

⑫ 74-78

同步电动机运行过程中的励磁控制技术

An Excitative Control in Operating
Process for Synchronous Motor

TM341

黄席樾

Huang Xiyu

邓仁明

Deng Renming

郑文军

Zheng Wenjun

柴毅

Chai Yi

(重庆大学电子信息工程学院, 重庆, 630044, 第一作者 52岁, 男, 教授, 博士)

A **摘要** 对同步电动机励磁强度控制提出了以功率因数调节为主, 辅以功角校正方法的控制策略, 在稳态情况下, 调励磁电流以维持功率因数恒定, 保证电机运行效率; 在动态情况, 一旦稳定性受到威胁, 就根据功角对励磁强度进行校正, 使电机免遭外扰的冲击, 减少失步概率。

关键词 同步电动机; 励磁系统; 计算机控制

中国图书资料分类法分类号 TM921; TP272

ABSTRACT Aimed at the excitative control for synchronous motor, based on main adjust for power factor and aided adjust for power angle, a kind of new control strategy is presented in this paper. In the steady running, the excitation current will be adjusted in keep power factor constant, and in dynamic running, it will be calibrated by means of power angle when the disturbance happened. For specified object, the improved algorithm of artificial intelligence controller is also presented in the paper, the simulation result shows that the control algorithm is satisfactory.

KEYWORDS synchronous motor; excitation system; computer control

0 引 言

励磁控制直接影响同步电动机工作特性的好坏, 由功能特性和“V”形曲线可以看出, 励磁强度的改变与电机运行的功率因数、稳定性密切相关, 励磁调节作用是增加电机的运行稳定度, 提高稳定运行范围; 调节功率因数, 使电机运行于合理工况, 同时向系统输出适度的无功功率, 支持电网电压。但同步电动机是双边励磁系统, 使励磁电流与电机的功角、功率因数等参数的关系具有很强的非线性; 在运行的过程中不断地受到来自电网或负载侧的各种扰动, 故时变性、不确定性都很强。因此需对同步电动机的励磁系统实施良好的控制并非易事, 采取传统的调节规律难以取得好的控制效果。国内基本上都采取开环控制策略, 对电机实施恒定励磁, 即无论电机运行的空载、半载或全载负荷状态, 都给予同样的励磁强度。由电机的“V”形曲线和功角特性可知, 由于受到励磁绕组过热的限制, 轻载时励磁电流不能过大, 故

励磁强度也不会很大;由于恒定励磁电流偏小,当电机受到扰动时,其稳定裕度也较小,容易导致电机的失步事故,不利于电机的安全运行^[14,21];恒定励磁导致电机在轻载时输出无功较多,而负载越重则输出无功越小,甚至运行于 $\cos\varphi=1$ 或偏滞后状态;电机在运行过程中,一般都要带一定负载运行,其功率因素一般不高,影响了同步电动机优良特性的发挥。上述表明,励磁调节一般可选两个目标:以电网方面为主,则要求电机适时的发送适量的无功功率;以电机方面为主,则要求电机具有良好的功率因数,使运行中效率较高,并使电机运行于超前的功率因数,兼顾向电网发送超前无功功率,以利于维持电网电压。笔者针对脉冲性负载,讨论同步电动机运行过程中的励磁控制策略和控制算法问题。

1 控制策略的选择

同步电动机励磁系统存在着较严重的非线性、时变性和不确定性,采用传统的 PID 控制难以取得好的控制效果;自校正、自适应等控制算法虽然在一定程度上能够解决非线性的问题,但它要求的在线辨识控制对象的数学模型算法复杂,运算量大,用于同步电动机励磁实时控制受到限制。此外,基于人工智能的专家控制长于使用逻辑性知识,基于模糊集理论的模糊控制能处理和决策模糊信息,基于人工神经网络(ANN)的神经网络控制更符合人的直觉式思维过程,后者还能实现前者的部分功能,它们都是对人的直觉推理及控制行为进行分析和研究,并将人的控制方法反映于自动控制系统中,使得控制系统具有一定的人的特性,从而能够对那些时变、非线性、不确定的对象实施良好的控制,但这些控制思想至今还处于探索和发展阶段,离工程化实用化还有一段距离。周其鉴先生提出的仿人智能控制是在专家控制基础上发展起来的一种实时控制方法,其在线信息处理能力和决策速度快是其它控制算法难以比拟的,其控制风格与经典及现代控制理论大不相同。其控制算法的基本表达式为:

$$P(t) = \begin{cases} P_0(n-1) + k_p \cdot e(n), e \cdot \dot{e} > 0 & \text{OR } |e| > 0, \dot{e} = 0 & \text{比例模式} \\ P_0(n) + k \cdot k_p \cdot \sum_{i=1}^n e_{i-1} \cdot e \cdot \dot{e} < 0 & \text{OR } e = 0 & \text{保持模式} \end{cases}$$

式中, $P(t)$:控制器的输出; e, \dot{e} :系统误差及其变化率; e_{i-1} :误差的第 i 次极值; $P_0(n)$:控制器输出的第 n 次保持值; k_p :控制器比例增益; k :抑制因子。

上述控制算法的特点是:对象本身结构参数和系统设定值变化或受干扰作用时其过程状态特性均反映在 e 和 \dot{e} 上,易于在线获取;根据 e 和 \dot{e} 反映出来的被调量的现状和变化趋势,采用了多模态控制方法,较易兼顾系统的静态指标和动态指标及控制系统对多种性能指标的要求;实时性强,其算法可以简单地利用产生式规则来描述,易在计算机上实现,它对被控对象模型依赖较少,控制参数可调范围宽,而且对环境干扰和对象参数的变化均不敏感,鲁棒性较强。

鉴于仿人智能控制算法的种种优点,我们在同步电动机励磁调节器设计中就采用了它的基本思想,并在此基础上,根据同步电动机自身的特点对其进行了一些加工,提出了同步电动机励磁自动调节的智能控制策略,调功率因数保证稳定运行效率,辅助调节功角保证动态稳定性。

2 运行过程中的自动励磁调节

分析表明,选取电机的功率因数 $\cos\varphi$ 及功角 δ 作为调节参量是比较合理的,其调节手段是改变励磁电流的大小。在 $\cos\varphi$ 及 δ 两个参量中,又以 $\cos\varphi$ 为主,而 δ 为辅。即在稳态情况下,通过改变励磁电流的大小来维持功率因数 $\cos\varphi$ 恒定于设定值上,以保持电机有较高的运行效率,同时也为电网进行一定的无功补偿;而在动态情况下,一旦电机的稳定性受到威胁就根据功角 δ 对励磁强度进行校正,以增强电机的运行稳定度,抑制励磁调节过猛造成电机振荡,减弱来自电网和负荷的扰动对电机造成的冲击,减少电机的失步概率。

2.1 根据 $\cos\varphi$ 的调节励磁算法

假定电机的设定功率值为 $\cos\varphi_r$,当前测量到的运行功率因数为 $\cos\varphi_x$,作为恒定功率因数控制,其误差为:

$$e = \cos\varphi_r - \cos\varphi_x$$

将其离散化后,用 $e(n)$ 表示 e 的当前值, $e(n-1)$, $e(n-2)$ 表示前一、二个周期 e 值,则误差的变化率分别为:

$$\Delta e(n) = e(n) - e(n-1)$$

$$\Delta e(n-1) = e(n-1) - e(n-2)$$

式中, $\Delta e(n)$:当前误差对时间的差分; $\Delta e(n-1)$:前一周期对时间的差分。

于是根据仿人智能控制算法的基本思想,并针对同步电动机励磁控制的固有特点,总结出按 $\cos\varphi$ 调励磁的控制算法,并以产生式规则描述如下:

- | | |
|---|--------------|
| 1) IF $ e(n) > M$ | |
| THEN $P = P_{\max}$ OR $P = P_{\min}$ | bang-bang 控制 |
| 2) IF $[e(n) \cdot \Delta e(n) > 0$ OR $\Delta e(n) \neq 0]$ AND $ e(n) \geq M_2$ | 比例模式 1 |
| THEN $P = P_0(n-1) + k_1 \cdot e(n)$ | |
| 3) IF $[e(n) \cdot \Delta e(n) < 0$ OR $\Delta e(n) = 0, e(n) \neq 0]$ AND $ e(n) < M_2$ | 比例模式 2 |
| THEN $P = P_0(n-1) + k_2 \cdot e(n)$ | |
| 4) IF $e(n) \cdot \Delta e(n) < 0, \Delta e(n) \cdot \Delta e(n-1) > 0$ OR $e(n) = 0$ | 保持模式 1 |
| THEN $P = P_0(n-1)$ | |
| 5) IF $e(n) \cdot \Delta e(n) < 0, \Delta e(n) \cdot \Delta e(n-1) < 0$ AND $ e(n) \geq M_2$ | 保持模式 2 |
| THEN $P = P_0(n) = P_0(n-1) + k_3 \cdot e_{n-1}$ | |
| 6) IF $e(n) \cdot \Delta e(n) < 0, \Delta e(n) \cdot \Delta e(n-1) < 0$ AND $ e(n) < M_2$ | 保持模式 3 |
| THEN $P = P_0(n) = P_0(n-1) + k_4 \cdot e_{n-1}$ | |

其中 e_{n-1} :误差 e 的第 n 个极值;

k_1, k_2, k_3, k_4 :比例增益;

M_1, M_2 :设定的误差界限, $M_1 > M_2$;

n :自然数;表示控制周期序号;

$P_0(n)$:输出量 P 的第 n 次需要保持的值;

$P_0(n-1)$: n 之前一个周期输出量 P 的保持值。

2.2 δ 角的校正算法

励磁调节的另一个重要作用是保证电机的运行稳定性。来自电网或负荷侧的大扰动、电

机运行工况的跃变、励磁调节幅度过大等都可能威胁电机的稳定, 功角 δ 是同步电动机能否稳定运行的最为直接的参量, 因此根据 δ 角调整励磁能够较好地保证电机运行的稳定性。具体作法如下:

1) 若 δ 较小, 例 $\delta < 40^\circ$ (具体值根据不同的电机而定), 电机有足够的稳定裕量, 故不干预正常的调励。

2) 若 δ 不断增大, 但又不足以使电机失步, 例如 $40^\circ < \delta < 90^\circ$, 则无条件对电机实施额定励磁, 闭锁根据 $\cos\varphi$ 的调整过程。

3) 若 δ 继续增大, 有可能造成电机失步, 例如 $\delta > 90^\circ$, 则立即对电机实施强励磁处理, 使电机有足够的动态稳定能力。

通过上述处理, 较好地保证了电机稳定运行时的工作性能, 同时也增强了电机的稳定能力, 使电机的运行更为可靠而合理。上述算法利用 8098 单片机反应速度快、功能强的特性是不难实现的, 并能保证控制的实时性。

2.3 励磁自动调节程序框图

在励磁自动调节程序中, 用到以下两个重要参量:

- 1) 在 8098 高速输入口 HS_{1,0} 的中断服务程序中求出的 δ 角
- 2) 在 8098 高速输入口 HS_{1,2} 的中断服务中求出的功率因数角 φ

在求出以上参数后, 如没有失步闭锁励磁信号, 则可进入调励程序, 程序框图见文献 [3], 这里从略。

3 仿真及结果分析

由于同步电动机是一个极为复杂的非线性对象, 本文采用简化数学模型^[4], 画出同步电动机动态运行等效模型的励磁控制仿真结构框图如图 1 所示。为了便于说明问题, 粗略地将同步电动机的励磁回路与定子回路分别视为一阶惯性环节 (环节 I 和环节 II); 另外, 考虑到同步电动机自身的复杂性, 在模型中还引入了纯滞后环节 (环节 IV) 和一个非线性环节 (环节 V)。

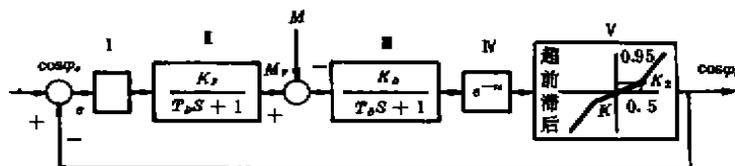


图 1 励磁控制仿真结构框图

图中 $\cos\varphi^*$: 功率因数的设定值; e : 功率因数的误差, $e = \cos\varphi^* - \cos\varphi$; M_f : 励磁控制系统的输出, 用以消除 M 引起的误差; M : 来自负载或电网的等效控制量; $\cos\varphi$: 电动机当前的功率因数; 环节 I: IC 励磁调节器; 环节 II: 励磁回路等效环节; 环节 III: 定子回路等效环节; 环节 IV: 控制系统中的等效纯延迟; 环节 V: 控制系统中的等效非线性环节, 非线性参数可由实验数据拟合求出。

在实际中由于运行状态发生变化, 例如电机由空载到半载, 半载到满载运行时, 上述各环节的参数均会相应地发生变化。下面即对 ① 电机由空载进入半载运行, 引起输入 M 发生跃变; ② 电机由空载直接进入满载运行, 引起输入 M 发生更大的跃变, 这两个过程进行仿

真,并取半载时 $T_r = 0.2, k_r = 1; T_D = 2, k_D = 3$;满载时 $T_r = 1, k_r = 1; T_D = 5, k_D = 3$ 。另外,设纯滞后环节中, $\tau = 0.2$;环节V中, $k_1 = 0.5, k_2 = 1$ 。电机运行状态发生改变时,非线性环节的参数不变。据此,作出的仿真结果如图2所示。为了便于比较,同时给出了采用IC作为励磁调节器(图中曲线1)和采用PID作为励磁调节器(图中曲线2)的仿真结果。

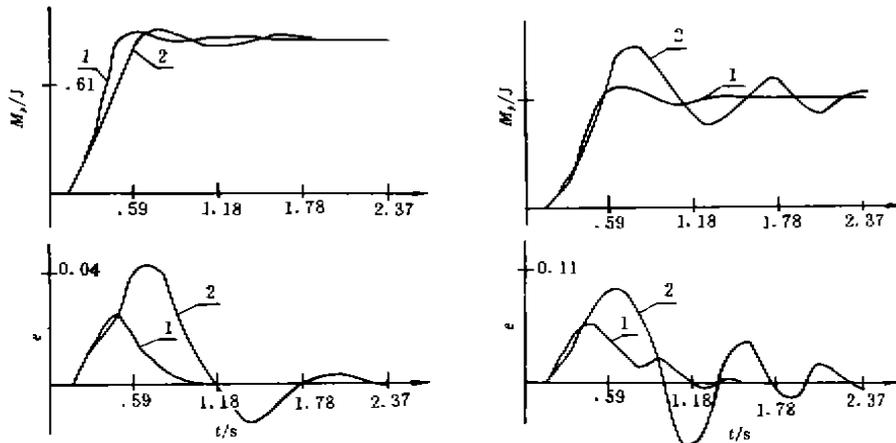


图2 电机负载状态发生变化到 M 跃变时, M_f 及 u 的响应曲线

由仿真曲线可以看出IC控制效果要比PID好得多,特别是在适应电机状态发生大的改变方面,IC控制器表现的更为优秀,可以明显看出,IC控制器的鲁棒性、控制精度、响应速度都比PID控制器好得多,和预期的结果是一样的,所以选用IC作为励磁控制器是恰当的。

图中,曲线1表示以IC作励磁控制器的响应过程;曲线2表示以PID作励磁控制器的响应过程;图2(a)为电机由空载跃变到半载时 M_f 的响应曲线;图2(b)为电机由空载跃变到满载时 M_f 的响应曲线;图2(c)为电机由空载跃变到满载时 u 的响应曲线;图2(d)为电机由空载跃变到满载时的响应曲线。

4 结束语

由于同步电动机强非线性、时变性、不确定性等特点,其励磁强度的自动调节一直是同步电动机运行控制中的难点,现有的励磁控制装置中基本上都实行恒定励磁控制,这在很大程度上限制了同步电动机优良性能的发挥。基于仿人智能控制算法并使之更能适应同步电动机自身的特点,以恒定电动机的功率因数并增强电动机的运行稳定性为控制目标,改善了电动机运行效率,并对电网进行一定的无功补偿,使同步电动机的优良性能得到较好的发挥。仿真结果表明,系统设计合理,控制品质好,新的尝试是成功的。

参 考 文 献

- 1 黄席樾,邓仁明,郑文军. 同步电动机失步保持与重整步技术. 重庆大学学报,1995,18(1):61~65
- 2 黄席樾,邓仁明,郑文军. 同步电动机启动过程计算机控制技术. 重庆大学学报,1994,17(6):94~97
- 3 郑文军. 同步电动机智能励磁控制系统. 重庆大学硕士论文,1994.45~52
- 4 戴克健. 同步电机励磁及其控制. 北京:水利电力出版社,1988.42~55