper current observer is testified. Damper current components are analyzed and using damper current to monitor SSO is proposed.

**Key words:** damping winding; observer; absolute stability region; subsynchronous oscillation (SSO); synchronous machine

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0067-06

## 0 引言

阻尼绕组在同步电机建模或分析同步电机对电力系统的影响时必不可少<sup>[1]</sup>。而阻尼绕组电流对研究同步电机阻尼绕组的作用、改进阻尼绕组设计、在线识别同步电机参数、分析电力系统中如低频振荡、次同步振荡等机电相互作用问题十分重要<sup>[2-6]</sup>。

现有的同步电机阻尼绕组电流测量方法有电压降法、电流互感器法、环形磁位计法, 文献[7]分析了其优缺点。由于电机的阻尼绕组通常不是线圈, 而一般是由阻尼条和阻尼环组成的笼形结构<sup>[8]</sup>, 因而难以建立这些电路的精确模型。对同步电机而言, 易测得的电气量有定子端电压、定子端电流、励磁电压、励磁电流。根据状态观测器理论, 可由测得的电气量观测出阻尼绕组电流。已有的阻尼绕组电流观测方法采用一阶向前差分, 精度较低, 而且未考虑初值波动和观测器的投入时间对观测效果的影响<sup>[9]</sup>。

本文对现有的阻尼绕组电流观测器做了改进, 将观测器的算法改进为 R-K4, 提高了观测器的精度。考虑到初值波动问题, 对改进前后的观测器的绝对稳定域进行了推导, 验证了改进后的观测器具有更大的绝对稳定域。基于 PSCAD 中 IEEE 次同步谐振第一标准模型, 验证了改进后的阻尼绕组电流观测器的可行性和优越性, 并将阻尼绕组电流信号的分析应用到次同步振荡的研究中, 提出了可用次同步振荡信号监测次同步振荡的可能性, 为以后采用阻尼绕组电流信号抑制次同步振荡打下基础。

## 1 阻尼绕组电流观测

### 1.1 同步发电机模型

采用文献[10]中的同步电机模型, 定子上有静止的 3 个绕组(a, b, c), 转子方面有四个绕组: 励磁绕组 f(d 轴), 阻尼绕组等值绕组 D(d 轴), 阻尼绕组等值绕组 Q(q 轴), 反映感生涡流作用的等值绕组 g(q 轴)。在规定正方向下, 可得定转子的电压矩阵

表达式为式(1)。

$$v = ri + \dot{\lambda} \quad (1)$$

式中： $r$  为绕组电阻； $i$  为电流； $\lambda$  为磁链。由于磁链和电感系数有关，电感系数又随转子角  $\theta$  而变化，因此采用式(2)、式(3)的 Park 变换将时变系数微分方程变换为常系数微分方程。

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$i_{dq0} = P i_{abc} \quad (3)$$

式中， $\theta$  是 d 轴与 a 轴的夹角。

则同步电机的方程变为式(4)，其中的参数满足关系式(5)<sup>[11]</sup>。

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_d \\ u_q \\ u_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + 3R_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & \omega(x_{aq} + x_q) & 0 & 0 & \omega x_{aq} & \omega x_{aq} \\ 0 & -\omega(x_{ad} + x_d) & R_a & -\omega x_{ad} & -\omega x_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_0 \\ -i_d \\ -i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_g \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_B} \begin{bmatrix} X_a + 3X_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_{ad} + x_d & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{aq} + x_q & 0 & 0 & x_{aq} & x_{aq} \\ 0 & x_{ad} & 0 & x_{ad} + x_f & x_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & x_{ad} & 0 & x_{ad} & x_{ad} + x_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{aq} & 0 & 0 & x_{aq} + x_g & x_{aq} \\ 0 & 0 & x_{aq} & 0 & 0 & x_{aq} & x_{aq} + x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\dot{i}_0 \\ \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_D \\ \dot{i}_g \\ \dot{i}_Q \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $x_{ad}$  为纵轴同步反应电抗； $x_{aq}$  为交轴同步反应电抗； $x_d$ 、 $x_q$  为漏电抗；其他参数意义相似。式(4)中的量除了  $\omega_B$  单位是 rad/s、微分中的时间单位是 s，其他量均是标么值。

$$\begin{cases} X_d = x_{ad} + x_d, X_f = x_{ad} + x_f, X_D = x_{ad} + x_D \\ X_q = x_{aq} + x_q, X_g = x_{aq} + x_g, X_Q = x_{aq} + x_Q \\ kX_f = kX_D = x_{ad}, kX_g = kX_Q = x_{aq} \end{cases} \quad (5)$$

## 1.2 阻尼绕组电流观测器构建

将阻尼绕组电流作为式(4)中的内部状态变量，根据状态观测器理论，进行状态变量的重构。即以原系统的输入量和输出量作为输入量，而它的状态变量的值能渐进逼近原系统状态变量的值<sup>[12]</sup>。

矩阵方程(4)中有七个关于状态变量的方程，取后三个方程，可得到关于阻尼绕组电流  $i_D$ 、 $i_g$ 、 $i_Q$

的一阶常系数微分方程，三者的观测方法相似，此处仅考虑阻尼绕组 D 的电流观测。其数学模型为

$$0 = R_D i_D + \frac{1}{\omega_B} [-x_{ad} \dot{i}_d + x_{ad} \dot{i}_f + (x_{ad} + x_D) \dot{i}_D] \quad (6)$$

式中， $\omega_B$  为电气角速度基准值。阻尼绕组观测器构建如图 1 所示。

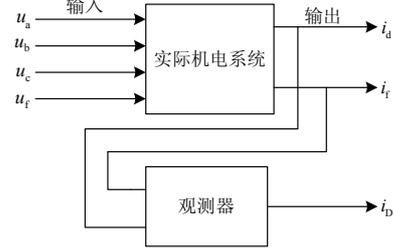


图 1 阻尼绕组电流观测器构建

Fig. 1 Establishing of damper current observer

式(6)中的参数  $R_D$ 、 $x_{ad}$ 、 $x_D$  可以从厂商直接获得，也可通过对同步电机的定转子参数进行辨识获得。本文 PSCAD 仿真中所用的参数通过设置 IEEE 次同步谐振第一标准模型中同步电机模型里的 Monitoring Internal Variables-Advances 来获得。也可从同步电机模型里获得标准参数，通过公式将其转化为所需的同步电机参数<sup>[13]</sup>。

## 1.3 阻尼绕组电流观测器算法选择

对图 1 中观测器算法的选择，需尽量做到采样频率低，计算精度高。文献[2, 9, 11]中对于阻尼绕组电流式(6)的计算选择向前差分，如式(7)，且初始值设为 0，其中  $h$  为采样步长。其本质是一级一阶 Runge-Kutta(R-K1)法。

$$\begin{cases} i_D(n+1) = (1 - \frac{R_D \omega_B h}{x_{ad} + x_D}) i_D(n) + \frac{x_{ad} h}{x_{ad} + x_D} (\dot{i}_d - \dot{i}_f) \\ i_D(0) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

为了提高其精度，可采用四级四阶 Runge-Kutta(R-K4)法，即经典 Runge-Kutta 法。R-K4 计算阻尼绕组电流方法如式(8)<sup>[14]</sup>。

$$\begin{cases} i_D(n+1) = i_D(n) + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ k_1 = \frac{-R_D \omega_B}{x_{ad} + x_D} i_D(n) + \frac{x_{ad}}{x_{ad} + x_D} \dot{i}_d(n) - \frac{x_{ad}}{x_{ad} + x_D} \dot{i}_f(n) \\ k_2 = \frac{-R_D \omega_B}{x_{ad} + x_D} [i_D(n) + \frac{1}{2} h k_1] + \frac{x_{ad}}{x_{ad} + x_D} \dot{i}_d(n + \frac{1}{2}) - \frac{x_{ad}}{x_{ad} + x_D} \dot{i}_f(n + \frac{1}{2}) \\ k_3 = \frac{-R_D \omega_B}{x_{ad} + x_D} [i_D(n) + \frac{1}{2} h k_2] + \frac{x_{ad}}{x_{ad} + x_D} \dot{i}_d(n + \frac{1}{2}) - \frac{x_{ad}}{x_{ad} + x_D} \dot{i}_f(n + \frac{1}{2}) \\ k_4 = \frac{-R_D \omega_B}{x_{ad} + x_D} [i_D(n) + h k_3] + \frac{x_{ad}}{x_{ad} + x_D} \dot{i}_d(n+1) - \frac{x_{ad}}{x_{ad} + x_D} \dot{i}_f(n+1) \end{cases} \quad (8)$$

### 1.4 阻尼绕组电流观测器算法稳定性研究

如图1的观测器采用开环结构,如何保证观测到的阻尼绕组电流值很好地跟踪实际阻尼绕组电流值是一个关键问题。易知, R-K1 和 R-K4 均与式(7)相容,且收敛。但当  $i_D(0)$  存在误差时,式(8)的递推法可能会将误差积累,因此必须考虑该方法的稳定性问题。文献[2, 9, 11]假设  $i_D(0) = 0$ ,即观测器在同步电机正常工作时投入,并未考虑初值波动或观测器投入时间变化时观测器是否能跟踪实际值的问题。现假设

$$\dot{i}_D = \lambda i_D \quad (9)$$

式中,  $\lambda = \frac{-R_D \omega_B}{x_{ad} + x_D}$  [15], 为常数。对于 R-K1, 有

$$i_D(n+1) = i_D(n) + h\lambda i_D(n) \quad (10)$$

设  $i_D^*(n)$  为精确初值的对应解,  $i_D(n)$  有误差  $e_n$ , 即

$$e_n = i_D(n) - i_D^*(n) \quad (11)$$

则

$$i_D^*(n+1) = (1 + h\lambda)i_D^*(n) \quad (12)$$

$$e_{n+1} = (1 + h\lambda)^{n+1} e_0 \quad (13)$$

所以, R-K1 的绝对稳定域为  $|1 + h\lambda| < 1$ , 即

$$-2 < \lambda h < 0 \quad (14)$$

对于 R-K4, 有

$$\begin{cases} k_1 = \lambda i_D(n) \\ k_2 = \lambda[i_D(n) + \frac{1}{2}hk_1] = \lambda i_D(n) + \frac{1}{2}h\lambda^2 i_D(n) \\ k_3 = \lambda[i_D(n) + \frac{1}{2}hk_2] = \lambda i_D(n) + \frac{1}{2}h\lambda^2 i_D(n) + \frac{1}{4}h^2\lambda^3 i_D(n) \\ k_4 = \lambda[i_D(n) + hk_3] = \lambda i_D(n) + h\lambda^2 i_D(n) + \frac{1}{2}h^2\lambda^3 i_D(n) + \frac{1}{4}h^3\lambda^4 i_D(n) \end{cases} \quad (15)$$

$$i_D(n+1) = i_D(n) + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) = (1 + h\lambda + \frac{h^2\lambda^2}{2} + \frac{h^3\lambda^3}{6} + \frac{h^4\lambda^4}{24})i_D(n) \quad (16)$$

其绝对稳定域为

$$\left| 1 + h\lambda + \frac{(h\lambda)^2}{2} + \frac{(h\lambda)^3}{6} + \frac{(h\lambda)^4}{24} \right| < 1$$

即

$$-2.78 < h\lambda < 0 \quad (17)$$

由于此处  $\lambda$  为常数, 所以绝对稳定域限制了步长大小。

可见, R-K4 较 R-K1 有更高的精度, 更大的绝对稳定域。

### 2 基于 IEEE 第一标准模型的次同步振荡阻尼绕组电流成分分析

假设某一稳态运行条件下, 机组轴系上的微小扰动时发电机转子产生频率为  $\omega_m$  (p.u.), 幅值为  $A$  的角位移增量  $\Delta\theta$  如式(18),  $\omega_m$  为轴系某一自然扭转频率的标么值。

$$\Delta\theta = A \sin \omega_m t \quad (18)$$

文献[10]推导得频率为  $\omega_m$  的转子角位移增量在  $a$  相电压上产生的电压增量为式(19)。

$$\Delta u_a = \sqrt{\psi_{q0}^2 + \psi_{d0}^2} \left\{ \frac{A}{2} (1 - \omega_m) \sin[(1 - \omega_m)t + \alpha] - \frac{A}{2} (1 + \omega_m) \sin[(1 + \omega_m)t + \alpha] \right\} \quad (19)$$

式中:  $\alpha = \arctan(\psi_{q0} / \psi_{d0})$ ;  $\psi_{d0}$ 、 $\psi_{q0}$  为稳态前的磁链。

若与定子回路相连的电路中的电感和电容形成谐振回路且其谐振频率正好是  $(1 - \omega_m)$ , 则定子回路中将会产生电流为

$$\Delta i_a = \Delta I \sin[(1 - \omega_m)t + \alpha] \quad (20)$$

$$\Delta I = \sqrt{\psi_{q0}^2 + \psi_{d0}^2} \times \frac{A}{2} \times \frac{1 - \omega_m}{R} \quad (21)$$

由式(20)可知, 定子电流将会出现与  $\omega_m$  互补的振荡频率。Park 变换后可得

$$\Delta i_d = -\Delta I \sin(\omega_m t - \alpha) \quad (22)$$

由于转子上的绕组 D、f 以  $d$  轴为轴线, 根据电磁感应定律可设

$$\Delta i_f = i_D = A_1 \cos(\omega_m t - \alpha) \quad (23)$$

由式(23)可知, 阻尼绕组 D 中有和转速一致的频率为  $\omega_m$  的分量, 则当轴系上频率为  $\omega_m$  的振荡发散时, 阻尼绕组中的电流也会呈现发散趋势。其中, 根据式(9)可得  $A_1$  满足

$$\begin{aligned} & \left( \frac{x_{ad} A_1 \omega_m}{x_{ad} + x_D} + A_1 \omega_m \right) \sin(\omega_m t - \alpha) = \\ & \left( \frac{x_{ad} \Delta I \omega_m}{x_{ad} + x_D} + \frac{R_D A_1 \omega_B}{x_{ad} + x_D} \right) \cos(\omega_m t - \alpha) \end{aligned} \quad (24)$$

综上所述, 当发电机转子上发生频率为  $\omega_m$  (p.u.) 的振荡, 且与定子回路相连的电路中的电感和电容形成谐振回路且其谐振频率正好是  $(1 - \omega_m)$  时, 发电机定子端会产生  $(1 - \omega_m)$  频的振荡, 阻尼绕组中的电流会有  $\omega_m$  频的振荡。这虽然是在次同步谐振条件下推得, 也适用于因电力系统发生大扰动时引发的次同步振荡。

### 3 仿真实验

用PSCAD中IEEE次同步谐振第一标准模型进行仿真验证,系统简化接线图如图2所示,电机参数选择如表1所示。其中,系统基频是60 Hz,发电机轴系采用六质量块模型,参数设置选用第一标准模型中的默认设置。该模型存在5个扭振模态,扭振频率依次为15.71 Hz、20.21 Hz、25.55 Hz、32.28 Hz和47.45 Hz。在1.5 s时刻,系统在图2中节点B经过渡阻抗发生三相短路,故障持续时间为0.075 s。故障结束后,次同步振荡现象发生<sup>[13]</sup>。

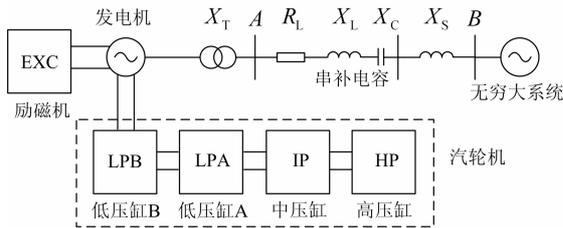


图2 IEEE第一标准模型系统接线图

Fig. 2 Wiring diagram of IEEE first benchmark system

表1 同步电机参数选择

Table 1 Parameters selection of synchronous machine

| 同步电机<br>参数选择 | $x_{ad}/p.u.$ | $x_D/p.u.$ | $R_D/p.u.$ |
|--------------|---------------|------------|------------|
|              | 1.690 5       | 0.072 4    | 0.011 8    |

#### 3.1 阻尼绕组电流观测

取 $\omega_B = 377 \text{ rad/s}$ ,初值取 $i_D(0) = 0$ ,采样频率为1 kHz。将PSCAD中的波形数据导入Matlab中计算,图3分别给出了采用R-K1、R-K4算法的阻

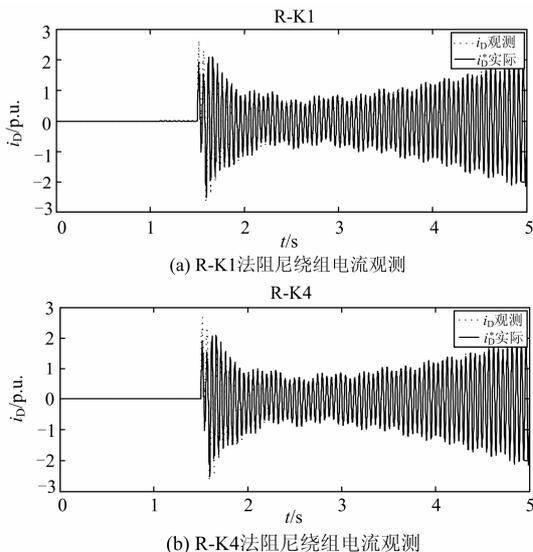


图3 R-K1法、R-K4法阻尼绕组电流观测器

Fig. 3 Damping current observing using R-K1, R-K4

尼绕组电流观测器的波形 $i_D$ 和模型自带阻尼绕组电流波形 $i_D^*$ 的比较。

定义总体误差为<sup>[16]</sup>

$$\sigma = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n [i_D(i) - i_D^*(i)]^2} \quad (25)$$

相同参数情况下, $\sigma_{R-K1} = 0.0038$ , $\sigma_{R-K4} = 0.0034$ 。

图4中给出了采用R-K1、R-K4算法的阻尼绕组电流观测的残余信号图。显然,R-K4使观测器精度更高。

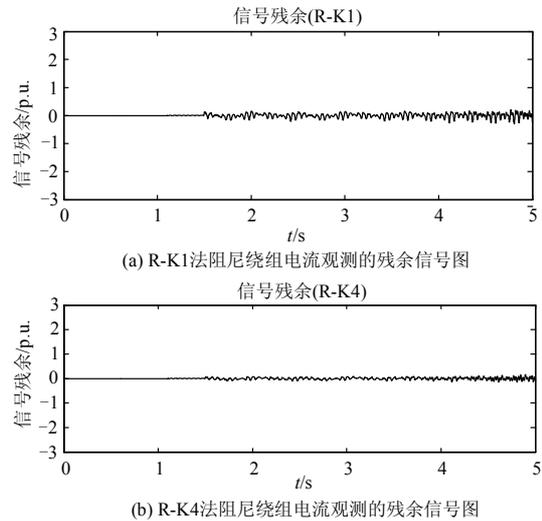


图4 R-K1法、R-K4法阻尼绕组电流观测的残余信号图

Fig. 4 Residual signal of damping current observing using R-K1, R-K4

#### 3.2 初值改变对阻尼绕组电流观测影响

由表1和式(14)、式(17),可得观测器满足绝对稳定域条件时,采用R-K1、R-K4时的采样步长要求分别为 $0 < h < 0.793 \text{ s}$ 、 $0 < h < 1.102 \text{ s}$ 。可见,R-K1、R-K4法绝对稳定域都较大(R-K4更大),对采样频率要求较低。图5中给出了采用R-K4法,采样频率为1 kHz,即 $h = 0.001 \text{ s}$ 时,改变观测器的投入时间和初始值时观测器的跟踪效果。

如图5(c)所示,在绝对稳定域范围内,即使设置不同初值,观测器均能准确跟踪到实际电流值,初值变化不影响阻尼绕组电流观测器的跟踪效果。且由图5(d)可进一步知,采样频率越高,跟踪的误差越小。

#### 3.3 基于IEEE第一标准模型的次同步振荡信号成分分析

1.5 s后由于转速、定子端电流、转矩均呈发散趋势,次同步振荡发生。在PSCAD中录取0~10 s时段模型自带的发电机转速波形、定子端a相电流波形和阻尼绕组电流波形,并用Matlab绘出如图6。

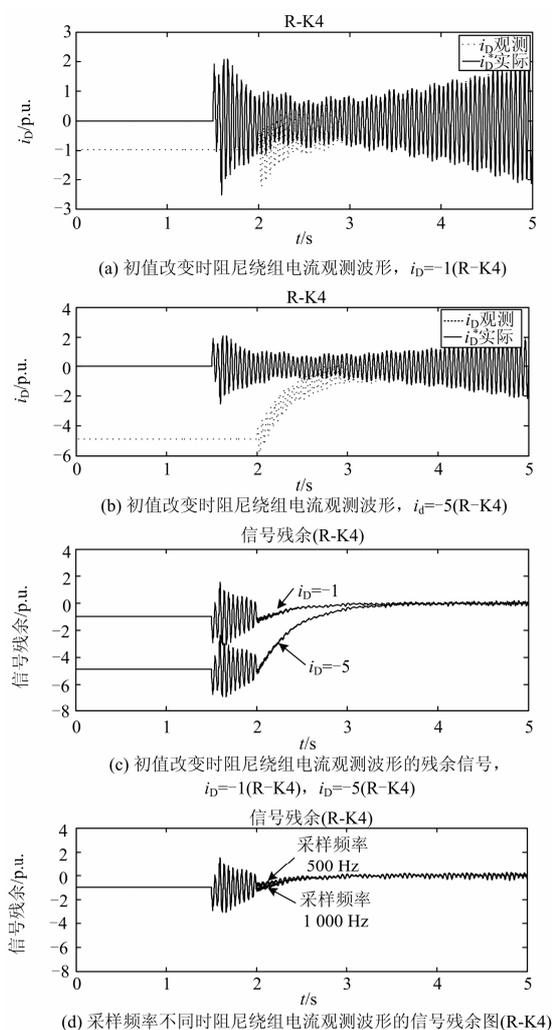


图 5 初值改变对阻尼绕组电流观测的影响

Fig. 5 Influence on damping current observing when initial value changes

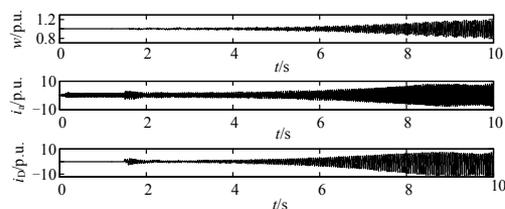


图 6 次同步振荡信号对比

Fig. 6 Comparison of subsynchronous oscillation signals

可见, 单机无穷大系统发生次同步振荡时, 发电机转速和定子端电流均呈现振荡发散趋势, 阻尼绕组电流也呈现发散模式。因此阻尼绕组电流可以用来监测次同步振荡。

如今对次同步振荡信号分析的方法有很多, 如小波变换法、PRONY 法、希尔伯特—黄变换(HHT)法、改进矩阵束法、随机子空间(SS)辨识法、基于

旋转矢量不变技术的信号参数估计法(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)等。现用 ESPRIT 法对发电机转速、定子端 a 相电流、阻尼绕组 D 电流进行模态频率分析<sup>[17]</sup>, 分析的时间段选取 1.6~2 s 和 6~9 s。为了进行统一对比, 定子端电流的模态频率取被 60 Hz 减过后的频率, 其对比结果如表 2, 表中只给出了主要模态频率分量。

表 2 次同步振荡信号成分对比

Table 2 Comparison of subsynchronous oscillation signal components

| 1.6~2 s |        |      |        |       |        |      |
|---------|--------|------|--------|-------|--------|------|
| 模态      | w      |      | $i_a$  |       | $i_D$  |      |
| 理论值/Hz  | 实际值/Hz | 误差/% | 实际值/Hz | 误差/%  | 实际值/Hz | 误差/% |
| 15.71   | 15.96  | 1.59 | 15.50  | -1.34 | 16.11  | 2.55 |
| 20.21   | 20.73  | 2.57 | 20.69  | 2.38  | 20.51  | 1.48 |
| 6~9 s   |        |      |        |       |        |      |
| 模态      | w      |      | $i_a$  |       | $i_D$  |      |
| 理论值/Hz  | 实际值/Hz | 误差/% | 实际值/Hz | 误差/%  | 实际值/Hz | 误差/% |
| 15.71   | 15.89  | 1.15 | 15.93  | 1.40  | 15.87  | 1.02 |
| 20.21   | 20.28  | 0.35 | 20.30  | 0.45  | 20.26  | 0.25 |

表 2 验证了第 2 节中转速、定子端电流、阻尼绕组电流中的频率成分关系, 若采用实时监测, 阻尼绕组电流信号能在故障发生较短时间内监测出次同步振荡现象, 且对于主要频率成分 20.21 Hz 精度更高。在实际运用时, 由于发电机转速测量复杂, 定子端电流次同步分量小, 电流发散趋势不明显, 且噪声干扰影响相对较大, 因此采用阻尼绕组电流信号监测次同步振荡有一定价值, 且为后续次同步振荡抑制打下基础。

## 4 结论

1) 改进的阻尼绕组电流观测器具有更高的精度, 且绝对稳定域更大, 对采样频率的要求降低。

2) 在绝对稳定域范围内, 初值变化不影响阻尼绕组电流观测器的跟踪效果。

3) 当发生次同步振荡时, 阻尼绕组中含有与转速一致的次同步分量, 可通过观测阻尼绕组电流不为零且为振荡发散来监测次同步振荡现象, 为以后研究次同步振荡的抑制打下基础。

## 参考文献

[1] 徐英新, 王西田, 杨帆, 等. 同步发电机阻尼绕组和磁路饱和对低频振荡阻尼的影响[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 28-31.

- XU Yingxin, WANG Xitian, YANG Fan, et al. Effect of synchronous machine damper windings and magnetic saturation on low-frequency oscillation damping[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 28-31.
- [2] CHEN Xiangyi, ZHA Xiaoming, LI Chunyan, et al. Design of a damper winding currents observer of twelve-phase synchronous generator for parameters identification [C]// Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-pacific, March 28-31, 2010.
- [3] 李天云, 祝磊, 宋莉, 等. 基于 TLS-ESPRIT 的同步电机参数辨识[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 38-42.  
LI Tianyun, ZHU Lei, SONG Li, et al. Parameter identification of synchronous machine based on TLS-ESPRIT Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 38-42.
- [4] 查晓明, 张扬, 成燕, 等. 用于简化微电网结构的微分几何广义同调方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 24-31.  
ZHA Xiaoming, ZHANG Yang, CHENG Yan, et al. New method of extended coherency for micro-grid based on homology in differential geometry[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 24-31.
- [5] 张宇辉, 陈峰, 李慧敏, 等. 基于小波变换和矩阵束算法的同步电机参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 87-92.  
ZHANG Yuhui, CHEN Feng, LI Huimin, et al. Parameter identification of synchronous machine based on wavelet transform and matrix pencil algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 87-92.
- [6] 倪良华, 李先允. 基于改进混合遗传算法的同步电机参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 51-55.  
NI Lianghua, LI Xianyun. Parameter identification of synchronous machine based on a hybrid genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 51-55.
- [7] 潘俊吉. 同步电机阻尼绕组电流测量方法[J]. 电工技术杂志, 1983(4): 31-33.  
PAN Junji. Measurements on damper winding current of synchronous machine[J]. Electrotechnical Journal, 1983(4): 31-33.
- [8] 侯君, 刘兆江. 同步电机阻尼绕组设计分析[J]. 防爆电机, 2012, 47(3): 10-11.  
HOU Jun, LIU Zhaojiang. Design and analysis on damper windings of synchronous motor[J]. Explosion-proof Electric Machine, 2012, 47(3): 10-11.
- [9] KYRIAKIDES E, HEYDT G T. An observer for the estimation of synchronous generator damper currents for use in parameter identification[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(1): 175-177.
- [10] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 21-33.  
CHENG Shijie, CAO Yijia, JIANG Quanyuan. Theory and method of subsynchronous oscillation in power system[M]. Beijing: Science Press, 2009: 21-33.
- [11] KYRIAKIDES E, HEYDT G T, VITTAL V. On-line estimation of synchronous generator parameters using a damper current observer and a graphic user interface[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 499-507.
- [12] 刘豹, 唐万生. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 210-220.
- [13] KYRIAKIDES E. Innovative concepts for on-line synchronous generator parameter estimation[D]. Tempe, AZ: Arizona State University, 2003.
- [14] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 182-191.  
YAN Qingjin. Numerical analysis[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 182-191.
- [15] 李荣华, 冯果忱. 微分方程数值解法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 32-64.  
LI Ronghua, FENG Guochen. Numerical methods for differential equations[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989: 32-64.
- [16] 董飞飞, 刘涤尘, 涂炼, 等. 基于 MM-ARMA 算法的次同步振荡模态参数辨识[J]. 高电压技术, 2013, 33(19): 1252-1257.  
DONG Feifei, LIU Dichen, TU Lian, et al. Subsynchronous oscillation modal parameter identification based on MM-ARMA algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2013, 33(19): 1252-1257.
- [17] 李宽, 李兴源, 胡楠, 等. 基于经验模态分解自适应滤波的次同步振荡 ESPRIT 分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 18-23.  
LI Kuan, LI Xingyuan, HU Nan, et al. ESPRIT analysis of subsynchronous oscillation based on the empirical mode decomposition self-adaptive filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 18-23.

收稿日期: 2014-03-21; 修回日期: 2014-04-15

作者简介:

吴楠(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制; E-mail: nicolanan@126.com

李尚盛(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为并联型补偿器及其在电力系统中的应用;

查晓明(1967-), 男, 博士, 教授, 长期从事柔性交流输电技术、电力电子技术及其在电力系统中的应用、智能电网等研究工作。