# 同步发电机简化模型的等效阻尼系数分析

余一平[1],宋忠鹏[2],鞠 平[1],金宇清[1],秦 川[1]
(1. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心,江苏 南京 210098;
2. 南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

**摘要**:通过对发电机详细模型和简化模型的比较,推导出单机无穷大系统下发电机简化模型阻尼转矩系数的数学表达式。通过 Prony 方法分析扰动后每台发电机的有功功率、功角和角速度的变化对应的振荡模式,计算出每个模式对应的阻尼转矩,通过每个振荡模式对实用模型阻尼转矩系数的灵敏度大小,确定发电机简化模型中阻尼转矩系数的取值。通过单机无穷大系统和 IEEE 39 节点系统算例验证了所提方法的合理性。

**关键词**:同步发电机;模型;阻尼系数;Prony 分析;灵敏度分析
**中图分类号**:TM 341 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.003

## 0 引言

在从事电力系统稳定性分析研究或控制器设计时,为节约计算内存、避免“维数灾难”等,常对电力系统做一定的简化与降阶处理。例如对某些发电机组不计阻尼绕组的作用,按简化模型考虑,从而达到降阶目的。如果发电机组的阻尼强弱与电力系统的主导振荡模式或不稳定振荡模式敏感相关,简单地忽略该机组的阻尼绕组,舍弃该机组的异步阻尼作用,可能会将一个稳定的电力系统判别为不稳定。不稳定的结论迫使人们采取措施来提高稳定性,从而造成不必要的经济损失。而这种简化模型下的发电机阻尼转矩系数项涉及的内容复杂,和运行状态及故障状况有关,故取值等相关问题有待研究[1-2]。

本文根据不同的运行工况,分析了同步发电机简化模型的阻尼系数,对于单机无穷大系统推导了发电机二阶模型阻尼系数近似计算公式,对于多机系统通过特征根灵敏度方法给出了同步发电机阻尼系数选取方法。

## 1 单机系统同步电机阻尼系数

### 1.1 同步电机六阶模型

由理想双极电机推导出来的最详细的实用模型,同时考虑 $dq$ 轴的阻尼绕组及 $q$ 轴的 g 绕组[2-3]。

电磁暂态方程:

$$\begin{aligned}
&\tau'_{d0}\frac{\mathrm{d}E'_q}{\mathrm{d}t}=E_\mathrm{f}-K_\mathrm{F}E'_q-(X_d-X'_d)i_d\\
&\tau''_{d0}\left(\frac{\mathrm{d}E''_q}{\mathrm{d}t}-\frac{\mathrm{d}E'_q}{\mathrm{d}t}\right)=E'_q-E''_q-(X'_d-X''_d)i_d\\
&\tau'_{q0}\frac{\mathrm{d}E'_d}{\mathrm{d}t}=-E'_d+(X_q-X'_q)i_q\\
&\tau''_{q0}\left(\frac{\mathrm{d}E''_d}{\mathrm{d}t}-\frac{\mathrm{d}E'_d}{\mathrm{d}t}\right)=E'_d-E''_d+(X'_q-X''_q)i_q
\end{aligned}\tag{1}$$

转子运动方程:

$$\begin{aligned}
&\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}=(\omega-1)\omega_0\\
&\tau_\mathrm{j}\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=T_\mathrm{m}-T_\mathrm{e}-D(\omega-1)
\end{aligned}\tag{2}$$

其中电磁转矩表达式为:

$$T_\mathrm{e}=P_\mathrm{e}=E''_qi_q+E''_di_d+(X''_q-X''_d)i_di_q\tag{3}$$

其中,$E''_d$、$E''_q$ 和 $E'_d$、$E'_q$ 分别为 $d$、$q$ 轴次暂态和暂态电势;$E_\mathrm{f}$ 为励磁电势;$X''_d$、$X''_q$、$X'_d$、$X'_q$ 和 $X_d$、$X_q$ 分别为 $d$、$q$ 轴次暂态、暂态和同步电抗;$\tau''_{d0}$、$\tau''_{q0}$ 和 $\tau'_{d0}$、$\tau'_{q0}$ 分别为 $d$、$q$ 轴次暂态和暂态开路时间常数;$K_\mathrm{F}$ 为发电机饱和系数;$\tau_\mathrm{j}$ 为惯性时间常数;$D$ 为阻尼系数。

### 1.2 二阶模型阻尼系数推导

式(1)、(2)可以化成形如 $\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{X}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{AX}$ 的形式,将上式在系统稳态工作点附近线性化,化为状态量的微增量方程,并对时间导数在复频域内作拉普拉斯变换得到类似于式(4)的公式。

$$s\Delta\boldsymbol{X}=\boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{X}\tag{4}$$

单机无穷大系统情况下认为无穷大母线电压恒定,且忽略同步电机定子电阻及电抗的影响,则由发电机定子侧的电气关系可以得到电流微增量方程:

$$\begin{aligned}
&\Delta I_d=\frac{U\sin\delta_0\Delta\delta+\Delta E''_q}{X''_d}=\frac{U_{d0}\Delta\delta+\Delta E''_q}{X''_d}\\
&\Delta I_q=\frac{U\cos\delta_0\Delta\delta-\Delta E''_d}{X''_q}=\frac{U_{q0}\Delta\delta-\Delta E''_d}{X''_q}
\end{aligned}\tag{5}$$

其中,$\delta_0$、$U_{d0}$、$U_{q0}$ 为系统运行稳态量。

根据式(1)可以看出 $dq$ 轴磁链解耦,可以得到同步电机次暂态电势的表达式:

**收稿日期**:2012-09-07;**修回日期**:2013-08-07
**基金项目**:国家自然科学基金重点项目(51137002);江苏省自然科学基金重点研究专项(BK2011026);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011B08914)
Project supported by the State Key Program of the National Natural Science Foundation of China(51137002),the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK2011026) and Fundamental Research Funds for the Central Universities(2011B08914)

$$\begin{cases}\Delta E_q''=G_1(s)\Delta\delta=\dfrac{K_1s+K_2}{s^2-K_3s+K_4}\Delta\delta\\ \Delta E_d''=G_2(s)\Delta\delta=\dfrac{K_5s+K_6}{s^2-K_7s+K_8}\Delta\delta\end{cases}\tag{6}$$

其中，$K_1$—$K_8$ 为根据系统运行稳态量及发电机参数可以求得的已知系数，如式(7)、(8)所示。

$$\begin{cases}K_1=-\dfrac{1}{\tau_{d0}''}\dfrac{X_d'-X_d''}{X_d''}U_{d0}-\dfrac{1}{\tau_{d0}'}\dfrac{X_d-X_d'}{X_d''}U_{d0}\\ K_2=-\dfrac{X_d-X_d''}{\tau_{d0}'\tau_{d0}''X_d''}U_{d0}\\ K_3=-\dfrac{X_d-X_d'+X_d''}{\tau_{d0}'X_d''}-\dfrac{X_d'}{\tau_{d0}''X_d''}\\ K_4=\dfrac{X_d}{\tau_{d0}'\tau_{d0}''X_d''}\end{cases}\tag{7}$$

$$\begin{cases}K_5=\dfrac{1}{\tau_{q0}''}\dfrac{X_q'-X_q''}{X_q''}U_{q0}+\dfrac{1}{\tau_{q0}'}\dfrac{X_q-X_q'}{X_q''}U_{q0}\\ K_6=\dfrac{X_q-X_q''}{\tau_{q0}'\tau_{q0}''X_q''}U_{q0}\\ K_7=-\dfrac{X_q-X_q'+X_q''}{\tau_{q0}'X_q''}-\dfrac{X_q'}{\tau_{q0}''X_q''}\\ K_8=\dfrac{X_q}{\tau_{q0}'\tau_{q0}''X_q''}\end{cases}\tag{8}$$

则单机系统下详细模型的电磁功率微增量可以表示为拉普拉斯算子和 $\Delta\delta$ 的函数：

$$\Delta P=H(s)\Delta\delta\tag{9}$$

其中含有 $s\Delta\delta$ 项前面的系数即二阶简化模型中的电气阻尼系数，拉普拉斯算子即为系统的特征根，在二阶模型中可以表示为：

$$s=-\zeta\omega_n\pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\tag{10}$$

$$\omega_n=\sqrt{\frac{\omega_0}{\tau_j}\left[\left(\frac{U_{q0}}{X_q'}+I_{d0}\right)U_{q0}+\left(\frac{U_{d0}}{X_d'}+I_{q0}\right)U_{d0}\right]}\tag{11}$$

其中，$\zeta$ 为阻尼比，$\omega_n$ 为自然振荡频率。

在实际情况中由于 $\zeta\ll1$，所以 $s\approx\omega_n$，即用自然频率代替拉普拉斯算子。那么二阶模型的阻尼系数 $D$ 可以得到近似的公式为：

$$D\approx\mathrm{Im}\left[-K_2\left(\frac{N_1}{j\omega_n-g_1}+\frac{N_2}{j\omega_n-g_2}\right)-K_3\left(\frac{N_3}{j\omega_n-g_3}+\frac{N_4}{j\omega_n-g_4}\right)\right]\tau_j\omega_0/\omega_n\tag{12}$$

$$\begin{cases}g_1=\dfrac{K_3}{2}+\sqrt{\dfrac{K_3^2}{4}-K_4}\\ g_2=\dfrac{K_3}{2}-\sqrt{\dfrac{K_3^2}{4}-K_4}\\ g_3=\dfrac{K_7}{2}+\sqrt{\dfrac{K_7^2}{4}-K_8}\\ g_4=\dfrac{K_7}{2}-\sqrt{\dfrac{K_7^2}{4}-K_8}\end{cases}$$

$$\begin{cases}N_1=\lim\limits_{s\to g_1}\left[\dfrac{K_1s+K_2}{s^2-K_3s+K_4}(s-g_1)\right]\\ N_2=\lim\limits_{s\to g_2}\left[\dfrac{K_1s+K_2}{s^2-K_3s+K_4}(s-g_2)\right]\\ N_3=\lim\limits_{s\to g_3}\left[\dfrac{K_5s+K_6}{s^2-K_7s+K_8}(s-g_3)\right]\\ N_4=\lim\limits_{s\to g_4}\left[\dfrac{K_5s+K_6}{s^2-K_7s+K_8}(s-g_4)\right]\end{cases}$$

同样，单机无穷大系统下其他阶次简化模型的阻尼系数推导过程类似于上述二阶模型阻尼系数的推导，在此不再赘述。在采用简化模型时由于忽略了一些高阶次项、磁链饱和等的影响，所以仿真结果必然会造成一些误差，特别是同步转矩，从而导致在频率、相位上会出现偏差，本文只关注其阻尼系数即仿真衰减因子的问题。在精度要求不高需要简化计算时，简化模型还是能很好地表示同步电机的特性[4-15]。

## 2 多机系统同步电机阻尼系数研究

多机系统阶次高，系统故障模式复杂，影响同步电机阻尼系数的因素众多，难以给出显性的表达式。针对这种情况，本文应用 Prony 分析，对多机情况下系统运行状态及故障后的振荡模式作一系列分析，然后根据特征根灵敏度的关系，给出多机系统中，当一台发电机采用简化模型时，阻尼系数合适的取值。

### 2.1 Prony 分析

Prony 分析是用指数项线性组合拟合有限的等间隔采样的信号，可以包含信号中的频率、阻尼比、幅值和相位。Prony 分析采用最小二乘意义上的拟合，无需估计样本是否自相关，估计值方差较小。

设时间序列 $X(n)(n=0,1,\cdots,N-1)$，$N$ 为采样点数，可以采用式(13)所示的指数函数进行拟合。

$$\hat{X}(n)=\sum_{i=1}^{p}b_iZ_i^n\quad n=0,1,\cdots,N-1\tag{13}$$

其中，$b_i=A_i\exp(j\theta_i)$，$A_i$ 为幅值，$\theta_i$ 为初始相位；$Z_i=\exp[(\partial_i+j2\pi f_i)\Delta t]$，$\partial_i$ 为衰减因子，$f_i$ 为振荡频率，$\Delta t$ 为采样间隔。

通过一系列数学变换可以推出差分方程式：

$$\hat{X}(n)=-\sum_{i=1}^{p}a_iZ_i^n\quad n=0,1,\cdots,N-1\tag{14}$$

$$r(i,k)=\sum_{n=p}^{N-1}\hat{X}(n-k)\hat{X}(n-i)\quad i,k=0,1,\cdots,p\tag{15}$$

其中，$p$ 为模型阶数，$a_i$ 为振荡模式所对应的系数。

由上式可以得到：

$$\begin{bmatrix}r(0,0)&r(0,1)&\cdots&r(0,p)\\ r(1,0)&r(1,1)&\cdots&r(1,p)\\ \vdots&\vdots&&\vdots\\ r(p,0)&r(p,1)&\cdots&r(p,p)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\a_1\\ \vdots\\a_p\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\varepsilon_p\\0\\ \vdots\\0\end{bmatrix}\tag{16}$$

其中，$\varepsilon_p$ 为最小二乘误差。

根据式(16)求出 $a_i$，从而可以求出式(17)每一个特征根。

$$1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}+\cdots+a_pz^{-p}=0 \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \hat{X}(1) \\ \hat{X}(2) \\ \vdots \\ \hat{X}(p) \end{bmatrix} \tag{18}$$

利用最小二乘法在式(18)中求解上述式中的 $b_i$，所以：

$$\begin{cases} A_i=\left|b_i\right| \\ \theta_i=\arctan\dfrac{\mathrm{Im}(b_i)}{\mathrm{Re}(b_i)} \\ \partial_i=\dfrac{\mathrm{Im}(z_i)}{\Delta t} \\ f_i=\arctan\left[\dfrac{\mathrm{Im}(z_i)}{\mathrm{Re}(z_i)}\dfrac{1}{2\pi\Delta t}\right] \end{cases} \tag{19}$$

由此可以得到时域的时间序列的各个模式和模态。Prony 分析已经成功地应用于电力系统的分析与控制、电力系统参数辨识和电力系统稳定器的设置等方面[11,16-19]。

## 2.2 Prony 分析在电力系统中的应用

电力系统线性化状态方程 $\mathrm{d}\Delta\boldsymbol{X}/\mathrm{d}t=\boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{X}$ 通过一系列变换可得到如下形式：

$$\boldsymbol{X}(t)=\sum_{i=1}^{m}\mathrm{e}^{\lambda_i t}\boldsymbol{u}_i\boldsymbol{v}_i\boldsymbol{X}(0)=\sum_{i=1}^{m}\mathrm{e}^{\lambda_i t}\boldsymbol{u}_i\boldsymbol{w}_{0i} \tag{20}$$

其中，$\boldsymbol{\lambda}_i$ 为状态矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值，$m$ 为模式个数，$\boldsymbol{v}_i$、$\boldsymbol{u}_i$ 为 $\boldsymbol{A}$ 的左、右特征向量，$\boldsymbol{w}_{0i}$ 为中间向量。可见系统的每个状态变量形如式(20)，所以采用 Prony 分析可获得系统的振荡模式与模态。

在用 Prony 分析进行数据分析时，对于数据的采样有一些要求。根据采样定理可知，采样频率要大于信号的最高频率的 2 倍；本文研究只关注其低频段的振荡特性，所以留有一定裕度，采样周期设为 0.1 s；同样为了捕捉到频率相对较低的模式，对截取的时间长度也有一定要求，一般时间长度应该包括 2 个周期的最低频率，截取时间太长又容易使一些衰减较快的模式丢失，所以本文中采用故障发生后 1~20 s 时间段为样本；拟合的阶次和实际计算中采样点的总数有关，而且电力系统阶次与实际系统有关，为了能够准确地反映系统特性，拟合阶次应根据不同的系统按照实际采样情况选取。

一般一种故障下会激发出多个振荡模式，其中被激励得最强、表现最明显的为主导低频振荡模式，具体分析中可以观察几个作用相对较明显的模式进行分析。式(21)可以作为判断主导地位的振荡模式的标准。

$$E_i=A_i\sum_{n=1}^{N}\exp(\partial_i+\mathrm{j}2\pi f_i n\Delta t) \tag{21}$$

其中，$A_i$、$\partial_i$、$f_i$ 分别为经过 Prony 分析得出的第 $i$ 个模式的幅值、衰减因子、振荡频率，$\Delta t$ 为采样间隔。式(21)是第 $i$ 个模式在采样时间内的所有值的和，符合实际对主导模式的判断[16-17,19]。

## 2.3 模式对应的阻尼转矩系数

通过对系统中每个发电机的实际功角、角速度、有功功率进行录波，然后对其进行 Prony 分析得到具体的振荡模式，并通过功角、角速度、有功功率之间的关系可以得到每个模式下的阻尼系数[5]。由式(20)可知对于每一个发电机可以认为：

$$\Delta\delta=\sum_{i=1}^{m}\Delta\delta_i \tag{22}$$

$$\Delta\omega=\sum_{i=1}^{m}\Delta\omega_i \tag{23}$$

其中，$\Delta\delta_i$、$\Delta\omega_i$ 为第 $i$ 个模式下功角及角速度的偏差量。

对于每个模式下的电磁转矩为：

$$\Delta T_{ei}=K_{si}\Delta\delta_i+D_i\Delta\omega_i \tag{24}$$

其中，$K_{si}$、$D_i$ 分别为第 $i$ 个模式的同步转矩系数和阻尼转矩系数。

所以可以通过 Prony 分析得到每个模式下的电磁转矩、功角及角速度的偏差量，根据式(25)求得每个模式下对应的阻尼转矩系数 $D_i$[1-2]。

$$D_i=\mathrm{Im}\left(\frac{\Delta T_{ei}}{\Delta\delta_i}\right)\omega_0/(2\pi f_i) \tag{25}$$

## 2.4 参数 $D$ 的选取

电力系统受到扰动后的动态特性主要由振荡模式决定，多机系统存在多个振荡模式，不同故障可能激发出不同的振荡模式，每个振荡模式的参与程度又不一样，由此就需要通过 Prony 分析得到系统的振荡特性。而采用简化模型进行仿真时参数 $D$ 的选取对不同振荡模式影响不同，如果选取得不合理就不能模拟出实际系统的振荡特性。所以对参数 $D$ 的选取首先要研究振荡模式与 $D$ 的关系。振荡模式实际就是对应着状态方程的特征根，所以研究振荡模式与参数 $D$ 的关系就是研究特征根对参数 $D$ 的灵敏度。

特征根灵敏度是系统中一个参数变化，特征根随之相应变化大小的指标。设系统状态系数矩阵 $\boldsymbol{A}(a)$ 是关于待求参数灵敏度的函数，则：

$$\boldsymbol{A}(a)\boldsymbol{u}_i=\lambda_i\boldsymbol{u}_i \tag{26}$$

两边分别对参数 $a$ 求导：

$$\frac{\partial\boldsymbol{A}(a)}{\partial a}\boldsymbol{u}_i+\boldsymbol{A}(a)\frac{\partial\boldsymbol{u}_i}{\partial a}=\frac{\lambda_i}{\partial a}\boldsymbol{u}_i+\lambda_i\frac{\partial\boldsymbol{u}_i}{\partial a} \tag{27}$$

两边左乘左特征向量 $\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}$，由于 $\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}(a)=\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\lambda_i$，整理可得：

$$\frac{\lambda_i}{\partial a}=\frac{\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\dfrac{\partial\boldsymbol{A}(a)}{\partial a}\boldsymbol{u}_i}{\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u}_i} \tag{28}$$

而在矩阵系数 $\boldsymbol{A}(a)$ 中包含 $D$ 的系数只存在于转速微分方程中，即 $\partial\boldsymbol{A}(a)/\partial a$ 只有在发电机转速对应的行的对角线上有一个 $-1/\tau_j$ 的数值，所以每个特征根对参数 $D$ 的灵敏度为：

$$\frac{\lambda_i}{\partial a}=-\frac{1}{\tau_j}\frac{\boldsymbol{v}_{i\omega}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u}_{i\omega}}{\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u}_i} \tag{29}$$

其中，$\boldsymbol{v}_{i\omega}^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{u}_{i\omega}$ 分别为左、右特征向量中转速项对应的元素。

与转速相关的参与因子为：

$$p_{\omega i}=\frac{\boldsymbol{v}_{i\omega}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u}_{i\omega}}{\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u}_i} \tag{30}$$

所以：

$$\frac{\lambda_i}{\partial a}=-\frac{1}{\tau_j}p_{\omega i} \tag{31}$$

则式(31)为特征根对参数 $D$ 的灵敏度，即振荡模式与参数 $D$ 的关系，灵敏度大的 $D$ 对其影响大，灵敏度小的 $D$ 对其影响小，应该根据灵敏度大小的不同选取，为了仿真结果能与实际情况最相近，选取 $D$ 时应该由灵敏度最大的那个振荡模式决定。如果有多个相关度高的模式，应该考虑选择与故障下最易被激发出来的模式相对应的 $D$，或者分故障给出不同情况下不同的实用参数 $D$。

对2.4节中求得的每个模式下的阻尼转矩系数，根据灵敏度关系选择合适的阻尼系数[2,20-22]。

## 3 算例分析

### 3.1 单机无穷大系统

单机无穷大系统中发电机的参数如下：$X_d=0.195$ p.u.，$X_d'=0.095$ p.u.，$X_d''=0.070$ p.u.，$X_q=0.180$ p.u.，$X_q'=0.080$ p.u.，$X_q''=0.070$ p.u.，$\tau_d'=6.50$ s，$\tau_d''=0.040$ s，$\tau_q'=1.50$ s，$\tau_q''=0.030$ s，$\tau_j=48.6$ s。各电抗参数都是归算到100 MV·A容量下的标幺值。发电机出力为500+j 122 MV·A，线路电抗为 $X_L=0.0075$ p.u.。根据详细模型得到单机系统的机电振荡特征值为 $-0.4404+j6.7088$，通过公式计算得到在单机下 $D=39.56$，将 $D$ 代入二阶模型中算得系统的机电振荡特征值为 $-0.4100+j6.9801$。

用BPA分别仿真2种模型下的联络线发生三相短路故障，5个周期后故障消除的发电机有功功率曲线如图1所示，图中 $P$ 为标幺值，后同。

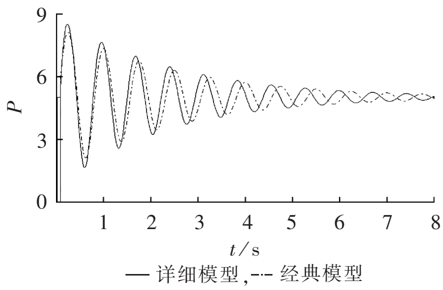



图1 同步电机采用不同模型时的有功功率
Fig.1 Active power for different generator models

2种模型下的发电机的有功功率动态曲线衰减趋势基本一致，衰减相位频率略有偏差。频率的偏差是因为在采用详细模型的情况下考虑磁路饱和特性，而经典模型中的 $X_d'$、$X_q'$ 就认为是饱和下的数据，这是采用经典模型不可避免的；衰减趋势是由发电机阻尼系数 $D$ 直接决定的，由图可见拟合效果很好。

### 3.2 IEEE 39节点系统

以IEEE 39节点系统为例，系统结构图如图2所示。基准容量为100 MV·A，所有电气参数都是归算到基准容量下的标幺值。分析系统在不同的故障下激发出来的振荡模式，以及对简化模型参数 $D$ 的选取。所有仿真是在BPA中进行的，详细模型采用MF模型，经典模型采用MC模型。

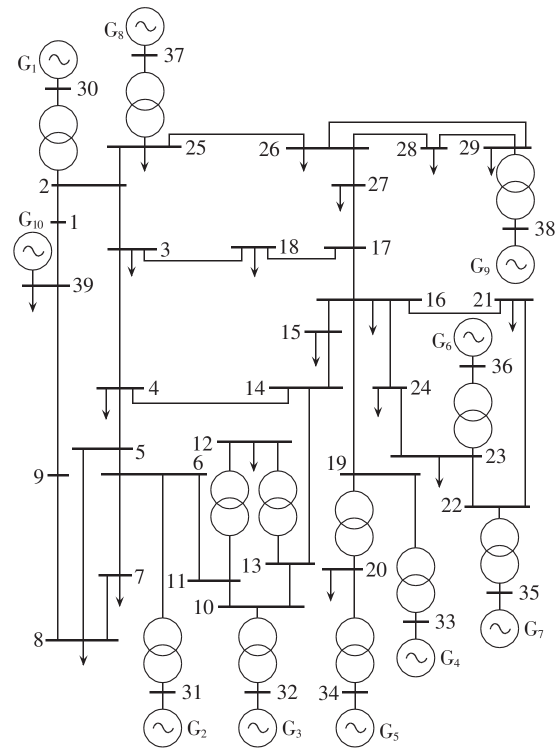


图2 IEEE 10机39节点系统
Fig.2 IEEE 10-generator 39-bus system

在IEEE 39节点系统中加2个不同的故障：故障1为线路26-28之间发生2个周期三相短路故障；故障2为线路8-9之间发生2个周期的三相短路故障。观测母线32上发电机 $G_3$ 的有功功率曲线，并对其进行Prony分析。

表1、2中 $A_i$、$E_i$ 为标幺值。由图3、表1、表2可见，发电机 $G_3$ 在故障1下主要有2个振荡模式，频率一个是0.5896 Hz，另一个是0.9188 Hz；在故障2下主要有3个振荡模式，频率分别是0.5896 Hz、0.9190 Hz和1.0125 Hz。通过QR算法分析得到0.5896 Hz和0.9188 Hz的振荡模式是系统的2个区间振荡模

**表 1　故障 1 下 $G_3$ 主要振荡模式**

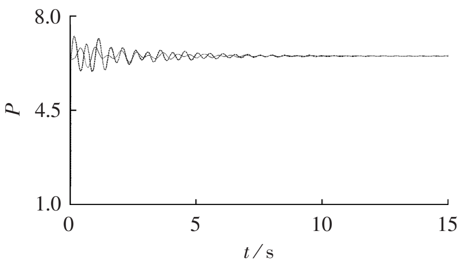
Tab.1 Dominative oscillation modes of $G_3$ at fault 1

| $f_i$/Hz | $\partial_i$ | $A_i$ | $E_i$ | $E_i/\sum E_i$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.5896 | −0.2148 | 0.2576 | 11.6980 | 0.4470 |
| 0.9188 | −0.1578 | 0.2520 | 15.1531 | 0.5630 |

**表 2　故障 2 下 $G_3$ 主要振荡模式**

Tab.2 Dominative oscillation modes of $G_3$ at fault 2

| $f_i$/Hz | $\partial_i$ | $A_i$ | $E_i$ | $E_i/\sum E_i$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.5896 | −0.2151 | 0.1984 | 8.9973 | 0.1870 |
| 0.9190 | −0.1559 | 0.0750 | 4.5572 | 0.0950 |
| 1.0125 | −0.1825 | 0.6557 | 34.6377 | 0.7180 |




— 故障 1, ┈┈ 故障 2

**图 3　不同故障点下 $G_3$ 有功功率**

Fig.3 Active power of $G_3$ for different fault points

式,第 1 个为发电机 $G_1$、$G_8$、$G_9$ 对其余发电机的振荡模式,第 2 个为母线 39 的发电机 $G_{10}$ 对其余发电机的振荡模式。而 1.0125 Hz 的振荡模式是母线 32 和母线 31 机组对系统其他机组的振荡。当故障发生在母线 32 附近时,1.0125 Hz 的振荡模式被激发,并在发电机 $G_3$ 中所占的比重较大。

表 3 给出了故障 2 情况下对应的 3 种振荡模式的模态,并根据 2.3 节计算出了每个模式下的阻尼转矩系数,表中 $\Delta P_i$ 为标幺值。

**表 3　故障 2 下 $G_3$ 各个振荡模式的阻尼转矩系数**

Tab.3 Damping torque coefficient for different oscillation modes of $G_3$ at fault 2

| $f_i$/Hz | $\Delta\delta_i$/(°) | $\Delta\omega_i$/(rad·s$^{-1}$) | $\Delta P_i$ | $D_i$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.5896 | 1.1549−j7.6158 | 0.2545+j0.0553 | 0.0262−j0.0949 | 14.8080 |
| 0.9190 | 0.2867−j0.5367 | 0.0547+j0.0270 | 0.0391−j0.0640 | 22.2975 |
| 1.0125 | 2.8558−j3.3319 | 0.3487+j0.3116 | 0.4623−j0.4649 | 31.2394 |

该系统各主要振荡模式与 $D$ 的灵敏度关系如表 4 所示,由表中可以看出模式 1 对发电机 $G_3$ 的 $D$ 的灵敏度最大,其他灵敏度较小的模式几乎不受 $D$ 变化的影响。由此可见当系统发电机采用经典模型仿

**表 4　振荡模式与阻尼系数的灵敏度**

Tab.4 Sensitivity of oscillation mode to damping coefficient

| 模式 | $f_i$/Hz | 参与因子幅值 | 参与因子相角/(°) |
|---|---|---|---|
| 1 | 1.0125 | 0.9975 | 263.5622 |
| 2 | 0.9190 | 0.0547 | 269.4987 |
| 3 | 0.5896 | 0.1022 | 89.0670 |

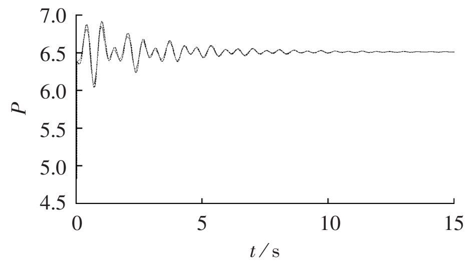
真时,参数 $D$ 应该首先选择对此发电机相关度明显高于其他模式下的阻尼,即选取表 3 中的 $D_i$=31.2394。以此作为简化模型的阻尼系数,用 BPA 进行仿真验证。

表 5 经典模型中 $D$=31.2394。由表 5、图 4 和图 5 可知,尽管在相位上有偏差,但是 2 种模型下的频率、衰减趋势都很接近。相位的偏差是由于采用经典模型时忽略了一些次要模式阻尼系数造成的影响,但并不影响对系统主要振荡特性的分析。依照此方法取得的简化模型阻尼系数能很好地拟合系统的动态响应,所以适合工程中应用。

**表 5　$G_3$ 采用不同模型时动态曲线的衰减因子**

Tab.5 Attenuation factor of dynamic curve for different models of $G_3$

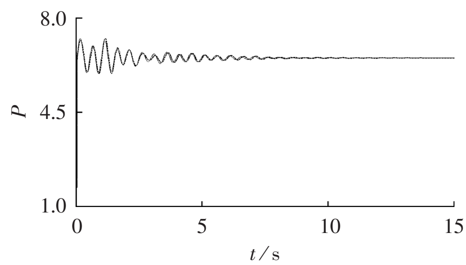
| $f_i$/Hz | $\partial_i$ | |
|---|---|---|
| | 详细模型 | 经典模型 |
| 0.5880 | −0.2151 | −0.2174 |
| 0.9175 | −0.1559 | −0.1574 |
| 1.0125 | −0.1825 | −0.1868 |




— 详细模型, ┈┈ 经典模型

**图 4　故障 1 下 $G_3$ 采用不同模型动态曲线**

Fig.4 Dynamic curves for different models of $G_3$ at fault 1




— 详细模型, ┈┈ 经典模型

**图 5　故障 2 下 $G_3$ 采用不同模型动态曲线**

Fig.5 Dynamic curves for different models of $G_3$ at fault 2

## 4　结论

单机无穷大系统阶次低,相对比较简单,通过同步电机详细模型的推导可以获得同步电机简化模型阻尼系数的近似计算公式,仿真结果比较表明该计算公式能够满足模型降阶需求。而电力系统多机情况下方程阶次高,非常复杂,难以给出详细的机组简化模型阻尼系数求解公式,机组简化模型阻尼系数的取值与系统振荡模式相关,实际扰动情况下,系统

激发的主导模式相对较少,故根据系统不同扰动情况,对实测曲线进行Prony分析,得到其动态响应中所含有的振荡模式信息,可以计算获得对应的各激发模式下机组简化模型阻尼系数,再根据模式特征根与阻尼系数间的灵敏度的关系,选择仿真中合适的机组简化模型阻尼系数。

## 参考文献:


[1] 李鹏. 从平衡点到振荡[D]. 天津:天津大学,2004.
LI Peng. From equilibrium to oscillation[D]. Tianjin:Tianjin University,2004.

[2] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版,2002:45-56.

[3] 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,2007:30-43.

[4] 高运华. 基于Park方程的同步发电机参数辨识研究[D]. 南京:河海大学,2005.
GAO Yunhua. Parameter estimation of synchronous generator based on Park model[D]. Nanjing:Hohai University,2005.

[5] 汤涌. 简化同步电机模型中的运动方程[J]. 电网技术,2007,31(10):28-31.
TANG Yong. A discussion about equations of motion of simplified synchronous machine models[J]. Power System Technology,2007,31(10):28-31.

[6] ALDEN R T H,SHALTOUT A A. Analysis of damping and synchronizing torques,part I-a general calculation method[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1979,PAS-98(5):1696-1700.

[7] 薛禹胜,郝思鹏,刘俊勇,等. 关于低频振荡分析方法的评述[J]. 电力系统自动化,2009,33(3):1-8.
XUE Yusheng,HAO Sipeng,LIU Junyong,et al. A review of analysis methods for low-frequency oscillations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(3):1-8.

[8] SHALTOUT A A,AI-FEILAT R A A. Damping and synchronizing torque computation in multimachine power systems [J]. IEEE Trans on Power Systems,1992,7(1):280-286.

[9] MATSUKI J,OKADA T. On-line calculation of synchronizing and damping torque coefficients of a synchronous generator[C]//International Conference on Electrical Machines and Drives. London,England:[s.n.],1991:316-320.

[10] ABU-AI-FEILAT E,BETTAYEB M,AI-DUWAISH H,et al. Neural network-based approach for on-line dynamic stability assessment using synchronizing and damping torque coefficients[J]. Electric Power Systems Research,1996,39(2):103-110.

[11] ABU-AI-FEILAT E A,YOUNAN N,GRZYBOWSKI S. Estimating the synchronizing and damping torque coefficients using Kalman filtering[J]. Electric Power Systems Research,1999,52(2):145-149.

[12] 余贻鑫,李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):6-11.
YU Yixin,LI Peng. The impact of weak internection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(11):6-11.

[13] 于浩,刘瑞叶,陈学允,等. 发电机实用模型的选取对稳定计算的影响[J]. 中国电力,1998,31(10):10-12.
YU Hao,LIU Ruiye,CHEN Xueyun,et al. Influence on stability calculation using different practical model of generator[J]. Electric Power,1998,31(10):10-12.

[14] SHALTOUT A A,AI-FEILAT R A A. Damping and synchronizing torque computation in multimachine power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,1992,7(1):280-286.

[15] ABU-AI-FEILAT E,BETTAYEB M,AI-DUWAISH H,et al. Neural network-based approach for on-line dynamic stability assessment using synchronizing and damping torque coefficients [J]. Electric Power Systems Research,1996,39(2):103-110.

[16] 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.

[17] 鞠平,谢欢,孟远景,等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报,2005,25(22):56-60.
JU Ping,XIE Huan,MENG Yuanjin,et al. Online identification of low-frequency oscillations based on wide-area measurements [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(22):56-60.

[18] SANCHEZ-GASCA J J,CHOW J H. Performance comparison of three identification methods for the analysis of electromechanical oscillations[J]. IEEE Trans on Power Systems,1999,14(3):995-1002.

[19] 邓集祥,涂进,陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别[J]. 电网技术,2007,31(7):36-39.
DENG Jixiang,TU Jin,CHEN Wuhui. Identification of critical low frequency oscillation mode in large disturbances[J]. Power System Technology,2007,31(7):36-39.

[20] 马进,王景钢,贺仁睦. 电力系统动态仿真的灵敏度分析[J]. 电力系统自动化,2005,29(17):20-27.
MA Jin,WANG Jinggang,HE Renmu. Sensitivity analysis of power system dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(17):20-27.

[21] 许剑冰,薛禹胜,张启平,等. 电力系统同调动态等值的述评[J]. 电力系统自动化,2005,29(14):92-95.
XU Jianbing,XUE Yusheng,ZHANG Qiping,et al. A critical review on coherency-based dynamic equivalences[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(14):92-95.

[22] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010:83-88.



### 作者简介:

余一平(1977-),男,浙江衢州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制(**E-mail**:yyiping@hhu.edu.cn);

宋忠鹏(1985-),男,江苏扬州人,硕士,主要研究方向为电力系统建模与控制;

鞠 平(1962-),男,江苏靖江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统建模与控制。

# 一种PWM整流器的模型预测控制方法

马宏伟，李永东，郑泽东，许　烈
（清华大学 电机系，北京 100084）

**摘要**：为了提高脉冲宽度调制(PWM)整流器的动态响应速度，降低其对系统参数的依赖性，提出了一种改进的模型预测控制(MPC)方法。该方法以PWM整流器的一阶差分方程为预测模型，采用不同的控制周期分别对内环电流和外环电压进行预测，并实现对性能函数的优化求解，将传统MPC的三元高阶受限最优解问题转换为一个二元一阶非受限最优问题和一个一元一阶非受限最优问题，克服了传统MPC运算量大、难以实时控制的缺点，同时保留了传统MPC优化控制、反馈校正等优点。实验结果表明，相比于传统的矢量控制，所提方法能够有效提高PWM整流器的响应速度，并显著提高系统的鲁棒性，改进系统控制性能。

**关键词**：整流器；模型预测控制；比例积分控制；鲁棒性；PWM
**中图分类号**：TM 461　　**文献标识码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.004

## 0 引言

三相脉冲宽度调制PWM(Pulse Width Modulation)整流器具有输出直流电压可控、输入电流谐波含量低、功率因数可调及能量双向流动等优点，因此广泛应用于整流、交流调速、有源滤波和新能源并网发电等领域[1-6]。

PWM整流器通过适当的控制策略，可以控制其直流侧电压和交流侧功率因数跟随参考值。在这个过程中，已有的控制策略包括基于比例积分PI(Proportional Integral)或比例谐振PR(Proportional Resonant)的矢量控制[7-10]、直接功率控制DPC(Direct Power Control)[11]、幅相控制[12]和电流预测控制[13]等。其中基于PI控制器的矢量控制方法具有交流侧有功和无功分量解耦、控制器结构简单、易于实现等特点，是目前应用最为广泛的控制方式，但具有动态响应较慢、参数鲁棒性较差等缺点。由于PI控制器参数对系统参数的依赖性较高，故无论理论计算还是仿真结果中的控制器参数对真实系统控制器参数的指导意义都较低；在实际应用中，其控制器参数的整定多依赖于工程经验，这也为大功率现场的调试带来一定的风险。

**收稿日期**：2012-12-17；**修回日期**：2013-08-14

模型预测控制MPC(Model Predictive Control)是一种通过对系统未来有限时间域内的状态进行预判进而确定当前控制动作的控制方式，它是一种非线性的最优化控制方法，具有控制效果好、鲁棒性强的特点。传统的MPC方法在线运算量过大，耗时过长，因此难以用于功率变换器的控制场合[14-16]。为此，本文提出了一种改进的MPC方法，以PWM整流器的一阶差分方程为预测模型，通过对内环电流和外环电压采用不同控制周期分别预测、分别优化性能函数的方法，降低了传统MPC的复杂度，具有运算量小、易于实现的特点。实验结果也表明，本文方法具有动态响应快、参数鲁棒性强的特点。

**Analysis of equivalent damping coefficient for simplified model of synchronous generator**

YU Yiping[1], SONG Zhongpeng[2], JU Ping[1], JIN Yuqing[1], QIN Chuan[1]
(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract**: By the comparison between simplified and detailed generator models, the mathematical expression of damping torque coefficient is deduced for the simplified model of generator in single-machine infinite system. Prony method is adopted to analyze the oscillation mode of generator according to its changes in active power, power angle and angular speed after disturbance, and the corresponding damping torque is calculated. The damping torque coefficient of simplified generator model is determined according to the sensitivity of oscillation mode to the damping torque coefficient of practical model. The rationality of the proposed method is verified by the case study for single-machine infinite bus system and IEEE 39-bus system.

**Key words**: synchronous generators; models; damping coefficient; Prony analysis; sensitivity analysis