

基于直观线性化模型的同步发电机电磁力矩解析

刘宪林¹, 柳 焯², 姜和恭¹

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 含阻尼绕组同步发电机电磁力矩系数的传统算式忽略直轴阻尼绕组与励磁绕组的互感, 且不考虑自动励磁调节(AVR)的作用。为提高电磁力矩系数计算的准确性, 细化关于 AVR 和阻尼绕组对机组稳定性影响的认识, 基于计及阻尼绕组作用的 c_1 - c_{12} 模型, 采用微振荡法建立了计及 AVR 以及直轴阻尼绕组与励磁绕组互感的同步发电机电磁力矩系数表达式。基于这些表达式, 按是否与 AVR 有关, 将电磁力矩划分为固有分量和受控分量, 对交、直轴阻尼绕组, 励磁调节主通道等对机组同步能力特别是阻尼能力的影响以及低频振荡的机理进行了详细分析。分析表明, AVR 总是削弱机组阻尼; 在 AVR 作用下, 交轴阻尼绕组的阻尼作用得到增强, 而直轴阻尼绕组反而可能提供负阻尼; 外部电抗和有功负载的增大导致固有阻尼能力下降; AVR 削弱阻尼的强度不仅与其增益有关, 而且随着固有阻尼能力的下降而增强。根据 c_1 - c_{12} 模型与 Phillips-Heffron k_1 - k_6 模型下阻尼力矩系数之差, 给出了 k_1 - k_6 模型等效阻尼系数算式。

关键词: 电力系统; 低频振荡; 电磁力矩; 线性化模型

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)10-0001-06

0 引言

同步发电机电磁力矩分析是研究电力系统小扰动稳定性的基础性工作。这一经典研究领域所取得的丰富成果收录于多种专著之中^[1-3], 它们对于揭示电力系统失稳机理发挥了重要作用。直到今天, 面对规模巨大、构成复杂的现代电力系统, 有关研究仍然受到重视^[4-13]。

文献[1-3]介绍了同步电机不计自动励磁调节 AVR(Automatic Voltage Regulator)作用的同步力矩系数和阻尼力矩系数计算公式, 其中文献[3]还提供了双机系统的阻尼力矩算式, 并对阻尼系数取值问题作了分析。文献[4-5]基于 Phillips-Heffron k_1 - k_6 模型给出了计及 AVR 作用的阻尼力矩系数算式, 但因 k_1 - k_6 模型忽略了发电机阻尼绕组的动态作用, 所得结果准确度有限。文献[6-7]对多机系统的阻尼力矩进行了研究。文献[8-9]分析了电力系统稳定器(PSS)对同步电机阻尼能力的影响, 而文献[10-11]则对静态无功补偿器(SVC)等网络控制装置对系统阻尼的作用进行了研究。文献[12]对电力系统阻尼模拟方法进行了比较, 其中涉及到了同步发电机阻尼绕组的影响。文献[13]则提出了一种频率响应法计算同步电机同步和阻尼力矩的方法。

本文基于文献[14]中的单机无穷大系统直观线

性化模型, 研究 AVR 作用下的含阻尼绕组同步发电机的电磁力矩系数, 提出电磁力矩固有分量和受控分量的概念, 建立一种新的包含 AVR 作用的同步力矩系数和阻尼力矩系数计算公式以及 k_1 - k_6 模型阻尼系数的计算公式, 并对交、直轴阻尼绕组在 AVR 作用下的特性和机组产生低频振荡的机理进行分析。

1 单机无穷大系统直观线性化模型

计及阻尼绕组作用的单机无穷大系统直观线性化模型(c_1 - c_{12} 模型)如图 1 所示^[14]。

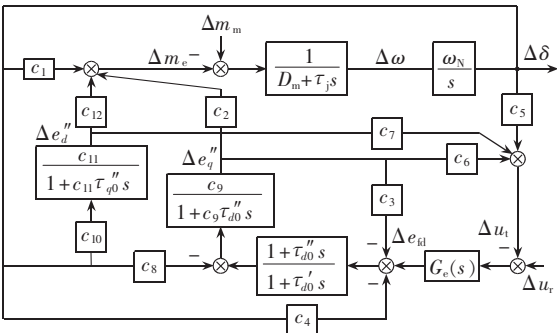


图 1 单机无穷大系统线性化 c_1 - c_{12} 模型
Fig.1 A linearized c_1 - c_{12} model of one-machine infinite-bus system

图中 $G_c(s)$ 为励磁系统的传递函数; D_m 为机械阻尼系数; c_1 - c_{12} 为线性化系数, 表达式如下:

$$c_1 = e_d'' u_d / x_q'' \Sigma + e_q'' u_q / x_d'' \Sigma + (u_q^2 - u_d^2)(x_d'' - x_q'') / x_d'' \Sigma x_q'' \Sigma$$

$c_2 = u_d / x_d''_{\Sigma}$, $c_3 = (x_d - x_d') / x_d''_{\Sigma}$, $c_4 = u_d (x_d - x_d') / x_d''_{\Sigma}$
 $c_5 = (u_{1d} u_q x_q'' / x_q''_{\Sigma} - u_{1q} u_d x_d'' / x_d''_{\Sigma}) / u_1$
 $c_6 = u_{1q} x_e / u_1 x_d''_{\Sigma}$, $c_7 = u_{1d} x_e / u_1 x_q''_{\Sigma}$
 $c_8 = u_d (x_d' - x_d'') / x_d''_{\Sigma}$, $c_9 = x_d''_{\Sigma} / x_q''_{\Sigma}$
 $c_{10} = u_q (x_q - x_q'') / x_q''_{\Sigma}$, $c_{11} = x_q''_{\Sigma} / x_q''_{\Sigma}$, $c_{12} = -u_q / x_q''_{\Sigma}$
 式中运行参数均取工作点处的值。

2 电磁力矩解析

2.1 电磁力矩的固有分量和受控分量

在图 1 中,应用叠加原理,可得 $\Delta\delta$ 为激励的电磁力矩增量表达式

$$\Delta m_e = \Delta m_{e(c1)} + \Delta m_{e(c4)} + \Delta m_{e(c5)} + \Delta m_{e(c8)} + \Delta m_{e(c10)} \quad (1)$$

式中 $\Delta m_{e(c1)} = c_1 \Delta\delta$

$$\Delta m_{e(c5)} = -[c_5 c_2 G_9(s) G_r(s) G_e(s) / N(s)] \Delta\delta$$

$$\Delta m_{e(c4)} = -[c_4 c_2 G_9(s) G_r(s) / N(s)] \Delta\delta$$

$$\Delta m_{e(c8)} = -[c_8 c_2 G_9(s) / N(s)] \Delta\delta$$

$$\Delta m_{e(c10)} = c_{10} [c_{12} G_{11}(s) - c_2 c_7 G_9(s) \times G_{11}(s) G_r(s) G_e(s) / N(s)] \Delta\delta$$

$$G_9(s) = c_9 / (1 + c_9 \tau_{d0}'' s)$$

$$G_{11}(s) = c_{11} / (1 + c_{11} \tau_{q0}'' s)$$

$$G_r(s) = (1 + \tau_{d0}'' s) / (1 + \tau_{d0}' s)$$

$$N(s) = 1 + c_3 G_9(s) G_r(s) + c_6 G_9(s) G_r(s) G_e(s)$$

以上各电磁力矩分量,若其表达式含有 $G_e(s)$ 项,表明其与 AVR 有关,含有与励磁调节有关的受控分量,且 $G_e(s)=0$ 时的部分则为固有分量;否则仅为固有分量。由此可知, $\Delta m_{e(c1)}$ 仅含固有分量; $\Delta m_{e(c5)}$ 仅含受控分量; $\Delta m_{e(c4)}$ 、 $\Delta m_{e(c8)}$ 和 $\Delta m_{e(c10)}$ 则同时包含固有分量和受控分量。

2.2 电磁力矩系数表达式

由微振荡法^[1]可建立电磁力矩系数表达式。设功角围绕工作点作角频率为 λ 的小幅低频正弦振荡,则式(1)中各力矩分量亦将围绕工作点作同频小幅振荡。在式(1)中令 $s = j\lambda$, 可得电磁力矩增量的相量表达式

$$\Delta m_e = \Delta m_{es} + \Delta m_{el} \quad (2)$$

$$\Delta m_{es} = k_s \Delta\delta, \quad \Delta m_{el} = k_d \Delta\omega = j(\lambda / \omega_N) k_d \Delta\delta$$

式中 Δm_{es} 为同步力矩, Δm_{el} 为阻尼力矩; k_s 和 k_d 分别为同步力矩系数和阻尼力矩系数。

由式(1)可知:

$$k_s = k_{s(c1)} + k_{s(c4)} + k_{s(c5)} + k_{s(c8)} + k_{s(c10)}$$

$$k_d = k_{d(c1)} + k_{d(c4)} + k_{d(c5)} + k_{d(c8)} + k_{d(c10)}$$

其中 $k_{s(c1)}$ 为电磁力矩分量 $\Delta m_{e(c1)}$ 中的同步力矩系数,其余类推。

设同步发电机采用快速励磁系统,近似取 $G_e(s) = k_e$, 则各电磁力矩分量的同步力矩系数和阻尼力矩系数分别为

$$k_{s(c1)} = c_1, \quad k_{d(c1)} = 0$$

$$k_{s(c4)} = -c_2 c_4 c_9 A (B + \lambda^2 C \tau_{d0}'')$$

$$k_{d(c4)} = -c_2 c_4 c_9 \omega_N A (B \tau_{d0}'' - C)$$

$$k_{s(c5)} = -c_2 c_5 c_9 k_e A (B + \lambda^2 C \tau_{d0}'')$$

$$k_{d(c5)} = -c_2 c_5 c_9 k_e \omega_N A (B \tau_{d0}'' - C)$$

$$k_{s(c8)} = -c_2 c_8 c_9 A (B + \lambda^2 C \tau_{d0}'')$$

$$k_{d(c8)} = -c_2 c_8 c_9 \omega_N A (B \tau_{d0}' - C)$$

$$k_{s(c10)} = c_{10} c_{11} c_{12} D - c_2 c_7 c_9 c_{10} c_{11} k_e A D \times [(B + \lambda^2 C \tau_{d0}'') + \lambda^2 c_{11} \tau_{q0}'' (B \tau_{d0}'' - C)]$$

$$k_{d(c10)} = -c_{10} c_{11} c_{12} \omega_N D \tau_{q0}'' - c_2 c_7 c_9 c_{10} c_{11} \omega_N k_e A D \times [(B \tau_{d0}'' - C) - c_{11} \tau_{q0}'' (B + \lambda^2 C \tau_{d0}'')]$$

其中

$$A = 1 / (B^2 + \lambda^2 C^2)$$

$$B = 1 + c_9 (c_3 + c_6 k_e - \lambda^2 \tau_{d0}' \tau_{d0}'')$$

$$C = \tau_{d0}' + c_9 \tau_{d0}'' (1 + c_3 + c_6 k_e)$$

$$D = 1 / (1 + \lambda^2 c_{10} \tau_{q0}''^2)$$

由文献[14]可知, $c_1 \sim c_{12}$ 模型的线性化系数 c_1 、 c_3 、 c_6 、 $c_9 \sim c_{12}$ 是有功功率 P 的偶函数,除 c_{12} 为负值外,其余均为正值; c_2 、 c_5 、 c_7 为 P 的奇函数,除 c_5 为单调减外,其余均为单调增。根据线性化系数 $c_1 \sim c_{12}$ 和发电机时间常数等参数的取值特点可以证明下列几个不等式:

$$B + \lambda^2 C \tau_{d0}'' > 0$$

$$B + \lambda^2 C \tau_{d0}' > 0$$

$$B \tau_{d0}'' - C < 0$$

$$(B + \lambda^2 C \tau_{d0}'') + \lambda^2 c_{11} \tau_{q0}'' (B \tau_{d0}'' - C) > 0$$

$$B \tau_{d0}' - C > 0 \quad (k_e > k_{e1})$$

$$B \tau_{d0}' - C < 0 \quad (k_e < k_{e1})$$

式中 $k_{e1} = [\tau_{d0}'' (1 + \lambda^2 \tau_{d0}'^2) / (\tau_{d0}' - \tau_{d0}'') + c_3] / c_6$ 为给定工况下 AVR 的临界增益。

2.3 同步力矩系数和阻尼力矩系数分析

2.3.1 各电磁力矩分量的力矩系数分析

机组不发生爬行失步的条件为 $k_s > 0$, 不发生振荡失步的条件为 $k_d > 0$ ^[1]。根据各电磁力矩分量的同步力矩系数和阻尼力矩系数的正负可判断出它们对机组 k_s 即机组同步能力或 k_d 即机组阻尼能力的影响。

根据线性化系数 $c_1 \sim c_{12}$ 和上节中所列不等式,便可确定各电磁力矩分量的同步分量和阻尼分量的正负。分析后可得下面的结论。

a. $\Delta m_{e(c1)}$ 仅含固有同步分量。因对任意工况有 $c_1 > 0$ 且数值较大, $k_{s(c1)} \gg 0$, 故 $\Delta m_{e(c1)}$ 构成同步力矩的主要部分。

b. $\Delta m_{e(c5)}$ 是对应励磁调节主通道的电磁力矩分量,是纯受控分量。对 $P \neq 0$ 的任意工况,总有 $-c_2 c_5 c_9 > 0$, $B + \lambda^2 C \tau_{d0}'' > 0$, $B \tau_{d0}'' - C < 0$, 故 $k_{s(c5)} > 0$, $k_{d(c5)} < 0$, 即 $\Delta m_{e(c5)}$ 增强同步力矩,但削弱阻尼力矩。作为纯受控分量,AVR 削弱机电振荡阻尼的作用主要通过 $\Delta m_{e(c5)}$ 来呈现。

c. $\Delta m_{e(c4)}$ 主要是依托励磁绕组产生的电磁力矩分量,但包含直轴阻尼绕组互感的影响和 AVR 的作用。对 $P \neq 0$ 任意工况,总有 $-c_2 c_4 c_9 < 0$, $B + \lambda^2 C \tau_{d0}'' > 0$, $B \tau_{d0}'' - C < 0$, 故 $k_{s(c4)} < 0$, $k_{d(c4)} > 0$, 即 $\Delta m_{e(c4)}$ 削弱同步力矩,增强阻尼力矩。进一步分析还可知,AVR 削弱 $\Delta m_{e(c4)}$ 中的固有同步力矩和固有阻尼力矩,但不严重。

d. $\Delta m_{e(c8)}$ 主要依托直轴阻尼绕组产生的电磁力

矩分量,但包含励磁绕组互感的影响和 AVR 的作用。 $k_{d(c8)}$ 的固有分量与受控分量交织在一起,在其表达式中令 $k_e=0$,可分解出其固有分量。对 $P \neq 0$ 的任意工况, $-c_2 c_8 c_9 < 0$,且当 AVR 增益与运行工况满足 $k_e > k_{e1}$ 时 $B \tau_{d0}' - C > 0$,从而 $k_{d(c8)} < 0$ 。可见,计及 AVR 的作用后,直轴阻尼绕组的阻尼作用被弱化甚至可能提供负阻尼,这出人意料,应予以注意。此外,因 $B + \lambda^2 C \tau_{d0}' > 0$,故直轴阻尼绕组总是削弱同步力矩。

e. $\Delta m_{e(c10)}$ 是依托交轴阻尼绕组产生的电磁力矩分量。 $k_{d(c10)}$ 的第 1 项为固有分量,第 2 项为受控分量。对 $P \neq 0$ 的任意工况, $-c_{10} c_{11}^2 c_{12} D > 0$,故 $k_{d(c10)}$ 的固有分量增强阻尼力矩;又因

$$-c_2 c_7 c_9 c_{10} c_{11} k_e A D < 0$$
$$[(B \tau_{d0}'' - C) - c_{11} \tau_{q0}'' (B + \lambda^2 C \tau_{d0}'')] < 0$$

故 $k_{d(c10)}$ 的受控分量增强阻尼力矩。这表明 AVR 强化了交轴阻尼绕组的阻尼作用,因此交轴阻尼绕组在抑制低频振荡方面具有重要的作用。类似分析可知,交轴阻尼绕组总是削弱同步力矩。

f. $P=0$ 即理想调相运行时, $\Delta m_{e(c4)}$ 、 $\Delta m_{e(c5)}$ 、 $\Delta m_{e(c8)}$ 均为 0,对机组小扰动稳定性没有影响;而 $\Delta m_{e(c10)}$ 的受控分量为 0。此时,由 $\Delta m_{e(c1)}$ 提供同步力矩,由依托交轴阻尼绕组的 $\Delta m_{e(c10)}$ 的固有分量提供阻尼力矩。

2.3.2 AVR 作用下的阻尼绕组特性详细分析

在此对阻尼绕组的固有阻尼以及 AVR 对其影响作进一步的分析。

在 $k_{d(c8)}$ 表达式中令 $k_e=0$ 和 $c_3=0$,并代入 c_1-c_{12} 模型有关线性化系数表达式即得不计励磁绕组互感影响的直轴阻尼绕组固有阻尼力矩系数传统算式:

$$D_d = k_{d(c8)} \Big|_{k_e=0, c_3=0} = u^2 \sin^2 \delta \times \frac{x_d' - x_d''}{x_d' \Sigma x_d'' \Sigma} \times \frac{\tau_{d0}'' \omega_N}{1 + (\lambda \tau_{d0}'')^2}$$

式中 $\tau_{d0}'' = \tau_{d0}''(x_d'' \Sigma / x_d' \Sigma)$, $x_d'' \Sigma = x_d'' + x_e$, $x_d' \Sigma = x_d' + x_e$; u 为无穷大容量母线电压幅值。

在 $k_{d(c10)}$ 表达式右边第一项代入各线性化系数表达式即得交轴阻尼绕组固有阻尼力矩系数的传统算式:

$$D_q = k_{d(c10)} \Big|_{k_e=0} = u^2 \cos^2 \delta \times \frac{x_q - x_q''}{x_q \Sigma x_q'' \Sigma} \times \frac{\tau_{q0}'' \omega_N}{1 + (\lambda \tau_{q0}'')^2}$$

式中 $\tau_{q0}'' = \tau_{q0}''(x_q'' \Sigma / x_q \Sigma)$, $x_q'' \Sigma = x_q'' + x_e$, $x_q \Sigma = x_q + x_e$ 。

上述 2 式分别含有 $\sin^2 \delta$ 和 $\cos^2 \delta$ 因子,表明交、直轴阻尼绕组的阻尼作用具有互补特性,例如,在有功重载时,交轴阻尼绕组的固有阻尼能力较差,而直轴阻尼绕组的阻尼能力却较强,这一特性使得发电机在不同的工况下都可以获得较强的阻尼能力。但由前边分析已知,在 AVR 作用下,情况将发生变化,即交轴阻尼绕组的阻尼作用得到强化,而直轴阻尼绕组的阻尼作用反而被恶化。

现以表 1 所列参数的单机无穷大系统为例验证该结论。对发电机在 $Q = 0.8$ p.u.(迟相)和 $Q = -0.8$ p.u.(进相) 2 种无功功率条件下求取交、直轴阻

尼绕组阻尼力矩系数关于有功功率和励磁系统增益的关系曲线如图 2 所示。计算中,励磁系统增益 k_e 取为 0、100、200 和 300(相应曲线为 1、2、3、4),其中 $k_e=0$ 的曲线是固有阻尼力矩系数曲线。计算时以机电二阶回路自然振荡角频率近似作为 λ ,即

$$\lambda \approx \lambda_n = \sqrt{c_1 \omega_N / \tau_j}$$

表 1 单机无穷大系统算例参数

Tab.1 Parameters of the one-machine infinite-bus testing system

参数	参数值	参数	参数值	参数	参数值
x_d	1.226	x_q''	0.140	τ_{q0}''	0.215
x_d'	0.190	x_e	0.500	τ_j	5
x_d''	0.130	τ_{d0}'	8.940	k_e	200
x_q	0.830	τ_{d0}''	0.093		

注:表中时间常数单位为 s,其余各量均为标么值。

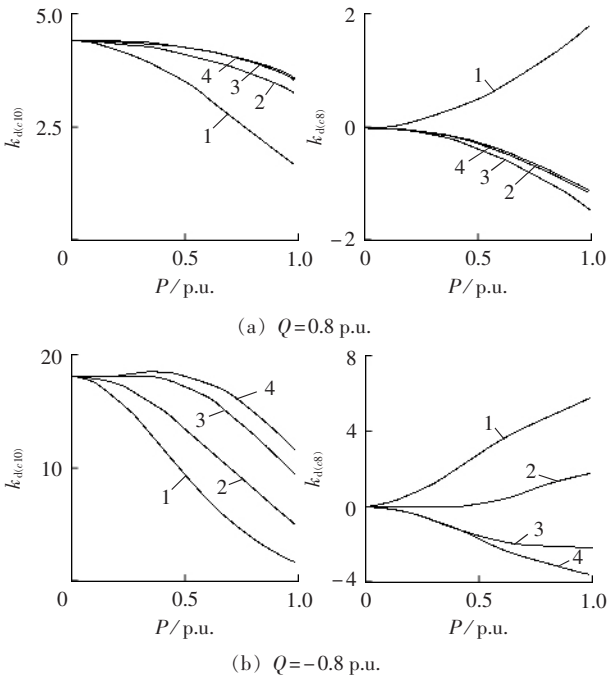


图 2 阻尼力矩系数曲线

Fig.2 Curves of damping torque coefficient

由图 2 可以得出 3 点结论。

a. 比照 $k_e=0$ 时的固有阻尼力矩系数曲线可知, AVR 削弱直轴阻尼绕组的阻尼,对本算例,在 AVR 作用下各工况下 $k_{d(c8)}$ 由正变负,且有功负载越重,后果越严重;与之相反,AVR 增强交轴阻尼绕组的阻尼,在 AVR 作用下各工况下 $k_{d(c10)}$ 均增大,且有功负载越重,效果越显著。

b. 在进相和迟相运行工况下,AVR 对 2 个阻尼绕组作用的影响有所不同。进相运行时,交轴阻尼绕组的阻尼能力得以提升,显著高于迟相运行时的能力,而直轴阻尼绕组的阻尼能力当 k_e 和 P 很大时可能较迟相运行时的更差。

c. AVR 对交、直轴阻尼绕组固有阻尼的影响相反,因此 AVR 对 2 个阻尼绕组的合成阻尼力矩系数的影响小于对单个阻尼绕组的影响。

以 $k_1 \sim k_6$ 为线性化系数的无阻尼绕组同步发电机 Phillips-Heffron $k_1 \sim k_6$ 模型^[14]如图 3 所示。图中 D_p 为等值阻尼参数,用来近似反映阻尼绕组的作用。

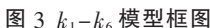


Fig.3 Block diagram of k_1-k_6 model

$k_1 \sim k_6$ 为线性化系数,表达式为

$$k_1 = e'_q u_q / x'_d \Sigma + (u_q^2 - u_d^2) (x'_d - x_q) / x'_d \Sigma x_{q\Sigma}$$

$$k_2 = u_d / x'_{d\Sigma}$$

$$k_3 = (x_d - x'_d) / x'_d \Sigma$$

$$k_4 = u_d(x_d - x'_d) / x'_d \Sigma$$

$$k_5 = (u_{1d} u_g x_g / x_{g\Sigma} - u_{1g} u_d x'_d / x'_{d\Sigma}) / u_1$$

$$k_6 = u_{1g} x_e / u_1 x_d' \Sigma.$$

上述各式中运行参数均取工作点处的值。

类似于式(2),基于 k_1-k_6 模型,可得无阻尼绕组同步发电机在微振荡下的电磁力矩同步力矩系数和阻尼力矩系数分别为

$$k_s = k_{s(k1)} + k_{s(k4)} + k_{s(k5)}$$

$$k_d = k_{d(k1)} + k_{d(k4)} + k_{d(k5)}$$

其中

$$k_{s(k1)}=k_1, \quad k_{d(k1)}=0$$

$$k_{s(k4)} = -k_2 k_4 (1 + k_3 + k_6 k_e) A_k$$

$$k_{d(k4)} = -k_2 k_4 \omega_N \tau_{d'0} A_k$$

$$k_{s(k5)} = -k_2 k_5 k_e (1 + k_3 + k_6 k_e) A_k$$

$$k_{d(k5)} = -k_2 k_5 k_e \omega_N \tau_{d0}' A_k$$

$$A_k = 1 / [(1 + k_3 + k_6 k_e)^2 + \lambda^2 \tau_{d0}'^2]$$

对表 1 所示算例系统,分别采用 c_1-c_{12} 模型和 k_1-k_6 模型求取的力矩系数曲线如图 4 所示(图中标注均为标么值),其中图 4(a)为固有力矩系数曲线,而图 4(b)则为计及 AVR 作用后的合成电磁力矩曲

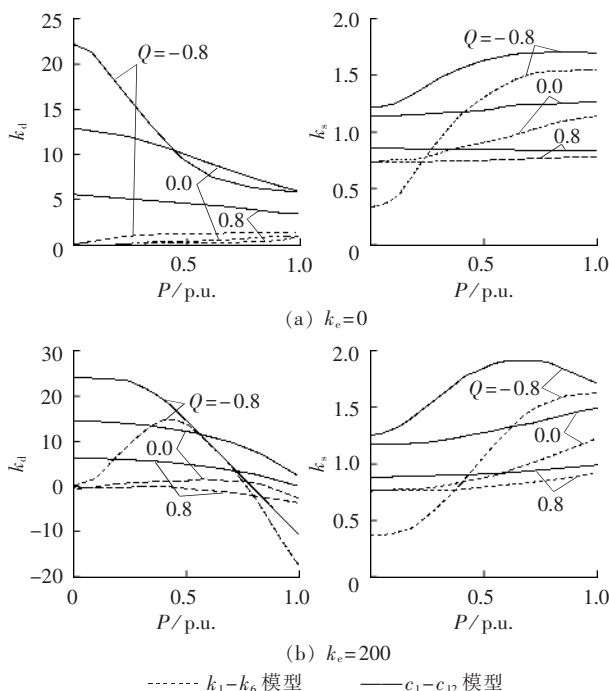


图 4 力矩系数曲线

Fig.4 The curves of torque coefficients

线。图 4 表明,无论是固有分量还是合成电磁力矩,由 c_1 - c_{12} 模型所得阻尼力矩系数和同步力矩系数均较 k_1 - k_6 模型的大,这体现了阻尼绕组的作用。

k_1-k_6 模型的等值阻尼系数 D_e 对机组小扰动稳定分析结果影响很大,但合理选取其数值非常困难^[3,12]。通常认为,阻尼系数的数值与发电机参数、系统参数和运行工况有关,其实,它还与 AVR 的参数有关。但一些文献提供的阻尼系数算法并没有计及 AVR 的影响。由上述分析可知,计及 AVR 影响的 k_1-k_6 模型的等值阻尼系数可由 c_1-c_{12} 模型与 k_1-k_6 模型下的阻尼力矩系数之差求取,即

$$D_e = (k_{d(c4)} + k_{d(c5)} + k_{d(c8)} + k_{d(c10)}) - (k_{d(k4)} + k_{d(k5)}) \quad (3)$$

表 2 是算例系统采用 c_1-c_{12} 模型和 k_1-k_6 模型计算的机电模式及阻尼比。计算时,取 $k_e=200$;不考虑机械阻尼, c_1-c_{12} 模型的 $D_m=0$; k_1-k_6 模型的等值阻尼系数 D_e 按式(3)计算。

由表 2 可见,无论进相或迟相运行,无论有功重载、轻载,采用式(3)计算的阻尼系数,由 k_1-k_6 模型

表 2 算例系统机电模式特征根 ($x_c=0.5$ p.u.)

Tab.2 Eigenvalues of the electromechanical mode in the testing system($x_e=0.5$ p.u.)

$Q/\text{p.u.}$	$P/\text{p.u.}$	c_1-c_{12} 模型		k_1-k_6 模型		
		机电模式	阻尼比	D_e	机电模式	阻尼比
-0.8	0	-2.271 7 ± j 8.240 6	0.265 8	18.105 7	-1.508 8 ± j 5.247 4	0.276 3
	0.5	-1.211 2 ± j 8.788 1	0.136 5	12.086 3	-1.084 0 ± j 6.553 4	0.163 2
	1.0	0.686 2 ± j 8.966 3	-0.076 3	9.763 4	0.501 7 ± j 8.256 0	-0.060 7
0	0	-1.071 4 ± j 7.838 5	0.135 4	10.127 9	-0.844 0 ± j 6.663 5	0.125 7
	0.5	-0.740 6 ± j 8.034 7	0.091 8	8.948 4	-0.632 4 ± j 7.004 6	0.089 9
	1.0	0.149 5 ± j 8.339 0	-0.017 9	7.119 8	0.084 7 ± j 7.739 1	-0.010 9
0.8	0	-0.409 6 ± j 6.792 3	0.060 2	4.387 1	-0.365 6 ± j 6.420 9	0.056 8
	0.5	-0.242 9 ± j 6.867 1	0.035 4	4.099 6	-0.225 3 ± j 6.543 6	0.034 4
	1.0	0.246 1 ± j 7.013 0	-0.035 1	3.573 9	0.220 3 ± j 6.832 9	-0.032 2

所得机电模式阻尼比与计及阻尼绕组作用的 c_1-c_{12} 模型所得结果相近,2 种模型在系统稳定性的判别上没有出现不一致的现象。

另外,不同运行条件以及是否考虑 AVR 的作用, k_1-k_6 模型等值阻尼系数的差别是很大的。因此,对 k_1-k_6 模型的等值阻尼系数的取值一定要慎重,没有根据随意取值将造成较大的计算误差甚至稳定分析的定性错误。

表 3 阻尼力矩系数
Tab.3 Damping torque coefficients p.u.

Q	P	$x_e=0$		$x_e=0.5$			
		固有值	固有值	$k_e=20$		$k_e=200$	
				受控值	合成值	受控值	合成值
-0.8	0	44.387 3	22.257 1	0	22.257 1	0	22.257 1
	0.5	27.739 7	9.305 6	-0.611 2	8.694 4	4.521 7	13.827 3
	1.0	20.809 1	5.833 4	-2.985 2	2.848 2	-14.290 2	-8.456 8
0	0	42.542 1	12.743 2	0	12.743 2	0	12.743 2
	0.5	38.568 7	9.965 3	-0.292 8	9.672 5	0.775 6	10.740 9
	1.0	31.560 0	5.833 4	-1.652 9	4.180 5	-5.833 4	0
0.8	0	40.844 2	5.625 1	0	5.625 1	0	5.625 1
	0.5	39.300 3	4.757 0	-0.335 5	4.421 5	-0.559 4	4.197 6
	1.0	35.604 3	3.680 6	-1.949 0	1.731 6	-1.366 6	2.284 0

由表 3 可看出下面所述的结果。

3.1 阻尼力矩系数的固有分量

$x_e=0$ 即同步电机直接接于无穷大母线时,机端电压恒定,基于电压偏差而工作的 AVR 对机组小扰动稳定性不再有影响,阻尼力矩系数仅有固有值且数值较大; $x_e \neq 0$ 时阻尼力矩系数固有分量明显减小;对给定的 $x_e \neq 0$,无功负载和有功负载越大,阻尼力矩系数固有分量越小。这表明机组自身的阻尼能力随着外电抗的增大而急剧下降,随着无功负载和有功负载的增大而有所下降。

3.2 阻尼力矩系数的受控分量

当 $x_e \neq 0$ 时,阻尼力矩系数出现受控分量且为 0 或负值,且有功负载越大其值越小,AVR 增益越大其值越小。这表明 AVR 削弱机电振荡的阻尼,且这种削弱作用随着有功负载的增大或 AVR 增益的增大都可趋于严重。

此外,由表 3 和图 4(b)中 $Q=-0.8\text{ p.u.}$ 、 $P=1.0\text{ p.u.}$ 时的结果可以发现,机组深度进相且有功负载较大时,AVR 削弱阻尼的程度可能更严重,机组较迟相有功重载工况可能更易发生低频振荡。这一现象应引起注意。

归纳以上分析可知,机组是否产生低频振荡取决于 3 个方面的综合作用:

- a. 网络结构因素,机组与系统电气距离增大将导致固有阻尼能力急剧下降;
- b. 机组运行因素,有功负载增大也将导致固有阻尼能力下降,迟相运行时的固有阻尼一般低于进相运行时固有阻尼;
- c. 励磁控制因素,高增益自动调节励磁产生负

3 基于固有阻尼和受控阻尼概念的低频振荡机理分析

长距重载输电系统在高增益 AVR 作用下易出现低频振荡,这已是共识。在此,运用前述固有阻尼和受控阻尼的概念对低频振荡的机理作进一步的细化分析。对算例系统,改变其外电抗和 AVR 增益,由式(2)计算的阻尼力矩系数如表 3 所示。

的受控阻尼力矩,削弱机组阻尼,且 AVR 的负阻尼效应强度不仅与其增益有关,而且与固有阻尼的弱化以及深度进相有关。

若合成阻尼力矩系数,即阻尼力矩系数固有分量和受控分量之和接近于 0 甚至为负,机组将发生弱阻尼甚至发散的低频振荡。

4 结论

基于计及阻尼绕组作用的单机无穷大系统直观线性化 c_1-c_{12} 模型和 Phillips–Heffron k_1-k_6 模型,采用微振荡法分析同步电机的电磁力矩。按是否与 AVR 有关,将电磁力矩增量分为固有分量和受控分量 2 个部分;给出了计及直轴阻尼绕组与励磁绕组互感和 AVR 作用的同步力矩系数和阻尼力矩系数算式,以及 k_1-k_6 模型阻尼系数的算式。运用固有阻尼和受控阻尼的概念深入分析产生低频振荡的原因,认为:外部电抗和有功负载的增大导致机组固有阻尼能力下降,而进相运行则可提升机组固有阻尼能力;AVR 总是削弱机组阻尼,其负阻尼效应的强度不仅与 AVR 的增益有关,而且随着固有阻尼能力的下降而增强,也与深度进相有关;计及 AVR 作用后,交轴阻尼绕组的阻尼作用得到强化,而直轴阻尼绕组反而可能提供负阻尼。

参考文献:

[1] 高景德,张麟征. 电机过渡过程的基本理论和分析方法[M]. 北京:科学出版社,1985.
[2] 汤蕴璆,张奕黄,范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
[3] 韩英铎,王仲鸿,陈淮金. 电力系统最优分散协调控制[M]. 北

京:清华大学出版社,1997.

- [4] YU Yao-nan. Electric power system dynamics[M]. New York: Academic Press,1983.
- [5] 崔小磊,赵书强,闫健杰. 快速求解多机系统机电振荡模式的新算法[J]. 电力自动化设备,2006,26(6):36-39.
- CUI Xiao-lei,ZHAO Shu-qiang,YAN Jian-jie. Electromechanical mode fast calculation of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(6):36-39.
- [6] 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 Yi-xin,LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(11):6-11.
- [7] SHALTOUT A A,ABU AL-FEILAT K A. Damping and synchronizing torque computation in multimachine power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1992,7(1):280-286.
- [8] 刘宪林,柳焯,娄和恭. 功率方向电力系统稳定器在抽水蓄能同步电机上的应用[J]. 电力自动化设备,2001,21(5):29-32.
- LIU Xian-lin,LIU Zhuo,LOU He-gong. Application of power directional power system stabilizer to pumped storage machine [J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(5):29-32.
- [9] MILANOVIC J V. Damping of the low-frequency oscillations of the generator;dynamic interactions and the effectiveness of the controllers [J]. IEE Proceedings: Generation,Transmission and Distribution,2002,149(6):753-760.
- [10] PADIYAR K R,VARMA R K. Damping torque analysis of static var system controllers[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1991,6(2):458-465.
- [11] WANG H F,SWIFT F J. Application of the Phillips-Heffron model in the analysis of the damping torque contribution to

power systems by SVC damping control[J]. Electrical Power and Energy System,1996,18(5):307-313.

- [12] KYRIAKIDES E,FARMER R G. Modeling of damping for power system stability analysis[J]. Electric Power Components and Systems,2004,32(8):827-837.
- [13] MARSHALL W K,SMOLINSKI W J. Dynamic stability determination by synchronization and damping torque analysis[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1973,92(4):1239-1246.
- [14] 刘宪林,柳焯,娄和恭. 考虑阻尼绕组作用的单机无穷大系统线性化模型[J]. 中国电机工程学报,2000,20(10):41-45.
- LIU Xian-lin,LIU Zhuo,LOU He-gong. Linearized model of the one-machine infinite-bus system considering the effect of damper windings[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(10):41-45.
- [15] ABU-EL-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.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

刘宪林(1955-),男,河南洛阳人,教授,博士,从事电力系统分析与控制方面的教学和研究工作(E-mail:liuxl@zzu.edu.cn);

柳焯(1929-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,长期从事电力系统分析与控制方面的教学和科研工作;

娄和恭(1936-),男,河南新乡人,教授,长期从事电力系统分析与规划方面的教学和科研工作。

Analysis of synchronous generator electromagnetic torque based on visual linearized model

LIU Xian-lin¹,LIU Zhuo²,LOU He-gong¹

(1. Zhengzhou University,Zhengzhou 450002,China;

2. Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China)

Abstract: In traditional formulas of electromagnetic torque coefficients for the damped synchronous generator,the mutual inductance between d -axis damping winding and excitation winding is neglected and the effect of AVR(Automatic Voltage Regulator) is not considered. To improve the computing accuracy and better understand their effects on unit stability,some formulas of electromagnetic torque coefficients are founded by applying small oscillation method,which is based on the c_1-c_{12} model of single-machine infinite-bus system and considers effects of AVR and mutual inductance. Based on formulas,the electromagnetic torque is divided into inherent part and controlled part according to whether it is related to AVR. Effects of q -axis damping winding, d -axis damping winding and main excitation regulating channels on synchronizing capacity,especially damping capacity,of generator unit,and the mechanism of low-frequency oscillation are analyzed in detail. It is achieved that,AVR always weakens the unit damping; q -axis winding damping is enhanced under AVR while d -axis winding may supply negative damping;the augment of external reactance and active power load reduces the inherent damping;the damping weakened by AVR is related to AVR gain and increases with the inherent damping decreasing. The calculating formula of equivalent damping coefficient of k_1-k_6 model is introduced according to the difference of damping torque coefficients between c_1-c_{12} model and Phillips-Heffron k_1-k_6 model.

Key words: power system; low frequency oscillation; electromagnetic torque; linearized model