

大型发电机自并励励磁系统 多功率柜自动均流控制

杜乐丁,黎 雄,孙元章

(清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084)

摘要: 开关电源并联系统常用的自动均流控制方法在自动电压调节器 AVR(Automatic Voltage Regulator)开环模式下会大幅改变励磁电流静态值,故只能安全用于 AVR 闭环模式下。提出一种可在 AVR 开环模式下使用的均流控制器,通过重新选择平均电流法均流控制系统状态方程的输出向量,提高了平均电流法的稳定性。通过仿真实验和其他均流控制进行对比,结果表明:该控制器能降低对机端电压的静态和动态影响,并提高多功率柜励磁系统稳定性。

关键词: 均流; 平均; 并联; 励磁; 功率柜

中图分类号: TM 761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)03-0005-04

随着电源系统向分布式方向发展^[1-3],基于数字控制技术的分布式智能功率柜将应用到大型发电机自并励励磁系统中,有必要研究出一种更好的均流控制方法。大型发电机励磁系统多功率柜均流控制与一般开关电源并联系统均流控制的一个不同之处,就是各并联支路电流既要为均流而改变也要为励磁系统动态调整的励磁电流而改变。目前,以平均电流法、主从电流法和最大电流法^[1,2,4,5]为代表的几种常用开关电源并联系统的均流方法并不适用于励磁系统的自动电压调节器 AVR(Automatic Voltage Regulator)开环工作模式,因为此时它们会在静态上较大幅度地改变励磁电流,并对 AVR 闭环工作时的 AVR 控制输出量产生一定影响。本文以采用多个三相全控桥式整流功率柜的励磁系统为模型,针对常用均流控制方法直接应用在发电机励磁系统多功率柜均流控制时的不足,通过控制理论分析与工程易实现性相结合,改进了平均电流法均流控制器,并

给出与其他均流方法相比较的仿真结果。

1 系统模型

本文采用的励磁控制系统如图 1 所示。

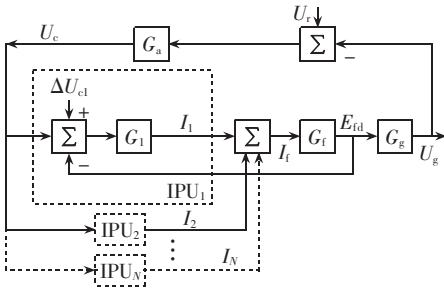


图 1 简化 AVR 闭环控制的励磁系统框图
Fig.1 The block diagram of excitation system with simplified AVR in close-loop mode

图中, N 为并联智能功率柜个数; $IPU_k(k=1,2,\dots,N)$ 代表第 k 个智能功率柜,其晶闸管电路采用三相全控整流桥结构;假设各功率柜的传递函数 $G_k=$

收稿日期:2004-05-25;修回日期:2004-11-22

$K_k/(1+\tau_k s)$; G_f 为励磁绕组的传递函数, 发电机空载时取为 $G_f=K_f+\tau_f s$, K_f 和 τ_f 分别对应励磁绕组的电阻和电感; G_g 为发电机的传递函数, 发电机空载时取为 $G_g=K_g/(1+\tau_g s)$ [6]; $G_a=K_p+K_i/s$ 为 AVR 的比例积分控制器的传递函数; I_k 为各功率柜的电流; I_f 为励磁电流; E_{fd} 为励磁电压; U_g 为机端电压; K_k , τ_k , K_f , K_g , τ_g , K_p , K_i 的值均大于零。

2 均流控制目标

均流控制就是使各支路电流最终相等, 也就是使均流系数 $\eta = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k / \max_{k=1}^N (I_k)$ 趋近 100%。但在多功率柜励磁系统中, 最好的均流控制器不仅要平均各功率柜的电流, 还应使均流控制对整个励磁控制系统的影响最小, 并且在某个功率柜加入或退出工作时, 均流控制仍能正常进行。要成为 AVR 控制环中的一个安全可靠、可平稳切入/切出的子模块, 均流控制器应几乎不影响在 AVR 开环 (U_c 取为固定值) 时励磁系统的正常工作, 其控制指标有 2 点。

a. 稳态时, 无论给定值 U_c 和各功率柜的参数为何值, 各功率柜的电流都趋向不均流时应有的平均值, 而不仅仅是各功率柜在均流过程中当前的平均值, 即

$$I_1(\infty) = I_2(\infty) = \dots = I_N(\infty) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k(\infty) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k(0) \quad (1)$$

设 $\bar{I}_{0k}$ 为无均流控制时各功率柜的电流稳态值, $\bar{I}_k$ 为均流控制后各功率柜的电流稳态值, 得:

$$\sum_{k=1}^N \bar{I}_k - \sum_{k=1}^N \bar{I}_{0k} = \sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck} / (1 + K_f \sum_{k=1}^N K_k) \quad (2)$$

由 $\sum_{k=1}^N \bar{I}_k - \sum_{k=1}^N \bar{I}_{0k} = 0$, 可得:

$$\sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck} = 0 \quad (3)$$

即励磁系统的均流控制器不仅要实现均流, 还应将 $\sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck}$ 控制到 0。

b. 动态时, 均流控制对励磁电压 E_{fd} 的影响要尽可能小, 从而保证对机端电压 U_g 的影响尽可能小。

3 均流控制器的改进

平均电流法是指每个功率柜均以当前各功率柜电流平均值作为基准调整本柜电流大小的方法。最大电流法和主从电流法则分别是以各功率柜电流最大值和某个功率柜电流值作为基准。这些方法均不能保证式 (3) 成立。此外, 通过对状态方程的分析还可发现, 基于平均电流法的均流控制在理论上不是渐近稳定的, 需要加以改进。

基于如下假设: 忽略可测量的采样、滤波的延迟和误差对计算的影响; 系统各单元的输入/输出均未达到饱和; 各功率柜增益 K_k 和时间常数 τ_k 为时不变量。根据功率柜的传递函数为

$$\frac{I_k(s)}{U_c(s) + \Delta U_{ck}(s) - E_{fd}(s)} = G_k(s) = \frac{K_k}{1 + \tau_k s} \quad (4)$$

得:

$$(U_c + \Delta U_{ck} - E_{fd}) K_k = I_k + \tau_k \dot{I}_k \quad (5)$$

发电机空载时励磁绕组电压和电流的关系为

$$E_{fd} = K_f I_f + \tau_f \dot{I}_f \quad (6)$$

各功率柜电流之和等于励磁电流, 即

$$I_f = \sum_{k=1}^N I_k \quad (7)$$

$$\text{取状态向量 } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix}, \text{ 输入向量 } \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta U_{c1} \\ \Delta U_{c2} \\ \vdots \\ \Delta U_{cN} \end{bmatrix}, \text{ 外}$$

部扰动向量 $\mathbf{w} = U_c$, 则在常值扰动下的 AVR 开环系统平均电流法均流控制状态方程可表示为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \mathbf{u} + \mathbf{D} \mathbf{w}, \quad \dot{\mathbf{w}} = 0, \quad \mathbf{y}_1 = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}_1$ 和 $\mathbf{D}$ 分别为和 τ_f , K_f , $\tau_1, \dots, \tau_N$, $K_1, \dots, K_N$ 相关的 $N \times N$, $N \times N$ 和 $N \times 1$ 维矩阵; $\mathbf{y}_1$ 为输出向量, 表示各功率柜电流与平均电流值之差; $\mathbf{C}$ 表达式为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1-1/N & -1/N & \dots & -1/N \\ -1/N & 1-1/N & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & -1/N \\ -1/N & \dots & -1/N & 1-1/N \end{bmatrix}$$

其比例积分 (PI) 反馈控制规律为

$$\dot{\mathbf{q}}_1 = \mathbf{y}_1 = \mathbf{C} \mathbf{x}, \quad \mathbf{u} = -\mathbf{F}_y \mathbf{y}_1 - \mathbf{F}_q \mathbf{q}_1 \quad (9)$$

式中 $\mathbf{F}_y$ 和 $\mathbf{F}_q$ 均为对角阵。

由式 (8) 和 (9), 平均电流法均流控制闭环增广状态方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{q}}_1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{L1} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{q}_1 \end{bmatrix} + \mathbf{D}_L \mathbf{w}, \quad \dot{\mathbf{w}} = 0, \quad \mathbf{y}_1 = \mathbf{C}_{L1} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{q}_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_{L1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{B}_1 \mathbf{F}_y \mathbf{C} & -\mathbf{B}_1 \mathbf{F}_q \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{L1} = [\mathbf{C} \quad 0]$$

可见, 只要系统 ($\mathbf{A}_{L1}, \mathbf{D}_L$) 渐近稳定, 由式 (10) 第一个方程的第二行就可以看出输出向量 $\mathbf{y}_1$ 将渐近稳定到零, 即完成均流。但通过对 $\mathbf{A}_{L1}$ 分析发现:

$$\det(\mathbf{C}) = 0, \quad \det(\mathbf{A}_{L1}) = \det(\mathbf{C}) \det(\mathbf{B}_1 \mathbf{F}_q) = 0$$

即无论反馈控制器的参数 $\mathbf{F}_y$ 和 $\mathbf{F}_q$ 取为何值, 闭环系统都有一个极点处在原点, 系统将处于临界稳定甚至不稳定的状态, 不满足工程要求。对 $\mathbf{A}_{L1}$ 的改进方法有 2 种: 一种是改变 $\mathbf{C}$, 另一种是将右下块的 0 变为非 0, 通过选取合适的控制器参数, 使 $\mathbf{A}_{L1}$ 的所有特征根均在左半复平面, 从而使系统渐近稳定。 $\mathbf{C}$ 是平均电流法的固有系数, 可以通过关闭其中一个功率柜的均流控制改变, 依靠其他功率柜均流时对励磁电压 E_{fd} 的影响改变此功率柜的电流, 即降维的平均电流法, 不过一旦不均流的功率柜退出工作, 系统就会再次进入非稳定状态。

本文采用后一种方法, 结合 $\sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck} = 0$ 的控

制目标,将输出向量改为

$$y = Cx + B_2 u, \quad B_2 = f_2 \begin{bmatrix} K_1 & \cdots & K_N \\ K_1 & \cdots & K_N \\ \vdots & & \vdots \\ K_1 & \cdots & K_N \end{bmatrix}_{N \times N}, \quad f_2 \neq 0$$

即将 $\sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck}$ 与电流差一起作为 PI 控制器的输入。此改进之处同样适用于其他均流方法。

通过仿真发现取 $F_y = 0$ 在动态上对 E_{fd} 的影响最小。本着参数配置尽量简单的原则,将各功率柜的积分器因子 F_q 取同一值进行整定。平均电流法均流控制规律改进为

$$u_1 = \begin{bmatrix} \Delta U_{c1} \\ \Delta U_{c2} \\ \vdots \\ \Delta U_{cN} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_1 & & & \\ & f_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & f_1 \end{bmatrix} F_1$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} \int (I_1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k + f_2 \sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck}) dt \\ \int (I_2 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k + f_2 \sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck}) dt \\ \vdots \\ \int (I_N - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k + f_2 \sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck}) dt \end{bmatrix} \quad (11)$$

当 $f_2 = 0$ 时,即为常规的平均电流法。

4 仿真实验结果

对比以下均流控制对 3 个功率柜均流的效果:

- a. 改进的平均电流法;
- b. 平均电流法 ($u_2 = u_1|_{f_2=0}$);
- c. 降维的平均电流法;

$$u_3 = \begin{bmatrix} \Delta U_{c1} \\ \Delta U_{c2} \\ \vdots \\ \Delta U_{cN} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & f_1 & \\ & & & 0 \end{bmatrix} F_2$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} \int (I_1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k) dt \\ \vdots \\ \int (I_{N-1} - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k) dt \\ 0 \end{bmatrix}$$

d. 将改进的平均电流法的控制器结构应用在最大电流值法上;

$$u_4 = \begin{bmatrix} \Delta U_{c1} \\ \Delta U_{c2} \\ \vdots \\ \Delta U_{cN} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_1 & & & \\ & f_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & f_1 \end{bmatrix} F_3$$

$$F_3 = \begin{bmatrix} \int (I_1 - \max_{1 \leq k \leq N} (I_k) + f_2 \sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck}) dt \\ \int (I_2 - \max_{1 \leq k \leq N} (I_k) + f_2 \sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck}) dt \\ \vdots \\ \int (I_N - \max_{1 \leq k \leq N} (I_k) + f_2 \sum_{k=1}^N K_k \Delta U_{ck}) dt \end{bmatrix}$$

e. 最大电流值法 ($u_5 = u_4|_{f_2=0}$);

f. 不均流 ($u_6 = 0$).

得到以下结果。

a. AVR 开环; $t=100$ s, $t=115$ s 和 $t=130$ s 时依次开启 3 个功率柜的均流控制; $t=150$ s 时同时关闭所有功率柜的均流控制。得到的变化规律如图 2, 3 所示(图中 1~6 分别对应 $u_1 \sim u_6$ 控制)。由图可见, 只有改进的平均电流法和改进的最大电流值法均流控制才可以在几乎不影响机端电压的前提下随意开关均流, 均流速度与其他方法差别很小。

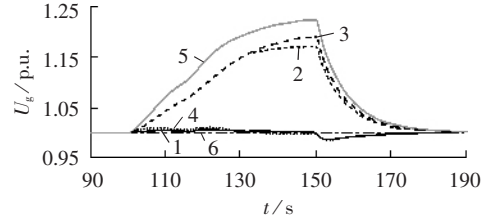


图2 机端电压 U_g 变化规律

Fig.2 Variation of port voltage U_g

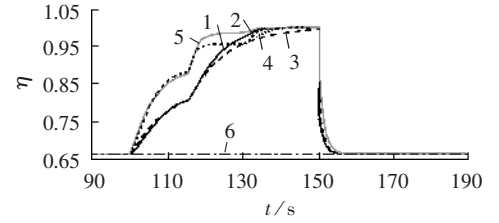
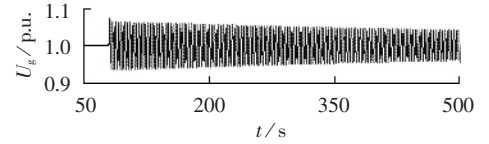


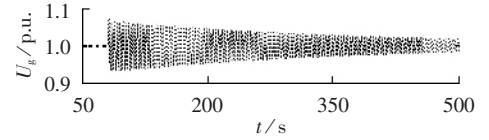
图3 均流系数 η 变化规律

Fig.3 Variation of average current coefficient η

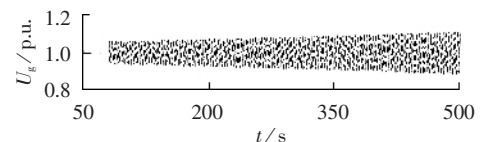
b. AVR 闭环; $t=80$ s 时, 调节 AVR 参数使机端电压 U_g 发生等幅振荡; $t=90$ s 时, 机端电压设定值 U_r 发生 +1 % 阶跃扰动; $t=100$ s 时, 开启均流控制; $t=150$ s 时, U_r 发生 -1 % 阶跃扰动。得到的变化规律如图 4 所示。



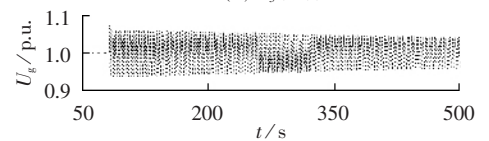
(a) u_1 控制



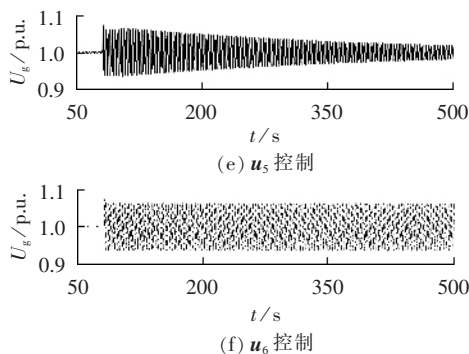
(b) u_2 控制



(c) u_3 控制



(d) u_4 控制

图4 机端电压 U_g 变化规律Fig.4 Variation of port voltage U_g

由图4可见,与不均流的情况相比,在AVR闭环情况下,除降维的平均电流法以外的各均流方法都可以加强系统的稳定性。改进的均流控制是以牺牲常规均流控制下的AVR参数的稳定域为代价的,但它仍然可以比不均流的情况更稳定。

5 结语

在本文的励磁系统模型下,大型发电机自并励励磁系统多功率柜均流控制采用如式(11)所示的基于改进的平均电流法的反馈控制器具有如下特性:

- 平均各功率柜的电流,具有鲁棒性,静态无差;
- AVR开环情况下,均流后励磁电压的静态值与不均流时相同,使得在AVR开环情况下进行安全的自动均流成为可能;
- AVR闭环情况下,机端电压控制的稳定性得到了提高;
- 可以调节控制器参数 f_1 和 f_2 使均流控制对机端电压的动态影响足够小。

与本文所列举的其他均流控制方法相比,改进的平均电流法在总体效果上优于其他方法,缺点是要测得各功率柜的增益 K_k ,但随着单片机和DSP等微处理器性能的提高,对此参数的辨识将不再困难。

参考文献:

- [1] 谢勤岚,陈红,陶秋生. 开关电源并联系统的均流技术

[J]. 舰船电子工程,2003,(4):75-78.

XIE Qin-lan, CHEN Hong, TAO Qiu-sheng. Average current technology in paralleled switch power supply system [J]. *Ship Electronics Engineering*, 2003, (4): 75-78.

- [2] 刘岩,常洁,卢宁芳. 自动均流原理在集散控制的电源系统中的应用[J]. 现代电子技术,2001,(9):40-41,51.

LIU Yan, CHANG Jie, LU Ning-fang. Principle of automatic load current sharing and its application to power supply in distributed control system [J]. *Modern Electronics Technology*, 2001, (9): 40-41, 51.

- [3] MCAVOY T, JAMSA-JOUNELA S L, PATTON R, et al. Milestone report for area 7 industrial applications [J]. *Control Engineering Practice*, 2004, (12): 113-119.

- [4] 程荣仓,刘正之,詹晓东,等. 基于自主均流法模块并联的小信号分析[J]. 电力电子技术,2001,(2):36-38.

CHENG Rong-cang, LIU Zheng-zhi, ZHAN Xiao-dong, et al. Small signal analysis of module parallel on basis of automatic current sharing [J]. *Power Electronics Technology*, 2001, (2): 36-38.

- [5] 邢妍,严仰光. 一种实现瞬时均流的UPS冗余并联新方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2003,43(3):333-336.

XING Yan, YAN Yang-guang. Control scheme for redundant parallel UPS with instantaneous current sharing [J]. *Journal of Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2003, 43(3): 333-336.

- [6] 戴克键. 同步电机励磁及其控制[M]. 北京:水利电力出版社,1988.

- [7] 吴麒,慕春棣. 自动控制原理[M]. 北京:清华大学出版社,1990.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

杜乐丁(1979-),男,上海人,硕士研究生,研究方向为励磁系统控制(E-mail: duleiding@ust.hk);

黎雄(1970-),男,广西梧州人,讲师,博士,研究方向为电力系统分析、非线性控制、鲁棒控制及FACTS应用;

孙元章(1954-),男,湖南华容人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析、非线性控制、鲁棒控制、智能控制及FACTS应用。

Automatic current sharing control for multi power units of self-shunting excitation system for large generators

DU Le-ding, LI Xiong, SUN Yuan-zhang
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In AVR (Automatic Voltage Regulator) open-loop mode, the common automatic current sharing control of parallel switching power supply system may change the static excitation current greatly. It can only be used safely in AVR close-loop mode. An automatic current sharing controller is provided, which can be used in AVR open-loop mode. A new set of output vectors is selected in the state equations of current sharing control system to improve the stability of average current value method. Compared with some other current sharing controllers, the simulative results indicate that the proposed controller decreases the static and dynamic influence on generator voltage and increases the stability of multi-power-unit excitation system.

Key words: current sharing; average; parallel; excitation; power unit