

计及变频器频率及电压调节暂态过程的 异步化同步发电机变结构励磁控制

宋军英¹, 李汉成², 刘涤尘³, 陈允平³

(1. 湖南电力调度通信中心, 湖南 长沙 410007; 2. 北京电力公司, 北京 100020;
3. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在考虑变频器的频率和电压调节暂态过程的情况下建立了异步化同步发电机 ASG (Asynchronous Synchronous Generator) 的暂态数学模型, 采用改进的变结构控制方法, 设计了 ASG 的变结构励磁控制系统。在 ASG 单机对无穷大系统上进行计算机仿真, 并与常规的变结构励磁控制比较, 结果表明, 改进的变结构励磁控制系统不但能迅速减小各变量的变化值, 改善系统的动态特性, 使系统达到新的稳定状态, 同时能有效地消除控制过程中产生的抖振现象, 具有一定的优越性。

关键词: 异步化同步发电机; 改进的变结构控制; 暂态稳定

中图分类号: TM 31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)04-0015-05

0 引言

异步化同步发电机 ASG (Asynchronous Synchronous Generator) 中的变频器既能调节励磁电压的频率又能调节励磁电压的幅值, 从而使其不仅可以吸收系统的过剩无功, 改善电网的电压质量, 而且可以提高远距离输电系统的稳定性, 是一种发电型的 FACTS 控制器^[1,2]。长期以来一直被国内外学者所关注。

目前, 有关 ASG 的研究主要集中在 ASG 系统的稳态分析, 例如, 研究 ASG 的等值电路、功率方程等^[3,4]。文献[5]使用线性最优励磁控制的方法设计了 ASG 计及变频器频率调节暂态方程的励磁控制系统,

但其中使用的模型没有考虑变频器调压暂态过程。然而变频器作为 ASG 的励磁机电源, 当外界发生扰动时, 其内部将发生一系列的暂态变化, 其中既包括频率变化也包括电压变化, 因此有必要进一步在状态方程中考虑变频器的电压调节暂态过程。

本文首先建立了包含变频器频率及电压调节暂态过程的 ASG 暂态数学模型, 然后使用改进的变结构控制方法, 设计了 ASG 的变结构励磁控制系统, 并与常规变结构控制方法进行比较, 仿真结果验证了该方法的有效性及其优越性。

1 异步化同步发电机的状态方程

1.1 坐标轴系的规定

在 ASG 正常运行中, 由于变频器的频率调节作

收稿日期: 2004-12-28; 修回日期: 2005-01-21

用,在保证输出电流的频率维持为同步频率时,转子的位置有可能发生变化,即该坐标轴与转子轴线将不重合,因此,在 ASG 的基本方程中,电机的参数将不为常数,这就使所建立的状态方程更加复杂。若选择同步坐标 d, q 轴系为参考轴系,其旋转速度与转子的转速无关,始终以同步速度在空间旋转,以保证整个系统有一个恒定转速的参考轴。因此,同步发电机与 ASG 并联运行时,需要将其状态方程建立在同一个同步坐标 d, q 轴下。

在本文下标中的 1 表示定子分量,下标中的 2 表示转子分量。

1.2 异步化同步发电机的基本方程

由文献[3, 5]可知,在不考虑变频器电压调节暂态过程而只考虑其频率调节暂态方程时,ASG 的状态方程可写成式(1)的形式。

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_a}{dt} &= \omega_2 + \omega_f - \omega_1 \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{\omega_1}{\tau_j} \left\{ P_m - D(\omega_2 - \omega_1) - \frac{\sqrt{3} U_s E'_1}{x'_{ld\Sigma}} \sin \delta_a \right\} \\ \frac{dE'_{ld}}{dt} &= \frac{1}{\tau_{q0}} \left[-\frac{x_{lq\Sigma}}{x'_{lq\Sigma}} E'_{ld} - \frac{\sqrt{3} (x_{lq} - x'_{lq})}{x'_{lq\Sigma}} U_s - \right. \\ &\quad \left. \omega_f \tau_{d0} E'_{lq} + E_{2q} \right] \\ \frac{dE'_{lq}}{dt} &= \frac{1}{\tau_{d0}} \left(-\frac{x_{ld\Sigma}}{x'_{ld\Sigma}} E'_{lq} + \omega_f \tau_{q0} E'_{ld} + E_{2d} \right) \\ \frac{d\omega_f}{dt} \tau_s + \omega_f &= k_s (\omega_1 - \omega_2 - \omega_f) \\ E'_1 &= \sqrt{E'^2_{ld} + E'^2_{lq}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 δ_a 为 ASG 与无穷大母线之间的夹角,即功角; ω_2 为 ASG 的转子转速; ω_f 为 ASG 转子励磁电流的频率; ω_1 为同步旋转频率; τ_j 为 ASG 的惯性时间常数; E_{2d}, E_{2q} 分别为 ASG 励磁绕组电势的 d, q 轴分量; E'_{ld}, E'_{lq} 分别为 ASG 等值暂态电势的 d, q 轴分量; E'_1 为 ASG 等值暂态电势; τ_{d0}, τ_{q0} 分别为 ASG 直轴和交轴励磁绕组时间常数; P_m 为 ASG 原动机功率; U_s 为无穷大母线的电压; $x_{ld\Sigma}, x'_{ld\Sigma}$ 分别为 ASG 等值直轴电抗及直轴暂态电抗; $x_{lq\Sigma}, x'_{lq\Sigma}$ 分别为 ASG 等值交轴电抗及交轴暂态电抗; k_s 为逆变器的放大系数; τ_s 为逆变器的惯性时间常数; D 为 ASG 阻尼系数。

变频器作为 ASG 的励磁机电源,当外界发生扰动的情况下,其内部将发生暂态变化,其中既包括频率变化也包括电压变化,因此不仅需要考虑其频率调节暂态过程(式(1)中的第 5 个方程),同时还有必要进一步考虑其电压调节暂态过程。

变频器和 ASG 构成的系统是一个强耦合的非线性系统,要精确地描述变频器的数学模型非常复杂。因此,在列写变频器的数学模型时需作一些简化。这里假设与 ASG 转子相连的变频器采用的是电压型 SPWM 变频器。该变频器主要由不可控整流器、可

控逆变器、滤波电容器所组成,其原理图见图 1。

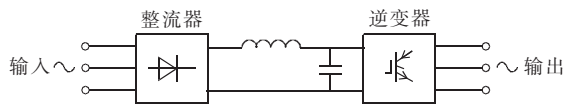


图 1 电压型 SPWM 交-直-交变频电路构成图

Fig.1 Structure of voltage-type AC-DC-AC SPWM converter

SPWM 逆变器可以通过改变脉冲的宽度和占空比控制逆变器输出交流基波电压的幅值和频率,从而实现变压和变频。IGBT 逆变器的输出交流电压 U_2 与控制脉冲电压 u_c 之间的关系可看成是一个一阶惯性环节,其状态方程为

$$\frac{dU_2}{dt} = \frac{1}{\tau_c} (-U_2 + k_c u_c) \quad (2)$$

式中 U_2 为逆变器输出电压的有效值; u_c 为逆变器的控制电压; k_c 为逆变器的放大系数; τ_c 为逆变器的惯性时间常数。

在式(1)中, E_{2d}, E_{2q} 分别为转子励磁电势在同步坐标轴中的 d, q 分量,它们不是状态变量,因此需要将它们消去,即转换与控制变量或状态变量的关系。

若不计变频器输出电压中谐波的影响,则其输出电压 u_{ba}, u_{bb}, u_{bc} 的基波分量为正弦函数,可表示为

$$\begin{bmatrix} u_{ba} \\ u_{bb} \\ u_{bc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} U_2 \begin{bmatrix} \sin(\omega_f t + \varphi) \\ \sin(\omega_f t - 120^\circ + \varphi) \\ \sin(\omega_f t + 120^\circ + \varphi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)是转子基波电压 U_2 在转子三相轴系中列写出来的,而 E_{2d}, E_{2q} 是在同步坐标轴 d, q 下的分量,要表示出 E_{2d}, E_{2q} 与转子基波电压 U_2 的关系,需要进行坐标变换:首先,将三相转子坐标轴系中表示的转子基波电压 U_2 变换到转子 d, q 轴系,再由转子 d, q 轴系变换到同步轴系。若选择 $t=0$ 时,同步轴系与转子旋转静止轴系重合,可得转子基波电压在同步坐标轴系下的分量为

$$\begin{bmatrix} u_{2d} \\ u_{2q} \end{bmatrix} = \sqrt{3} U_2 \begin{bmatrix} \cos[(\omega_f + \omega_2 - \omega_1)t + \varphi] \\ \cos[(\omega_f + \omega_2 - \omega_1)t + \varphi] \end{bmatrix} \quad (4)$$

在式(4)中, φ 为转子基波电压超前于定子电流的初相角,正是转子电压与定子电流有不同的时间相序,定子绕组的输出端才会产生稳定的转矩。对于稳态运行时,初相角 φ 及变频器输出交流基波电压 U_2 的大小,可通过 ASG 避免合闸冲击电流的条件来选择。

假设 ASG 稳态运行时,忽略定、转子绕组电阻,将磁链方程代入电压方程,则 ASG 的定、转子电压与定、转子电流之间的关系可写成式(5)的形式。

$$\begin{bmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \\ u_{2d} \\ u_{2q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_1 x_{ld} & 0 & -\omega_1 x_{ad} \\ -\omega_1 x_{ld} & 0 & \omega_1 x_{ad} & 0 \\ 0 & \omega_f x_{ad} & 0 & -\omega_f x_{2d} \\ -\omega_f x_{ad} & 0 & \omega_f x_{2d} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

若将定子开路,则定子电流为零。并在 ASG 的转子绕组侧通入式(4)所表示的电压,调节逆变器输出频率,使 $\omega_f = \omega_1 - \omega_2$ (这时转子绕组静止,即 $\omega_2 = 0$)。

将以上假设各量代入式(5)中,并将 $u_{1d}, u_{1q}, i_{2d}, i_{2q}$ 看成未知变量,求解式(5),可得:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \frac{\sqrt{3} \omega_1 x_{ad}}{\omega_1 x_{2d}} U_2 \cos \varphi \\ u_{1q} &= \frac{\sqrt{3} \omega_1 x_{ad}}{\omega_1 x_{2d}} U_2 \sin \varphi \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)即为 d, q 坐标轴中转子磁场在定子绕组中感应出的空载电势分量。

在 ASG 与无穷大母线合闸瞬间,其转子磁场在定子中的感应电势应等于无穷大母线电压 U_s (若忽略电压降落),即式(6)应等于无穷大母线电压 U_s 在同步坐标轴系中的分量 $\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} U_s \\ 0 \end{bmatrix}$ 。由此关系可解得 ASG 在稳态运行时,初相角 φ 及变频器输出交流基波电压 U_2 为: $\varphi=0, U_2=(\omega_1 x_{2d}/\omega_1 x_{ad})U_s$ 。将 $\varphi=0$ 代入式(4)中,则该式可变成下列形式:

$$\begin{bmatrix} u_{2d} \\ u_{2q} \end{bmatrix} = \sqrt{3} U_2 \begin{bmatrix} \cos \delta_a \\ \sin \delta_a \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)即建立了 ASG 在三相轴系下的转子电压 U_2 与同步坐标轴下转子电势在 d, q 轴中的分量关系。

假设 $u_{2d} \approx E_{2d}, u_{2q} \approx E_{2q}$, 且将式(7)代入式(1)中,则得到计及变频器频率及电压调节暂态过程的 ASG 状态方程。该状态方程中,状态变量为 $\delta_a, \omega_f, \omega_2, E'_{1d}, E'_{1q}, U_2$; 控制变量只有一个,即 u_c 。

2 改进的变结构控制在 ASG 单机对无穷大系统中应用

变结构控制过程中的抖振现象是一个阻碍其发展的问題。本节将使用改进的变结构控制方法,对所建立的 ASG 进行励磁控制设计,并在单机对无穷大系统上进行数字仿真。

2.1 改进的变结构控制方法

变结构控制规律在切换面上不断地切换,不可避免地将引起系统的抖振,系统的动态响应曲线很难保证在切换面处平滑。为了克服系统采用传统变结构控制策略对励磁控制造成的影响,对系统变结构控制进行改进。包含变频器调频及调压过程的 ASG 状态方程,其只有一个控制变量,是一个单输入的变结构控制系统。

设某一理想的变结构控制规律为

$$u_i = \begin{cases} u_i^+(x) & s_i(x) > 0 \\ u_i^-(x) & s_i(x) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

为消除系统中的抖振现象,对上述切换函数引入线性段,使之具有饱和型函数 $\text{sat}(s_i)$ 的特性。 $\text{sat}(s_i)$ 为饱和函数,其表达式为

$$\text{sat}(s_i) = \begin{cases} +1 & s_i(x) > H \\ 1/H & |s_i(x)| \leq H \\ -1 & s_i(x) < -H \end{cases}$$

式中 H 为一常数。

连续化后变结构控制规律为一典型非线性饱和型控制函数,其控制函数为

$$\begin{aligned} u_i &= u_i'(x) + u_i''(x) \text{sat}(s_i) \\ u_i' &= [u_i^+(x) + u_i^-(x)]/2 \\ u_i'' &= [u_i^+(x) - u_i^-(x)]/2 \end{aligned} \quad (9)$$

改进的变结构控制

器工作原理如图 2

所示。对于单输入的控制系统,饱和型控制器虽然有两个切换面,即 $s(x)=H$ 和 $s(x)=-H$,但由此控制函数得到的系统状态方程却是一个右端连续的函数,因此可以保证该系统的解存在且唯一,而且在切换面上不存在止点,从而有效地抑制系统的抖振现象,保证系统动态响应曲线的平滑。

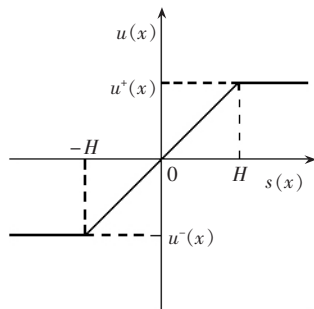


图 2 改进的变结构控制器原理

Fig.2 Improved variable structure control diagram

2.2 仿真结果及分析

为了验证方法的有效性,下面对图 3 所示的单机对无穷大系统分别使用常规变结构控制及改进变结构控制方法进行数字仿真。

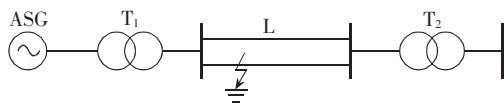


图 3 ASG 单机对无穷大系统接线示意图

Fig.3 The wiring diagram of a single ASG infinite-bus system

2.2.1 系统数学模型

图 3 所示系统的参数如下: $x_d=1.7, x'_d=0.2, x_l=0.2, x_l=0.56/2, \tau_J=6 \text{ s}, \tau_{d0}=8 \text{ s}, \cos \varphi=0.8$, 无穷大母线电压 $U_s=1.0$, ASG 输出电磁功率 $P_0=1$, 原动机输出功率 $P_m=1.0$, 转子转速 $\omega_2=800 \text{ r/min}$, 初始运行功角 $\delta_{a0}=31.5^\circ$ (以上无单位的各参数均为标么值)。

仿真过程中的 3 个条件如下:

- 故障方式为一回线路首端发生三相突然短路或两相突然短路;
- 短路发生后 0.1 s 或 0.3 s 切除故障线路,不重合,系统以一回线路运行。
- 正常运行方式下,发电机初始功率 $P_0=1 \text{ p.u.}$ 。

2.2.2 一回线路首端发生三相短路

图 4 及图 5 分别给出了在系统的初始条件下, ASG 采用改进的变结构控制及常规的变结构方式,在一回线路首端发生三相短路,故障切除时间分别在 $t_c=0.1 \text{ s}, t_c=0.3 \text{ s}$ 及初始功率为 $P_0=1 \text{ p.u.}$ 时,发电机的摇摆曲线及发电机输出端功率 ΔP_e 及端电压 ΔU_t 的变化曲线。

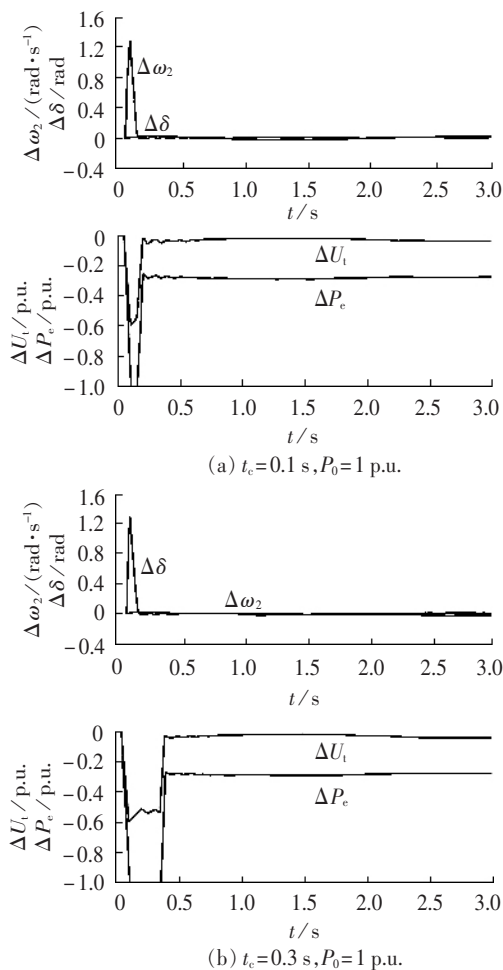


图 4 线路首端发生三相短路时,ASG 的改进变结构控制仿真结果

Fig.4 Simulative results of improved variable structure control for system with three-phase short-circuit at line upper terminal

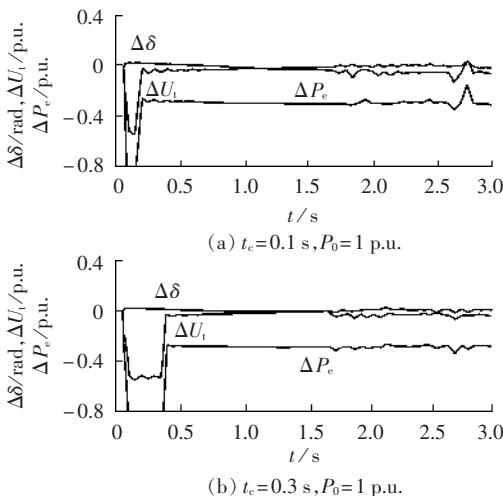


图 5 线路首端三相短路时常规变结构控制仿真结果

Fig.5 Simulative results of conventional variable structure control for system with three-phase short-circuit at line upper terminal

从图 4 中可看出,采用改进的变结构控制,转子摇摆角在故障后较短的时间内(约 1.5 s)即可进入稳定状态,且整个过程超调量小、恢复速度快,控制中未产生明显的抖振现象。

在图 5 中可看到,采用常规变结构控制所得到的动态响应曲线将产生抖振现象(与图 4 中的(a)及(b)比较)。

2.2.3 一回线路首端发生两相短路

图 6 及图 7 分别给出了 ASG 采用改进的变结构控制及常规的变结构控制方式,在一回线路首端发生两相短路,故障切除时间分别在 $t_c = 0.1$ s, $t_c = 0.3$ s 及初始功率为 $P_0 = 1$ p.u.时,发电机的摇摆曲线及发电机输出端功率 ΔP_e 和端电压 ΔU_i 的变化曲线。

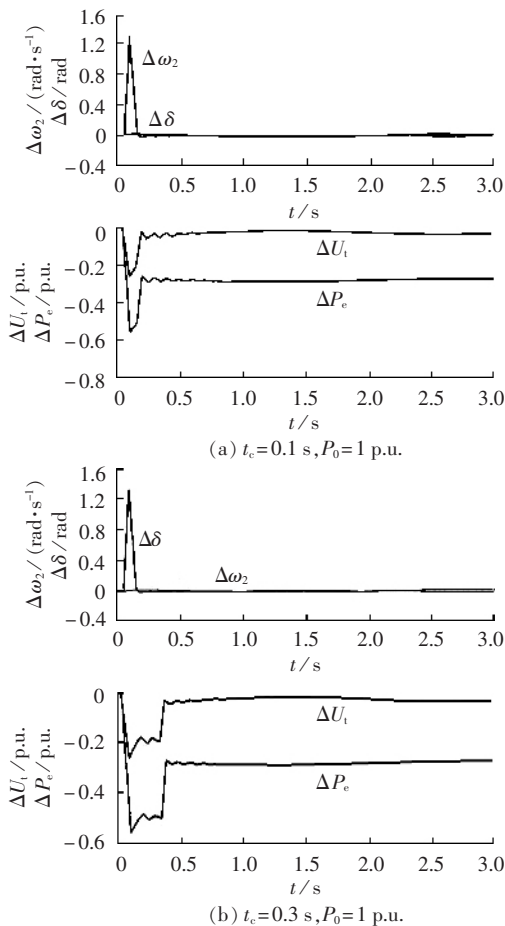
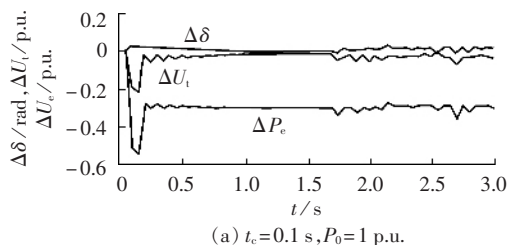


图 6 线路首端两相短路时改进变结构控制仿真结果

Fig.6 Simulative results of improved variable structure control for system with two-phase short-circuit at line upper terminal

从图 6 中可看出,采用改进的变结构控制,转子摇摆角在故障后较短的时间内(约 1.0 s)即可进入稳定状态。而且整个过程,超调量小、恢复速度快,且在控制中未产生抖振现象。

从图 7 中可看到,采用常规变结构控制结构控制所得到的动态响应曲线将产生抖振现象(与图 6 中的(a)及(b)比较)。



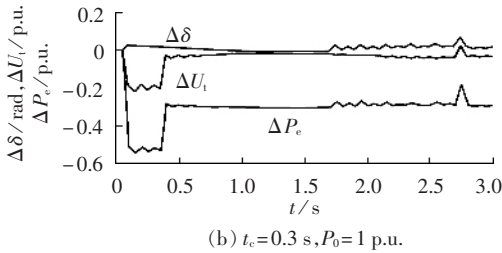


图7 线路首端两相短路时常规变结构控制仿真结果

Fig.7 Simulative results of conventional variable structure control for system with two-phase short-circuit at line upper terminal

从图4~7可看出:改进的变结构控制不但能改善系统的动态品质,而且消除控制过程中产生的抖振现象。

3 结语

从以上分析可知,变频器作为ASG的励磁机,其频率调节暂态方程也应作为ASG状态方程不可分割的一部分,用于分析ASG系统的稳定性,缺少了这一项,状态方程将不可求解。同时,为了能直接地控制转子绕组的电压从而控制发电机输出端的电压,需要建立变频器的电压调节暂态方程。

通过对ASG单机对无穷大系统的改进变结构励磁控制的计算机仿真,并与常规的变结构励磁控制比较,结果表明,改进的变结构控制方法不但能迅速减小各变量的变化值,使系统达到新的稳定状态,改善系统的动态特性,同时也能有效地消除控制过程中产生的抖振现象。

参考文献:

- [1] 何大愚. 柔性交流输电系统概念研究的进展 [J]. 电网技术, 1997, 21(2): 9-14.
HE Da-yu. On the new progress extended in the facts concept[J]. *Power System Technology*, 1997, 21(2): 9-14.

- [2] 李向荣, 赵遵廉, 杨永康. 灵活交流输电系统的研究及进展 [J]. 华中电力, 1997, 21(5): 9-13, 34.
LI Xiang-rong, ZHAO Zun-lian, YANG Yong-kang. Study and proceed on FACTS[J]. *Center China Electric Power*, 1997, 21(5): 9-13, 34.
- [3] 杨顺昌. 异步化汽轮发电机数学模型[J]. 电工技术学报, 1995, 10(2): 14-16.
YANG Shun-chang. Modelling of asynchronized turbogenerator[J]. *Journal of Electrician Technique*, 1995, 10(2): 14-16.
- [4] 肖强晖, 姚若萍, 郑逢时. 交流励磁发电机系统的稳态分析——发电机的稳态性能[J]. 电工技术学报, 1997, 12(4): 26-28.
XIAO Qiang-hui, YAO Ruo-ping, ZHENG Feng-shi. Study analysis of AC exciting generator—Steady performance of generator[J]. *Journal of Electrician Technique*, 1997, 12(4): 26-28.
- [5] 宋军英, 刘涤尘, 陈允平. 异步化同步发电机的最优励磁控制及其暂态分析研究[J]. 现代电力, 2001, 18(4): 52-57.
SONG Jun-ying, LIU Di-chen, CHEN Yun-ping. ASG's optimal excited control and its transient analysis [J]. *Modern Electric Power*, 2001, 18(4): 52-57.
- [6] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

宋军英(1969-), 女, 江西南昌人, 博士, 从事电力系统运行与控制等方面的研究工作 (E-mail: songjunying27@sohu.com);

李汉成(1972-), 男, 湖北应城人, 硕士, 从事电力系统规划等方面的工作;

刘涤尘(1953-), 男, 湖北红安人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统运行与控制及电力电子等方面的研究工作;

陈允平(1945-), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统运行与控制及电力电子等方面的研究工作。

ASG variable structure excitation control considering converter frequency and voltage adjusting

SONG Jun-ying¹, LI Han-cheng², LIU Di-chen³, CHEN Yun-ping³

(1. Hunan Electric Power Dispatching and Communication Center, Changsha 410007, China; 2. Beijing Electric Power Company, Beijing 100020, China; 3. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A transient mathematical model of ASG (Asynchronized Synchronous Generator) is established, which considers the transient process of converter frequency and voltage adjusting. An excitation control system based on improved variable structure control scheme is designed for ASG. It is simulated in a single-ASG infinite-bus system and compared with conventional control methods. Results show that the proposed control system decreases the variations of variables rapidly, improves the system dynamic performance to reach a new stable state, and effectively suppress the vibration during control.

Key words: asynchronized synchronous generator; improved variable structure control; transient stability