

交流电机由电磁力激发的参、强联合共振

邱家俊

(天津大学)

摘要 本文建立了电机转子振动方程和电机稳态电路方程相耦合的统一数学系统,求得了解析解,找到了联合共振的幅频曲线,理论结果和实验结果吻合得很好。

采用被实验证实的数学模型,研究了各种参数对这种共振的影响,得到了别人没有研究过的规律,探索了消除这种共振的途径。

研究结果对大型汽轮发电机组的机、电耦合振有实际指导价值。

关键词 参数共振,电磁力,交流电机,三相不对称。

一、前言

大型汽、水发电机组的振动问题一直是国内外的重要课题,随着单机功率的增大,出现的问题更突出,不断的出现振动破坏事故,造成巨大的经济损失。

文献[3]从理论研究中发现了汽轮发电机存在激发参数共振的电磁力,得到了有功、无功负载变化情况下所激发的参数共振的特性。文献[4]得到了汽轮发电机在三相不对称运行情况下参数共振的规律。本文进一步研究了高速交流电机由电磁力激发的参数共振与强迫共振的联合,其振动规律变化的多样性,是机械系统中所没有的;进行了系统的实验研究,验证了理论结果;指出了这种参数共振的危害性和预防的途径。

二、数学模型

由图4可见, $e_0 = oo_1$ 是静偏心, $e_1 = o_1o_2$ 是转子振动形成的偏心, $e_2 = o_2o_3$ 是转动偏心, e 是合成的偏心, $r = o_2c$ 是质量偏心。由图3可知定、转子间的偏心气隙 δ 可近似表示为:

$$\delta(\alpha, t) = \sigma[1 - \varepsilon \cdot \cos(\alpha - \alpha_1)]; \quad \sigma = K_\mu \cdot \delta_0;$$

$$\varepsilon = e/\sigma = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \cos \alpha_1 = x_3/\varepsilon; \quad \sin \alpha_1 = y_3/\varepsilon;$$

$$x_3 = \frac{x_0 + x + e_2 \cdot \cos \phi}{\sigma} = x_0 + x + \varepsilon_2 \cdot \cos \phi;$$

$$y_3 = \frac{Y_0 + Y + e_2 \cdot \sin \phi}{\sigma} = y_0 + y + \varepsilon_2 \cdot \sin \phi; \quad \phi = \omega t$$

式中 δ_0 是均匀气隙, K_μ 是气隙系数。根据本实验装的情况:

$$\delta_0 = 0.7\text{mm}, \quad K_\mu = 1.1, \quad r = e_2 = 0.035\text{mm}, \quad \phi_0 = 0.$$

本文于1986年5月30日收到。于1988年2月18日收到修改稿。

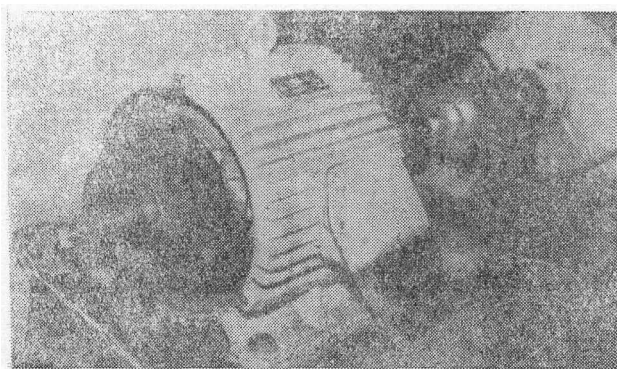


图 1 实验装置

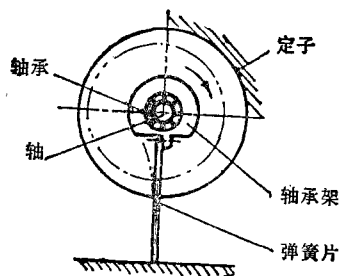


图 2 装置简图

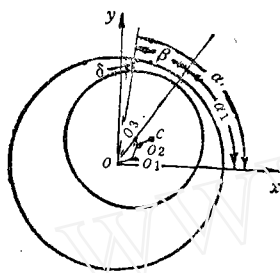


图 3 气隙偏心几何关系

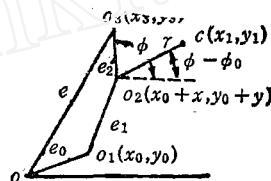


图 4 气隙偏心几何尺寸关系

电机定子与转子间的不均匀气隙内的气隙磁场能由 [4] 为:

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{RLA_0}{2} \int_0^{2\pi} \left\{ 1 + \frac{1}{2} x_3^2 + \frac{1}{2} y_3^2 + \frac{3}{8} (x_3^2 + y_3^2)^2 + \left[x_3 + \frac{3}{4} (x_3^3 + x_3 \cdot y_3^2) \right] \right. \\
 & \cdot \cos \alpha + \left[y_3 + \frac{3}{4} (y_3^3 + y_3 \cdot x_3^2) \right] \cdot \sin \alpha + \left[\frac{1}{2} (x_3^2 - y_3^2) + \frac{1}{2} (x_3^4 - y_3^4) \right] \\
 & \cdot \cos 2\alpha + [x_3 \cdot y_3 + x_3^3 \cdot y_3 + x_3 \cdot y_3^3] \cdot \sin 2\alpha + \left[\frac{1}{4} x_3^3 - \frac{3}{4} x_3 \cdot y_3^2 \right] \\
 & \cdot \cos 3\alpha + \left[\frac{3}{4} y_3 \cdot x_3^2 - \frac{1}{4} y_3^3 \right] \cdot \sin 3\alpha + \left[\frac{1}{8} x_3^4 - \frac{3}{4} x_3^2 y_3^2 + \frac{1}{8} y_3^4 \right] \\
 & \cdot \cos 4\alpha + \left[\frac{1}{2} x_3 y_3 - \frac{1}{2} x_3 y_3^3 \right] \cdot \sin 4\alpha \left. \right\} \cdot [F_r^+ \cdot \cos(\omega t - \alpha) + F_r^- \\
 & \cdot \cos(\omega t + \alpha) + F_r^+ \cdot \cos(\omega t - \alpha - \varphi_{10}) + F_r^- \cdot \cos(\omega t + \alpha - \varphi_{20})]^2 \cdot d\alpha
 \end{aligned}$$

把磁场能、转子动能和势能代入拉格朗日-麦克斯威方程, 得到转子在三相不对称运行情况下的振动方程式。根据图 1、图 2 的实验装置情况可以取 $Y_3 = 0$, 考虑到 e_2 是微量, 略去二阶微量以上的项, 并取 $x_0 = 0$, 对方程式简化后得到下式:

$$\ddot{x} + k^2 x = \mu \{ 2n \cdot \dot{x} + b_3 \cdot x^3 + [b_1 \cos 2\omega t + b_2 \cdot \sin 2\omega t] \cdot x + [b_4 \cdot \cos 2\omega t + b_5 \cdot \sin 2\omega t] \cdot x^3 + c_1 \cdot \cos \omega t + c_2 \cdot \sin \omega t \} \quad (1)$$

式 (1) 是非线性周期系数微分方程式, 式中的系数为:

$$k^2 = k_0^2 - k_1^2 - k_2^2, \quad b_1 = k_4^2 + k_5^2, \quad b_2 = k_3^2 + k_6^2, \quad b_3 = 1.5 \cdot k_1^2 + 2 \cdot k_2^2,$$

$$b_4 = 2k_4^2 + 1.5k_8^2, \quad b_5 = 2k_5^2 + 1.5k_9^2, \quad r_0 = \frac{r}{\sigma};$$

$c_1 = r_0 \omega^2 + (k_1^2 + k_2^2 + 0.5k_4^2 + 0.5k_6^2 + 0.5k_8^2) \cdot \varepsilon_2$, $c_2 = 0.5(k_3^2 + k_9^2 - k_7^2 + k_5^2) \cdot \varepsilon_2$.
方程式中的 9 个系数 $k_1, k_2, \dots, k_9$ 和电机稳态三相不对称的电压方程及磁势关系式相耦合:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_+ &= [(r_1 + r_m) + jX_1] \dot{I}_{1+} + (r_m + jX_m) \dot{I}_{2+} \\ 0 &= (r_m + jX_m) \dot{I}_{1+} + \left[\left(\frac{r_2'}{s} + r_m \right) + jX_2 \right] \dot{I}_{2+} \\ \dot{U}_- &= [(r_1 + r_m) + jX_1] \dot{I}_{1-} + (r_m + jX_m) \dot{I}_{2-} \\ 0 &= (r_m + jX_m) \dot{I}_{1-} + \left[\left(\frac{r_2''}{2-s} + r_m \right) + jX_2 \right] \dot{I}_{2-} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} F_r^+ &= \frac{m_1}{2} \times 0.9 \times I_{1+} \times \frac{W_1 \cdot K_{w1}}{p} \\ F_r^- &= \frac{m_1}{2} \times 0.9 \times I_{1-} \times \frac{W_1 \cdot K_{w1}}{p} \\ F_r^+ &= \frac{m_2}{2} \times 0.9 \times I_{2+} \times \frac{W_2 \cdot K_{w2}}{p} \\ F_r^- &= \frac{m_2}{2} \times 0.9 \times I_{2-} \times \frac{W_2 \cdot K_{w2}}{p} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} H &= \frac{\pi R L \Lambda_0}{2 m \sigma^2} \\ k_1^2 &= \frac{H}{RK_1} [F_r^{+2} + 2F_r^+ F_r^+ \cos \varphi_{10} + F_r^{+2} + F_r^{-2} + 2F_r^- F_r^- \cos \varphi_{20} + F_r^{-2}] \\ k_2^2 &= \frac{H}{RK_2} [F_r^+ F_r^- + F_r^+ F_r^- \cos \varphi_{20} + F_r^+ F_r^- \cos \varphi_{10} + F_r^+ F_r^- \cos (\varphi_{20} - \varphi_{10})] \\ k_3^2 &= \frac{H}{RK_2} [F_r^+ F_r^- \sin \varphi_{20} - F_r^+ F_r^- \sin \varphi_{10} - F_r^+ F_r^- \sin (\varphi_{20} - \varphi_{10})] \\ k_4^2 &= \frac{H}{2RK_1} [F_r^{+2} + 2F_r^+ F_r^+ \cos \varphi_{10} + F_r^{+2} \cdot \cos 2\varphi_{10} + F_r^{-2} + 2F_r^- F_r^- \cos \varphi_{20} \\ &\quad + F_r^{-2} \cdot \cos 2\varphi_{20}] \\ k_5^2 &= \frac{H}{2RK_1} [2F_r^+ F_r^+ \sin \varphi_{10} + F_r^{+2} \sin 2\varphi_{10} + 2F_r^- F_r^- \sin \varphi_{20} + F_r^{-2} \sin 2\varphi_{20}] \\ k_6^2 &= \frac{H}{2RK_1} [F_r^{+2} + 2F_r^+ F_r^+ \cos \varphi_{10} + F_r^{+2} \cos 2\varphi_{10} - F_r^{-2} - 2F_r^- F_r^- \cos \varphi_{20} \\ &\quad - F_r^{-2} \cdot \cos 2\varphi_{20}] \\ k_7^2 &= \frac{H}{2RK_1} [-2F_r^+ F_r^+ \cdot \sin \varphi_{10} - F_r^{+2} \cdot \sin 2\varphi_{10} + 2F_r^- F_r^- \sin \varphi_{20} \\ &\quad + F_r^{-2} \sin 2\varphi_{20}] \\ k_8^2 &= \frac{2H}{RK_2} [F_r^+ F_r^- + F_r^+ F_r^- \cos \varphi_{20} + F_r^+ F_r^- \cos \varphi_{10} + F_r^+ F_r^- \cos (\varphi_{10} + \varphi_{20})] \\ k_9^2 &= \frac{2H}{RK_2} [F_r^+ F_r^- \sin \varphi_{20} + F_r^+ F_r^- \cdot \sin \varphi_{10} + F_r^+ F_r^- \cdot \sin (\varphi_{10} + \varphi_{20})] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(1)、(2)、(3) 和 (4) 式形成统一的机电耦联的数学系统。

三、方程的解

运用 Ю. А. Митропольский 的非固定参数的渐近解法, 求一般情况(包括共振)的解, 重点研究主参数共振。得到第一次近似解为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{da}{dt} &= -\mu[n \cdot a + d_1 \cdot \sin \vartheta + d_2 \cdot \cos \vartheta + (d_3 + d_4 \cdot a^2) \cdot a \cdot \sin 2\vartheta \\ &\quad + (d_5 + d_6 \cdot a^2) \cdot a \cdot \cos 2\vartheta] \cdots \cdots \\ \frac{d\vartheta}{dt} &= k - \omega - \mu \left[d_7 \cdot a^2 + \frac{d_1}{a} \cos \vartheta - \frac{d_2}{a} \sin \vartheta \right. \\ &\quad \left. + (d_3 + d_8 \cdot a^2) \cos 2\vartheta - (d_5 + d_9 \cdot a^2) \cdot \sin 2\vartheta \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中系数分别为:

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{c_1}{k + \omega}, \quad d_2 = \frac{c_2}{k + \omega}, \quad d_3 = \frac{b_1}{4\omega}, \quad d_4 = d_8 = \frac{(3k - 1.5\omega) \cdot b_4}{8\omega(2k - \omega)} \\ d_5 &= \frac{b_2}{4\omega}, \quad d_6 = d_9 = \frac{(3k - 1.5\omega) \cdot b_2}{8\omega(2k - \omega)}, \quad d_7 = \frac{3b_3}{8k} \end{aligned}$$

(5) 式 $\frac{da}{dt} = \frac{d\vartheta}{dt} = 0$ 的稳态解是非线性超越代数方程组, 由此式仍然无法得到振幅、相角表达式, 用数字计算也存在数学上的收敛性与多值性的困难, 为此对方程进行变换, 设 $u = a \cdot \cos \vartheta$, $v = a \cdot \sin \vartheta$, 得到:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{du}{dt} &= -\mu[n \cdot u + (k - \omega) \cdot v - d_7(u^2 + v^2)v + d_2 + d_3 \cdot v + d_4 \\ &\quad \cdot (u^2 + v^2) \cdot v + d_5 \cdot u + d_6 \cdot (u^2 + v^2) \cdot u] \\ \frac{dv}{dt} &= -\mu[n \cdot v + (\omega - k) \cdot u + d_7(u^2 + v^2) \cdot u + d_1 + d_3 \cdot u \\ &\quad + d_4(u^2 + v^2) \cdot u - d_5 \cdot v - d_6 \cdot (u^2 + v^2) \cdot v] \end{aligned} \right.$$

其稳态解为 $\frac{du}{dt} = \frac{dv}{dt} = 0$, 再考虑到 $a^2 = u^2 + v^2$, 得到:

$$\begin{cases} (n + d_4 + d_6 \cdot a^2) \cdot u + [k - \omega + d_3 + (d_4 - d_7) \cdot a^2] \cdot v = -d_2 \\ [\omega - k + d_3 + (d_4 + d_7) \cdot a^2] \cdot u + (n - d_5 - d_6 \cdot a^2) \cdot v = -d_1 \end{cases}$$

对上式解出 u 、 v , 再代入 $a^2 = u^2 + v^2$ 中去, 并按 a 的幂次排列, 得到稳态解的振幅方程为:

$$R_1 \cdot (a^2)^3 + R_2 \cdot (a^2)^2 + R_3 \cdot (a^2) + R_4 \cdot (a^2)^2 + R_5 \cdot (a^2) + R_6 = 0 \quad (6)$$

式 (6) 中的系数为:

$$\begin{aligned} R_1 &= E_3^2, \quad R_2 = 2E_1E_2, \quad R_3 = E_2^2 - 2E_1E_2, \quad R_4 = -2E_1E_2 - G_1^2 - G_2^2 \\ R_5 &= E_1^2 - 2G_1 \cdot G_2 - 2G_3 \cdot G_4, \quad R_6 = -G_1^2 - G_2^2 \\ E_1 &= (n + d_5)(n - d_5) - (d_3 + k - \omega)(d_3 - k + \omega) \\ E_2 &= 2d_4d_6 + (d_3 + k - \omega)(d_4 + d_7) + (d_3 - k + \omega)(d_4 - d_7) \\ E_3 &= d_4^2 + d_6^2 - d_7^2, \quad G_1 = (d_3 + k - \omega)d_1 - (n - d_5)d_4 \end{aligned}$$

$$G_2 = d_2 \cdot d_6 + (d_4 - d_7)d_1, \quad G_3 = (d_3 - k + \omega)d_2 - (n + d_5)d_1$$

$$G_4 = (d_4 + d_7)d_2 - d_1d_6$$

稳态相角方程式为:

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{(d_3 - k + \omega)d_2 - (d_5 + n)d_1 + [(d_4 + d_7)d_2 - d_1d_6] \cdot a^2}{(d_3 + k - \omega)d_1 - (n - d_5)d_2 + [(d_4 - d_7)d_1 + d_1d_6] \cdot a^2} \quad (7)$$

由实验电机给定的电磁参数及力学参数, 利用式 (6)、(7) 可求出各种参数情况下的幅-频曲线及相频曲线。利用式 (5) 可求得通过参数共振区的过渡过程及起振过程曲线。稳态解的稳定性, 可应用式 (5) 的变分方程式, 得到稳定的充分、必要条件为:

$$\left. \begin{aligned} 2n + 2(d_4 \cdot \sin 2\vartheta + d_6 \cdot \cos 2\vartheta) \cdot a^2 &> 0 \\ \frac{da}{dt} &> 0, \quad 2a(\omega - k_a) - d_1 \cdot \cos \vartheta + d_2 \cdot \sin \vartheta > 0 \\ \frac{da}{dt} &< 0, \quad -2a(\omega - k_a) - d_1 \cos \vartheta + d_2 \cdot \sin \vartheta < 0 \\ k_a &= k - k_2 \cdot a^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

四、结果分析

利用 (6) 式求得电机转子稳态解的幅-频曲线。在图 5 中的点线是计算值, $\times$ 号是实验值, 理论结果和实验结果吻合得很好。在实验时当振幅大于气隙 δ_0 , 转子就要和定子碰摩, 转子所能达到的最大振幅值被限止在定子气隙内, 所以当振幅大于 δ_0 时, 实测的振幅值就不能和理论值进行比较。例如频率 ω 由小变大时, 振幅沿左分支逐渐增大到 A 点, 到 A 点之后振幅按道理应该跳跃到 B 点, 但实际上振幅却在突然增大过程中还没有达到 B 点时就被定子限制而发生碰摩; 同理, 右振幅分支的 BC 段由实验也是测不出来的。

图 6 表示四种不同的电源电压的幅-频曲线, 它们和图 7 中由实验得到的相对应的四种电压的幅-频曲线均有较好的定量吻合。图 6 中的曲线④ $V_\phi = 10$ 伏, 此时电磁力非常小, 几乎可以忽略, 故这条幅-频曲线和无电磁力状态的实验的强迫共振曲线吻合得也很好。由此可以看出, 当电磁力很小时, 电磁激发的参数共振就消失, 就变成纯强迫共振了。

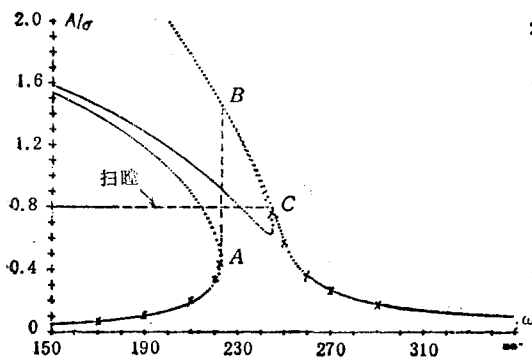


图 5 (1) 点线: 计算值 (2) 符号 $\times$: 实验值
(3) ---: 碰摩线

$V_\phi = 378$ $r_0 = s_2 = 0.045$ $n = 1.8$ $RK_1 = 9.1$

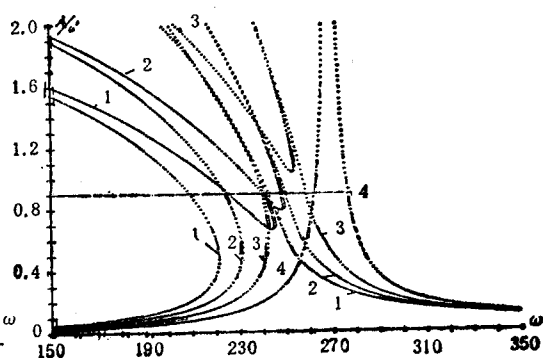


图 6 理论曲线

1. $V_\phi = 378$, $RK_1 = 9.1$ 2. $V_\phi = 315$, $RK_1 = 8.8$
3. $V_\phi = 197$, $RK_1 = 5.4$ 4. $V_\phi = 10$, $RK_1 = 5.4$
 $r_0 = s_2 = 0.045$ $n = 1.8$

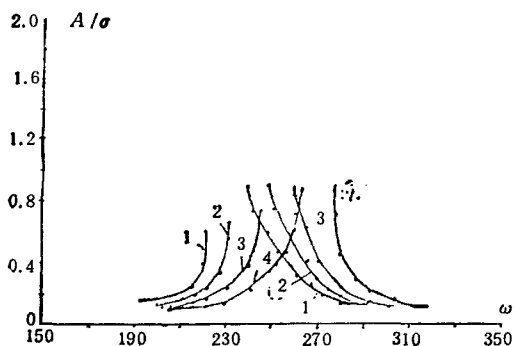
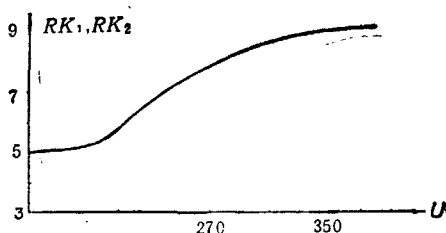


图7 实验曲线

1. $V_\phi = 380\text{V}$ 2. $V_\phi = 315\text{V}$ 3. $V_\phi = 197\text{V}$ 4. $V_\phi = 0\text{V}$

图8 RK_1, RK_2 曲线

由于电机工作在磁饱和区, 因之电磁力和磁势间存在非线性关系。式(4)中的系数 RK_1, RK_2 , 根据实验及理论分析得到了随电压变化的关系曲线, 如图8所示。应用这些被实验证实的数学模型, 对参、强联合共振的特性及电磁参数对共振的影响进行了计算, 得到了有实际意义的结果。图9中的曲线②表示纯参数共振, 它有二条共振分支曲线; 曲线①是参、强联合共振曲线, 由图可知, 它使参数共振的两个分支曲线各自分裂成两个, 连接起来便形成以纯参数共振的两条曲线及另线为渐近线的三条分支曲线。图10中曲线①是非线性项有周期系数的参数共振曲线, 呈喇叭口状; 曲线②只是线性项有周期系数的参数共振曲线。图11中的三组曲线说明, 电源电压增大, 共振曲线向低频区移动, 并且共振区宽度增大; 反之当电压减小到某个小值时, 共振曲线变成纯强迫共振的临界状态。图12是阐述转动偏心 ε_2 及质量偏心 r_0 的大小变化对共振振幅的影响, ε_2, r_0 值越小, 共振振幅及共振区就愈小; 当 ε_2, r_0 减小到一定程度, 并且阻尼 n 比较大的情况下, 则出现曲线⑤的形状, 此时整个频率区域内振幅都变得很小, 采用这种办法可以消除参数共振的有害影响。图13表示转子轴刚度值不同的幅-频曲线, 图14表示三相电压不对称度对共振曲线的影响, 不对称度愈大使共振区愈大, 使共振区向左移动得愈显著, 例

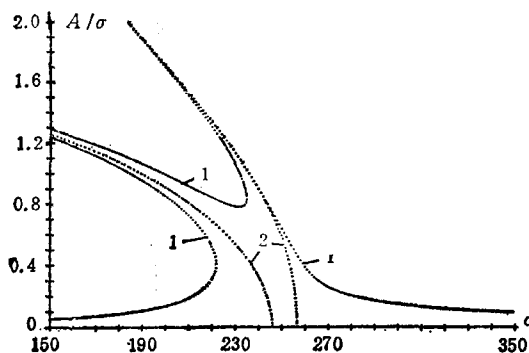


图9

1. 参强联合共振 $r_0 = \varepsilon_2 = 0.04$ 2. 纯参数共振
 $r_0 = \varepsilon_2 = 0.00$ $V_\phi = 380$, $n = 6.0$

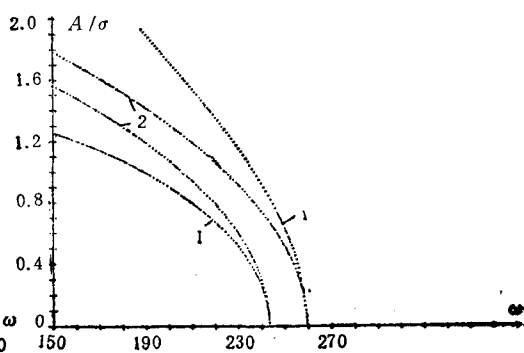


图10

1. 非线性参数激发 2. 线性参数激发 $V_\phi = 378\text{V}$,
 $n = 1.8$, $r_0 = \varepsilon_2 = 0.00001$

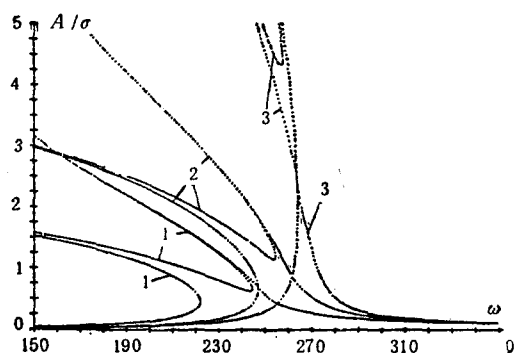


图 11

1. $V_\phi = 380$, $RK_1 = 9.1$, 2. $V_\phi = 180$, $RK_1 = 6.0$, 3. $V_\phi = 50$, $RK_1 = 5.5$, $r_0 = \varepsilon_2 = 0.045$, $n = 1.8$

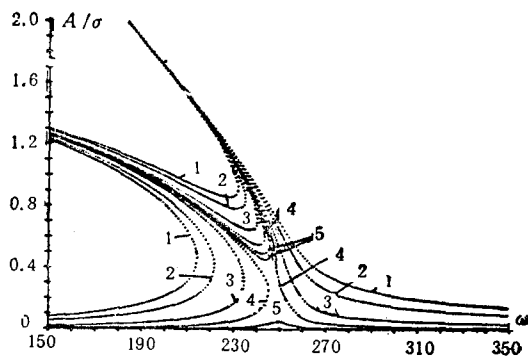


图 12

$V_\phi = 380$, $n = 11$. 1. $r_0 = \varepsilon_2 = 0.06$, 2. $r_0 = \varepsilon_2 = 0.04$, 3. $r_0 = \varepsilon_2 = 0.015$, 4. $r_0 = \varepsilon_2 = 0.001$, 5. $r_0 = \varepsilon_2 = 0.0005$

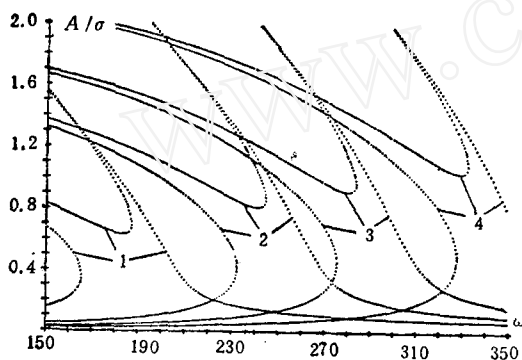


图 13

$V_\phi = 380$, $r_0 = \varepsilon_2 = 0.04$

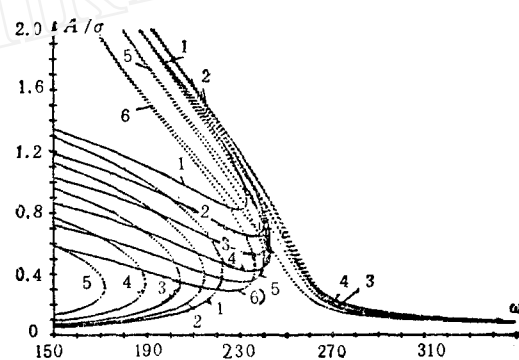


图 14

$V_\phi = 380$, $r_0 = \varepsilon_2 = 0.04$, $n = 11$, $DL = U_{1-}/U_{1+}$. 1. $DL = 0$, 2. $DL = 0.071$, 3. $DL = 0.154$, 4. $DL = 0.25$, 5. $DL = 0.364$, 6. $DL = 0.50$

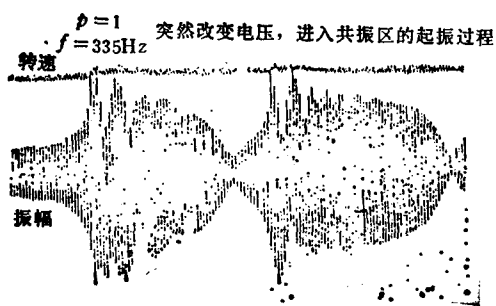


图 15 起振过程实验曲线

$p = 1$, $f = 335\text{Hz}$ 突然改变电压, 进入共振区的起振过程

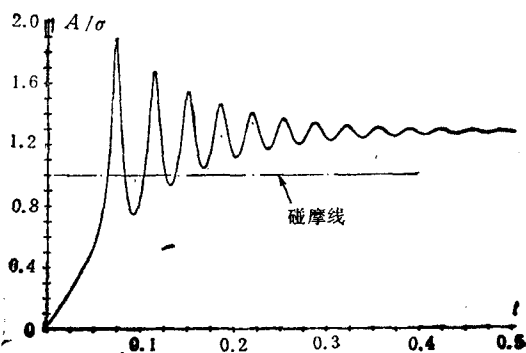


图 16 起振过程理论曲线

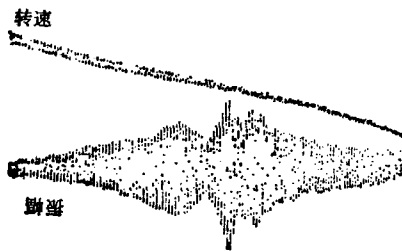
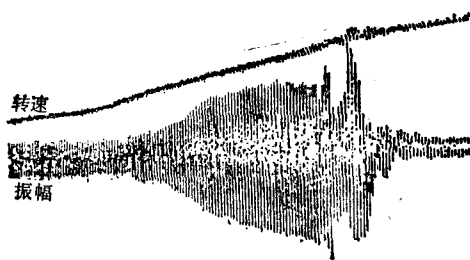
图 17 $p=1$ 升速过程曲线图 18 $p=1$ 降速过程曲线

图 17

图 18

如出现一相突然故障断路, 由同样的原因会使临界转速大幅度降低, 并使共振区大大加宽, 它的一个后果是很容易使工作转速落于共振区内, 从而突然激发起大振幅的参数共振。图 15 的起振实验曲线就是突然降低一相电压促使电压不对称, 而突然激发参数共振。

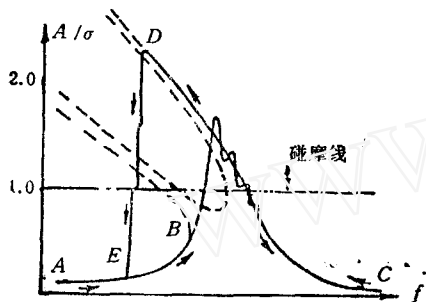


图 19 理论曲线

利用式 (5) 进行计算, 可以得到起振过程和过渡过程的振幅随时间变化的曲线, 理论曲线得到了实验的验证。图 15 是起振过程的实验曲线, 图 16 是起振过程的理论计算曲线, 两者进行比较, 得到以下相吻合的结果: (1) 起振时的振幅都按指数规律增长, (2) 振幅增长超过了气隙 δ_0 的大小都发生了碰摩。但发生碰摩后, 转子振幅变化的曲线, 两者是不能进行比较的, 因为建立的方程没有考虑碰摩力。图 17 是升速过程, 通过参数共振区振幅的实验曲线。图 18 是降速过程, 通过参数共振区的振幅的实验曲线。其变化的过程由图 19 得到说明, 当升速时振幅的变化由 A 点逐渐增加到不稳定边界点 B, 之后突然跳到 CD 分支曲线, 当降速时振幅由 C 点开始, 沿 CD 分支曲线逐渐增加到不稳定边界点 D 之后突然降到 E 点。理论结果和实验曲线比较是一致的。

参 考 文 献

- [1] H. H. 包戈留包夫; IO. A. 米特罗波夫斯基, 非线性振动理论中的渐近法, (1963).
- [2] Woodson, H. H., Melcher, J. R. Electromechanical dynamics, (1968).
- [3] 邱家俊, 汽轮发电机转子由电磁力激发的参数振动、运动稳定性及减振的研究, 天津大学学报, 3(1980), 88—111.
- [4] 邱家俊, 汽轮发电机由电磁参数激发的参数振动规律, 天津大学学报, 4(1981), 83—95.

ON THE COMBINED PARAMETRIC AND FORCED RESONANCES IN AN ALTERNATING CURRENT MACHINE EXCITED BY ELECTROMAGNETIC FORCES

Qiu Jiajun

(Tianjin University)

Abstract In this paper, the unified mathematical system is suggested for coupling the rotor vibration equations and the steady-state circuit equation. An analytical solution is derived, and amplitude curves of the combined resonances are obtained. The theoretical results have shown in good agreement with the experimental results.

The mathematical model which has been verified by the experiment is used to analyse the effect of each parameter on the combined resonance and to seek ways to eliminate it. Some useful results are obtained, which have important applications in analysing the coupled mechanical and electrical vibrations of high-output turbogenerators.

Key words parameter resonances, electromagnetic forces, alternating current machines, three-phase unsymmetry.