

文章编号: 1000-0887(2000) 10-1069-08

水轮发电机定子系统磁固耦合双重共振^{*}

李文兰¹, 邱家俊¹, 杨志安²

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2. 唐山大学 科研生产处, 唐山 063000)

(李骊推荐)

摘要: 以双壳系统模型为水轮发电机定子系统的物理模型, 建立了三相对称稳态运行状态下定子系统的磁固耦合振动方程。分析了定子系统磁固耦合的双重共振, 指出其响应具有跳跃现象, 在某些参数域上有多解共存现象。

关键词: 水轮发电机组; 定子系统; 多尺度法; 磁固耦合; 双重共振

中图分类号: O321; TM312 文献标识码: A

引 言

随着经济的发展, 对能源的需求越来越大, 发电机正朝着大型化发展。举世瞩目的三峡工程中的水轮发电机组属于极限容量机组, 机组的各项性能指标要求越来越高, 综合分析各方面的影响, 对其状态进行监测、分析、故障诊断和预测是极为重要的。发电设备的耦合问题已发展成一个多学科相互交叉、相互渗透的综合性研究课题。

对大型水轮发电机组的定子系统, 气隙磁场交变产生作用于定子铁芯内圆表面的电磁力波, 引起定子系统振动, 而定子铁芯的径向振动位移又影响气隙磁场, 进而影响到电磁力的成分。定子系统的变形场与电磁场的这种耦合会给定子系统的振动带来新的规律和现象。为了更好地指导水轮发电机组的设计、制造和安全运行, 对定子系统的磁固耦合动态特性进行深入研究变得越来越重要。本文针对国产 241MW 水轮发电机组, 对定子系统磁固耦合的双重共振进行研究。

1 考虑定子铁芯径向振动位移与气隙磁场相互影响时的电磁力波

水轮发电机定子结构主要包括铁芯和机座两大部分, 并通过定位筋连接起来。对大、中型机组多采用大齿压板。根据定子系统的结构特点, 将其简化成如图 1 所示的双壳系统模型^[1]。其中, R_1 为定子铁芯的重心半径, h_1 为铁芯的等效厚度, R_2 为定子机座的重心半径, h_2 为定子机座的等效厚度, L 为定子铁芯长度。

本文取如图 2 示圆柱壳坐标系, P 为圆柱壳中曲面上任一点。 u, v, w 分别为 P 点的轴

* 收稿日期: 1998_12_29; 修订日期: 2000_05_15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19672041)

作者简介: 李文兰(1964—), 女, 河北唐山人, 副教授, 博士;

邱家俊(1934—), 男, 江西赣州人, 教授, 博导。

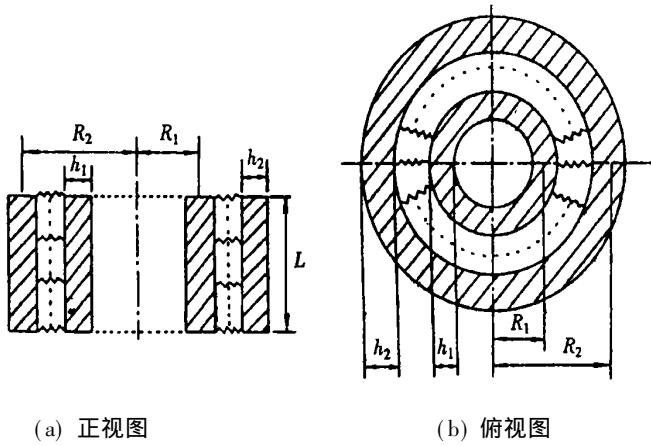


图1 双壳系统模型

向、切向、法向位移。

按机电分析动力学的方法,定、转子间的气隙磁密为

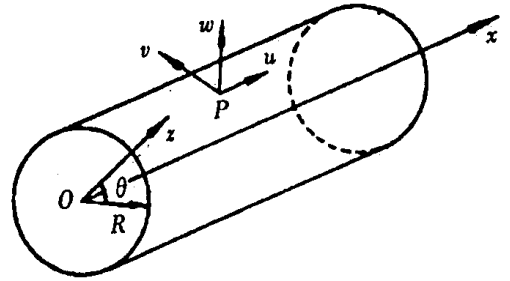
$$B(x, \theta, t) = \Lambda(x, \theta, t)F(\theta, t), \quad (1)$$

其中 $\Lambda(x, \theta, t)$ 为考虑凸极及定子径向位移 $w_s(x, \theta, t)$ 时的气隙磁导, $F(\theta, t)$ 为定子分数槽绕组与转子励磁绕组的气隙合成磁势。

$$\Lambda(x, \theta, t) = \mu_0 [33 + 23\cos 2(p\theta - \phi - \omega t) - 9\cos 4(p\theta - \phi - \omega t)] \times [1 - W + W^2 - W^3],$$

$$F(\theta, t) = A_1 \sin \left[p \frac{\theta}{11} + \omega t + 2.286 \right] + A_2 \sin \left[p \frac{5\theta}{11} - \omega t - 1.144 \right] + A_3 \sin \left[p \frac{7\theta}{11} + \omega t - 2.864 \right] + A_0 \sin [p\theta - \omega t] + A_4 \sin \left[p \frac{13\theta}{11} + \omega t + \frac{\pi}{2} \right] + A_5 \sin \left[p \frac{19\theta}{11} + \omega t - 0.91 \right] + A_6 \sin \left[p \frac{37\theta}{11} + \omega t - 0.288 \right] + A_7 \sin \left[p \frac{55\theta}{11} + \omega t - \pi \right] + B_1 \cos [p\theta - \omega t - \phi] + B_2 \cos 3[p\theta - \omega t - \phi] + B_3 \cos 5[p\theta - \omega t - \phi] + B_4 \cos 7[p\theta - \omega t - \phi], \quad (2)$$

图2 圆柱壳坐标系



其中

$$A_1 = 0.1545 I_s, A_2 = 0.1215 I_s, A_3 = 0.3525 I_s, A_0 = 4.845 I_s,$$

$$A_4 = 0.078 I_s, A_5 = 0.075 I_s, A_6 = 0.113 I_s, A_7 = 0.084 I_s,$$

$$B_1 = -1.17F_j, B_2 = 0.15F_j, B_3 = 0.11F_j, B_4 = -0.17F_j,$$

$\phi = \theta_e + \varphi_e + \phi$, θ_e 为功率角, φ_e 为功率因数角, ϕ 为转子扭转角, $\omega = 2\pi f$ 为电网频率, $W = w_s / k_\mu \delta_0$, w_s 为定子铁芯径向位移, k_μ 为饱和度, δ_0 为平均气隙大小, $p = 44$ 为极对数, μ_0 为空气导磁系数, $A_0 \sim A_7, B_1 \sim B_4$ 分别为定、转子的磁势的系数, $F_j = 17I_j$, I_j 是激磁电流, I_s 是定子电枢电流。

考虑(1)、(2)、(3),作用在定子铁芯内圆表面所受的电磁力为^[1]

$$q_z(x, \theta, t) = \frac{B^2}{2\mu_0} = Z_1 \cos(8\theta + 2\omega t) + Z_2 w_s^2 + Z_3 w_s^3 + Z_4 \cos(8\theta + 2\omega t) w_s + Z_5 \cos(8\theta + 2\omega t) w_s^2 + Z_6 \cos(8\theta + 2\omega t) w_s^3 + \dots \quad (4)$$

2 数学模型

对于双壳系统, 在定子铁芯内圆表面的电磁力 $q_z(x, \theta, t)$ 作用下, 设内、外壳接触面通过定位筋传递的径向力为 $P(x, \theta, t)$, 则内、外壳所受的轴向、切向外力均为零, 径向外力为(以后凡在角标中有 s 的量为内壳的量, 有 r 的量为外壳的量)

$$q_z^s(x, \theta, t) = (R\sqrt{R_1}) q_z(x, \theta, t) - (R_A/R_1) P(x, \theta, t), \quad (5a)$$

$$q_z^r(x, \theta, t) = (R_A/R_2) P(x, \theta, t), \quad (5b)$$

R_1, R_A 分别为铁芯的内、外径。文[2]建立了载荷(5)作用下定子双壳系统模型的磁固耦合非线性振动方程式

$$\ddot{T}_i(t) + 2\mu_i T_i(t) + \omega_i^2 T_i(t) = \frac{R_1}{M_{is} + M_{ir}} \int_0^L \int_0^{2\pi} q_z(x, \theta, t) W_{is} dx d\theta, \quad (6)$$

其中 $T_i(t)$ 为定子双壳模型各阶振型分量, M_{is}, M_{ir} 为定子内、外壳的广义质量, W_{is} 为定子铁芯径向振动的第 i 阶振型, μ_i 为系统的模态阻尼, ω_i 为系统的第 i 阶固有频率。

3 定子系统磁固耦合双重共振

由公式(4)可以看出, 当考虑定子铁芯的振动位移与气隙磁场的相互耦合时, 电磁力成分很丰富, 这里只考虑带有平方非线性项时, 在参数激励 $Z_5 \cos(8\theta + 2\omega t) w_s^2$ 和强迫激励 $Z_1 \cos(8\theta + 2\omega t)$ 联合作用情况下的双重共振。这时定子系统的磁固耦合振动方程为

$$\ddot{T}_i(t) + \omega_i^2 T_i(t) = \varepsilon \left[-2\mu_i T_i(t) + \alpha_i \sum_j \sum_k \Gamma_{ijk} T_j(t) T_k(t) + \beta_i \cos 2\omega t \sum_j \sum_k \Gamma_{8ijk} T_j(t) T_k(t) \right], \quad (i \neq 8), \quad (7a)$$

$$\ddot{T}_8(t) + \omega_8^2 T_8(t) = \varepsilon \left[-2\mu_8 T_8(t) + \alpha_8 \sum_j \sum_k \Gamma_{8jk} T_j(t) T_k(t) + \beta_8 \cos 2\omega t \sum_j \sum_k \Gamma_{88jk} T_j(t) T_k(t) \right] + \varepsilon 2F_8 \cos 2\omega t, \quad (i = 8), \quad (7b)$$

式中

$$\mu_i = \varepsilon \mu_i, \quad F_8 = \frac{\pi Z_1 R_1 L}{M_{8s} + M_{8r}} = 2\varepsilon F_8, \quad \alpha_i = \frac{Z_2 R_1 L}{M_{is} + M_{ir}} = \varepsilon \alpha_i,$$

$$\beta_i = \frac{Z_5 R_1 L}{M_{is} + M_{ir}} = \varepsilon \beta_i, \quad \Gamma_{ijkl} = \int_0^{2\pi} \cos i\theta \cos j\theta \cos k\theta \cos l\theta d\theta,$$

$$\Gamma_{ijk} = \int_0^{2\pi} \cos i\theta \cos j\theta \cos k\theta d\theta.$$

引入内共振调谐值 σ_1 , 参、强联合共振调谐值 σ_2 , 则双重共振关系为

$$\omega_8 = \omega_2 + \omega_6 + \sigma_1 \varepsilon, \quad 2\omega = \omega_8 + \sigma_2 \varepsilon \quad (8)$$

利用多尺度法解方程(7)。设

$$T_i(t, \varepsilon) = T_{i0}(T_0, T_1) + \varepsilon T_{i1}(T_0, T_1) + \dots, \quad (9)$$

式中 T_0 为快变时间尺度, 而 T_1 为慢变时间尺度。 $T_0 = t, T_1 = \varepsilon t$ 。则有微分算子

$$\frac{d}{dt} = D_0 + \varepsilon D_1 + \dots, \quad \frac{d^2}{dt^2} = D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1 + \dots, \quad (10)$$

这里 $D_n = \partial/\partial T_n$ 。将(9)、(10)代入方程(7),令等式两边 ε 同次幂系数相等,得下列微分方程组

$$\varepsilon^0 \quad D_0^2 T_{i0} + \omega_i^2 T_{i0} = 0, \tag{11a}$$

$$D_0^2 T_{80} + \omega_8^2 T_{80} = 0; \tag{11b}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^1 \quad D_0^2 T_{i1} + \omega_i^2 T_{i1} = & -2D_0 D_1 T_{i0} - 2\beta_i D_0 T_{i0} + \alpha_i \sum_j \sum_k \Gamma_{ijk} T_{j0} T_{k0} + \\ & \beta_i \cos 2\omega_i \sum_j \sum_k \Gamma_{8ijk} T_{j0} T_{k0}, \end{aligned} \tag{12a}$$

$$\begin{aligned} D_0^2 T_{81} + \omega_8^2 T_{81} = & -2D_0 D_1 T_{80} - 2\beta_8 D_0 T_{80} + \alpha_8 \sum_j \sum_k \Gamma_{8jk} T_{j0} T_{k0} + \\ & \beta_8 \cos 2\omega_i \sum_j \sum_k \Gamma_{88jk} T_{j0} T_{k0} + 2F_8 \cos 2\omega_i. \end{aligned} \tag{12b}$$

方程(11)的解为

$$T_{i0} = A_i(T_1) \exp(i\omega_i T_0) + A_i(T_1) \exp(-i\omega_i T_0), \tag{13}$$

这里 $i = 1, 2, \dots, 8, \dots, A_i$ 为 A_i 的共轭复数。将(13)代入(12)得到

$$\begin{aligned} D_0^2 T_{i1} + \omega_i^2 T_{i1} = & -2i\omega_i(A_i' + \beta_i A_i) \exp(i\omega_i T_0) + \\ & \alpha_i \sum_j \sum_k \Gamma_{ijk} \left\{ A_j A_k \exp[i(\omega_j + \omega_k) T_0] + A_j A_k \exp[i(\omega_j - \omega_k) T_0] \right\} + \\ & \frac{\beta_i}{2} \sum_j \sum_k \Gamma_{8ijk} \left\{ A_j A_k \exp[i(2\omega_j + \omega_k) T_0] + A_j A_k \exp[i(2\omega_j + \omega_j - \omega_k) T_0] + \right. \\ & \left. A_j A_k \exp[i(2\omega_j - \omega_j + \omega_k) T_0] + A_j A_k \exp[i(2\omega_j - \omega_j - \omega_k) T_0] \right\} + cc, \end{aligned} \tag{14a}$$

$$\begin{aligned} D_0^2 T_{81} + \omega_8^2 T_{81} = & -2i\omega_8(A_8' + \beta_8 A_8) \exp(i\omega_8 T_0) + \\ & \alpha_8 \sum_j \sum_k \Gamma_{8jk} \left\{ A_j A_k \exp[i(\omega_j + \omega_k) T_0] + A_j A_k \exp[i(\omega_j - \omega_k) T_0] \right\} + \\ & \frac{\beta_8}{2} \sum_j \sum_k \Gamma_{88jk} \left\{ A_j A_k \exp[i(2\omega_j + \omega_k) T_0] + A_j A_k \exp[i(2\omega_j + \omega_j - \omega_k) T_0] + \right. \\ & \left. A_j A_k \exp[i(2\omega_j - \omega_j + \omega_k) T_0] + A_j A_k \exp[i(2\omega_j - \omega_j - \omega_k) T_0] \right\} + \\ & F_8 \exp[i2\omega_8 T_0] + cc, \end{aligned} \tag{14b}$$

cc 为前面各项的共轭。对于 $i \neq 2, i \neq 6, i \neq 8$, 要使(14a)的解中不出现长期项, 必须有

$$A_i' + \beta_i A_i = 0 \tag{15}$$

由(15)知,除了 A_2, A_6, A_8 以外的所有 A_i 都衰减。

对于 $i = 2, i = 6$, 要使(14a)的解中不出现长期项, 必须有

$$-2i\omega_2(A_2' + \beta_2 A_2) + 2\alpha_2 \Gamma_{286} A_8 A_6 \exp[i\sigma_1 T_1] = 0, \tag{16a}$$

$$-2i\omega_6(A_6' + \beta_6 A_6) + 2\alpha_6 \Gamma_{628} A_8 A_2 \exp[-i\sigma_1 T_1] = 0 \tag{16b}$$

对于 $i = 8$, 要使(14b)的解中不出现长期项, 必须有

$$\begin{aligned} -2i\omega_8(A_8' + \beta_8 A_8) + \alpha_8 \Gamma_{826} A_2 A_6 \exp[-i\sigma_1 T_1] + \\ \frac{1}{2} \beta_8 \beta_{88} A_8 A_8 \exp[i\sigma_2 T_1] + F_8 \exp[i\sigma_2 T_1] = 0, \end{aligned} \tag{16c}$$

其中 $\beta_{88} = 2\Gamma_{8888}$, 设

$$A_2(T_1) = \frac{1}{2} a_2(T_1) e^{i\phi_2(T_1)}, \quad A_6(T_1) = \frac{1}{2} a_6(T_1) e^{i\phi_6(T_1)}, \quad A_8(T_1) = \frac{1}{2} a_8(T_1) e^{i\phi_8(T_1)}. \tag{17}$$

将它们分别代入(16a)、(16b)、(16c)后分离实部和虚部得

$$- a_2' \omega_2 - \mu_2 \omega_2 a_2 + \frac{1}{2} \alpha_2 \Gamma_{268} a_6 a_8 \sin \psi_1 = 0, \quad (18a)$$

$$a_2 \omega_2 \phi_2' + \frac{1}{2} \alpha_2 \Gamma_{286} a_6 a_8 \cos \psi_1 = 0, \quad (18b)$$

$$- a_6' \omega_6 - \mu_6 \omega_6 a_6 + \frac{1}{2} \alpha_6 \Gamma_{628} a_2 a_8 \sin \psi_1 = 0, \quad (18c)$$

$$a_6 \omega_6 \phi_6' + \frac{1}{2} \alpha_6 \Gamma_{628} a_2 a_8 \cos \psi_1 = 0, \quad (18d)$$

$$- a_8' \omega_8 - \mu_8 \omega_8 a_8 - \frac{1}{4} \alpha_8 \Gamma_{826} a_2 a_6 \sin \psi_1 + \frac{1}{8} \beta_8 \beta_{88} a_8^2 \sin \psi_2 + F_8 \sin \psi_2 = 0, \quad (18e)$$

$$a_8 \omega_8 \phi_8' + \frac{1}{4} \alpha_8 \Gamma_{826} a_2 a_6 \cos \psi_1 + \frac{1}{8} \beta_8 \beta_{88} a_8^2 \cos \psi_2 + F_8 \cos \psi_2 = 0, \quad (18f)$$

其中 $\psi_1 = \sigma_1 T_1 - \phi_2 - \phi_6 + \phi_8$, $\psi_2 = \sigma_2 T_1 - \phi_8$ •

稳态运动 ($a_2' = 0$, $a_6' = 0$, $a_8' = 0$, $\psi_1' = 0$, $\psi_2' = 0$)

$$X_1 = \mu_2 a_2 - \Lambda_2 a_6 a_8 \sin \psi_1 = 0, \quad (19a)$$

$$X_2 = \mu_6 a_6 - \Lambda_6 a_2 a_8 \sin \psi_1 = 0, \quad (19b)$$

$$X_3 = \mu_8 a_8 + \Lambda_8 a_2 a_6 \sin \psi_1 - \Lambda_{88} a_8^2 \sin \psi_2 - D_8 \sin \psi_2 = 0, \quad (19c)$$

$$X_4 = \sigma_2 a_8 + \Lambda_8 a_2 a_6 \cos \psi_1 + \Lambda_{88} a_8^2 \cos \psi_2 + D_8 \cos \psi_2 = 0, \quad (19d)$$

$$X_5 = \sigma_1 a_2 a_6 a_8 + [\Lambda_2 a_2^2 a_8^2 + \Lambda_6 a_2^2 a_8^2 - \Lambda_8 a_2^2 a_6^2] \cos \psi_1 - \Lambda_{88} a_2 a_6 a_8^2 \cos \psi_2 - D_8 \cos \psi_2 = 0, \quad (19e)$$

其中

$$\Lambda_2 = (\alpha_2 / \omega_2) \Gamma_{286} / 2, \quad \Lambda_6 = (\alpha_6 / \omega_6) \Gamma_{628} / 2, \quad \Lambda_8 = (\alpha_8 / \omega_8) \Gamma_{826} / 4,$$

$$\Lambda_{88} = (\beta_8 / \omega_8) \beta_{88} / 8, \quad D_8 = F_8 / \omega_8 \bullet$$

确定双重共振定常解的方程组(19)是非线性超越代数方程组,由(19)得到两种情况的解•

情况(I)

$$a_2 = 0, \quad (20a)$$

$$a_6 = 0, \quad (20b)$$

$$\Lambda_{88} a_8^2 + (2 \Lambda_{88} D_8 - \mu_8^2 - \sigma_2^2) a_8^2 + D_8^2 = 0, \quad (20c)$$

情况(II)

$$a_2^2 = \frac{1}{\Lambda_6 \Lambda_8} \sqrt{\frac{\mu_6}{\mu_2}} [T_1 \pm \sqrt{F^2 - T_2^2}], \quad (21a)$$

$$a_6^2 = \frac{\mu_2 \Lambda_6}{\mu_6 \Lambda_2} a_2^2, \quad (21b)$$

$$a_8 = a_8^* = \sqrt{\frac{\mu_2 \mu_6}{\Lambda_2 \Lambda_6} \left[1 + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\mu_2 + \mu_6} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (21c)$$

其中

$$F = (\Lambda_{88} a_8^2 + D_8) \sqrt{\Lambda_2 \Lambda_6},$$

$$T_1 = \frac{\sqrt{\mu_2 \mu_6}}{\mu_2 + \mu_6} [\sigma_2 (\sigma_1 + \sigma_2) - \mu_8 (\mu_2 + \mu_6)],$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{\mu_2 \mu_6}}{\mu_2 + \mu_6} [\sigma_2 (\mu_2 + \mu_6) + \mu_8 (\sigma_1 + \sigma_2)] \bullet$$

为了说明(21a) 式存在实数解的条件, 引入 F 的两个临界值, 即 $F_1 = |T_2|$ 和 $F_2 = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$.

显然, F_2 一定大于 F_1 , a_2^2 有实解的数目取决于 T_1 的符号, 当 $T_1 < 0$, 且 $F > F_2$ 时, 有一个实根; 当 $T_1 > 0$, 且 $F_1 < F < F_2$ 时有两个实根; 而当 $F > F_2$ 时有一个实数解; 当 $F < F_1$, 无实数解.

4 数值结果分析

图3、4是两种参数下响应幅值随有功功率 P 的变化曲线. 对应 F 的两个临界值 $F_1、F_2$, P 也有两个临界值 $P_1、P_2$.

图3中 $T_1 < 0$, 开始时只激起 a_8 , 而 $a_2、a_6$ 保持为零, 这时对应第(I) 种情况的双重共振解; 当有功功率 P 超过临界值 P_2 后, 对应第(I) 种情况的双重共振解失去稳定性, a_8 不再增加, 而开始缓慢减小, 外部输入的能量通过组合内共振途径传给 a_2 和 a_6 , 使 a_2 和 a_6 增大. 图中实线表示稳定解, 虚线表示不稳定解, 以下同.

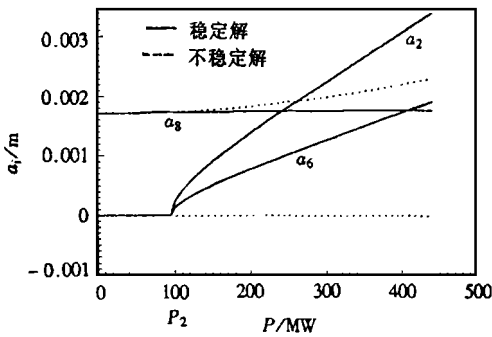


图3 响应随有功功率 P 变化 ($T_1 < 0$)

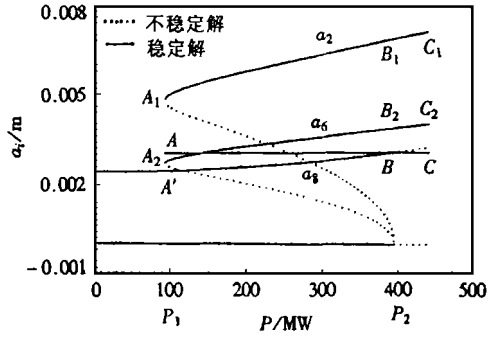


图4 响应随有功功率 P 变化 ($T_1 > 0$)

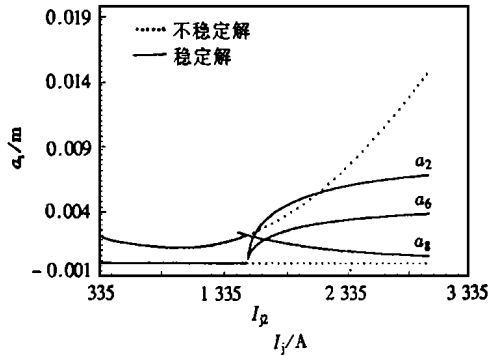


图5 响应随激磁电流 I_j 变化 ($T_1 < 0$)

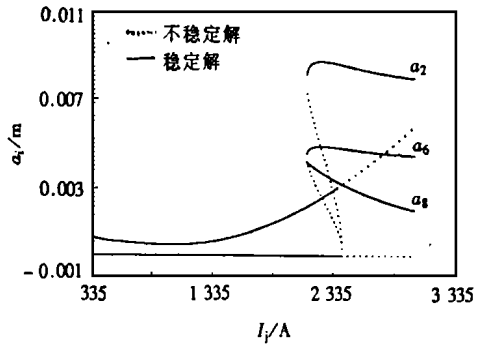


图6 响应随激磁电流 I_j 变化 ($T_1 > 0$)

图4中 $T_1 > 0$, 开始时只激起 a_8 , 而 $a_2、a_6$ 保持为零, 这时对应第(I) 种情况的双重共振解; 当有功功率 P 超过临界值 P_2 后, 对应第(I) 种情况的双重共振解失去稳定性, a_8 不再增加, 而开始缓慢减小, $a_2、a_6$ 分别跳至 $B_1、B_2$, 并随 P 的增加而沿曲线 B_1C_1 和 B_2C_2 增加; 而若 P 在图4中对应点 $C、C_1、C_2$ 处减小, 开始 a_8 沿 CBA 变化, 而 $a_2、a_6$ 沿 $C_1B_1A_1$ 和 $C_2B_2A_2$ 变化, 当 P 减小至 P_1 时, $a_2、a_6$ 降至零, a_8 由 A 降至 A' 按第(I) 种情况(21c) 的规律变化. 有功功率 P 在两个临界值之间变化时, 双重共振的幅响曲线有两种稳定形式的解, 解的多值性使得

当 P 的值在两个临界值之间变化时, 幅响曲线可以在两种稳定形式的解之间跳跃, 这种现象在非线形振动中称之为跳跃现象。

图 5、6 是两种参数下响应的幅值激磁电流 I_j 变化的曲线。其性质与图 3、4 相似。

图 7 是额定运行状态下内共振调谐值 $\sigma_1 = 0$ 时双重共振的频响曲线。频响曲线左右对称, 呈 M 形; 图中有两个区域包括两个稳定解, 在这两个区域上频响曲线存在跳跃现象, 多解共存是产生跳跃现象的原因。图 8、9 分别为 $\sigma_1 < 0$ 和 $\sigma_1 > 0$ 时双重共振的频响曲线。因为 $\sigma_1 \neq 0$, 频响曲线失去对称性, 但仍然存在跳跃现象的两个区域。

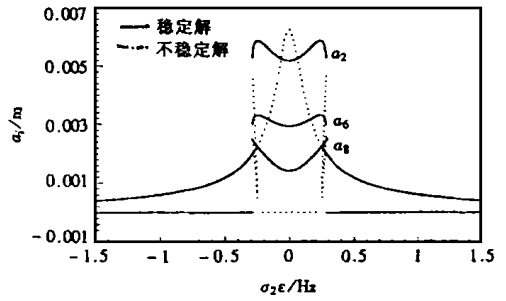


图 7 频响曲线 $\sigma_1 = 0$

以上各响应曲线都不考虑参数激励的情况, 经过计算知对额定运行状态下参数激励对定子系统的双重共振影响很小, 它不改变各种响应曲线的性质, 而只是量值上有较小的改变。

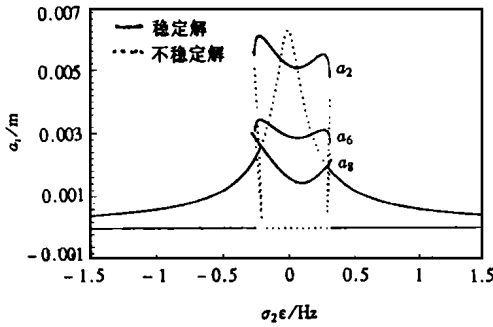


图 8 频响曲线 $\sigma_1 < 0$

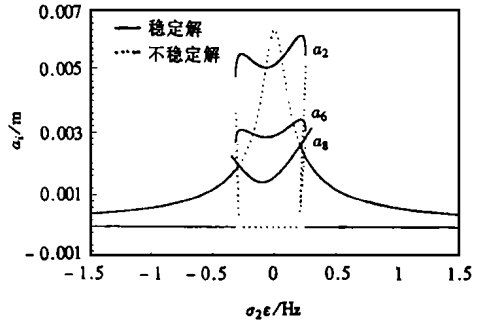


图 9 频响曲线 $\sigma_1 > 0$

5 结 论

(1) 定子系统磁固耦合双重共振发生时, 通过组合内共振的途径, 使三阶模态都不为零, 且前两阶模态振幅要比第三阶振幅大许多。

(2) 定子系统的双重共振稳态解有多解共存, 存在跳跃现象。

(3) 定子系统磁固耦合双重共振的最大幅值比工程实际允许的最大幅值(工程上允许的双幅值为 0.03 mm) 大几十倍到上百倍, 当定子系统的固有频率及激励频率存在共振关系, 且各模态之间的耦合系数不为零时, 定子系统磁固耦合双重共振的危害很大。在工程实际中应避免定子系统发生磁固耦合双重共振。

(4) 对实际 241 MW 机组, 定子系统的固有频率 ω_2 、 ω_6 、 ω_8 及强迫激励的频率 2ω 未落在式 (8) 双重共振的共振范围内, 该机组不会发生式 (8) 频率关系的磁固耦合双重共振。

[参 考 文 献]

- [1] 李文兰, 邱家俊. 水轮发电机定子系统的磁固耦合振动[A]. 见: 全国第六届振动理论及应用学术会议论文集[C]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997, (5): 544—548.
- [2] 李文兰. 大型水轮发电机组定子系统磁固耦合非线性振动研究[D]. 博士学位论文. 天津: 天津大

- 学, 1998.
- [3] 邱家俊. 机电耦联动力系统的非线性振动[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [4] Nayfeh A H, Mook D T. Nonlinear Oscillations [M]. New York: Wiley-Interscience, 1997.
- [5] 邱家俊, 杨志安. 发电机组转子轴系扭振模化系统的三重共振[J]. 力学学报, 1997, 29(6): 733—739.
- [6] Nayfeh T A, Nayfeh A H, Mook D T. A theoretical and experimental investigation of a three-degree-of-freedom structure[J]. Nonlinear Dynamics, 1994, 6(3): 353—374.

The Double Resonances of Magnetism and Solid Coupling of Hydroelectric Generator Stator System

LI Wen_jan¹, QIU Jia_jun¹, YANG Zhi_an²

(1. School of Mechanics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P R China;

2. Department of Scientific Research and Production, Tangshan University,
Tangshan 063000, P R China)

Abstract: A double-shell model of hydroelectric generator stator system was established. Applying the theory of mechano-electric analytical dynamics theory, the nonlinear vibration equation of magnetism and solid coupling of hydroelectric generator stator system, under steadily balanced three-phases operating condition, was obtained. According to the method of multiple scales for nonlinear oscillations, the double resonances of magnetism and solid coupling of hydroelectric generator stator system were investigated. It is pointed out that the system has abundant dynamics phenomenon including the attendant jumps and coexistence of multiple stable motions.

Key words: hydroelectric generator; stator system; method of the multiple scales; magnetism and solid coupling; double resonances